

Circuit intégré

Le circuit intégré, aussi nommé puce électronique, est un composant électronique reproduisant une ou plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant fréquemment plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit,...

Le circuit intégré (CI), aussi nommé puce électronique, est un composant électronique reproduisant une ou plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant fréquemment plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit, rendant le circuit facile à mettre en œuvre. Il existe une très grande variété de ces composants divisés en deux grandes catégories : analogique et numérique.

1/Historique

Jack Kilby (1923 – 2005) est l'inventeur du circuit intégré. En 1958, cet Américain, alors employé par Texas Instruments, créait le tout premier circuit intégré, jetant ainsi les bases du matériel informatique moderne. Pour la petite histoire, Jack Kilby, qui venait de rejoindre la compagnie, a fait cette découverte tandis que la majorité de ses collègues profitaient de vacances organisées par Texas Instruments. À l'époque, Kilby avait tout simplement relié entre eux différents transistors en les câblant à la main. Il ne faudra ensuite que quelques mois pour passer du stade de prototype à la production de masse de puces en silicium contenant plusieurs transistors. Ces ensembles de transistors interconnectés en circuits microscopiques dans un même bloc, permettaient la réalisation de mémoires, mais aussi d'unités logiques et arithmétiques. Ce concept révolutionnaire concentrait dans un volume inprobablement réduit, un maximum de fonctions logiques, auxquelles l'extérieur accédait à travers des connexions réparties à la périphérie du circuit^[1]. Cette découverte a valu à Kilby un prix Nobel de physique en 2000, tandis que ce dernier siégeait toujours au directoire de Texas Instruments et détenait plus de 60 [brevets](#) à son nom.

2/Introduction

L'analogique et le numérique sont deux procédés pour transporter et stocker des données. (de type audio, photo, vidéo...). L'analogique est né avec le début de l'électricité tandis que le numérique est apparu plus récemment avec l'ère de l'informatique.

Le principe de l'analogique est de reproduire le signal à enregistrer (audio, vidéo...) sous forme similaire sur un support (magnétique en général). Par exemple lorsque l'on enregistre un signal audio sur un système analogique le signal présent sur la bande suivra les mêmes amplitudes (" la même courbe ") que l'onde sonore (avec plus ou moins de fidélité) : les variations de pressions caractéristiques d'une onde sonore seront traduites en variations d'un signal électrique. Ainsi

l'amplitude électrique du signal analogique sera l'image plus ou moins fidèle du signal à enregistrer (audio, vidéo...)

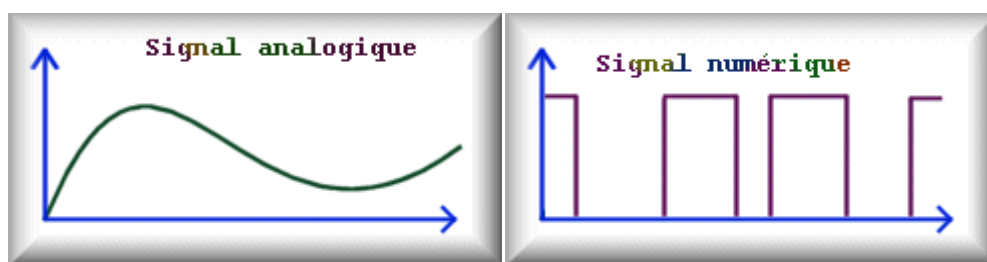
En numérique le signal analogique à enregistrer est converti en numérique grâce à un convertisseur analogique> numérique. Après cette conversion le signal n'est plus qu'une suite de " 0 " et de " 1 " c'est à dire un signal à deux amplitudes au lieu d'une infinité en analogique.

Une fois sous cette forme le signal peut être copié et transmis sans pertes car au lieu de transporter un signal dont l'amplitude doit varier fidèlement à l'original on transporte un signal formé de seulement deux amplitudes (par exemple $0=0\text{v}$ et $1=5\text{v}$). Lorsqu'un parasite perturbe un signal analogique, en numérique ce parasite aura aucun effet : par exemple un parasite qui ajoute 0.2v de perturbation va détériorer un signal analogique alors que ce même parasite sur un signal numérique n'aura pas d'effet car $0\text{v} \pm 0.2\text{v}$ sera toujours considéré comme = " 0 ".

Le signal numérique est donc un signal analogique constitué de deux niveaux possibles (par exemple " 0 " = 0v et " 1 " = 5v) et lorsque le signal analogique s'éloigne de ces deux tensions cela n'est pas grave car tous signal proche de 0v sera considéré comme = " 0 " et tout signal proche de 5v sera = " 1 " avec un seuil de tension entre les deux d'où une immunité exceptionnelle contre les parasites et une facilité exemplaire à faire des copies parfaites (clones) de ce type de signal .

Après un transport et un stockage en numérique tout signal (vidéo ou audio) devra revenir à sa forme analogique de départ. Par exemple un signal audio sera converti de numérique>analogique pour ensuite être amplifié ; en effet nos oreilles ne savent entendre en numérique !!!

Il faut bien garder à l'esprit que le numérique ne sert (dans le cas d'un signal audio ou vidéo) qu'au transport et au stockage des données.



3/Circuit intégré analogique

Les composants les plus simples peuvent être de simples [transistors](#) encapsulés les uns à côté des autres sans liaison entre eux, jusqu'à des assemblages réunissant l'ensemble des fonctions requises pour le fonctionnement d'un appareil dont il est l'unique composant. Les [amplificateurs opérationnels](#) sont des représentants de moyenne complexité de cette grande famille où on retrouve aussi des composants réservés à l'électronique haute [fréquence](#) et de télécommunication.

Un exemple de circuit analogique : l'[ampli op LM741](#) et une ribambelle de cousins.

4/Circuit intégré numérique

Les circuits intégrés numériques les plus simples sont des portes logiques (et, ou, non), les plus complexes sont les microprocesseurs et les plus denses sont les mémoires. On trouve de nombreux circuits intégrés dédiés à des applications spécifiques (**ASIC** pour *Application Specific Integrated Circuit*), surtout pour le traitement du signal (traitement d'image, compression vidéo) on parle alors de DSP (pour *Digital Signal Processor*). Une famille importante de circuits intégrés est celle des composants de logique programmable (FPGA, CPLD). Ces composants sont amenés à remplacer les portes logiques simples à cause de leur grande densité d'intégration.

5/Analogique VS Numérique et la compression de données.

On vient donc de voir que le numérique n'est pas un gadget commercial, c'est bien le support de toutes les nouvelles technologies mais doit-on pour autant considérer que le numérique est résolument meilleur que l'analogique?

Je serais tenter de répondre oui mais il faut cependant tempérer ce jugement et cela pour deux raisons : la compression et l'échantillonnage.

*/ La compression numérique :

La conversion d'un signal en numérique n'est pas sans problèmes : la bande passante occupée par un signal une fois numérisé est plus importante que son équivalent analogique . Lorsque l'on traite des données très encombrantes comme la vidéo cela devient très lourd à traiter ; il faut donc utiliser un algorithme de compression visant à réduire la quantité d'informations en diminuant la qualité du signal . Toutes les compressions utilisées pour la vidéo ou l'audio se basent sur la perception humaine de façon à rendre peu ou pas perceptible cette baisse de qualité pour l'homme. Mais le problème est que souvent on a tendance à vouloir trop compresser le signal et la dégradation devient alors perceptible (cas des téléphones GSM, des MP3 < 128kbit/s, des vidéos mpeg-1)

Par exemple un signal audio de haute qualité enregistré sur une platine cassette haut de gamme (analogique) sera de meilleure qualité qu'un mp3 à 112kbit/s, car à 112kbit/s beaucoup d'informations ont été supprimées pour satisfaire au débit imposé de 112kbit/s.

Par contre en analogique intervient la notion de génération de copie : une copie sera moins bonne que l'originale, une copie de la copie perdra encore un peu Au bout de 10 ou 20 copies de copies le signal est totalement détérioré et n'est plus exploitable. En numérique une copie est souvent un clone de l'original donc on peut en théorie faire une infinité de copies en ayant strictement la même qualité que l'original. Je parle de théorie car lors d'une copie numérique des erreurs peuvent intervenir, souvent à cause de l'état du support. C'est le cas lors de la copie numérique d'un CD Audio (de votre lecteur CD-ROM vers votre disque dur par exemple) : au passage d'une rayure ou d'un défaut l'information ne sera pas copiée et sera remplacée par le système de correction d'erreur par une donnée " extrapolée " pour faire passer inaperçu ce

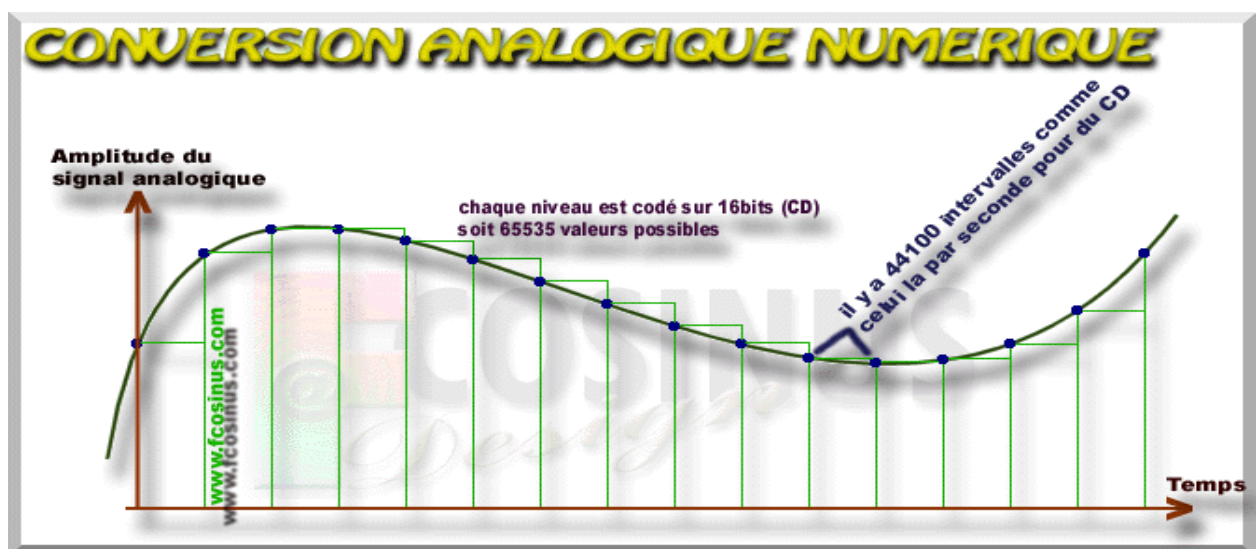
défaut ; dans ce cas la copie numérique ne sera plus identique à l'original. (Dans ce cas précis il est à noter que l'utilisation de lecteur CD ROM haut de gamme permet d'éviter ces erreurs : mes tests avec un Plector m'a montré que la copie numérique était bit à bit identique à l'original et ce à toutes les vitesses).

Cependant en numérique il est possible d'avoir un contrôle sur l'intégrité des données. C'est le cas de l'informatique, toute donnée transportée ou exploitée est vérifiée : par exemple lorsqu'un support de masse (disquettes, disques dur..) présente un défaut l'ordinateur indiquera une " erreur de lecture ". Contrairement à un signal vidéo ou audio en informatique la moindre petite erreur lors de traitement de signaux numériques peut s'avérer catastrophique d'où l'importance de ces contrôles d'intégrité des données.

*/ L'échantillonnage

Le deuxième défaut d'un signal numérique par rapport à son homologue analogique c'est la précision de la conversion analogique/numérique.

Le principe de base est de découper le signal analogique en " tranches " (Quantification) pour ensuite donner à chaque tranche une valeur numérique équivalente (Résolution). D'après le théorème de Shanon il faut au minimum avoir une fréquence d'échantillonnage double de la bande passante du signal à numériser. C'est pour cela quand audio on a une fréquence d'échantillonnage de 44.1kHz pour un signal audio dont la bande passante varie jusqu'à environ 20kHz. Mais cela est un minimum car plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et meilleur sera le son (c'est pour cette raison que l'échantillonnage à 48kHz est meilleur même si on se limite à une bande passante de 20kHz). De plus le niveau de chacune de ces " tranches " est converti en numérique sur un nombre de " bits " bien précis . En 16 bits on a 2^{16} soit 65536 niveaux. Ainsi en numérique on a une perte due à la conversion analogique/numérique. En audio on découpe donc le signal en 44100 morceaux par seconde, chacun de ces morceaux étant pouvant avoir 65536 niveaux possibles.



C'est pour ça que les mélomanes n'apprécient pas toujours le CD car même si les données ne sont pas compressées (contrairement au mini disque), la numérisation dégrade le signal. Par exemple lorsque le signal audio est faible (dans le cas de grande musique sur certains passages) le codage se fait alors sur peu de niveaux (en effet 65536 représente le nombre de niveaux couvrant l'amplitude maximale du signal analogique). Enfin pour la plupart d'entre nous la qualité CD représente le son idéal même si on ne peut le qualifier de parfait.

En règle générale on peut affirmer que pour avoir une bonne qualité en analogique il faut dépenser beaucoup d'argent (à une époque on trouvait des platines cassettes haut de gamme >12000fr) alors qu'en numérique même une platine CD à 500fr offrira de très bonnes performances ce qui n'est pas du tout le cas des platines cassettes d'entrée de gamme. Le numérique propose donc au grand public d'accéder à une qualité qui était jadis réservé aux professionnels ou à une élite fortunée ...

De plus le transport du numérique est très maniable, on peut faire circuler plusieurs signaux sur la même fréquence (plusieurs chaîne de TV sur un même canal satellite par exemple). Le domaine spectral, c'est à dire l'étendu des fréquence disponible, étant limité, le numérique offre une réponse à la demande sans cesse croissante du nombre de communications par voies hertziennes.

*/Le numérique aujourd'hui

Les industriels ont bien compris les intérêts du numérique et le propose dans grand nombre de produits. C'est l'audio avec le CD qui a ouvert le bal ; la vidéo plus récemment avec le satellite et le DVD ; cependant le vieux standard analogique VHS est encore le seul moyen d'enregistrement grand public... Le numérique à aussi envahi les communications : le GSM/DCS1800 a remplacé les anciens standards de la téléphonie mobile analogique (radiocom 2000 ...). Les téléphones portables d'intérieur ne sont pas restés en reste avec l'arrivée du DECT.

C'est bien sur l'informatique, 100 % numérique, et tous ces dérivés (notebook, organizers...) qui représente le plus bel exemple de " l'invasion " du tout numérique. L'ordinateur est le moyen de traitement numérique le plus polyvalent. Mais le chemin vers un monde 100% numérique est encore long : les communications de la police/%, des pompiers, des ambulances... sont encore en analogique (ce qui explique qu'on puisse encore les écouter avec un simple scanner.)

L'analogique pour la transmission hertzienne de la télévision et de la radio va perdurer encore longtemps même si la concurrence du câble et du satellite se fait sentir...

Le numérique est donc omniprésent dans notre vie moderne, il permet à moindre coût d'obtenir une qualité excellente dans bon nombre d'applications.

6/Composition

-Le boîtier



Circuits intégrés boîtier DIP.



Un microcontrôleur boîtier DIP.

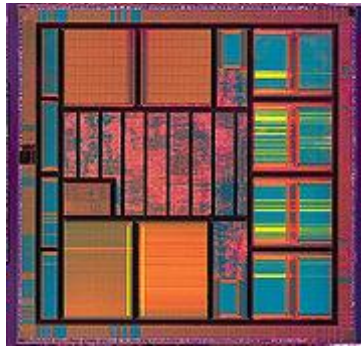
Les circuits intégrés se présentent le plus souvent sous la forme de boîtiers pleins rectangulaires, noirs, équipés sur un ou plusieurs côtés ou alors sur une face, de pattes (appelées aussi broches ou pins) permettant d'établir les connexions électriques avec l'extérieur du boîtier. Ces composants sont brasés, (soudé, terme impropre) sur un circuit imprimé, ou enfichés, à des fins de démontage, dans des supports eux-mêmes brasés sur un circuit imprimé.

Sur le boîtier sont peints : le logo du fabricant, une référence qui permet d'identifier le composant, un code correspondant à des variantes ou révisions et la date de fabrication (4 chiffres codés AASS : année et semaine). Les progrès de l'intégration sont tels que les circuits intégrés peuvent devenir particulièrement petits. Leur taille ne dépend plus guère que de la capacité du boîtier à dissiper la chaleur produite par effet Joule et , fréquemment du nombre, de la taille des broches de sortie du circuit mais aussi de leur espacement.

Différents types de boîtiers permettent d'adapter le circuit intégré à son environnement de destination.

- Le format le plus ancien a pour nom Dual Inline Package (DIP ou DIL) qui se traduit sommairement par «boîtier avec deux lignes».
- La miniaturisation aidant, les circuits dits de surface ont fait leur apparition : le format **SO**.

-Le Die



Un *die* de circuit intégré VLSI

Le **die** est la partie élémentaire, de forme rectangulaire, reproduite comme une copie conforme avec une matrice sur une tranche de silicium en cours de fabrication. Il correspond au circuit intégré qui sera ensuite découpé et qu'on appellera une *puce* avant qu'elle ne soit encapsulée pour donner un *circuit intégré*, prêt à être monté sur une carte.

Le *Die* d'un circuit intégré comprend sous des formes miniaturisées essentiellement des transistors, des diodes, des résistances, des condensateurs, plus rarement des inductances, car elles sont plus difficilement miniaturisables.

7/Échelle d'intégration

L'échelle d'intégration définit le nombre de portes par boîtier :

- SSI (*small scale integration*) petite : inférieur à 12
- MSI (*medium*) moyenne : 12 à 99
- LSI (*large*) grande : 100 à 9 999
- VLSI (*very large*) particulièrement grande : 10 000 à 99 999
- ULSI (*ultra large*) ultra grande : 100 000 et plus

Ces distinctions ont progressivement perdu de leur utilité avec la croissance exponentielle du nombre de portes. Actuellement plusieurs centaines de millions de transistors (plusieurs dizaines de millions de portes) représentent un chiffre *normal* (pour un microprocesseur ou un circuit intégré graphique haut de gamme). Pour parvenir à de tels niveaux d'intégrations, un flot de conception complexe est utilisé

8/La technique de fabrication la plus courante



Des microprocesseurs sur la tranche de silicium (*wafer*) qui permet leur fabrication.

La fabrication d'un circuit intégré est un procédé complexe dont la tendance est à se compliquer de plus en plus.

- Le motif de base est le [transistor](#), et ce sont ensuite les interconnexions métalliques entre les transistors qui exécutent la fonction spécifique du circuit.
- L'[aluminium](#) est fréquemment employé dans ce but, mais une technologie plus performante permet l'emploi du [cuivre](#).
- On utilise quelquefois du silicium polycristallin, aussi conducteur, surtout pour la grille du transistor.

*/Matière première

La matière première de base généralement utilisée pour fabriquer les circuits intégrés est le [silicium](#).

Néanmoins, d'autres matériaux sont quelquefois employés, comme le [germanium](#) ou l'[arséniure de gallium](#).

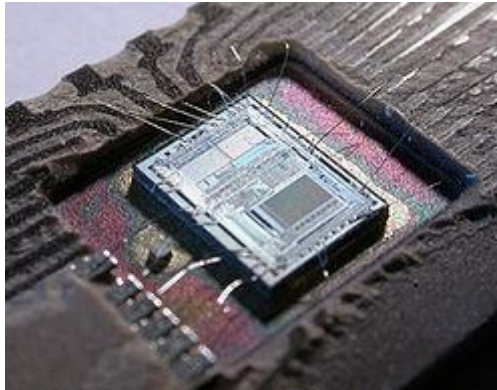
Le silicium est un [semi-conducteur](#) dans sa forme monocristalline. Ce [matériau](#) doit être pur à 99, 99 %.

On produit en premier lieu un *barreau* cylindrique de silicium en le cristallisant particulièrement lentement. Ce barreau est ensuite découpé pour être utilisé sous forme de galettes de 100 à 800 µm d'épaisseur et ayant jusqu'à 300 mm de diamètre, nommé *wafer* (galette, en anglais). Un wafer va supporter de nombreux circuits intégrés.

*/La photolithographie

La photolithographie, sert à désigner la totalité des opérations servant à délimiter l'extension latérale des matériaux sur la surface d'un substrat semi-conducteur, dont la structure est plus ou moins bidimensionnelle car basée sur l'empilement de couches à la surface d'une plaquette de [silicium](#). Les motifs deviendront ensuite les différentes zones actives des composants électroniques (exemple : contact, drain...) ou les jonctions entre ces composants. Ce procédé est aujourd'hui le plus commun.

*/Étapes de fabrication



Le circuit intégré d'une puce Intel 8742

Le nombre d'étapes de la fabrication des circuits intégrés a crû énormément depuis 20 ans. Il peut atteindre plusieurs dizaines pour certaines productions spécialisées. Cependant, on retrouve environ toujours la même série d'étapes :

- Préparation de la couche : on expose le wafer à du dioxygène pur après chauffage pour fabriquer une couche d'oxyde (isolant) en surface, ensuite le wafer est recouvert d'un vernis photosensible.
- Transfert : on transfère le dessin du circuit à reproduire sur la surface photosensible avec un masque, comme pour la peinture au pochoir, en l'exposant aux ultraviolets, (ou aux rayons X, pour les gravures les plus fines). Le vernis non soumis aux rayonnements est dissout grâce à un solvant spécifique.
- Gravure : l'oxyde de silicium est par conséquent protégé par le vernis aux lieux exposés aux ultraviolets. Un agent corrosif va creuser la couche d'oxyde aux lieux non protégés.
- Dopage : on dissout ensuite le vernis exposé avec un autre solvant, et des ions métalliques, nommés *dopants*, sont introduits dans le silicium exposé à l'endroit où l'oxyde a été creusé, pour le rendre conducteur.
- Couche suivante : l'opération est renouvelée pour créer les couches successives du circuit intégré ou du microprocesseur (jusqu'à 20).
- On détermine la qualité de la gravure selon le plus petit motif qu'il est envisageable de graver, en l'occurrence la largeur de la grille du transistor MOS.
 - En 2004, les gravures les plus fines en production sont de 0,13 μm (ou 130 nm) et **90 nm**.
 - En 2006, les gravures les plus fines en production sont de 60 nm et **30 nm**.
 - En 2018, les gravures les plus fines en production sont de 28 nm et **10 nm**

*/Phases finales

- On dépose une pellicule métallique aux lieux où le circuit devra être en contact avec les broches de sortie.
- Les circuits intégrés sont testés directement sur le wafer. Les puces défectueuses sont marquées (inking).
- Le wafer est finalement découpé au moyen d'une scie circulaire au diamant d'une épaisseur de 0.02mm ou via un procédé de découpe laser pour obtenir des *die*.
- Les puces ainsi obtenues sont insérées dans un boîtier individuel de protection et reliées aux broches qui vont leur permettre de communiquer avec l'extérieur.
- Des tests de validation sévères et individuels sont alors entrepris pour qualifier les microprocesseurs, en fréquence et en température.

9/Technologies spécialisées

Certaines techniques sont aussi utilisées pour des circuits intégrés de type légèrement spécialisé.

*/Silicium sur isolant

Le principal défaut du CMOS réside dans sa capacitance. C'est-à-dire la capacité interne et parasite qui ralentit la vitesse de commutation d'un transistor. À la périphérie immédiate de la source et du drain, on observe une forte accumulation de charges électriques. Ces charges résultent de la différence de potentiel entre le substrat silicium et ces parties d'épi-couche (c'est-à-dire de la couche de surface, proche des zones sources et drains) ionisées. À partir des années 1990, on s'est intéressé à une solution nommée SOI ou (Silicon On Insulator, c'est-à-dire silicium sur couche isolante) servant à diminuer ces effets nuisibles... ^[2].

La technologie (*silicon on insulator* - SOI) consiste à introduire une couche isolante électriquement sous les transistors en profondeur du silicium. Cela diminue les pertes d'électrons dans le circuit, sources de consommation statique d'énergie. Le silicium «à côté» des transistors n'est plus fixé à un potentiel donné, ce qui introduit des performances intéressantes (augmentation de vitesse pour les portes CMOS complexes).

*/Silicium sur saphir

Occasionnellement, le substrat en silicium monocristallin est purement et simplement abandonné. L'avantage intrinsèque d'utiliser du silicium (l'arrangement des atomes de silicium sur le substrat est naturellement plus régulier) peut alors être compensé pour des applications spécialisées. C'est ainsi que le *silicium sur saphir* (substrat en saphir cristallin) est utilisé dans les applications où le circuit intégré sera exploité dans un environnement spatial ou soumis à d'intenses radiations qui rendraient les substrats de silicium inutilisables.

*/Arséniure de gallium

On réalise aussi des semi-conducteurs à base d'[arséniure de gallium](#). Même si ce matériau a eu l'antériorité sur le silicium, il avait presque disparu de l'industrie. Actuellement les avantages intrinsèques de ce matériau en termes de vitesse de commutation, mais aussi ses performances supérieures à celles du silicium dans le domaine de l'[opto-électronique](#), lui redonnent une nouvelle jeunesse dans le domaine des hautes fréquences et on voit réapparaître une fabrication industrielle sur la base de cette technologie.

10/Développements futurs

L'industrie des circuits intégrés est une de celles qui évoluent le plus rapidement de l'histoire des technologies. Elle explore continuellement de nouvelles technologies. Parmi celles qui semblent avoir un avenir prometteur il faut compter :

- les substrats en diamant ^[3], dont on attend énormément en termes de refroidissement ^[4].

Notes et références

1. ↑ Jean-Baptiste Waldner, *Nano-informatique et Intelligence Ambiante - Inventer l'Ordinateur du XXI^e siècle*, Hermes Science, Londres (ISBN 2-7462-1516-0) , p. 37
2. ↑ Jean-Baptiste Waldner, *Nano-informatique et Intelligence Ambiante - Inventer l'Ordinateur du XXI^e siècle*, Hermes Science, Londres (ISBN 2-7462-1516-0) , p. 126-127
3. ↑ Gahlin, et al, *The Effects of Compressive Stresses on the Abrasion of DiamondCoatings*, Elsevier Science, p. 226-233
4. ↑ Fuji S. et al, *The Diamond Wafer for Saw Application*, IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, US., New York (ISBN 0-7803-4154-6) , p. 183-186