



جامعة مولاي إسماعيل
ተዕሊጋዊት ርዕሳኑ ዐርሳክ
UNIVERSITÉ MOULAY ISMAÏL



كلية العلوم
ተሃዲሳት ተርዕዕዲ
FACULTÉ DES SCIENCES

Parcours Électronique S6 Optoélectronique

Polycopié cours

Eloutassi Omar

2025-2026

Sommaire :

CHAPITRE 1 SEMI-CONDUCTEURS	8
1. INTRODUCTION.....	8
2. OBJECTIFS	8
3. GÉNÉRALITÉS	8
3.1. SEMICONDUCTEURS INTRINSÈQUES OU SEMICONDUCTEURS PURS :	8
3.2. SEMICONDUCTEURS EXTRINSÈQUES OU SEMI-CONDUCTEURS IMPURS :	8
3.2.1. <i>Semiconducteurs de type N</i> :	9
3.2.2. <i>Semiconducteurs de type P</i> :	9
3.2.3. <i>Transporteurs majoritaires et minoritaires</i> :	9
3.2.3.1. Porteurs de charges majoritaires :	10
3.2.3.2. Porteurs de charges minoritaires :	10
4. DOPAGE	11
4.1. DOPAGE DE TYPE N	11
4.2. DOPAGE DE TYPE P	12
5. ALLIAGES SEMICONDUCTEURS	12
5.1. ÉPITAXIE PAR JET MOLÉCULAIRE (MBE) :	13
5.2. DÉPÔT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR D'ORGANOMÉTALLIQUES (MOCVD)	13
5.3. ALLIAGE PAR RECUIT	13
6. FORMATION ET RECOMBINAISON DE PAIRES ÉLECTRONS-TROUS	14
6.1. FORMATION DE PAIRES ÉLECTRON-TROU	14
6.2. RECOMBINAISON DE PAIRES ÉLECTRON-TROU.....	14
6.2.1. <i>Durées de vie des porteurs de charges</i>	15
7. BANDES D'ÉNERGIE DANS LES SOLIDES	15
7.1. NIVEAUX D'ÉNERGIE ATOMIQUE	16
7.2. RÉSEAU CRISTALLIN ET THÉORÈME DE BLOCH	16
7.2.1. <i>Bande de valence</i>	17
7.2.2. <i>Bande conductrice</i>	18
7.2.3. <i>Bande interdite</i>	18
8. RÉSUMÉ	19
9. LEXIQUE	19
10. REFERENCES	19
11. RECOMMANDATIONS.....	19
CHAPITRE 2 : PROCÉDÉS OPTIQUES DANS LES SEMI-CONDUCTEURS.....	20
1. INTRODUCTION.....	20
1.1. ABSORPTION :	20
1.2. ÉMISSION :	20
1.3. PHOTOLUMINESCENCE	20
1.4. DIFFUSION	21

2. OBJECTIFS	22
3. ABSORPTION DANS LES SEMI-CONDUCTEURS.....	22
3.1. ÉNERGIE DE BANDE INTERDITE.....	22
3.2. ABSORPTION DES PHOTONS.....	22
3.3. TRANSFERT D'ÉNERGIE	22
3.4. FORMATION DE PAIRS ÉLECTRONS TROUS	23
3.5. COEFFICIENT D'ABSORPTION	23
3.6. MATÉRIAUX À BANDE INTERDITE INDIRECTE	23
3.7. SPECTRE D'ABSORPTION	23
4. TRANSITIONS INTRINSÈQUES INDIRECTES.....	24
4.1. TRANSITIONS DIRECTES ET INDIRECTES :	24
4.2. CONSERVATION DE L'ÉNERGIE DE L'IMPULSION.....	25
4.3. CARACTÉRISTIQUES D'ABSORPTION ET D'ÉMISSION	25
4.4. APPLICATIONS	25
5. ABSORPTION DES EXCITONS	26
6. ABSORPTION DONNEUR-ACCEPTEUR ET BANDE D'IMPURETÉ	27
6.1. ABSORPTION DONNEUR-ACCEPTEUR :.....	27
6.2. ABSORPTION DES BANDES D'IMPURETÉS	28
6.3. APPLICATIONS	28
7. EFFET DU CHAMP ÉLECTRIQUE SUR L'ABSORPTION	29
APPLICATIONS	30
8. RAYONNEMENT DANS LE SEMICONDUCTEUR (RELATION ENTRE LES SPECTRES D'ABSORPTION ET D'ÉMISSION)	30
8.1. RELATION ENTRE L'ABSORPTION ET L'ÉMISSION	31
8.2. REMARQUES	31
9. TRANSITIONS RADIOACTIVES PROCHE DE LA BANDE GAP.....	32
9.1. BANDE INTERDITE ÉNERGÉTIQUE	32
9.2. TRANSITIONS DIRECTES ET INDIRECTES	32
9.3. ABSORPTION	32
9.4. ÉMISSION	33
9.5. EFFICACITÉ RADIATIVE	33
9.6. SPECTRES OPTIQUES	33
9.7. APPLICATIONS	33
10. RÉSUMÉ	34
11. LEXIQUE	34
11. RÉFÉRENCES.....	34
12. RECOMMANDATIONS	34
CHAPITRE 3 : DÉTECTEURS OPTOÉLECTRONIQUES	35
1. INTRODUCTION.....	35
1.1. PHOTODIODES.....	35
1.2. PHOTOTRANSISTORS	35

1.3. TUBES PHOTOMULTIPLICATEURS (PMT)	35
1.4. PHOTODIODES À AVALANCHE (APD).....	35
1.4. DISPOSITIFS À COUPLAGE DE CHARGE (CCD)	35
1.5. CAPTEURS CMOS.....	35
2. OBJECTIFS	36
3. PHOTOCONDUCTEURS	36
3.1. CARACTÉRISTIQUES.....	36
3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	36
3.3. APPLICATIONS	38
3.3.1. <i>Avantages des photoconducteurs :</i>	38
3.3.2. <i>Limitations des photoconducteurs:</i>	38
4. PHOTODIODE À JONCTION.....	39
4.1. STRUCTURE.....	39
4.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	39
4.3. RESPONSIVITÉ ET EFFICACITÉ QUANTIQUE.....	40
4.4. APPLICATIONS	40
4.4.1. <i>Avantages</i>	41
5. PHOTODIODE PIN	41
5.1. STRUCTURE.....	41
5.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	42
5.3. AVANTAGES DES PHOTODIODES PIN.....	42
5.4. APPLICATIONS	42
6. DIODES À HÉTÉROJONCTION.....	43
6.1. STRUCTURE ET TYPES DE DIODES À HÉTÉROJONCTION.....	43
6.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET CARACTÉRISTIQUES AVANCÉES.....	44
6.3. APPLICATIONS	44
7. PHOTODIODES À AVALANCHE.....	45
7.1. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	45
7.2. CARACTÉRISTIQUES ET FONCTIONS AVANCÉES	46
7.3. APPLICATIONS	47
8. PHOTOTRANSISTOR	47
8.1. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	48
8.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	48
8.3. MODES DE FONCTIONNEMENT	49
8.4. CONFIGURATION DE CIRCUIT	49
8.5. TYPES DE PHOTOTRANSISTORS	50
8.6. PARAMÈTRES DE PERFORMANCE	50
8.7. CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES	51
8.8. APPLICATIONS	52
9. PHOTODIODE MÉTAL-SEMICONDUCTEUR-MÉTAL.....	52
9.1. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	52
9.2. CARACTÉRISTIQUES AVANCÉES ET AVANTAGES.....	53
9.3. APPLICATIONS	53

10. RÉSUMÉ	54
11. LEXIQUE	54
12. RÉFÉRENCES	54
13. RECOMMANDATIONS.....	55
CHAPITRE 4 : APPLICATION DE L'OPTOÉLECTRONIQUE, DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES.....	56
1. INTRODUCTION.....	56
2. OBJECTIFS	56
3. SPECTRE D'ÉNERGIE SOLAIRE	56
3.1. INTENSITÉ DU SPECTRE SOLAIRE	57
3.2. APPLICATIONS	57
4. PRINCIPES DES DISPOSITIFS	58
5. CARACTÉRISTIQUES COURANT-TENSION (I-V)	60
6. CIRCUITS ÉQUIVALENTS	62
7. EFFETS DE LA TEMPÉRATURE SUR LES DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES.....	63
8. MATÉRIAUX	65
9. EFFICACITÉS	66
10. RÉSUMÉ	69
11. LEXIQUE	69
12 RÉFÉRENCES	69
CHAPITRE 5 : DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES	70
1. INTRODUCTION.....	70
2. OBJECTIFS	70
3. FONCTIONNEMENT DES LEDS ÉLECTROLUMINESCENCE	71
4. CARACTÉRISTIQUES DES DISPOSITIFS LED	72
4.1. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES.....	72
4.2 CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES.....	73
5. STRUCTURE DES LEDS	74
5.1 STRUCTURE DES LED HOMOJONCTION ET HÉTÉROJONCTION	74
5.2 LED ÉMETTANT EN SURFACE.....	75
5.2.1. <i>Propriétés de la LED émettant en surface</i>	75
5.3 STRUCTURE DE LA LED ÉMETTANT SUR LE BORD	76
5.3.1. <i>Propriétés de la LED émettant sur le bord</i>	76
6. MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LES LEDS	76
7. PUISSANCE ET EFFICACITÉ DES LEDS.....	77
7.1. PUISSANCE LUMINEUSE DES LED	77
7.2. EFFICACITÉ LUMINEUSE DES LED	78
7.3. EFFICACITÉ DES LED ET EFFICACITÉ DES LAMPES	78

7.4. ÉCLAIRAGE LED ET FACTEUR DE PUISSANCE	78
8. SPÉCIFICATIONS DES LEDS	79
8.1. SPÉCIFICATIONS ÉLECTRIQUES	79
8.2. SPÉCIFICATIONS OPTIQUES	80
9. APPLICATIONS DES LEDS	81
9.1. LED COMME INDICATEUR	81
9.2. LED COMME SOURCE OPTIQUE :	81
9.3. LED COMME AMPOULE :	82
10. RÉSUMÉ	82
11. LEXIQUE	83
12. RÉFÉRENCES.....	83
13. RECOMMANDATION	83
CHAPITRE 6 : DIODE LASER	85
1. INTRODUCTION.....	85
2. OBJECTIF	85
3. DIODE LASER.....	85
3.1. GÉNÉRALITÉS.....	86
4. POMPAGE ÉLECTRIQUE ET OPTIQUE	86
5. GÉNÉRATION D'ÉMISSION SPONTANÉE	87
6. SEMICONDUCTEURS À BANDE DIRECTE ET INDIRECTE	87
7. CAVITÉ OPTIQUE ET MODES LASER	88
8. FORMATION DU FAISCEAU LASER	89
9. CARACTÉRISTIQUES	89
9.1. LASERS À DOUBLE HÉTÉROSTRUCTURE	89
9.2. LASERS À Puits QUANTIQUES.....	90
9.3. LASERS À CASCADE QUANTIQUE.....	90
9.4. LASERS À HÉTÉROSTRUCTURE DE CONFINEMENT SÉPARÉ.....	90
9.5. LASERS À RÉFLECTEUR BRAGG DISTRIBUÉ.....	91
9.6. LASERS À RÉTROACTION DISTRIBUÉE	91
9.7. LASER ÉMETTANT EN SURFACE À CAVITÉ VERTICALE	92
9.8. LASER ÉMETTANT EN SURFACE À CAVITÉ EXTERNE VERTICALE	92
9.9. LASERS À DIODE À CAVITÉ EXTERNE	93
10. FIABILITÉ	93
11. APPLICATIONS.....	95
11.1. TÉLÉCOMMUNICATIONS, IMAGERIE ET SPECTROMÉTRIE.....	95
11.2. UTILISATIONS MÉDICALES.....	95
11.3. PHOTOLITHOGRAPHIE SANS MASQUE	96
12. ÉQUATIONS DE TAUX DES DIODES LASER.....	96
12.1. ÉQUATIONS DE TAUX MULTIMODES.....	97
12.2. PROBLÈMES ET SOLUTIONS	99

13. RÉSUMÉ	99
14. LEXIQUE	99
15. RÉFÉRENCES	100
16. RECOMMANDATIONS	100
CHAPITRE 7 : FIBRE OPTIQUE	101
1. INTRODUCTION.....	101
2. OBJECTIF	101
3. FIBRE OPTIQUE	102
4. UTILISATIONS.....	103
4.1. COMMUNICATION	103
4.2. CAPTEURS.....	103
4.3. TRANSMISSION D'ÉNERGIE	104
4.4. AUTRES UTILISATIONS	104
5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	105
5.1. INDICE DE RÉFRACTION	106
5.2. RÉFLEXION TOTALE INTERNE	106
5.3. FIBRE MULTIMODE	107
5.4. FIBRE MONOMODE	107
5.5. FIBRES À USAGE SPÉCIAL	108
6. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION.....	108
7. DIFFUSION DE LA LUMIÈRE	109
8 ABSORPTION UV-VIS-IR.....	110
9 OUVERTURE NUMÉRIQUE	110
9.1. OPTIQUE GÉNÉRALE	111
9.2. PHYSIQUE LASER	112
10. ÉLARGISSEMENT DES IMPULSIONS DANS LES FIBRES OPTIQUES	113
11. AVANTAGES DES FIBRES OPTIQUES.....	115
12. INCONVÉNIENTS DES FIBRES OPTIQUES	115
13. RÉSUMÉ	116
14. LEXIQUE	116
15. RÉFÉRENCES.....	117
16. RECOMMANDATIONS	117

Chapitre 1 Semi-conducteurs

1. Introduction

Les semi-conducteurs (exemple le Germanium et le Silicium) sont des matériaux dont les caractéristiques électriques se situent entre celles des conducteurs et des isolants. En termes de bandes d'énergie, les semi-conducteurs sont des matériaux présentant un gap énergétique très faible de l'ordre 1eV , séparant leurs deux bandes d'énergie et une bande de conduction presque vide et une bande de valence presque remplie.

2. Objectifs

Les objectifs de ce chapitre sont :

- Définir les semiconducteurs
- Expliquer le type de semi-conducteurs
- Définir les alliages semi-conducteurs
- Expliquer la formation et la recombinaison des paires électron-trou
- Expliquer les bandes d'énergie dans les solides

3. Généralités

Les semi-conducteurs peuvent être classés comme le montre la figure 1 :

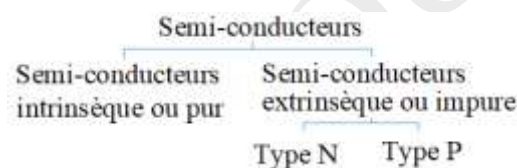


Figure 1 : Type de semiconducteurs

3.1. Semiconducteurs intrinsèques ou semiconducteurs purs :

Un semiconducteur entièrement constitué de matériau semi-conducteur est appelé semi-conducteur intrinsèque ou pur. Exemples : Germanium pur (Ge) et silicium (Si), qui présentent des écarts énergétiques interdits de $0,72\text{eV}$ et de $1,1\text{eV}$, respectivement. Il existe de nombreux électrons avec suffisamment d'énergie pour franchir le petit écart énergétique entre les bandes de valence et de conduction, même à température ambiante, car l'écart énergétique est très petit. Les semi-conducteurs pur possèdent le même nombre de trous et d'électrons de conduction. Le diagramme de la bande d'énergie schématique d'un semi-conducteur intrinsèque à température ambiante est donné dans la figure 2.

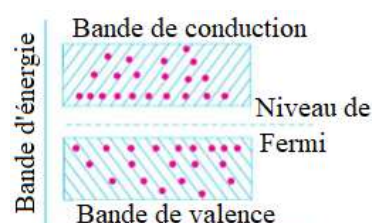


Figure. 2. Diagramme de bande d'énergie

3.2. Semiconducteurs extrinsèques ou semi-conducteurs impurs :

Les semi-conducteurs extrinsèques, également appelés semi-conducteurs à impuretés, sont des semi-conducteurs intrinsèques auxquels de très petites quantités (environ 1 partie sur 108) d'une impureté, d'un agent dopant ou d'un dopant ont été ajoutées. Selon le matériau dopant utilisé, les semi-conducteurs extrinsèques peuvent être divisés en deux catégories :

- Semi-conducteurs de type N
- Semi-conducteurs de type P

3.2.1. Semiconducteurs de type N :

Les semi-conducteurs extrinsèques de type N sont fabriqués en ajoutant une substance pentavalente comme l'antimoine (Sb) à du germanium pur ou à un cristal de silicium. Chaque atome d'antimoine utilise quatre de ses cinq électrons pour établir des liaisons covalentes avec les quatre atomes de germanium qui l'entourent, comme montre la figure 3. L'atome d'antimoine n'est que faiblement connecté au cinquième électron, ce qui n'est pas nécessaire. Par conséquent, en appliquant un champ électrique ou en augmentant l'énergie thermique, il peut être facilement stimulé de la bande de valence à la bande de conduction. Comme le montre l'explication ci-dessus, les trous constituent la minorité des porteurs dans les semi-conducteurs de type N alors que les électrons sont majoritaires.

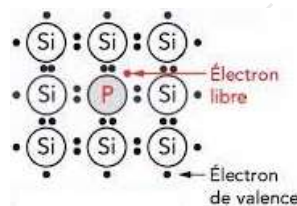


Figure 3 : Semiconducteurs de type N

3.2.2. Semiconducteurs de type P :

Lorsque des atomes d'un élément trivalent, tel que le bore (B), sont ajoutés à un cristal de germanium pur, un semi-conducteur de type p se forme. Dans ce cas, les trois électrons de valence de l'atome de bore établissent des liaisons covalentes avec quatre des atomes de germanium à proximité, mais il ne reste qu'un seul électron vacant (trou). En conséquence, le bore, une impureté dite acceptative, crée un semiconducteur extrinsèque de type P (P pour positif) sous la forme d'autant de trous positifs dans un cristal de germanium qu'il y a d'atomes de bore. La conduction dans ce type de semi-conducteur résulte du mouvement des trous dans la bande de valence. La figure 4. Illustre la formation d'un trou lorsqu'une liaison reste inachevée.

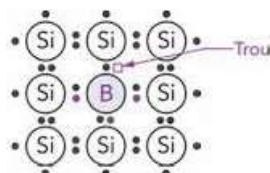


Figure 4 : Semiconducteurs de type P

3.2.3. Transporteurs majoritaires et minoritaires :

À 0K, il n'existe aucun porteur de charge gratuit disponible dans un morceau de germanium ou de silicium pur. Cependant, une fois que la température atteint la température ambiante,

certaines liaisons covalentes sont rompues par l'énergie thermique, ce qui conduit à la formation de paires électron-trou. On les appelle porteurs de charge générés thermiquement. Ils sont également connus sous le nom de porteurs de charge intrinsèquement disponibles. Ils n'ont généralement pas beaucoup de numéros.

3.2.3.1. Porteurs de charges majoritaires :

Les porteurs de charge majoritaires sont le type prédominant de porteurs de charge dans un matériau semi-conducteur. Ils sont chargés de transporter la majeure partie du courant électrique à travers le matériau. Le type de porteurs de charge majoritaires dans un semi-conducteur dépend du dopage du matériau, qui implique l'ajout intentionnel d'impuretés pour modifier ses propriétés électriques. Il existe deux principaux types de porteurs de charges majoritaires :

- Dans les semi-conducteurs de type N, les porteurs de charge majoritaires sont des électrons. Ceci est obtenu en dopant le matériau semi-conducteur avec des éléments du groupe V du tableau périodique, comme le phosphore ou l'arsenic. Ces éléments possèdent cinq électrons de valence, un de plus que celui requis pour la liaison dans la structure cristalline semi-conductrice. L'électron supplémentaire devient un porteur de charge mobile et est responsable de la conduction du courant électrique.

- Dans les semi-conducteurs de type P, les porteurs de charge majoritaires sont des trous. Ceci est obtenu en dopant le matériau semi-conducteur avec des éléments du groupe III du tableau périodique, comme le bore ou le gallium. Ces éléments possèdent trois électrons de valence, soit un de moins que celui requis pour la liaison dans la structure cristalline semi-conductrice. L'absence d'un électron crée un « trou » dans le réseau cristallin, qui se comporte comme un porteur mobile chargé positivement et contribue au courant électrique.

3.2.3.2. Porteurs de charges minoritaires :

Les porteurs de charge minoritaires sont le type de porteurs de charge le moins abondant dans un matériau semi-conducteur. Ils sont présents en raison de processus d'excitation thermique ou de génération-recombinaison, mais contribuent généralement moins au courant électrique global que les porteurs de charge majoritaires. Le type de porteurs de charge minoritaires est opposé aux porteurs de charge majoritaires dans le semi-conducteur :

- Dans les semi-conducteurs de type N, les porteurs de charge minoritaires sont des trous. Ces trous sont générés lorsque l'énergie thermique (température) excite les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant derrière eux des trous chargés positivement.

- Dans les semi-conducteurs de type P, les porteurs de charge minoritaires sont des électrons. Ces électrons sont générés par une excitation thermique, provoquant la rupture de certaines des liaisons covalentes entre les atomes dopants et le réseau semi-conducteur, libérant ainsi des électrons libres.

Le comportement des porteurs de charge minoritaires et majoritaires est essentiel pour comprendre le fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs. Dans des dispositifs tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés, la manipulation des porteurs minoritaires et

majoritaires permet un contrôle précis du flux de courant électrique, conduisant aux fonctionnalités électroniques souhaitées.

4. Dopage

Le dopage des semi-conducteurs est un processus consistant à introduire intentionnellement des impuretés dans un matériau semi-conducteur pour modifier ses propriétés électriques. Le terme « dopage » fait référence à l'ajout de ces impuretés, qui sont généralement des atomes différents, au réseau cristallin semi-conducteur. Le dopage est une technique fondamentale dans la fabrication de dispositifs semi-conducteurs et est essentiel à la création de divers composants électroniques tels que des diodes, des transistors et des circuits intégrés.

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des conducteurs (tels que les métaux) et celle des isolants (tels que la céramique). Les semi-conducteurs purs, appelés semi-conducteurs intrinsèques, possèdent un réseau cristallin composé d'atomes d'un seul élément, comme le silicium (Si) ou le germanium (Ge). Dans leur forme pure, ces semi-conducteurs ont un nombre équilibré d'électrons et de trous chargés positivement, ce qui donne un nombre presque égal d'électrons chargés négativement et de trous chargés positivement, ce qui en fait de mauvais conducteurs d'électricité.

Pour améliorer la conductivité électrique et adapter les propriétés des semi-conducteurs à des applications spécifiques, des quantités contrôlées d'impuretés sont introduites via le processus de dopage.

Les dopants sont les impuretés ajoutées aux semi-conducteurs intrinsèques. La diffusion est le mouvement net de molécules d'une concentration plus élevée vers une concentration plus faible. Il existe trois manières d'ajouter des dopants à un réseau de silicium.

- Diffusion dans les espaces vides : Dans cette technique, des dopants sont utilisés pour remplir les espaces entre les réseaux cristallins.
- Diffusion sur le réseau interne : Dans cette technique, les atomes dopants se déplacent entre le réseau du matériau semi-conducteur.
- Changement de place : Cette technique est appliquée lorsque le réseau contient des atomes d'impuretés. Le réseau cristallin provoque le déplacement de ces atomes.

Il existe deux types courants de dopage : voir figure 5.

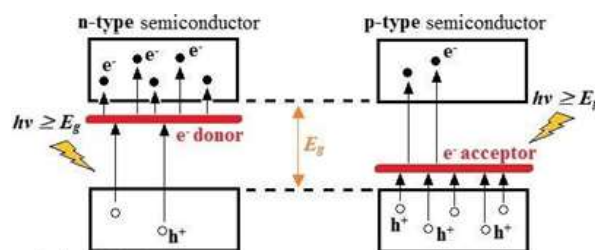


Figure 5 : Illustration du dopage de type n et de type p dans un semi-conducteur

4.1. Dopage de type N

Dans ce type de dopage, des impuretés contenant plus d'électrons de valence que l'atome semi-conducteur sont ajoutées au réseau cristallin. Ces impuretés sont appelées impuretés donneuses. Les impuretés donneuses les plus couramment utilisées dans le silicium sont le

phosphore (P), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb). Lorsque ces impuretés sont ajoutées au réseau semi-conducteur, elles introduisent des électrons supplémentaires dans le matériau, conduisant à un excès de porteurs chargés négativement. Les électrons ajoutés sont libres de se déplacer dans le réseau, augmentant ainsi la conductivité du matériau. En conséquence, le semi-conducteur dopé devient un semi-conducteur de type N, où « N » représente l'excès de porteurs chargés négativement.

4.2. Dopage de type P

Dans ce type de dopage, des impuretés contenant moins d'électrons de valence que l'atome semi-conducteur sont ajoutées au réseau cristallin. Ces impuretés sont appelées impuretés accepteurs. Les impuretés accepteurs les plus couramment utilisées dans le silicium sont le bore (B), l'aluminium (Al) et le gallium (Ga). Lorsque ces impuretés sont ajoutées au réseau semi-conducteur, elles créent des « trous » dans la structure électronique du matériau. Ces trous agissent comme porteurs de charges positives. En conséquence, le semi-conducteur dopé devient un semi-conducteur de type P, où « P » représente l'excès de porteurs chargés positivement.

L'introduction de ces impuretés et des porteurs en excès qui en résultent modifie de manière significative le comportement électrique du matériau semi-conducteur. En dopant sélectivement différentes régions d'un semi-conducteur, des dispositifs électroniques complexes tels que des diodes et des transistors peuvent être créés. Ces dispositifs exploitent les différentes propriétés électriques des semi-conducteurs de type N et de type P pour obtenir les fonctionnalités souhaitées, telles que la rectification, l'amplification et la commutation.

Le processus de dopage est généralement effectué lors de la fabrication de dispositifs semi-conducteurs. Cela implique des techniques telles que la diffusion ou l'implantation ionique, où des atomes d'impuretés sont introduits dans le réseau cristallin à des concentrations et des profondeurs contrôlées. La concentration et la distribution spécifiques du dopage sont soigneusement contrôlées pour obtenir les caractéristiques électriques souhaitées du dispositif final.

En résumé, le dopage est un processus crucial dans la technologie des semi-conducteurs qui permet la modification contrôlée des propriétés électriques des semi-conducteurs. En ajoutant sélectivement des impuretés à un matériau semi-conducteur pur, la conductivité et les types de porteurs peuvent être manipulés, permettant ainsi la création de divers dispositifs électroniques utilisés dans la technologie moderne.

5. Alliages semiconducteurs

Les semi-conducteurs en alliage sont une classe de matériaux qui combinent deux ou plusieurs éléments de différents groupes du tableau périodique pour former un semi-conducteur composé. Ces matériaux offrent des propriétés et des avantages uniques par rapport aux semi-conducteurs à élément unique comme le silicium ou le germanium.

Dans les semi-conducteurs en alliage, la combinaison d'éléments entraîne une modification de la structure de la bande électronique, ce qui affecte les propriétés électriques et optiques du matériau. En ajustant la composition de l'alliage, il est possible d'adapter la bande interdite, la mobilité du porteur et d'autres paramètres clés pour répondre aux exigences spécifiques du

dispositif. Cette polyvalence rend les semi-conducteurs en alliage parfaitement adaptés à un large éventail d'applications, notamment l'optoélectronique, le photovoltaïque et les dispositifs haute fréquence.

L'alliage semi-conducteur le plus couramment étudié et utilisé est celui des composés semi-conducteurs III-V, qui combinent des éléments du groupe III (tels que l'aluminium, le gallium et l'indium) et du groupe V (tels que l'azote, le phosphore, l'arsenic et l'antimoine) du tableau périodique. Des exemples de semi-conducteurs en alliage III-V comprennent l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium (InP) et l'arséniure d'aluminium et de gallium (AlGaAs). L'alliage dans les semiconducteurs peut être réalisé par plusieurs méthodes, notamment :

5.1. Épitaxie par jet moléculaire (MBE) :

Cette méthode implique la croissance de films minces d'alliage semi-conducteur sur un substrat. Différentes sources d'éléments sont utilisées dans une chambre à vide poussé et un flux d'atomes contrôlé avec précision est dirigé vers le substrat pour former la composition d'alliage souhaitée.

5.2. Dépôt chimique en phase vapeur d'organométalliques (MOCVD)

Le MOCVD est une autre technique commune pour obtenir des semiconducteurs en alliage. Dans ce procédé, les précurseurs organométalliques contenant les éléments souhaités sont vaporisés puis décomposés sur la surface du substrat pour former le composé d'alliage.

5.3. Alliage par recuit

Dans certains cas, les semi-conducteurs en alliage peuvent être formés par recuit d'un mélange de différentes couches élémentaires. Le traitement thermique permet aux atomes de diffuser et de se mélanger, formant ainsi la composition d'alliage souhaitée.

Les avantages des semi-conducteurs en alliage comprennent :

- Bande interdite accordable : la bande interdite d'un semi-conducteur détermine sa capacité à absorber et à émettre de la lumière. L'alliage permet un contrôle précis de la bande interdite en ajustant la composition de l'alliage. Cette propriété est cruciale pour concevoir des dispositifs fonctionnant dans des régions spécifiques du spectre électromagnétique.
- Mobilité améliorée des porteurs : les semi-conducteurs en alliage peuvent présenter une mobilité des porteurs plus élevée que les semi-conducteurs à élément unique. Cette caractéristique est bénéfique pour les appareils électroniques hautes fréquence et haute vitesse.
- Compatibilité avec la technologie existante : les semi-conducteurs en alliage peuvent être intégrés aux technologies de semi-conducteurs existantes, telles que le silicium, pour tirer parti de leurs propriétés uniques. Cette compatibilité permet le développement de dispositifs avancés combinant les meilleures caractéristiques de différents matériaux.
- Constantes de réseau sur mesure : La constante de réseau est la distance entre les atomes dans un réseau cristallin. L'alliage permet d'ajuster la constante de réseau, ce qui est essentiel pour la conception de dispositifs à hétérostructure et la minimisation des défauts aux interfaces de matériaux.

➤ Large gamme d'applications : les semi-conducteurs en alliage trouvent des applications dans divers domaines, notamment les diodes électroluminescentes (DEL), les diodes laser, les cellules solaires, les transistors à grande vitesse et les capteurs.

Dans l'ensemble, les semi-conducteurs en alliage offrent une plate-forme polyvalente pour la conception et la fabrication de dispositifs électroniques et optoélectroniques avancés. En combinant différents éléments dans le réseau cristallin, les propriétés de ces matériaux peuvent être finement ajustées pour répondre aux exigences d'applications spécifiques, ouvrant ainsi la voie aux progrès technologiques dans diverses industries.

6. Formation et recombinaison de paires électrons-trous

Dans les semi-conducteurs, la formation et la recombinaison de paires électron-trou jouent un rôle crucial dans leur comportement électrique. Lorsqu'un semi-conducteur est soumis à une énergie externe, telle qu'une énergie thermique ou un rayonnement électromagnétique, des paires électron-trou peuvent être générées, entraînant des modifications de la conductivité et des propriétés optiques du matériau. Examinons le processus de formation et de recombinaison des paires électron-trou :

6.1. Formation de paires électron-trou

Lorsqu'une énergie suffisante est fournie à un semi-conducteur, il peut promouvoir un électron de la bande de valence à la bande de conduction, laissant derrière lui une lacune appelée trou dans la bande de valence. Ce processus peut se produire à travers différents mécanismes :

➤ Absorption des photons: lorsqu'un photon dont l'énergie est égale ou supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur frappe le matériau, il peut être absorbé par un électron dans la bande de valence, l'excitant vers la bande de conduction et créant une paire électron-trou.

➤ Excitation thermique: à des températures finies, certains électrons de la bande de valence peuvent gagner suffisamment d'énergie thermique pour surmonter la bande interdite et se déplacer vers la bande de conduction, laissant derrière eux un trou.

Une fois qu'une paire électron-trou est générée, l'électron occupe un état énergétique dans la bande de conduction, tandis que le trou occupe un état énergétique dans la bande de valence. Ces porteurs de charge sont désormais libres de se déplacer au sein du réseau semi-conducteur.

6.2. Recombinaison de paires électron-trou

La recombinaison électron-trou se produit lorsqu'un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la bande de valence, entraînant l'annihilation de l'électron et du trou. Ce processus peut se dérouler à travers différents mécanismes, voir figure 6 :

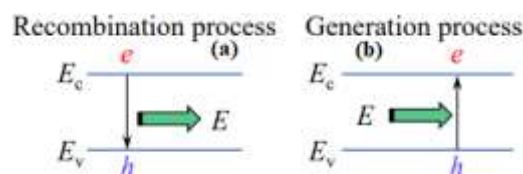


Figure 6 : Processus de génération/recombinaison directe.

➤ **Recombinaison radiative** : Lors de la recombinaison radiative, l'électron et le trou se recombinent, libérant de l'énergie sous forme de photon. Cette énergie se présente généralement sous forme de lumière visible ou infrarouge, en fonction de l'énergie de bande interdite du semi-conducteur. La recombinaison radiative est un processus souhaitable pour les dispositifs électroluminescents tels que les LED et les lasers.

➤ **Recombinaison non radiative** : La recombinaison non radiative implique l'annihilation des trous électroniques sans émission de photons. Au lieu de cela, l'énergie excédentaire est transférée aux vibrations du réseau (phonons), aux défauts ou aux impuretés présentes dans le matériau. La recombinaison non radiative réduit l'efficacité des appareils et contribue à la perte d'énergie.

➤ **Recombinaison Auger** : la recombinaison Auger se produit dans des semi-conducteurs hautement dopés ou à des densités de porteurs élevées. Dans ce processus, l'énergie de recombinaison est transférée à un autre porteur, plutôt que d'être émise sous forme de photon. L'énergie de l'électron ou du trou recombiné est transférée à un troisième porteur, conduisant à son excitation et à la recombinaison ultérieure de la paire électron-trou d'origine.

Le taux de recombinaison des paires électron-trou dépend de divers facteurs, notamment les propriétés du matériau, la température, la concentration de dopage et la présence de défauts. Minimiser la recombinaison non radiative et améliorer la recombinaison radiative sont importants pour améliorer les performances des dispositifs semi-conducteurs.

Au cours de la recombinaison assistée par photons, un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie excédentaire est transférée à un photon. Le processus inverse obtient son énergie du rayonnement et génère une paire électron-trou.

6.2.1. Durées de vie des porteurs de charges

La durée de vie des porteurs de charge (électrons et trous) dans un semi-conducteur détermine la durée pendant laquelle ils restent libres avant de se recombiner. Des durées de vie plus longues des porteurs améliorent la conductivité et permettent aux porteurs de participer aux opérations des appareils sur une période plus longue.

La durée de vie des supports peut être influencée par divers facteurs, tels que la pureté des matériaux, les niveaux de dopage, la température et les défauts. Des techniques telles que la passivation et l'ingénierie des matériaux sont utilisées pour prolonger la durée de vie des porteurs et réduire les taux de recombinaison, améliorant ainsi les performances globales des dispositifs semi-conducteurs.

En résumé, la formation de paires électron-trou se produit lorsque de l'énergie est fournie à un semi-conducteur, provoquant la transition des électrons de la bande de valence à la bande de conduction et créant des trous dans la bande de valence. La recombinaison, en revanche, est l'annihilation

7. Bandes d'énergie dans les solides

Les bandes d'énergie dans les solides jouent un rôle crucial dans la détermination des propriétés électroniques et du comportement des matériaux. Un solide peut être considéré

comme un grand nombre d'atomes ou d'ions disposés dans un réseau cristallin régulier et périodique. Lorsque ces atomes se réunissent pour former un solide, les fonctions d'onde électroniques des atomes individuels interagissent, conduisant à la formation de bandes d'énergie. Examinons le concept de bandes d'énergie dans les solides :

7.1. Niveaux d'énergie atomique

Dans un atome isolé, les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets ou orbitales autour du noyau atomique. Ces niveaux d'énergie sont déterminés par la configuration électronique de l'atome et sont caractérisés par des valeurs d'énergie quantifiées. Le niveau d'énergie le plus bas est l'état fondamental, tandis que les niveaux d'énergie plus élevés sont les états excités.

7.2. Réseau cristallin et théorème de Bloch

Dans un solide, les atomes sont disposés dans un réseau cristallin, formant une structure périodique. Le théorème de Bloch stipule que dans un potentiel périodique, la fonction d'onde électronique peut être représentée comme le produit d'une onde plane et d'une fonction périodique décrivant l'arrangement atomique. Cela nous permet de décrire les états électroniques dans un solide en termes de fonctions de Bloch, qui sont une combinaison d'ondes planes et de fonctions périodiques.

➤ Formation de bandes d'énergie : lorsque les atomes se réunissent pour former un solide, les fonctions d'onde des électrons se chevauchent, conduisant à des interactions entre les électrons. Ces interactions provoquent la division et l'élargissement des niveaux d'énergie des atomes isolés en bandes d'états énergétiques autorisés. La division des niveaux d'énergie se produit en raison de l'interférence constructive ou destructrice des fonctions d'onde électroniques.

➤ Bande de Valence et bande de conduction : Les bandes d'énergie dans les solides sont généralement classées en deux bandes principales : la bande de valence et la bande de conduction.

➤ Bande de Valence : La bande de valence est la bande d'énergie inférieure dans la structure électronique d'un solide. Il s'agit des niveaux d'énergie remplis d'électrons à température nulle absolue. Les électrons de la bande de valence sont impliqués dans des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes voisins et ne sont pas disponibles pour la conduction électrique dans des conditions normales.

➤ Bande de conduction : La bande de conduction est la bande d'énergie la plus élevée dans la structure électronique d'un solide. Il s'agit de niveaux d'énergie situés au-dessus de la bande de valence où les électrons peuvent se déplacer librement dans le réseau cristallin. Les électrons de la bande de conduction ne sont pas fortement liés à des atomes spécifiques et peuvent contribuer à la conduction électrique et à la mobilité au sein du matériau.

➤ Bande interdite : La différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction est connue sous le nom de bande interdite. Il détermine les propriétés électriques et optiques du matériau. Les semi-conducteurs se caractérisent par une bande interdite modérée, ce qui permet leur conductivité intermédiaire par rapport aux conducteurs et aux isolants.

➤ Isolateurs : les isolants ont une grande bande interdite et, à température nulle absolue, la bande de valence est complètement remplie d'électrons et la bande de conduction est complètement vide. Par conséquent, les isolants ont une conductivité électrique négligeable.

➤ Semi-conducteurs : les semi-conducteurs ont une bande interdite plus petite que les isolants et, à température nulle absolue, la bande de valence est en grande partie remplie, mais la bande de conduction est vide. En appliquant une énergie externe, telle que l'énergie thermique ou l'absorption de photons, les électrons peuvent être promus de la bande de valence à la bande de conduction, conduisant ainsi à une conductivité accrue.

➤ Conducteurs : les conducteurs ont des bandes de valence et de conduction qui se chevauchent, ce qui signifie que les électrons peuvent se déplacer librement entre les deux bandes. Ce chevauchement permet une conductivité électrique élevée dans les conducteurs.

Structure des bandes et densité des états : Les bandes d'énergie dans les solides ne sont pas continus mais plutôt composées d'un grand nombre de niveaux d'énergie rapprochés. La densité d'états (DOS) représente le nombre de niveaux d'énergie par unité de plage d'énergie disponibles pour les électrons dans une énergie donnée.

Dans les solides, y compris les semi-conducteurs, la structure électronique est souvent décrite en termes de bandes d'énergie. Les bandes d'énergie représentent les niveaux d'énergie autorisés pour les électrons dans un réseau cristallin. Les deux bandes principales des solides sont la bande de valence et la bande de conduction, et leurs propriétés jouent un rôle crucial dans la détermination du comportement électrique des semi-conducteurs. Explorons ces groupes en détail : voir figure 7 :

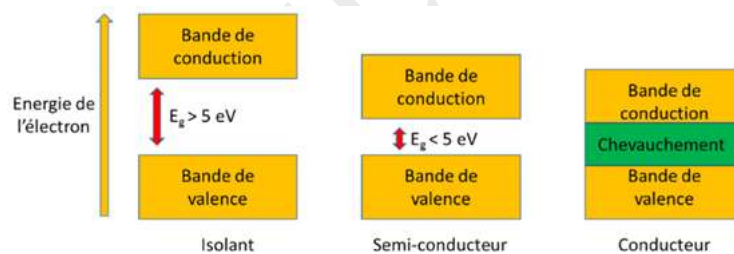


Figure 7 : structure de bande électronique

7.2.1. Bande de valence

La bande de valence est la bande d'énergie inférieure dans la structure électronique d'un solide. Il représente les niveaux d'énergie les plus élevés occupés par les électrons à température nulle absolue. Les électrons de la bande de valence sont fortement liés à leurs atomes respectifs et participent à des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes voisins. La bande de valence est responsable de la stabilité du matériau et de ses propriétés isolantes ou conductrices.

Dans les semi-conducteurs, la bande de valence est généralement remplie d'électrons, formant une couche d'électrons de valence autour des noyaux atomiques. Ces électrons sont étroitement liés aux noyaux atomiques et ne sont pas disponibles pour la conduction électrique dans des conditions normales. La bande de valence joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés chimiques et des caractéristiques de liaison du matériau semi-conducteur.

7.2.2. Bande conductrice

La bande de conduction est la bande d'énergie la plus élevée dans la structure électronique d'un solide. Il représente les niveaux d'énergie au-dessus de la bande de valence où les électrons peuvent se déplacer librement dans le réseau cristallin. Les électrons dans la bande de conduction ne sont pas fortement liés à des noyaux atomiques spécifiques et sont relativement libres de se déplacer sous l'influence d'un champ électrique.

Dans les semi-conducteurs, la bande de conduction est généralement vide ou partiellement remplie d'électrons à température nulle absolue. Pour promouvoir les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, une source d'énergie externe, telle que l'énergie thermique ou l'absorption de photons, est nécessaire. Une fois dans la bande de conduction, les électrons peuvent contribuer à la conduction électrique et à la mobilité au sein du matériau. La différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction est connue sous le nom d'énergie de bande interdite (E_g) et détermine les propriétés électriques du semi-conducteur.

7.2.3. Bande interdite

La bande interdite est la différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. Il détermine les caractéristiques de conductivité d'un matériau semi-conducteur. Les semi-conducteurs sont classés en deux catégories en fonction de leur énergie de bande interdite :

Bande interdite directe : dans les matériaux avec une bande interdite directe, le niveau d'énergie minimum de la bande de conduction se produit au même moment (vecteur k) que le niveau d'énergie maximum de la bande de valence. Les matériaux à bande interdite directe absorbent et émettent efficacement des photons, ce qui les rend adaptés aux applications optoélectroniques telles que les LED et les lasers.

Bande interdite indirecte : dans les matériaux dotés d'une bande interdite indirecte, le niveau d'énergie minimum de la bande de conduction se produit à un moment différent du niveau d'énergie maximum de la bande de valence. Les matériaux à bande interdite indirecte ont une efficacité moindre en termes d'émission et d'absorption de la lumière par rapport aux matériaux à bande interdite directe.

L'énergie de la bande interdite détermine l'énergie nécessaire aux électrons pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les semi-conducteurs avec des bandes interdites plus petites (par exemple, moins de 1,5 eV) sont considérés comme des matériaux à bande interdite étroite, tandis que ceux avec des bandes interdites plus grandes (par exemple, supérieures à 1,5 eV) sont classés comme des matériaux à large bande interdite.

En résumé, les bandes d'énergie dans les semi-conducteurs comprennent la bande de valence, où les électrons sont étroitement liés aux atomes, et la bande de conduction, où les électrons peuvent se déplacer librement dans le réseau cristallin. L'énergie de la bande interdite entre ces deux bandes détermine la conductivité électrique et les propriétés optiques du semi-conducteur. Comprendre le comportement et les caractéristiques de ces bandes est

fondamental pour comprendre la structure électronique et le comportement des semi-conducteurs.

8. Résumé

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les semi-conducteurs et les types de semi-conducteurs. Nous avons également discuté du dopage des semi-conducteurs intrinsèques pour en faire des semi-conducteurs extrinsèques. Les semi-conducteurs en alliage sont discutés en détail. La formation et la recombinaison de paires électron-trou sont expliquées. Les bandes d'énergie dans les solides sont également discutées.

9. Lexique

Dopage : Introduire intentionnellement des impuretés dans un semi-conducteur extrêmement pur pour modifier ses propriétés électriques.

Alliage : Une substance formée de la combinaison de deux ou plusieurs métaux, parfois incluant des éléments non métalliques.

Extrinsèque : Se dit d'une propriété ou d'un facteur qui provient de l'extérieur d'un système ou d'une chose.

Intrinsèque : Se dit d'une propriété qui appartient à une chose par sa nature même, indépendante de toute influence externe.

Trou : Une absence d'électron dans un semi-conducteur, agissant comme une charge positive.

10. References

1. S.M. Sze, Semiconductor Devices - Physics and Technology, Wiley, New York.
2. J. Singh, Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology, McGraw Hill.
3. P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Pearson Education,
4. J. Singh, Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices, Tata McGraw Hill.
5. Holger T. Grahn, Introduction to Semiconductor Physics, World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
6. S.M. Sze and Kwok K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons.
7. Simon M. Sze and Ming-Kwei Lee, Semiconductor Devices: Physics and Technology, Wiley, New York.
8. Otfried Madelung, Semiconductors: Basic Data, Springer.
9. Donald A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, McGraw Hill.

11. Recommendations

1. S.M. Sze, Semiconductor Devices - Physics and Technology, Wiley, New York.
2. J. Singh, Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology, McGraw Hill.
3. P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Pearson Education,
4. J. Singh, Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices, Tata McGraw Hill.

Chapitre 2 : Procédés optiques dans les semi-conducteurs

1. Introduction

Les processus optiques dans les semi-conducteurs font référence à l'interaction entre les matériaux semi-conducteurs et le rayonnement électromagnétique, en particulier dans la plage optique du spectre électromagnétique. Ces processus impliquent l'absorption, l'émission et la diffusion de photons par les électrons et les trous du matériau semi-conducteur. Les processus optiques sont fondamentaux dans de nombreux dispositifs et technologies optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes (DEL), les lasers, les photodétecteurs et les cellules solaires. Explorons les processus optiques clés dans les semi-conducteurs : voir figure 1.

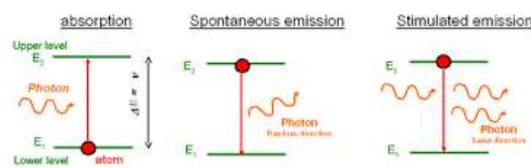


Figure 1 : Absorption-émission

1.1. Absorption :

L'absorption est le processus par lequel un photon d'énergie suffisante est absorbé par un semi-conducteur, faisant passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Pour que l'absorption se produise, l'énergie du photon incident doit correspondre ou dépasser l'énergie de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Lors de l'absorption, l'énergie du photon est transférée à l'électron, qui est alors libre de participer aux processus de conduction électrique ou de recombinaison.

1.2. Émission :

L'émission fait référence au processus par lequel un matériau semi-conducteur libère des photons d'énergies spécifiques lorsque les électrons passent d'états d'énergie plus élevés à des états d'énergie plus faibles. Il existe deux principaux types de processus d'émission :

- Émission spontanée : L'émission spontanée se produit lorsqu'un électron dans un état excité de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence, libérant un photon. L'énergie du photon émis correspond à la différence d'énergie entre les états impliqués. L'émission spontanée est un processus aléatoire et les photons émis ne sont pas en phase les uns avec les autres, ce qui entraîne une émission lumineuse de faible intensité.
- Émission stimulée : une émission stimulée se produit lorsqu'un photon incident interagit avec un électron excité dans la bande de conduction, provoquant la transition de l'électron vers un état d'énergie inférieur. Ce processus libère un photon qui est en phase et a la même énergie, la même direction et la même phase que le photon incident. L'émission stimulée est le processus fondamental derrière le fonctionnement des lasers, où une cascade d'émissions stimulées conduit à l'amplification de la lumière.

1.3. Photoluminescence

La photoluminescence est un processus par lequel un semi-conducteur émet de la lumière après avoir absorbé des photons. Cela implique l'absorption de photons, suivie d'une

recombinaison et d'une émission ultérieure de photons. La photoluminescence peut se produire par deux mécanismes principaux : voir figure 2

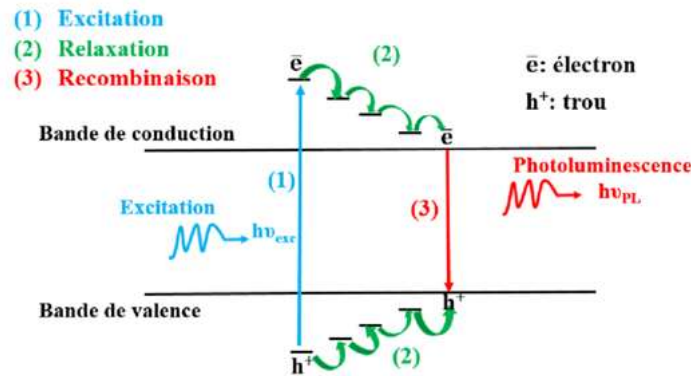


Figure 2 : processus de photoluminescence

➤ **Fluorescence** : La fluorescence est un type de photoluminescence dans lequel la lumière émise se produit immédiatement ou peu de temps après l'absorption des photons. L'énergie absorbée est rapidement rayonnée sous forme de photon de plus faible énergie. La fluorescence est couramment observée dans les matériaux fluorescents et est largement utilisée dans les technologies d'imagerie biologique, de détection et d'affichage.

➤ **Phosphorescence** : La phosphorescence est un type de photoluminescence retardée où la lumière émise persiste même après la suppression de la source d'excitation. Les matériaux phosphorescents ont des états excités de longue durée et la recombinaison radiative se produit sur une échelle de temps plus longue. Les matériaux phosphorescents sont utilisés dans des applications telles que les produits qui brillent dans le noir et certains types de technologies d'affichage.

1.4. Diffusion

La diffusion fait référence à l'interaction des photons avec des électrons ou d'autres porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur, entraînant des changements dans la direction et l'énergie des photons. Il existe différents types de processus de diffusion, notamment la diffusion Rayleigh, la diffusion Raman et la diffusion Brillouin. La diffusion peut affecter la propagation de la lumière dans un matériau, entraînant des phénomènes tels que des effets de diffraction optique, de coloration et de polarisation. Voir figure 3 :

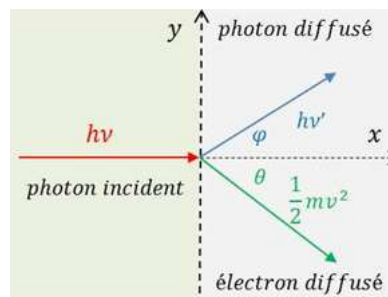


Figure 3 : Principe de diffusion

Ces processus optiques dans les semi-conducteurs sont essentiels au fonctionnement de divers dispositifs optoélectroniques. En manipulant et en contrôlant ces processus, les chercheurs et les ingénieurs peuvent concevoir et optimiser des matériaux semi-conducteurs

pour des applications dans les domaines de l'éclairage, de la communication, de l'imagerie et de la conversion d'énergie.

2. Objectifs

Après avoir étudié cette unité, vous devriez être capable de-

- Comprendre les différents processus optiques dans les semi-conducteurs
- Expliquer l'absorption dans les semiconducteurs et les transitions intrinsèques indirectes
- Expliquer l'absorption des excitons, l'absorption du donneur-accepteur et de la bande d'impuretés
- Discutez de l'effet du champ électrique sur l'absorption
- Comprendre le rayonnement dans les semiconducteurs
- Expliquer la relation entre les spectres d'absorption et d'émission
- Discuter des transitions radioactives proches de la bande interdite

3. Absorption dans les semi-conducteurs

La mesure des spectres d'absorption et d'émission dans les semi-conducteurs constitue un aspect important de la caractérisation des matériaux.

- Elles fournissent non seulement des informations sur la bande interdite, mais les mesures fournissent également des informations sur les transitions directes et indirectes, la répartition des états, les défauts et les impuretés.
- Le spectre d'absorption couvre une large gamme d'énergie (ou de longueur d'onde), s'étendant des énergies proches de la bande interdite aux transitions de faible énergie impliquant des porteurs libres et des vibrations de réseau (transitions proches de la bande interdite).

L'absorption dans les semi-conducteurs fait référence au processus par lequel un matériau semi-conducteur absorbe des photons d'énergies spécifiques, conduisant à la promotion des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Voici une explication détaillée de l'absorption dans les semi-conducteurs :

3.1. Énergie de bande interdite

Dans les semi-conducteurs, la bande de valence est remplie d'électrons, tandis que la bande de conduction est pratiquement vide à température nulle absolue. La différence d'énergie entre ces deux bandes est appelée énergie de bande interdite (E_g). L'énergie de la bande interdite détermine l'énergie minimale requise pour qu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction.

3.2. Absorption des photons

Lorsqu'un photon d'énergie ($h\nu$) interagit avec un matériau semi-conducteur, l'énergie du photon peut être transférée à un électron. Pour que l'absorption se produise, l'énergie du photon incident doit correspondre ou dépasser l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur. Si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de la bande interdite, l'énergie excédentaire est généralement dissipée sous forme de chaleur.

3.3. Transfert d'énergie

Dans le processus d'absorption, l'énergie du photon incident est transférée à l'électron du semi-conducteur, le faisant passer de la bande de valence à la bande de conduction. Le principe de conservation de l'énergie veut que l'énergie du photon absorbé ($h\nu$) soit égale à la somme de l'énergie initiale de l'électron dans la bande de valence et de l'énergie nécessaire pour atteindre la bande de conduction. Mathématiquement, cela peut s'exprimer comme suit :

$$h\nu = E_{valence} + \Delta E.$$

Où $E_{valence}$ est l'énergie initiale de l'électron dans la bande de valence, et ΔE est l'énergie requise pour que l'électron passe à la bande de conduction.

3.4. Formation de paires électrons trous

Lorsqu'un électron absorbe un photon avec une énergie correspondant ou dépassant l'énergie de la bande interdite, il gagne suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière énergétique et passer à la bande de conduction. Cette promotion de l'électron de la bande de valence à la bande de conduction crée une paire électron-trou, où le trou (l'absence d'électron) est laissé dans la bande de valence.

3.5. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption (α) quantifie le degré d'absorption dans un matériau semi-conducteur. Il représente la fraction de photons incidents absorbés par unité de distance parcourue à travers le matériau. Le coefficient d'absorption dépend des propriétés du matériau, de l'énergie des photons et d'autres facteurs. Cela dépend généralement de la longueur d'onde et peut varier selon les différentes régions du spectre électromagnétique.

3.6. Matériaux à bande interdite indirecte

L'efficacité de l'absorption dans les semi-conducteurs dépend de la nature de la bande interdite. Dans les matériaux à bande interdite directe, le niveau d'énergie minimum de la bande de conduction s'aligne sur le niveau d'énergie maximum de la bande de valence dans l'espace d'impulsion. En conséquence, les matériaux à bande interdite directe ont une efficacité d'absorption plus élevée et sont largement utilisés dans les dispositifs optoélectroniques tels que les LED et les lasers.

En revanche, les matériaux à bande interdite indirecte présentent un décalage dans l'espace de quantité de mouvement entre les extrema énergétiques des bandes de conduction et de valence. L'absorption dans les matériaux à bande interdite indirecte nécessite l'assistance de phonons ou d'autres mécanismes pour conserver à la fois l'énergie et l'impulsion, ce qui entraîne une efficacité d'absorption inférieure.

3.7. Spectre d'absorption

Le spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur représente ses caractéristiques d'absorption sur une gamme d'énergies ou de longueurs d'onde photoniques. Le spectre d'absorption peut être mesuré expérimentalement à l'aide de techniques telles que la spectroscopie d'absorption optique. Il fournit des informations précieuses sur la structure de bande du matériau, l'énergie de la bande interdite et les propriétés optiques.

Comprendre l'absorption dans les semi-conducteurs est crucial pour concevoir et optimiser des dispositifs à base de semi-conducteurs qui reposent sur l'absorption des photons, tels que

les cellules solaires, les photodétecteurs et les capteurs optiques. En adaptant l'énergie de la bande interdite et les propriétés des matériaux, les chercheurs peuvent optimiser l'efficacité d'absorption et la réponse spectrale des semi-conducteurs.

4. Transitions intrinsèques indirectes

En optoélectronique, les transitions intrinsèques indirectes font référence aux transitions électroniques dans les semi-conducteurs où l'énergie et la quantité de mouvement des électrons impliqués ne correspondent pas directement. Ces transitions se produisent entre les niveaux d'énergie dans la bande de conduction et la bande de valence, et nécessitent des mécanismes supplémentaires, tels que les interactions de phonons, pour conserver à la fois l'énergie et l'impulsion.

Le changement d'impulsion ou de vecteur d'onde requis dans une transition indirecte peut être fourni par un ou plusieurs phonons, bien que la probabilité que ce dernier se produise soit très faible. Il existe des phonons optiques et acoustiques.

Chacun d'entre eux possède des modes de vibrations transversaux et longitudinaux, avec une énergie et une impulsion caractéristiques. Dans le processus de transition indirecte, la conservation de la quantité de mouvement nécessite :

$$k'' \pm k_p = k' + k_{ph}$$

Où k'' et k' sont les vecteurs d'onde électroniques pour les états final et initial, k_p est le vecteur d'onde du phonon, et k_{ph} est le vecteur d'onde du photon absorbé. Puisque cette dernière est petite, la conservation de la quantité de mouvement pour une transition indirecte peut être exprimée comme $k'' - k' = \pm k_p$. De même, la conservation de l'énergie pour les deux cas d'émission et d'absorption de phonons peut être exprimée par :

$$\hbar\omega_e = \varepsilon C - \varepsilon V + \varepsilon p$$

$$\hbar\omega_a = \varepsilon C - \varepsilon V - \varepsilon p$$

Où le côté gauche représente l'énergie du photon absorbé.

A partir de cet état énergétique, l'électron atteint finalement la vallée indirecte par diffusion de phonons. L'état d'énergie intermédiaire de l'électron est appelé état virtuel, dans lequel le porteur réside jusqu'à ce qu'un phonon ayant l'énergie et l'impulsion appropriées soit disponible pour le processus de diffusion. Les probabilités de transition indirecte impliquant un état virtuel peuvent être calculées à l'aide d'une théorie de perturbation dépendante du temps du second ordre. La probabilité totale est obtenue par une sommation de ces états énergétiques, à condition que chaque transition particulière conserve l'énergie entre les états initial et final.

Explorons plus en détail les transitions intrinsèques indirectes :

4.1. Transitions directes et indirectes :

Dans les semi-conducteurs, les transitions électroniques peuvent être classées comme directes ou indirectes en fonction de leurs propriétés de conservation de la quantité de mouvement.

➤ Transitions directes : dans les transitions directes, le niveau d'énergie minimum de la bande de conduction s'aligne avec le niveau d'énergie maximum de la bande de valence dans l'espace d'impulsion. Cela signifie que les électrons impliqués ont le même élan avant et après la transition, ce qui entraîne une absorption et une émission efficaces de photons. Les transitions directes ont des coefficients d'absorption plus élevés et sont couramment observées dans les matériaux à bande interdite directe tels que les composés III-V (par exemple GaAs, InP) et les composés II-VI (par exemple ZnSe, CdS).

➤ Transitions indirectes : dans les transitions indirectes, le niveau d'énergie minimum de la bande de conduction ne s'aligne pas avec le niveau d'énergie maximum de la bande de valence dans l'espace d'impulsion. Cela signifie que l'impulsion des électrons avant et après la transition ne correspond pas, ce qui entraîne une probabilité plus faible d'absorption et d'émission de photons. Les transitions indirectes nécessitent des mécanismes supplémentaires pour conserver à la fois l'énergie et l'élan, impliquant généralement l'interaction avec les vibrations du réseau appelées phonons. Des transitions indirectes sont couramment observées dans les matériaux à bande interdite indirecte tels que le silicium (Si), le germanium (Ge) et d'autres semi-conducteurs élémentaires du groupe IV.

4.2. Conservation de l'énergie de l'impulsion

Dans une transition intrinsèque indirecte, la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement est obtenue grâce à la participation des phonons. Les phonons sont des vibrations quantifiées d'un réseau ou des oscillations collectives d'atomes dans un réseau cristallin. Lorsqu'un électron effectue une transition indirecte, il absorbe ou émet un photon avec une énergie légèrement inférieure ou supérieure à l'énergie de la bande interdite. L'énergie supplémentaire nécessaire à la conservation de l'impulsion est échangée avec un phonon, qui emporte ou fournit l'impulsion nécessaire.

4.3. Caractéristiques d'absorption et d'émission

Les transitions indirectes ont des coefficients d'absorption inférieurs à ceux des transitions directes en raison du décalage de quantité de mouvement. L'efficacité d'absorption inférieure se traduit par une longueur d'absorption optique plus longue pour les matériaux à bande interdite indirecte. De plus, l'émission de photons dans les transitions indirectes est moins efficace que dans les transitions directes en raison de l'implication de phonons et de la plus faible probabilité de recombinaison radiative.

4.4. Applications

Malgré leur efficacité moindre, les matériaux à bande interdite indirecte comme le silicium (Si) sont largement utilisés dans les dispositifs optoélectroniques tels que les photodétecteurs, les capteurs d'image et les cellules solaires. L'abondance et la compatibilité du silicium avec la technologie complémentaire métal-oxyde-semi-conducteur (CMOS) en font un choix populaire dans les systèmes optoélectroniques intégrés. De plus, des matériaux à bande interdite indirecte ont été explorés pour des applications en photonique sur silicium, où la lumière peut être manipulée et guidée sur une puce de silicium pour la transmission de données et la communication optique.

En résumé, les transitions intrinsèques indirectes en optoélectronique font référence à des transitions électroniques dans les semi-conducteurs où l'énergie et la quantité de mouvement des électrons impliqués ne correspondent pas directement. Ces transitions nécessitent des mécanismes supplémentaires, tels que les interactions de phonons, pour conserver à la fois l'énergie et l'élan. Les transitions indirectes ont des efficacités d'absorption et d'émission inférieures à celles des transitions directes, mais elles restent importantes dans diverses applications optoélectroniques, en particulier dans les dispositifs à base de silicium.

5. Absorption des excitons

L'absorption des excitons dans les semi-conducteurs fait référence au processus par lequel un exciton, un état lié d'un électron et d'un trou, absorbe un photon et subit une transition électronique de l'état fondamental à un état excité. Les excitons se forment en raison de l'attraction coulombienne entre un électron excité dans la bande de conduction et le trou résultant dans la bande de valence. Voici une explication détaillée de l'absorption des excitons dans les semi-conducteurs :

- Formation d'excitons : Dans un matériau semi-conducteur, lorsqu'un photon est absorbé, il peut créer une paire électron-trou. Le photon absorbé transfère son énergie à un électron, le faisant passer de la bande de valence à la bande de conduction, laissant derrière lui un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou sont liés ensemble par la force coulombienne attractive, formant un exciton.

- Exciton lié : Dans l'exciton, l'électron et le trou orbitent autour de leur centre de masse en raison de leurs charges opposées. L'exciton est une quasi-particule dont les caractéristiques sont différentes d'un électron libre ou d'un trou. L'énergie de liaison de l'exciton est généralement de l'ordre de quelques milli-électrons-volts (meV) et dépend du matériau semi-conducteur spécifique.

- Processus d'absorption : lorsqu'un photon incident dont l'énergie est égale ou supérieure à l'énergie de liaison de l'exciton interagit avec un semi-conducteur, il peut être absorbé par l'exciton. L'énergie du photon est transférée à l'exciton, l'excitant vers un état énergétique supérieur. L'énergie du photon absorbé doit correspondre à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité de l'exciton.

- Niveaux d'énergie des excitons : les excitons dans les semi-conducteurs présentent des niveaux d'énergie quantifiés similaires aux niveaux d'énergie atomique. Le niveau d'énergie le plus bas est l'état fondamental, où l'électron est dans le niveau d'énergie le plus bas de la bande de conduction et le trou est dans le niveau d'énergie le plus élevé de la bande de valence. Les excitons ont également des états excités correspondant à des niveaux d'énergie plus élevés dans les bandes de conduction et de valence.

- Spectre d'absorption des excitons : Le spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur montre la dépendance énergétique du coefficient d'absorption du matériau. Dans le cas de l'absorption des excitons, le spectre d'absorption présente des pics correspondant aux niveaux d'énergie des excitons. Les pics d'absorption des excitons apparaissent à des énergies inférieures à l'énergie de bande interdite du matériau semi-conducteur.

- Dynamique des excitons : les excitons dans les semi-conducteurs ont une durée de vie limitée en raison de plusieurs processus qui peuvent se produire après l'absorption. Ces processus incluent la recombinaison radiative, où l'exciton émet un photon et revient à l'état

fondamental, et des processus non radiatifs tels que la relaxation assistée par phonons, la recombinaison Auger ou la dissociation des excitons. La dynamique spécifique dépend des propriétés du matériau et de l'environnement.

➤ Effets des excitons sur les propriétés optiques : La présence d'excitons dans les semi-conducteurs a des effets significatifs sur leurs propriétés optiques. Les excitons ont une influence sur le coefficient d'absorption et l'indice de réfraction du matériau, conduisant à des caractéristiques telles que des bords d'absorption et des pics excitoniques dans le spectre optique. L'énergie et l'intensité de l'absorption excitonique peuvent être modifiées par des facteurs externes tels que la température, la déformation et le dopage.

➤ Applications : L'absorption des excitons et les propriétés excitoniques sont importantes dans divers dispositifs optoélectroniques. Par exemple, les excitons jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des diodes électroluminescentes organiques (OLED), où la recombinaison des excitons conduit à l'émission de lumière. Les effets excitoniques sont également pertinents dans les dispositifs photovoltaïques, tels que les cellules solaires excitoniques, où l'absorption des photons par les excitons contribue au processus de conversion d'énergie.

En résumé, l'absorption des excitons dans les semi-conducteurs implique l'absorption des photons par des paires électron-trou liées appelées excitons. L'exciton absorbe des photons d'énergies spécifiques, provoquant des transitions de l'état fondamental aux états excités. L'absorption des excitons conduit à des caractéristiques distinctives dans le spectre d'absorption et a des implications importantes sur les propriétés optiques et les performances des dispositifs optoélectroniques.

6. Absorption donneur-accepteur et bande d'impureté

Le donneur-accepteur et l'absorption des bandes d'impuretés sont deux mécanismes d'absorption dans les semi-conducteurs impliquant la présence d'impuretés ou de dopants. Ces mécanismes jouent un rôle crucial dans la modification des propriétés optiques des semi-conducteurs. Explorons chaque mécanisme en détail :

6.1. Absorption donneur-accepteur :

Dans l'absorption donneur-accepteur, des impuretés ou des dopants sont intentionnellement ajoutés à un matériau semi-conducteur pendant le processus de fabrication. Ces impuretés introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite du semi-conducteur hôte, entraînant des processus d'absorption supplémentaires. Les impuretés sont généralement classées comme donneurs ou accepteurs en fonction de leurs propriétés électroniques.

➤ Donateurs : les impuretés du donneur introduisent des niveaux d'énergie proches de la bande de conduction du semi-conducteur hôte, fournissant des états électroniques supplémentaires qui peuvent être occupés par des électrons. Les impuretés donneuses courantes comprennent des éléments tels que le phosphore (P) ou l'arsenic (As) dans les semi-conducteurs en silicium (Si) ou en germanium (Ge).

➤ Accepteurs : les impuretés des accepteurs introduisent des niveaux d'énergie proches de la bande de valence du semi-conducteur hôte, créant des états supplémentaires pouvant accueillir des trous. Les impuretés accepteurs courantes comprennent des éléments tels que le bore (B) ou l'aluminium (Al) dans les semi-conducteurs Si ou Ge. Voir figure 3

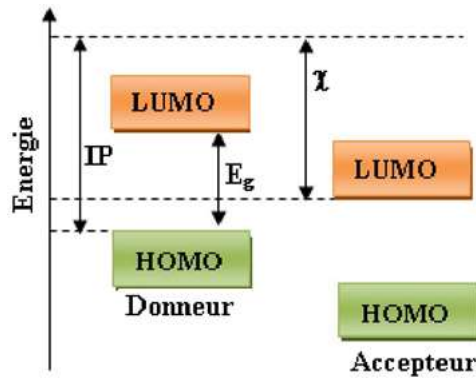


Figure 3. : Illustration de l'absorption des photons due à la transition donneur-accepteur.

Le processus d'absorption se produit lorsque des photons dont les énergies correspondent à la différence d'énergie entre le niveau donneur ou accepteur et la bande de conduction ou de valence sont absorbés. Cette absorption conduit à l'attribution d'un électron du niveau donneur ou accepteur vers la bande de conduction ou de valence, respectivement.

L'absorption donneur-accepteur modifie le spectre d'absorption du semi-conducteur, introduisant des pics d'absorption supplémentaires correspondant aux énergies des niveaux donneur et accepteur. Ces pics d'absorption peuvent être utilisés pour identifier et caractériser les impuretés dopantes dans le matériau.

6.2. Absorption des bandes d'impuretés

L'absorption des bandes d'impuretés se produit lorsqu'une concentration élevée d'impuretés est présente dans un matériau semi-conducteur, conduisant à la formation d'une bande d'impuretés dans la bande interdite. Ce mécanisme est plus pertinent dans les semi-conducteurs fortement dopés ou alliés.

Lorsque la concentration d'impuretés est élevée, les niveaux d'énergie des atomes d'impuretés se chevauchent et forment une large bande d'états énergétiques au sein de la bande interdite. Cette bande d'impuretés peut s'étendre sur une gamme d'énergies, remplissant partiellement ou totalement la bande interdite.

La bande d'impuretés sert de canal d'absorption supplémentaire pour les photons. Les photons dont les énergies correspondent à la différence d'énergie entre la bande d'impuretés et la bande de conduction ou de valence peuvent être absorbés, favorisant ainsi les électrons ou les trous de la bande d'impuretés vers la bande de conduction ou de valence, respectivement.

La présence de la bande d'impuretés peut améliorer considérablement les propriétés d'absorption du matériau semi-conducteur, permettant une absorption dans des plages d'énergie qui sont généralement inaccessibles dans les matériaux non dopés ou faiblement dopés.

6.3. Applications

L'absorption donneur-accepteur et l'absorption des bandes d'impuretés ont des applications pratiques dans divers dispositifs optoélectroniques. Par exemple:

- Photodétecteurs: l'absorption donneur-accepteur et l'absorption des bandes d'impuretés étendent la sensibilité spectrale des photodétecteurs à une gamme plus large de

longueurs d'onde. Cela permet la détection de la lumière dans des régions spécifiques du spectre électromagnétique.

➤ Cellules solaires: La modification du spectre d'absorption par absorption donneur-accepteur ou absorption par bande d'impuretés peut améliorer l'efficacité des cellules solaires. En ajustant la concentration d'impuretés et les niveaux d'énergie, il est possible d'absorber une gamme plus large de photons, augmentant ainsi l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité.

➤ Capteurs infrarouges: l'absorption des bandes d'impuretés est particulièrement pertinente pour les capteurs infrarouges qui nécessitent une sensibilité élevée au rayonnement infrarouge. La présence de bandes d'impuretés permet une absorption et une détection efficaces de la lumière infrarouge.

En résumé, l'absorption donneur-accepteur et l'absorption de la bande d'impuretés sont des mécanismes dans lesquels les impuretés ou les dopants introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite d'un matériau semi-conducteur. Ces mécanismes modifient le spectre d'absorption, permettant l'absorption de photons avec des énergies correspondant aux différences d'énergie entre les niveaux d'impuretés et la bande de conduction ou de valence. L'absorption donneur-accepteur est obtenue par dopage intentionnel, tandis que l'absorption des bandes d'impuretés se produit dans les semi-conducteurs fortement dopés ou alliés. Ces mécanismes ont des applications dans divers dispositifs optoélectroniques, augmentant leur sensibilité spectrale et améliorant leurs performances.

7. Effet du champ électrique sur l'absorption

➤ Absorption dans les semi-conducteurs : L'absorption dans les semi-conducteurs fait référence au processus par lequel les photons incidents sont absorbés, entraînant l'excitation des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Ce processus d'absorption est régi par la structure de bande d'énergie du matériau semi-conducteur.

➤ Effet du champ électrique : La présence d'un champ électrique dans un semi-conducteur peut influencer considérablement les propriétés d'absorption. Le champ électrique modifie la structure de la bande, altère les niveaux d'énergie et affecte le coefficient d'absorption du matériau.

➤ Effet Stark confiné quantique (QCSE) : L'un des principaux effets d'un champ électrique sur l'absorption est l'effet Stark confiné quantique (QCSE). Le QCSE se produit dans les hétérostructures semi-conductrices, où des couches de différents matériaux avec différentes bandes interdites sont empilées.

➤ Courbure de bande : lorsqu'un champ électrique est appliqué à travers une hétérostructure semi-conductrice, il provoque une courbure de bande aux interfaces entre les couches. La flexion de bande fait référence à la redistribution de la charge et à la modification des niveaux d'énergie à proximité de l'interface.

➤ Changement des niveaux d'énergie : Le champ électrique induit un changement dans les niveaux d'énergie du matériau semi-conducteur. En présence d'un champ électrique, les niveaux d'énergie dans les bandes de conduction et de valence se déplacent dans des directions opposées. Ce changement de niveau d'énergie modifie le spectre d'absorption du semi-conducteur.

➤ **Changement de Stark** : Le changement des niveaux d'énergie dû au champ électrique est connu sous le nom de changement de Stark. Il en résulte une modification de la différence d'énergie entre les bandes de valence et de conduction. Par conséquent, le bord d'absorption du matériau est déplacé vers des énergies plus élevées ou plus faibles en fonction de la polarité et de l'ampleur du champ électrique.

➤ **Effet Exciton Stark** : Le décalage Stark induit par le champ électrique affecte également les excitons, qui sont des paires électron-trou liées. Les niveaux d'énergie des états excitoniques sont modifiés par le champ électrique, entraînant des modifications de leurs propriétés d'absorption. Cet effet est connu sous le nom d'effet Exciton Stark.

➤ **Modulation du coefficient d'absorption** : Le champ électrique peut moduler le coefficient d'absorption du matériau semi-conducteur. En contrôlant l'intensité du champ électrique, il est possible d'améliorer ou de supprimer l'absorption à des longueurs d'onde spécifiques. Cette modulation du coefficient d'absorption trouve des applications dans des dispositifs tels que les modulateurs d'électro-absorption et les commutateurs électro-optiques.

➤ **Structures de puits quantiques** : dans les structures de puits quantiques, qui sont de fines couches semi-conductrices prises en sandwich entre des barrières, le champ électrique affecte les niveaux d'énergie quantifiés. En modifiant l'intensité du champ électrique, les niveaux d'énergie dans le puits quantique peuvent être ajustés, ce qui entraîne des propriétés d'absorption réglables.

Applications

L'influence d'un champ électrique sur l'absorption dans les semi-conducteurs a de nombreuses applications. Il est utilisé dans des dispositifs tels que les modulateurs d'électro-absorption, les photodétecteurs infrarouges à puits quantiques, les commutateurs électro-optiques et les modulateurs électro-optiques. Ces dispositifs reposent sur le contrôle des propriétés d'absorption grâce à la manipulation du champ électrique.

En résumé, la présence d'un champ électrique dans les semi-conducteurs, notamment dans les hétérostructures, a un impact significatif sur les propriétés d'absorption. Le champ électrique induit une courbure de bande, déplace les niveaux d'énergie, modifie les états excitoniques et altère le coefficient d'absorption. Comprendre et manipuler l'effet des champs électriques sur l'absorption est crucial pour la conception et l'optimisation de divers dispositifs optoélectroniques.

8. Rayonnement dans le semiconducteur (relation entre les spectres d'absorption et d'émission)

Dans les semiconducteurs, les spectres d'absorption et d'émission sont intimement liés et fournissent des informations précieuses sur l'interaction du rayonnement avec le matériau. Comprendre la relation entre les spectres d'absorption et d'émission est crucial pour la conception et la caractérisation de dispositifs optoélectroniques. Explorons cette relation en détail :

➤ **Spectre d'absorption** : le spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur représente le coefficient d'absorption dépendant de l'énergie, qui décrit la capacité du matériau à absorber des photons incidents à différentes énergies. Il fournit des informations

sur les niveaux d'énergie et les transitions qui se produisent dans le matériau lors de l'absorption des photons.

➤ Niveaux d'énergie et transitions : Dans un semi-conducteur, les niveaux d'énergie existent dans la bande de valence (VB) et la bande de conduction (CB). L'absorption se produit lorsqu'un photon dont l'énergie correspond à la différence d'énergie entre le VB et le CB arrive sur le matériau. Cela promeut un électron du VB vers le CB, laissant derrière lui un trou dans le VB. Le spectre d'absorption affiche des pics aux énergies correspondant à ces transitions électroniques.

➤ Énergie de bande interdite : L'énergie de bande interdite (E_g) est l'énergie minimale requise pour promouvoir un électron du VB au CB. Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite ne sont pas absorbés, tandis que ceux dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande interdite sont absorbés avec une efficacité variable.

➤ Transitions directes et indirectes : dans certains semi-conducteurs, la différence d'énergie entre le VB et le CB est presque égale à l'énergie du photon, ce qui entraîne des transitions directes. Dans d'autres cas, la différence d'énergie est différente, conduisant à des transitions indirectes. Les transitions directes ont un pic d'absorption plus net, tandis que les transitions indirectes ont un bord d'absorption plus progressif.

➤ Spectre d'émission : Le spectre d'émission d'un matériau semi-conducteur représente la distribution d'énergie des photons émis par le matériau lorsqu'il passe d'un état excité à un état d'énergie inférieur. Le spectre d'émission est souvent étudié à l'aide de techniques de photoluminescence ou d'électroluminescence.

➤ Recombinaison radiative : Dans les semi-conducteurs, la recombinaison radiative est un processus par lequel un électron du CB se recombine avec un trou du VB, entraînant l'émission d'un photon. Le photon émis transporte une énergie égale à la différence d'énergie entre le CB et le VB.

8.1. Relation entre l'absorption et l'émission

La relation entre les spectres d'absorption et d'émission est régie par le principe de l'équilibre détaillé. Selon ce principe, les processus d'absorption et d'émission sont en équilibre lorsque le matériau est en équilibre thermique. Dans cet équilibre, les taux d'absorption et d'émission sont égaux.

Les pics d'absorption dans le spectre d'absorption correspondent aux énergies auxquelles les photons sont absorbés et excitent les électrons à travers la bande interdite. En revanche, les pics d'émission dans le spectre d'émission correspondent aux énergies auxquelles les photons sont émis lors de la recombinaison radiative. Le spectre d'émission présente généralement une gamme d'énergies plus large que le spectre d'absorption.

➤ Changement de Stokes : dans certains cas, l'énergie maximale d'émission est inférieure à l'énergie maximale d'absorption. Cette différence d'énergie est connue sous le nom de décalage de Stokes. Le déplacement de Stokes se produit en raison de processus de relaxation non radiative, tels que les interactions de phonons, qui provoquent une perte d'énergie avant l'émission de photons.

8.2. Remarques

La relation entre les spectres d'absorption et d'émission est cruciale pour divers dispositifs optoélectroniques. Par exemple, dans les diodes électroluminescentes (DEL), le spectre d'émission est conçu pour correspondre aux longueurs d'onde souhaitées en sélectionnant des matériaux semi-conducteurs et des niveaux de dopage appropriés. Dans les cellules solaires, le spectre d'absorption est maximisé pour couvrir une large gamme d'énergies de photons incidents pour une récupération efficace de la lumière.

Comprendre la relation entre les spectres d'absorption et d'émission dans les semi-conducteurs fournit un aperçu des transitions électroniques sous-jacentes et du comportement des photons dans le matériau. Ces connaissances permettent la conception et l'optimisation de dispositifs semi-conducteurs pour des applications spécifiques dans des domaines tels que la photonique, l'optoélectronique et la conversion d'énergie.

9. Transitions radioactives proche de la bande gap

Les transitions radiatives proches de la bande interdite, également appelées transitions optiques, font référence à des transitions électroniques qui se produisent à proximité de la bande interdite d'énergie dans un matériau semi-conducteur. Ces transitions impliquent l'absorption ou l'émission de photons avec des énergies proches de l'énergie de la bande interdite. Les transitions radiatives proches de la bande interdite jouent un rôle crucial dans les propriétés optiques et les applications des semi-conducteurs. Entrons dans les détails :

9.1. Bande interdite énergétique

La bande interdite d'énergie (E_g) est la différence d'énergie entre la bande de valence (VB), qui contient des états électroniques occupés, et la bande de conduction (CB), qui contient des états électroniques inoccupés, dans un semi-conducteur. L'énergie de la bande interdite détermine l'énergie minimale requise pour exciter un électron du VB vers le CB.

9.2. Transitions directes et indirectes

Dans les matériaux semi-conducteurs, les transitions électroniques proches de la bande interdite peuvent se produire via des processus directs ou indirects.

➤ **Transitions directes** : Dans les transitions directes, l'impulsion de l'électron dans le CB et du trou dans le VB est conservée pendant la transition. L'absorption ou l'émission d'un photon permet à l'électron de passer directement du VB au CB (ou vice versa). Les transitions directes sont caractérisées par des pics d'absorption et d'émission prononcés dans le spectre optique.

➤ **Transitions indirectes** : Dans les transitions indirectes, l'impulsion de l'électron et du trou n'est pas conservée pendant la transition. Des mécanismes supplémentaires, tels que les interactions de phonons, sont impliquées pour compenser le décalage de quantité de mouvement. Les transitions indirectes ont une probabilité plus faible que les transitions directes et présentent généralement un bord d'absorption ou d'émission plus progressif dans le spectre optique.

9.3. Absorption

L'absorption proche de la bande interdite se produit lorsqu'un photon dont l'énergie est proche de l'énergie de la bande interdite arrive sur le matériau semi-conducteur. Le photon absorbé

fournit l'énergie nécessaire pour promouvoir un électron du VB vers le CB. L'énergie absorbée est généralement égale ou légèrement supérieure à l'énergie de la bande interdite. Le coefficient d'absorption et la forme du spectre d'absorption dépendent de la nature de la transition (directe ou indirecte) et de la densité d'états dans les bandes.

9.4. Émission

L'émission à bande interdite proche, également connue sous le nom de photoluminescence, implique la recombinaison d'un électron dans le CB avec un trou dans le VB, entraînant l'émission d'un photon. Ce processus de recombinaison radiative se produit lorsque la paire électron-trou atteint un état d'énergie inférieur. Le photon émis transporte une énergie égale à la différence d'énergie entre le CB et le VB.

9.5. Efficacité radiative

L'efficacité radiative des transitions radiatives proches de la bande interdite fait référence à la probabilité d'un processus de recombinaison radiative par rapport aux processus non radiatifs. Les processus non radiatifs impliquent une perte d'énergie due à des mécanismes tels que des interactions de phonons ou des défauts. Une efficacité radiative élevée est souhaitable dans les dispositifs optoélectroniques car elle garantit une émission ou une absorption efficace de la lumière.

9.6. Spectres optiques

Les spectres optiques des semi-conducteurs présentent des caractéristiques liées aux transitions radiatives proches de la bande interdite. Le spectre d'absorption montre une forte augmentation de l'absorption à proximité de l'énergie de la bande interdite, correspondant aux transitions directes ou indirectes. Le spectre d'émission affiche des pics correspondant aux énergies des processus de recombinaison radiative. La forme, l'intensité et la position de ces pics dépendent de facteurs tels que la structure de bande du matériau, les niveaux de dopage et la température.

9.7. Applications

Les transitions radiatives proches de la bande interdite jouent un rôle crucial dans divers dispositifs et technologies optoélectroniques :

- Diodes électroluminescentes (LED) : une recombinaison radiative efficace permet aux LED d'émettre de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. En concevant l'énergie de la bande interdite et la structure de la bande, les LED peuvent couvrir une large gamme de couleurs pour des applications dans l'éclairage et les écrans.
- Photovoltaïque : l'absorption proche de la bande interdite dans les cellules solaires permet une absorption efficace de la lumière solaire et la génération ultérieure de paires électron-trou. En optimisant les propriétés d'absorption, l'efficacité des cellules solaires peut être améliorée.
- Lasers : les appareils laser reposent sur l'émission stimulée de photons via des processus de recombinaison radiative. Les transitions proches de la bande interdite contribuent à l'action du laser en fournissant les niveaux d'énergie nécessaires à l'inversion de population et à l'amplification de la lumière.

➤ Photodétecteurs et capteurs : l'absorption proche de la bande interdite permet la détection de photons dans des plages d'énergie spécifiques. Les photodétecteurs et les capteurs utilisent ces processus d'absorption pour des applications telles que l'imagerie, la spectroscopie et les communications optiques.

En résumé, les transitions radiatives proches de la bande interdite dans les semi-conducteurs impliquent l'absorption et l'émission de photons avec des énergies proches de l'énergie de la bande interdite. Ces transitions sont essentielles pour comprendre et manipuler les propriétés optiques des semi-conducteurs, permettant ainsi de faire progresser les dispositifs et technologies optoélectroniques.

10. Résumé

Dans cette unité, vous avez étudié l'absorption dans les semi-conducteurs. Les transitions intrinsèques indirectes, l'absorption de l'exciton, l'absorption du donneur accepteur et de la bande d'impuretés, l'absorption à faible énergie (longue longueur d'onde) ont été étudiées. L'effet du champ électrique sur l'absorption a été discuté en détail. Le rayonnement dans les semi-conducteurs a également été expliqué. Transitions radioactives proches de la bande interdite expliquées en détail.

11. Lexique

Absorption : processus d'absorption

Intrinsèque : appartenir à quelque chose dans le cadre de sa nature

Exciton : état lié d'un électron et d'un trou électronique qui sont attirés l'un vers l'autre par la force électrostatique de Coulomb

Portée : un domaine dans lequel on opère

Transition : changement d'un état ou d'une forme à un autre; Optique – lié au sens de la vue

11. Références

1. Holger T. Grahn, Introduction à la physique des semi-conducteurs, World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
2. S.M. Sze et Kwok K. Ng, Physique des dispositifs semi-conducteurs, John Wiley & Sons.
3. Simon M. Sze et Ming-Kwei Lee, Dispositifs semi-conducteurs : physique et technologie, Wiley, New York.
4. Otfried Madelung, Semi-conducteurs : données de base, Springer.
5. Donald A. Neamen, Physique et dispositifs des semi-conducteurs : principes de base, McGraw Colline.

12. Recommandations

1. S.M. Sze, Dispositifs semi-conducteurs - Physique et technologie, Wiley, New York.
2. J. Singh, Optoélectronique des semi-conducteurs : physique et technologie, McGraw Hill.
3. P. Bhattacharya, Dispositifs optoélectroniques à semi-conducteurs, Pearson Education,
4. J. Singh, Optoélectronique : une introduction aux matériaux et aux dispositifs, Tata McGraw Colline.

Chapitre 3 : Détecteurs optoélectroniques

1. Introduction

Les détecteurs optoélectroniques sont des dispositifs qui convertissent les signaux lumineux en signaux électriques. Ils sont largement utilisés dans diverses applications, notamment les télécommunications, les systèmes d'imagerie, les dispositifs médicaux et les instruments scientifiques. Les détecteurs optoélectroniques exploitent les principes de l'optique et de l'électronique pour détecter et mesurer la lumière sous différentes formes, telles que la lumière visible, l'infrarouge ou le rayonnement ultraviolet.

Il existe plusieurs types de détecteurs optoélectroniques, chacun conçu pour détecter la lumière dans une gamme spécifique de longueurs d'onde et avec différentes caractéristiques de performance. Voici quelques types courants :

1.1. Photodiodes

Les photodiodes sont des dispositifs à semi-conducteurs qui génèrent un courant lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Elles sont largement utilisées pour détecter la lumière dans des applications telles que les systèmes de communication optique, les capteurs de lumière et les lecteurs de codes-barres.

1.2. Phototransistors

Les phototransistors sont similaires aux photodiodes, mais avec une étape d'amplification supplémentaire. Ils offrent une sensibilité et un gain plus élevés par rapport aux photodiodes, ce qui les rend adaptés aux applications en faible lumière.

1.3. Tubes photomultiplicateurs (PMT)

Les PMT sont des détecteurs de lumière extrêmement sensibles qui peuvent amplifier des signaux lumineux faibles de plusieurs ordres de grandeur. Ils se composent d'une photocathode, d'une série de dynodes et d'une anode. Les PMT sont couramment utilisés dans des applications nécessitant une haute sensibilité, telles que la recherche scientifique, la médecine nucléaire et l'astronomie.

1.4. Photodiodes à avalanche (APD)

Les APD sont des dispositifs à semi-conducteurs qui fonctionnent en mode de polarisation inverse, permettant une multiplication interne par avalanche des porteurs générés par la lumière. Ce processus de multiplication offre un gain et une sensibilité plus élevés par rapport aux photodiodes conventionnelles.

1.4. Dispositifs à couplage de charge (CCD)

Les CCD sont des capteurs d'image constitués d'une matrice de pixels qui détectent et enregistrent des informations optiques. Ils sont couramment utilisés dans les appareils photo numériques, les scanners et les dispositifs d'imagerie astronomique.

1.5. Capteurs CMOS

Les capteurs CMOS sont un autre type de capteur d'image utilisé dans de nombreux appareils électroniques grand public. Ils offrent des avantages tels qu'une faible consommation d'énergie, une haute intégration avec d'autres électroniques et des vitesses de lecture rapides.

Ce ne sont là que quelques exemples de détecteurs optoélectroniques. Le choix du détecteur dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que la sensibilité, la vitesse, la plage de longueurs d'onde et le coût.

2. Objectifs

Après avoir étudié cette unité, vous devriez être capable de :

- Comprendre les différents détecteurs optoélectroniques
- Expliquer les photoconducteurs
- Expliquer les différents types de photodiodes
- Comprendre les phototransistors

3. Photoconducteurs

Les photoconducteurs sont des dispositifs optoélectroniques qui présentent des changements de conductivité électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ils sont largement utilisés dans diverses applications, notamment les capteurs de lumière, les photocopieurs, les scanners de codes-barres et les dispositifs d'imagerie. La théorie, le principe de fonctionnement et les applications des photoconducteurs sont expliqués en détail ci-dessous :

3.1. Caractéristiques

Les photoconducteurs sont généralement fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium amorphe, le sulfure de cadmium ou le sulfure de plomb. Ces matériaux possèdent une propriété unique appelée effet photoconducteur, où leur conductivité électrique change lorsque la lumière est absorbée. L'effet photoconducteur provient de la génération et de la recombinaison de porteurs de charge (électrons et trous) au sein du matériau.

"Lorsque l'énergie radiante (photons) frappe un photoconducteur, elle modifie sa conductance (résistance). À mesure que davantage de porteurs sont produits dans le détecteur par l'énergie radiante, la conductance augmente. Lorsqu'un photoconducteur fonctionne dans un mode où un champ électrique appliqué entraîne un courant modulé par des porteurs supplémentaires générés par l'excitation photonique ; en d'autres termes, les quanta de rayonnement sont absorbés et des porteurs de charge libres (photogénérés) sont produits dans le semi-conducteur. La conductivité du semi-conducteur est augmentée grâce à ces porteurs supplémentaires. Le nom de ce phénomène est photoconduction."

"Les semi-conducteurs sont utilisés pour fabriquer des photoconducteurs. Les écarts d'énergie déterminent la réactivité spectrale. Seuls les photons ayant des énergies supérieures à l'écart d'énergie seront absorbés et provoqueront un flux de courant. Des porteurs libres ne peuvent être produits que lorsque les photons de rayonnement ont suffisamment d'énergie pour déplacer les électrons à travers la barrière d'énergie. En conséquence, la capacité d'un semi-conducteur à détecter le rayonnement à une certaine longueur d'onde a une limite."

3.2. Principe de fonctionnement

Lorsque la lumière illumine un photoconducteur, des photons ayant une énergie suffisante peuvent exciter des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi des paires électron-trou. Dans un photoconducteur intrinsèque, les électrons excités deviennent des porteurs libres, contribuant à une augmentation de la conductivité électrique du matériau. Cependant, les trous laissés dans la bande de valence contribuent également à la conductivité. Voir figure 1.

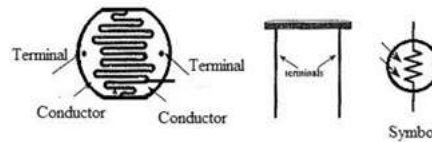


Figure1 : Construction et symbole du photoconducteur

L'augmentation de la conductivité due à l'exposition à la lumière peut être expliquée par la création de porteurs de charge supplémentaires qui sont disponibles pour participer à la conduction électrique. La concentration des porteurs de charge est directement proportionnelle à l'intensité de la lumière, ce qui signifie que la conductivité du photoconducteur augmente à mesure que l'intensité lumineuse augmente.

La liaison covalente peut libérer un électron lorsqu'une fréquence optique de $\nu = E_g/h$, est présente. En termes de longueur d'onde, $\lambda_c = 1.24/E_g$, où λ_c est la longueur d'onde maximale de la lumière capable de provoquer une transition électronique. L'écart d'énergie est exprimé en unités d'électronvolts (eV).

Dans l'obscurité ou dans des conditions de faible luminosité, le photoconducteur a moins de porteurs libres, ce qui entraîne une conductivité plus faible. Lorsque la lumière est appliquée, l'augmentation du nombre de porteurs libres améliore la conductivité du photoconducteur, lui permettant de conduire davantage de courant électrique. Les photoconducteurs peuvent être classés en deux types selon leur comportement de conductivité, voir figure 2

➤ **Photoconducteurs intrinsèques** : Les photoconducteurs intrinsèques sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs avec une faible concentration d'impuretés. Ils présentent une conductivité accrue lorsqu'ils sont exposés à la lumière en raison de la génération de paires électron-trou.

➤ **Photoconducteurs extrinsèques** : Les photoconducteurs extrinsèques sont dopés avec des impuretés pour améliorer leur conductivité. Les impuretés introduisent des niveaux d'énergie à l'intérieur de la bande interdite du matériau, permettant une meilleure réponse photo. Le dopage peut être effectué avec des éléments tels que l'arsenic, l'antimoine ou l'indium.

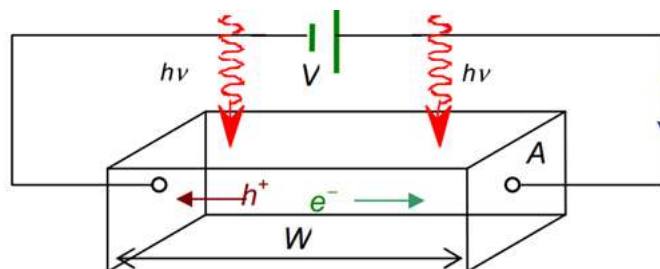


Figure 2 : Structure schématique des photoconducteurs

3.3. Applications

Capteurs de lumière : Les photoconducteurs sont couramment utilisés comme capteurs de lumière dans diverses applications. Ils peuvent détecter la présence et l'intensité de la lumière et la convertir en un signal électrique. Ces capteurs se trouvent dans les systèmes d'éclairage automatique, les photomètres et les interrupteurs optiques.

Photocopieurs : Dans les photocopieurs, les photoconducteurs jouent un rôle crucial dans le processus de reproduction électrostatique. Le photoconducteur est chargé, et lorsqu'il est exposé à la lumière, il devient conducteur dans les zones éclairées. Cela permet le transfert de particules de toner pour créer une réplique du document original.

Dispositifs d'imagerie : Les photoconducteurs sont utilisés dans des dispositifs d'imagerie tels que les scanners à plat et les machines à fax. Ces dispositifs utilisent le photoconducteur pour capturer l'image optique et la convertir en un signal électrique, qui peut être traité et stocké numériquement.

Scanners de codes-barres : Les scanners de codes-barres utilisent des photoconducteurs pour détecter la lumière réfléchie par le code-barres. La réflectivité variable des lignes du code-barres modifie l'intensité lumineuse tombant sur le photoconducteur, permettant au scanner de décoder le code-barres.

Xérographie : Les photoconducteurs sont un composant fondamental des processus xérographiques utilisés dans les imprimantes laser et les photocopieurs. Dans ces dispositifs, un tambour photoconducteur est utilisé pour former une image électrostatique, qui est ensuite développée et transférée sur papier.

3.3.1. Avantages des photoconducteurs :

- **Haute sensibilité à la lumière :** Les photoconducteurs peuvent présenter une grande sensibilité même à de faibles niveaux de lumière, permettant une détection et une mesure précises.
- **Temps de réponse rapide :** Les photoconducteurs peuvent répondre rapidement aux changements d'intensité lumineuse, permettant des applications en temps réel.
- **Large gamme spectrale :** Différents types de photoconducteurs peuvent être conçus pour détecter la lumière sur une large gamme de longueurs d'onde, y compris visible, ultraviolet et infrarouge.

3.3.2. Limitations des photoconducteurs:

- **Courant sombre :** Les photoconducteurs peuvent présenter une petite quantité de courant électrique même en l'absence de lumière, connu sous le nom de courant sombre. Cela peut affecter la précision des mesures de lumière et peut nécessiter des techniques de traitement de signal supplémentaires.
- **Réponse non linéaire :** La conductivité des photoconducteurs peut ne pas toujours avoir une relation linéaire avec l'intensité lumineuse, nécessitant une calibration pour des mesures précises.
- **Temps de récupération lent :** Dans certains photoconducteurs, il peut y avoir un délai pour revenir à leur état d'origine après exposition à la lumière, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications nécessitant des temps de réponse rapides.

Les photoconducteurs jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'optoélectronique, permettant des avancées significatives dans des technologies variées. Leur capacité à détecter et à mesurer la lumière les rend indispensables dans de nombreux secteurs, allant de la sécurité à l'énergie renouvelable.

4. Photodiode à jonction

Les photodiodes à jonction sont un type de dispositif semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse en courant électrique. Elles sont largement utilisées comme capteurs de lumière dans diverses applications, y compris les systèmes de communication optique, les dispositifs d'imagerie et les systèmes de détection de lumière. Les photodiodes à jonction fonctionnent selon le principe de l'effet photoélectrique interne et utilisent les caractéristiques d'une jonction p-n. Voici une explication détaillée des photodiodes à jonction :

4.1. Structure

Les photodiodes à jonction sont généralement construites à l'aide d'une jonction p-n, qui est formée en joignant un matériau semi-conducteur de type p (avec un excès de porteurs de charge positifs ou « trous ») et un matériau semi-conducteur de type n (avec un excès de porteurs de charge négatifs ou électrons). La jonction p-n est soigneusement conçue pour avoir des niveaux de dopage et des propriétés matérielles spécifiques afin d'optimiser ses capacités de détection de lumière. Voir figure 3.

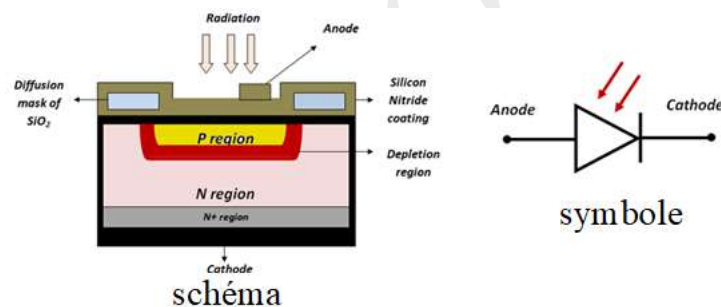


Figure 3 : Photodiode

4.2. Principe de Fonctionnement

Lorsque la lumière frappe la surface d'une photodiode à jonction, des photons ayant une énergie suffisante peuvent être absorbés, entraînant la création de paires électron-trou dans la région de déplétion de la jonction p-n. La région de déplétion est une zone près de la jonction où aucun porteur libre n'est présent en raison de la diffusion des porteurs du côté p vers le côté n et vice versa.

Les photons absorbés transfèrent leur énergie aux électrons dans la bande de valence, leur permettant de se libérer de leurs liaisons et de devenir des porteurs libres. Les électrons se déplacent vers le côté n de la jonction, tandis que les trous se déplacent vers le côté p, créant ainsi un courant photo-généré. Voir figure 4.

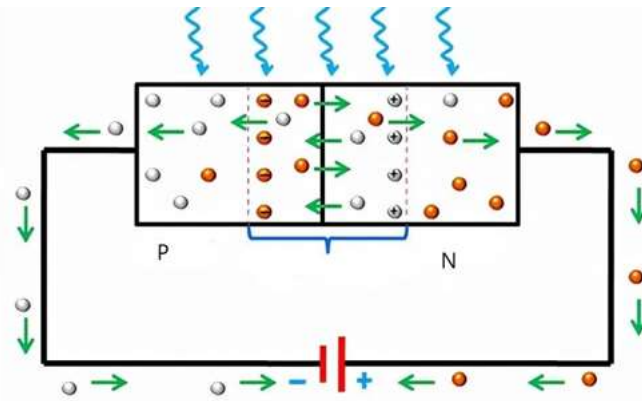


Figure 4: Principe de fonctionnement d'une photodiode

Le concept clé dans une photodiode à jonction est le champ électrique interne créé par la jonction p-n. Ce champ électrique sépare les paires électron-trou générées par la lumière, empêchant la recombinaison et permettant la collecte des charges sous forme de courant. Plus le champ électrique interne est grand, plus la collecte des charges est efficace et plus la sensibilité de la photodiode est élevée.

Pour améliorer les performances des photodiodes à jonction, elles sont souvent utilisées en mode de polarisation inverse. L'application d'une tension de polarisation inverse augmente la largeur de la région de déplétion, améliorant ainsi la sensibilité de la photodiode en élargissant la zone disponible pour la collecte des charges.

4.3. Responsivité et efficacité quantique

Les performances d'une photodiode à jonction sont caractérisées par sa responsivité et son efficacité quantique.

➤ **Responsivité** : La responsivité fait référence au rapport du courant de sortie à la puissance optique incidente. Elle est généralement exprimée en ampères par watt (A/W) et indique la sensibilité de la photodiode. Des valeurs de responsivité plus élevées indiquent une plus grande sensibilité à la lumière.

➤ **Efficacité quantique** : L'efficacité quantique représente le rapport entre le nombre de porteurs photogénérés et le nombre de photons incidents. C'est une mesure de l'efficacité avec laquelle la photodiode convertit les photons en électrons. L'efficacité quantique est exprimée en pourcentage et peut varier en fonction de la longueur d'onde de la lumière et des propriétés matérielles de la photodiode.

4.4. Applications

Les photodiodes à jonction trouvent une utilisation répandue dans diverses applications nécessitant la détection et la mesure de la lumière. Quelques applications courantes incluent :

➤ **Systèmes de communication optique** : Les photodiodes à jonction sont utilisées comme récepteurs dans les systèmes de communication par fibre optique pour convertir les signaux optiques en signaux électriques.

➤ **Dispositifs d'imagerie** : Les photodiodes à jonction sont utilisées dans des dispositifs d'imagerie tels que les caméras numériques, les scanners et les capteurs CCD (Dispositif à Couplage de Charge). Elles capturent et convertissent les signaux lumineux en signaux électriques pour la formation et le traitement d'images.

➤ **Systèmes de Détection de Lumière** : Les photodiodes à jonction sont employées dans des systèmes de détection de lumière pour des applications telles que la surveillance environnementale, l'automatisation industrielle et l'instrumentation scientifique.

➤ **Dispositifs Médicaux** : Les photodiodes sont utilisées dans des équipements médicaux tels que les oxymètres de pouls pour mesurer les niveaux de saturation en oxygène dans le sang.

4.4.1. Avantages

➤ **Haute Sensibilité** : Les photodiodes à jonction offrent une haute sensibilité aux signaux lumineux, permettant une détection précise même dans des conditions de faible luminosité.

➤ **Temps de réponse rapide** : Les photodiodes à jonction peuvent réagir rapidement aux changements d'intensité lumineuse, les rendant adaptées aux applications nécessitant des mesures en temps réel.

➤ **Large plage spectrale** : Différents types de photodiodes à jonction.

5. Photodiode PIN

Les photodiodes PIN (*P-type, Intrinsic, and N-type*) sont un type de dispositif semi-conducteur largement utilisé comme détecteur de lumière dans diverses applications, y compris les systèmes de communication optique, les dispositifs d'imagerie et les applications de détection de lumière. Le nom "PIN" est dérivé de la structure du dispositif, qui se compose d'une région de type p, d'une région intrinsèque (non dopée) et d'une région de type n. Les photodiodes PIN sont conçues pour offrir une haute sensibilité, un faible bruit et un temps de réponse rapide. Une jonction PN modifiée appelée photodiode PIN est utilisée pour des applications particulières. L'application initiale de la diode à jonction PN était comme redresseur haute puissance et basse fréquence en 1952 après son développement dans les années 1940. La tension de claquage pour des applications haute tension peut être considérablement augmentée par la présence d'une couche intrinsèque. Lorsque le système utilise des fréquences élevées dans le spectre des ondes radio et micro-ondes, cette couche intrinsèque offre également des caractéristiques intéressantes. Une diode PIN est une forme spécifique de diode avec une grande région semi-conductrice intrinsèque non dopée, coincée entre une région de type P et une région de type N. En raison de leur rôle en tant que contacts ohmiques, ces régions sont généralement fortement dopées. Contrairement à une diode p-n classique, la zone intrinsèque plus large n'est pas affectée. La diode est fabriquée.

5.1. Structure

Une photodiode PIN est construite en utilisant trois couches de matériaux semi-conducteurs : une couche de type p (p+), une couche intrinsèque et une couche de type n (n+). Les couches sont généralement fabriquées à partir de matériaux tels que le silicium ou le germanium. La couche intrinsèque, qui est coincée entre les couches p et n, a de faibles niveaux de dopage et fournit la région active pour l'absorption de la lumière. Voir figure 5.

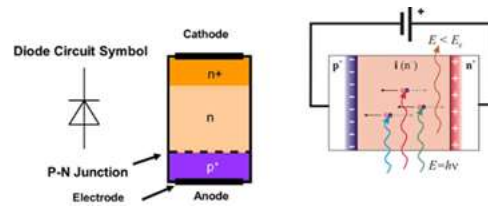


Figure 5: Symbole et structure d'une diode PIN

5.2. Principe de fonctionnement

Lorsque la lumière pénètre dans le dispositif par la fenêtre transparente ou par l'arrière, les photons ayant une énergie suffisante peuvent être absorbés dans la région intrinsèque de la photodiode PIN. Les photons absorbés transfèrent leur énergie aux électrons dans la bande de valence, créant des paires électron-trou. Le champ électrique présent dans la région de déplétion sépare ces porteurs générés par la lumière.

Les régions de type p et n de la photodiode PIN sont fortement dopées pour fournir un grand nombre de porteurs libres. La forte concentration de dopage entraîne une région de déplétion plus large, ce qui améliore la capacité du dispositif à absorber les photons et augmente la probabilité de collecte des porteurs.

La région intrinsèque, avec sa faible concentration de dopage, remplit deux fonctions principales. Premièrement, elle réduit le nombre de centres de recombinaison, minimisant ainsi la perte de porteurs et maximisant l'efficacité de collecte. Deuxièmement, la région intrinsèque fournit une région de déplétion plus large, permettant une plus grande profondeur d'absorption et améliorant la sensibilité du dispositif à la lumière.

Lorsque la photodiode PIN est polarisée inversement en appliquant une tension à travers les régions p et n (avec le côté p connecté à la borne positive), un champ électrique est établi à travers la région intrinsèque. Ce champ électrique accélère les porteurs générés par la lumière vers les électrodes respectives, créant ainsi un photocourant.

Le photocourant généré est proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. À mesure que davantage de photons sont absorbés, davantage de paires électron-trou sont générées, entraînant un photocourant plus élevé.

5.3. Avantages des Photodiodes PIN

- Haute sensibilité : Les photodiodes PIN offrent une haute sensibilité à la lumière, ce qui les rend adaptées aux applications en faible luminosité.
- Faible bruit : La faible concentration de dopage dans la région intrinsèque réduit le nombre de centres de recombinaison, entraînant ainsi des niveaux de bruit faibles.
- Temps de réponse rapide : Les photodiodes PIN ont un temps de réponse relativement rapide, leur permettant de détecter et de répondre rapidement aux variations de l'intensité lumineuse.
- Large gamme spectrale : Les photodiodes PIN peuvent être conçues pour détecter une large gamme de longueurs d'onde, y compris le visible, l'infrarouge et l'ultraviolet.

5.4. Applications

Les photodiodes PIN sont largement utilisées dans diverses applications, notamment :

➤ Systèmes de communication optique : Elles sont couramment utilisées comme récepteurs dans les systèmes de communication par fibre optique pour convertir les signaux optiques en signaux électriques.

➤ Dispositifs d'imagerie : Les photodiodes PIN sont utilisées dans des caméras numériques, des capteurs CCD (Dispositif à Couplage de Charge) et des dispositifs d'imagerie pour capturer et convertir les signaux lumineux en signaux électriques pour la formation et le traitement d'images.

➤ Systèmes de détection de lumière : Les photodiodes PIN sont employées dans des systèmes de détection de lumière pour des applications telles que la surveillance environnementale, l'automatisation industrielle et l'instrumentation scientifique.

➤ Télédétection : Elles sont utilisées dans des applications de télédétection pour mesurer et analyser les propriétés de la lumière réfléchie ou émise par la surface de la Terre ou l'atmosphère.

➤ Dispositifs médicaux : Les photodiodes PIN sont utilisées dans des équipements médicaux tels que les oxymètres de pouls et les glucomètres pour la détection et la mesure de la lumière.

Dans l'ensemble, les photodiodes PIN offrent une excellente sensibilité, un faible bruit et un temps de réponse rapide, ce qui en fait un choix populaire pour une large gamme d'applications de détection et de mesure de la lumière.

6. Diodes à hétérojonction

Les diodes à hétérojonction, également connues sous le nom de diodes à hétérostructure, sont des dispositifs semi-conducteurs formés en joignant deux matériaux semi-conducteurs différents avec des largeurs de bande dissemblables. La jonction entre ces matériaux crée une hétérojonction, qui présente des propriétés uniques non trouvées dans les diodes à homojonction. Les diodes à hétérojonction sont utilisées dans diverses applications, y compris l'électronique haute vitesse, l'optoélectronique et les cellules solaires. Voici une explication détaillée des aspects avancés des diodes à hétérojonction :

6.1. Structure et types de diodes à hétérojonction

Les diodes à hétérojonction se composent de deux couches semi-conductrices avec des énergies de bande interdites différentes empilées ensemble pour former une jonction. Les matériaux utilisés pour ces couches peuvent être des semi-conducteurs composés tels que GaAs (arséniure de gallium), InP (phosphure d'indium), GaN (nitrure de gallium), ou d'autres combinaisons. Il existe différents types de diodes à hétérojonction en fonction de la combinaison de matériaux utilisés. Certains types courants incluent :

➤ Diodes à hétérojonction à couche strainée (déformée) : Dans les diodes à hétérojonction à couche strainée, une couche semi-conductrice est déposée sur une autre avec un décalage de réseau. La contrainte résultant du décalage de réseau modifie la structure de bande électronique, conduisant à des propriétés de transport de porteurs améliorées.

➤ Diodes à Hétérojonction de Type I : Les diodes à hétérojonction de type I ont des bandes de conduction et de valence qui s'alignent à travers la jonction. Par conséquent, la majorité des porteurs sont confinés d'un côté de la jonction, entraînant des propriétés de transport de charge uniques.

➤ **Diodes à Hétérojonction de Type II** : Les diodes à hétérojonction de type II ont des bandes de conduction et de valence qui ne s'alignent pas à travers la jonction. Ce décalage de bande provoque le confinement des porteurs dans différentes régions de l'hétérojonction, permettant diverses applications telles que la séparation efficace des électrons et des trous dans les dispositifs photovoltaïques.

6.2. Principe de fonctionnement et caractéristiques avancées

Les propriétés uniques des diodes à hétérojonction proviennent du décalage de bande et de l'alignement de la bande d'énergie à l'hétérojonction. Voici quelques caractéristiques avancées et principes de fonctionnement des diodes à hétérojonction :

➤ **Ingénierie de bande** : Les diodes à hétérojonction permettent un contrôle précis de la structure de bande électronique en sélectionnant des matériaux appropriés avec des énergies de bande interdites spécifiques. Cette ingénierie de bande permet la conception de dispositifs avec des propriétés sur mesure telles qu'un confinement amélioré des porteurs, des courants de fuite réduits et un transport de porteurs amélioré.

➤ **Transport amélioré des porteurs** : Les diodes à hétérojonction peuvent présenter des caractéristiques de transport de porteurs améliorées par rapport aux diodes à homojonction. Cela est réalisé en sélectionnant soigneusement des matériaux avec des largeurs de bande différentes, des masses efficaces et des mobilités de porteurs. Le confinement des porteurs et la réduction de la diffusion peuvent entraîner des vitesses d'électrons ou de trous plus élevées, conduisant à des vitesses de commutation plus rapides et à une performance améliorée des dispositifs.

➤ **Réduction de la tension directe** : Les diodes à hétérojonction peuvent avoir des chutes de tension directe plus faibles par rapport aux diodes à homojonction. Le décalage de bande à l'hétérojonction facilite une injection de porteurs plus efficace à travers la jonction, entraînant une résistance réduite et une dissipation de puissance plus faible.

➤ **Contrôle du tunneling et de la hauteur de barrière** : Les diodes à hétérojonction avec des énergies de bande interdites variables peuvent présenter différentes hauteurs de barrière à l'hétérojonction. Cette caractéristique permet un contrôle précis des processus de tunneling (encapsulation) des porteurs, permettant des applications telles que des diodes à tunneling résonnant (RTDs) avec des performances en haute fréquence.

6.3. Applications

Les diodes à hétérojonction trouvent des applications dans divers dispositifs électroniques et optoélectroniques avancés, notamment :

➤ **Électronique haute vitesse** : Les transistors bipolaires à hétérojonction (HBT) et les transistors à mobilité électronique élevée (HEMT) utilisent des diodes à hétérojonction pour atteindre un fonctionnement haute fréquence et une faible consommation d'énergie. Ces dispositifs sont utilisés dans les télécommunications, les amplificateurs micro-ondes et les circuits intégrés haute vitesse.

➤ **Optoélectronique** : Les diodes à hétérojonction jouent un rôle crucial dans le développement de dispositifs optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes (LED), les diodes laser et les photodétecteurs. L'hétérojonction permet une injection et un

confinement efficaces des porteurs, entraînant une amélioration de l'efficacité et des performances des dispositifs.

➤ Cellules solaires : Les cellules solaires à hétérojonction, telles que la cellule solaire à hétérojonction avec couche mince intrinsèque (HIT), utilisent le décalage de bande et les propriétés de confinement des porteurs des diodes à hétérojonction pour atteindre de hautes efficacités de conversion. L'hétérojonction permet une séparation efficace des charges, une réduction de la recombinaison et une amélioration de l'absorption de lumière, conduisant à de meilleures performances des cellules solaires.

➤ Dispositifs à puits quantiques : Les diodes à hétérojonction sont utilisées dans des dispositifs à puits quantiques tels que les lasers à puits quantiques et les lasers à cascade quantique. Le contrôle précis de la structure de bande et du confinement des porteurs permet la création d'états d'énergie étroits et l'émission efficace de photons à des longueurs d'onde spécifiques.

En résumé, les diodes à hétérojonction offrent des caractéristiques et des capacités avancées grâce à la combinaison de différents matériaux semi-conducteurs. Leur alignement de bande unique et leurs propriétés de confinement des porteurs les rendent bien adaptées à l'électronique haute vitesse, aux dispositifs optoélectroniques et aux cellules solaires, entre autres applications.

7. photodiodes à avalanche

Les photodiodes à avalanche (APDs, *avalanche photodiodes*) sont des dispositifs semi-conducteurs spécialisés conçus pour détecter la lumière avec une haute sensibilité en utilisant l'effet avalanche. Les APDs sont largement utilisées dans des applications nécessitant une détection en faible lumière, telles que les systèmes de communication optique, les systèmes lidar et l'instrumentation scientifique. Elles offrent des niveaux de sensibilité plus élevés par rapport aux photodiodes standard. Voici une explication détaillée des aspects avancés des photodiodes avalanche :

7.1. Structure et principe de fonctionnement

Une photodiode avalanche se compose d'une jonction p-n, similaire à une photodiode ordinaire, mais avec une région supplémentaire appelée région d'avalanche. La région d'avalanche est généralement formée par un dopage élevé de la couche de type p ou n, créant un champ électrique élevé. La photodiode PIN et la photodiode avalanche sont toutes deux construites de manière similaire. Cette diode comprend deux régions fortement dopées et deux régions légèrement dopées. P+ et N+ indiquent les régions fortement dopées dans ce cas, tandis que I et P indiquent les régions légèrement dopées. Voir figure 6

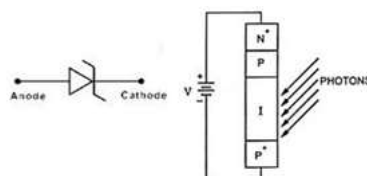


Figure 6 : Symbole et structure de la photodiode à avalanche

Comparée à d'autres photodiodes, celle-ci fonctionne dans des conditions de polarisation inverse élevée, permettant la multiplication par avalanche des porteurs de charge générés par l'impact de la lumière ou des photons, ce qui permet d'augmenter le gain de la photodiode plusieurs fois. Dans la région intrinsèque, la largeur de la zone de déplétion est comparativement plus mince dans cette diode que dans la photodiode PIN.

Le principe de fonctionnement des photodiodes avalanche (APDs) est basé sur le processus de multiplication par avalanche, qui se produit lorsqu'une tension de polarisation inverse élevée est appliquée à la jonction p-n. Lorsque des photons frappent la région de déplétion de l'APD, ils génèrent des paires électron-trou. Ces porteurs de charge sont accélérés par le champ électrique élevé dans la région d'avalanche.

Le champ électrique est suffisamment élevé pour provoquer une ionisation par impact, où les porteurs accélérés acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser d'autres atomes, créant ainsi des paires électron-trou supplémentaires. Ce processus conduit à un effet d'avalanche, où le nombre de porteurs augmente de manière exponentielle à mesure qu'ils subissent des événements d'ionisation successifs.

La multiplication par avalanche entraîne une augmentation significative du photocourant par rapport à une photodiode ordinaire. Cela permet aux APDs d'atteindre des niveaux de sensibilité plus élevés et des limites de détection plus basses, les rendant adaptées aux applications où des signaux lumineux faibles doivent être détectés. Voir figure 7.

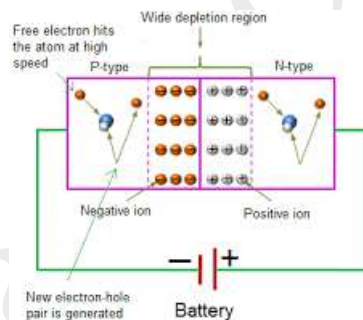


Figure 7: Principe de fonctionnement d'une diode a avalanche

7.2. Caractéristiques et fonctions avancées

- **Gain :** Le processus de multiplication par avalanche dans les APDs introduit un gain, qui est le rapport entre le courant de sortie et le courant d'entrée. Les APDs peuvent atteindre des valeurs de gain allant de 10 à plusieurs centaines, voire des milliers. Ce gain permet aux APDs de détecter des signaux lumineux faibles qui seraient difficiles à percevoir avec des photodiodes ordinaires.

- **Haute sensibilité :** Les APDs offrent une sensibilité supérieure par rapport aux photodiodes conventionnelles. La multiplication par avalanche permet la détection de niveaux de lumière faibles, ce qui les rend idéales pour des applications où les rapports signal-sur-bruit sont cruciaux.

- **Caractéristiques de bruit :** Les APDs présentent des caractéristiques de bruit différentes de celles des photodiodes ordinaires. Elles sont sensibles au bruit excessif causé par le processus d'avalanche lui-même. Ce bruit excessif peut être quantifié par le facteur de

bruit excessif (F). Des efforts sont déployés pour réduire le bruit excessif en optimisant la conception et les conditions de fonctionnement des APDs.

- Haute vitesse : Les photodiodes avalanche peuvent atteindre une réponse à haute vitesse grâce à leur mécanisme de gain interne. Elles sont capables de détecter des signaux optiques rapides et peuvent être utilisées dans des systèmes de communication optique à haute vitesse.

- Fonctionnement en mode Geiger : Les APDs peuvent fonctionner en mode Geiger, où la détection d'un seul photon est possible. En mode Geiger, l'APD fonctionne dans un état activé lorsqu'un photon est détecté, entraînant un signal de sortie important. Ce mode est particulièrement utile pour des applications telles que le comptage de photons uniques et la distribution de clés quantiques.

7.3. Applications

Les photodiodes avalanche trouvent des applications dans divers domaines, notamment :

- Systèmes de communication optique : Les APDs sont utilisées comme récepteurs à haute sensibilité dans des systèmes de communication optique à longue portée. Elles permettent d'étendre les distances de transmission et d'améliorer la qualité du signal.

- Systèmes Lidar : Les APDs sont utilisées dans les systèmes Lidar pour des mesures de distance à longue portée et de haute précision, la détection atmosphérique et la détection d'objets.

- Imagerie et détection : Les APDs peuvent être utilisées dans des applications d'imagerie à faible luminosité, telles que les caméras de vision nocturne, les systèmes de surveillance et les instruments scientifiques.

- Optique quantique et comptage de photons : Les APDs fonctionnant en mode Geiger sont employées dans des expériences d'optique quantique, le comptage de photons uniques et d'autres applications nécessitant la détection de photons uniques.

- En résumé, les photodiodes avalanche offrent des caractéristiques avancées telles que le gain, une haute sensibilité et la capacité de détecter des niveaux de lumière faibles. Leur conception et leur fonctionnement uniques les rendent bien adaptées aux applications nécessitant une détection de lumière haute performance dans des domaines tels que les communications, la détection et l'optique quantique.

8. Phototransistor

Dans un circuit électrique moderne, différents types de capteurs sont utilisés. Le photosenseur est l'un de ces capteurs, utilisé pour détecter et surveiller l'intensité lumineuse. Bien qu'il fonctionne de manière similaire à une photodiode en tant que type de photosenseur, un phototransistor possède un facteur d'amplification. En utilisant l'intensité de la lumière, il augmente le courant entre les bornes.

Les phototransistors sont des dispositifs semi-conducteurs largement utilisés pour la détection et l'amplification de la lumière. Ils sont essentiellement des transistors avec une région sensible à la lumière, leur permettant de convertir des signaux lumineux en signaux électriques. Les phototransistors offrent une sensibilité et un gain supérieurs par rapport aux photodiodes, ce qui les rend adaptés aux applications où des signaux lumineux faibles doivent être détectés et amplifiés.

Le phototransistor a été inventé en 1950 dans les laboratoires Bell Téléphone par le Dr. John Northrup Shive. Il était actionné par la lumière plutôt que par un courant électrique. Voici une explication détaillée des phototransistors :

8.1. Structure et principe de fonctionnement

Un phototransistor est un interrupteur contrôlé par la lumière qui active un circuit et amplifie le courant lorsqu'il est exposé à la lumière. Les phototransistors sont généralement construits à partir de trois couches semi-conductrices : l'émetteur, la base et le collecteur. La région de base est souvent plus large et moins fortement dopée par rapport aux transistors conventionnels pour améliorer l'absorption de la lumière. Lorsqu'il est exposé à la lumière, un phototransistor active un interrupteur de circuit et augmente le courant. Une base sensible à la lumière au bas d'un dispositif semi-conducteur à trois couches est visible. Le courant entre l'émetteur et le collecteur est amplifié proportionnellement à l'intensité de la lumière lorsqu'elle frappe la base, augmentant le courant fourni par un courant de base. Ils sont utilisés pour détecter des impulsions lumineuses rapides et minimes. Il est similaire au BJT, sauf pour la base exposée au lieu d'une borne. Voir figure 8.

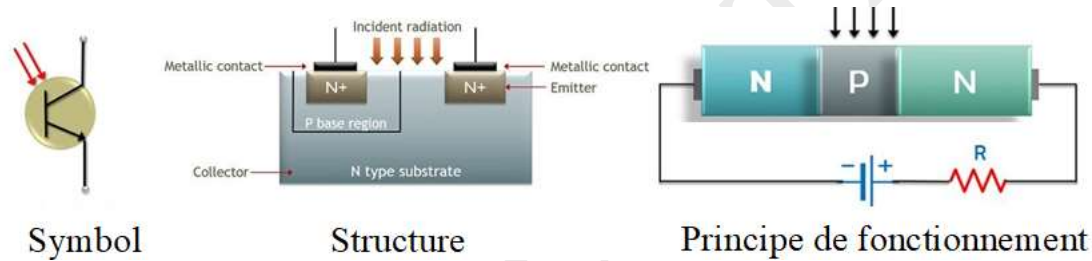


Figure 8: Phototransistor

8.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un phototransistor est similaire à celui d'un transistor ordinaire. Lorsque la lumière frappe la région de base, elle génère des paires électron-trou. Les photons transfèrent leur énergie aux électrons de valence dans le matériau, les amenant à se libérer et à créer des porteurs de charge mobiles. Si la jonction base-émetteur est polarisée en direct, les électrons du courant base-émetteur circulent dans la région de base. La présence de lumière augmente le nombre de porteurs libres dans la région de base, entraînant une augmentation du courant de base. Par conséquent, le phototransistor est 100 fois plus sensible que la photodiode. Le courant de base est généré selon le principe de l'effet photovoltaïque. Le courant de base amplifié contrôle le flux de courant du collecteur vers l'émetteur, ce qui entraîne un courant de sortie amplifié. Le courant de collecteur est proportionnel à l'intensité de la lumière incidente, permettant au phototransistor de détecter et d'amplifier les signaux lumineux.

Dans les phototransistors NPN, le collecteur est maintenu à une tension plus élevée par rapport à l'émetteur pendant la polarisation, tandis que dans les phototransistors PNP, le collecteur est maintenu à une tension plus basse que l'émetteur. De plus, la jonction collecteur-base est polarisée en inverse.

Dans le cas des phototransistors à trois broches, la borne de base doit rester déconnectée ou ouverte, sinon, il fonctionnera comme un transistor normal.

Un petit courant de saturation inverse ou courant de fuite, connu sous le nom de courant noir, existe en l'absence de lumière et est directement proportionnel à la température, tout comme dans les photodiodes. L'effet photovoltaïque crée un courant de base lorsque la lumière frappe le phototransistor, concentrant la lumière sur la jonction collecteur-base. Le courant de base est amplifié des centaines de fois.

8.3. Modes de fonctionnement

Le phototransistor, comme le BJT, peut fonctionner en mode linéaire ou actif et en mode commuté.

➤ Mode linéaire ou actif : Le courant de sortie est directement proportionnel à l'intensité de la lumière incidente lorsqu'il fonctionne en mode linéaire. En termes pratiques, la réponse prend la forme d'une courbe et n'est pas très linéaire. Par conséquent, le terme correct pour ce mode est mode actif. Ce mode est utilisé pour son facteur d'amplification. Le gain du transistor détermine combien le courant de base généré est amplifié.

➤ Mode commuté : En mode commuté, le phototransistor fonctionne dans l'un des deux états : "Off" ou "On", tout comme un interrupteur. C'est pourquoi on l'appelle mode commuté. En raison de la réponse non linéaire du phototransistor à la lumière, ce mode est généralement utilisé. L'appareil est considéré comme étant en état "Off" lorsqu'il n'y a pas de courant de base et pas de lumière. Le courant de sortie augmente à mesure que l'intensité lumineuse augmente. Il arrive un moment où l'appareil est saturé et l'augmentation de l'intensité lumineuse n'a aucun effet sur le courant de sortie. On dit alors que l'appareil est en état "On".

Tout comme un interrupteur numérique, il fonctionne sur deux niveaux. En raison de la nature non linéaire de la région active, ce mode est utilisé pour le décodage, l'envoi, la détection d'objets, la conversion de signaux, etc.

8.4. Configuration de Circuit

Le phototransistor peut être utilisé dans une configuration d'émetteur commun ou de collecteur commun. Voir figure 9.

➤ Émetteur commun : Dans cette configuration, comme montré dans la figure ci-dessous, le collecteur est connecté à la source de tension via une résistance de charge R_c , et la sortie est obtenue du collecteur. Avec la détection de la lumière, la tension de sortie passe d'un état haut à un état bas. C'est une configuration fréquemment utilisée qui agit comme un amplificateur.

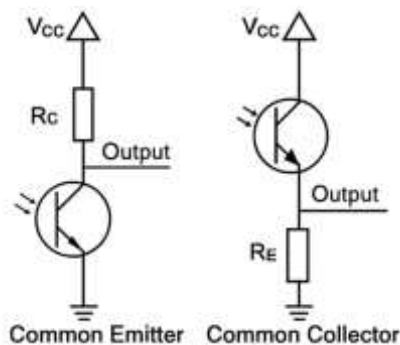


Figure 9: configuration du phototransistor

8.5. Types de Phototransistors

Il existe deux principaux types de phototransistors :

- Phototransistors NPN : Dans les phototransistors NPN, la région de base est de type p, tandis que les régions émetteur et collecteur sont de type n. L'absorption de lumière se produit dans la région de base, et les porteurs générés contribuent au courant de base, qui contrôle le courant de collecteur.
- Phototransistors PNP : Dans les phototransistors PNP, la région de base est de type n, tandis que les régions émetteur et collecteur sont de type p. Les principes de fonctionnement et d'absorption de lumière sont similaires à ceux des phototransistors NPN, mais les types de porteurs sont inversés.
- Phototransistor FET : Un phototransistor à effet de champ (FET) est un dispositif qui possède un canal sensible à la lumière mais sans jonction. Il peut être de type N ou de type P. Les deux bornes sont appelées Source et Drain. D'un point de vue constructif, le drain et la source sont interchangeables. Par rapport à la source, le drain est positif. Le courant de drain est contrôlé par la lumière incidente. En raison de son commutateur rapide, il peut être utilisé dans des applications à haute fréquence. Cependant, il permet un faible courant et un faible gain.

8.6. Paramètres de performance

Il existe certains paramètres qui définissent la performance du phototransistor. Ces paramètres doivent être pris en compte lors du choix d'un phototransistor pour garantir une performance économique.

- Courant de collecteur I_C : Le courant de collecteur est le courant de charge maximal autorisé. Si le courant de charge est dépassé, le phototransistor pourrait subir des dommages permanents.
- Courant de base : Le courant de base représente le courant produit par la lumière incidente. Il dépend de la taille de la région de base. La capacité, qui affecte la vitesse de commutation, augmente à mesure que la surface de la région de base augmente.
- Courant noir I_D : Il s'agit du courant de fuite entre le collecteur et l'émetteur en l'absence de lumière. Il est très faible, en milliampères. Idéalement, il ne devrait pas conduire de courant. Mais en raison de la température, il ne s'éteint jamais complètement. Le courant noir affecte inversement la performance.
- Tension de claquage V_{CE} : C'est la tension maximale appliquée entre le collecteur et l'émetteur. Si la tension appliquée dépasse la tension de claquage, le dispositif est endommagé de façon permanente.
- Tension de claquage V_{EC} : C'est la tension maximale autorisée appliquée entre l'émetteur et le collecteur. Elle est relativement beaucoup plus basse que la tension de claquage V_{CE} .
- Longueur d'onde : Différents matériaux photoconducteurs montrent différentes réponses à un spectre de longueurs d'onde. Ils présentent une haute sensibilité et une efficacité de conversion élevée dans une plage étroite de longueurs d'onde. Par conséquent, la longueur d'onde de la lumière incidente est très importante pour obtenir une conversion d'énergie plus élevée.

➤ Linéarité : La linéarité signifie à quel point le courant de sortie varie de manière linéaire avec le changement d'intensité lumineuse. Une réponse linéaire est précise et sans erreur. Il est donc nécessaire de connaître la linéarité du dispositif.

8.7. Caractéristiques et avantages

La relation entre la tension collecteur-émetteur V_{CE} et le courant de collecteur I_C à différents niveaux d'intensité lumineuse est montrée dans le graphique suivant. La tension entre le collecteur et l'émetteur est représentée sur l'axe des x, tandis que le courant de collecteur est représenté sur l'axe des y. voir figure 10.

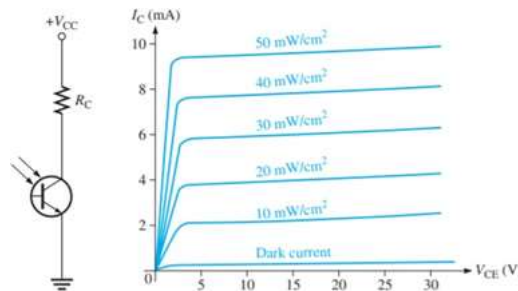


Figure 10 : Caractéristique du collecteur du phototransistor

Sa courbe caractéristique est similaire à celle d'un BJT, avec la différence que le gain est contrôlé par l'intensité de la lumière. Avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, le courant de collecteur augmente. Il existe un petit courant de fuite ou courant noir en l'absence de lumière.

La réponse spectrale du phototransistor montre qu'une petite plage de longueurs d'onde est celle où les phototransistors fonctionnent le mieux, car ils sont fabriqués à partir d'un matériau photoconducteur qui ne réagit pas à toutes les longueurs d'onde. Le graphique ci-dessous illustre comment la réponse spectrale d'un phototransistor est liée à son pourcentage de réponse en fonction de la longueur d'onde. Voir figure 11.

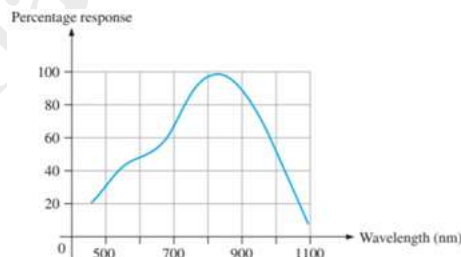


Fig.3.13 : Réponse spectral d'un phototransistor

Les avantages sont:

➤ Sensibilité supérieure : Les phototransistors offrent une sensibilité supérieure par rapport aux photodiodes. L'amplification fournie par la configuration du transistor permet de détecter des signaux lumineux plus faibles.

➤ Amplification : Les phototransistors peuvent amplifier le faible courant généré par les signaux lumineux, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une amplification du signal.

- Gain : Les phototransistors présentent un gain, qui est le rapport du courant de sortie au courant d'entrée. Le gain peut être contrôlé en ajustant les conditions de polarisation du transistor.
- Temps de réponse : Les phototransistors ont des temps de réponse relativement rapides, leur permettant de détecter et de réagir rapidement aux changements d'intensité lumineuse.
- Configurabilité : Les phototransistors peuvent être utilisés dans diverses configurations telles que l'émetteur commun, la base commune ou le collecteur commun, offrant ainsi une flexibilité dans la conception des circuits.

8.8. Applications

Les phototransistors trouvent des applications dans un large éventail de domaines, notamment:

- Systèmes de communication optique : Les phototransistors sont utilisés comme récepteurs dans les systèmes de communication par fibre optique pour convertir les signaux optiques en signaux électriques pour un traitement ultérieur.
- Détection de lumière : Les phototransistors sont utilisés dans des applications de détection de lumière telles que les barrières lumineuses, les interrupteurs optiques, les photomètres et les détecteurs de lumière ambiante.
- Dispositifs d'imagerie : Les phototransistors peuvent être utilisés dans des dispositifs d'imagerie, tels que les scanners et les lecteurs de codes-barres, pour la détection de lumière et la formation d'images.
- Automatisation industrielle : Les phototransistors sont employés dans l'automatisation industrielle pour des tâches telles que la détection d'objets, la détection de position et la surveillance des lignes de production.

9. Photodiode métal-semiconducteur-métal

Une photodiode métal-semi-conducteur-métal (MSM) est un type de photodétecteur qui se compose de deux électrodes métalliques séparées par un matériau semi-conducteur. Elle est conçue pour convertir des signaux lumineux en signaux électriques et est couramment utilisée dans les systèmes de communication optique à grande vitesse, les circuits intégrés photoniques et d'autres applications nécessitant une détection de lumière rapide et sensible. Voici une explication détaillée de la photodiode MSM :

9.1. Structure et principe de fonctionnement

La structure d'une photodiode MSM se compose de deux électrodes métalliques, généralement fabriquées à partir de matériaux tels que le titane (Ti), le platine (Pt) ou l'or (Au), séparées par une fine couche de matériau semi-conducteur, tel que le silicium (Si) ou des composés III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs). La distance entre les électrodes est généralement de l'ordre du micromètre.

Lorsque la lumière frappe la surface de la photodiode MSM, elle génère des paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur. La lumière incidente est absorbée dans la région de déplétion ou la région active de la couche semi-conductrice, selon la conception spécifique.

Les deux électrodes métalliques, souvent appelées contacts Schottky, créent un champ électrique intégré dans le matériau semi-conducteur. Le champ électrique a deux fonctions principales : séparer les paires électron-trou générées et faciliter la collecte des porteurs de charge par les électrodes métalliques.

Les électrodes métalliques sont généralement conçues avec des doigts interdigitaux ou des formes asymétriques, créant une série de jonctions Schottky parallèles ou entrelacées. Ce design permet une collecte efficace des porteurs générés dans la couche semi-conductrice.

Lorsque la photodiode est polarisée avec une tension, un courant circule à travers le dispositif. La lumière incidente génère un courant photoélectrique, qui est directement proportionnel à l'intensité de la lumière. Les électrodes métalliques collectent les porteurs photogénérés et les transportent vers le circuit externe pour un traitement ultérieur.

9.2. Caractéristiques avancées et avantages

- **Fonctionnement à grande vitesse :** Les photodiodes MSM sont capables de fonctionner à grande vitesse en raison de leur faible capacité et du temps de transit court des porteurs. Elles sont adaptées aux applications nécessitant une détection de lumière et une démodulation à grande vitesse.

- **Réponse large bande :** Les photodiodes MSM offrent une large plage de réponse spectrale, allant des longueurs d'onde ultraviolettes (UV) aux infrarouges (IR), selon le choix du matériau semi-conducteur. Cela les rend polyvalentes pour diverses applications dans le spectre électromagnétique.

- **Faible courant sombre :** Le courant sombre fait référence au courant circulant à travers une photodiode en l'absence de lumière. Les photodiodes MSM peuvent atteindre de faibles courants sombres, ce qui améliore les rapports signal/bruit et la sensibilité.

- **Facilité de fabrication :** Les photodiodes MSM sont relativement simples à fabriquer en utilisant des processus de fabrication semi-conducteurs standard. La structure plane et l'absence de jonctions pn complexes simplifient la fabrication et l'intégration des dispositifs dans des circuits intégrés photoniques.

9.3. Applications

Les photodiodes MSM trouvent des applications dans divers domaines, notamment :

- **Systèmes de communication optique :** Les photodiodes MSM sont utilisées comme récepteurs à grande vitesse dans les systèmes de communication par fibre optique pour la transmission et la démodulation de données.

- **Détection optique :** Elles sont utilisées dans des applications de détection optique telles que le positionnement optique, le profilage de faisceau et la réflectométrie temporelle optique (OTDR).

- **Circuits intégrés photoniques :** Les photodiodes MSM sont intégrées dans des circuits intégrés photoniques pour le traitement des signaux optiques, y compris la modulation, la démodulation et la conversion de longueur d'onde.

- **Interconnexions optiques :** Elles sont utilisées dans des interconnexions optiques à grande vitesse pour la communication de données entre composants électroniques et circuits intégrés.

En résumé, les photodiodes métal-semi-conducteur-métal (MSM) offrent un fonctionnement à grande vitesse, une large réponse spectrale et de faibles courants sombres. Elles sont largement utilisées dans les systèmes de communication optique, les circuits intégrés photoniques et diverses applications de détection optique.

10. Résumé

Dans cette unité, vous avez étudié les différents détecteurs optoélectroniques. Les photoconducteurs ont été discutés. Différents types de photodiodes tels que la photodiode à jonction, la photodiode PIN, la photodiode à hétérojonction, la photodiode à avalanche, la photodiode à barrière modulée et la photodiode métal-sémi-conducteur-métal ont été expliqués en détail. Une explication des phototransistors a également été donnée en détail.

11. Lexique

Tunneling : Pénétration de barrière.

Avalanche : Une augmentation soudaine du flux de courant électrique à travers un solide non conducteur ou semi-conducteur.

Sensibilité : Le rapport des changements dans la sortie d'un instrument à un changement dans la valeur de la quantité mesurée.

Photonique : La branche de la technologie concernée par les propriétés et la transmission des photons.

Optique : Connecté au sens de la vue.

Domaine : Un domaine de connaissance ou d'activité.

Déplétion : Une réduction de quelque chose.

Saturation : Un état physique et chimique où un système ne peut plus en prendre davantage.

Détecteur : Un instrument utilisé pour détecter ou identifier des particules à haute énergie.

Fabrication : L'action ou le processus de fabrication ou d'invention de quelque chose.

12. Références

1. Holger T. Grahn, *Introduction to Semiconductor Physics*, World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
2. S.M. Sze et Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons.
3. Simon M. Sze et Ming-Kwei Lee, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, Wiley, New York.
4. Otfried Madelung, *Semiconductors: Basic Data*, Springer.
5. Donald A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, McGraw Hill.
6. Dereniak et Crowe, *Optical Radiation Detectors*, 1984, Wiley, New York.
7. [Electrical Technology - Phototransistor](#).

13. Recommendations

S.M. Sze, *Semiconductor Devices - Physics and Technology*, Wiley, New York.

J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*, McGraw Hill.

P. Bhattacharya, *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Pearson Education.

J. Singh, *Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices*, Tata McGraw Hill.

Donald A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*, McGraw Hill, 3ème édition.

Pr Omar ELOUTASSI

Chapitre 4 : Application de l'optoélectronique, dispositifs photovoltaïques

1. Introduction

Jusqu'à présent, nous avons uniquement examiné des perturbations indépendantes du temps et des perturbations périodiques dépendantes du temps. Un défi courant en mécanique quantique est la commutation on/off d'un facteur perturbateur, comme un champ externe. En général, il est assez complexe de résoudre les détails de l'activation ou de la désactivation des perturbations dépendantes du temps. Cependant, les approximations abrupte et adiabatique sont deux cas limites importants qui peuvent être examinés en profondeur avec un niveau raisonnable de précision.

2. Objectifs

Après avoir étudié cette unité, vous devriez être capable de :

- Expliquer le spectre de l'énergie solaire
- Décrire les principes des dispositifs de cellules solaires
- Comprendre les caractéristiques I-V des dispositifs photovoltaïques
- Comprendre les circuits équivalents
- Expliquer les rendements des dispositifs photovoltaïques

3. Spectre d'énergie solaire

Le spectre d'énergie solaire fait référence à la distribution de la radiation électromagnétique émise par le Soleil sur une large gamme de longueurs d'onde. Le Soleil émet de la radiation dans tout le spectre électromagnétique, des ultraviolets (UV) à la lumière visible, en passant par les longueurs d'onde infrarouges (IR). Comprendre le spectre d'énergie solaire est essentiel pour exploiter l'énergie solaire dans diverses applications, telles que la production d'énergie solaire et les systèmes thermiques solaires. Voici une explication détaillée du spectre d'énergie solaire : voir figure 1.

➤ Radiation Ultraviolet (UV) : Le spectre solaire commence par la radiation ultraviolette (UV), qui a des longueurs d'onde plus courtes et une énergie plus élevée que la lumière visible. La radiation UV est généralement divisée en trois régions :

- UVA (315-400 nm) : Également connue sous le nom de UV à onde longue, la radiation UVA est responsable des effets de bronzage et de vieillissement de la peau. Elle a une énergie inférieure à celle des autres régions UV.
- UVB (280-315 nm) : La radiation UVB provoque des coups de soleil et joue un rôle dans la synthèse de la vitamine D dans le corps humain. Elle a une énergie plus élevée que la radiation UVA.
- UVC (100-280 nm) : La radiation UVC est la forme la plus énergétique et la plus dommageable de la radiation UV. Heureusement, elle est presque entièrement absorbée par l'atmosphère terrestre et n'atteint pas la surface.

➤ Lumière Visible : Le spectre de la lumière visible s'étend d'environ 400 à 700 nanomètres (nm). Il se compose de différentes couleurs, chacune correspondant à une longueur d'onde spécifique. Les couleurs du spectre visible, dans l'ordre croissant de longueur d'onde, sont le violet, le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge. La lumière visible est la région du spectre solaire qui est la plus facilement détectée par l'œil humain.

➤ Radiation Infrarouge (IR) : Au-delà de la plage de lumière visible, le spectre solaire s'étend dans la région infrarouge (IR). La radiation IR a des longueurs d'onde plus longues et une énergie plus faible que la lumière visible. Elle est également divisée en trois régions principales :

- Infrarouge Proche (NIR) (700-1400 nm) : La radiation NIR est souvent utilisée dans des applications de télédétection, telles que la surveillance de la végétation, car elle fournit des informations précieuses sur la santé et la composition des plantes.
- Infrarouge Moyen (MIR) (1400-3000 nm) : La radiation MIR est couramment utilisée dans les applications de spectroscopie et d'imagerie thermique. Elle peut fournir des informations sur les vibrations moléculaires et les signatures thermiques.
- Infrarouge Lointain (FIR) (3000 nm - 1 mm) : La radiation FIR est associée à la chaleur et à l'énergie thermique. Elle est utilisée dans des applications telles que l'imagerie thermique, la détection de chaleur et l'astronomie.

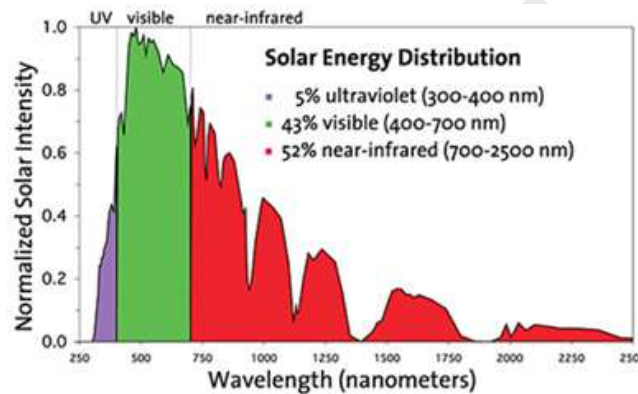


Figure 1: Spectre de distribution de l'énergie solaire

3.1. Intensité du Spectre Solaire

L'intensité de la radiation solaire varie à travers le spectre. La distribution de l'intensité est influencée par des facteurs tels que la température du Soleil et les conditions atmosphériques. Le spectre solaire est souvent représenté par le Spectre d'irradiance Solaire, qui montre la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface par unité de temps à chaque longueur d'onde ou fréquence.

Le spectre solaire n'est pas constant et peut varier en fonction de facteurs tels que l'heure de la journée, la latitude, l'altitude, les conditions atmosphériques et l'activité solaire. De plus, l'atmosphère terrestre filtre et absorbe certaines portions du spectre solaire, affectant la quantité et le type de radiation qui atteignent la surface.

3.2. Applications

Comprendre le spectre de l'énergie solaire est essentiel pour diverses applications, y compris :

➤ Génération d'énergie solaire : Les systèmes photovoltaïques (PV) convertissent la lumière du soleil en électricité. Les cellules PV sont conçues pour capturer et convertir efficacement les photons du spectre solaire, en particulier dans les régions visible et infrarouge proche.

➤ **Systèmes thermiques solaires** : Les systèmes thermiques solaires capturent l'énergie solaire sous forme de chaleur. Ils utilisent l'ensemble du spectre solaire, y compris les régions visible et infrarouge, pour chauffer l'eau, générer de la vapeur ou fournir un chauffage d'espace.

➤ **Mesures de radiation solaire** : Comprendre le spectre solaire aide à mesurer avec précision la radiation solaire à des fins météorologiques, climatologiques et de conception de systèmes d'énergie solaire.

➤ **Spectroscopie solaire** : Les techniques de spectroscopie utilisent différentes régions du spectre solaire pour analyser et étudier la composition, la température et les propriétés de divers objets célestes, y compris le Soleil.

En résumé, le spectre de l'énergie solaire englobe une large gamme de radiations électromagnétiques émises par le Soleil, y compris les radiations ultraviolettes, visibles et infrarouges. Ce spectre est crucial pour exploiter l'énergie solaire à travers diverses technologies et applications.

4. Principes des dispositifs

Les cellules photovoltaïques (PV), également connues sous le nom de cellules solaires, sont des dispositifs semi-conducteurs qui convertissent directement la lumière du soleil en énergie électrique. Elles constituent les éléments de base des panneaux solaires et jouent un rôle crucial dans la génération d'énergie solaire renouvelable. Les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques impliquent l'interaction de la lumière avec les semi-conducteurs, la génération et la séparation des porteurs de charge, et la création d'un courant électrique. Voici une explication détaillée des principes des cellules photovoltaïques : voir figure 2.

➤ **Matériau Semiconducteur** : Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, le plus couramment le silicium (Si). Le silicium est abondant, économique et possède des propriétés électroniques adaptées aux applications PV. D'autres matériaux semi-conducteurs, tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le tellure de cadmium (CdTe), sont également utilisés dans des technologies PV spécifiques.

➤ **Jonction p-n** : La structure de base d'une cellule PV implique la création d'une jonction p-n au sein du matériau semi-conducteur. Cette jonction est formée en dopant une région du semi-conducteur avec un dopant de type p (accepteur d'électrons) et une autre région avec un dopant de type n (donneur d'électrons). La région de type p a un excès de trous chargés positivement, tandis que la région de type n a un excès d'électrons chargés négativement.

➤ **Absorption des photons** : Lorsque la lumière du soleil, composée de photons, frappe la surface de la cellule PV, certains photons sont absorbés par le matériau semi-conducteur. L'énergie des photons absorbés doit être supérieure à l'énergie de bande interdite du semi-conducteur pour que l'absorption se produise. L'énergie de bande interdite détermine les longueurs d'onde de lumière qui peuvent être efficacement absorbées.

➤ **Génération de paires électron-trou** : Les photons absorbés transfèrent leur énergie aux électrons de valence dans le matériau semi-conducteur, leur permettant de se libérer de leurs liaisons et créant des paires électron-trou. Les électrons sont excités de la bande de valence à

la bande de conduction, laissant derrière eux des trous chargés positivement dans la bande de valence.

➤ **Champ électrique :** La jonction p-n crée un champ électrique en raison de la différence de porteurs de charge de part et d'autre de la jonction. Les trous chargés positivement dans la région p sont attirés par les électrons chargés négativement dans la région n, ce qui entraîne la formation du champ électrique.

➤ **Séparation et collecte des porteurs de charge :** Le champ électrique à la jonction p-n facilite la séparation des paires électron-trou générées. Les électrons chargés négativement sont repoussés vers la région n, tandis que les trous chargés positivement sont repoussés vers la région p. Cette séparation empêche la recombinaison immédiate des porteurs de charge.

➤ **Formation d'un courant électrique :** À mesure que les porteurs de charge séparés se déplacent vers leurs régions respectives, un courant électrique est généré. Les électrons circulent à travers un circuit externe de la région n vers la région p, créant la puissance électrique souhaitée. Ce flux d'électrons constitue l'effet photovoltaïque et est à la base de la génération d'électricité dans les cellules PV.

➤ **Contacts conducteurs :** Pour extraire efficacement le courant généré, des contacts métalliques sont placés sur les surfaces supérieure et inférieure de la cellule PV. Ces contacts collectent les électrons et les trous des régions respectives et fournissent les voies pour que le courant généré circule.

➤ **Charge externe :** Le courant électrique généré peut être utilisé pour alimenter des dispositifs électriques ou être stocké dans des batteries. En connectant une charge externe à la cellule PV, le courant circule à travers la charge, fournissant de l'énergie pour diverses applications.

➤ **Efficacité et performance :** L'efficacité d'une cellule PV est une mesure de son efficacité à convertir la lumière du soleil en énergie électrique utilisable. L'efficacité dépend de plusieurs facteurs, y compris le matériau semi-conducteur, la conception de la cellule, la gestion de la lumière et les processus de fabrication. Les chercheurs s'efforcent continuellement d'améliorer l'efficacité des cellules PV pour maximiser la conversion d'énergie et réduire les coûts.

➤ **Module et système PV :** Les cellules PV sont généralement interconnectées et encapsulées dans un module PV (panneau solaire) pour former de plus grands ensembles. Plusieurs modules PV peuvent être combinés pour créer des systèmes PV capables de générer des quantités significatives d'électricité pour des applications résidentielles, commerciales et à grande échelle.

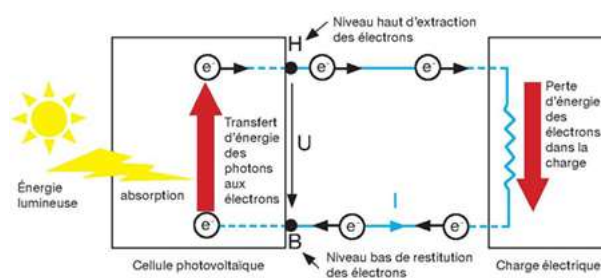


Figure 2 : Effet photovoltaïque

En conclusion, les cellules photovoltaïques exploitent les principes de la physique des semi-conducteurs pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique. L'absorption des photons, la génération de paires électron-trou, la séparation des porteurs de charge et la création d'un courant électrique permettent la conversion directe de l'énergie solaire en puissance utilisable. Les cellules PV sont à la pointe des technologies d'énergie renouvelable et continuent de progresser en efficacité et en abordabilité, favorisant la transition vers une génération d'énergie solaire durable.

5. Caractéristiques courant-tension (I-V)

Les caractéristiques courant-tension (I-V) des dispositifs photovoltaïques (PV) décrivent la relation entre le courant électrique généré et la tension appliquée à travers le dispositif. Ces caractéristiques sont fondamentales pour comprendre la performance et le comportement des dispositifs PV, y compris les cellules solaires et les modules. Les caractéristiques I-V fournissent des informations sur l'efficacité du dispositif, sa production d'énergie et ses conditions de fonctionnement. Voici une explication détaillée des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques : voir figure 3.

➤ Tension à circuit ouvert (V_{oc}) : La tension à circuit ouvert (V_{oc}) est la tension aux bornes du dispositif PV lorsque aucune charge externe n'est connectée et qu'aucun courant ne circule. À ce stade, le courant généré est nul et la tension maximale est obtenue. La tension à circuit ouvert représente la tension potentielle maximale que le dispositif peut produire.

➤ Courant de court-circuit (I_{sc}) : Le courant de court-circuit (I_{sc}) est le courant circulant à travers le dispositif PV lorsque la tension aux bornes est nulle (court-circuité). À ce stade, la tension générée est nulle et le courant maximal est obtenu. Le courant de court-circuit représente le courant maximal que le dispositif peut produire.

➤ Facteur de remplissage (FF) : Le facteur de remplissage (FF) est un paramètre clé dans les caractéristiques I-V et est défini comme le rapport de la puissance maximale (P_{max}) au produit de V_{oc} et I_{sc} . Mathématiquement, $FF = P_{max} / (V_{oc} \times I_{sc})$. Le facteur de remplissage indique à quel point le dispositif PV utilise efficacement la tension et le courant disponibles.

➤ Point de puissance maximale (P_{max}) : Le point de puissance maximale (P_{max}) correspond au point de fonctionnement où le dispositif PV délivre la puissance électrique maximale. Il se produit à une combinaison spécifique de tension (V_{MP}) et de courant (I_{MP}). P_{max} est le produit de (V_{MP}) et (I_{MP}).

➤ Efficacité : L'efficacité d'un dispositif PV est une mesure de son efficacité à convertir la lumière du soleil en énergie électrique. Elle est déterminée par le rapport de la puissance maximale (P_{max}) à la puissance solaire incidente (P_{in}). Mathématiquement, $\text{Efficacité} = P_{max} / P_{in}$.

Les caractéristiques I-V aident à déterminer l'efficacité du dispositif en fournissant des informations sur la production d'énergie à différents niveaux de tension et de courant.

➤ Point de fonctionnement : Le point de fonctionnement d'un dispositif PV correspond à la combinaison spécifique de tension et de courant à laquelle le dispositif fonctionne dans des conditions externes données. Le point de fonctionnement dépend de la charge connectée au dispositif. Il est essentiel de trouver le point de fonctionnement optimal pour maximiser la production d'énergie et l'efficacité.

➤ Effets d'ombre : L'ombrage ou l'ombrage partiel d'un dispositif PV affecte ses caractéristiques I-V. Lorsque qu'une partie du dispositif est ombragée, cela réduit la quantité de lumière incidente, entraînant une réduction de la production de courant. L'ombrage provoque une réponse non linéaire dans la courbe I-V, avec une chute du courant et de la production d'énergie.

➤ Effets de température : La température influence également les caractéristiques I-V des dispositifs PV. À mesure que la température augmente, la production de courant augmente généralement en raison de l'augmentation de la génération de porteurs. Cependant, la tension de sortie diminue en raison des pertes de recombinaison accrues. Par conséquent, les variations de température peuvent affecter la performance globale et l'efficacité du dispositif PV.

➤ Formes de courbes I-V : La forme de la courbe I-V varie en fonction du type de dispositif PV et de ses caractéristiques. Différentes technologies, telles que le silicium cristallin, les films minces et les cellules solaires multi-jonctions, présentent des formes de courbes I-V uniques. Des facteurs tels que les propriétés des matériaux, les techniques de fabrication et la conception du dispositif influencent la forme de la courbe I-V.

➤ Effets non idéaux : Les effets non idéaux, tels que les résistances série et de dérivation, peuvent également influencer les caractéristiques I-V des dispositifs PV. La résistance série (R_s) est la résistance rencontrée par le courant circulant à l'intérieur du dispositif, tandis que la résistance de dérivation (R_{sh}) représente des chemins de fuite indésirables. Ces résistances peuvent entraîner des pertes de puissance et affecter la performance globale du dispositif.

➤ Mesure et analyse I-V : Pour obtenir les caractéristiques I-V d'un dispositif PV, il est généralement soumis à des conditions externes contrôlées, et des mesures sont effectuées à différents niveaux de tension. Ces mesures aident à analyser la performance du dispositif, à évaluer son efficacité et à déterminer son adéquation pour des applications spécifiques.

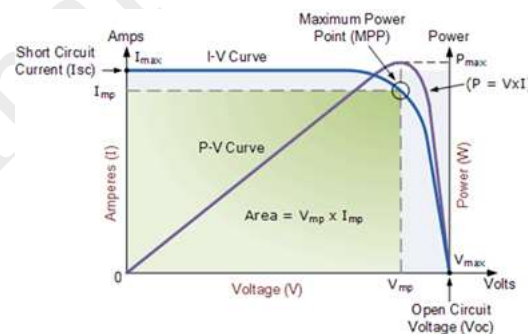


Figure 3 : Caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque

Comprendre les caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques est essentiel pour évaluer leur performance, optimiser leur fonctionnement et concevoir des systèmes PV efficaces. En analysant les courbes I-V, les chercheurs et les ingénieurs peuvent évaluer l'efficacité de l'appareil, sa production d'énergie et ses conditions de fonctionnement, permettant ainsi le développement de technologies solaires plus avancées et efficaces.

6. Circuits équivalents

Les circuits équivalents sont des modèles électriques qui représentent le comportement des dispositifs photovoltaïques (PV), tels que les cellules solaires et les modules, sous une forme simplifiée. Ces circuits constituent un outil utile pour analyser et comprendre les caractéristiques électriques et la performance des dispositifs PV. Ici, nous discuterons de deux circuits équivalents couramment utilisés : le modèle à diode unique et le modèle à double diode. Voir figure 4.

➤ **Modèle à Diode Unique :** Le modèle à diode unique est une représentation largement utilisée et relativement simple d'un dispositif PV. Il se compose d'une source de courant (I_{ph}) représentant le courant photogénérés par le dispositif, d'une diode représentant le comportement de la jonction, d'une résistance série (R_s) et d'une résistance shunt (R_{sh}) tenant compte des effets non idéaux, et d'une résistance de charge externe (R_L) représentant la charge connectée.

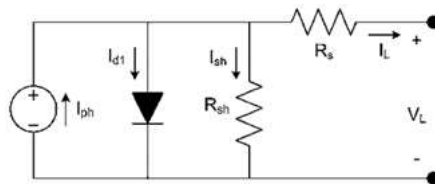


Figure 4 : Schéma du circuit équivalent du modèle à diode unique

➤ La source de courant (I_{ph}) représente le courant photogénérés par le dispositif sous illumination. La diode modélise le comportement de la jonction, représentant la relation non linéaire courant-tension. La résistance série (R_s) tient compte de la résistance rencontrée par le flux de courant à l'intérieur du dispositif, tandis que la résistance shunt (R_{sh}) représente les chemins de fuite indésirables. La résistance de charge externe (R_L) représente la charge connectée.

Le modèle à diode unique permet le calcul de divers paramètres, tels que la tension à circuit ouvert (V_{oc}), le courant à court-circuit (I_{sc}) et le point de puissance maximale (P_{max}). Il fournit également des informations sur l'impact des effets non idéaux, tels que la résistance série et la résistance shunt, sur la performance du dispositif.

➤ **Modèle à Double Diode :** Le modèle à double diode est une représentation plus avancée des dispositifs PV, offrant une meilleure précision pour analyser leur comportement électrique. Il tient compte de phénomènes supplémentaires, tels que la recombinaison et les variations du facteur d'idéalité. Le modèle à double diode comprend deux diodes (D_1 et D_2) et des composants supplémentaires similaires à ceux du modèle à diode unique. Voir figure 5.

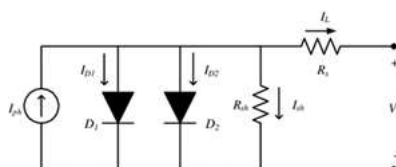


Figure 5 : Schéma du circuit équivalent du modèle à double diode

Dans le modèle à double diode, D_1 représente le comportement principal de la jonction, tandis que D_2 représente des chemins de recombinaison supplémentaires. Les composants

additionnels, y compris la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}) et la résistance de charge (R_L), sont similaires à ceux du modèle à diode unique.

Le modèle à double diode fournit des prédictions plus précises des caractéristiques électriques de l'appareil, telles que les réponses en tension et en courant, et peut mieux tenir compte de l'impact de la recombinaison et d'autres effets non idéaux. Il est particulièrement utile pour analyser des dispositifs avec des structures ou des matériaux complexes, tels que les cellules solaires à multi-jonctions.

Il est important de noter que ces modèles de circuits équivalents sont des représentations simplifiées du comportement électrique complexe des dispositifs photovoltaïques (PV). Bien qu'ils offrent des aperçus précieux et des capacités d'analyse, ils peuvent ne pas capturer toutes les nuances et subtilités de l'appareil réel. L'exactitude des modèles peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques de l'appareil et des conditions de fonctionnement. Néanmoins, les modèles de circuits équivalents servent d'outils pratiques pour comprendre et analyser la performance électrique des dispositifs PV.

7. Effets de la température sur les dispositifs photovoltaïques

La température a un impact significatif sur la performance et l'efficacité des dispositifs photovoltaïques (PV), y compris les cellules solaires et les modules. Comprendre les effets de la température est crucial pour une conception précise du système, la prédiction des performances et l'optimisation. Voici une explication détaillée des effets de la température sur les dispositifs photovoltaïques :

- Coefficient de température de la tension (T_{cv}) : la tension de sortie des dispositifs pv diminue avec l'augmentation de la température. Cela est capturé par le coefficient de température de la tension (T_{cv}), qui représente le changement en pourcentage de la tension par degré Celsius. Le T_{cv} est généralement négatif, indiquant une diminution de la tension avec l'augmentation de la température. Le T_{cv} est un paramètre important pour estimer la diminution de la tension de sortie due à l'augmentation de la température.

- Coefficient de température du courant (T_{cc}) : la sortie de courant des dispositifs PV est également affectée par les changements de température. le coefficient de température du courant (T_{cc}) représente le changement en pourcentage du courant par degré Celsius. le T_{cc} peut être positif ou négatif, selon les caractéristiques de l'appareil. En général, les cellules solaires à base de silicium cristallin ont des T_{cc} négatifs, indiquant une diminution du courant avec l'augmentation de la température.

- Coefficient de température de la puissance (T_{cp}) : le coefficient de température de la puissance (T_{cp}) représente le changement en pourcentage de la puissance de sortie par degré Celsius. Il combine le T_{cv} et le T_{cc} pour fournir une indication de la manière dont la puissance de sortie de l'appareil est affectée par les variations de température. Le T_{cp} est généralement négatif, reflétant la diminution de la puissance de sortie avec l'augmentation de la température.

- Réduction de la tension et de la puissance de sortie : à mesure que la température augmente, la tension de sortie et la puissance des dispositifs PV diminuent. Cette réduction est principalement attribuée à l'augmentation du courant de saturation de la diode à l'intérieur de l'appareil. L'augmentation de la température entraîne une génération thermique de plus de

paires électron-trou, ce qui entraîne une recombinaison accrue et une diminution du courant de sortie. La réduction de la tension et de la puissance de sortie due aux effets de température doit être prise en compte dans la conception du système et l'estimation des performances.

➤ Impact sur le point de puissance maximale (MPP) : le point de puissance maximale (MPP) des dispositifs PV, représenté par la combinaison de tension et de courant qui produit la puissance de sortie la plus élevée, est également affecté par la température. L'algorithme de suivi du MPP dans les systèmes PV doit ajuster le point de fonctionnement en fonction de la température pour maintenir une génération de puissance optimale. Cet ajustement compense les changements de tension et de courant causés par les variations de température.

➤ Impact sur l'efficacité : l'efficacité des dispositifs PV est influencée par les changements de température. L'efficacité représente le rapport de la puissance de sortie à la puissance solaire d'entrée. À mesure que la température augmente, la diminution de la tension et de la puissance de sortie réduit l'efficacité globale. Il est important de prendre en compte les effets de la température lors de l'évaluation des performances et de l'efficacité des dispositifs PV.

➤ Gestion thermique : la gestion de la température est cruciale pour maintenir la performance et la longévité des dispositifs PV. Des températures de fonctionnement élevées peuvent accélérer les processus de vieillissement et de dégradation, entraînant une réduction de l'efficacité et de la fiabilité. Des techniques de gestion thermique appropriées, telles que les dissipateurs thermiques, la ventilation et les méthodes de refroidissement, sont employées pour atténuer les effets néfastes de la température et maintenir des conditions de fonctionnement optimales.

➤ Performance à températures extrêmes : les dispositifs PV présentent des comportements différents à des températures extrêmement élevées ou basses. Des températures élevées peuvent provoquer un emballement thermique et une dégradation accélérée, entraînant des pertes de performance. D'autre part, des températures extrêmement basses peuvent diminuer la conductivité des matériaux, augmenter les pertes résistives et réduire la performance des dispositifs PV. Les dispositifs PV sont conçus pour fonctionner dans des plages de température spécifiques afin d'assurer des performances optimales et une longévité.

➤ Coefficient thermique : le coefficient thermique représente le changement des paramètres électriques des dispositifs PV avec la température. Il inclut les coefficients de température de la tension, du courant et de la puissance. Les fabricants fournissent des spécifications concernant le coefficient thermique pour aider à l'estimation des performances et à la conception du système.

➤ Modèles d'efficacité dépendants de la température : pour estimer avec précision les performances des systèmes PV dans des conditions de température variables, des modèles d'efficacité dépendants de la température sont utilisés. Ces modèles intègrent les effets de la température sur la tension, le courant et la puissance pour prédire les performances avec précision et optimiser la conception du système et la production d'énergie. En conclusion, la température a un impact significatif sur la performance et l'efficacité des dispositifs photovoltaïques. Comprendre les effets de la température est crucial pour une estimation précise des performances, la conception du système et l'optimisation. Des techniques de gestion thermique appropriées et la prise en compte des caractéristiques

dépendantes de la température sont nécessaires pour maintenir des performances optimales et maximiser la production d'énergie des systèmes PV.

8. Matériaux

Les dispositifs photovoltaïques (PV), tels que les cellules solaires et les modules, utilisent divers matériaux pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique. Le choix des matériaux est crucial pour atteindre une conversion d'énergie solaire efficace et rentable. Voici une explication détaillée des matériaux utilisés dans les dispositifs photovoltaïques :

➤ **Silicium (Si) :** Le silicium est le matériau le plus utilisé dans les dispositifs PV en raison de son abondance, de sa stabilité et de ses propriétés électroniques favorables. Il existe sous deux formes principales : le silicium cristallin (c-Si) et le silicium amorphe (a-Si).

- **Silicium Cristallin (c-Si) :** Le silicium cristallin est utilisé dans la majorité des cellules PV commerciales. Il peut être classé en silicium monocristallin (mono-Si) et silicium multicristallin (multi-Si). Les cellules mono-Si offrent une efficacité plus élevée mais sont plus coûteuses, tandis que les cellules multi-Si constituent une option économique avec une efficacité légèrement inférieure. La haute pureté et la structure cristalline ordonnée du c-Si contribuent à ses excellentes propriétés électroniques.

- **Silicium Amorphe (a-Si) :** Le silicium amorphe est une forme non cristalline de silicium avec une structure atomique désordonnée. Il peut être déposé sur une variété de substrats, permettant des dispositifs PV flexibles et légers. Cependant, les cellules a-Si ont généralement une efficacité inférieure par rapport aux cellules c-Si.

➤ **Technologies à Film Mince :** Les technologies PV à film mince utilisent divers matériaux pour créer des couches de semi-conducteurs avec des épaisseurs généralement dans la plage des nanomètres à micromètres. Les technologies à film mince offrent des avantages tels que la flexibilité, une utilisation réduite des matériaux et un potentiel de coûts de fabrication plus bas.

- **Tellure de Cadmium (CdTe) :** Le CdTe est un semi-conducteur composé utilisé dans les cellules PV à film mince. Il possède d'excellentes propriétés d'absorption de la lumière et une efficacité relativement élevée, ce qui rend les cellules à base de CdTe compétitives sur le plan commercial. Les modules à film mince CdTe sont connus pour leur rendement élevé et leurs faibles coûts de fabrication.

- **Sélénure de Cuivre Indium Gallium (CIGS) :** Le CIGS est un autre semi-conducteur composé utilisé dans les cellules PV à film mince. Il offre une efficacité élevée et de bonnes performances dans des conditions de faible luminosité. Les cellules à base de CIGS sont connues pour leur flexibilité et leur potentiel de haute efficacité de conversion de puissance.

- **Sulfure/Sélénure de Cuivre Zinc Étain (CZTS/Se) :** Le CZTS/Se est un matériau à film mince émergent qui se compose d'éléments abondants et non toxiques. Il montre un potentiel pour des dispositifs PV à faible coût et respectueux de l'environnement, bien que sa commercialisation soit encore en cours.

➤ **Semi-Conducteurs Composés III-V :** Les semi-conducteurs composés III-V sont un groupe de matériaux formés en combinant des éléments du groupe III (comme le gallium et

l'indium) et du groupe V (comme l'arsenic et le phosphore) du tableau périodique. Ils offrent d'excellentes propriétés électriques et optiques, mais sont relativement coûteux par rapport aux technologies à base de silicium. Les composés III-V sont principalement utilisés dans des cellules solaires à haute efficacité à multi-jonctions.

- Arséniure de Gallium (GaAs) : Le GaAs est un semi-conducteur composé III-V utilisé dans des cellules solaires à haute efficacité, en particulier dans des applications spatiales et des photovoltaïques concentrés. Les cellules GaAs ont une excellente efficacité et des performances supérieures sous une forte concentration lumineuse.
- Matériaux Péroovskites : Les cellules solaires à pérovskite sont une technologie PV en rapide avancée qui utilise des matériaux à structure pérovskite. Les pérovskites sont une classe de matériaux avec une structure cristalline spécifique qui peut être facilement synthétisée et offre une haute absorption de lumière et des propriétés de transport de charge. Bien que les cellules solaires à pérovskite aient réalisé des améliorations remarquables en matière d'efficacité ces dernières années, leur commercialisation est encore en cours, et des défis tels que la stabilité et l'échelle doivent être abordés.
- Matériaux Organiques : Les cellules solaires organiques, également connues sous le nom de photovoltaïques organiques (OPV), utilisent des matériaux organiques comme couche active. Ces matériaux offrent des avantages tels que des procédés de fabrication à faible coût, de la flexibilité et des caractéristiques légères. Cependant, les cellules OPV ont généralement une efficacité inférieure par rapport aux technologies PV inorganiques, et des recherches sont en cours pour améliorer leurs performances.
- Dispositifs Tandem et à Multi-Jonctions : Les dispositifs tandem et à multi-jonctions incorporent plusieurs couches de semi-conducteurs de différents matériaux pour capturer efficacement une gamme plus large du spectre solaire. En combinant des matériaux avec différentes énergies de bande interdite, chaque couche peut absorber la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. Cela permet d'augmenter l'efficacité globale par rapport aux dispositifs à jonction unique. Les conceptions tandem et à multi-jonctions utilisent souvent des combinaisons de semi-conducteurs composés III-V ou des structures hybrides telles que des tandems pérovskite-silicium.
- Oxydes Conducteurs Transparents (TCO) : Les oxydes conducteurs transparents, tels que l'oxyde d'indium-étain (ITO) et l'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO), sont utilisés comme électrodes transparentes dans les dispositifs PV. Ces matériaux permettent à la lumière de passer tout en offrant une conductivité électrique.

Le choix des matériaux dépend de divers facteurs, notamment le coût, l'efficacité, la stabilité, la disponibilité et les exigences d'application. Les chercheurs et les ingénieurs continuent d'explorer de nouveaux matériaux et architectures de dispositifs pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et renforcer la durabilité des dispositifs photovoltaïques.

9. Efficacités

L'efficacité est un paramètre crucial pour évaluer la performance et l'efficacité des dispositifs photovoltaïques (PV), tels que les cellules solaires et les modules. Elle mesure à quel point ces dispositifs convertissent efficacement la lumière du soleil en énergie électrique utilisable.

Une efficacité plus élevée se traduit directement par une production d'électricité plus importante à partir de la même quantité d'énergie solaire incidente. Dans cette explication, nous discuterons des différentes métriques d'efficacité utilisées pour les dispositifs PV et des facteurs qui influencent leur efficacité.

➤ **Efficacité de Conversion** : L'efficacité de conversion est la principale métrique d'efficacité utilisée pour évaluer les dispositifs PV. Elle représente le rapport de la puissance électrique de sortie de l'appareil à la puissance solaire incidente. Mathématiquement, l'efficacité (η) est calculée comme suit :

$$\eta = (\text{Electrical Power Output} / \text{Incident Solar Power}) \times 100\%$$

L'efficacité de conversion est généralement exprimée en pourcentage. Plus l'efficacité est élevée, plus l'appareil est efficace pour convertir la lumière du soleil en électricité.

➤ **Facteurs Influant sur l'Efficacité** : Plusieurs facteurs affectent l'efficacité des dispositifs PV :

- **Propriétés des Matériaux** : Le choix des matériaux dans les dispositifs PV joue un rôle significatif dans la détermination de l'efficacité. Les matériaux avec des énergies de bande appropriées et une mobilité des porteurs élevée aident à maximiser l'absorption de la lumière et à minimiser les pertes d'énergie.
- **Absorption de la Lumière Solaire** : La capacité de l'appareil à absorber une large gamme de longueurs d'onde dans le spectre solaire affecte l'efficacité. Une absorption plus élevée signifie que plus de photons sont convertis en énergie électrique.
- **Recombinaison des Porteurs** : Une séparation efficace des porteurs de charge et une recombinaison minimale sont essentielles pour une haute efficacité. Des pertes de recombinaison réduites entraînent un plus grand nombre de porteurs de charge contribuant à la sortie électrique.
- **Réflexion de Surface** : La surface des dispositifs PV doit avoir des revêtements antireflets ou des structures texturées pour minimiser la réflexion de la lumière et améliorer l'absorption de la lumière.
- **Résistance Série** : La résistance série à l'intérieur de l'appareil peut réduire l'efficacité en provoquant des chutes de tension et des pertes de puissance. Minimiser la résistance série aide à maintenir une sortie de tension plus élevée.
- **Résistance Shunt** : La résistance shunt représente des chemins de fuite indésirables dans l'appareil. Une résistance shunt plus élevée conduit à une efficacité améliorée en réduisant le courant de fuite et les pertes de puissance.
- **Effets de Température** : La température impacte la performance des dispositifs PV. Des températures plus élevées peuvent augmenter les taux de recombinaison, diminuer la tension à circuit ouvert et réduire l'efficacité.

➤ **Limites de l'Efficacité de Conversion** : L'efficacité des dispositifs PV est soumise à des limitations physiques et matérielles. La limite de Shockley-Queisser définit l'efficacité de conversion maximale possible pour une cellule solaire à jonction unique en fonction du spectre solaire et de l'énergie de bande du matériau. Pour les cellules solaires à base de silicium, la limite théorique est d'environ 29%. Cependant, des limitations pratiques, telles

que les pertes dues à la recombinaison et les pertes résistives, rendent l'atteinte de cette limite difficile.

➤ **Efficacité des Cellules à Jonction Unique et à Multi-Jonctions :** Les cellules solaires à jonction unique sont composées d'un seul matériau semi-conducteur. Les cellules solaires à multi-jonctions, en revanche, consistent en plusieurs couches de semi-conducteurs avec différentes énergies de bande.

Les cellules à multi-jonctions peuvent atteindre des efficacités plus élevées en capturant une gamme plus large du spectre solaire.

➤ **Efficacité Certifiée :** L'efficacité certifiée est la valeur d'efficacité obtenue à partir de laboratoires de test indépendants utilisant des procédures de mesure standard. Elle fournit une référence fiable pour comparer la performance de différents dispositifs PV.

➤ **Efficacité des Modules :** L'efficacité des modules fait référence à l'efficacité d'un module PV entier, qui se compose de plusieurs cellules solaires interconnectées. L'efficacité des modules prend en compte les pertes dues aux zones inactives, aux interconnexions électriques et à d'autres facteurs au niveau du module.

➤ **Efficacité de Conversion de Puissance (PCE) :** L'efficacité de conversion de puissance est une mesure de l'efficacité avec laquelle un dispositif PV convertit la lumière du soleil en puissance électrique. Elle est calculée comme le rapport de la puissance électrique de sortie à la puissance d'entrée. La PCE prend en compte des pertes supplémentaires telles que les pertes optiques et électriques au-delà de l'efficacité de conversion.

➤ **Efficacité de Conversion d'Énergie (ECE) :** L'efficacité de conversion d'énergie quantifie l'efficacité d'un dispositif PV à convertir la lumière du soleil en énergie électrique utilisable sur une période donnée. Elle prend en compte la production totale d'énergie au fil du temps, en considérant des facteurs tels que les variations quotidiennes et annuelles de la lumière solaire.

➤ **Suivi du Point de Puissance Maximale :** Maximiser l'efficacité nécessite de faire fonctionner les dispositifs PV à leur point de puissance maximale (MPP). Des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont employées pour ajuster continuellement le point de fonctionnement afin de maintenir une génération de puissance optimale, même dans des conditions environnementales variables.

➤ **Efficacités des Différentes Technologies PV :** Les technologies PV ont différentes plages d'efficacité. Les cellules solaires en silicium cristallin ont atteint des efficacités dépassant 25%, les cellules monocristallines étant généralement plus efficaces que les cellules multi cristallines. Les technologies à film mince, telles que le CdTe et le CIGS, ont des efficacités dans la plage de 10 à 22%. Les technologies émergentes comme les cellules solaires à pérovskite ont montré des améliorations d'efficacité remarquables, avec des valeurs record dépassant 25%.

En conclusion, l'efficacité est un facteur critique dans l'évaluation de la performance des dispositifs photovoltaïques. Divers facteurs influencent l'efficacité, y compris les propriétés des matériaux, l'absorption de la lumière solaire, la recombinaison des porteurs, les pertes résistives et les effets de température. L'efficacité de conversion, l'efficacité des modules, l'efficacité de conversion de puissance et l'efficacité de conversion d'énergie sont des métriques clés utilisées pour quantifier l'efficacité des dispositifs PV. Les avancées continues

dans les matériaux, la conception des dispositifs et les processus de fabrication visent à améliorer l'efficacité et à favoriser l'adoption généralisée de l'énergie solaire comme source d'énergie propre et renouvelable.

10. Résumé

Dans cette unité, vous avez étudié les dispositifs photovoltaïques (cellule photo ou cellule solaire). La cellule solaire fonctionne sur le principe de l'effet photovoltaïque. Les caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque ont été expliquées. Le modèle à diode unique et le modèle à double diode d'une cellule photovoltaïque ont été discutés. Les effets de la température, les matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les efficacités des cellules photovoltaïques ont également été abordés.

11. Lexique

Spectre : une bande de lumières colorées dans l'ordre de leurs longueurs d'onde ou fréquences

Dispositif : un objet qui a été inventé pour un but particulier

Caractéristiques : une caractéristique typique ou notable de quelque chose

Équivalent : égal en valeur, montant, signification, importance

Efficacité : capacité à produire un effet désiré

12 Références

1. Green, M. A. (2018). Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. University of New South Wales Press.
2. Arora, P. (2017). Solar Cell Devices: Physics, Processing, Simulations and Characterization. John Wiley & Sons.
3. Photovoltaics: Overview. (n.d.). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
4. Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications. (2016). CRC Press.
5. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2018). Solar cell efficiency tables (version 52). Progress in Photovoltaics, 26(7), 427-436.
6. Green, M. A., & Zhao, J. (2019). Solar cell efficiency tables (version 55). Progress in Photovoltaics, 27(7), 565-575.
7. Würfel, P. (2005). Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts.
8. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. (2003).
9. Nishimura, N., Nitta, K., Sakai, J., & Kasamatsu, N. (2012). Crystalline Silicon Solar Cells: Technology and Systems Applications.
10. 4.13 LECTURES SUGGÉRÉES
11. S.M. Sze, Semiconductor Devices - Physics and Technology, Wiley, New York.
12. J. Singh, Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology, McGraw Hill.
13. P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Pearson Education.
14. J. Singh, Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices, Tata McGraw Hill.

Chapitre 5 : Diodes électroluminescentes

1. Introduction

Une diode électroluminescente (LED) est un dispositif semi-conducteur qui émet de la lumière lorsque le courant y circule. Les électrons dans le semi-conducteur se recombinent avec des trous d'électrons, libérant de l'énergie sous forme de photons. La couleur de la lumière (correspondant à l'énergie des photons) est déterminée par l'énergie requise pour que les électrons traversent la bande interdite du semi-conducteur. La lumière blanche est obtenue en utilisant plusieurs semi-conducteurs ou une couche de phosphore électroluminescent sur le dispositif semi-conducteur. En 1962, lorsqu'elle est apparue pour la première fois en tant que composant électronique pratique, elle émettait une lumière infrarouge (IR) de faible intensité. Les LEDs infrarouges sont utilisées dans les circuits de télécommande, tels que ceux utilisés avec une grande variété d'électroniques grand public. Les premières LEDs de lumière visible étaient de faible intensité et limitées au rouge. Les premières LEDs étaient souvent utilisées comme lampes indicatrices, remplaçant de petites ampoules à incandescence, et dans les afficheurs à sept segments. Les développements ultérieurs ont produit des LEDs disponibles dans des longueurs d'onde visibles, ultraviolettes (UV) et infrarouges, avec des sorties lumineuses élevées, faibles ou intermédiaires, par exemple, des LEDs blanches adaptées à l'éclairage intérieur et extérieur. Les LEDs ont également donné naissance à de nouveaux types d'afficheurs et de capteurs, tandis que leurs taux de commutation élevés sont utiles dans la technologie de communication avancée avec des applications aussi diverses que l'éclairage aéronautique, les guirlandes lumineuses, les phares automobiles, la publicité, l'éclairage général, les feux de circulation, les flashes de caméra, le papier peint lumineux, les lumières de culture horticole et les dispositifs médicaux.

Les LEDs présentent de nombreux avantages par rapport aux sources lumineuses à incandescence, notamment une consommation d'énergie inférieure, une durée de vie plus longue, une robustesse physique améliorée, une taille plus petite et une commutation plus rapide. En échange de ces attributs généralement favorables, les inconvénients des LEDs incluent des limitations électriques à basse tension et généralement à l'alimentation CC (pas CA), l'incapacité à fournir un éclairage constant à partir d'une source d'alimentation CC pulsée ou CA, et une température de fonctionnement maximale et une température de stockage inférieures. Contrairement aux LEDs, les lampes à incandescence peuvent être conçues pour fonctionner intrinsèquement à pratiquement n'importe quelle tension d'alimentation, peuvent utiliser indifféremment le courant CA ou CC, et fourniront un éclairage constant lorsqu'elles sont alimentées par du CA ou du CC pulsé même à une fréquence aussi basse que 50 Hz. Les LEDs nécessitent généralement des composants électroniques de support pour fonctionner, tandis qu'une ampoule à incandescence peut, et fonctionne généralement, directement à partir d'une source d'alimentation CC ou CA non régulée. En tant que transducteur d'électricité en lumière, les LEDs fonctionnent à l'inverse des photodiodes.

2. Objectifs

Après avoir lu cette unité, nous serons capables de comprendre :

L'idée de base des LEDs

La structure des LEDs

La classification des LEDs

Le principe de fonctionnement et les caractéristiques des LEDs

Les spécifications des LEDs

Les applications des LEDs

3. Fonctionnement des LEDs électroluminescence

Nous sommes tous familiers avec les LEDs, car elles sont des indicateurs ou des sources optiques très largement utilisées. Mais de nos jours, leur domaine d'application évolue des indicateurs vers des applications d'éclairage. Cela est devenu possible grâce aux développements récents dans la technologie de fabrication des LEDs. Des LEDs de puissance fiables et moins chères sont disponibles aujourd'hui. Ce ne sont rien d'autre que des diodes à jonction p-n qui émettent de la lumière lorsqu'elles sont polarisées en direct. Le symbole du circuit et le dispositif LED réel sont montrés ci-dessous. Les flèches sortantes dans le symbole du circuit symbolisent la lumière émise. Observez attentivement le dispositif réel. Il a deux bornes de longueurs différentes. La plus longue est l'« Anode » et la plus courte est la borne « Cathode ». voir figure 1.

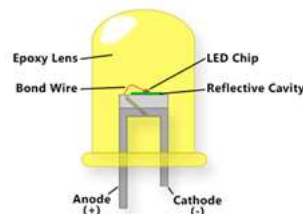


Figure 1 : LEDs

Les LEDs diffèrent des diodes à jonction p-n normales par leur principe de fonctionnement, leur matériau de fabrication, leurs spécifications et donc leur application. La principale différence entre une diode redresseuse et une LED est que les semi-conducteurs de type p et n des LEDs sont fortement dopés (plus de $10^{26}/m^3$). Ainsi, les autres diodes dégagent de la chaleur lorsqu'elles sont polarisées en direct, tandis que les LEDs émettent de la lumière lorsqu'elles sont polarisées en direct. Le processus de génération d'énergie lumineuse par l'application d'une tension électrique est appelé électroluminescence. Lorsque la LED est polarisée en direct, des électrons sont injectés dans la région n et des trous dans la région p. Les électrons traversent la jonction p-n à partir du matériau de type n et se recombinent avec des trous dans le matériau de type p. Les électrons libres se trouvent dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence. La recombinaison électron-trou a lieu et, au cours de ce processus, l'énergie est libérée sous forme de radiation. Ainsi, dans une LED, la lumière émise provient de la recombinaison trou-électron. Voir figure 2

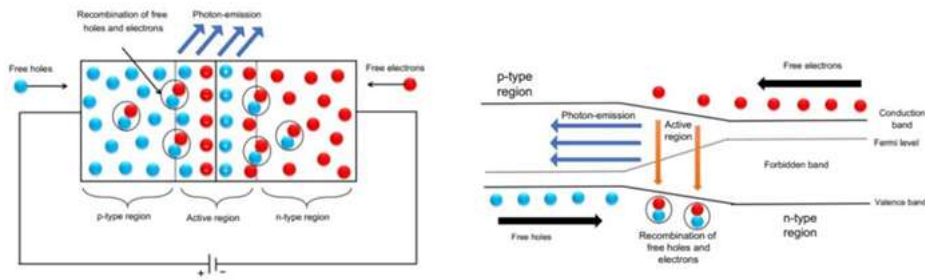


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'une LED

Le phénomène d'électroluminescence sera mieux illustré à l'aide d'un diagramme de bande d'énergie. Les électrons libres présents dans la bande de conduction sont à un niveau d'énergie plus élevé que les trous dans la bande de valence. La recombinaison radiative et non radiative se produit dans les LEDs. Dans tous les semi-conducteurs, ces deux types de radiations se produisent lorsqu'ils sont polarisés en direct. La seule différence est que, dans certains cas, le phénomène radiatif est prédominant, tandis que dans d'autres, c'est le phénomène non radiatif qui l'est. En conséquence, l'énergie est libérée soit sous forme de lumière, soit sous forme de chaleur. Dans les semi-conducteurs de Si ou Ge, un pourcentage plus élevé de l'énergie est sous forme de chaleur et le pourcentage d'énergie lumineuse est inférieur.

Étant donné que les semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des LEDs sont principalement des composés de Gallium et d'Indium, le comportement des LEDs est différent de celui des diodes normales lorsqu'elles sont polarisées en direct. Lors de la recombinaison, la lumière de longueur d'onde λ est émise, où λ est lié à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur par la formule :

$$E_g = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Avec h = constante de *plank* = $4.14 \times 10^{-15} \text{ V.s}$

c = vitesse de la lumière dans le vide = $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Ainsi, il est clair d'après l'équation que la longueur d'onde de la lumière émise dépend de l'énergie de la bande interdite. Si le matériau est changé, alors E_g change et par conséquent, la couleur de la lumière émise change également.

Sous polarisation inverse, aucune injection de porteurs n'a lieu et, par conséquent, aucun photon (lumière) n'est émis.

4. Caractéristiques des dispositifs LED

De manière générale, les caractéristiques des LEDs peuvent être classées en caractéristiques électriques et optiques.

4.1. Caractéristiques électriques

La caractéristique électrique d'une LED est essentiellement la variation de courant et de tension à travers la diode. La caractéristique directe d'une LED est la même que celle d'une diode redresseuse, sauf pour un changement dans la chute de tension directe. En général, la chute de tension directe à travers une LED est comprise entre 1,2 V et 3,2 V, tandis que la

chute de tension directe à travers une diode est de 0,2 V (pour une diode Ge) ou 0,6 V (pour une diode Si). Dans la figure, les caractéristiques directes de plusieurs matériaux de LED sont montrées. Il convient de noter que, bien que la couleur de la lumière soit déterminée par le matériau utilisé, la quantité de lumière produite par une LED dépend du courant direct circulant dans le circuit. Le courant peut être contrôlé par son circuit de commande et donc l'intensité lumineuse.

On observe à partir de la caractéristique que la tension de genou pour la LED rouge est la plus basse et qu'elle augmente pour les matériaux à longueur d'onde plus courte. Voir figure 3.

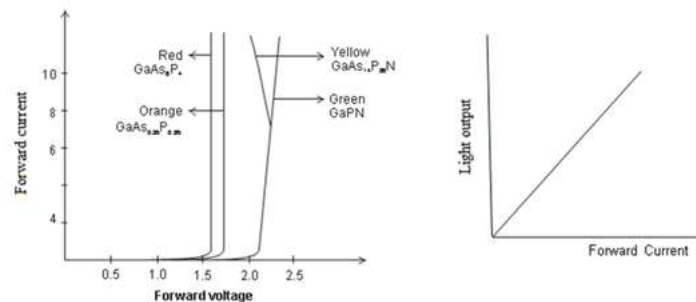


Figure 3 : Caractéristique électrique de la LED

4.2 Caractéristiques optiques

De nos jours, les LEDs sont utilisées à des fins d'illumination, les caractéristiques optiques des LEDs deviennent donc également importantes. Les caractéristiques optiques donnent une idée de la couleur de la lumière émise et de la distribution de puissance spectrale. Il y a deux caractéristiques optiques importantes, à savoir les caractéristiques spectrales et spatiales, qui doivent être étudiées.

➤ **Caractéristique spectrale** : Elle représente la sortie lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Les courbes suivantes montrent la réponse spectrale des LEDs colorées dans la plage visible. Les LEDs ont un pic unique se produisant à la longueur d'onde correspondant à la couleur. Voir figure 4.

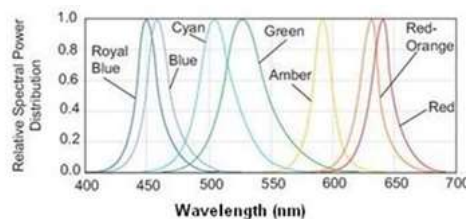


Figure 4 : Caractéristique spectrale

➤ **Caractéristiques spatiales** : Elles donnent le schéma de rayonnement des LEDs. Elles montrent la répartition de la sortie lumineuse par rapport à l'espace. En résumé, elles donnent une directionnalité à la lumière émise. Le graphique suivant montre le schéma de rayonnement typique d'une LED. Le schéma dépend de la structure de la lentille de la LED. Plus le schéma de rayonnement est étroit, plus la lumière est concentrée dans une direction particulière. Voir figure 5.

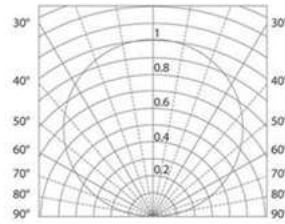


Figure 5 : Caractéristiques spatiales

5. Structure des LEDs

Les LEDs sont une forme spécialisée de diodes à jonction p-n qui ont été conçues pour optimiser leur sortie optique. Par conséquent, la structure et les techniques de fabrication des LEDs doivent garantir que l'électroluminescence est optimisée. Les LEDs se composent essentiellement de trois composants principaux comme indiqué dans la figure 6.

- Jonction p-n
- Contacts électriques
- Capuchon en plastique transparent

La majeure partie de la structure est une jonction p-n. Les films actifs de la structure de la LED sont normalement cultivés par épitaxie - souvent par épitaxie en phase liquide ou en phase vapeur. Les substrats couramment utilisés sont des composés de Gallium, d'Arsenic et de Phosphore. La jonction PN peut être créée soit par diffusion d'impuretés, soit par implantation ionique, ou elle peut être incorporée pendant la phase de croissance épitaxiale. Une fois qu'une jonction p-n peu profonde est formée, des contacts électriques sont prélevés dans les deux régions. La jonction est encapsulée dans un milieu plastique transparent. Le plastique est moulé en une forme approximativement hémisphérique. D'autres géométries sont également possibles, ce qui améliore la direction d'émission de la lumière et l'efficacité de conversion de l'électrique à l'optique

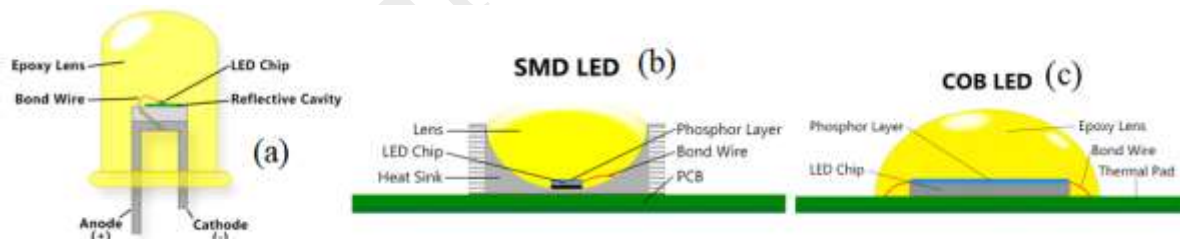


Figure 6 : Formes géométriques des LED : (a) LED régulière, (b) LED SMD "Surface mount device", (c) LED COB "Chip on board".

Sur la base de la structure et du fonctionnement, il existe deux types de LED : LED émettant en surface et LED émettant sur le bord. Deux configurations de base pour la structure de la LED sont données par la figure 7.



Figure 7: Différentes formes de LED

5.1 Structure des LED homojonction et hétérojonction

Si le côté p et le côté n de la jonction p-n d'une LED sont fabriqués à partir du même type de matériau, on parle de LED homojonction. En d'autres termes, si le matériau de type p et le matériau de type n de la LED sont faits du même matériau, la seule différence réside dans le dopage. Par exemple, le GaAs est appelé LED homojonction. En revanche, si le matériau de type n et le matériau de type p de la LED sont différents, on parle de LED hétérojonction. Par exemple, si le matériau de type p est en GaAs et le matériau de type n est en SiO₂, alors on parle d'une LED hétérojonction. La LED homojonction est également appelée LED émettant en surface. La LED hétérojonction est également appelée LED émettant sur le bord. Étant donné que la jonction homojonction a une plus grande surface de section transversale, elle présente une faible impédance terminale mais émet une lumière non directionnelle. Sur la hétérojonction, la zone d'émission de lumière est petite, ce qui permet un bon fonctionnement avec un taux de données élevé.

5.2 LED émettant en surface

La structure de la LED émettant en surface est donnée dans la Figure 5.9. La LED émettant en surface peut être utilisée pour la fibre optique. Comme son nom l'indique, la lumière émet de la surface de la LED et la lumière émise est perpendiculaire à la surface de la LED. La fibre optique est également placée perpendiculairement à la LED afin que la lumière puisse être facilement couplée à la fibre optique. La structure de la LED est montrée dans la Figure 5.8. Il y a différentes couches, la couche active étant faite de matériau GaAs de type p et au-dessus de la couche p, la couche n d'AlGaAs, et la couche n⁺ de GaAs. En dessous de la couche active se trouvent la couche p d'AlGaAs et la couche p⁺ de GaAs. Ce sont des couches de hétérojonction, et en utilisant une surface n-type gravée, la distance entre la région active et la surface émettrice de lumière est minimisée afin d'obtenir un maximum de lumière. Les couches de contact sont en métal pour fournir une alimentation électrique à la LED et en dessous de la couche métallique, on utilise généralement un dissipateur thermique pour refroidir la LED. Voir figure 8.

5.2.1. Propriétés de la LED émettant en surface

- Une haute irradiance est obtenue.
- Une faible impédance terminale est obtenue.
- En raison de plusieurs couches de type p et de doubles hétérojonctions, l'efficacité de couplage est augmentée.
- Le motif d'émission est anisotrope avec une intensité lumineuse maximale au centre et la moitié à 120°.
- Les inconvénients ou inconvenients de la LED émettant en surface sont sa faible durée de vie et sa faible bande passante de modulation.

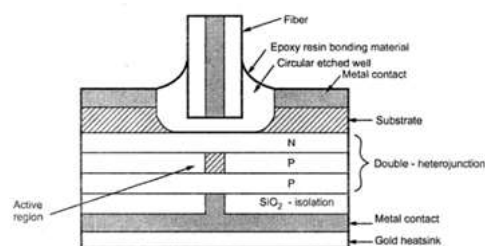


Figure 8 : LED émettant en surface.

5.3 Structure de la LED émettant sur le bord

Dans la LED émettant sur le bord, il y a deux couches optiques de guidage de la lumière, comme le montre la région ombragée en noir dans la Figure 5.10. La région active se trouve entre ces couches. Les deux couches de guidage ont un indice de réfraction inférieur à celui de la région active et supérieur à celui des matériaux environnants (substrat SiO_2 au-dessus de la couche de guidage de lumière supérieure et substrat GaAs de type n en dessous de la couche de guidage de lumière inférieure). Au-dessus de la couche de substrat SiO_2 , il y a une couche métallique utilisée pour le contact électrique. De même, en dessous du substrat GaAs de type n, une autre couche métallique est utilisée pour le contact électrique. En dessous de la métallisation inférieure, il y a un dissipateur thermique qui absorbe la chaleur générée lors de l'émission de lumière. Si l'ouverture numérique est inférieure, la LED émettant sur le bord couple plus de puissance que la diode émettant en surface et la bande passante de modulation est plus élevée que celle de la diode émettant en surface. La lumière émise par la LED émettant sur le bord est elliptique, comme le montre la Figure 9.

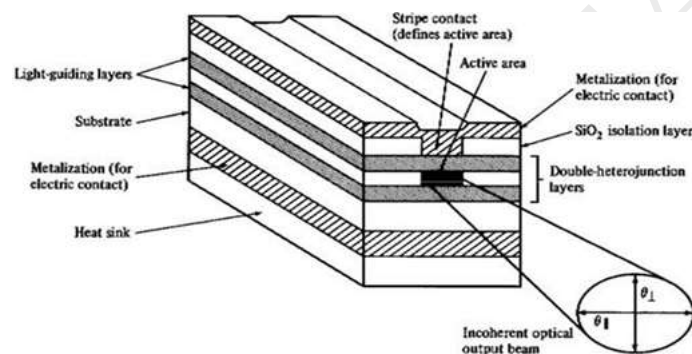


Figure 5.10 : Structure de la LED émettant sur le bord

5.3.1. Propriétés de la LED émettant sur le bord

- Elle a une haute irradiance.
- La divergence du faisceau se rétrécit par rapport à la diode émettant en surface et elle couple plus de puissance optique.
- Large bande passante de modulation.

6. Matériaux utilisés pour les LEDs

Les diodes électroluminescentes sont disponibles dans une large gamme de couleurs, les plus courantes étant le rouge, l'ambre, le jaune et le vert, et sont donc largement utilisées comme indicateurs. La couleur réelle de la lumière émise par une LED est déterminée par le composé semi-conducteur utilisé pour sa fabrication. Les différents matériaux émettent différentes longueurs d'onde de lumière et donc différentes couleurs. Le tableau suivant montre le matériau semi-conducteur utilisé pour produire une couleur particulière. Voir tableau 1.

Tableau 1 : matériaux utilisés pour les LEDs

Matériau semiconducteur	Longueur d'onde de la lumière émise (nm)	Couleur
GaAs	850-940	Infra-Rouge

Matériau semiconducteur	Longueur d'onde de la lumière émise (nm)	Couleur
GaAs _{0.6} P _{0.4}	630-660	Rouge
GaAs _{0.25} P _{0.75}	605-620	Ambre
GaAsP:N	585-595	Jaune
AlGaP	550-570	Vert
SiC	430-505	Bleu
GaInN	450	Blanc

D'après le tableau ci-dessus, il est clair que le principal dopant de type P utilisé dans la fabrication des diodes électroluminescentes est le Gallium (Ga, numéro atomique 31) et que le principal dopant de type N utilisé est l'Arsenic (As, numéro atomique 33). D'autres couleurs sont produites en ajoutant des impuretés de nitrogène ou de phosphore.

Ainsi, il convient de noter que la couleur de la lumière émise par une LED n'est pas déterminée par la coloration du boîtier en plastique de la LED, bien que ces derniers soient légèrement colorés pour améliorer la sortie lumineuse et indiquer leur couleur lorsqu'ils ne sont pas illuminés. La plupart des diodes électroluminescentes produisent une seule sortie de lumière colorée ; cependant, des LEDs multicolores sont désormais disponibles, pouvant produire une gamme de couleurs différentes à partir d'un seul dispositif. La plupart de celles-ci sont en réalité deux ou trois LEDs fabriquées dans un seul boîtier.

Jusqu'aux années 1970, seules des LEDs colorées étaient disponibles, principalement utilisées comme indicateurs. L'utilisation des LEDs pour des applications de signalisation a commencé il y a environ 35 ans. Ce sont des LEDs basse puissance émettant une faible intensité lumineuse. Le développement des LEDs blanches de puissance a commencé lorsque des cristaux de GaN de haute qualité ont été déposés sur un substrat de saphir en 1986 et que des LEDs bleues à haute luminosité ont été développées en 1993, avec des améliorations continues. La première OLED de couleur blanche a été lancée vers 1990, rendant les LEDs de plus en plus intéressantes à utiliser comme ampoules. Les LEDs blanches ont été développées en utilisant des LEDs bleues combinées avec des phosphores jaunes et commercialisées en 1996. De nos jours, les LEDs, colorées ou blanches, surpassent les ampoules incandescentes et halogènes et sont largement acceptées comme ampoules. Cependant, de nombreuses recherches sont en cours pour produire des LEDs à haute intensité.

7. Puissance et efficacité des LEDs

7.1. Puissance lumineuse des LED

La puissance (P) de tout appareil électrique, y compris une LED, est mesurée en Watts (W), qui est égale au courant ou à l'électricité tirée (I), mesurée en ampères, multipliée par la tension (V). $P = V \times I$ Par conséquent, la puissance de la lumière LED est proportionnelle à la tension et/ou au courant, de sorte qu'un appareil peut avoir une faible tension mais tirer tout de même un courant très élevé et avoir une forte consommation d'énergie.

Les lumières LED, par nature, fonctionnent à faible tension mais aussi à courant relativement faible, ce qui les rend moins puissantes et plus efficaces que les ampoules incandescentes et halogènes traditionnelles. En général, nous parlons d'un courant compris entre 100 et 750 milliampères selon la tension directe requise pour allumer la LED. Il y a un certain avantage à avoir des LEDs à haute tension lorsque de longues distances se produisent entre la LED et l'alimentation, comme dans l'éclairage à bandes LED. Cependant, pour la plupart des applications, cela n'a pas vraiment d'importance.

Les plages de puissance typiques pour les ampoules résidentielles et commerciales à usage général varient de 3W à 15W. En général, plus la puissance est élevée, plus le courant est grand et donc plus la sortie lumineuse est importante. Cependant, ce n'est pas toujours le cas, ce qui nous amène au concept d'efficacité et de facteur de puissance.

7.2. Efficacité lumineuse des LED

L'efficacité de la lumière LED est mesurée en lumens par watt (Lm/W), ce qui fait référence à la quantité totale de lumière produite par l'ampoule LED par 1 W d'énergie. *Efficacité = sortie totale en lumens/puissance total*. Les anciennes puces LED trouvées dans les ampoules LED de génération précédente, datant de 2008 à 2010, produisent moins de lumière par watt que les puces LED de 2011 à 2012 trouvées dans les ampoules LED modernes. Par exemple, une ampoule de 7W de 2012 avec une puce CREE XT-E peut produire plus de lumière ou de sortie en lumens qu'une ampoule de 12W avec une ancienne puce CREE XP-E. Les ampoules LED modernes ont également de meilleurs designs de dissipateurs thermiques, permettant des sorties lumineuses plus élevées.

7.3. Efficacité des LED et efficacité des lampes

Comme discuté dans la section ci-dessus, nous devons nous assurer que les informations du détaillant spécifient l'efficacité de la lampe plutôt que l'efficacité de la LED. En raison des pertes inhérentes dans l'ampoule, l'efficacité de la lampe sera toujours inférieure à l'efficacité de la LED, selon le design. Cela inclut les effets thermiques, les pertes de pilotes et les inefficacités optiques qui combinent toutes pour réduire l'efficacité globale de l'ampoule LED ou du luminaire par rapport au paquet ou à la puce LED interne. Collectivement, ces pertes peuvent diminuer l'efficacité de plus de 30 %. Dans de tels cas, un fabricant peut spécifier qu'une ampoule LED MR16 a 720lm, mais en réalité, pour l'ampoule LED, il n'y a qu'environ 500lm.

7.4. Éclairage LED et facteur de puissance

Une complication supplémentaire est le facteur de puissance (PF), qui est une valeur inférieure à 1.0 et mesure l'efficacité du pilote LED ou de l'alimentation. Essentiellement, un appareil électrique peut être évalué à une puissance de 100W mais consommer en réalité plus de 100W en raison d'un décalage de phase entre la tension instantanée et le courant

instantané. Rappelez-vous que l'alimentation secteur est AC ou courant alternatif et est composée de formes d'onde sinusoïdales de tension oscillante et de courant oscillant. Idéalement, ces deux formes d'onde sont synchrones ($PF=1$), mais en raison de la nature des appareils électroniques ou des charges inductives telles que les moteurs électriques, un retard émerge entre la forme d'onde de tension et la forme d'onde de courant, entraînant un gaspillage d'énergie électrique ou une puissance réactive qui ne peut accomplir aucun travail. Par conséquent, un appareil peut être évalué à 1000W de puissance réelle mais consommer 1500W de puissance apparente ou active en raison d'un PF de 0.67, et finir par gaspiller 500W ou 1/3 de la puissance totale consommée en raison du décalage de phase du courant. Notez que pour que l'appareil électrique utilise le courant, il doit être en phase avec la tension, étant donné que la puissance est égale à la tension multipliée par le courant, soit $P = VI$.

Le PF est généralement un problème uniquement dans les applications commerciales avec des dispositifs inductifs qui utilisent une très haute puissance, de sorte que les retards entre le courant et la tension s'additionnent pour produire des pertes de puissance significatives. D'autres composants qui entraîneront des retards entre le courant et la tension incluent les transformateurs, les régulateurs de tension et les ballasts dans l'éclairage fluorescent. Dans les environnements résidentiels, ces pertes sont relativement minimales et les entreprises d'électricité ne facturent que la puissance réelle de toute façon. Cependant, il y a toujours une perte, donc ceux qui sont soucieux de l'énergie ou écologiques peuvent souhaiter examiner le facteur de puissance de leurs alimentations LED pour s'assurer qu'il est supérieur à 0.8 afin de minimiser les pertes d'énergie. En fait, le programme *Energy Star* du département de l'Énergie des États-Unis (DOE) impose des facteurs de puissance minimaux acceptables de 0.7 et 0.9 respectivement pour les lumières LED domestiques et commerciales.

La plupart des dispositifs d'alimentation de nos jours auront une forme de correction de facteur de puissance, passive ou active, menant à un PF supérieur à 0.9, afin de minimiser les pertes de puissance. Une exception est les pilotes de gradation ultra-élevée qui s'assombrissent jusqu'à 1 %. En raison des charges capacitatives élevées nécessaires pour stabiliser le courant à des niveaux de gradation très bas afin d'éviter le scintillement, le PF est faible, généralement environ 0.65, ce qui signifie qu'une ampoule LED de 10W nominale consommera environ 15.4W (ou VA, puissance apparente) près de la charge maximale. Cependant, en pratique, ce n'est pas un gros problème étant donné que ces pilotes sont généralement utilisés dans des applications où les lampes seront atténuées à des niveaux bas pendant la majeure partie de leur durée de vie, de sorte que la puissance réelle est de 2 ou 3W et la puissance apparente reste très faible, jusqu'à 4.6W.

8. Spécifications des LEDs

Lors de la sélection d'une LED pour une application particulière, il est nécessaire de comprendre les différentes spécifications ou paramètres des LED. Certaines des principales spécifications des LED sont données ci-dessous. Les spécifications des LED peuvent être classées en spécifications électriques et optiques.

8.1. Spécifications électriques

Puisque la LED est essentiellement une diode, la tension directe et le courant direct sont deux paramètres importants. Les LEDs basse puissance peuvent supporter un courant direct allant jusqu'à 100mA, tandis que les LEDs de puissance peuvent avoir un courant direct aussi élevé que 1A. La chute de tension directe typique varie entre 1.2V et 3V. Il est nécessaire de s'assurer que la capacité de courant maximale n'est pas dépassée. Cela pourrait entraîner une dissipation de chaleur excessive à l'intérieur de la puce LED elle-même, ce qui pourrait réduire la sortie lumineuse et la durée de vie de fonctionnement.

Tension inverse : Les LEDs ne tolèrent pas de fortes tensions inverses. Elles ne doivent jamais fonctionner au-delà de leur tension inverse maximale indiquée, qui est normalement assez faible. Si elles le font, la destruction permanente du dispositif en résultera presque certainement. S'il y a une chance qu'une tension inverse apparaisse à travers la LED, il est toujours préférable d'intégrer une protection dans le circuit pour éviter cela. Normalement, des circuits de diodes simples peuvent être introduits et ceux-ci protégeront adéquatement toute LED.

- Température de jonction de fonctionnement et de stockage
- Résistance thermique (jonction à ambiant)
- Durée de vie de fonctionnement : L'intensité lumineuse d'une LED diminue progressivement avec le temps. Cela signifie qu'une LED a une durée de vie opérationnelle. Cette spécification de LED est particulièrement importante lorsque des LED doivent être utilisées pour des applications d'éclairage. Ce n'est pas normalement aussi crucial lorsque la LED est utilisée comme indicateur - ici, une défaillance catastrophique est d'une plus grande importance.
- Temps d'allumage et d'extinction.

8.2. Spécifications optiques

Dans cette section, il faut considérer la couleur de la lumière, l'intensité maximale et le motif de radiation de la LED.

Sortie lumineuse : La spécification d'intensité lumineuse de la LED n'est pas d'une importance cruciale pour la plupart des applications d'indicateurs, mais avec les LEDs utilisées pour l'éclairage, ce paramètre est nécessaire pour pouvoir spécifier exactement ce qui est nécessaire dans de nombreuses situations. La sortie lumineuse d'une LED est quantifiée en tant que valeur d'intensité lumineuse et est exprimée en millicandela (mcd). La valeur d'intensité lumineuse pour une LED doit être citée pour un courant donné. De nombreuses LEDs fonctionnent à des courants d'environ 20mA, mais la sortie lumineuse d'une LED augmente avec une augmentation du courant direct.

Elle est parfois spécifiée comme intensité de radiation à un courant particulier en watt/steradian.

Longueur d'onde de fonctionnement de la LED : Cela signifie la couleur de la lumière émise. Dans la fiche technique, la valeur numérique directe de la longueur d'onde est donnée pour la LED colorée. Dans le cas de la LED blanche, la réponse spectrale graphique du dispositif est fournie.

Motif de radiation : Il décrit la force d'intensité relative dans n'importe quelle direction à partir de la source lumineuse. Les sources lumineuses pratiques ont diverses formes de motifs de radiation basés sur différents mécanismes d'émission, matériaux utilisés pour la fabrication des sources et techniques de fabrication. Les fiches techniques des fabricants de LEDs fournissent des motifs de radiation en termes d'intensité relative par rapport à l'angle. Les motifs peuvent être symétriques ou non symétriques. Dans le cas de motifs de radiation symétriques, les fabricants mentionnent les angles de vue.

9. Applications des LEDs

Les LEDs sont largement utilisées comme indicateurs ou comme source ou ampoule optique. Concentrons-nous sur ces applications.

9.1. LED comme indicateur

Les LEDs qui produisent une radiation visible (400 à 700nm) sont utiles dans les instruments, les calculatrices, etc., à des fins d'affichage. Lorsqu'elles sont utilisées comme indicateur simple, elles sont utilisées en polarisation directe. Le circuit est le suivant. La valeur de la résistance, R_s , détermine le courant direct de la LED, décidant ainsi de l'intensité lumineuse. Voir figure 10.

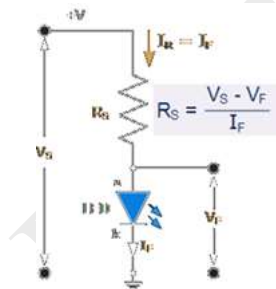


Figure 11 : Schéma pour déterminer l'intensité lumineuse

Lorsqu'elles sont utilisées comme indicateurs, les LEDs peuvent avoir plusieurs formes, comme des LEDs de couleur individuelle ou multicolores. Plusieurs diodes électroluminescentes peuvent être combinées dans un seul boîtier pour produire des affichages tels que des graphiques à barres, des bandes, des matrices, des affichages à sept segments, des affichages à matrice de points, etc.

9.2. LED comme source optique :

La LED est une source lumineuse potentielle pour la communication par fibre optique et dans les opto-isolateurs. L'une des composantes clés de la communication optique est la source de lumière monochromatique. Dans les communications optiques, les sources de lumière doivent être compactes, monochromatiques, stables et durables (de nombreuses années). Les LEDs peuvent former des sources de lumière en onde continue (CW) pour la communication optique. Les LEDs utilisées dans les communications sont construites pour permettre à la lumière d'émerger du bord de l'appareil. Voir figure 12.

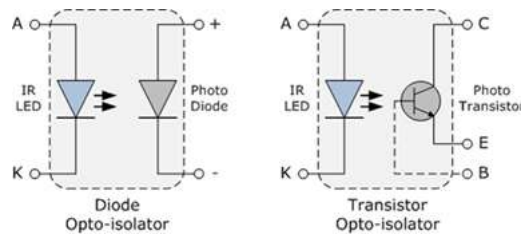


Figure 12 : Utilisation de la LED dans le système de communication optique

L'optoisolateur n'est rien d'autre qu'une source optique et un détecteur optique utilisés en paire. Il trouve des applications dans les systèmes d'alarme anti-intrusion, les lecteurs de CD et d'autres dispositifs nécessitant une radiation invisible. Ici, une LED infrarouge est utilisée à la place d'une LED de la plage visible, ainsi qu'un photodiode IR. L'avantage des opto-isolateurs est qu'ils fournissent une isolation électrique entre deux circuits tout en connectant optiquement deux circuits.

9.3. LED comme ampoule :

Les ampoules incandescentes et les CFL sont les sources lumineuses traditionnelles utilisées à des fins d'éclairage. Auparavant, les LEDs n'avaient qu'une sortie lumineuse de quelques lumens et n'atteignaient même pas le niveau d'intensité lumineuse des ampoules incandescentes standard. Des avancées plus récentes dans les processus de fabrication des LEDs ont suscité une discussion vigoureuse sur la profondeur et le rythme avec lesquels les LEDs pénètrent le marché de l'éclairage. Les LEDs gagnent une acceptation généralisée en tant que source lumineuse la plus efficace en raison de leurs avantages de faible consommation d'énergie, longue durée de vie, plus de fiabilité, petite taille, légèreté et, surtout, respect de l'environnement. Les LEDs remplacent les sources lumineuses conventionnelles en raison de divers avantages tels que la faible consommation d'énergie, le coût, la longue durée de vie, respect de l'environnement, etc.

10. Résumé

Une diode électroluminescente (LED) est un dispositif semi-conducteur qui émet de la lumière lorsque le courant la traverse. Les électrons dans le semi-conducteur se recombinent avec des trous électroniques, libérant de l'énergie sous forme de photons.

La couleur de la lumière (correspondant à l'énergie des photons) est déterminée par l'énergie requise pour que les électrons traversent la bande interdite du semi-conducteur.

La principale différence entre une diode redresseuse et une LED est que les semi-conducteurs de type p et n de la LED sont fortement dopés (plus de $10^{26}/m^3$). Ainsi, d'autres diodes dégagent de la chaleur lorsqu'elles sont polarisées directement, tandis que les LEDs émettent de la lumière lorsqu'elles sont polarisées directement. Le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse par l'application d'une tension électrique est appelé électroluminescence.

Les caractéristiques électriques de la LED sont essentiellement des variations de courant et de tension à travers la diode. La caractéristique directe d'une LED est la même que celle d'une diode redresseuse, sauf pour un changement dans la chute de tension directe.

Les caractéristiques optiques donnent une idée de la couleur de la lumière émise et de la distribution de puissance spectrale. Il y a deux caractéristiques optiques importantes, à savoir spectrales et spatiales, qui doivent être étudiées. Il faut connaître les caractéristiques électriques et optiques de la LED avant de l'utiliser pour une application particulière.

Si le côté p et le côté n de la jonction p-n d'une LED sont fabriqués à partir du même type de matériau, alors on l'appelle une LED homojonction.

Si le matériau de type n et de type p de la LED est différent, alors on l'appelle une LED hétérojonction.

Comme son nom l'indique, dans une LED émettant en surface, la lumière émet de la surface de la LED et est perpendiculaire à la surface de la LED.

Dans une LED émettant sur le bord, la lumière est émise du bord de la couche semi-conductrice, qui est guidée par deux couches appelées couches de guidage de lumière.

L'efficacité de la lumière LED est mesurée en lumens par watt (Lm/W), ce qui fait référence à la quantité totale de lumière que l'ampoule LED produit par 1 W d'énergie. *Efficacite' = puissance totale/puissance totale en lumens*

Les LEDs ont un domaine d'application très large. Elles sont couramment utilisées comme indicateur lumineux pour divers appareils et instruments. Elles sont largement utilisées comme source optique, que ce soit dans la communication optique ou dans des dispositifs isolateurs optiques. Elles sont désormais largement acceptées comme source d'illumination en raison de la disponibilité de LEDs fiables, puissantes et éconergétiques. Elles remplacent les ampoules incandescentes et CFL, les ampoules traditionnelles.

11. Lexique

LED : diode électroluminescente

Électroluminescence : le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse par l'application d'une tension électrique

Homojonction : le côté p et le côté n de la jonction p-n d'une LED sont fabriqués à partir du même type de matériau

Hétérojonction : le matériau de type n et de type p de la LED est différent

12. Références

1. <https://epgp.inflibnet.ac.in/>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/LED_lamp
3. <https://www.liteonled.com.au/buying-guide/understanding-led-lighting/led-power-levels/>
4. <https://www.thetechnicaltalk.com/2020/04/edge-emitter-led-construction-and.html>

13. Recommandation

S.M. Sze, Semiconductor Devices - Physics and Technology, Wiley, New York.

J. Singh, Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology, McGraw Hill.

P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, Pearson Education.

J. Singh, Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices, Tata McGraw Hill.

Pr Omar ELOUTASSI

Chapitre 6 : Diode laser

1. Introduction

Comme de nombreux autres dispositifs semi-conducteurs, une diode laser est créée en dopant une très fine couche de la surface d'une plaquette de cristal. Une jonction p-n, ou diode, est créée lorsque le cristal est dopé pour former une zone n-type et une région p-type empilées l'une sur l'autre. Une diode laser (LD, également connue sous le nom de diode laser d'injection ou ILD) est un dispositif semi-conducteur qui fonctionne de manière similaire à une diode électroluminescente, en ce sens qu'elle peut produire des conditions de laser à sa jonction lorsqu'elle est pompée directement avec un courant électrique.

La diode laser fonctionne sur le principe que chaque atome excité a la capacité de générer des photons si les électrons à des niveaux d'énergie plus élevés ont accès à une source d'énergie externe. Un atome peut émettre de l'énergie lumineuse par trois processus principaux : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Il existe plusieurs distinctions significatives entre les diodes électroluminescentes (LED), qui sont similaires aux diodes laser dans certains systèmes de communication par fibre optique, et les diodes laser. La lumière cohérente à fréquence étroite que les diodes laser peuvent produire permet la transmission de plusieurs canaux de données sur un seul câble à fibre optique.

Pratiquement tous les aspects de ces domaines, des « spectacles de lumière » aux CD, DVD et effets spéciaux au cinéma, impliquent la technologie laser. Les pointeurs laser, les scanners de codes-barres, les imprimantes laser, etc. sont quelques autres utilisations courantes des lasers. Dans les pointeurs laser, des diodes laser sont utilisées. Les communications par fibre optique emploient des diodes laser. Les lecteurs de codes-barres utilisent des diodes laser. Dans l'impression laser, des diodes laser sont utilisées.

2. Objectif

Après avoir étudié cette unité, vous apprendrez sur :

- Différents types de diodes laser
- Principe et fonctionnement de la diode laser
- Application de la diode laser

3. Diode laser

Une diode laser (LD, également connue sous le nom de diode laser d'injection ou ILD) est un dispositif semi-conducteur qui fonctionne de manière similaire à une diode électroluminescente, en ce sens qu'elle peut produire des conditions de laser à sa jonction lorsqu'elle est directement pompée avec un courant électrique.

La transition p-n dopée, qui est entraînée par la tension, permet la recombinaison d'un électron et d'un trou. Une radiation sous forme de photon émis est produite lorsqu'un électron tombe d'un niveau d'énergie plus élevé à un niveau inférieur. Il s'agit d'une émission non intentionnelle. Lorsque le processus est effectué de manière répétée et qu'une nouvelle lumière avec la même phase, cohérence et longueur d'onde est créée, une émission stimulée peut en résulter.

La longueur d'onde du faisceau émis, qui dans les diodes laser modernes varie de l'infrarouge à l'ultraviolet (UV), est déterminée par le matériau semi-conducteur sélectionné. La forme de laser la plus répandue fabriquée est la diode laser, qui est utilisée dans une variété d'applications telles que les communications par fibre optique, les lecteurs de codes-barres, les pointeurs laser, la lecture/enregistrement de CD, DVD et disques Blu-ray, l'impression laser, le scanning laser et l'illumination par faisceau lumineux. Les diodes laser peuvent être utilisées pour l'illumination générale avec l'utilisation d'un phosphore similaire à celui présent dans les LEDs blanches.

3.1. Généralités

D'un point de vue électrique, une diode laser est une diode PIN. Les porteurs (électrons et trous) sont pompés dans la région intrinsèque (I) de la diode laser, qui abrite la région active, à partir des régions N et P, respectivement. Tous les lasers contemporains utilisent la mise en œuvre à double hétérostructure, où les porteurs et les photons sont restreints pour maximiser leurs chances de recombinaison et d'émission de lumière. Les recherches initiales sur les diodes laser ont été effectuées sur des diodes P-N simples. L'objectif d'une diode laser, contrairement à une diode conventionnelle, est de recombiner tous les porteurs dans la région I et de générer de la lumière.

Ainsi, des semi-conducteurs à bande interdite directe sont utilisés pour créer des diodes laser. L'un des processus de croissance cristalline est utilisé pour produire la structure épitaxiale de la diode laser, commençant généralement par un substrat dopé N et progressant à travers la couche active dopée I, le revêtement dopé P et la couche de contact. Les puits quantiques sont le plus souvent utilisés dans la couche active car ils offrent un courant de seuil plus bas et une plus grande efficacité.

4. Pompage électrique et optique

Les diodes laser sont un sous-ensemble de la catégorie plus large des diodes à jonction p-n semi-conductrices. Les deux espèces de porteurs de charge, trous et électrons, sont « injectées » dans la zone de déplétion depuis des côtés opposés de la jonction p-n par un biais électrique direct à travers la diode laser. Dans un semi-conducteur, les trous d'un matériau dopé P sont injectés dans un matériau dopé N, et vice versa. Partout où les semi-conducteurs de type n et p sont en contact physique, la différence de potentiel électrique entre eux provoque l'émergence d'une zone de déplétion dépourvue de porteurs de charge. Cette classe de lasers est parfois appelée « lasers d'injection » ou « diode laser d'injection » (ILD) en raison de l'injection de charge utilisée pour alimenter la majorité des diodes laser. Les diodes laser peuvent également être classées comme des lasers semi-conducteurs car ce sont des dispositifs semi-conducteurs. Les diodes laser peuvent être distinguées des lasers à état solide à l'aide de l'un ou l'autre identifiant.

Certaines diodes laser peuvent également être alimentées par le biais de pompage optique. Les lasers semi-conducteurs pompés optiquement (OPSL) utilisent un autre laser (généralement une autre diode laser) comme source de pompage et une puce semi-conductrice III-V comme milieu de gain. En termes de sélection de longueur d'onde et d'absence d'interférences provenant des structures d'électrodes internes, les OPSL présentent

plusieurs avantages par rapport aux ILD. L'invariance des paramètres du faisceau tels que la divergence, la forme et le pointage à travers un rapport de puissance de sortie de 10:1, ainsi que les variations de puissance de pompage (et donc de puissance de sortie), constituent un autre avantage des OPSL.

5. Génération d'émission spontanée

Lorsqu'un électron et un trou sont présents dans le même espace, ils peuvent « s'annihiler » ou se recombiner, provoquant une émission spontanée, dans laquelle l'électron peut à nouveau occuper l'état d'énergie du trou et libérer un photon avec une énergie égale à la différence entre l'état initial de l'électron et l'état du trou. (Dans une diode de jonction semi-conductrice typique, l'énergie libérée lors de la recombinaison des électrons et des trous est transportée sous forme de phonons, ou vibrations de réseau, plutôt que de photons.) Des caractéristiques similaires à celles d'une LED sont produites par l'émission spontanée en dessous du seuil de laser. Bien que l'émission spontanée soit nécessaire pour démarrer un laser oscillant, elle n'est qu'une des nombreuses sources d'inefficacité une fois que le laser a démarré. Voir figure 1.



Figure 1 : Lasers semi-conducteurs (De Bas en Haut : 660 nm, 635 nm, 532 nm, 520 nm, 445 nm, 405 nm)

6. Semiconducteurs à bande directe et indirecte

Le type de semi-conducteur utilisé, dont la structure physique et atomique permet l'émission de photons, distingue un laser semi-conducteur émettant des photons d'une diode de jonction semi-conductrice standard émettant des phonons (non émettrice de lumière). Ces semi-conducteurs dits à "bande directe" sont ceux qui émettent des photons. Les bandes interdites dans le silicium et le germanium, deux semi-conducteurs à élément unique, ne s'alignent pas de manière à permettre l'émission de photons ; par conséquent, ils ne sont pas considérés comme ayant des "bandes directes".

D'autres substances, les soi-disant semi-conducteurs composés, rompent la symétrie en disposant alternativement deux espèces atomiques différentes dans un motif en damier, bien qu'ayant des structures cristallines presque identiques à celles du silicium ou du germanium. La caractéristique cruciale de la "bande directe" est produite par le changement de matériaux dans le motif alternatif. Les semi-conducteurs composés tels que l'arséniure de gallium, le

phosphore d'indium, l'antimoniure de gallium et le nitrure de gallium peuvent tous être utilisés pour fabriquer des diodes de jonction qui émettent de la lumière. Voir figure 2.

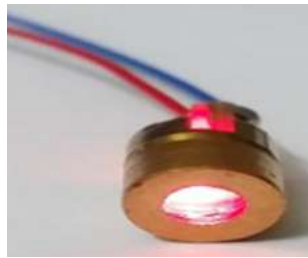


Figure : 2 : Une diode laser métallique simple et à faible puissance

7. Cavité optique et modes laser

La zone de gain est entourée par une cavité optique, tout comme dans d'autres lasers, pour créer un laser. Le type de diode laser le plus basique crée un guide d'onde optique sur la surface du cristal, ce qui confine la lumière à une ligne relativement étroite. Un résonateur Fabry-Pérot est créé lorsque les deux extrémités du cristal sont coupées en bords parallèles parfaitement lisses. Lorsque des photons sont émis dans un mode de guide d'onde, ils se déplacent le long du guide d'onde et rencontrent plusieurs réflexions de chaque face d'extrémité avant de sortir. Une onde lumineuse est stimulée pour émettre de la lumière à mesure qu'elle traverse la cavité, mais une partie de la lumière est également perdue en raison de l'absorption et de la réflexion incomplète des facettes d'extrémité. Enfin, la diode commence à "laser" s'il y a plus d'amplification que de pertes. La géométrie de la cavité optique affecte quelques caractéristiques clés des diodes laser. En général, seule une mode optique dans la direction perpendiculaire aux couches est supportée par la structure, et la lumière est contenue dans une couche très fine. Le laser est qualifié de "multimode" s'il peut supporter plusieurs modes optiques transverses dans la direction transversale et est plus large que la longueur d'onde de la lumière. Ces lasers multimodes transverses sont adaptés aux applications nécessitant une très haute puissance mais pas un faisceau étroit TEM00, comme l'impression, l'activation chimique, la microscopie ou le pompage d'autres types de lasers. Le guide d'onde doit être rendu plus étroit dans les applications où un faisceau focalisé petit est requis, de l'ordre de la longueur d'onde optique. Cela entraîne le support d'un seul mode transverse et d'un faisceau limité par diffraction. Ces composants à mode spatial unique sont utilisés dans la fibre optique, les pointeurs laser et le stockage optique. Il convient de noter que ces lasers peuvent encore supporter plusieurs modes longitudinaux, leur permettant d'émettre de la lumière simultanément à plusieurs longueurs d'onde. La bande interdite du matériau semi-conducteur et les modes de la cavité optique influencent la longueur d'onde qui est émise. En général, les modes les plus proches du sommet de la courbe de gain seront ceux qui restent le plus intensément, et le gain maximum se produira pour des photons ayant une énergie légèrement supérieure à l'énergie de la bande interdite. Selon les conditions de fonctionnement, la largeur de la courbe de gain déterminera combien d'autres "modes latéraux" peuvent également laser. Les lasers Fabry-Pérot (FP) sont des lasers à mode spatial unique qui peuvent supporter de nombreux modes longitudinaux. Dans la largeur de bande de gain du milieu de laser, un laser FP sera loué à une variété de modes de cavité. Un laser FP a généralement un nombre instable de modes de laser, qui peut changer en raison de

variations de température ou de courant. Le fonctionnement en mode longitudinal unique est une option de conception pour les diodes laser à mode spatial unique. Ces diodes laser à fréquence unique très stables sont utilisées en spectroscopie, en métrologie et comme références de fréquence. Les lasers à rétroaction distribuée (DFB) et les lasers à réflecteur Bragg distribué (DBR) sont deux catégories différentes de lasers à diode à fréquence unique.

8. Formation du faisceau laser

Après avoir quitté la puce, la diffraction provoque une divergence rapide du faisceau (expansion), généralement à un angle de 30 degrés verticalement et de 10 degrés latéralement. Une lentille est nécessaire pour créer un faisceau collimateur similaire à celui produit par un pointeur laser. Des lentilles cylindriques et d'autres optiques sont utilisées pour créer des faisceaux circulaires lorsqu'ils sont nécessaires. En raison de la différence entre les divergences verticale et latérale, le faisceau collimateur pour les lasers à mode spatial unique utilisant des lentilles symétriques prend une forme ovale. Un pointeur laser rouge rend cela facile à voir. L'axe long de l'ellipse est perpendiculaire au plan de la puce.

9. Caractéristiques

La construction simple de diode laser mentionnée ci-dessus est inefficace. De tels dispositifs ne peuvent fonctionner qu'en mode pulsé sans être endommagés en raison de leurs exigences en haute puissance. De telles technologies ne sont pas utiles, bien qu'elles soient significatives sur le plan historique et faciles à expliquer.

9.1. Lasers à double hétérostructure

Dans ces dispositifs, deux couches à large bande interdite sont placées entre une couche de matériau à faible bande interdite. L'arséniure de gallium (GaAs) et l'arséniure d'aluminium-gallium ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) sont deux matériaux souvent utilisés ensemble. Le terme "laser à double hétérostructure" ou laser DH fait référence à un laser avec deux hétérostructures, chacune étant une jonction entre deux matériaux de bande interdite distincts. Pour comparaison avec ces dispositifs plus largement utilisés, le type de diode laser discuté dans la première section de l'article peut être appelé laser homojonction.

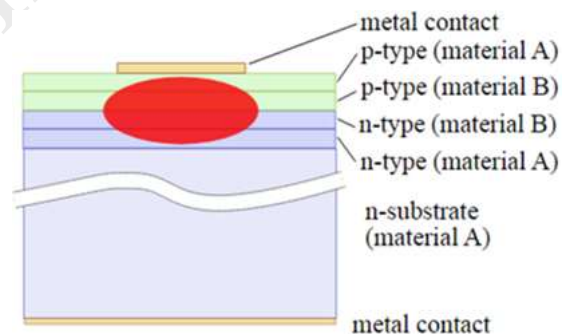


Figure : 6.3 : Diode Laser à Double Hétérostructure

Le principal avantage d'un laser DH est que la zone active, où des électrons libres et des trous coexistent simultanément, est limitée à l'épaisseur de la couche intermédiaire. Cela signifie qu'un nombre beaucoup plus élevé de paires électron-trou peut contribuer à l'amplification et que moins de paires sont laissées dans les régions périphériques qui amplifient mal. De plus,

la lumière est réfléchi à l'intérieur de l'hétérojonction, ce qui limite la quantité de lumière à la zone où se produit l'amplification.

9.2. Lasers à puits quantiques

La couche intermédiaire peut fonctionner comme un puits quantique si elle est suffisamment mince. Cela indique qu'une partie de l'énergie de l'électron, ainsi que la variation verticale de la fonction d'onde, est quantifiée. En raison du bord abrupt de la fonction de densité d'états électroniques dans le système de puits quantiques, qui concentre les électrons dans des états d'énergie contribuant à l'activité laser, l'efficacité d'un laser à puits quantiques est supérieure à celle d'un laser en volume. Voir figure 4.

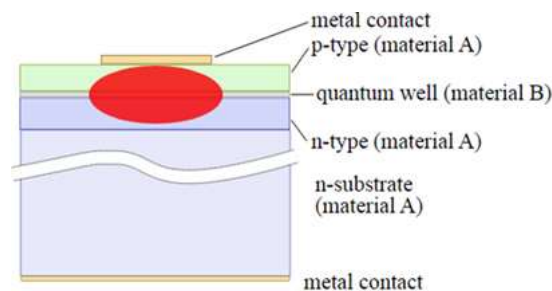


Figure : 6.4 : Diode Laser à Puits Quantiques Simple

Plusieurs lasers à puits quantiques sont ceux qui possèdent plusieurs couches de puits quantiques. L'overlap entre la région de gain et le mode de guide d'onde optique est amélioré en utilisant plusieurs puits quantiques. Réduire la couche de puits quantiques à un fil quantique ou à une mer de points quantiques a également montré qu'il augmente encore l'efficacité du laser.

9.3. Lasers à cascade quantique

Un type particulier de diode laser connu sous le nom de laser à cascade interbande (ICL) est capable de produire une radiation cohérente sur une grande partie du spectre infrarouge moyen.

9.4. Lasers à hétérostructure de confinement séparé

La couche mince dans la diode à puits quantiques simple mentionnée ci-dessus est tout simplement trop mince pour restreindre efficacement la lumière. En dehors des trois premières couches, deux autres sont ajoutées en compensation. Ces couches limitent efficacement la lumière car elles ont un indice de réfraction plus bas que les couches centrales. Une diode laser à hétérostructure de confinement séparé (SCH) est un tel design. Voir figure 5.

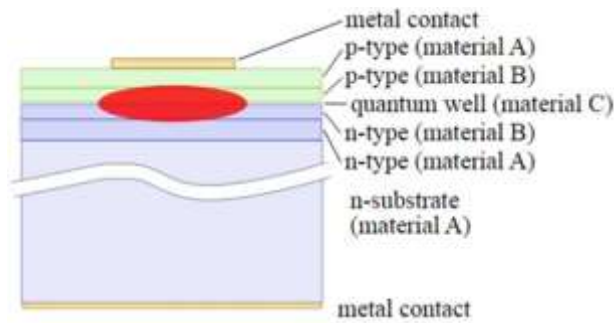


Figure : 5 : Diode Laser à Puits Quantiques à Hétérostructure de Confinement Séparé

9.5. Lasers à réflecteur Bragg distribué

Une diode laser à fréquence unique est appelée laser à réflecteur Bragg distribué (DBR). Elle se distingue par une cavité optique avec rétroaction produisant une zone de gain pompée électriquement ou optiquement, située entre deux miroirs. Le gain est favorisé sur un seul mode longitudinal, entraînant un fonctionnement en laser à une seule fréquence résonante. L'un des miroirs est un réflecteur large bande et l'autre miroir est sélectif en longueur d'onde. Pour permettre l'émission, le miroir large bande est généralement recouvert d'un revêtement à faible réflectivité. Un réseau de diffraction à haute réflectivité, construit de manière régulière, sert de miroir sélectif en longueur d'onde. Le réseau de diffraction est situé dans une zone passive, ou non pompée, de la cavité.

Un dispositif monolithique à puce unique connu sous le nom de laser DBR a le réseau de semi-conducteur gravé à l'intérieur. Les lasers émettant par le bord ou les VCSEL peuvent être utilisés comme lasers DBR. Les lasers à diode à cavité étendue et les lasers à réseau de Bragg en volume sont d'autres architectures hybrides ayant la même topologie ; cependant, ils ne doivent pas être appelés lasers DBR.

9.6. Lasers à rétroaction distribuée

Une diode laser à fréquence unique est un laser à rétroaction distribuée (DFB). Dans les systèmes DWDM, les DFB sont le type de transmetteur le plus répandu. Un réseau de diffraction est gravé près de la jonction p-n de la diode afin de stabiliser la longueur d'onde du laser. Pour renvoyer une seule longueur d'onde à la zone de gain et produire un laser, ce réseau fonctionne comme un filtre optique. La réflexion des facettes n'est pas nécessaire car le réseau fournit la rétroaction nécessaire au fonctionnement en laser. Ainsi, un DFB a un revêtement anti-réflexion sur au moins une de ses surfaces. Le laser DFB a une longueur d'onde constante déterminée par le pas du réseau lors de la production et est seulement légèrement accordable par température. Dans les applications de communication optique où une longueur d'onde précise et stable est cruciale, les lasers DFB sont fréquemment utilisés.

Basé sur sa caractéristique statique, ce laser DFB a un courant de seuil d'environ 11 mA. Dans un régime linéaire, 50 mA au milieu de la caractéristique statique peuvent être utilisés comme courant de polarisation approprié. En ajoutant un décalage de phase unique (1PS) ou plusieurs décalages de phase (MPS) au réseau de Bragg uniforme, diverses méthodes ont été suggérées pour améliorer le fonctionnement en mode unique dans ces types de lasers. Cependant, en raison de leur combinaison d'un meilleur rapport de suppression des modes

latéraux et d'une réduction de l'effet de brûlage spatial, les lasers DFB à décalage de phase multiple représentent la meilleure option.

9.7. Laser émettant en surface à cavité verticale

Contrairement aux diodes laser ordinaires, les lasers émettant en surface à cavité verticale (VCSEL) ont l'axe de la cavité optique parallèle au flux de courant plutôt que perpendiculaire. Étant donné que la longueur de la région active est beaucoup plus courte que les dimensions latérales, la radiation sort de la cavité par sa surface plutôt que par son bord, comme l'illustre l'image. Des miroirs diélectriques avec des couches alternant des indices de réfraction élevés et bas, d'une épaisseur d'un quart d'onde, sert de réflecteurs aux extrémités de la cavité. Voir figure 6.

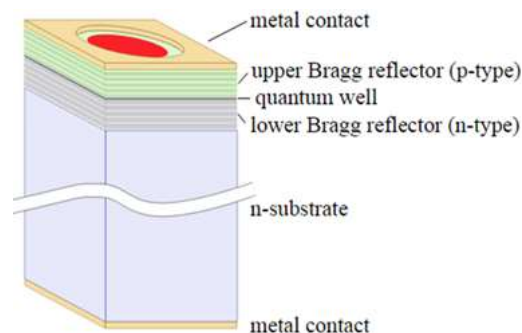


Figure : 6.6 : Schéma d'une structure VCSEL simple

De tels miroirs diélectriques fournissent un degré élevé de réflectance sélective en longueur d'onde à la longueur d'onde de surface libre λ requise si les épaisseurs des couches alternées d_1 et d_2 avec des indices de réfraction n_1 et n_2 sont telles que $n_1d_1 + n_2d_2 = \lambda/2$, ce qui conduit ensuite à l'interférence constructive de toutes les ondes partiellement réfléchies aux interfaces. Mais il y a un inconvénient : en raison de la haute réflectivité des miroirs, les VCSEL ont des puissances de sortie inférieures par rapport aux lasers émettant par le bord.

Il y a plusieurs avantages à produire des VCSEL par rapport au processus de production des lasers émettant par le bord. Les émetteurs par le bord ne peuvent pas être testés avant la fin du processus de production. Si l'émetteur par le bord ne fonctionne pas, que ce soit en raison de mauvais contacts ou de la mauvaise qualité de croissance du matériau, le temps de production et les matériaux de traitement ont été gaspillés.

De plus, des dizaines de milliers de VCSEL peuvent être traités simultanément sur une plaquette de gallium de trois pouces, car les VCSEL émettent le faisceau perpendiculairement à la région active du laser plutôt que parallèlement comme avec un émetteur par le bord. Le rendement peut également être régulé pour produire un résultat plus prévisible, bien que la méthode de production des VCSEL soit plus laborieuse et consommatrice de ressources. Ils présentent souvent une production de puissance inférieure, cependant.

9.8. Laser émettant en surface à cavité externe verticale

Les lasers émettant en surface à cavité externe verticale, ou VECSEL, sont similaires aux VCSEL. Dans les VCSEL, les miroirs sont généralement générés soit indépendamment puis liés épitaxialement au semi-conducteur qui abrite la région active, soit ils sont cultivés séparément et liés à la structure de la diode. L'architecture des VECSEL est unique en ce sens

qu'un des deux miroirs est situé à l'extérieur de l'assemblage de la diode. En conséquence, il y a une zone d'espace libre dans la cavité. Un espacement normal de 1 cm existerait entre la diode et le miroir externe.

La mince zone de gain semi-conducteur, d'une épaisseur inférieure à 100 nm dans la direction de propagation, est l'une des caractéristiques les plus intrigantes de tout VECSEL. Un laser semi-conducteur typique en plan, en revanche, nécessite que la lumière se propage sur des distances de 250 m jusqu'à 2 mm ou plus. L'effet des non-linéarités "antiguidentes" dans la zone de gain du laser à diode est minimisé en raison de la courte distance de propagation. Le résultat final est un faisceau optique en mode unique avec une grande section transversale, ce qui n'est pas possible avec des lasers à diode en plan.

En raison de leur puissance et de leur efficacité extraordinaires lorsqu'ils sont pompés par des barres de lasers à diode multimode, les VECSEL pompés optiquement ont été démontrés par plusieurs chercheurs et sont encore en cours de développement pour une variété d'applications, y compris des sources de haute puissance pour une utilisation dans l'usinage industriel (découpe, poinçonnage, etc.). Les VECSEL pompés optiquement sont classés comme des lasers semi-conducteurs plutôt que comme des "lasers à diode" en raison de l'absence de jonction p-n.

Des VECSEL pompés électriquement sont également présentés. Les affichages projectifs font partie des utilisations des VECSEL pompés électriquement, qui sont soutenus par le doublement de fréquence des émetteurs VECSEL infrarouges proches pour créer de la lumière bleue et verte.

9.9. Lasers à Diode à Cavité Externe

Les lasers accordables avec des structures hétérogènes doubles de type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sont des lasers à diode à cavité externe. La technologie des étalons intracavitaires et les réseaux de Littrow de réglage de base ont été utilisés dans les premiers lasers à diode à cavité externe. D'autres conceptions incluent des arrangements de réseaux à prisme multiple et des réseaux à incidence rasante.

10. Fiabilité

Les problèmes de fiabilité et de défaillance des diodes laser sont les mêmes que ceux des diodes électroluminescentes. De plus, lorsqu'elles sont utilisées à des puissances plus élevées, elles sont vulnérables aux dommages optiques catastrophiques (COD).

Les développeurs des lasers à diode détiennent toujours des droits exclusifs sur de nombreuses améliorations de fiabilité réalisées au cours des 20 dernières années. Les distinctions entre des produits de laser à diode plus fiables et moins fiables ne sont pas toujours discernables par rétro-ingénierie.

Les lasers émettant en surface, comme les VCSEL, ou les lasers émettant par le bord en plan sont deux types de lasers semi-conducteurs. Le miroir de facette de bord pour les lasers émettant par le bord est fréquemment créé en fendant la plaquette semi-conductrice en un plan de réflexion spéculaire. La faiblesse du plan cristallographique dans les cristaux semi-

conducteurs III-V (comme GaAs, InP, GaSb, etc.) par rapport à d'autres plans facilite cette méthode.

La fin du réseau parfaitement périodique au niveau du plan de clivage modifie les états atomiques par rapport à leurs caractéristiques de masse au sein du cristal. Les états de surface au plan de clivage ont des niveaux d'énergie qui tombent dans la bande interdite du semi-conducteur (sinon interdite).

En conséquence, lorsque la lumière quitte le cristal semi-conducteur par le plan de clivage et se déplace dans l'espace libre, une partie de l'énergie lumineuse est absorbée par les états de surface, où les interactions phonon-électron la transforment en chaleur. En retour, le miroir fendu se réchauffe. De plus, le miroir peut chauffer en raison d'un contact imparfait entre le bord du laser à diode pompé électriquement et le support, ce qui crée un chemin pour l'évacuation de la chaleur.

La bande interdite du semi-conducteur se contracte dans les régions plus chaudes en raison du chauffage du miroir. Plus de transitions électriques de bande à bande s'alignent avec l'énergie des photons en raison de la réduction de la bande interdite, augmentant ainsi la quantité d'absorption. La facette peut fondre en raison d'une montée en température, un type de rétroaction positive, qui est désigné comme dommage optique catastrophique, ou COD.

Ce problème, qui est plus problématique pour les lasers basés sur GaAs émettant entre 0,630 μm et 1 μm de longueurs d'onde (et moins problématique pour les lasers de télécommunications à long terme basés sur InP émettant entre 1,3 μm et 2 μm de longueurs d'onde), a été découvert dans les années 1970. Une solution a été développée par Michael Ettenberg, un chercheur et alors vice-président du David Sarnoff Research Centre de RCA Laboratories à Princeton, New Jersey. Un mince revêtement d'oxyde d'aluminium s'est formé sur la facette. Si l'épaisseur de l'oxyde d'aluminium est choisie correctement, il sert de revêtement anti-réflexion qui réduit la réflexion à la surface. Le chauffage et le COD à la facette ont été réduits en conséquence.

Depuis lors, de nombreuses autres améliorations ont été utilisées. La fabrication d'un soi-disant miroir non absorbant (NAM) qui n'absorbe pas à la longueur d'onde d'intérêt pour les 10 μm environ avant que la lumière ne s'échappe de la facette fendue est une méthode.

SDL, Inc. a commencé à livrer des lasers à diode haute puissance avec de bonnes caractéristiques de fiabilité au tout début des années 1990. Lors d'événements comme les conférences SPIE Photonics West des années 1980, le PDG Donald Scifres et le CTO David Welch ont présenté de nouvelles données de performance en matière de fiabilité. En juin 2006, les stratégies utilisées par SDL pour lutter contre le COD étaient considérées comme hautement confidentielles et n'avaient pas été rendues publiques.

IBM Research (Ruschlikon, Suisse) a rapporté au milieu des années 1990 qu'elle avait développé le soi-disant "processus E2", qui conférait aux lasers à base de GaAs une résistance remarquable au COD. En juin 2006, rien n'était connu sur cette procédure non plus.

Malgré ces avancées exclusives, la fiabilité des barres de pompage de laser à diode haute puissance (utilisées pour pomper des lasers à état solide) continue d'être un problème difficile dans une variété d'applications. En fait, la recherche sur ce sujet est toujours en cours, bien

qu'elle se déroule dans des conditions de confidentialité, et les mécanismes de défaillance des diodes laser sont encore en cours d'élaboration.

Pour que les diodes laser continuent d'être adaptées à un large éventail d'applications, leur durée de vie doit être augmentée.

11. Applications

Avec des ventes de presque 733 millions d'unités en 2004 par rapport à 131 000 d'autres types de lasers, les diodes laser sont numériquement la forme de laser la plus populaire.

11.1. Télécommunications, imagerie et spectrométrie

Faciles à moduler et simples à coupler comme sources lumineuses pour la communication par fibre optique, les diodes laser sont largement utilisées dans les télécommunications. Elles sont un composant de plusieurs dispositifs de mesure, y compris les télémètres. Les lecteurs de codes-barres sont une autre application populaire. En tant que pointeurs laser, les lasers visibles, généralement rouges mais ensuite aussi verts, sont fréquemment utilisés. L'industrie de l'impression utilise considérablement à la fois des diodes à faible puissance et à haute puissance comme sources lumineuses pour le scan d'images (entrée) et la production de plaques d'impression très rapides et de haute résolution (sortie). Dans les lecteurs de CD, les CD-ROM et la technologie DVD, les diodes laser infrarouges et rouges sont fréquemment utilisées.

Les technologies HD DVD et Blu-ray utilisent des lasers violets. La spectrométrie d'absorption laser (LAS) est une technique qui utilise des diodes laser pour mesurer ou surveiller rapidement et à moindre coût la concentration de différentes espèces dans la phase gazeuse. Les processus industriels tels que le traitement thermique, le revêtement, le soudage par points et le pompage d'autres lasers comme les lasers à état solide pompés par diode utilisent tous des diodes laser haute puissance.

Différentes catégories peuvent être utilisées pour regrouper les applications des diodes laser. De plus grands lasers à état solide ou des oscillateurs paramétriques optiques pourraient gérer la majorité des applications, mais les diodes laser sont nécessaires pour les applications grand public en raison de leur faible coût. Étant donné que la lumière a tant de caractéristiques différentes (puissance, longueur d'onde, qualité spectrale et de faisceau, polarisation, etc.), il est utile de catégoriser les applications par ces caractéristiques fondamentales. Les diodes laser sont utilisées dans une grande variété d'industries.

Utiliser la caractéristique "d'énergie dirigée" d'un faisceau optique est le principal composant de nombreuses applications de diodes laser. Les imprimantes laser, les lecteurs de codes-barres, les scanners d'images, les illuminateurs, les désignateurs, les enregistreurs de données optiques, l'ignition de combustion, la chirurgie laser, le tri industriel, l'usinage industriel, le transfert d'énergie sans fil (sous forme de faisceau d'énergie), et les armes à énergie dirigée pourraient tous être classés sous cette rubrique. Bien que certaines de ces applications soient établies, d'autres ne font que commencer.

11.2. Utilisations médicales

Médecine laser : Les diodes laser offrent une large gamme d'applications novatrices en dentisterie et en médecine. Les cliniciens trouvent que les unités sont particulièrement attrayantes pour les opérations simples sur les tissus mous en raison de leur taille réduite, de leur coût et de leur facilité d'utilisation. Les longueurs d'onde des diodes, qui varient de 810 à 1100 nm, ne conviennent pas à la coupe ou à l'ablation car elles sont peu absorbées par les tissus mous. Au lieu d'être coupés par le faisceau laser, les tissus mous sont plutôt endommagés par le contact avec une pointe en verre brûlée et chaude. L'extrémité distale de la pointe est considérablement absorbée par l'irradiation du laser, ce qui élève sa température entre 500 et 900 °C. La pointe peut être utilisée pour couper les tissus mous grâce à sa chaleur, et elle peut également provoquer une hémostase par cautérisation et carbonisation. Les diodes laser, lorsqu'elles sont utilisées sur des tissus mous, peuvent causer des dommages thermiques collatéraux étendus aux tissus environnants.

Certaines applications tirent parti de la cohérence des diodes laser, car la lumière du faisceau laser est cohérente par nature. Celles-ci incluent l'holographie, les communications cohérentes, la mesure de distance interférométrique et le contrôle cohérent des réactions chimiques.

La télémétrie, les télécommunications, les contre-mesures infrarouges, la détection spectroscopique, la génération d'ondes radiofréquence ou térahertz, la préparation d'état d'horloge atomique, la cryptographie quantique par clé, le doublement et la conversion de fréquence, la purification de l'eau (dans l'UV), et la thérapie photodynamique (où une longueur d'onde spécifique de lumière rendrait une substance telle que la porphyrine chimiquement active en tant que pigment) utilisent toutes des diodes laser en raison de leur "spectre étroit".

Les diodes laser sont employées en raison de leur capacité à produire des impulsions lumineuses ultra-courtes par le processus de "verrouillage de mode". Des sources à haute puissance de pointe pour la détection par spectroscopie de rupture induite par laser, la génération d'ondes à forme arbitraire pour les ondes radiofréquences, l'échantillonnage photonique pour la conversion analogique-numérique, et les systèmes d'accès multiple par répartition de code optique pour la communication sécurisée sont quelques-unes des applications. La distribution d'horloge pour des circuits intégrés à haute performance en est une autre.

11.3. Photolithographie sans masque

Les diodes laser sont utilisées dans la photolithographie sans masque.

12. Équations de taux des diodes laser

Les équations de taux des diodes laser modélisent la performance électrique et optique d'une diode laser. Ce système d'équations différentielles ordinaires relie le nombre ou la densité de photons et de porteurs de charge (électrons) dans le dispositif au courant d'injection et aux paramètres du dispositif et du matériau tels que la durée de vie des porteurs, la durée de vie des photons et le gain optique.

Les équations de taux peuvent être résolues par intégration numérique pour obtenir une solution dans le domaine temporel, ou utilisées pour dériver un ensemble d'équations à l'état

stationnaire ou de petits signaux pour aider à mieux comprendre les caractéristiques statiques et dynamiques des lasers semi-conducteurs.

Les équations de taux des diodes laser peuvent être formulées avec plus ou moins de complexité pour modéliser différents aspects du comportement des diodes laser avec une précision variable.

12.1. Équations de taux multimodes

Dans la formulation multimode, les équations de taux modélisent un laser avec plusieurs modes optiques. Cette formulation nécessite une équation pour la densité de porteurs, et une équation pour la densité de photons dans chacun des modes de la cavité optique.

Où N est la densité de porteurs, P est la densité de photons, I est le courant appliqué, e est la charge élémentaire, V est le volume de la région active, τ est la durée de vie des porteurs, G est le coefficient de gain (s^{-1}), Γ est le facteur de confinement, τ_p est la durée de vie des photons, β est le facteur d'émission spontanée, τ_{rad} est la constante de temps de recombinaison radiative, M est le nombre de modes modélisés, μ est le numéro de mode, et l'indice μ a été ajouté à G , Γ , et β pour indiquer que ces propriétés peuvent varier pour les différents modes.

Le premier terme du côté droit de l'équation de taux des porteurs est le taux d'électrons injectés (I/eV), le deuxième terme est le taux de déplétion des porteurs dû à tous les processus de recombinaison (décrit par le temps de désintégration) et le troisième terme est la déplétion des porteurs due à la recombinaison stimulée, qui est proportionnelle à la densité de photons et au gain du milieu.

Dans l'équation de taux de densité de photons, le premier terme ΓGP est le taux d'augmentation de la densité de photons dû à l'émission stimulée (le même terme que dans l'équation de taux des porteurs, avec un signe positif et multiplié par le facteur de confinement Γ), le deuxième terme est le taux auquel les photons quittent la cavité, pour l'absorption interne ou la sortie des miroirs, exprimé via la constante de temps de désintégration, et le troisième terme est la contribution de l'émission spontanée de la recombinaison radiative des porteurs dans le mode laser.

La modulation de la puissance de sortie d'une diode laser peut se faire de deux manières : en changeant le courant d'entrée/signal ou en alternant la sortie en onde continue après la génération de la lumière. Dans la modulation laser, le courant ou la tension varie dans le temps pour moduler le signal de sortie du laser. La modulation directe est lorsque le courant, avant d'atteindre la diode laser, est modifié avec le signal souhaité pour l'application. Cela utilise un générateur de fonctions pour créer le signal de modulation et un pilote de diode laser pour appliquer le signal au courant de polarisation pour le laser. La modulation externe est lorsque la modulation est imposée au signal laser après la génération de la lumière. Des modulations telles que la modulation électro-optique (EOM), la modulation acousto-optique (AOM), et la modulation par absorption électro (EAM) peuvent être utilisées pour manipuler la sortie du laser avec des champs électriques ou des ondes sonores. Les deux types de modulation des diodes laser sont montrés dans la figure 7.

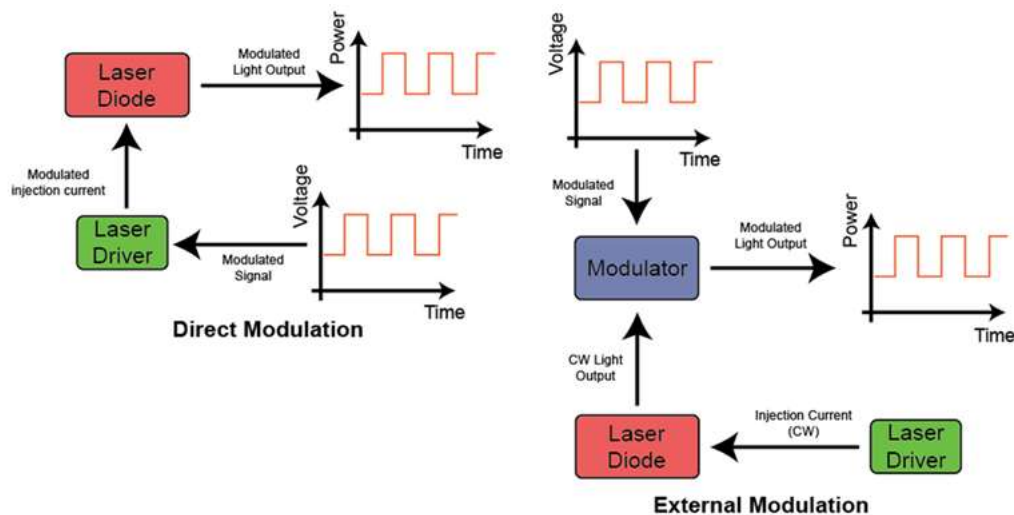


Figure : 7 : Schémas de Modulation Directe et de Modulation Externe

La modulation peut être utile pour une variété d'applications dans le monde des lasers. La capacité de données transmises peut être augmentée avec des sources et des modulateurs de haute fréquence pour de nombreuses applications de communication. La modulation laser offre une méthode alternative pour les mesures de détection et de télémétrie par lumière (LIDAR) avec des avantages tels qu'un risque réduit de dommages oculaires et une sensibilité plus élevée que celle des lasers à onde continue (CW). Lorsque des puissances de sortie ultra-élevées ne sont pas nécessaires pour les lasers pulsés, comme dans le cas de la spectroscopie, les lasers modulés peuvent fournir une acquisition de données rapide, réduire les coûts du système et permettre une haute résolution sans endommager l'échantillon. D'autres types de recherches ou d'expériences impliquant l'imagerie d'échantillons bénéficient également de la modulation des diodes laser.

La modulation laser peut être analogique ou numérique, avec différents avantages. La modulation analogique est un signal continu et lisse qui est limité à une plage de valeurs. Un graphique de puissance en fonction du temps en forme d'onde sinusoïdale est un parfait exemple de modulation analogique où le signal change en douceur au fil du temps. La modulation numérique a un ensemble de valeurs discrètes et finies. Une onde carrée est un signal avec deux valeurs définies entre lesquelles basculer. Cela est souvent utilisé pour allumer et éteindre un laser, le point bas étant en dessous du seuil. Le laser fonctionne comme une LED en dessous du courant de seuil avec émission spontanée, et le laser fonctionne avec émission stimulée au-dessus du seuil. Dans la modulation directe, l'utilisation d'un signal numérique via une entrée analogique sur le pilote laser peut entraîner une distorsion de la puissance de sortie ou du signal du laser. Voir figure 8.

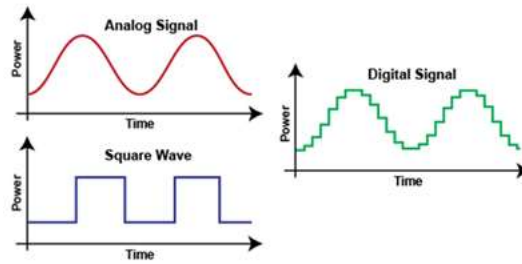


Figure : 8 : Signaux de Modulation Analogique et Numérique et Signal d'Onde Carrée

12.2. Problèmes et Solutions

Il y a quelques problèmes qui peuvent survenir lors de la modulation d'un signal laser. Voici quelques problèmes courants et des solutions ou recommandations, principalement pour la modulation directe.

- **Dépassement de la bande passante** – Lors de la modulation directe d'un laser, dépasser la bande passante peut causer des distorsions et une atténuation de la sortie. Vérifiez avec les fiches techniques du pilote laser et de la diode laser pour vous assurer que vous êtes bien en dessous de la bande passante de modulation indiquée.

- **Fréquence d'oscillation** – Si le laser est modulé à ou autour de la fréquence d'oscillation, des oscillations de relaxation peuvent se produire. Évitez la fréquence d'oscillation du laser pour une meilleure réponse du signal et une réduction des oscillations autour du point de consigne.

- **Bruit** – Un pilote laser avec un bruit élevé peut affecter la sortie propre du laser modulé. Sélectionnez un pilote à faible bruit pour garantir que le bruit électronique ne se propage pas à travers le système optique.

- **Courant Élevé** – Le fonctionnement à courant élevé ainsi que les hautes fréquences de modulation peuvent révéler des problèmes sous-jacents dans la conception du laser. Une sélection soigneuse des fils, des alimentations et des banques de condensateurs peut résoudre certains des problèmes créés à des courants plus élevés (>10 A).

13. Résumé

Dans cette unité, vous avez étudié la diode laser, son principe et son fonctionnement. Vous avez appris les différents types de diodes laser. La diode laser est basée sur le fonctionnement du laser, vous avez donc appris les idées de base du laser telles que l'émission spontanée, l'émission stimulée, la cohérence, le pompage optique et l'inversion de population.

14. Lexique

AOM : Modulation Acousto-Optique

CD : Disque Compact

CW : Onde Continue

DFB : Laser à Rétroaction Distribuée

EAM : Modulation par Absorption Électro

EOM : Modulation Électro-Optique

15. Références

1. Milan L. Mashanovitch, Larry A. Coldren, et Scott W. Corzine (2 mars 2012). Circuits intégrés photoniques et diodes lasers. Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-118-14817-4.
2. Robert N. Hall, George E. Fenner, James D. Kingsley, Thomas J. Soltys, et Robert O. Carlson (novembre 1962). "Émission de lumière cohérente à partir de jonctions GaAs" 9(9):366-368, Physical Review Letters. doi:10.1103/PhysRevLett.9.366. Bibcode: 1962PhRvL...9...366H.
3. Ajoy Chatak (2009). Tata McGraw-Hill Education, Optique, p. 1.14, ISBN 978-0-07-0262157.
4. Lasers à diode GaAlAs à bande étroite contrôlés par cavité externe 32-MHz, C. Voumard, 1977. 1(2): 61-3. Optics Letters. PMID 19680331. Bibcode:1977OptL....1...61V; doi:10.1364/OL.1.000061.
5. Zorabedian, P. (1995). "8". Dans F. J. Duarte (éd.). Manuel des lasers accordables. Academic Press. ISBN 0-12-222695-X.
6. Deppe, Herbert; Horch, Hans-Henning (2007). "Applications des lasers en chirurgie orale et dentisterie implantaire" (PDF). Lasers in Medical Science.

16. Recommandations

Lasers à Diode et Circuits Intégrés Photoniques

Ressources ouvertes

NPTL

YouTube

Chapitre 7 : Fibre optique

1. Introduction

La vie quotidienne dépend fortement de la lumière. Des imprimantes laser et des caméras numériques aux lecteurs de disques compacts où un laser réfléchissant sur un CD transforme le signal retourné en musique, la lumière est utilisée dans l'optoélectronique et la télécommunication par fibre optique pour le transport de données. Elle permet l'utilisation de câbles en fibre optique pour connecter des lignes téléphoniques et des ordinateurs. Elle a été utilisée dans une variété d'applications, y compris les modulateurs de fibre optique, les capteurs, les interféromètres et les lasers. En médecine, les lasers sont utilisés pour effectuer des chirurgies oculaires et des productions d'images sont employées dans les hôpitaux. Le spectre de la lumière est beaucoup plus large que ce que l'œil humain peut voir. Le spectre électromagnétique entre 850 nm et 1310 nm et 1550 nm est appelé région infrarouge proche et est utilisé dans une variété d'applications, y compris la transmission par fibre optique. Fondamentalement, la lumière est constituée d'un ensemble d'ondes électromagnétiques qui ressemblent à des particules de lumière. Si la lumière était considérée comme une particule, elle serait un flux de photons se déplaçant d'un endroit à un autre. Tout comme les électrons, les photons sont les éléments constitutifs fondamentaux de la lumière. La nature particulière de la lumière est moins significative que sa forme d'onde lorsqu'elle est utilisée pour la transmission par fibre optique. La lumière est généralement considérée comme ayant une nature double. Le spectre électromagnétique est composé d'ondes dont les longueurs d'onde varient de milliers de kilomètres (kilomètres) jusqu'à la taille d'un noyau atomique, et des fréquences d'un hertz à plus de 10^{25} Hz.

Le domaine de fréquence électromagnétique comprend donc plusieurs bandes distinctes, chacune contenant diverses ondes électromagnétiques connues sous différents noms, tels que les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet et les rayons X, allant des basses fréquences (longues longueurs d'onde) aux hautes fréquences (courtes longueurs d'onde). Le spectre électromagnétique contient de l'énergie électromagnétique, qui inclut la lumière. La portion visible du spectre électromagnétique qui peut être vue par l'œil humain est appelée "lumière". La plage de fréquence de 430 à 750 THz (térahertz) correspond au spectre visible. Les fibres optiques sont utilisées comme guides d'onde pour transmettre la lumière. Le cœur d'une fibre optique, qui est généralement en verre, est l'une des trois parties les plus cruciales. Une autre couche en verre ou en plastique connue sous le nom de revêtement entoure le cœur et se distingue par un indice de réfraction inférieur à celui du matériau du cœur.

2. Objectif

Après avoir étudié cette unité, vous apprendrez à propos de :

Fibre Optique

Différents types de Fibre Optique

Application de la Fibre Optique

3. Fibre optique

Une fibre optique flexible et transparente connue sous le nom de fibre optique est créée en étirant du verre (silice) ou du plastique à un diamètre juste un peu plus épais qu'un cheveu. Dans les communications par fibre optique, où elles permettent une transmission sur de plus grandes distances et à des largeurs de bande plus élevées (débits de transfert de données) que les lignes électriques, les fibres optiques sont le plus souvent utilisées comme moyen d'envoyer de la lumière entre les deux extrémités de la fibre. Les fibres sont utilisées à la place des fils métalliques car elles ont une perte de transmission inférieure et sont immunisées contre les interférences électromagnétiques, auxquelles les fils métalliques sont sensibles. De plus, utilisées pour l'éclairage et l'imagerie, les fibres sont souvent regroupées en faisceaux afin de pouvoir être utilisées, comme dans le cas d'un fibroscope, pour transporter de la lumière dans ou des images hors de petits endroits. D'autres utilisations de fibres spécialement conçues incluent les capteurs à fibre optique et les lasers à fibre, parmi beaucoup d'autres. Voir figure 1.

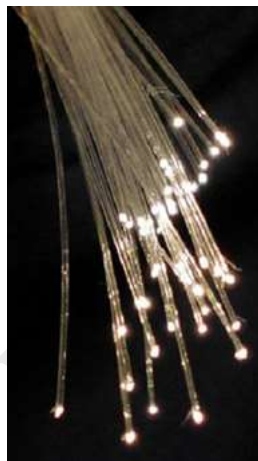


Figure 1 : Un faisceau de fibres optiques

Les fibres optiques se composent généralement d'un matériau de revêtement transparent avec un indice de réfraction réduit entourant le cœur. La réflexion totale interne, qui permet à la fibre de fonctionner comme un guide d'onde et maintient la lumière à l'intérieur du cœur, est un phénomène physique. Les fibres multimodes (MMF) offrent de nombreux chemins de propagation ou modes transversaux, tandis que les fibres monomodes (SMF) ne supportent qu'un seul mode. Lorsque des puissances importantes doivent être transmises sur de courtes distances, les fibres multimodes sont utilisées car elles ont souvent un diamètre de cœur plus grand. La plupart des liaisons de communication de plus de 1 000 mètres (3 300 pieds) utilisent des fibres monomodes.

Dans la communication par fibre optique, la capacité de relier les fibres optiques avec peu de pertes est cruciale. Cela nécessite une découpe minutieuse des fibres, un alignement exact des cœurs de fibres et un couplage de ces cœurs alignés. C'est plus difficile que de combiner des fils ou des câbles électriques. Une épissure par fusion est souvent utilisée pour des applications nécessitant une connexion durable. Cette méthode consiste à faire fondre les extrémités des fibres ensemble à l'aide d'un arc électrique. Une épissure mécanique est une autre procédure typique dans laquelle les extrémités des fibres sont maintenues ensemble par

une force mécanique. Des connecteurs de fibre optique spécialisés sont utilisés pour créer des connexions temporaires ou semi-permanentes.

La fibre optique fait référence à la branche de la science appliquée et de l'ingénierie qui traite de la création et de l'utilisation de fibres optiques. Le physicien indo-américain Narinder Singh Kapany est crédité d'avoir inventé le terme.

4. Utilisations

4.1. Communication

Parce que la fibre optique est flexible et peut être regroupée en câbles, elle est utilisée comme un moyen de communication et de mise en réseau. Contrairement à l'électricité dans les câbles électriques, la lumière infrarouge se propage à travers la fibre avec une atténuation considérablement réduite, ce qui la rend particulièrement avantageuse pour les communications à longue distance. Cela permet d'utiliser peu de répéteurs pour relier de grandes distances.

Chaque fibre peut transporter de nombreux canaux séparés, chacun utilisant une longueur d'onde différente de lumière, grâce à l'utilisation de la multiplexion par répartition de longueur d'onde (WDM). Le débit de données par canal multiplié par le nombre de canaux (souvent jusqu'à 80 dans les systèmes WDM denses commerciaux en 2008) et divisé par la surcharge de correction d'erreur en avant (FEC) donne le débit de données net (débit de données sans octets de surcharge) par fibre.

Le câblage en fibre optique peut libérer de l'espace dans les conduits de câbles pour des applications à courte distance, comme un réseau à l'intérieur d'un bâtiment de bureaux (voir fibre jusqu'au bureau). Cela est dû au fait qu'une seule fibre a une capacité de données beaucoup plus élevée que des connexions électriques comme le câble de catégorie 5, qui fonctionne normalement à des vitesses de 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s. De plus, des connexions à courte distance entre appareils sont souvent réalisées à l'aide de fibres. Un lien audio numérique optique, par exemple, est disponible sur la plupart des téléviseurs haute définition. Cela permet au protocole S/PDIF via une connexion optique Toslink de transporter l'audio à travers la lumière.

4.2. Capteurs

Dans la télédétection, les fibres sont largement utilisées. La fibre elle-même sert de capteur dans certaines applications (les fibres transmettent la lumière optique à une unité de traitement qui examine les variations des propriétés de la lumière). D'autres fois, une connexion en fibre est établie entre un capteur et un système de mesure. En modifiant une fibre optique de manière à ce que la propriété surveillée altère l'intensité, la phase, la polarisation, la longueur d'onde ou le temps de transit de la lumière dans la fibre, les fibres optiques peuvent être utilisées comme capteurs pour mesurer la contrainte, la température, la pression et d'autres paramètres. Les capteurs les plus simples sont ceux qui ajustent l'intensité lumineuse car ils nécessitent simplement une source et un détecteur basiques. De tels capteurs à fibre optique ont la capacité de fournir une détection distribuée sur des distances allant jusqu'à un mètre, ce qui est une caractéristique très importante. Parmi eux se trouve la détection acoustique distribuée.

En revanche, en combinant des composants de détection miniature avec l'extrémité de la fibre, de petites mesures localisées peuvent être produites. Celles-ci peuvent être créées à l'aide d'une variété de techniques de micro et nanofabrication de sorte qu'elles ne dépassent pas la minuscule bordure de l'extrémité de la fibre, permettant des utilisations comme l'insertion d'une aiguille hypodermique dans des artères sanguines. Les capteurs optiques extrinsèques transfèrent la lumière modulée d'un capteur optique non fibre ou d'un capteur électronique couplé à un émetteur optique à l'aide d'une connexion en fibre optique, généralement multimode. La capacité des capteurs extrinsèques à accéder à des endroits qui seraient autrement inaccessibles est un avantage significatif. Un pyromètre à l'extérieur du moteur est utilisé pour mesurer la température à l'intérieur des moteurs à réaction en utilisant une fibre pour transmettre le rayonnement.

Les transformateurs électriques ont des champs électromagnétiques extrêmement forts qui rendent difficile l'utilisation d'autres techniques de mesure. Les capteurs extrinsèques peuvent être utilisés de la même manière pour surveiller la température interne des transformateurs électriques. Les capteurs extrinsèques mesurent également la vibration, la rotation, le déplacement, la vitesse, l'accélération, le couple et la torsion. L'interférence de la lumière a été utilisée pour créer un gyroscope à état solide. L'effet Sagnac est utilisé par le gyroscope à fibre optique (FOG), qui n'a pas de pièces mobiles, pour détecter la rotation mécanique. Les capteurs à fibre optique sont fréquemment utilisés dans des systèmes de sécurité sophistiqués de détection d'intrusion. Sur une clôture, un pipeline ou un câble de communication, la lumière est transmise le long d'un câble de capteur à fibre optique, et le signal retourné est surveillé et vérifié pour détecter des anomalies. Pour identifier les perturbations et déclencher une alerte en cas d'intrusion, ce signal de retour est traité numériquement.

Les composants des capteurs chimiques optiques et des biosenseurs optiques incluent souvent des fibres optiques.

4.3. Transmission d'énergie

Une cellule photovoltaïque peut être utilisée pour convertir la lumière en électricité et la transférer à travers une fibre optique. Bien que cette méthode de transfert d'énergie soit moins efficace que les méthodes conventionnelles, elle est particulièrement utile lorsque des machines IRM, qui génèrent de forts champs magnétiques, sont à proximité et qu'il est préférable d'éviter d'avoir un conducteur métallique. D'autres utilisations incluent l'alimentation en électricité d'appareils de mesure dans des équipements de transmission haute tension et l'électronique dans des composants d'antenne haute puissance.

4.4. Autres utilisations

Dans des applications médicales et autres où une lumière intense doit être dirigée vers une cible sans un chemin de ligne de vue évident, les fibres optiques sont utilisées comme guides lumineux. Les sources lumineuses à fibre optique sont fréquemment utilisées dans les microscopes pour produire un éclairage puissant des échantillons examinés. L'optique d'imagerie utilise également des fibres optiques. Un outil d'imagerie long et fin appelé endoscope est utilisé pour examiner des objets à travers un petit trou. Il est constitué d'un faisceau cohérent de fibres, parfois en conjonction avec des lentilles. Pour des opérations

exploratoires ou chirurgicales peu invasives, des endoscopes médicaux sont employés. Les endoscopes industriels sont utilisés pour examiner des objets difficiles d'accès, comme l'intérieur des moteurs à réaction.

Les fibres optiques dans certaines structures transportent la lumière du soleil du toit vers des espaces intérieurs. Pour l'éclairage, des lumières à fibre optique sont utilisées dans des applications décoratives telles que des panneaux, des œuvres d'art, des jouets et des arbres de Noël artificiels. LiTraCon, un matériau de construction en béton translucide, est inextricablement lié à la fibre optique.

La fibre optique peut également être utilisée pour vérifier la santé des structures. Des contraintes qui pourraient avoir un effet à long terme sur les structures peuvent être détectées avec ce type de capteur. L'idée est de mesurer l'atténuation analogique. Les faisceaux de fibres optiques sont utilisés en spectroscopie pour transférer la lumière d'un spectromètre à une substance à l'extérieur du spectromètre lui-même afin que sa composition puisse être déterminée. En réfléchissant la lumière à travers des substances, un spectromètre peut les examiner. Un spectromètre peut être utilisé pour étudier des objets à distance en utilisant des fibres.

Le milieu de gain d'un laser à fibre ou d'un amplificateur optique peut être une fibre optique dopée avec des éléments de terres rares spécifiques, comme l'erbium. En attachant un court segment de fibre optique dopée aux terres rares à une connexion de fibre optique conventionnelle (non dopée), une amplification du signal peut être réalisée. En plus de l'onde du signal, une seconde longueur d'onde laser est injectée dans la ligne et pompée optiquement dans la fibre dopée. La fibre dopée transmet les deux longueurs d'onde lumineuses, convertissant l'énergie de la seconde longueur d'onde de pompe en onde du signal. L'émission stimulée est le mécanisme responsable de l'amplification.

L'utilisation de la fibre optique comme milieu non linéaire est également très courante. De nombreuses interactions optiques non linéaires peuvent se produire dans le milieu en verre, et les longues longueurs d'interaction de la fibre permettent une large gamme de phénomènes pouvant être utilisés dans des applications pratiques et des recherches scientifiques. En revanche, la non-linéarité de la fibre peut avoir des conséquences négatives sur les communications optiques, et des mesures sont souvent nécessaires pour réduire de tels effets indésirables.

Dans les recherches en physique, des fibres optiques décalées en longueur d'onde sont utilisées pour collecter la lumière de scintillation. Pour rendre les marques sur la vue plus visibles, des sites à fibre optique pour pistolets, fusils et fusils de chasse utilisent des morceaux de fibre optique.

5. Principe de fonctionnement

La réflexion totale interne permet à une fibre optique, un guide d'onde diélectrique cylindrique (guide d'onde non conducteur), de transmettre la lumière le long de son axe. Une couche de cœur et de revêtement, toutes deux formées de matériaux diélectriques, entourent le cœur dans la fibre. L'indice de réfraction du cœur doit être supérieur à celui du revêtement afin de restreindre le signal optique dans le cœur. Dans une fibre à indice de marche, la

transition entre le cœur et le revêtement peut être soudaine, tandis que dans une fibre à indice gradué, elle peut être progressive. Des lasers ou des LEDs peuvent être utilisés pour alimenter la lumière dans les fibres optiques.

La fibre est résistante aux interférences électriques ; il n'y a pas d'interférence de signal entre les câbles ou de captation de bruit environnemental. Même les impulsions électromagnétiques produites par des dispositifs nucléaires sont imperméables aux informations circulant à l'intérieur de la fibre optique.

Les câbles en fibre sont avantageux pour protéger les équipements de communication dans des situations à haute tension, telles que des installations de production d'énergie ou des applications vulnérables aux coups de foudre, car ils ne conduisent pas l'électricité. Les problèmes de boucle de terre sont également évités grâce à l'isolation électrique. Les câbles optiques peuvent être utilisés dans des zones avec des gaz explosifs car ils ne contiennent pas d'électricité, ce qui pourrait éventuellement provoquer des étincelles. Comparé à l'écoute électronique, le piratage de fibre est plus difficile.

Le vol de métal ne cible pas les câbles en fibre. En revanche, pendant le boom des matières premières des années 2000, les infrastructures de câbles en cuivre ont été une cible d'attaque.

5.1. Indice de réfraction

L'indice de réfraction est une mesure permettant de déterminer la vitesse à laquelle la lumière se déplace à travers une substance. Dans un vide, comme dans l'espace, la lumière se déplace le plus rapidement. Dans un vide, la lumière se déplace à une vitesse d'environ 300 000 km (186 000 mph) par seconde. En divisant la vitesse de la lumière dans un vide par la vitesse de la lumière dans ce milieu, on détermine l'indice de réfraction d'une substance. Par conséquent, par définition, un vide a un indice de réfraction de 1. Une fibre monomode typique utilisée dans les communications a un cœur en silice dopée avec un indice d'environ 1,4475 et un revêtement en silice pure avec un indice de 1,444 à 1500 nm. L'indice de réfraction d'un milieu détermine la lenteur avec laquelle la lumière s'y déplace. Sur la base de cette connaissance, on peut généraliser que la vitesse d'un signal voyageant à travers une fibre optique pour la communication est d'environ 200 000 km/s. En conséquence, un appel téléphonique voyageant par fibre entre Sydney et New York, une distance de 16 000 kilomètres, connaîtrait une latence minimale de 80 millisecondes.

5.2. Réflexion totale interne

Lorsque la lumière se déplaçant à travers un milieu optiquement dense rencontre une barrière à un angle aigu, un angle supérieur à l'angle critique de la frontière, elle est totalement réfléchi. C'est ce que nous appelons la réflexion totale interne. Dans les fibres optiques, ce phénomène est utilisé pour concentrer la lumière à l'intérieur du cœur. La majorité des fibres optiques modernes sont faiblement guidantes, ce qui signifie qu'il n'y a qu'un très léger (généralement moins de 1 %) changement de l'indice de réfraction entre le cœur et le revêtement. La lumière passe à travers le cœur de la fibre et rebondit sur la paroi où le cœur et le revêtement se rencontrent.

Seule la lumière qui entre dans la fibre dans une plage d'angles spécifique peut s'écouler le long de la fibre sans fuir, car la lumière doit atteindre la frontière à un angle supérieur à

l'angle critique. Le cône d'acceptation de la fibre est le nom donné à cet ensemble d'angles. Il existe un angle maximum auquel la lumière peut entrer dans la fibre depuis l'axe de la fibre et continuer à se propager, ou voyager, dans le cœur de la fibre. L'ouverture numérique (NA) de la fibre est le sinus de cet angle maximum. L'épissage et le travail avec une fibre ayant une NA plus grande nécessitent moins de précision que celle avec une NA plus petite. La différence d'indice de réfraction entre le cœur et le revêtement de la fibre détermine la taille de ce cône d'acceptation. La NA de la fibre monomode est modeste.

5.3. Fibre multimode

L'optique géométrique peut analyser les fibres avec un grand diamètre de cœur (plus de 10 micromètres). En raison de l'analyse électromagnétique, ce type de fibre est connu sous le nom de fibre multimode. La réflexion totale interne dirige les ondes lumineuses le long du cœur de la fibre multimode à indice de marche. Lorsque des rayons traversent la frontière cœur-revêtement à un angle supérieur à l'angle critique pour cette frontière, toute la lumière est réfléchi vers la source. La différence d'indices de réfraction entre les matériaux utilisés pour le cœur et le revêtement détermine l'angle critique. Les rayons à faible angle qui croisent la frontière sont courbés du cœur vers le revêtement, où ils s'arrêtent. L'angle d'acceptation de la fibre est déterminé par l'angle critique, qui est parfois exprimé comme une ouverture numérique. Une ouverture numérique élevée permet un couplage efficace de la lumière dans la fibre en permettant à la lumière de s'écouler dans la fibre en rayons parallèles à l'axe et à différents angles. Cependant, en raison du fait que les rayons voyageant à des angles différents ont des longueurs de chemin variées et passent donc à travers la fibre à des vitesses différentes, cette haute ouverture numérique augmente la quantité de dispersion.

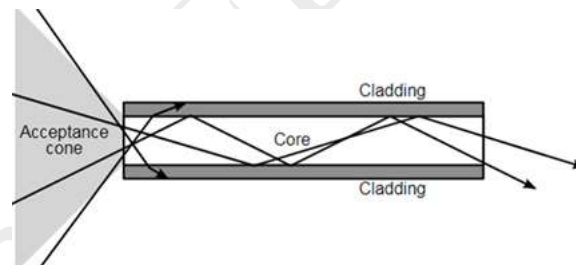


Figure 2 : La propagation de la lumière à travers une fibre optique multimode

L'indice de réfraction dans le cœur d'une fibre à indice gradé diminue constamment entre l'axe et le revêtement. Par conséquent, les rayons lumineux s'approchent du revêtement en douceur plutôt que de se réfléchir brusquement à la frontière cœur-revêtement. Comme les rayons à grand angle se déplacent davantage à travers la périphérie à indice inférieur du cœur que le centre à indice élevé, les trajectoires courbées résultantes réduisent la dispersion multipath. Pour réduire la variation des vitesses de propagation axiales des différents rayons dans la fibre, le profil de l'indice est adopté. Une relation parabolique entre l'indice et la distance par rapport à l'axe est extrêmement proche de ce profil d'indice idéal.

5.4. Fibre monomode

L'optique géométrique ne peut pas être utilisée pour simuler une fibre ayant un diamètre de cœur inférieur à environ 10 fois la longueur d'onde de la lumière propagée. Selon les équations de Maxwell simplifiées à l'équation des ondes électromagnétiques, elle doit plutôt

être examinée comme une structure de guide d'onde électromagnétique. La fibre supporte un ou plusieurs modes transversaux limités qui permettent à la lumière de voyager à travers la fibre comme un guide d'onde optique. La fibre monomode est définie comme n'ayant qu'un seul mode. L'étude du guide d'onde révèle que l'énergie lumineuse de la fibre n'est pas entièrement contenue dans le cœur. Au lieu de cela, une portion importante de l'énergie du mode lié, en particulier dans les fibres monomodes, voyage à travers le revêtement sous forme d'onde évanescente. Le type de fibre monomode le plus populaire est conçu pour une utilisation dans l'infrarouge proche et a un diamètre de cœur de 8 à 10 micromètres. En comparaison, la fibre multimode est produite avec des tailles de cœur allant de centaines de micromètres à aussi peu que 50 micromètres.

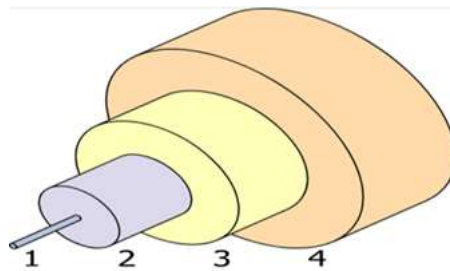


Figure 3 : Fibre optique

5.5. Fibres à usage spécial

Un noyau ou une couche de gaine non cylindrique, souvent avec une section transversale elliptique ou rectangulaire, est utilisé dans la construction de certaines fibres optiques à usage spécial. Celles-ci comprennent des fibres qui maintiennent la polarisation dans les capteurs à fibre optique et des fibres conçues pour empêcher la propagation en mode galerie chuchotante.

Un motif cohérent de variation de l'indice est utilisé pour créer des fibres à cristal photonique, souvent sous la forme de trous cylindriques qui parcourent la longueur de la fibre. Pour limiter la lumière au noyau de la fibre, ce type de fibre utilise des effets de diffraction au lieu de ou en plus de la réflexion totale interne. Les caractéristiques de la fibre peuvent être modifiées pour une large gamme d'applications.

6. Mécanismes d'atténuation

En optique à fibre, l'atténuation, parfois appelée perte de transmission, est la perte de la force du signal lumineux au fur et à mesure qu'il passe à travers le milieu de transmission. Dans les fibres optiques, les coefficients d'atténuation sont souvent exprimés en unités de dB/km. Le milieu entoure généralement le faisceau lumineux incident à l'intérieur d'une fibre de verre silice. Un obstacle clé à la transmission d'un signal numérique sur de longues distances est l'atténuation. Par conséquent, d'importantes recherches ont été menées sur les moyens de maximiser l'amplification du signal optique tout en minimisant son atténuation. L'amélioration constante des procédés de fabrication, de la pureté des matières premières, des préformes et des conceptions de fibres au cours de quatre décennies a conduit à une réduction de quatre ordres de grandeur de l'atténuation des fibres optiques en silice, permettant à ces fibres d'approcher la limite théorique inférieure de l'atténuation.

Des fibres optiques à mode unique à très faible perte sont facilement disponibles. Une fibre typique à mode unique pour les longueurs d'onde de télécommunications, la fibre SMF-28 de Corning, a une perte de 0,17 dB/km à 1550 nm. Par exemple, la SMF-28 transmet plus de 75 % de la lumière à 1550 nm sur une longueur de 8 km. On affirme que si l'eau de l'océan était aussi claire que la fibre, on pourrait voir le fond de la fosse des Mariannes, qui se trouve dans l'océan Pacifique et a une profondeur de 11 000 mètres (36 000 pieds). Selon des études empiriques, la diffusion et l'absorption sont les principales causes de l'atténuation dans les fibres optiques.

7. Diffusion de la lumière

La réflexion totale interne est la base de la façon dont la lumière voyage à travers le noyau d'une fibre optique. Même à l'échelle moléculaire, des surfaces rugueuses et inégales peuvent provoquer des réflexions de rayons lumineux dans des directions erronées. La réflexion diffuse, également connue sous le nom de diffusion, est ce phénomène et est souvent caractérisée par une large gamme d'angles de réflexion.

La longueur d'onde de la lumière diffusée affecte la diffusion. La fréquence de l'onde lumineuse incidente et la dimension physique (ou échelle spatiale) du centre de diffusion, qui prend souvent la forme d'une caractéristique microstructurale unique, déterminent les limites des échelles spatiales de visibilité qui en résultent. Comme les centres de diffusion auront des dimensions sur une échelle spatiale comparable, la lumière visible, qui a une longueur d'onde de l'ordre d'un micromètre (un millionième de mètre), aura une longueur d'onde similaire. L'atténuation est l'effet de la lumière étant diffusée de manière incohérente à des surfaces et interfaces internes. En plus des pores, la majorité des surfaces internes ou des interfaces dans des matériaux (poly)cristallins comme les métaux et les céramiques prennent la forme de limites de grains, qui divisent des régions minuscules d'ordre cristallin. Il a été démontré que la diffusion cesse de se produire de manière appréciable lorsque la taille du centre de diffusion (ou de la limite de grain) est réduite en dessous de celle de la longueur d'onde de la lumière diffusée. Des matériaux céramiques transparents sont déjà en cours de production grâce à ce phénomène.

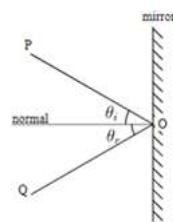


Figure 4 : Réflexion spéculaire

De même, les imperfections au niveau moléculaire (variations de composition) dans la structure du verre sont à l'origine de la diffusion de la lumière dans les fibres optiques de qualité. Le verre n'est qu'un exemple limite d'un solide polycristallin, selon une école de pensée en pleine expansion. Selon ce concept, des domaines avec des degrés variables d'ordre à courte portée servent de base aux métaux, aux verres et aux céramiques. Les défauts microstructuraux dispersés entre et au sein de ces domaines constituent les meilleurs endroits

pour la diffusion de la lumière. La transparence des dômes de missiles IR est censée être limitée par ce même phénomène.

Des processus optiques non linéaires dans la fibre peuvent également entraîner une diffusion à des puissances optiques élevées.

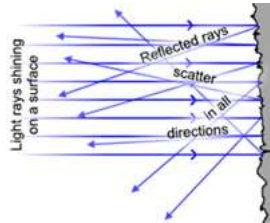


Figure : 7.5 : Réflexion diffuse

8 Absorption UV-VIS-IR

En plus de la diffusion de la lumière, l'absorption sélective de longueurs d'onde particulières peut également entraîner une atténuation ou une perte de signal. Voici quelques considérations matérielles principales pour les électrons et les molécules :

- Au niveau électronique, la capacité d'absorber un quantum de lumière (ou photon) avec une certaine longueur d'onde ou fréquence dans les plages ultraviolettes (UV) ou visibles dépend de l'écart entre les orbitales électroniques (ou "quantifiées"). La couleur en résulte.

- Au niveau atomique ou moléculaire, cela dépend des fréquences vibratoires des atomes ou des molécules, de la densité des atomes ou des molécules, et de la présence ou non d'un ordre à longue portée. La capacité du matériau à transmettre des longueurs d'onde plus longues dans les régions infrarouge (IR), infrarouge lointain, radio et micro-ondes dépendra de ces variables.

Tout dispositif optiquement transparent doit être conçu avec une sélection de matériaux basée sur une compréhension de ses caractéristiques et de ses limites. La transparence maximale du matériau pour les longues longueurs d'onde est déterminée par les propriétés d'absorption de la structure cristalline qui sont visibles dans les plages de fréquence inférieure (plage de longueur d'onde IR moyenne à lointaine). Elles résultent de l'interaction entre la radiation de l'onde lumineuse incidente et les vibrations thermiquement produites des atomes et des molécules qui composent le réseau solide. À cause de cela, les zones limites d'absorption dans l'infrarouge lointain ($>10 \text{ m}$) générées par les vibrations atomiques et moléculaires (étirement des liaisons) entourent tous les matériaux.

En d'autres termes, la raison pour laquelle une certaine substance absorbe sélectivement la lumière IR est que la fréquence choisie de l'onde lumineuse coïncide avec la fréquence (ou un multiple entier de la fréquence, ou harmonique) à laquelle les particules du matériau vibrent. Étant donné que différents atomes et molécules vibrent à différentes fréquences naturelles, ils absorberont préférentiellement certaines fréquences de lumière IR (ou régions du spectre).

9 Ouverture numérique

La plage d'angles sur laquelle un système optique peut recevoir ou émettre de la lumière est définie par son ouverture numérique (NA), qui est un nombre sans dimension en optique. La

NA a la propriété d'être constante pour un faisceau lorsqu'il passe d'un matériau à un autre en incluant l'indice de réfraction dans sa définition, à condition qu'il n'y ait pas de puissance réfractive à l'interface. Les différentes branches de l'optique ont des définitions légèrement variées pour ce terme.

L'ouverture numérique est fréquemment utilisée en fibre optique pour définir la plage d'angles dans laquelle la lumière incidente sur la fibre sera transmise le long de celle-ci, ainsi qu'en microscopie pour décrire le cône d'acceptation d'un objectif (et donc sa capacité à collecter la lumière et sa résolution).

L'ouverture numérique est la capacité de collecte de lumière de la fibre. Elle est également appelée figure de mérite de la fibre. Une valeur élevée d'ouverture numérique est requise pour avoir un bon couplage. Si la fibre a une faible ouverture numérique, alors les pertes de couplage seront importantes.

9.1. Optique générale

Dans la plupart des domaines de l'optique, et particulièrement en microscopie, l'ouverture numérique d'un système optique tel qu'une lentille d'objectif est définie par

$$NA = n \sin \theta$$

où θ est l'angle moitié du plus grand cône de lumière qui peut entrer ou sortir de la lentille, et n est l'indice de réfraction du milieu dans lequel la lentille fonctionne (1,00 pour l'air, 1,33 pour l'eau pure, et généralement 1,52 pour l'huile d'immersion). En termes généraux, c'est l'angle du rayon marginal réel du système. L'ouverture numérique (NA) d'un faisceau de rayons est un invariant lorsqu'il se déplace d'un matériau à un autre à travers une surface plane, car l'indice de réfraction est pris en compte. En réarrangeant la loi de Snell pour découvrir que $n \sin \theta$ est constant à travers une interface, cela est simplement démontré. Dans l'approximation paraxiale, l'ouverture angulaire de la lentille dans l'air est environ le double de cette valeur. La NA changera à mesure qu'un objet ou un point d'image est déplacé, et est souvent mesurée par rapport à ce point. Sauf indication contraire, la NA en microscopie fait normalement référence à la NA de l'espace objet.

La NA est significative en microscopie car elle représente la capacité de résolution d'une lentille. La résolution a une relation proportionnelle avec la taille du plus petit détail qui peut être résolu.

$$\frac{\lambda}{2NA}$$

Où la longueur d'onde de la lumière est. Des détails plus fins peuvent être observés en utilisant une lentille avec une ouverture numérique plus élevée que celle avec une ouverture plus petite. Étant donné de bonnes optiques (limitées par la diffraction), les lentilles avec des ouvertures numériques plus élevées produiront généralement des images plus lumineuses, mais au détriment d'une profondeur de champ plus courte.

Dans les formats de disque optique, le terme "taille de trou" fait référence à une ouverture numérique.

La distance de travail, ou la distance entre la lentille avant et l'échantillon, est réduite en diminuant l'ouverture numérique et la magnification de l'objectif.

9.2. Physique laser

L'ouverture numérique est définie légèrement différemment en physique laser. Les faisceaux laser se propageant lentement se répandent à mesure qu'ils avancent. La dispersion du faisceau laser dans le "champ lointain" crée un cône de lumière lorsqu'il est éloigné du point le plus étroit du faisceau, où il est à peu près linéaire avec la distance. La relation utilisée pour décrire l'ouverture numérique d'un système optique est également utilisée pour définir l'ouverture numérique d'un faisceau laser. $NA = n \sin \theta$

Cependant, la définition de varie. Contrairement au cône de lumière qui passe par l'ouverture d'une lentille, les faisceaux laser n'ont souvent pas de bords nets. Au lieu de cela, l'irradiance diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre du faisceau. Un profil gaussien pour le faisceau est extrêmement typique. La divergence du faisceau est couramment définie par les physiciens laser comme l'angle en champ lointain entre l'axe du faisceau et l'emplacement éloigné de l'axe où l'irradiance est réduite à e^{-2} fois l'irradiance sur l'axe. Le NA d'un faisceau laser gaussien est alors lié à sa taille minimale de spot ("taille du faisceau") par $NA \approx \frac{\lambda_0}{\pi w_0}$

Avec, λ_0 est la longueur d'onde du vide de la lumière, et $2w_0$ est le diamètre du faisceau à son point le plus étroit, mesuré entre les points d'irradiance e^{-2} ("Largeur à e^{-2} maximum de l'intensité"). Cela signifie qu'un faisceau laser qui est focalisé sur un petit point se répandra rapidement à mesure qu'il s'éloigne de la mise au point, tandis qu'un faisceau laser de grand diamètre peut rester à peu près de la même taille sur une très longue distance. Fibres optiques

Le cône d'acceptation d'une fibre optique multimode est la gamme d'angles à laquelle la lumière pénètre dans la fibre et ne se propage qu'à l'intérieur. L'angle d'acceptation, max, de ce cône est son angle moitié. Les indices de réfraction du cœur, du revêtement et du milieu déterminent à eux seuls l'angle d'acceptation pour une fibre multimode à indice constant dans un milieu particulier. Voir figure 6.

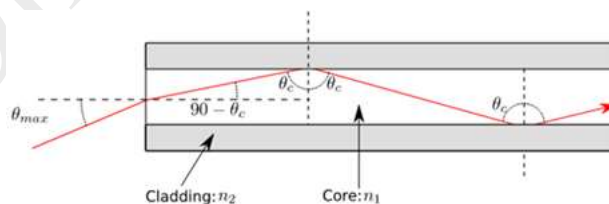


Figure : 6 : Une fibre multimode d'indice n_1 avec un revêtement d'indice n_2

$$n \cdot \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$$

n_{core} , n_{clad} , sont les indices de réfraction du cœur et du revêtement de la fibre, respectivement, tandis que n est l'indice de réfraction du milieu entourant la fibre. La lumière à angle plus élevé passera à travers le cœur, mais comme elle ne se réfléchira pas complètement à l'interface cœur-revêtement, elle n'atteindra pas l'autre extrémité de la fibre. Ce qui suit est la dérivation de la formule.

La loi de Snell au contact du milieu et du cœur fournit ce qui suit lorsqu'un faisceau lumineux est incident d'un milieu ayant un indice de réfraction n vers le cœur ayant un indice n_{core} à l'angle d'acceptation maximal. $n \cdot \sin\theta_{max} = n_{core} \cdot \sin\theta_r$

D'après la géométrie de la figure ci-dessus, nous avons :

$$\sin\theta_r = \sin(90^\circ - \theta_c) = \cos\theta_c$$

Avec

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_{clad}}{n_{core}}$$

À l'angle critique pour la réflexion totale interne, en substituant $\cos\theta_c$ par $\sin\theta_r$ dans la loi de Snell, nous obtenons :

$$\frac{n}{n_{core}} \sin\theta_{max} = \cos\theta_c$$

En élevant les deux côtés au carré

$$\left(\frac{n}{n_{core}}\right)^2 (\sin\theta_{max})^2 = (\cos\theta_c)^2 = 1 - \sin^2\theta_c = 1 - \frac{n_{clad}^2}{n_{core}^2}$$

En résolvant, nous trouvons la formule énoncée ci-dessus :

$$n \cdot \sin\theta_{max} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

Il est devenu courant de définir l'ouverture numérique (NA) de tout type de fibre de manière à ce qu'elle ait la même forme que la NA dans d'autres systèmes optiques.

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

Où, n_{core} est l'indice de réfraction de l'axe central de la fibre. Il convient de noter que lorsque cette définition est appliquée, la relation entre l'ouverture numérique (NA) et l'angle d'acceptation de la fibre est réduite à une approximation. Bien que l'angle d'acceptation pour les fibres monomodes soit très différent et ne puisse pas être dérivé uniquement des indices de réfraction, les fabricants citent souvent "NA" pour les fibres monomodes sur la base de ce calcul.

Le volume des modes liés, ou l'ouverture numérique (NA), est corrélé à la fréquence normalisée. L'ouverture numérique d'équilibre est une expression parfois utilisée en relation avec les fibres multimodes. C'est l'ouverture numérique d'un rayon quittant une fibre avec une distribution de modes d'équilibre stable par rapport à son angle de sortie extrême.

10. Élargissement des impulsions dans les fibres optiques

Les vitesses de fonctionnement des réseaux locaux (LAN) à fibre GRIN pour les applications multimédias à large bande utilisant le mode de transfert asynchrone (ATM) sont de 155 Mbp et 622 Mbps. Déjà, des vitesses supérieures à 1 Gbps étaient utilisées sans compenser le retard de mode différentiel (DMD). Une voie améliorée vers l'Ethernet gigabit est fournie par la technologie d'interconnexion des LAN Ethernet à 10 Mbps et 100 Mbps. La dispersion modale, qui transforme les impulsions de signal carrées numérisées en impulsions gaussiennes élargies, limite la bande passante des fibres multimodes. La distorsion de retard

est le résultat de cette distorsion du signal. Si l'écart est significatif et que l'impulsion n'apparaît plus comme gaussienne, l'impulsion peut parfois se désintégrer.

La dispersion intramodale et intermodale sont les deux principaux mécanismes d'élargissement des impulsions dans une fibre optique. La dispersion intramodale résulte de la dépendance de la vitesse de groupe à la longueur d'onde. De plus, elle augmente à mesure que la largeur spectrale de la source optique augmente. La largeur spectrale d'une diode laser est d'environ 1 ou 2 nm, tandis que celle d'une LED est d'environ 40 nm pour un spectre de 830-870 nm avec une longueur d'onde d'émission maximale de 850 nm. Par conséquent, l'utilisation d'une diode laser à mode unique comme source optique aide à réduire la dispersion intramodale dans les fibres optiques. Les caractéristiques dispersives du matériau de la fibre optique (dispersion matérielle) et les effets de guidage de la fibre optique (dispersion de guide d'onde) contribuent tous deux à la dispersion intramodale.

La fluctuation de la vitesse de groupe pour chaque mode à une seule fréquence a conduit à la dispersion intermodale. En raison de la dispersion massive multimode qui entraîne l'élargissement maximal des impulsions, les fibres multimodes à indice de marche présentent une valeur de dispersion élevée. La dispersion globale de la fibre GRIN est 100 fois moins importante que celle de la fibre multimode à indice de marche en raison de la forme parabolique du profil de l'indice de réfraction. Les fibres multimodes peuvent être utilisées dans les réseaux de fibres optiques GRIN pour réduire la dispersion intermodale. Il est nécessaire de disposer d'une méthode de mesure rapide et précise permettant d'identifier les effets de la dispersion du profil intrinsèque sur les largeurs de bande de transmission dans les fibres à indice gradé à mesure que la dispersion intermodale diminue.

De nombreux auteurs ont étudié la dispersion intramodale dans les fibres optiques. Des recherches ont été effectuées sur les profils à indice de marche et à indice gradé. Il a été examiné comment la dispersion intramodale se comporte dans les profils à indice gradé multimode avec le paramètre du profil du cœur. En revanche, plusieurs rapports ont été publiés sur des tentatives de détection de la dispersion intermodale dans les fibres optiques. Un profil d'indice de réfraction gradé en forme de parabole à travers le cœur de la fibre et le couplage de modes optiques, dans lequel l'énergie est transférée entre les modes par le biais de perturbations aléatoires le long de la direction de propagation de la fibre, sont les deux principales méthodes utilisées pour tenir compte de la dispersion.

Bien que les techniques de fabrication puissent fournir un creux d'indice central dans le profil de l'indice de réfraction du cœur, le traitement UV, qui est utilisé pour augmenter la différence d'indice de réfraction globale, provoque un creux d'indice très faible dans la fibre qui devient très visible. De plus, il est possible d'élargir délibérément le profil de champ du mode fondamental dans la direction d'une distribution en plateau, ce qui a des avantages pour les amplificateurs de fibres, les connexions de fibres et l'auto-imagerie.

Les rayons lumineux traversent la fibre sous forme de rayons obliques ou hélicoïdaux en raison de la forme parabolique de l'indice de réfraction du cœur. Par conséquent, avec la fibre à indice gradé, le profil de l'indice de réfraction détermine la bande passante de la fibre. Le profil d'indice des fibres optiques a été caractérisé à l'aide de plusieurs méthodes, y compris la technique de motif de champ lointain, la microscopie de phase quantitative, la méthode des

gradients de phase transversaux non-interférométriques basée sur la microscopie à champ clair, un interféromètre à fibre avec lentille laser, une méthode de diffraction, l'interférométrie holographique numérique, la méthode de diffusion de la lumière et la méthode de faisceau propagé, afin de réduire la dispersion dans les communications par fibre optique.

Dans l'étude des fibres, une méthode puissante est celle des franges de Fizeau à faisceaux multiples. L'indice de réfraction, la biréfringence et la dispersion des fibres naturelles, synthétiques et optiques ont toutes été calculées à l'aide de cette méthode. Elle a également été utilisée pour étudier la création et identifier les caractéristiques des fibres optiques GRIN, en omettant le creux de la fibre optique. Le creux de la fibre est pris en compte dans le travail actuel. La différence de décalage de phase optique est étudiée à l'aide de franges de Fizeau à faisceaux multiples en transmission le long de l'axe optique de la fibre optique GRIN tout en étant immergée dans un liquide de correspondance. Il est examiné comment les fibres optiques GRIN avec un creux d'indice central affectent l'élargissement des impulsions, la dispersion intermodale et intramodale, ainsi que le taux de transmission maximal à travers la section transversale de la fibre.

11. Avantages des fibres optiques

- **Bande passante extrêmement élevée :** La fibre offre une bande passante inégalée par tout autre support de transmission de données basé sur des câbles.

- **Facilité d'adaptation à l'augmentation de la bande passante :** De nouveaux équipements peuvent être ajoutés aux câbles à fibre inerte en utilisant plusieurs des types de câblage à fibre optique les plus récents pour offrir une capacité considérablement augmentée par rapport à la fibre initialement posée. La multiplexion par répartition en longueur d'onde dense, ou DWDM, permet aux câbles à fibre optique de commuter différents longueurs d'onde de lumière à volonté lorsqu'ils passent à travers la fibre. Ces deux caractéristiques du câble à fibre permettent de provisionner dynamiquement la bande passante du réseau pour s'adapter aux pics et aux creux du trafic de données.

- **Résistance aux interférences électromagnétiques** – Étant donné que la fibre est très résistante aux interférences électromagnétiques, elle présente un taux d'erreur binaire extrêmement bas. La transmission par fibre optique est essentiellement sans bruit.

- **Détection précoce des dommages aux câbles et transmissions sécurisées :** Les transmissions par fibre sont beaucoup plus sécurisées que celles basées sur des électrons conventionnels, car aucune donnée ne peut être interceptée en « écoutant » l'énergie électromagnétique qui « fuit » à travers le câble. Les épissures dans le câble peuvent être facilement trouvées en surveillant en continu un réseau optique et en mesurant précisément le temps qu'il faut à la lumière pour réfléchir dans la fibre.

12. Inconvénients des fibres optiques

- Malgré une diminution, les frais d'installation restent importants. Même si le coût d'installation de la fibre diminue de 60 % par an, l'installation de câbles à fibre optique reste assez coûteuse. La fibre pénètre dans la boucle locale et permet l'accès à large bande des abonnés et des utilisateurs finaux grâce à des technologies telles que FTTx (Fibre jusqu'à la maison, locaux, etc.) et PONs (Réseaux Optiques Passifs) à mesure que les coûts

d'installation diminuent. Le domaine d'origine et l'application principale de la fibre dans le backbone des opérateurs restent là où elle existe principalement aujourd'hui.

➤ Des équipements de test spéciaux sont souvent nécessaires : Un réseau de fibres optiques ne peut pas être utilisé avec l'équipement de test qui est généralement utilisé pour les réseaux basés sur des électrons conventionnels. Pour tester efficacement la fibre optique, un équipement de test optique spécialisé coûteux, tel que des sondes optiques et un OTDR (Réflectomètre de Domaine Temporel Optique), est nécessaire à la plupart des points de terminaison de la fibre et des nœuds de connexion.

➤ Sensibilité aux dommages physiques : La fibre est un fil petit et compact qui est très susceptible d'être coupé ou endommagé lors de travaux de construction ou d'installation. Les déraillements de wagons de chemin de fer représentent une menace sérieuse pour les dommages aux câbles, car les chemins de fer fournissent souvent des droits de passage pour l'installation de fibres optiques, et ces incidents peuvent perturber le service pour de grandes populations, car les câbles à fibre optique ont des capacités de transmission de données incroyables. Par conséquent, lorsque le câblage à fibre optique est choisi comme support de transmission, des questions de restauration, de sauvegarde et de survie doivent être abordées.

➤ Dommages aux câbles à fibre optique causés par la faune : Par exemple, de nombreux oiseaux rongent les gaines des câbles à fibre pour utiliser des portions du matériau de renforcement en Kevlar, car ils le trouvent particulièrement attrayant comme matériau de nidification. Des insectes comme les fourmis aiment manger le blindage en plastique ; par conséquent, ils peuvent souvent être vus en train de grignoter le câble à fibre optique. Les castors et d'autres rongeurs utilisent les fils de fibre exposés pour aiguiser leurs dents. On sait également que des requins rongent les câbles à fibre optique sous-marins, en particulier aux points de répétition, causant des dommages. Une plante connue sous le nom de plante de sapin de Noël s'enroule si étroitement autour des câbles à fibre optique que les impulsions lumineuses se déplaçant dans la fibre sont étouffées. Cette plante considère le fil comme une racine d'arbre.

13. Résumé

Dans cette unité, vous avez étudié la fibre optique, son principe et son fonctionnement. Vous avez appris la fabrication de la fibre optique et ses différents types. Les fibres optiques ont de nombreuses applications. Bien que la fibre optique existe depuis longtemps, notre technologie ne parvient à les exploiter pleinement que maintenant. Les chercheurs et les scientifiques continueront de chercher de nouvelles méthodes pour utiliser la fibre optique dans notre vie quotidienne dans un avenir proche. Il ne fait aucun doute que la fibre optique continuera d'évoluer et permettra aux gens d'améliorer leurs capacités de communication, de soins médicaux et militaires grâce à leur capacité à améliorer les appareils et la communication.

14. Lexique

ATM : Mode de Transfert Asynchrone

DMD : Retard de Mode Différentiel

LAN : Réseau Local

NA : Ouverture Numérique

PON : Réseaux Optiques Passifs

OTDR : Réflectomètre de Domaine Temporel Optique

15. Références

1. "Fibre Optique". www.thefoa.org. The Fiber Optic Association. Consulté le 17 avril 2015.
2. Senior, John M.; Jamro, M. Yousif (2009). Communications par fibre optique : principes et pratique. Pearson Education. pp. 7–9. ISBN 978-0130326812.
3. "Naissance des Fibroscopes". www.olympus-global.com. Olympus Corporation. Consulté le 17 avril 2015.
4. Lee, Byounggho (2003). "Revue de l'état actuel des capteurs de fibre optique". Technologie des Fibres Optiques. 9 (2): 57–79. Bibcode:2003OptFT...9...57L. doi:10.1016/s1068-5200(02)00527-8.
5. Pearsall, Thomas (2010). Photonics Essentials, 2e édition. McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-162935-5. Archivé depuis l'original le 17 août 2021. Consulté le 24 février 2021.
6. Le Répertoire d'Achat de l'Industrie Optique et des Systèmes. Optical Publishing Company. 1984.
7. Hunsperger (19 octobre 2017). Dispositifs et Systèmes Photoniques. Routledge. ISBN 9781351424844.
8. Fennelly, Lawrence J. (26 novembre 2012). Sécurité Physique Efficace (Quatrième éd.). Elsevier Science. p. 355. ISBN 9780124159815.
9. "Chaire Narinder Singh Kapany en Opto-électronique". ucsc.edu. Archivé depuis l'original le 21 mai 2017. Consulté le 1er novembre 2016.
10. Colladon, Jean-Daniel (1842). "Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'un courant liquide parabolique". Comptes Rendus.
11. Bates, Regis J (2001). Manuel de Commutation et de Réseautage Optique. New York : McGraw-Hill. p. 10. ISBN 978-0-07-137356-2.
12. Tyndall, John (1870). "Réflexion Totale". Notes sur la Lumière.

16. Recommandations

"Communications par Fibre Optique" par : JOHN M. SENIOR

Introduction à l'Électronique Optique par Kenneth E Jones

Ressources ouvertes