

**République Algérienne Démocratique et populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université kasdi Merbah-Ouargla (UKMO)**



**Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés**

Mémoire

Présenté par BEDOUI Mouhammed Lahcen et SAYAh Khalad Achraf

Pour l'obtention du diplôme de Master académique

FILIERE : Industrie Pétrochimique

SPECIALITE : Génie pétrochimique

Thème

**REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS ET
LEURS APPLICATIONS**

Soutenu le : 11/06/2026

TABCHOUCHE Ahmed	MCA (UKMO)	Président
BACHA Oussama	Pr (UKMO)	Examineur
BAAMEUR Lotfi	MCB (UKMO)	Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

Dédicaces

*J*e dédie ce modeste travail :

A ma mère qui m'a entouré d'amour,

A mon père qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui
que dieu le garde et le protège.

A Mes frères et Mes sœurs

A mes amies proches

A toute la famille Bedoui et toute personne m'ayant m'aidé de près ou de loin, qu'il
trouve ici l'expression de mes profondes reconnaissances.

Remerciements

Allah le bénéfique soit loué et qu'il nous guide sur la bonne voie

Ainsi je remercie mon encadreur «Mr.baameur », pour tous ses conseils et ses orientations pour la réalisation de ce travail.

Je remercie mon encadreur pour son aide, sa Gentillesse et pour sa sympathie

Aux membres du jury qui ont bien voulu lire et évaluer le présent mémoire.

A à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table de matières

<i>Dédicaces</i>	<i>I</i>
------------------------	----------

<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
----------------------------	-----------

Introduction Générale :	2
-------------------------------	---

Chapiter I : Bibliographie sur les semi-conducteurs

I. 1. Introduction :	4
-----------------------------------	----------

I.2 Concept et définition :	4
--	----------

I.3 Types de semi-conducteurs	6
--	----------

I.3.1 Semi-conducteurs organiques.....	6
--	---

I.3.2 Semi-conducteurs inorganiques.....	8
--	---

I.3.3 Semi-conducteurs composés	11
---------------------------------------	----

I.4. Principe de préservation de la structure du semi-conducteur :....	16
---	-----------

I.4.1. La structure atomique :	16
--------------------------------------	----

I.4.2. Les liaisons covalentes :	17
--	----

I.4.3. L'importance de la préservation de la structure :	18
--	----

I.5. Opérations sur les semi-conducteurs.....	18
--	-----------

I. 5.1. Dopage :	18
------------------------	----

I. 5.2. Diffusion :	22
---------------------------	----

I. 5.3. Implantation ionique :	23
--------------------------------------	----

I.5.4. Dépôt Chimique en Phase Vapeur (LPCVD) :	24
I.5.5. Croissance de cristaux :	24
I.5.6. Concentration de porteurs :	26
I.6 Méthodes de caractérisation des semi-conducteurs.....	27
I.6.1. Caractérisation morphologique (MEB) :	27
I.6.2 Caractérisation optique (UV-Visible) :	28
 <i>Chapiter II :Applications des semi-conducteurs</i>	
II.1 Applications dans l'industrie pétrochimique :	32
II.1.1. Les capteurs de pression à effet piézorésistif fabriqués à partir de silicium polycristallin	32
II.1.2. Capteurs de gaz.....	33
II.1.3. Le Système de Nez Électronique :	35
II.2. Applications électroniques :.....	36
II.2.1 Circuits intégrés (Integrated Circuits) :	36
II.2.2 Appareils électroniques modernes :	37
II.3. Applications en science des matériaux semi-conducteurs	38
II.3.1 Développement de matériaux intelligents	38
II.3.2 Amélioration des propriétés des matériaux : alliages et nanostructures	39
II.4 Applications dans les énergies renouvelables semi-conducteurs..	39
II.4.1 Cellules solaires (photovoltaïques) :	40
II.4.2 Conversion d'énergie :	41

II.5 De la théorie à l'application pour semi-conducteurs :	43
II.5.1 Liaison des concepts théoriques aux applications réelles :	43
II.5.2 Exemples appliqués :	44
II.6.Étude statistique de l'évolution des semi-conducteurs au cours des dix dernières années :	46
Conclusion générale :	50
Références :	53
Abstract :	58

Liste des figures

Figure 1 : Structure cristalline du Silicium pur[3].	5
Figure 2 : Structure cristalline du germanium (a) et de l'arséniure de gallium (b) [4].	5
Figure 3 : Poly[2,5-bis(3-tétradécylthiophén-2-yl)thiéo[3,2-b]thiophène]	7
Figure 4 : Poly(3-hexylthiophène)	8
Figure 5 : Poly[2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene] N-oxide	8
Figure 6 : Structure cristalline zinc-blende[8].	9
Figure 7: Matériaux semi-conducteurs capteurs de gaz[10].	11
Figure 8 : Structure d'une hétérojonction à base de semi-conducteurs composés III-V (GaAs/AlGaAs) utilisée dans les dispositifs optoélectroniques[11].	12
Figure 9 : (a) La structure cristalline du diamant et de la blende (ZnS). (b) Le réseau cubique à faces centrées (cfc) montrant un ensemble de vecteurs du réseau primitif. (c) Le réseau réciproque du réseau cfc, représenté avec la première zone de Brillouin. [14]	17
Figure 10 : schéma des niveaux énergétiques de la liaison C-C dans une hybridation sp^2 [15].	17
Figure 11 : Semi-conducteur de type n[16].	19
Figure 12 : Bandes d'énergie du semi-conducteur de type n[16].	19
Figure 13 : Cristal de silicium de type p (accepteur)	20
Figure 14 : Bandes d'énergie du semi-conducteur de type p[16].	21
Figure 15 : Étapes générales du processus de diffusion[17].	23
Figure 16 Îlotage par faisceau d'ions localisé de microfils de GaN par suppression des fils sur une bande circulaire, découpe du sommet avec un angle de 55° , et exemple d'îlot obtenu. Les échelles sont respectivement de 30 μm , 5 μm et 5 μm [18].	24
Figure 17 . IoT Monitoring System[29]	38
Figure 18 . Diverses configurations de systèmes photoélectrochimiques (PEC) et photovoltaïques (PV) utilisant des semi-conducteurs III-V pour l'énergie verte [33].	40
Figure 19 . Dispositif de caractérisation des semi-conducteurs et cartes d'interface[35].	41
Figure 20 . Schéma d'une cellule photovoltaïques cristalline[41].	44
Figure 21 . Diodes	45
Figure 22 . Single planar diode[42].	45
Figure 23 . Schéma d'une LED[43].	45

Liste des tableaux

Table 1 : Propriétés de quelques semiconducteurs composés courants[12].....	14
---	----

Liste des abréviations

- **AC** : Alternating Current (Courant alternatif)
- **DC** : Direct Current (Courant continu)
- **DC-DC** : Convertisseur de courant continu à courant continu
- **CMOS** : Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
- **MOS** : Metal-Oxide Semiconductor
- **MOSFET** : Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
- **IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor
- **LED** : Light Emitting Diode (Diode électroluminescente)
- **MEMS** : Micro-Electro-Mechanical Systems
- **MPPT** : Maximum Power Point Tracking
- **HOMO** : Highest Occupied Molecular Orbital
- **LUMO** : Lowest Unoccupied Molecular Orbital
- **III-V** : Semi-conducteurs composés des groupes III et V
- **II-VI** : Semi-conducteurs composés des groupes II et VI
- **PBTTT** : Poly(bis(3-alkylthiophène)thiénothiophène)
- **PBTTT-C14** : Dérivé du polymère PBTTT avec chaîne C14
- **PBTTT-10 / PBTTT-50** : Dérivés oxydés du PBTTT
- **PANI** : Polyaniline
- **TCNQ** : Tetracyanoquinodimethane
- **CZ** : Czochralski (méthode de croissance cristalline)
- **FZ** : Floating Zone (zone flottante)
- **LPE** : Liquid Phase Epitaxy (épitaxie en phase liquide)
- **VPE** : Vapor Phase Epitaxy (épitaxie en phase vapeur)
- **MBE** : Molecular Beam Epitaxy (épitaxie par jets moléculaires)
- **MOCVD** : Metal Organic Chemical Vapor Deposition
- **LPCVD** : Low Pressure Chemical Vapor Deposition
- **RTLPCVD** : Rapid Thermal Low Pressure Chemical Vapor Deposition
- **RTP** : Rapid Thermal Processing
- **FIB** : Focused Ion Beam (faisceau d'ions focalisé)
- **SIMS** : Secondary Ion Mass Spectrometry
- **HOMO / LUMO** : Orbitales moléculaires (liaison électronique organique)
- **EF** : Niveau de Fermi

- **ND** : Concentration des donneurs
- **NA** : Concentration des accepteurs
- **PN** : Jonction P-N
- **NREL** : National Renewable Energy Laboratory
- **PERC** : Passivated Emitter and Rear Cell
- **CO** : Monoxyde de carbone
- **CO₂** : Dioxyde de carbone

Introduction générale

Introduction Générale :

Les semi-conducteurs constituent l'une des catégories de matériaux les plus importantes ayant révolutionné les domaines technologique et industriel au cours des dernières décennies[1]. Ils représentent la base de la majorité des systèmes électroniques modernes, allant des ordinateurs et des smartphones aux technologies de l'intelligence artificielle et des énergies renouvelables[2]. Leur importance réside dans leurs propriétés électriques particulières qui leur permettent de contrôler le flux du courant électrique, offrant ainsi la possibilité de concevoir des composants électroniques à hautes performances et à efficacité croissante. Avec l'évolution rapide de ce domaine, l'utilisation ne se limite plus au silicium traditionnel ; de nouveaux types de semi-conducteurs ont émergé, présentant de meilleures performances en termes de consommation énergétique et d'efficacité[3]. Cette évolution soulève une problématique fondamentale : **dans quelle mesure le développement structural et physique des semi-conducteurs contribue-t-il à l'amélioration de l'efficacité des technologies modernes et futures ?**

Partant de cette **problématique**, cette étude vise à identifier les propriétés fondamentales des semi-conducteurs et leurs différentes classifications, à comprendre les principes physiques qui régissent leur comportement, ainsi qu'à mettre en évidence leurs principales applications dans les domaines industriel et énergétique. Pour atteindre ces objectifs.

Une méthodologie descriptive et analytique fondée sur une revue bibliographique de la littérature scientifique et des références spécialisées a été adoptée. Cette démarche repose sur la collecte, l'analyse et la synthèse des informations relatives aux semi-conducteurs, à leur évolution et à leurs applications.

L'étude est structurée en deux chapitres principaux : le premier est consacré aux aspects théoriques des semi-conducteurs, notamment les concepts fondamentaux, les classifications et les propriétés physiques, tandis que le second traite de leurs différentes applications technologiques et industrielles, en mettant particulièrement l'accent sur leur rôle dans les énergies renouvelables et l'industrie moderne.

Chapitre I :

Bibliographie sur les semi-conducteurs

I. 1. Introduction :

Le monde contemporain connaît un développement accéléré dans divers domaines scientifiques et technologiques, et le domaine des semi-conducteurs est l'une des principales pierres angulaires sur lesquelles repose cette révolution moderne. Ces matériaux sont devenus la base sur laquelle s'appuient les industries électroniques avancées, depuis les appareils simples jusqu'aux systèmes intelligents complexes. De ce point de vue, comprendre la nature des semi-conducteurs et leurs propriétés constitue une étape essentielle pour tout chercheur cherchant à saisir les transformations technologiques actuelles.

I.2 Concept et définition :

Les semi-conducteurs constituent une classe de matériaux solides dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants[4]. D'un point de vue physique, ce comportement s'explique par l'existence d'une bande d'énergie interdite (gap) d'une largeur modérée, séparant la bande de valence de la bande de conduction[5]. Cette structure électronique particulière permet à ces matériaux de moduler leur capacité de transport de charges sous l'effet de stimuli externes, tels que l'élévation de la température, l'éclairement ou l'introduction contrôlée d'impuretés (dopage). Au-delà de leurs propriétés intrinsèques, l'importance des semi-conducteurs réside dans la maîtrise humaine de leur conductivité, faisant d'eux le pilier technologique fondamental de l'électronique moderne et des dispositifs de conversion d'énergie.

Exemples :

1. Le silicium (Silicon) :

Le silicium est le matériau le plus célèbre et le plus utilisé dans le monde des semi-conducteurs, non seulement pour sa capacité à conduire l'électricité, mais pour sa grande flexibilité dans le contrôle de ses propriétés physiques. Dans son état pur, le silicium se comporte comme un isolant à basse température, mais dès que des impuretés sont ajoutées avec précision (processus de dopage — Doping), il se transforme en un semi-conducteur actif dont nous pouvons contrôler le flux de charges à l'intérieur[6].

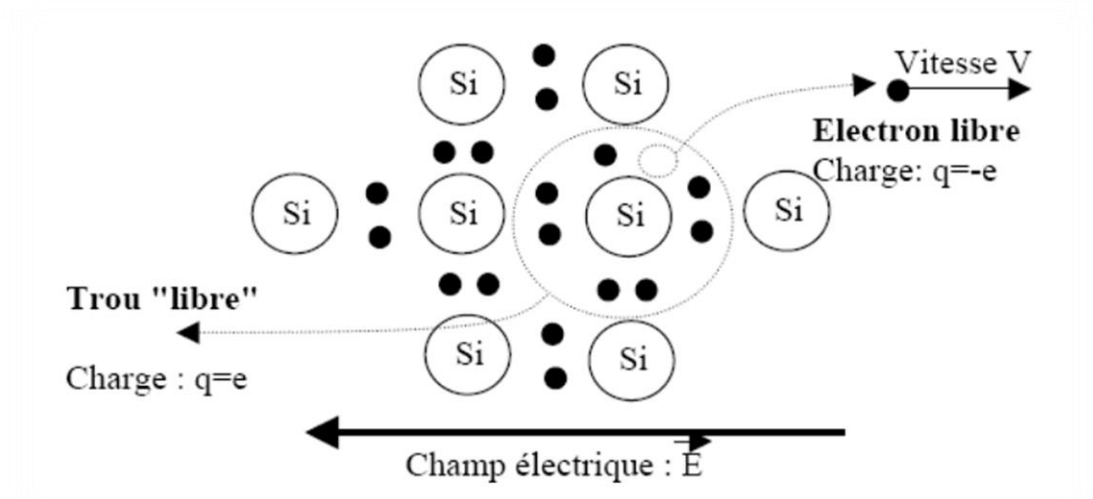


Figure 1 : Structure cristalline du Silicium pur[3].

2. Le germanium (Germanium) :

Le germanium, dont le symbole chimique est **Ge** et le numéro atomique est 32 est l'un des matériaux semi-conducteurs élémentaires les plus importants appartenant au groupe IV du tableau périodique. La structure de l'atome de germanium se caractérise par la présence de quatre électrons de valence sur sa couche externe, responsables de la formation de liaisons covalentes au sein du réseau cristallin du matériau. D'un point de vue énergétique, le germanium est classé comme un matériau à bande interdite (gap) relativement étroite, dont la valeur est de 0,67 électronvolt (eV) à une température de 300 kelvins, ce qui lui confère une concentration élevée de porteurs intrinsèques atteignant $2,4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Bien que le silicium l'ait surpassé dans de nombreuses applications industrielles, le germanium reste un matériau de référence dans l'étude des propriétés physiques et électroniques des semi-conducteurs, notamment en ce qui concerne l'effet de la température sur le flux des charges[7].

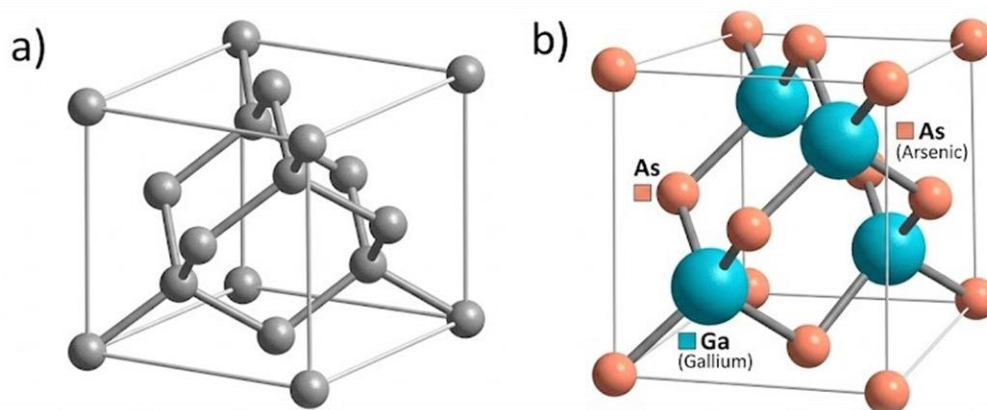


Figure 2 : Structure cristalline du germanium (a) et de l'arséniure de gallium (b) [4].

I.3 Types de semi-conducteurs

I.3.1 Semi-conducteurs organiques

1. Définition :

Les semi-conducteurs organiques sont classés comme des matériaux à base de carbone dont les propriétés électroniques dépendent de la présence d'un système π conjugué, lequel est une structure moléculaire caractérisée par l'alternance de liaisons simples et doubles ou triples, permettant l'existence d'un nuage électronique délocalisé capable de se déplacer sous l'effet de stimuli externes. Sur le plan énergétique, leur conductivité s'explique par la proximité des niveaux orbitaux moléculaires frontières, où l'orbitale moléculaire haute occupée (HOMO) représente la bande de valence, tandis que l'orbitale moléculaire basse inoccupée (LUMO) représente la bande de conduction, séparées par un intervalle énergétique (band gap) étroit qui permet le passage des charges lorsqu'elles sont excitées thermiquement ou optiquement. Cette catégorie de matériaux se caractérise par une flexibilité mécanique élevée, une faible conductivité thermique, ainsi que par la possibilité d'un traitement chimique pour contrôler leurs niveaux d'énergie, ce qui en fait un substrat essentiel dans les applications de l'électronique flexible et des générateurs thermoélectriques[8].

2. Caractéristiques :

Les semi-conducteurs organiques à base de polymères formés par plasma (polymères plasma) constituent une classe prometteuse de matériaux fonctionnels. Ils se distinguent par des propriétés physiques, chimiques et électriques particulières, ce qui les place au centre de l'intérêt de la recherche scientifique actuelle. À partir des résultats expérimentaux, ces propriétés peuvent être résumées comme suit :

1/ Propriétés structurales et morphologiques (Aspect structural) :

Les couches minces élaborées à partir de monomères tels que la phthalocyanine et le TCNQ présentent des caractéristiques remarquables :

- **Stabilité et homogénéité** : Les films obtenus sont hautement cohésifs, insolubles dans les solvants organiques usuels et présentent une excellente stabilité thermique.
- **Qualité de surface** : Ces couches sont lisses, continues et pratiquement dépourvues de porosité, avec un aspect brillant. Ces propriétés sont essentielles pour assurer de bonnes performances dans les dispositifs électroniques.

- **Organisation structurale** : Les propriétés finales du film dépendent fortement des paramètres de la décharge plasma, notamment la pression et la puissance. Une augmentation du rapport puissance/pression (W/P) entraîne une augmentation du degré de réticulation du polymère, ce qui influence directement la densité et la structure du matériau[9].

2/ Propriétés électriques :

Ce volet constitue l'aspect fondamental de l'étude :

- **Conductivité électrique spécifique (σ)** Les polymères plasma présentent une conductivité située entre celle des isolants faibles et celle des semi-conducteurs. À des températures élevées (environ 150 °C), la conductivité varie entre 10^{-14} et 10^{-11} .
- **Énergie d'activation** : La conduction électrique suit une loi de type Arrhenius, décrite par :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

Où (E_a) représente l'énergie d'activation. Les valeurs obtenues expérimentalement se situent entre 0,5 et 1,0 eV, ce qui est caractéristique des semi-conducteurs organiques à large bande interdite[9].

3. Exemples :

Les exemples les plus représentatifs, on trouve les polymères de la famille PBTTT, notamment le PBTTT-C14, qui se distingue par sa bonne organisation moléculaire et ses performances élevées en transport de charge.

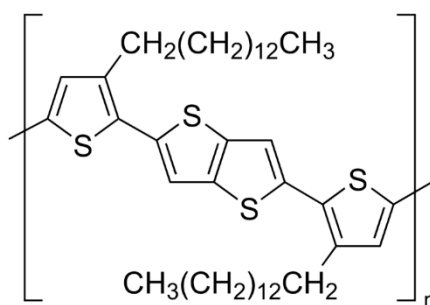


Figure 3 : Poly[2,5-bis(3-tétradécylthiophén-2-yl)thiéno[3,2-b]thiophène]

Un autre polymère largement étudié est le P3HT (poly(3-hexylthiophène)), reconnu pour sa simplicité de synthèse, sa stabilité relative et son utilisation répandue dans diverses applications.

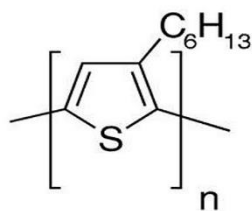


Figure 4 : Poly(3-hexylthiophène)

Par ailleurs, la famille des PBTTT-nO, incluant des dérivés comme le PBTTT-1O et le PBTTT-5O, correspond à des polymères modifiés par l'introduction de chaînes latérales contenant des groupements éther. Cette modification permet d'améliorer certaines propriétés, notamment les performances électrothermiques et la conductivité.

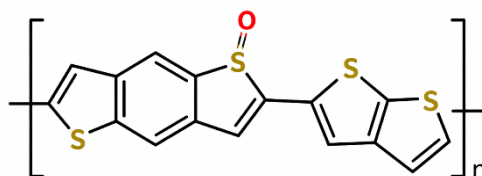


Figure 5 : Poly[2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene] N-oxide

Enfin, d'autres matériaux organiques méritent également d'être mentionnés, tels que le PANI (polyaniline), connu pour sa conductivité ajustable et sa stabilité chimique, ainsi que le N2200, un semi-conducteur de type n, couramment utilisé dans les dispositifs électroniques organiques en raison de ses bonnes propriétés de transport des électrons.

Ainsi, ces différents polymères illustrent la diversité et le potentiel des semi-conducteurs organiques dans le développement de technologies électroniques flexibles et performantes.

1.3.2 Semi-conducteurs inorganiques

1. Définition :

Matériaux solides possédant une structure cristalline ordonnée, dont les propriétés électriques se situent dans une gamme intermédiaire entre les conducteurs et les isolants. Ces matériaux sont caractérisés par la liaison de leurs atomes via des liaisons covalentes au sein d'un réseau cristallin périodique, où les atomes s'organisent selon des configurations géométriques spécifiques, telles que la structure diamant ou la structure blende[10].

2. Caractéristiques :

- 1/ **Conductivité électrique intermédiaire** : Les semi-conducteurs inorganiques occupent une position énergétique intermédiaire entre les métaux hautement conducteurs et les isolants. À l'état pur, leur conductivité est limitée en raison de la faible concentration de porteurs de charge intrinsèques. Ce qui leur confère un intérêt technologique majeur est la possibilité de moduler précisément cette conductivité, soit en réponse aux variations de température, soit par l'introduction intentionnelle d'impuretés, permettant ainsi de contrôler le flux de courant de niveaux isolants jusqu'à des niveaux proches de la conductivité métallique.
- 2/ **Structure cristalline régulière** : Les propriétés électroniques de ces matériaux dépendent essentiellement de l'ordre atomique périodique du réseau cristallin. Les matériaux traditionnels, comme le silicium ou les semi-conducteurs composés, se cristallisent en structures géométriques définies telles que le réseau diamant ou zinc-blende. Cette régularité structurale permet la formation des fonctions d'onde des électrons selon la théorie de Bloch, facilitant le mouvement efficace des porteurs de charge dans le réseau sans dispersion aléatoire significative[11].

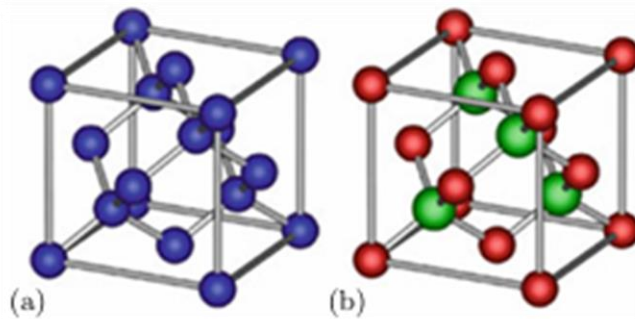


Figure 6 : Structure cristalline zinc-blende[8].

- 3/ **Bande interdite (Band Gap)** : La bande interdite caractérise les semi-conducteurs, séparant la bande de valence remplie d'électrons de la bande de conduction vide. La largeur de cette bande, directe ou indirecte, détermine la capacité du matériau à exciter les électrons. Une bande interdite relativement faible dans les matériaux inorganiques permet aux électrons de la franchir lorsqu'ils acquièrent une énergie thermique ou lumineuse suffisante, posant ainsi la base physique de la conduction induite[11].
- 4/ **Influence de la température** : Les semi-conducteurs inorganiques montrent une relation directe entre température et conductivité électrique, comportement inverse de

celui des métaux. L'énergie thermique provoque la rupture des liaisons covalentes et la génération de paires électron-trou, augmentant exponentiellement la densité des porteurs de charge et réduisant la résistivité spécifique. La gestion thermique devient donc essentielle pour assurer la stabilité des performances des dispositifs électroniques[11].

5/ **Possibilité de dopage (Doping)** : Ces matériaux possèdent la capacité unique de modifier leurs propriétés électriques et chimiques par le dopage, c'est-à-dire l'introduction d'atomes étrangers à concentrations très précises dans le réseau cristallin. Les atomes donneurs créent des semi-conducteurs de type n riches en électrons, tandis que les atomes accepteurs produisent le type p riche en trous. Cette technique constitue la base des jonctions PN et des transistors modernes[11].

6/ **Stabilité thermique et chimique** : Comparés aux semi-conducteurs organiques, ces matériaux possèdent une rigidité structurelle et une stabilité thermique et chimique supérieures, leur permettant de fonctionner efficacement dans des conditions extrêmes et à des températures élevées sans dégradation de leur réseau cristallin. Cette stabilité assure la longévité des composants électroniques et la fiabilité requise dans les applications industrielles et spatiales avancées[11].

3. Exemples :

Les semi-conducteurs inorganiques constituent une classe essentielle de matériaux utilisés dans de nombreuses applications technologiques modernes. Parmi les exemples les plus importants, on peut citer :

- **Les oxydes métalliques nanostructurés** : Ces matériaux sont largement utilisés comme éléments sensibles dans les capteurs en raison de leur grande surface spécifique et de leur forte activité chimique, ce qui améliore leur interaction avec l'environnement et permet un meilleur contrôle du transport des porteurs de charge[12].
- **L'oxyde de zinc (ZnO)** : Il s'agit d'un matériau très utilisé dans le domaine de la détection des gaz. Il présente des propriétés électroniques et structurales remarquables et peut être synthétisé sous différentes formes nanométriques, telles que les nano fils et les nanobâtonnets, ce qui améliore ses performances de détection[13].
- **Les matériaux bidimensionnels (2D)** : Cette catégorie comprend des matériaux avancés tels que le graphène (Graphene), les dichalcogénures de métaux de transition (TMDs)

comme MoS_2 , ainsi que les MXenes. Ces matériaux se distinguent par leurs propriétés électroniques et de surface exceptionnelles, les rendant particulièrement adaptés aux applications de détection à haute sensibilité[13].

4. d'application :

- **L'industrie pétrochimique:** Ils sont utilisés pour la surveillance de la sécurité des installations industrielles et la détection précoce des fuites de gaz toxiques et dangereux, notamment les hydrocarbures, contribuant ainsi à prévenir les explosions et la pollution environnementale[12].
- **La sécurité :** Ils interviennent dans les systèmes de détection des gaz inflammables et explosifs, aussi bien dans les environnements domestiques qu'industriels, afin de renforcer les mesures de sécurité[13].
- **Le secteur industriel :** Ils sont employés pour le suivi et le contrôle des procédés industriels dans divers domaines tels que l'exploitation minière, la pétrochimie, ainsi que l'industrie du pétrole et du gaz, afin d'assurer une exploitation efficace et sécurisée[13].

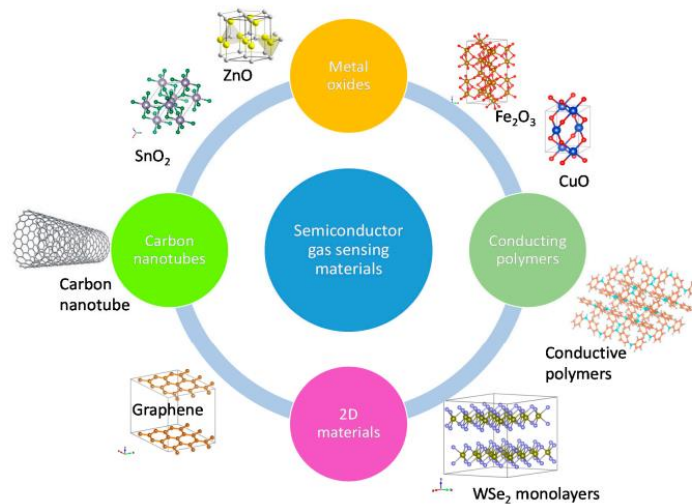


Figure 7: Matériaux semi-conducteurs capteurs de gaz[10].

1.3.3 Semi-conducteurs composés

1. Définition :

Les semiconducteurs composés sont des matériaux semi-conducteurs formés par l'association d'au moins deux éléments chimiques appartenant à des groupes distincts du tableau périodique, par opposition aux semiconducteurs élémentaires (tels que le silicium et le germanium). Ils sont généralement obtenus par combinaison d'éléments des groupes III et V (III-V), comme l'arséniure

de gallium (GaAs), ou des groupes II et VI (II-VI), comme le sulfure de cadmium (CdS). Leur principal avantage réside dans la possibilité d'ajuster leurs propriétés physico-chimiques par le contrôle précis de la composition stœchiométrique[14].

2. Classification :

Selon le nombre d'éléments constitutifs du réseau cristallin, les semi-conducteurs composés se répartissent en trois catégories principales :

- **Composés binaires** : formés de deux éléments dans des proportions atomiques généralement égales. Les représentants majeurs en sont l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphure d'indium (InP)[14].
- **Composés ternaires** : obtenus par substitution partielle d'un élément d'un composé binaire par un autre élément du même groupe, comme dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, où le paramètre x Permet de contrôler la largeur de la bande interdite[14].
- **Composés quaternaires** : constitués de quatre éléments, à l'exemple de $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Ces matériaux offrent une grande flexibilité pour l'ajustement du paramètre de maille, permettant ainsi une meilleure compatibilité avec les substrats utilisés en microélectronique[14].

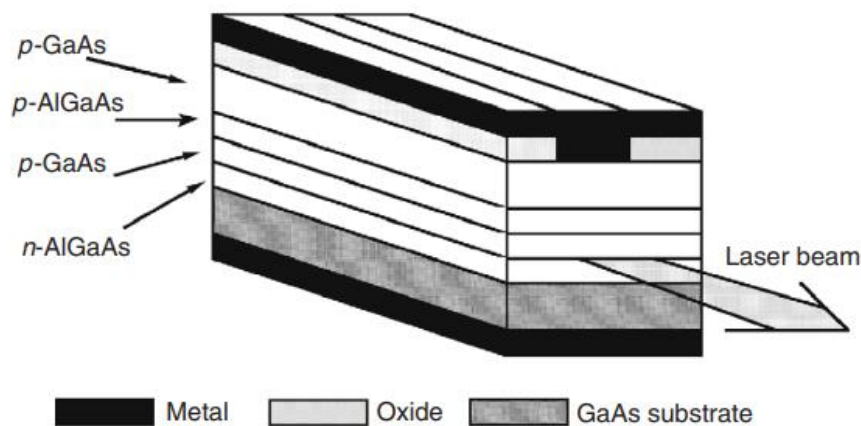


Figure 8 : Structure d'une hétérojonction à base de semi-conducteurs composés III-V (GaAs/AlGaAs) utilisée dans les dispositifs optoélectroniques[11].

3. Caractéristiques :

1/ Propriétés Physiques :

Les semi-conducteurs composés se distinguent par un ensemble de propriétés physiques fondamentales, dont les plus notables sont :

- **Bande interdite directe (Direct Bandgap) :** Contrairement au silicium, la majorité des semi-conducteurs composés (tels que le GaAs et l'InP) possèdent une bande interdite directe. Cela permet des transitions électroniques efficaces entre la bande de valence et la bande de conduction, accompagnées de l'émission ou de l'absorption de photons. Cette caractéristique explique leur haute efficacité dans les applications optoélectroniques, notamment pour les dispositifs laser et les LED[15].
- **Ingénierie de la bande interdite (Bandgap Engineering) :** Ces matériaux offrent la possibilité de moduler la valeur de l'énergie de la bande interdite (E_g) en faisant varier les proportions des éléments constitutifs (par exemple, les alliages d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Ce contrôle permet la fabrication de dispositifs opérant à des longueurs d'onde spécifiques avec une précision accrue[15].
- **Mobilité des porteurs de charge :** Les semi-conducteurs composés, particulièrement les matériaux III-V, se caractérisent par une mobilité électronique élevée. Cela confère une vitesse de réponse ultra-rapide aux dispositifs électroniques fonctionnant à hautes fréquences (tels que les radars à micro-ondes)[15].
- **Constantes de réseau :** Chaque composé possède une constante de réseau spécifique. L'accord de maille (Lattice Matching) entre les couches épitaxiées et le substrat est un facteur physique crucial pour garantir la qualité cristalline et l'absence de défauts structuraux susceptibles d'entraver le transport des charges[15].

2/ Propriétés Chimiques et Structurales

Le comportement de ces matériaux et leurs interactions lors de la synthèse dépendent de leur structure chimique précise :

- **Valence et liaisons chimiques :** Ils résultent de l'association d'éléments issus de

différents groupes du tableau périodique (groupes 13 et 15 pour les III-V, ou groupes 12 et 16 pour les II-VI). Les liaisons covalentes prédominent dans ces composés, avec une certaine fraction d'ionicté qui croît proportionnellement à la différence d'électronégativité entre les éléments constitutifs[15].

- **Structure cristalline** : La plupart des semi-conducteurs composés cristallisent dans des systèmes spécifiques, les plus fréquents étant la structure "Sphalérite" (Zinc Blende) et la structure "Wurtzite". Cette architecture définit la symétrie chimique du matériau et influence ses propriétés mécaniques et électriques[15].
- **Dopage chimique** : Ces matériaux subissent un processus de dopage rigoureux par l'introduction d'éléments donneurs ou accepteurs. Sur le plan chimique, il est impératif de sélectionner des dopants dont le rayon atomique est proche de celui des atomes du réseau afin d'éviter les distorsions de contrainte[15].
- **Stabilité thermique et réactivité** : Les semi-conducteurs composés présentent une stabilité chimique variable. Par exemple, les nitrures possèdent une stabilité thermique très élevée. En revanche, les procédés de préparation d'autres composés (via la technique MOCVD) requièrent l'utilisation de précurseurs chimiques de haute pureté, tels que des complexes de coordination, pour garantir l'obtention de couches minces de haute qualité électronique[15].

Table 1 : Propriétés de quelques semiconducteurs composés courants[12].

<i>Compound</i>	<i>Band gap^a</i> (eV)	<i>Type^b</i>	<i>Structure</i>	<i>Lattice spacing</i> (Å)
Si	1.11	i	Diamond	5.43
Ge	0.67	i	Diamond	5.66
III–V materials				
GaP	2.25	i	Zinc blende	5.450
GaAs	1.43	d	Zinc blende	5.653
GaSb	0.69	d		6.095
InP	1.28	d	Zinc blende	5.8687
InAs	0.36	d	Zinc blende	6.058
InSb	0.17	d		6.4787
II–VI materials				
CdS	2.53	d	Wurtzite	<i>a</i> : 4.136; <i>c</i> : 6.713
CdSe	1.74	d	Wurtzite	<i>a</i> : 4.299; <i>c</i> : 7.010
CdTe	1.50	d	Zinc blende	6.477
ZnS	3.8	d	Wurtzite	<i>a</i> : 3.814; <i>c</i> : 6.257
ZnS	3.6	d	Zinc blende	5.406
ZnSe	2.58	d	Zinc blende	5.667
IV–VI materials				
ZnTe	2.28	d	Zinc blende	6.101
PbS	0.37	d	NaCl	5.936
PbSe	0.26	d	NaCl	6.124
PbTe	0.29	d	NaCl	6.460

5. Exemples :

Les semiconducteurs composés constituent une catégorie avancée de matériaux formés par la combinaison de deux ou plus de groupes du tableau périodique, ce qui leur confère des propriétés techniques supérieures à celles des semiconducteurs traditionnels.

Ces matériaux sont classés selon leur structure atomique en :

- **Composés des groupes (13-15) :** appelés III-V, parmi leurs exemples les plus marquants figurent l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium (InP), le nitrure de gallium (GaN).
- **Composés des groupes (12-16) :** appelés II-VI, tels que le tellure de cadmium (CdTe) et le sulfure de zinc (ZnS).
- **Composés du groupe (14-16) :** comme la tellure de plomb (PbTe).
- **Matériaux ternaires :** ce sont des alliages qui permettent un contrôle précis des propriétés physiques, comme (AlGaAs).

La force scientifique de ces composés réside dans leur capacité à offrir 'l'ingénierie de la bande interdite', ce qui permet de contrôler les interactions optiques et les vitesses électroniques élevées, ce qui en fait le substrat essentiel dans la fabrication des dispositifs optiques et de l'électronique avancée[15].

6. d'application :

1. Détection thermique et des fuites de gaz (QWIPs) : Ces détecteurs fabriqués à partir de semiconducteurs composés reposent sur la détection de la chaleur et des rayons infrarouges. Dans les raffineries et les champs pétroliers, ils sont utilisés pour fabriquer des caméras de surveillance qui 'détectent les gaz fuyants' invisibles à l'œil nu, et surveillent la température des tuyauteries pour éviter les explosions dues à la contrainte thermique[16].

2. Analyse de la qualité du carburant et du gaz (Lasers QC) : Il s'agit d'un laser très précis fonctionnant comme une 'sonde chimique'. Il est utilisé dans les laboratoires de raffinage pour analyser les composants du gaz naturel et mesurer le taux d'impuretés (comme le soufre) dans le carburant en temps réel. Cette application contribue à garantir la conformité des dérivés pétroliers aux spécifications internationales avant leur exportation[16].

3. Électronique des puits de pétrole (Dispositifs GaN) : Ces matériaux (comme le nitrure de gallium) se caractérisent par leur capacité à fonctionner à des 'températures très élevées'. Ils sont utilisés pour fabriquer des circuits électroniques placés à l'intérieur des têtes de forage dans les profondeurs de la terre, là où l'électronique ordinaire échoue. Cette technologie assure la transmission continue des données depuis le fond du puits sans panne[16].

I.4. Principe de préservation de la structure du semi-conducteur :

I.4.1. La structure atomique :

Les cristaux semi-conducteurs ont une structure rangée selon un système périodique en trois dimensions, où les vecteurs du réseau primitif (a_1 , a_2 , a_3) reflètent les symétries de translation du cristal. La structure est créée en utilisant un petit groupe d'atomes, appelé la base, puis en le déplaçant à l'aide de multiples des vecteurs du réseau et de leurs combinaisons linéaires.

Pour les semi-conducteurs, il existe deux structures cristallines principales :

- La structure du diamant (Diamond), où la base est composée de deux atomes de carbone identiques.
- La structure de la blende (zinc-blende), où la base est composée de deux types d'atomes différents, tels que le zinc et le soufre.

Ces deux structures partagent le même type de réseau direct (maille directe), qui est un réseau cubique à faces centrées (fcc). De multiples choix sont permis pour les vecteurs du réseau primitif pour un même réseau, car le choix de ces vecteurs n'est pas unique[17].

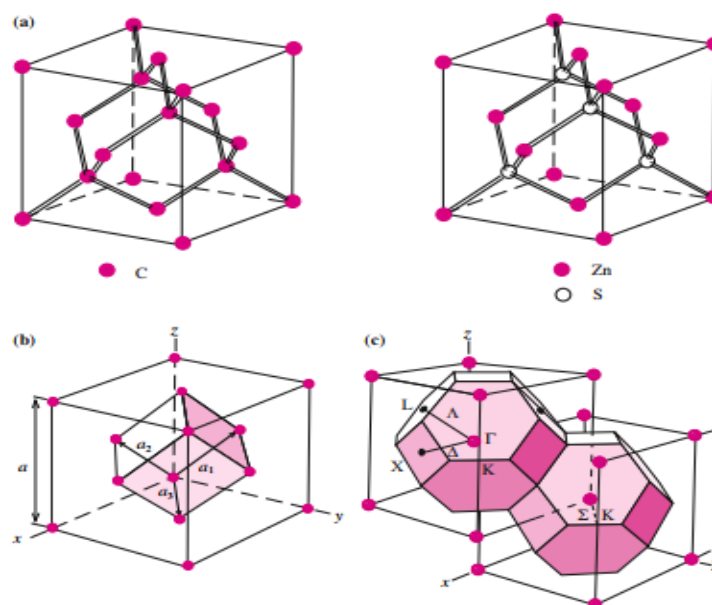


Figure 9 : (a) La structure cristalline du diamant et de la blende (ZnS). (b) Le réseau cubique à faces centrées (cfc) montrant un ensemble de vecteurs du réseau primitif. (c) Le réseau réciproque du réseau cfc, représenté avec la première zone de Brillouin. [14]

1.4.2. Les liaisons covalentes :

Les orbitales moléculaires π liantes sont désignées par le terme HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), correspondant à l'orbitale occupée possédant le niveau d'énergie le plus élevé. À l'inverse, les orbitales anti-liantes π^* sont appelées LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), représentant l'orbitale vacante de plus faible énergie.

La différence d'énergie entre ces deux orbitales constitue la bande interdite (E_g). L'écart énergétique entre les orbitales σ et σ^* est très important, dépassant 5 eV, ce qui limite fortement l'excitation des électrons de l'HOMO vers la LUMO. Cette caractéristique explique le comportement isolant des matériaux organiques saturés[18].

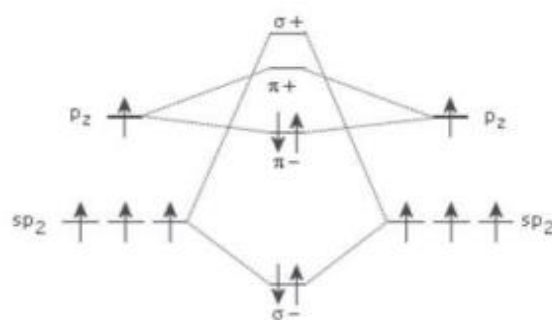


Figure 10 : schéma des niveaux énergétiques de la liaison C-C dans une hybridation sp^2 [15]

I.4.3. L'importance de la préservation de la structure :

Les liaisons σ jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la rigidité de la structure moléculaire grâce à leur forte cohésion. En revanche, l'écart énergétique entre les orbitales π et π^* est nettement plus faible, généralement inférieur à 3 eV, ce qui confère aux matériaux organiques conjugués des propriétés de semi-conducteurs[18].

I.5. Opérations sur les semi-conducteurs

I. 5.1. Dopage :

Le dopage est un procédé permettant d'augmenter considérablement la conductivité électrique d'un semi-conducteur. Il consiste à introduire des atomes d'impureté dans un semi-conducteur intrinsèque afin de le transformer en un semi-conducteur extrinsèque possédant une meilleure conductivité électrique[19].

Deux types de dopage sont possibles : les types n et p.

- ✓ Impuretés peu profondes (shallow) : impuretés qui nécessitent peu d'énergie — typiquement de l'ordre de l'énergie thermique ou moins — pour s'ioniser.
- ✓ Impuretés profondes (deep) : impuretés qui nécessitent des énergies plus grandes que l'énergie thermique pour s'ioniser ; par conséquent, seule une petite quantité de ces impuretés peut contribuer aux porteurs libres.
- ✓ Les donneurs ionisés fournissent au semi-conducteur des électrons libres (type n).
- ✓ $N_d^+ \approx N_d$
- ✓ Les accepteurs ionisés fournissent au semi-conducteur des trous libres (type p).
- ✓ $N_a^- \approx N_a$

1. Semi-conducteur de type n :

- On appelle donneurs les atomes dopants intégrés à un cristal semi-conducteur.
- Le phosphore (P), l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb) ont cinq électrons de valence ; ils agissent donc comme le silicium (Si), mais avec un électron supplémentaire, ce qui les transforme en donneurs.

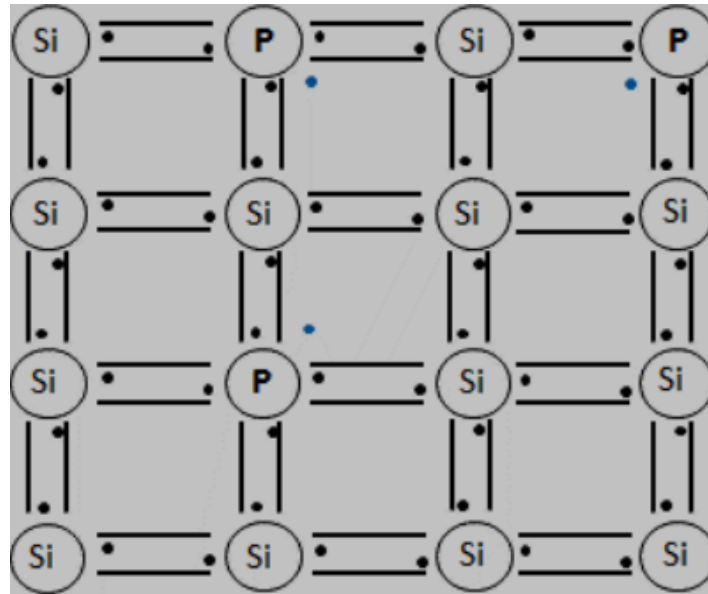


Figure 11 : Semi-conducteur de type n[16].

Étant donné que l'énergie d'activation à température ambiante est faible, pratiquement tous les atomes donneurs du cristal céderont des électrons à la bande de conduction[19].

Donc si N_D représente la concentration de donneur, pour un matériau de type n en équilibre :

$$n_0 \approx N_D cm^{-3}$$

Où n_0 représente le nombre d'électrons conducteurs (concentration en électrons)[19].

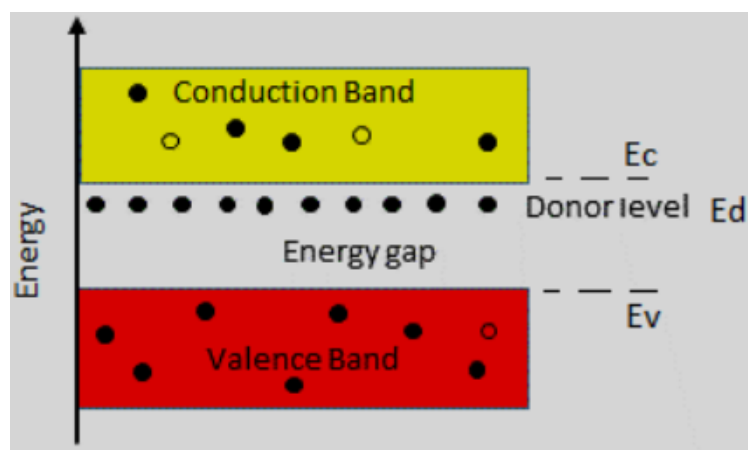


Figure 12 : Bandes d'énergie du semi-conducteur de type n[16].

2. Semi-conducteur de type p :

- Les atomes de dopage intégrés à un cristal semi-conducteur sont dénommés des accepteurs.
- Le bore (B), le gallium (Ga) et l'aluminium (Al) possèdent trois électrons de valence ; ils se comportent donc comme du silicium avec un électron perdu.

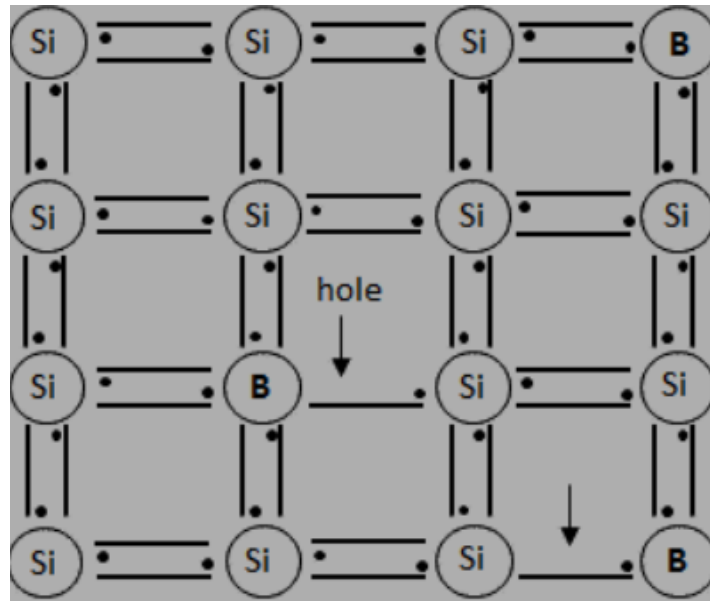


Figure 13 : Cristal de silicium de type p (accepteur)

- Lorsque des atomes de B, Ga ou Al sont introduits dans un cristal de silicium, l'un des électrons de valence du Si peut aisément passer à la couche de valence d'un des atomes ajoutés, laissant ainsi un atome de Si chargé positivement. Par conséquent, les atomes ajoutés auront une charge négative. Bien sûr, les électrons de ces atomes ne peuvent pas participer à la conduction.
- En raison de la faible énergie d'activation à température ambiante, presque tous les atomes donneurs présents dans le cristal accepteront un électron de la bande de valence.

Donc, si N_A représente la concentration d'accepteurs, pour un matériau de type p à l'équilibre

:

$$p_0 \approx N_A (cm^{-3})$$

Où p_0 représente la concentration des trous[19].

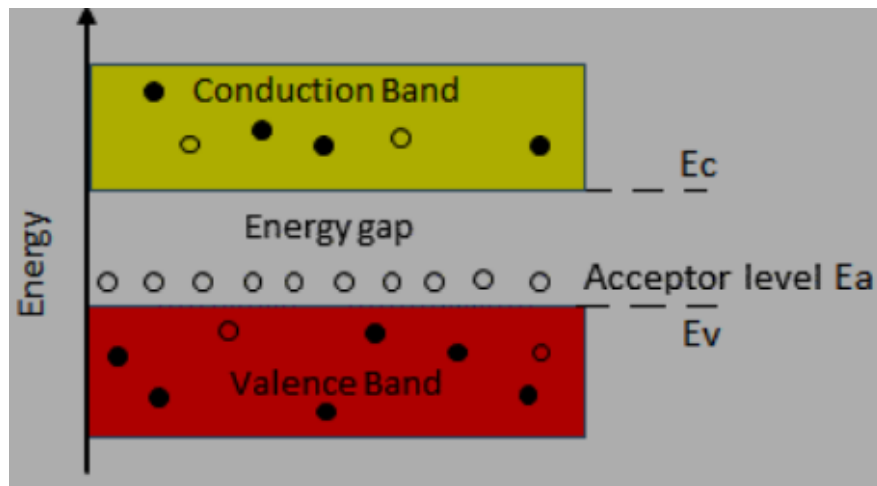


Figure 14 : Bandes d'énergie du semi-conducteur de type p[16].

En général, plusieurs donneurs et accepteurs coexistent dans le semi-conducteur extrinsèque, et par conséquent, le type de dopage sera classé comme suit :

A. $N_D > N_A$, n-type :

$$n_0 = N_D - N_A$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}$$

B. $N_A > N_D$, p-type :

$$p_0 = N_A - N_D$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$$

I. 5.2. Diffusion :**Étape 1 : Nettoyage préliminaire des wafers**

Le procédé débute par le nettoyage des wafers de silicium afin de supprimer la poussière, les contaminants organiques ainsi que les impuretés métalliques présentes à la surface, garantissant ainsi un substrat parfaitement propre.

Étape 2 : Oxydation thermique

Une opération d'oxydation thermique est ensuite réalisée afin de générer une couche homogène de dioxyde de silicium à la surface du wafer. Cette couche jouera le rôle de masque protecteur lors des futures étapes de gravure.

Étape 3 : Application de la résine photosensible

Une fine couche de résine photosensible (photoresist) est déposée sur la couche d'oxyde afin de préparer l'étape de photolithographie.

Étape 4 : Photolithographie

Après les phases d'exposition et de développement, le motif du masque est reproduit sur la résine photosensible, ce qui permet de délimiter les régions où l'oxyde devra être retiré pour effectuer le dopage.

Étape 5 : Gravure sélective

Le dioxyde de silicium non recouvert par le photoresist est éliminé de manière sélective par gravure humide ou sèche, mettant ainsi à nu les zones du silicium destinées au dopage.

Étape 6 : Retrait du photoresist

Une fois la gravure achevée, la résine photosensible restante est supprimée, laissant une structure en dioxyde de silicium qui servira de masque pendant le dopage.

Étape 7 : Nettoyage avant l'opération de dopage

Le wafer subit un nouveau nettoyage pour enlever les résidus chimiques et les particules générés lors des étapes précédentes, assurant une surface propre avant le dopage final.

Étape 8 : Dopage principal par diffusion thermique

Le dopage est ensuite effectué par diffusion thermique, un mécanisme gouverné par les gradients de concentration conformément aux lois de Fick. Les atomes dopants migrent des régions fortement concentrées vers les régions moins concentrées, permettant de contrôler avec précision la profondeur et le profil des jonctions.

Étape 9 : Retrait final de l'oxyde

Pour terminer, la couche de dioxyde de silicium est complètement supprimée afin de révéler les zones dopées avec précision sur la surface du silicium[20].

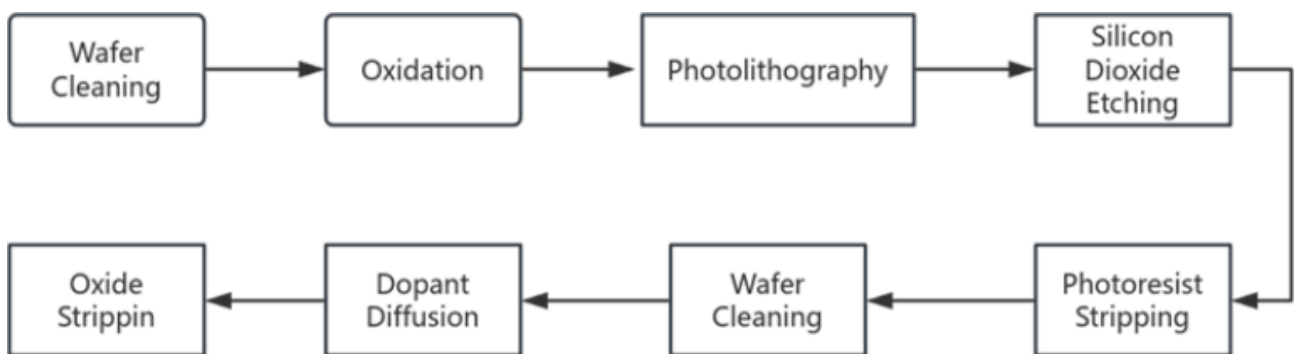


Figure 15 : Étapes générales du processus de diffusion[17].

I. 5.3. Implantation ionique :

L'emploi de la méthode d'usinage automatisé par faisceau d'ions focalisé (FIB) sur les nanofils de nitrure de gallium (GaN) permet de répondre au besoin d'évaluation du dopage radial et axial de ces structures. Cette méthode cherche à illustrer les variations de dopage présentes dans les nanofils en fabriquant des fils coupés à diverses hauteurs.

En utilisant un faisceau d'ions focalisé (FIB), une portion du nanofil est d'abord isolée en tant qu'îlot, après quoi l'échantillon est incliné à un angle de 55°. On procède ensuite à la découpe des nanofils en utilisant un faisceau d'ions de gallium. L'issue de cette technique est démontrée ci-dessous. Après leur préparation, ces îlots peuvent être caractérisés en utilisant la méthode ToF-SIMS (spectrométrie de masse par temps de vol secondaire)[21].

1.5.4. Dépôt Chimique en Phase Vapeur (LPCVD) :

La méthode de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression réalisée dans un four à lampes halogènes, également connue sous l'acronyme RTLPCVD (rapid thermal low-pressure chemical vapor deposition), est une approche prometteuse pour la fabrication de films minces basés sur le silicium. Effectivement, la diminution du temps total des processus ainsi que la faible utilisation de gaz réactifs dans les réacteurs à traitement thermique rapide (RTP) ouvrent la voie à l'exploration de nouvelles technologies pour la production de dispositifs (microcapteurs, cellules solaires) qui sont relativement moins polluants comparés aux méthodes traditionnelles[22].

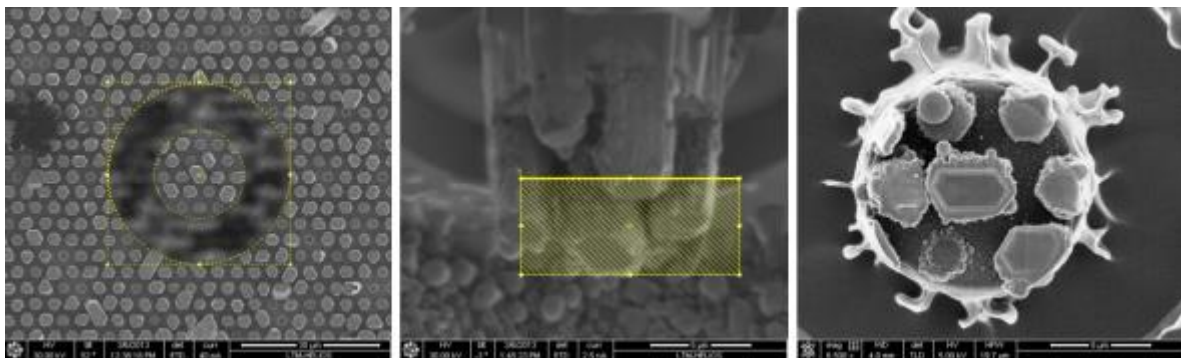


Figure 16 Îlotage par faisceau d'ions localisé de microfils de GaN par suppression des fils sur une bande circulaire, découpe du sommet avec un angle de 55°, et exemple d'îlot obtenu. Les échelles sont respectivement de 30 μm , 5 μm et 5 μm [18].

Notre installation RTP est équipée de plusieurs gaz (SiH_4 , NH_3 , N_2O , O_2 , PH_3 , B_2H_6), nous permettant de réaliser des dépôts de différentes couches minces à base de silicium via RTLPCVD : silicium polycristallin (poly-Si) intrinsèque ou dopé in situ, nitrure de silicium (Si-N) et oxynitrure de silicium (Si-O-N). Cet article présente une synthèse de nos résultats relatifs à l'étude des dynamiques de dépôt et des caractéristiques physiques de ces films minces[22].

Nous démontrons que l'on peut obtenir des couches RTLPCVD aux caractéristiques structurales, électriques et optiques remarquables dans notre four à lampes en maîtrisant avec précision les paramètres de dépôt comme la température, la pression et les ratios de flux des gaz[22].

1.5.5. Croissance de cristaux :

La perfection discrète du cristal unique (monocristal) se situe au cœur de la révolution numérique. L'examen de la croissance cristalline ne se limite pas à une activité technique austère ; il constitue en réalité le lien capital entre les aspects bruts de la nature et les dispositifs électroniques

sophistiqués qui servent l'humanité en établissant des connexions entre différents acteurs. Par le biais du contrôle minutieux de l'arrangement atomique, les chercheurs ont doté la communauté mondiale d'instruments pour la communication, les soins médicaux et l'énergie durable[23].

1. Principes de base des semi-conducteurs :

Pour garantir un déplacement efficace des électrons, il est indispensable que les cristaux semi-conducteurs soient d'une pureté rigoureuse et sans défauts structuraux. Le mode d'opération suit généralement les phases suivantes :

1. **Germination** : Création d'un « germe » solide ou emploi d'un cristal germé (cristal de référence) pour établir la direction de croissance.
2. **Transfert du soluté** : Transport des atomes vers l'interface de croissance par le biais de la diffusion ou de la convection.
3. **Fixation en surface** : L'incorporation d'atomes à des emplacements précis dans le réseau cristallin pour diminuer l'énergie de surface[23].

2. Méthodes principales de l'expansion des semi-conducteurs :

La sélection de la technique de croissance est déterminée par la pureté nécessaire et l'application spécifique du semi-conducteur :

1. **Technique Czochralski (CZ)** : Norme industrielle pour la fabrication du silicium (Si). Elle implique l'extraction d'un cristal germinal à partir de la matière fondue, ce qui permet la fabrication de grands lingots cylindriques de qualité supérieure servant de base aux tranches (wafers) microélectroniques actuelles.
2. **Épitaxie en phase liquide (LPE)** : Fréquemment employée pour les semi-conducteurs à base de composés. Une fine couche est élaborée à partir d'une solution liquide sur un support, garantissant un contrôle optimal de la composition chimique.
3. **Épitaxie en phase vapeur (VPE) et épitaxie par jets moléculaires (MBE)** : Ces techniques offrent un « façonnage atomique », les cristaux se développant couche après couche à partir de la phase gazeuse. Elles sont indispensables pour la production de boîtes quantiques et de transistors ultra-rapides.

4. **Méthode de la zone flottante (Floating Zone - FZ)** : Employée quand une pureté extrême est nécessaire. Elle prévient la contamination due aux creusets en utilisant une zone de fusion mobile[23].

I.5.6. Concentration de porteurs :

1. Concepts de base sur les concentrations d'électrons et de trous :

Dans un semi-conducteur, la détermination fondamentale de la concentration d'électrons (n) et de trous (p) repose sur la Densité d'États ($D(E)$) et la fonction de répartition de Fermi-Dirac ($f(E)$), qui illustre la probabilité qu'un état énergétique soit occupé par un électron. Dans un équilibre thermique, les concentrations de porteurs sont calculées en intégrant le produit de la densité d'états et de la probabilité d'occupation sur les bandes d'énergie concernées[24].

- **Concentration d'électrons (n)** : Elle est définie comme le produit de la densité effective d'états dans la bande de conduction (N_c) et de la probabilité qu'un état à la limite de la bande de conduction (E_c) soit occupé.
- **Concentration en trous (p)** : De façon similaire, c'est le produit de la densité effective des états dans la bande de valence (N_v) et de la probabilité qu'un état ne soit pas occupé par un électron.

2. Le rôle du niveau de Fermi :

Le niveau de Fermi E_F fonctionne comme un paramètre essentiel reliant le potentiel chimique du système aux concentrations porteuses[24].

- **Sensibilité au Doping** : La localisation d' E_F dans le gap énergétique dépend directement de la concentration des porteurs. Par exemple, dans le silicium à 300 K, une concentration d'électrons de 10^{17} cm^{-3} positionne approximativement le niveau de Fermi 146 meV en dessous du bord de la bande de conduction (E_c).
- **Tendances de concentration** : Lorsque E_F se rapproche d' E_c , la concentration des électrons s'accroît ; à l'inverse, lorsqu'il se dirige vers le bord de la bande de valence E_v , la concentration des trous augmente.

3. La concentration intrinsèque de porteurs (n_i) et la loi d'action de masse

Dans la physique des semi-conducteurs, une relation essentielle est que le produit des concentrations d'électrons et de trous (np) reste constant pour un matériau donné à une température spécifique, indépendamment de la concentration du dopant[24].

- **Le produit np** : On l'exprime comme $np = n_i^2$, où n_i désigne la concentration intrinsèque de porteurs.
- **Génération thermique** : Dans les semi-conducteurs intrinsèques (non dopés), les porteurs sont créés en paires par l'excitation thermique, ce qui conduit à $n = p = n_i$.
- **Détails sur les matériaux** : À température ambiante, le nombre intrinsèque est d'environ 10^{10} cm^{-3} pour le silicium (Si) et de 10^7 cm^{-3} pour l'arséniure de gallium (GaAs), en raison de son gap plus élevé.

4. Neutralité de Charge et Théorie Générale :

Dans un système en état stationnaire, le semi-conducteur doit garder une neutralité de charge nette. Cette condition équilibre les densités des porteurs mobiles (électrons et trous) avec celles des dopants ionisés (donneurs N_d^+ et accepteurs N_a^-) :

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

En supposant une ionisation complète, ce qui est habituel pour les dopants superficiels à température ambiante, tous les atomes donneurs et accepteurs contribuent à la concentration des porteurs[24].

I.6 Méthodes de caractérisation des semi-conducteurs

I.6.1. Caractérisation morphologique (MEB) :

L'usage de la Microscopie Électronique à Balayage (MEB) est essentiel en physique et en ingénierie des semi-conducteurs. Son rôle va bien au-delà de la simple imagerie de surface à haute résolution, en permettant une compréhension approfondie des propriétés structurales, électriques et optiques de ces matériaux.

Cette relation est primordiale car la MEB a la capacité d'examiner et de définir les défauts étendus (Extended Defects) dans les semi-conducteurs, y compris les dislocations et les joints de grains (Grain Boundaries). Malgré leur taille réduite, ces défauts jouent un rôle significatif dans

l'optimisation des performances et de l'efficacité des appareils électroniques et des solutions énergétiques, comme les cellules solaires et les capteurs, en altérant la structure de bandes du matériau et en régulant le comportement des porteurs de charge[25].

Pour effectuer cette caractérisation exhaustive, le microscope électronique est utilisé comme une plateforme combinant simultanément trois méthodes expérimentales de pointe :

- **Cathodoluminescence (CL)** : cette technique s'appuie sur l'examen des signaux de lumière produits par l'activation du semi-conducteur par le faisceau d'électrons, facilitant ainsi une analyse spectrale et spatiale des défauts et de leurs attributs optiques.
- **Le Courant Induit par Faisceau d'Électrons (EBIC – Electron Beam Induced Current)** : ce procédé sert à examiner de manière localisée les caractéristiques électriques en analysant les événements de recombinaison entre les électrons et les trous près des imperfections.
- **La Diffraction d'Électrons Rétrodiffusés par Corrélation Croisée (Cross-Correlation Electron Backscatter Diffraction - ccEBSD)** : cet outil permet une détermination quantitative précise des champs de déformation internes (Strain Fields) dans le réseau cristallin du semi-conducteur.

La méthode MEB (microscopie électronique à balayage) influence significativement le développement de la recherche sur les semi-conducteurs, en évoluant d'une approche centrée sur l'analyse des défaillances vers une véritable ingénierie des défauts (Defect Engineering). Cette évolution ouvre de nouvelles perspectives pour l'amélioration de la qualité des matériaux ainsi que pour la conception de dispositifs électroniques et optoélectroniques plus performants et plus fiables.

1.6.2 Caractérisation optique (UV-Visible) :

La spectroscopie UV-Visible (Ultraviolet-Visible Spectroscopy) constitue l'une des principales techniques optiques expérimentales non destructives utilisées pour la caractérisation des semi-conducteurs, en particulier ceux présentant une structure lamellaire, tels que les composés du gallium : GaS, GaSe et GaTe. Cette technique revêt une importance particulière, car elle permet d'établir un lien direct entre la réponse optique du matériau et sa structure électronique, notamment ses bandes d'énergie, grâce à plusieurs aspects fondamentaux[26] :

1- Évaluation de la bande interdite et identification des transitions électroniques (détermination de la bande interdite) :

L'énergie de la bande interdite (E_g) d'un semi-conducteur, c'est-à-dire l'énergie requise pour exciter les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, peut être déterminée avec précision à l'aide de techniques d'absorption et de réflectivité dans le domaine ultraviolet-visible. Par ailleurs, cette méthode permet d'identifier les transitions électroniques à proximité du bord d'absorption (absorption edge). Des études ont montré que ces transitions peuvent être de type direct pour les composés GaSe et GaTe, ou de type indirect pour le composé GaS.

2- Examen et caractérisation des excitons (Exciton Analysis) :

Lorsque les semi-conducteurs interagissent avec des photons incidents dans cette zone spectrale, des pics d'absorption fins apparaissent près du bord de bande en raison de la formation d'excitons, c'est-à-dire des paires électron-trou liées par l'interaction coulombienne. L'analyse des spectres UV-Visible, en particulier lorsqu'elle est associée aux techniques de spectroscopie modulée, permet une détermination très précise de l'énergie de liaison de ces excitons ainsi que de leurs nombres quantiques.

3- Exploration des niveaux d'énergie profonds et des points critiques (Critical Points) :

La spectroscopie UV-Visible englobe bien plus que l'analyse du bord d'absorption. L'exploration des transitions électroniques internes du matériau est également possible grâce à des mesures de réflectivité à des énergies plus élevées (jusqu'à 6 eV). Ces analyses facilitent le repérage des points critiques, aussi connus sous le nom de singularités de Van Hove, qui indiquent une forte densité d'états électroniques dans la structure de bandes du matériau semi-conducteur.

4- Évaluation des constantes physiques et des propriétés diélectriques (Dielectric Properties) :

L'application de transformations mathématiques, telles que les relations de Kramers-Kronig, aux données expérimentales obtenues à partir des spectres UV-Visible permet de déterminer les composantes réelle et imaginaire de la constante diélectrique (ϵ_1 et ϵ_2) en fonction de l'énergie des photons. À partir de ces paramètres, il est possible de calculer l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption, ainsi que la masse effective réduite des porteurs de charge présents dans le matériau.

5- Suivi de l'impact de la structure cristalline et de la constitution atomique :

Les spectres UV-Visible réagissent de manière très sensible aux variations des distances interatomiques et des paramètres du réseau cristallin dans les semi-conducteurs. En général, en examinant des composés similaires, on observe un décalage des pics d'absorption vers des énergies plus faibles (redshift) lorsqu'il y a une augmentation de la taille atomique des éléments, comme c'est le cas lors de la transition du soufre (S) vers le tellure (Te) dans les composés du gallium. Ce phénomène traduit une diminution de la force des liaisons chimiques et une réduction de la bande interdite, soulignant ainsi le lien étroit entre les caractéristiques structurelles et optiques du matériau.

Chapitre II :

Applications des semi-conducteurs

II.1 Applications dans l'industrie pétrochimique :

II.1.1. Les capteurs de pression à effet piézorésistif fabriqués à partir de silicium polycristallin

Le semi-conducteur est utilisé dans la fabrication des capteurs de pression piézorésistifs (Piezoresistive Pressure Sensors), notamment dans les systèmes de contrôle et de mesure employés dans les champs pétroliers (Oil Fields). Ces capteurs permettent de mesurer différents types de pression, tels que la pression absolue, la pression relative et la pression différentielle. Leur principe de fonctionnement repose sur la conversion de la déformation mécanique de la membrane, provoquée par la pression appliquée, en signaux électriques normalisés[27].

1. Type de semi-conducteur utilisé :

On emploie le silicium polycristallin (Polysilicon) comme matériau de base. Ce dispositif est conçu à partir de résistances piézorésistives en polysilicium (Polysilicon Piezoresistors), déposées sur une couche d'oxyde formée au niveau du diaphragme[27].

2. Nature du semi-conducteur :

Les résistances en silicium polycristallin représentent une alternative aux résistances traditionnelles de type p monocristallin.

Elles se distinguent par leur isolation structurelle : elles sont électriquement isolées grâce à une couche d'oxyde de silicium (SiO_2) formée dans la zone de la membrane, plutôt que par une isolation traditionnelle assurée par une jonction p-n[27].

3. Propriétés et avantages :

Le silicium polycristallin, grâce à son isolation par oxyde, possède plusieurs caractéristiques qui le rendent particulièrement adapté aux applications pétrolières et gazières :

- **Isolation à haute température :** contrairement aux capteurs standards, dont le courant de fuite des jonctions p-n augmente de manière exponentielle avec la température, le polysilicium isolé par oxyde conserve d'excellentes performances d'isolation, même au-delà de 300 °C.

- **Résistance aux conditions extrêmes** : ce matériau présente une grande stabilité, lui permettant de fonctionner de manière fiable dans des environnements industriels sévères et à haute température, tels que les champs pétrolifères et les systèmes de contrôle de combustion des turbines à gaz.
- **Réponse piézorésistive linéaire** : la résistance électrique du semi-conducteur varie de manière proportionnelle à la pression appliquée lors de faibles déformations de la membrane, ce qui permet une mesure précise et fiable des signaux électriques générés[27].

II.1.2. Capteurs de gaz

Le principal champ d'application concerne l'identification et la surveillance des gaz libérés au sein des installations pétrolières et des champs gaziers. Ce type d'application permet de détecter des concentrations très faibles de gaz ciblés, afin de protéger les employés et les installations contre les risques d'explosion ou d'intoxication[28].

Les principaux gaz identifiés, directement associés au secteur pétrolier, incluent :

- **Le sulfure d'hydrogène (H_2S)** : un gaz toxique et extrêmement dangereux, présent lors des processus d'extraction et de raffinage du pétrole et du gaz.
- **Le méthane (CH_4)** : principal constituant du gaz naturel, c'est un composé hautement inflammable.
- **L'hydrogène (H_2)** : utilisé et produit lors des processus de raffinage et d'hydrogénation.
- **Le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO_2)** : issus des processus de combustion réalisés dans les installations industrielles {Citation}.

1. Type de semi-conducteurs utilisés et leur nature :

Le type principal correspond aux semi-conducteurs à base d'oxydes métalliques, connus sous l'abréviation MOS (Metal Oxide Semi-conducteurs)[28].

- ❖ **Exemples issus de** : l'oxyde de zinc (ZnO), le dioxyde d'étain (SnO_2), le dioxyde de titane (TiO_2) et l'oxyde de molybdène (MoO_3).

2. Nature structurale et physique :

Ces matériaux sont actuellement en cours de développement sous forme de structures nanométriques (nanostructurées), dont les dimensions varient de 1 à 90 nanomètres[28].

Ils peuvent se présenter sous diverses formes morphologiques :

- **Une dimension (1D) :** nanofils (nanowires), nanotubes et nanobâtonnets (nanorods).
- **Deux dimensions (2D) :** films nanométriques (nanosheets).
- **Trois dimensions (3D) :** interconnexion de structures hiérarchiques ou poreuses.

Ils peuvent être classés en deux modes de fonctionnement selon la température d'opération :

Des oxydes fonctionnant par conductivité de surface (surface conduction) à basse et moyenne température, et des oxydes fonctionnant par conductivité volumique (bulk conduction) à des températures extrêmement élevées, supérieures à 700 °C[28].

3. Propriétés et caractéristiques intrinsèques :

Les semi-conducteurs MOS présente des caractéristiques physico-chimiques exceptionnelles[28], particulièrement adaptées aux environnements pétroliers et gaziers difficiles :

- **Sensibilité extrême :** aptitude à détecter des gaz à des concentrations extrêmement faibles, pouvant atteindre le niveau des parties par milliard (ppb) et même des parties par trillion (ppt), surpassant les capteurs électrochimiques et catalytiques traditionnels.
- **Sélectivité élevée :** capacité à identifier un gaz particulier (tel que H₂S ou CH₄), même en présence d'autres gaz susceptibles d'interférer.
- **Rapport surface/volume élevé (high surface-to-volume ratio) :** en raison de sa structure à l'échelle nanométrique, il présente un grand nombre de sites actifs favorisant les interactions entre le gaz et la surface, ce qui amplifie considérablement la réponse électrique.

- **Stabilité en conditions sévères (High stability in harsh environments) :** capacité à résister aux températures extrêmes et aux conditions rigoureuses observées dans les champs pétroliers et les installations de raffinage.
- **Rapidité de réaction et de rétablissement (Fast response and recovery time) :** aptitude à réagir rapidement en cas de détection de gaz et à retrouver l'état initial une fois ceux-ci disparus, ce qui est crucial pour les systèmes d'alerte.
- **Coût réduit et simplicité de fabrication :** méthodes de fabrication simples et peu coûteuses, facilitant l'utilisation à grande échelle dans les installations industrielles.

II.1.3. Le Système de Nez Électronique :

Dans ce domaine, le semi-conducteur joue un rôle crucial en tant que composant principal des systèmes de nez électronique (Electronic Nose), utilisés pour la détection des gaz et l'identification des composés à base d'hydrocarbures, ainsi que des solvants volatils. Dans le secteur pétrolier et gazier, sa pertinence se traduit principalement par : l'identification des gaz nocifs et dangereux présents sur le lieu de travail, que l'odorat humain ne peut ni détecter ni tolérer en raison de leur toxicité ; ainsi que la reconnaissance des hydrocarbures insaturés, des gaz réducteurs et oxydants liés aux processus de raffinage et d'exploitation du pétrole et du gaz[29].

1. Type de semi-conducteur employé :

Le type de capteur employé se réfère aux capteurs à semi-conducteurs basés sur des oxydes métalliques (Metal Oxide Semiconductor - MOS Sensors), qui sont classifiés en deux grandes catégories en fonction des matériaux utilisés et du processus des réactions chimiques :

Semi-conducteurs de type n (n-type) : produits à partir d'oxydes de zinc, d'étain ou de fer, comme le SnO_2 (dioxyde d'étain) et ZnO , qui est l'oxyde de zinc.

Semi-conducteurs de catégorie p (p-type) : fabriqués à partir d'oxydes de nickel ou de cobalt.

2. Nature du semi-conducteur :

Ces semi-conducteurs sont constitués d'oxydes métalliques présentant des propriétés semi-conductrices, déposés sous forme de couches minces sur un substrat céramique isolant, tel que l'alumine (Al_2O_3). Ces capteurs sont associés à un élément chauffant interne (Heating

Element), car leur fonctionnement nécessite une activation thermique afin de stimuler les réactions chimiques se produisant à leur surface[29].

3. Propriété principale :

Le semi-conducteur possède la propriété de « conductivité électrique réversible » (Reversible Electrical Conductivity / Reversible Electrical Resistance).

➤ Mécanisme de fonctionnement :

- À l'état normal :

Le semi-conducteur adsorbe l'oxygène présent dans l'air ambiant sur sa surface cristalline, ce qui augmente sa résistance électrique et stabilise son état électrique.

- Lors de l'exposition aux gaz cibles :

- Les semi-conducteurs de type n réagissent principalement aux gaz réducteurs tels que le méthane (CH_4), l'hydrogène (H_2), le monoxyde de carbone (CO) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Ces gaz interagissent avec l'oxygène adsorbé à la surface, libérant ainsi des électrons dans la bande de conduction du semi-conducteur. Cela entraîne une diminution de la résistance électrique et une augmentation de la conductivité.
- Les semi-conducteurs de type p sont davantage sensibles aux gaz oxydants tels que l'oxygène (O_2), le dioxyde d'azote (NO_2) et le chlore (Cl_2).

- Mesure et analyse :

La variation de la résistance et de la conductivité est convertie en une tension électrique de sortie (Output Voltage), représentant une signature caractéristique du gaz détecté. Cette signature est ensuite analysée avec précision à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle[29].

II.2. Applications électroniques :

II.2.1 Circuits intégrés (Integrated Circuits) :

Les circuits intégrés constituent l'une des applications les plus importantes des matériaux semi-conducteurs dans le domaine de l'électronique moderne[30]. Grâce aux

propriétés électriques du silicium et d'autres semi-conducteurs, il est possible d'intégrer des millions, voire des milliards de composants électroniques microscopiques, tels que les transistors, les diodes et les résistances, sur une seule puce électronique de très petite dimension[31]. Cette miniaturisation a permis une amélioration considérable des performances des systèmes électroniques tout en réduisant la consommation énergétique, le coût de fabrication et l'encombrement des dispositifs électroniques[32].

Les circuits intégrés sont largement utilisés dans la conception des microprocesseurs et des microcontrôleurs qui assurent le traitement des données et le contrôle des opérations dans les équipements numériques modernes[33]. Les progrès réalisés dans les technologies de fabrication des semi-conducteurs ont favorisé l'augmentation de la vitesse de calcul, de la capacité de stockage et de la fiabilité des systèmes électroniques[30]. En outre, les technologies CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) représentent aujourd'hui la base principale de fabrication des circuits intégrés à haute densité utilisés dans les ordinateurs, les télécommunications et les systèmes embarqués[31].

Le développement des circuits intégrés a également joué un rôle fondamental dans l'évolution des technologies numériques avancées, notamment l'intelligence artificielle, les réseaux de communication et les systèmes électroniques industriels automatisés[32]. Ainsi, les semi-conducteurs constituent le cœur technologique de l'industrie électronique contemporaine[30].

II.2.2 Appareils électroniques modernes :

Les matériaux semi-conducteurs occupent une place essentielle dans le fonctionnement des appareils électroniques modernes tels que les smartphones, les ordinateurs et les dispositifs de l'Internet des objets (IoT)[30]. Les composants semi-conducteurs, notamment les transistors, les capteurs, les mémoires électroniques et les processeurs, assurent le traitement rapide des informations, la communication sans fil ainsi que la gestion intelligente de l'énergie dans ces équipements[31].

Dans les smartphones et les ordinateurs, les semi-conducteurs permettent l'exécution d'opérations complexes à grande vitesse grâce aux processeurs multicœurs et aux circuits intégrés avancés[34]. Ils interviennent également dans les technologies d'affichage, les systèmes de stockage de données, les modules de connectivité sans fil et les capteurs intégrés tels que les capteurs de proximité, de lumière et d'image[31]. L'amélioration continue des performances des semi-conducteurs a contribué à la réduction de la taille des appareils

électroniques tout en augmentant leur capacité fonctionnelle et leur efficacité énergétique[32].

Par ailleurs, l'Internet des objets repose principalement sur les technologies semi-conductrices pour connecter les objets intelligents aux réseaux numériques[33]. Les capteurs électroniques et les microcontrôleurs intégrés dans les systèmes IoT permettent la collecte, le traitement et la transmission des données en temps réel dans divers domaines tels que l'industrie, la santé, les transports et les villes intelligentes. Les avancées récentes dans les semi-conducteurs favorisent ainsi le développement des systèmes intelligents autonomes et des technologies numériques de nouvelle génération[30].

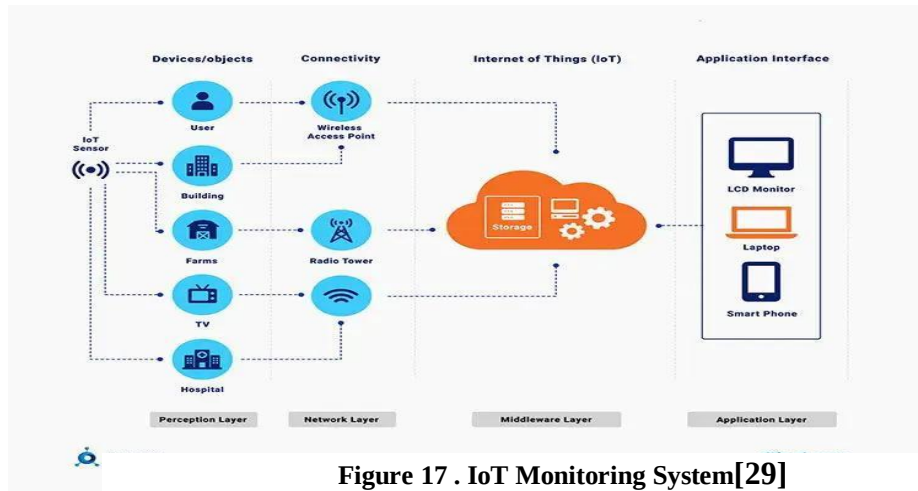


Figure 17 . IoT Monitoring System[29]

II.3. Applications en science des matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs jouent un rôle central dans les avancées technologiques modernes grâce à leurs propriétés électroniques ajustables, leur sensibilité aux conditions externes (température, lumière, champ électrique) et leur capacité à être modifiés à l'échelle atomique. Ces caractéristiques ont permis le développement de nombreuses applications en science des matériaux, notamment dans les matériaux intelligents et l'ingénierie des nanostructures[35].

II.3.1 Développement de matériaux intelligents

Les matériaux intelligents (ou smart materials) sont des systèmes capables de réagir de manière contrôlée à des stimuli externes tels que la température, la pression, la lumière ou les champs électriques. Dans ce contexte, les semi-conducteurs constituent une base essentielle pour la conception de dispositifs intelligents, en particulier grâce à leur capacité à convertir des signaux physiques en signaux électriques exploitables.

Les oxydes semi-conducteurs tels que le ZnO, SnO₂ et TiO₂ sont largement utilisés dans les capteurs de gaz, les dispositifs optoélectroniques et les systèmes de surveillance environnementale. Leur sensibilité de surface élevée permet une interaction efficace avec les molécules chimiques, ce qui les rend adaptés aux applications de détection en temps réel.

Par ailleurs, l'intégration des semi-conducteurs dans les systèmes microélectromécaniques (MEMS) a permis le développement de structures intelligentes capables d'autodiagnostic et d'adaptation dynamique. Ces avancées sont particulièrement importantes dans les secteurs industriels et énergétiques[36].

II.3.2 Amélioration des propriétés des matériaux : alliages et nanostructures

L'ingénierie des matériaux semi-conducteurs repose fortement sur l'optimisation de leurs propriétés électriques, optiques et mécaniques par l'utilisation d'alliages et de nanostructures.

Les alliages semi-conducteurs tels que SiGe, GaAs et AlGaIn permettent d'ajuster la bande interdite (band gap engineering), améliorant ainsi les performances des dispositifs électroniques et optoélectroniques. Cette flexibilité est essentielle dans la fabrication de transistors à haute mobilité, de diodes laser et de cellules photovoltaïques à haut rendement[35].

D'autre part, la nanostructuration des matériaux (nanofils, boîtes quantiques, couches minces) permet de modifier les propriétés électroniques en raison des effets de confinement quantique. À l'échelle nanométrique, les phénomènes physiques diffèrent significativement du matériau massif, ce qui améliore la sensibilité des capteurs et l'efficacité des dispositifs électroniques.

Ces approches sont largement étudiées dans la littérature scientifique récente, notamment dans le cadre du développement des technologies de nouvelle génération comme la nanoélectronique et les dispositifs flexibles[37].

II.4 Applications dans les énergies renouvelables semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs occupent une place essentielle dans l'évolution des technologies liées aux énergies renouvelables. Leurs propriétés électroniques spécifiques, telles que la largeur de la bande interdite, le dopage et la mobilité des porteurs de charge, leur confèrent la capacité d'assurer une conversion efficace de l'énergie ainsi qu'un contrôle

précis des systèmes électriques. Dans le domaine des installations énergétiques modernes, ils sont largement utilisés pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique et pour optimiser la gestion des flux énergétiques au sein des systèmes de production et de distribution d'électricité[38].



Figure 18 . Diverses configurations de systèmes photoélectrochimiques (PEC) et photovoltaïques (PV) utilisant des semi-conducteurs III-V pour l'énergie verte [33].

II.4.1 Cellules solaires (photovoltaïques) :

Les cellules photovoltaïques sont principalement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium cristallin, qu'il soit monocristallin ou polycristallin, ainsi que le tellure de cadmium (CdTe) et certains composés de type III-V. Leur fonctionnement repose sur le phénomène de l'effet photovoltaïque, qui permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Lorsqu'un rayonnement lumineux atteint la cellule avec une énergie suffisante, les photons transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la bande de valence, provoquant leur passage vers la bande de conduction. Ce processus engendre la formation de paires électron-trou responsables de la circulation du courant électrique[39].

Parmi les différents matériaux utilisés, le silicium demeure le plus exploité dans l'industrie photovoltaïque grâce à sa grande stabilité chimique, sa disponibilité abondante dans la nature ainsi que ses performances énergétiques satisfaisantes. Les recherches actuelles dans ce domaine visent principalement à améliorer le rendement des cellules solaires à travers le développement de nouvelles architectures, notamment les cellules tandem, les technologies PERC et les matériaux à base de pérovskite[40].

D'après les travaux du National Renewable Energy Laboratory (NREL), les technologies photovoltaïques récentes connaissent une amélioration continue de leur efficacité énergétique, accompagnée d'une réduction progressive des coûts de fabrication. Ces avancées contribuent fortement à l'expansion des systèmes photovoltaïques dans le cadre des stratégies mondiales de transition vers des sources d'énergie durables.



Figure 19 . Dispositif de caractérisation des semi-conducteurs et cartes d'interface[35].

II.4.2 Conversion d'énergie :

Les semi-conducteurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes modernes de conversion et de gestion de l'énergie électrique, notamment dans le domaine des énergies renouvelables et de l'électronique de puissance. Leur importance réside dans leur capacité à contrôler efficacement le passage du courant électrique grâce à des composants électroniques tels que les diodes, les transistors MOSFET, les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et les thyristors [41]. Ces dispositifs sont intégrés dans les convertisseurs statiques de puissance, notamment les redresseurs, les onduleurs et les convertisseurs DC-DC, qui assurent

l'adaptation de l'énergie électrique selon les besoins des systèmes énergétiques modernes.

Dans les installations photovoltaïques, les panneaux solaires produisent un courant continu (DC) qui doit être converti en courant alternatif (AC) afin d'être compatible avec le réseau électrique ou avec les équipements domestiques et industriels. Cette opération est réalisée par des onduleurs électroniques utilisant des composants semi-conducteurs de puissance à haute efficacité. De même, dans les systèmes éoliens, les générateurs produisent une tension variable dépendante de la vitesse du vent ; des convertisseurs électroniques sont alors nécessaires pour stabiliser la fréquence et la tension du courant délivré [41].

Les progrès récents dans les matériaux semi-conducteurs ont permis le développement de composants plus performants basés sur le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), en complément du silicium traditionnel (Si). Ces matériaux, dits « semi-conducteurs à large bande interdite », présentent plusieurs avantages, notamment une meilleure conductivité thermique, une résistance élevée aux hautes températures et une capacité de fonctionnement à haute fréquence. Par conséquent, ils permettent de réduire les pertes par effet Joule, d'améliorer le rendement des convertisseurs et de diminuer la taille des systèmes de refroidissement, ce qui augmente la fiabilité globale des équipements électriques.[42]

Par ailleurs, les systèmes modernes de conversion d'énergie intègrent des techniques de contrôle intelligentes afin d'optimiser l'exploitation des sources renouvelables. Parmi ces techniques, le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking – MPPT) constitue une méthode fondamentale permettant d'extraire en permanence la puissance maximale disponible des panneaux photovoltaïques malgré les variations d'ensoleillement et de température. Les onduleurs intelligents participent également à la stabilité des réseaux électriques en assurant la régulation de la tension, la synchronisation avec le réseau et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique[43].

Ainsi, les semi-conducteurs représentent aujourd'hui un élément clé de la transition énergétique et du développement des réseaux électriques intelligents (Smart Grids), grâce à leur contribution à l'amélioration de l'efficacité énergétique, à l'intégration des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

II.5 De la théorie à l'application pour semi-conducteurs :

II.5.1 Liaison des concepts théoriques aux applications réelles :

Les semi-conducteurs constituent la base fondamentale de l'électronique moderne grâce à leurs propriétés électriques intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Leur comportement est expliqué par la théorie des bandes d'énergie, issue de la mécanique quantique, selon laquelle les électrons occupent des niveaux énergétiques organisés en bande de valence et bande de conduction séparées par une bande interdite appelée band gap. Chez les matériaux semi-conducteurs comme le silicium et le germanium, cette bande interdite possède une valeur modérée permettant aux électrons de passer vers la bande de conduction sous l'effet de l'énergie thermique, lumineuse ou électrique[44].

Le contrôle des propriétés électriques des semi-conducteurs est réalisé par le phénomène de dopage, qui consiste à introduire des impuretés spécifiques dans le cristal semi-conducteur. L'ajout d'atomes pentavalents tels que le phosphore produit un semi-conducteur de type N riche en électrons libres, tandis que l'ajout d'atomes trivalents comme le bore génère un semi-conducteur de type P caractérisé par la présence de trous. Cette modification contrôlée de la concentration des porteurs de charge permet d'adapter les propriétés électriques du matériau selon les besoins technologiques[31].

Lorsque deux régions dopées P et N sont mises en contact, une jonction PN se forme. Cette jonction crée une zone de déplétion accompagnée d'un champ électrique interne qui contrôle le déplacement des charges électriques. Le comportement asymétrique de cette jonction vis-à-vis du courant électrique constitue le principe de fonctionnement des diodes semi-conductrices. De manière plus avancée, l'association de plusieurs jonctions permet la fabrication des transistors bipolaires et des transistors MOSFET utilisés dans les circuits intégrés et l'électronique numérique[17].

Les propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs jouent également un rôle essentiel dans les technologies modernes. Sous l'effet de l'absorption des photons, les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour traverser la bande interdite et générer des paires électron-trou. Ce phénomène constitue le principe physique des cellules photovoltaïques capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Inversement, dans les diodes électroluminescentes (LED), la recombinaison des électrons et des trous entraîne l'émission de photons sous forme de lumière[42].

Par ailleurs, les semi-conducteurs de puissance tels que les MOSFET et les IGBT

permettent la conversion et le contrôle de l'énergie électrique dans les systèmes industriels modernes. Grâce à leurs faibles pertes énergétiques et à leur rapidité de commutation, ces dispositifs sont largement utilisés dans les convertisseurs, les onduleurs, les alimentations à découpage et les véhicules électriques[45].

II.5.2 Exemples appliqués :

1. Les dispositifs photovoltaïques et les cellules solaires :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques constitue l'une des applications les plus représentatives des semi-conducteurs. Cette technologie repose sur l'utilisation de semi-conducteurs dopés de type p et de type n , formant une jonction $p-n$ qui crée un champ électrique interne. Ce dernier permet de séparer les électrons et les trous générés par l'absorption des photons lumineux, puis de les diriger vers les électrodes afin de produire un courant électrique exploitable[46].

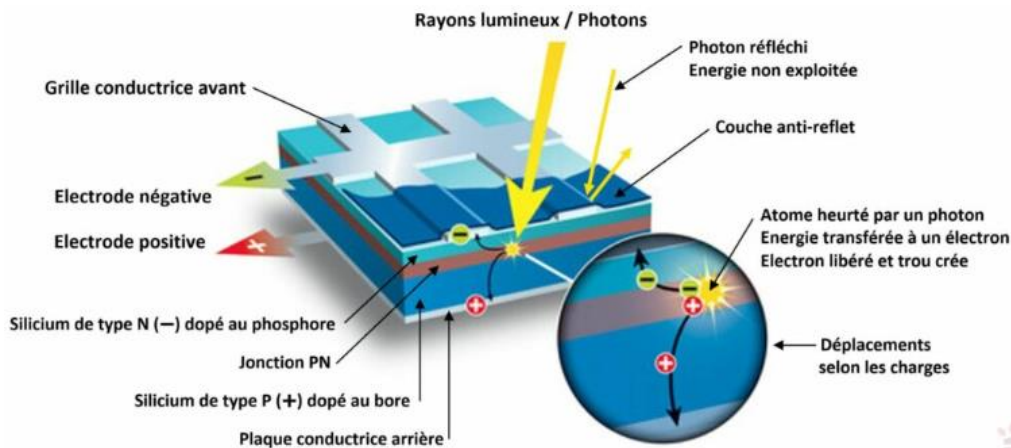


Figure 20 . Schéma d'une cellule photovoltaïques cristalline[41].

2. Diodes :

L'utilisation des jonctions $p-n$, réalisées à partir de matériaux semi-conducteurs et intégrées sous forme de diodes dans les systèmes électroniques et électriques, est très répandue. Leur rôle principal consiste à permettre la circulation du courant électrique dans un seul sens tout en le bloquant dans le sens opposé. Cette propriété est exploitée pour protéger les panneaux contre les courants inverses susceptibles de les endommager et pour assurer la stabilité ainsi que la fiabilité des circuits électriques[47].

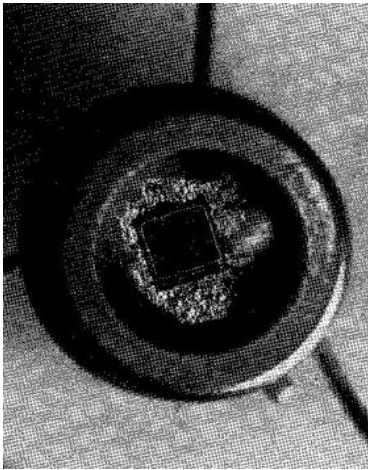


Figure 22 . Single planar diode[42].

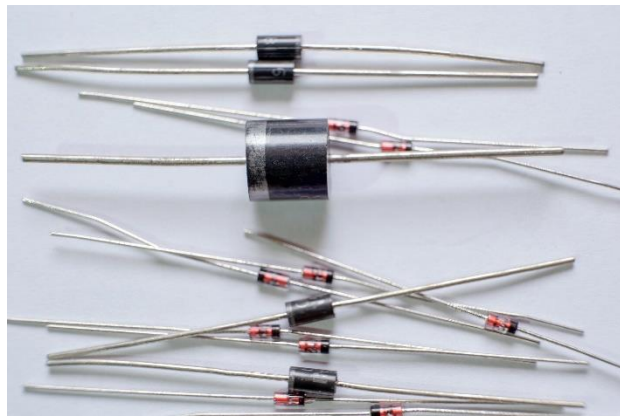


Figure 21 . Diodes

3. Diodes électroluminescentes (LEDs – Light Emitting Diodes) :

Les diodes électroluminescentes (LEDs) représentent l'une des applications directes des semi-conducteurs dans les technologies modernes d'éclairage à l'état solide (Solid-State Lighting). Elles fonctionnent selon un principe inverse de celui des cellules photovoltaïques : lorsqu'un courant électrique traverse le matériau semi-conducteur, les électrons se recombinent avec les trous, entraînant l'émission d'énergie sous forme de lumière. Cette technologie se distingue par sa grande efficacité énergétique et sa faible consommation d'énergie par rapport aux systèmes d'éclairage traditionnels[48].

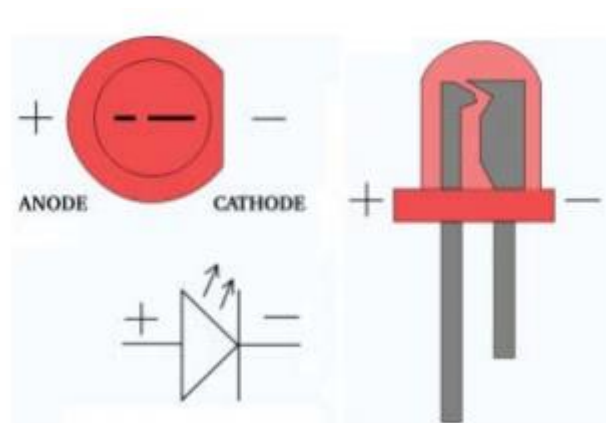


Figure 23 . Schéma d'une LED[43].

II.6. Étude statistique de l'évolution des semi-conducteurs au cours des dix dernières années :

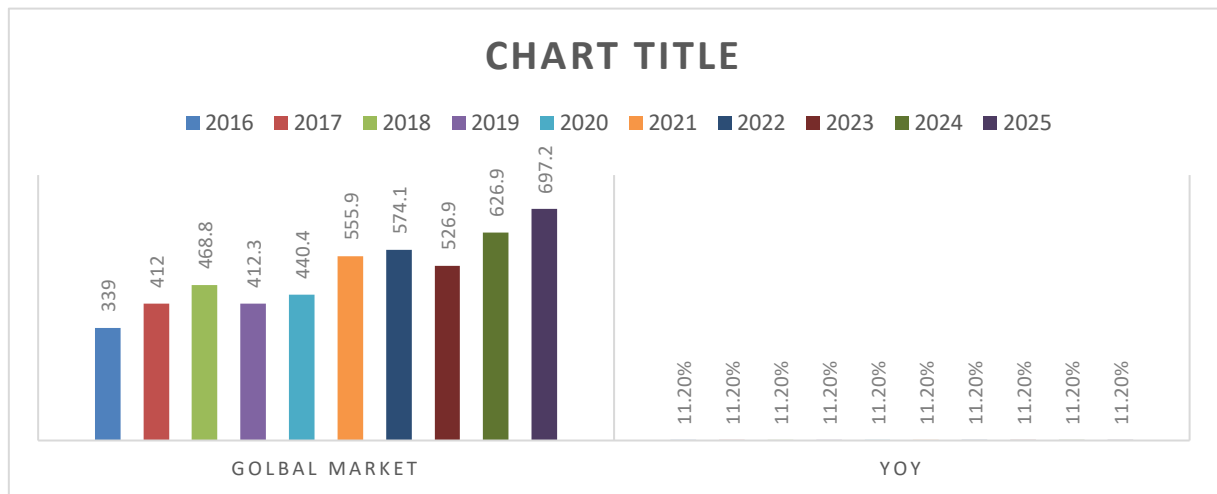


Figure 24 . Taille du marché mondial des semi-conducteurs[44]

Ce graphique représente l'évolution de la taille du marché mondial des semi-conducteurs (Global Semiconductor Market) sur la période 2016–2025. Les barres bleues indiquent la valeur du marché en milliards de dollars américains, tandis que la courbe rouge représente le taux de croissance annuel (% YoY)[49].

Analyse de la courbe :

- **2016** : La valeur du marché s'est élevée à 339 milliards de dollars, avec une légère baisse de 0,3 %.
- **2017** : Le marché a progressé jusqu'à 412 milliards de dollars, enregistrant une forte croissance de 21,6 % en raison de l'augmentation de la demande en semi-conducteurs.
- **2018** : La croissance s'est poursuivie pour atteindre 468,8 milliards de dollars, avec un taux de 13,7 %.
- **2019** : Le marché a connu une baisse à 412,3 milliards de dollars, enregistrant un recul marqué de -12,1 % en raison du ralentissement de la demande mondiale et des tensions commerciales.
- **2020** : Le marché est revenu à la croissance, atteignant 440,4 milliards de dollars, soit une augmentation de 6,8 %, malgré le contexte de la pandémie de

COVID-19.

- **2021** : Le secteur a enregistré une forte hausse pour atteindre 555,9 milliards de dollars, avec un taux de croissance de 26,2 %, le plus élevé de la période étudiée, en raison de la forte demande en appareils électroniques et en centres de données.
- **2022** : La croissance s'est poursuivie mais à un rythme plus lent, atteignant 574,1 milliards de dollars, soit 3,3 %.
- **2023** : Le marché a reculé à 526,9 milliards de dollars, avec une baisse de 8,2 % due à la diminution de la demande en ordinateurs et smartphones ainsi qu'à la correction des stocks.
- **2024 (estimé)** : Le marché devrait augmenter à 626,9 milliards de dollars, avec une croissance de 19 %, portée par le développement de l'intelligence artificielle et du cloud computing.
- **2025 (prévisions)** : Le marché devrait atteindre 697,2 milliards de dollars, poursuivant sa croissance avec un taux estimé de 11,2 %.

Conclusion :

Le graphique montre que le marché des semi-conducteurs est caractérisé par des cycles de croissance et de recul liés aux conditions économiques mondiales et aux avancées technologiques. Malgré les baisses enregistrées en 2019 et 2023, la tendance générale du marché au cours de la dernière décennie est clairement ascendante, la valeur passant de 339 milliards de dollars en 2016 à environ 697 milliards de dollars prévus en 2025, soit presque un doublement. Cela confirme l'importance stratégique croissante de l'industrie des semi-conducteurs dans l'économie numérique mondiale.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'étude a montré que les propriétés électroniques uniques des semi-conducteurs, notamment l'existence d'une bande interdite entre la bande de valence et la bande de conduction, confèrent à ces matériaux la capacité de contrôler avec précision le transport des charges électriques. Il a également été constaté que le dopage constitue l'un des moyens les plus importants pour modifier les propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs et obtenir des semi-conducteurs de type N et de type P, ce qui représente la base de la fabrication des jonctions, des transistors et des circuits intégrés.

La revue a également mis en évidence la diversité des matériaux semi-conducteurs, comprenant les semi-conducteurs inorganiques, organiques et composés, chaque catégorie possédant des caractéristiques adaptées à des applications spécifiques. Les semi-conducteurs inorganiques, en particulier le silicium, se sont imposés comme le choix principal dans les industries électroniques, tandis que les semi-conducteurs organiques ont ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de l'électronique flexible. Les semi-conducteurs composés, quant à eux, offrent des performances supérieures dans les applications optoélectroniques et électroniques à haute fréquence.

À la lumière de ces résultats, il est possible d'affirmer que le développement continu des sciences et des technologies des semi-conducteurs demeurera un facteur essentiel pour soutenir la transformation numérique, la transition énergétique et le développement industriel durable. La poursuite de la recherche scientifique dans ce domaine contribuera également à la mise au point de matériaux et de dispositifs plus performants et moins énergivores, répondant ainsi aux exigences futures et aux défis technologiques croissants. En bref, les principaux points que l'on peut noter d'après cette étude bibliographique se résument en le suivant :

- Les semi-conducteurs possèdent des propriétés électriques intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants, ce qui permet un contrôle précis de leur comportement électrique.
- Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé grâce à l'abondance de ses ressources, à sa stabilité et à son efficacité technologique.
- Le dopage permet de modifier la structure électronique du matériau et d'obtenir des semi-conducteurs de type **N** et de type **P**, indispensables à la fabrication des composants électroniques.

- Les propriétés et les applications des semi-conducteurs organiques, inorganiques et composés varient selon leur structure électronique et cristalline.
- La jonction PN constitue la base physique du fonctionnement des diodes, des transistors et des cellules photovoltaïques.
- Les semi-conducteurs jouent un rôle majeur dans la fabrication des circuits intégrés, des dispositifs électroniques modernes et des systèmes de communication.
- Les capteurs à base de semi-conducteurs contribuent à améliorer la sécurité et l'efficacité opérationnelle dans l'industrie pétrochimique.
- Les cellules solaires et les dispositifs de conversion d'énergie figurent parmi les applications les plus importantes des semi-conducteurs dans le domaine des énergies renouvelables.
- Les matériaux avancés tels que le **SiC** (carbure de silicium) et le **GaN** (nitrure de gallium) offrent de meilleures performances dans les applications d'électronique de puissance grâce à leur résistance élevée aux fortes tensions et aux températures élevées.
- Les progrès de la technologie des semi-conducteurs constituent l'un des piliers fondamentaux du développement des systèmes intelligents, des industries du futur et de la durabilité énergétique.

Références

Références :

- [1] S. M. Sze et K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 1^{re} éd. Wiley, 2006. doi: 10.1002/0470068329.
- [2] P. Y. Yu et M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. in Graduate Texts in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-00710-1.
- [3] S. Liu et J. Wang, « Ultra-violet emission from one dimensional and micro-sized SiC obtained via microwave heating », *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 72, p. 60-66, déc. 2017, doi: 10.1016/j.mssp.2017.09.022.
- [4] M. Surdin, « Une théorie des fluctuations électriques dans les semi-conducteurs », *J. Phys. Radium*, vol. 12, n° 8, p. 777-783, oct. 1951, doi: 10.1051/jphysrad:01951001208077700.
- [5] Masson. P. Chovet.A, *PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS*. 2004.
- [6] A. Geravand, « Modulateurs photoniques sur silicium ultra-compacts pour l'optique cohérente », 2026, Consulté le: 27 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://hdl.handle.net/20.500.11794/178825>
- [7] « Matériaux semi-conducteurs et hétérojonction AlGaAs/GaAs », p. 1-30.
- [8] P. Durand, « Synthèse de semi-conducteurs organiques pour des applications en thermoélectricité », Theses, Université de Strasbourg, 2021. Consulté le: 28 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04416384>
- [9] J. Castonguay et A. Théorêt, « Propriétés électriques de minces films de polymères formés dans une décharge r.f. à partir de monomères organiques semi-conducteurs », *Thin Solid Films*, vol. 69, n° 1, p. 85-97, juin 1980, doi: 10.1016/0040-6090(80)90206-0.
- [10] « Semiconductor Physics & Devices Textbook », studylib.net.
- [11] M. Grundmann, *The physics of semiconductors: an introduction including nanophysics and applications*, Fourth edition. in Graduate texts in physics. Cham, Switzerland: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-51569-0.
- [12] Y. Zhao, « The bottleneck and innovation key of MEMS-based metal oxide semiconductors gas sensor for petrochemical industry », *Chem. Eng. J.*, vol. 489, p. 151431, juin 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.151431.
- [13] M. V. Nikolic, V. Milovanovic, Z. Z. Vasiljevic, et Z. Stamenkovic, « Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application », *Sensors*, vol. 20, n° 22, p. 6694, janv. 2020, doi: 10.3390/s20226694.
- [14] C. P. C. V. Bernardo, R. A. M. Lameirinhas, J. P. De Melo Cunha, et J. P. N. Torres,

- « A revision of the semiconductor theory from history to applications », *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, n° 6, p. 316, juin 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06001-1.
- [15] P. O'Brien et N. L. Pickett, « Coordination Complexes as Precursors for Semiconductor Films and Nanoparticles », in *Comprehensive Coordination Chemistry II*, Elsevier, 2003, p. 1005-1063. doi: 10.1016/B0-08-043748-6/09005-8.
- [16] K. Y. Cheng, *III–V Compound Semiconductors and Devices: An Introduction to Fundamentals*. in Graduate Texts in Physics. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-51903-2.
- [17] P. Y. Yu et M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*, Third, Revised and Enlarged Edition. in Graduate Texts in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. doi: 10.1007/b137661.
- [18] I. Bulut, « Synthèse et caractérisation de matériaux semi-conducteurs pour la conversion photovoltaïque ».
- [19] Aljaberi, Emad, « Energy Bandgap Theory ». Physics Department, College of Science.
- [20] W. Luo, « Diffusion Process Strategies for Semiconductor Devices », p. 614-620, 2026.
- [21] J. Morin, « Etude de fils semi-conducteurs dopés individuels par techniques locales d'analyse de surface », Doctoral Thesis, Université de Grenoble, 2013.
- [22] B. Semmache, S. Kallel, et H. E. Omari, « Dépôt chimique en phase vapeur et à basse pression de couches minces à base de silicium dans un réacteur à lampes halogène », *Can. J. Phys.*, vol. 77, p. 737-743.
- [23] T. Nishinaga, Éd., *Handbook of crystal growth*, Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [24] 3G E-Learning LLC, *Concepts of Semi-Conductors*. New York, United States of America: Bibliotex Digital Library, 2023.
- [25] E. Hieckmann *et al.*, « Comprehensive Characterization of Extended Defects in Semiconductor Materials by a Scanning Electron Microscope », *J. Vis. Exp.*, n° 111, p. 53872, mai 2016, doi: 10.3791/53872.
- [26] U. Giorgianni, G. Mondio, P. Perillo, G. Saitta, et G. Vermiglio, « Infrared and UV-visible spectra of layer semiconductors Gas, GaSe and GaTe », *J. Phys.*, vol. 38, n° 10, p. 1293-1299, oct. 1977, doi: 10.1051/jphys:0197700380100129300.
- [27] G. Korotcenkov et B. Cho, « MEMS-Based Pressure Sensors », in *Porous Silicon: Opto- and Microelectronic Applications*, CRC Press / Taylor & Francis Group, 2015.
- [28] N. Goel, K. Kunal, A. Kushwaha, et M. Kumar, « Metal oxide semiconductors for gas sensing », *Eng. Rep.*, vol. 5, n° 6, p. e12604, juin 2023, doi: 10.1002/eng2.12604.

- [29] J. Tan et J. Xu, « Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review », *Artif. Intell. Agric.*, vol. 4, p. 104-115, 2020, doi: 10.1016/j.aiia.2020.06.003.
- [30] S. M. Sze, M.-K. Lee, et M.-K. Lee, *Semiconductor devices: physics and technology*, 3. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2012.
- [31] S. M. Sze, K. K. Ng, et Y. Li, *Physics of semiconductor devices*, Fourth edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021.
- [32] J. S. Chang, A. F. Facchetti, et R. Reuss, « A Circuits and Systems Perspective of Organic/Printed Electronics: Review, Challenges, and Contemporary and Emerging Design Approaches », *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 7, n° 1, p. 7-26, mars 2017, doi: 10.1109/JETCAS.2017.2673863.
- [33] D. Serpanos et M. Wolf, *Internet-of-Things (IoT) Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-69715-4.
- [34] D. Horelova, « Enhance Your Company with IoT Monitoring System ». Consulté le: 23 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.eliftech.com/insights/leveraging-iot-monitoring-system-for-your-company/>
- [35] K. S. Novoselov *et al.*, « Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films », *Science*, vol. 306, n° 5696, p. 666-669, oct. 2004, doi: 10.1126/science.1102896.
- [36] J. A. Rogers, T. Someya, et Y. Huang, « Materials and Mechanics for Stretchable Electronics », *Science*, vol. 327, n° 5973, p. 1603-1607, mars 2010, doi: 10.1126/science.1182383.
- [37] « Nature Materials », *Nature*. Consulté le: 23 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nature.com/nmat/>
- [38] B. Chandran *et al.*, « Solar-Driven Sustainability: III–V Semiconductor for Green Energy Production Technologies », *Nano-Micro Lett.*, vol. 16, n° 1, p. 244, juill. 2024, doi: 10.1007/s40820-024-01412-6.
- [39] C.-S. Jiang *et al.*, « Carrier separation and transport in perovskite solar cells studied by nanometre-scale profiling of electrical potential », *Nat. Commun.*, vol. 6, n° 1, p. 8397, sept. 2015, doi: 10.1038/ncomms9397.
- [40] Z. Ouyang, M. Yang, J. Whitaker, D. Li, et M. F. A. M. van Hest, « Toward Scalable Perovskite Solar Modules Using Blade Coating and Rapid Thermal Processing », *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 3, n° 4, p. 3714-3720, 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c00180.
- [41] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications*. Pearson, 2013.
- [42] D. S. G. Kadwane, *Power Electronics (Circuits, Devices and Application)*. Academic Guru Publishing House, 2024.

- [43] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás, et J. Rebollo, « A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, n° 5, p. 2155-2163, mai 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2268900.
- [44] D. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices: basic principles*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012.
- [45] H. M., G. N., et A. S. F., « Comportement elasto - électrique des Semi-conducteurs Binaires (IV. VI), (III.VI) et(II.VI) », *Commun. Sci. Technol.*, vol. 1, n° 1, p. 101-106, juin 2002.
- [46] A. Carré, « Au cœur de la cellule solaire pour comprendre l'effet photovoltaïque : dopage du silicium cristallin, production d'électricité ». Consulté le: 1 juin 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://acsolue-energie.fr/2021/08/01/au-coeur-de-la-cellule-solaire-pour-comprendre-leffet-photovoltaique-dopage-du-silicium-cristallin-production-deelectricite/>
- [47] Noble, Peter J. W., « Self-Scanned Silicon Image Detector Arrays », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-15, n° 4, p. 202-209, avr. 1968.
- [48] Redjel, Ilyas, « Etude sur les diodes électroluminescentes », Mémoire de Master, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, Algérie, 2012. [En ligne]. Disponible sur: www.enp.edu.dz
- [49] Synnex Technology International Corporation, « 2024 Annual Report: Synnex Technology International Corporation », Synnex Technology International Corporation, Taipei, Taiwan, Annual Report 2347 / SYXZF, mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.synnex.com.tw>

ملخص :

تُرَكِّز الدراسة في شَقِّها النظري على تصنيف هذه المواد إلى ثلاثة أقسام رئيسية : **أشباه الموصلات العضوية** التي تعتمد على الكربون والأنظمة المترافقة لتوفر مرونة ميكانيكية عالية ، و **أشباه الموصلات غير العضوية** مثل السيليكون والجرمانيوم التي تتميز ببنية بلورية منتظمة واستقرار حراري وكيميائي فائق يجعلها العمود الفقري للإلكترونيات التقليدية ، و **أشباه الموصلات المركبة** الناتجة عن دمج عناصر من مجموعات مختلفة في الجدول الدوري (مثل عناصر المجموعتين III-V) والتي تتيح إمكانية "هندسة الفجوة الطاقية" لرفع كفاءة الأجهزة الضوئية وسرعة استجابتها . كما يستعرض البحث العمليات الأساسية المطبقة على هذه المواد مثل **الدوباج** (التطعيم) بنوعيه (n و p) للتحكم الدقيق في موصليتها الكهربائية . وفي الشق التطبيقي، تُبرز المذكرة كيف تتحول هذه المفاهيم الفيزيائية إلى حلول تكنولوجية ملموسة؛ لاسيما في قطاع **الصناعة البتروكيمياوية** عبر تطوير كواشف الغاز الذكية، وأنظمة الأنف الإلكتروني لحماية المنشآت من التسريبات ، بالإضافة إلى دورها الحاسم في **الطاقة المتجددة** من خلال تحسين أداء الخلايا الفولطاضوئية والتحويل الطافي . وتختتم الدراسة بتقديم إحصائيات حول التطور الهيكلي لأشباه الموصلات بين عامي 2016 و2026، مؤكدة أنها المحرك الأساسي للحضارة الرقمية الحديثة وسيرورتها التكنولوجية .

الكلمات المفتاحية: أشباه الموصلات، السيليكون، الدوباج، البتروكيمياوية، غير العضوية، العضوية، المركبة.

Abstract :

The study, in its theoretical part, focuses on classifying these materials into three main categories: organic semiconductors, which are based on carbon and conjugated systems and provide high mechanical flexibility; inorganic semiconductors such as silicon and germanium, which are characterized by an ordered crystalline structure and exceptional thermal and chemical stability, making them the backbone of conventional electronics; and compound semiconductors resulting from the combination of elements from different groups of the periodic table (such as group III–V elements), which enable “band-gap engineering” to enhance the efficiency and response speed of optoelectronic devices.

The research also reviews the fundamental processes applied to these materials, such as doping (n-type and p-type), which allows precise control of their electrical conductivity. On the applied side, the thesis highlights how these physical concepts are transformed into concrete technological solutions, particularly in the petrochemical industry through the development of smart gas sensors and electronic nose systems for protecting industrial facilities from leaks. It also emphasizes their crucial role in renewable energy by improving the performance of photovoltaic cells and energy conversion systems.

The study concludes by presenting statistics on the structural evolution of semiconductors between 2016 and 2026, confirming that they are the fundamental driving force behind modern digital civilization and its technological development.

Keywords: semiconductors, silicon, doping, petrochemistry, inorganic, organic, compound.