

De l'atome aux transistors

Alix Renaud

Volume 24, numéro 3, septembre 1979

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/003936ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/003936ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0026-0452 (imprimé)

1492-1421 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Renaud, A. (1979). De l'atome aux transistors. *Meta*, 24(3), 361–370.
<https://doi.org/10.7202/003936ar>

DE L'ATOME AUX TRANSISTORS

Quand, en 1948, dans les laboratoires de la Compagnie Bell, les savants américains John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley mirent au point le transistor, ils ne se doutaient pas qu'une véritable révolution était dès lors amorcée. En effet, l'invention semblait se comporter, dans les circuits électroniques, comme une simple RÉSISTANCE DE TRANSFERT (*transfer resistor*) ; bien vite, cependant, elle devait se poser en concurrent (combien redoutable !) du tube à vide.

Du jour au lendemain, la « triode à cristal », comme on l'appelle parfois, imposa une transformation radicale de la technologie, dans le même temps qu'elle conférait à l'électronique ses titres de noblesse, lui ouvrant toutes les portes... La miniaturisation, la microélectronique étaient nées : c'était soudain la course aux appareils de plus en plus petits, de plus en plus complexes et légers, du récepteur radio de poche aux circuits réalisés par INTÉGRATION À GRANDE ÉCHELLE (*large-scale integration*), en passant par les CIRCUITS SOLIDES (*solid circuits*) et la multitude des gadgets.

Cette « révolution », somme toute, tient quelque peu du paradoxe : au regard des montages à lampes, les circuits transistorisés restent simples ; et pourtant, les « triodes à cristal » sont le siège de phénomènes fort complexes, que nous essayons justement d'analyser dans les lignes qui suivent. Les principes une fois compris, nous nous permettrons un survol de l'utilisation pratique.

18. M. Cossette, *op. cit.*, p. 6.

19. *Ibid.*

Structure de la matière (rappel)

Particule élémentaire du CORPS SIMPLE ou ÉLÉMENT (*chemical element ; element*), l'atome a souvent évoqué un système solaire en miniature. Autour du noyau, qui serait le Soleil, gravitent, à l'instar des planètes, les électrons répartis sur des NIVEAUX ou COUCHES (*levels*) différents qu'identifient des lettres de l'alphabet (de K à Q). Ainsi, l'atome de chlore comporte 17 électrons distribués sur trois plans : 2 sur la couche K, 8 sur L et 7 sur M. L'atome le plus simple, celui de l'hydrogène, ne comporte qu'une COUCHE ou NIVEAU D'ÉNERGIE (*energy level*) sur laquelle gravite un seul électron.

Chaque couche porte aussi un numéro, appelé NOMBRE QUANTIQUE (*quantum number*) : K = 1, L = 2, M = 3, etc. La distance du noyau à la première couche (K) mesure 5 milliardièmes de centimètre (5×10^{-9} cm) et elle sert de référence pour le calcul des autres rayons. Sachant que le rayon d'une couche est égal au carré de son nombre quantique, on en déduira qu'une couche N, par exemple, a un rayon 16 fois plus grand que celui de K.

Par ailleurs, à chaque niveau, et quel que soit l'atome considéré, le nombre de places est limité. Ainsi, la couche K ne comportera jamais plus de 2 électrons ; L, jamais plus de 8, M, jamais plus de 18... (c'est chaque fois le double du carré de leur nombre quantique). À ce train-là, c'est-à-dire en considérant les sept orbites, on en arrive à imaginer un atome lesté de 280 électrons ! Dans la pratique, cependant, seules les quatre premières couches peuvent être saturées. Quant aux trois autres niveaux, O, P et Q, ils ne comportent jamais plus de 18, 32 et 10 électrons, respectivement. Le nombre total des électrons d'un atome donné s'appelle NOMBRE ou NUMÉRO ATOMIQUE (*atomic number*). Par exemple, le nombre atomique du radium est 88.

Chaque électron étant animé d'une énergie proportionnelle à son rang (nombre quantique de la couche à laquelle il appartient), la cohésion du système est assurée par des champs électriques, magnétiques et gravitationnels, dont l'action conjuguée s'oppose à celle de la force centrifuge.

Ionisation et nombre de valence

À l'état normal, l'atome est électriquement neutre, son noyau contenant autant de protons (particules positives) qu'il y a d'électrons (particules négatives) autour de lui. Cependant, pour diverses raisons, il arrive que l'atome perde ou capture un ou plusieurs électrons d'un atome voisin et devienne, selon le cas, positif ou négatif. Ce phénomène, connu sous le nom d'ionisation, a généralement lieu aux niveaux les plus éloignés du noyau, et l'atome ainsi chargé s'appelle un ion. En l'occurrence, seule la dernière couche (COUCHE DE VALENCE : *valence shell*) nous intéresse : le nombre de ses électrons (dits ÉLECTRONS DE VALENCE : *valence electrons*) détermine le NOMBRE DE VALENCE (*valence number*) de l'atome considéré. Cette dernière notion peut être définie comme le nombre d'électrons que la couche de valence (niveau extérieur) doit perdre ou capturer pour être stable ou assurer la stabilité d'un atome voisin.

PROBLÈMES ET SOLUTIONS

363

Le nombre de valence exprime donc la possibilité, pour un atome, de se combiner avec d'autres. S'il manque 1 électron à une couche pour être stable, on dit que l'atome considéré est monovalent ; s'il en manque 2, il est bivalent, etc.

Prenons le cas de la boisson la plus connue : l'eau, formée d'oxygène et d'hydrogène. L'oxygène est bivalent, puisque sa couche extérieure (L) ne comporte que 6 électrons (au lieu de 8). D'un autre côté, nous avons l'hydrogène : 1 seul électron au niveau K. Il y aura donc combinaison d'un atome d'oxygène avec deux atomes d'hydrogène, et le résultat sera une molécule d'eau.

Théorie des bandes — Isolant, conducteur et semiconducteur

Dans un corps non cristallisé ou insuffisamment pur, chaque atome occupe une position aléatoire. D'un tel agencement ne peut donc découler aucune théorie pleinement vérifiable dans la pratique. Par contre, dans un corps pur, ou bien dans un cristal, chaque atome occupe, par rapport aux autres une position définie, entretenant avec ses voisins des rapports connus. Aussi peut-on prévoir leur comportement sous l'action de la chaleur, de la lumière, d'un champ électrique, etc.

Dans certains cas particuliers, les électrons externes de deux atomes, par exemple, peuvent sembler graviter, sur une même trajectoire, autour des deux noyaux¹. On sait qu'il n'en est rien, chaque électron étant forcément séparé de ses voisins par une infime différence d'énergie². C'est le PRINCIPLE D'EXCLUSION DE PAULI (*exclusion principle ; Pauli exclusion principle*). Dès lors, dans le cas de deux électrons, on peut dire que la trajectoire est légèrement dédoublée.

Si nous avons affaire à un cristal très pur, cette situation sera celle d'un grand nombre d'atomes : les niveaux d'énergie individuels restent assez voisins pour constituer ce que l'on appelle une BANDE D'ÉNERGIE (*energy band*). Pour un corps simple cristallisé, trois bandes retiennent notre attention : la BANDE DE VALENCE (*valence band*), la BANDE INTERDITE (*forbidden energy gap*) et la BANDE DE CONDUCTION (*conduction band*).

Les matériaux semiconducteurs et leurs propriétés

Naturellement, le DIAGRAMME ÉNERGÉTIQUE (*energy-level diagram ; energy diagram ; level scheme*) n'est pas le même pour tous les types de corps considérés. La bande interdite, prise en sandwich entre les deux autres, sera très importante pour un ISOLANT (*insulator*), étroite pour un CONDUCTEUR (*conductor*) et d'une largeur « moyenne » pour un SEMICONDUCTEUR (*semiconductor*). C'est d'elle, en effet, que dépend la RÉSISTIVITÉ, ou RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE (*electrical resistivity ; resistivity ; specific resistance*), d'un matériau donné³. Ainsi, la résis-

1. C'est le cas de deux atomes dont les noyaux sont séparés par une distance inférieure au rayon moyen de la trajectoire des électrons les plus éloignés du centre.
2. Comme nous l'avons rappelé plus haut, l'énergie dont est animé chaque électron est proportionnelle au rang qu'il occupe.
3. La bande d'énergie est mesurée en ÉLECTRONS-VOLTS, dont le symbole est eV (*electron volts, eV*), et sa grandeur, pour un matériau donné, correspond à la différence d'énergie existant entre le niveau supérieur de la bande de valence et le niveau inférieur de la bande de conduction. Pour le diamant, par exemple, cette différence est de 7 eV, alors qu'elle n'est que de 0,67 eV pour le germanium et de 1,43 pour l'ARSÉNIURE DE GALLIUM ou GaAs (*gallium arsenide*).

tivité des conducteurs sera comprise entre 10^{-7} et 10^{-2} ohm-cm, alors que celle des isolants variera de 10^8 à 10^{19} ohm-cm. La « gamme » intermédiaire, on s'en doute bien, concerne les MATÉRIAUX SEMICONDUCTEURS (*semiconductor materials*). Que ceux-ci soient des COMPOSÉS (*compounds*) ou des CORPS SIMPLES (*elements*), une bande interdite d'environ 1 eV les caractérise.

Aux basses températures, un semiconducteur se comporte comme un isolant, puisque sa bande de valence est complète et sa bande de conduction, vide. Il suffit que la température augmente pour que, sous l'effet de l'agitation thermique, certains électrons soient assez excités et franchissent la bande interdite, faisant irruption dans la bande de conduction: le corps devient conducteur.

Certains semiconducteurs sont particulièrement sensibles à la lumière, c'est-à-dire qu'un simple bombardement de photons (quanta d'énergie lumineuse) en libérera des électrons⁴. C'est notamment le cas du sulfure de cadmium et du silicium, SUBSTANCES PHOTO-ÉMETTRICES ou PHOTO-ÉMISSIVES (*photoemissive materials*)⁵. On parle alors d'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE (*photoelectricity*; *photoelectric effect*; *photoelectric process*). Les électrons libérés par l'effet photoélectrique s'appellent PHOTO-ÉLECTRONS (*photoelectrons*).

Tout comme les isolants⁶, les semiconducteurs ont un COEFFICIENT THERMIQUE (*temperature coefficient*) négatif, c'est-à-dire qu'à l'inverse des métaux, leur résistance diminue quand la température augmente.

Semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques — Dopage —

Type P et type N

Nous avons souvent évoqué, plus haut, la PURETÉ (*purity*) des matériaux : c'est d'elle que dépend finalement la conductivité du corps considéré⁷. Aussi se réfère-t-on d'habitude, pour mieux caractériser les semiconducteurs, à leur diagramme énergétique. Ils ont, en principe, une bande de valence complète et une bande de conduction vide (cf. *supra*). Leurs propriétés électriques dépendant uniquement de leur stabilité structurelle, on les qualifie d'INTRINSÈQUES (*intrinsic*). Les principaux sont le germanium (Ge) et le silicium (Si), tous deux TÉTRAVALENTS (*tetravalent*), puisqu'ils possèdent 4 électrons sur leur couche de valence.

Mais cet équilibre structurel du semiconducteur intrinsèque ne favorise, à la température ambiante, que le passage d'un courant faible. Il est donc nécessaire de le perturber quelque peu, si l'on recherche une conductivité plus grande. On y parvient en incorporant au semiconducteur tétravalent quelques atomes d'un corps ou trivalent ou pentavalent. Le semiconducteur ainsi obtenu est dit EXTRINSÈQUE (*extrinsic*), ses nouvelles propriétés électriques dépendant du corps

4. La lumière, on le sait, est de nature électromagnétique. On ne sera donc pas surpris, en lisant une définition de photo-émetteur, que l'auteur parle de « rayonnement électromagnétique » au lieu de dire « lumière » ou « énergie lumineuse ».

5. Il y a lieu de prévenir ici tout risque de confusion entre PHOTO-ÉMETTEUR (transformant l'énergie lumineuse en courant électrique) et ÉLECTROLUMINESCENT (susceptible d'émettre de la lumière sous l'action du courant électrique). Dans le premier cas, l'anglais dira *photoemissive* et, dans le second, *light-emitting*.

6. Le verre, par exemple, devient conducteur à très haute température.

7. Cette notion de pureté reste cependant relative : le germanium (Ge) le plus pur contient des atomes de « corps étranger » dans la proportion de 1 pour 10^9 .

étranger, de l'IMPURETÉ (*impurity*) ajoutée. L'opération consistant à modifier ainsi la structure d'un cristal semiconducteur (par addition d'impureté en dose déterminée) prend le nom de DOPAGE (*doping*).

Si l'impureté apportée est trivalente (cas de l'aluminium et de l'indium), chacun de ses électrons de valence se combinera avec un électron d'un des atomes du germanium tétravalent. Pour chaque atome de germanium participant à la « combinaison », il y aura un électron resté seul dans un état de pseudo-équilibre. Pour peu que le cristal soit soumis à l'action d'un champ électrique, l'électron libre de chaque atome sera facilement happé par un noyau voisin, créant ainsi un TROU ou LACUNE (*hole*) dans le bande qu'il vient de quitter. Ce trou, charge positive élémentaire, attirera donc un électron d'un atome voisin, lequel, à son tour, attirera un autre électron pour combler son trou, et ainsi de suite, d'un bout à l'autre du cristal. On a affaire à un excédent de trous, c'est-à-dire à un semiconducteur du TYPE P (*p-type*).

Au contraire, si l'impureté choisie possède 5 électrons de valence (arsenic, antimoine, phosphore), l'équilibre du réseau (en ce qui concerne la répartition des charges) sera perturbé, non plus par des trous « en promenade », mais par un excès d'électrons qu'un très faible apport d'énergie suffit à faire passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les porteurs étant de charge négative, nous sommes maintenant en présence d'un SEMICONDUCTEUR DU TYPE N (*n-type semiconductor*). L'atome apportant des trous est dit ACCEPTEUR (*acceptor*), par opposition au DONNEUR (*donor*) d'électrons.

Jonction PN — Diode semiconductrice

L'action d'un champ électrique déclenche, dans un semiconducteur, des phénomènes qu'il est convenu de considérer comme une progression d'électrons vers le pôle positif de la source de courant, doublée d'une progression de trous dans la direction opposée, les électrons acquérant assez d'énergie pour sauter de la bande de valence à la bande de conduction.

Si nous accolons un semiconducteur P à un autre du type N, la zone limite entre les deux parties prend le nom de JONCTION PN (*p-n junction*). Ce simple rapprochement provoque quelques perturbations : les ions positifs de la région N repoussent loin de la jonction les trous de la région P, tandis que les atomes négativement ionisés de P font de même pour les électrons libres de la région N. On peut dire qu'au voisinage de cette jonction, P devient négatif et N, positif. Il se forme, au voisinage de cette jonction, ce qu'on appelle une BARRIÈRE DE POTENTIEL (*potential hill ; potential barrier ; barrier*).

Maintenant, si nous relions la région N au pôle négatif d'une pile électrique, et la région P au pôle positif, les électrons de N seront chassés vers la jonction par ceux du courant appliqué. Ils franchissent la barrière de potentiel, traversent la région P, comblant, au fur et à mesure de leur progression, les trous créés dans le circuit par les électrons attirés par le pôle positif de la source de courant. Il y a conductibilité, puisque nous avons appliqué une TENSION DIRECTE (*forward voltage*) : zone N au pôle négatif, zone P au pôle positif.

Les choses se passent différemment si nous inversons les polarités, appliquant ainsi une TENSION INVERSE (*inverse voltage*). En effet, les électrons venant de la source attireront les trous de la zone P, tandis que le pôle positif de la pile attirera les électrons de la zone N. Il ne circule aucun courant (ou un courant si faible qu'il n'y a pas lieu d'en tenir compte dans la pratique).

Ainsi, notre jonction PN se comporte comme une diode à vide, ne laissant passer le courant que dans un sens ; on l'appelle DIODE SEMICONDUCTRICE ou DIODE À CRISTAL (*semiconductor diode ; crystal diode ; diode*). Ses utilisations sont multiples : détection, redressement du courant, etc.

En comparaison des diodes à vide, elle offre des avantages certains : absence de chauffage, faible encombrement, robustesse et longévité supérieures. Les diodes au sélénium, au silicium ou à l'oxyde de cuivre s'adaptent mieux que les lampes à vide aux courants de très haute fréquence. Fait amusant : c'est bien longtemps après la commercialisation des REDRESSEURS À SEMICONDUCTEUR (*semiconductor rectifiers*), laquelle remonte aux environs de 1930, que leur fonctionnement fut vraiment compris.

Transistors PNP et NPN

Sommairement décrit, le transistor est constitué de deux jonctions PN ou NP (donc 2 diodes) MISES EN OPPOSITION (*joined back-to-back*) ; il en résulte un montage PNP ou NPN, selon que les zones positives sont extrêmes ou prises en sandwich. Dans l'un ou l'autre cas, l'une des régions extrêmes porte le nom d'ÉMETTEUR (*emitter*) et l'autre, celui de COLLECTEUR (*collector*) ; la zone tampon s'appelle BASE (*base*). Les électrodes qui en partent sont respectivement identifiées par les lettres E, C et B.

Il va sans dire que, placés dans un circuit, ces deux types de transistors auront des comportements différents, du moins en ce qui concerne leur fonctionnement interne.

En fabriquant un transistor PNP, on s'arrange pour qu'il y ait, dans la partie N, beaucoup moins d'impuretés que dans les régions P. Entre autres « trucs », la base est rendue extrêmement mince. Le collecteur étant, de son côté, destiné à dissiper bien plus de chaleur que les deux autres zones, on lui octroie une surface beaucoup plus importante que celle de l'émetteur.

Avant application des tensions d'alimentation à un transistor PNP, les charges négatives des régions P (collecteur et émetteur) attirent celles, positives, de la région N. Quant aux charges négatives de la base N, on en déduit aisément qu'elles se trouvent repoussées des deux côtés à la fois. Comme dans le cas des jonctions PN et NP, nous avons affaire à des barrières de potentiel. Maintenant, si nous appliquons une tension entre émetteur et collecteur, il y aura forcément une jonction POLARISÉE EN DIRECT (*forward biased*) et une autre EN INVERSE (*reverse biased*). En principe, aucun courant ne devrait passer. Cependant, sous l'effet de l'agitation thermique, il se trouve un certain nombre

d'électrons pour franchir la barrière de potentiel, formant ainsi un courant faible dont l'intensité ne dépend pas de la tension appliquée, mais de la température ⁸.

Observons maintenant ce qui se passe quand on applique une faible tension directe entre émetteur et base, tout en rendant la base positive par rapport au collecteur. Les trous du pôle positif de la pile « A » repoussent ceux de l'émetteur qui, refoulés dans la base trop mince pour les contenir et trop peu riche en impuretés pour les neutraliser, débordent dans le collecteur. De là, ils sont « extraits » par le pôle négatif de la pile « B » ⁹. Il s'est donc déclenché, dans la jonction base-collecteur, un courant inverse, et ceci grâce à la polarisation directe de la jonction émetteur-base. C'EST L'EFFET TRANSISTOR !

En général, la tension appliquée entre émetteur et base est d'environ 0,1 à 0,2 volt. Par contre, elle est de 4 à 9 volts entre émetteur et collecteur. Quant au courant recueilli entre base et collecteur, il va de 50 à 200 microampères. Des mesures effectuées à l'aide d'un montage fort simple ¹⁰ permettent de déterminer un coefficient d'amplification proche de 50 ! Un vrai pactole !

Pour réaliser les mêmes expériences avec un transistor NPN, la base sera rendue positive par rapport à l'émetteur. Ce sont donc des électrons, et non plus des trous, qui bousculeront la répartition des charges dans la zone N, avant de se ruer dans la base et déborder au collecteur. Il faut évidemment polariser en direct la jonction émetteur-base...

Trois schémas de principe (Three basic diagrams)

Les transistors ont donné lieu à trois principaux types de circuits amplificateurs : le MONTAGE À BASE COMMUNE (*common-base circuit configuration*), le plus ancien de tous ; le montage À ÉMETTEUR COMMUN (*common-emitter*), qui demeure le plus employé ; enfin, le montage À COLLECTEUR COMMUN (*common-collector*).

Presque un conte de fées

Outre les avantages de la diode semiconductrice que nous avons signalés plus haut, le transistor permet, on l'a vu, une grande amplification à peu de frais. Il est plusieurs fois plus rapide que la lampe et commence à fonctionner dès qu'il est mis sous tension. Son faible encombrement et la simplicité de sa structure ont ainsi permis de réaliser les merveilles de miniaturisation qui prolifèrent de nos jours. Qui ne s'est pas étonné qu'une simple PUCE (*chip*) de 2 à 3 mm de côté puisse comporter près (et parfois plus) de 3 000 composants ! Si maintenant la science se complaît dans le merveilleux...

ALIX RENAUD

8. Il y a lieu de nuancer ici notre propos : une tension *excessive* provoquera assurément un échauffement des jonctions ; l'intensité du courant en question s'en trouvera donc augmentée.
9. La faible tension de la pile « A » ne les contrariera pas outre mesure : peu d'entre eux seront attirés par le pôle positif relié à la base.
10. Schéma sur demande !

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

AISSBERG, E., *le Transistor ?... mais c'est très simple !*, Paris, Société des Éditions Radio.

Encyclopaedia Britannica, vol. 11, 12, 14 et 16.

Encyclopédie des sciences industrielles, Paris, Quillet.

Encyclopédie internationale des sciences et des techniques, passim.

Les Techniques de l'ingénieur, documents E1, E2 et E5.

McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, 1974.

McGraw-Hill Encyclopaedia of Science and Technology, passim.

MICROLEXIQUE DES SEMICONDUCTEURS

acceptor ; acceptor impurity ; acceptor material	accepteur
alloy	alliage
atomic number	nombre atomique
band theory of solids	théorie des bandes
barrier	Voir <i>potential hill</i>
base	base
basic diagram	schéma de principe
chemical element	Voir <i>element</i>
chip	puce
collector	collecteur
common-base	à base commune
common-collector	à collecteur commun
common-emitter	à émetteur commun
compound	composé
conduction band	bande de conduction
conductivity	conductivité ; conductibilité électrique
conductor	conducteur
crystal diode	Voir <i>semiconductor diode</i>
diode	Voir <i>semiconductor diode</i>
donor ; donor impurity ; electron donor	donneur
dopant	dopeur
doping	dopage
electrical resistivity ; specific resistance ; resistivity	résistivité ; résistance spécifique
element ; chemical element	élément ; corps simple
emitter	émetteur
energy band	bande d'énergie
energy diagram	Voir <i>energy-level diagram</i>
energy gap	Voir <i>forbidden energy gap</i>
energy level ; level	niveau ; niveau d'énergie

energy-level diagram ; energy diagram ; level scheme	diagramme énergétique
exclusion principle ; Pauli exclusion principle	principe d'exclusion de Pauli
extrinsic	extrinsèque
forbidden energy gap ; energy gap	bande interdite
forward bias	polarisation directe
forward current	courant direct (Ne pas confondre avec courant continu)
forward voltage	tension directe
galena (lead sulfide)	galène (sulfure naturel de plomb)
heat sink	radiateur
hole	trou ; lacune
impurity	impureté
insulator	isolant
intrinsic	intrinsèque
inverse voltage	tension inverse
joined back-to-back	mis en opposition
large-scale integration	intégration à grande échelle
leakage	claquage
level	Voir <i>energy level</i>
level scheme	Voir <i>energy-level diagram</i>
majority carrier	porteur majoritaire
minority carrier	porteur minoritaire
n-carrier	donneur
n-type	du type N
Pauli exclusion principle	Voir <i>exclusion principle</i>
p-carrier	accepteur
photoelectric effect	Voir <i>photoelectricity</i>
photoelectricity ; photoelectric effect ; photoelectric process	effet photoélectrique
photoelectric process	Voir <i>photoelectricity</i>
photoelectron	photo-électron
photoemissive, adj.	photo-émetteur ; photo-émissif
physics of solids	Voir <i>solid-state physics</i>
p-n junction	jonction PN (ou P-N)
potential barrier	Voir : <i>potential hill</i>
potential hill ; potential barrier ; barrier	barrière de potentiel
p-type	du type P
purity	pureté
quantum number	nombre quantique
resistivity	Voir <i>electrical resistivity</i>
reverse bias	polarisation inverse
semiconductor	semiconducteur
semiconductor diode ; crystal diode ; diode	diode semiconductrice ; diode à cristal ; diode

semiconductor material

semiconductor rectifier

solid circuit

solid-state physics ; physics of solids

specific resistance

temperature coefficient

tetravalent

thermal effect ; thermal agitation

transfer resistor

valence band

valence electron

valence number

valence shell

Zener diode

Zener voltage

matériau semiconducteur ;

substance semiconductrice

redresseur à semiconducteur

circuit solide

physique des (du) solides

Voir *electrical resistivity*

coefficient thermique

tétravalent

agitation thermique

résistance de transfert

bande de valence

électron de valence

nombre de valence

couche de valence

diode de Zener

tension de Zener