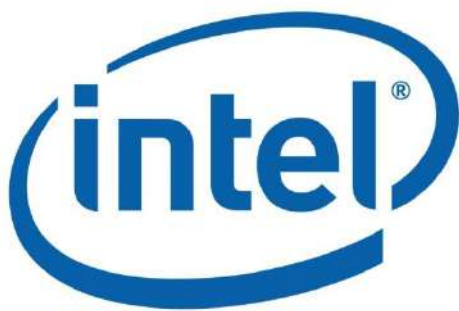
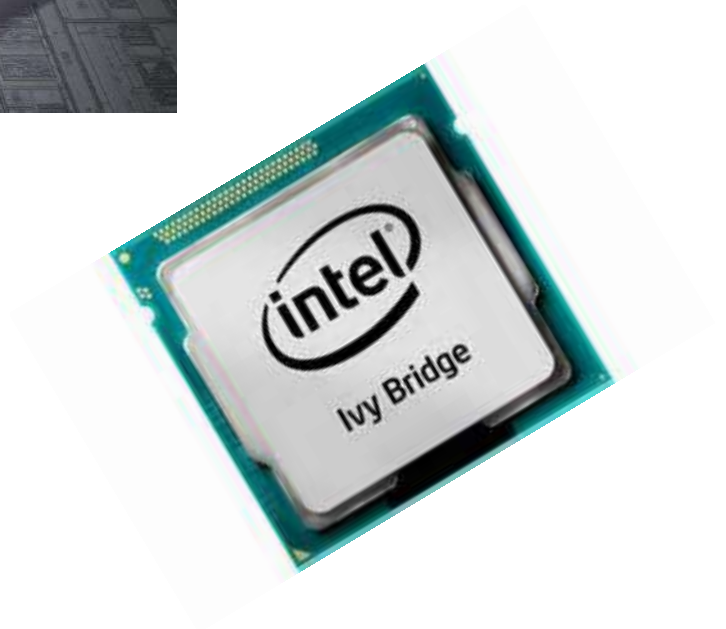
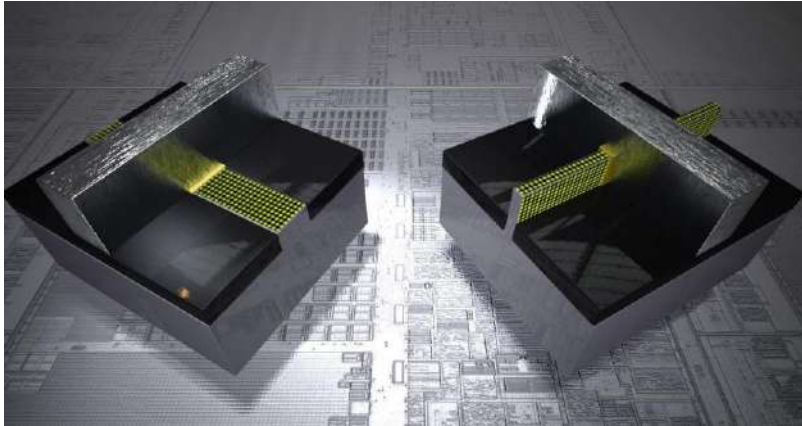


TAI ATOME A LA PUCE N°1

Les FinFET, transistors en 3 dimensions



Soitec

SOMMAIRE

| | | |
|-------------|---|------------------|
| I. | <u>Introduction</u> | <u>1</u> |
| II. | <u>Le principe du transistor Tri Gate</u> | <u>2</u> |
| | 1) Fonctionnement du transistor à effet de champs | 3 |
| | 2) Les particularités du FinFET | 4 |
| | 3) Etapes principales de la fabrication d'un FinFET (sans SOI) | 5 |
| III. | <u>Les avantages avec les transistors traditionnels</u> | <u>7</u> |
| | 1) Un procédé de fabrication simplifié | 7 |
| | 2) Des caractéristiques énergétiques et électroniques hors du commun | 8 |
| | 3) Une taille réduite | 9 |
| IV. | <u>Applications du finFET</u> | <u>10</u> |
| | 1) Introduction | 10 |
| | 2) Utilisation dans les smartphones, ordinateurs portables et tablettes | 12 |
| V. | <u>Conclusion</u> | <u>14</u> |

INTRODUCTION

Un transistor est un composant électronique que l'on peut assimiler à un interrupteur, en effet son rôle est de laisser passer ou non un courant. Toutefois cette comparaison reste très basique puisqu'un transistor n'est pas commandé manuellement (par l'homme) mais électriquement.

Ce mode de fonctionnement particulier en fait un composant très important dans de nombreuses applications, ce qui explique sa constante évolution depuis son invention en 1947.

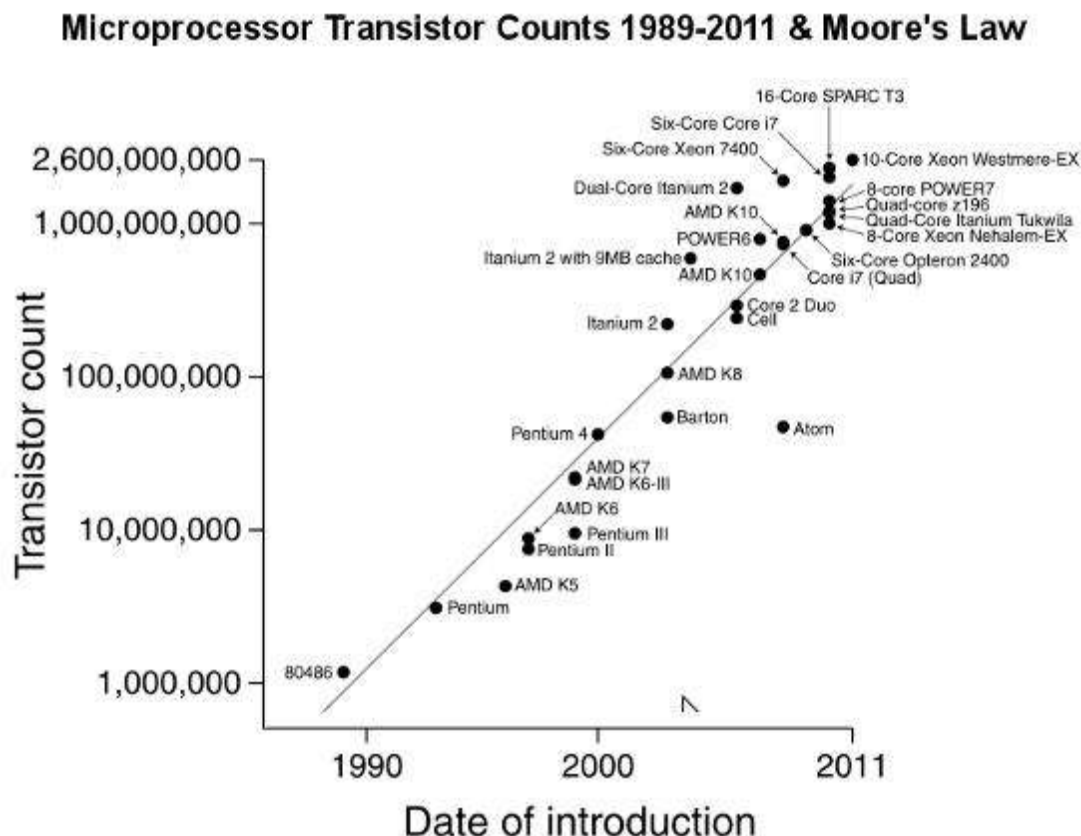
C'est un composant majeur de l'électronique de nos jours, on l'utilise dans presque tous les circuits intégrés, circuits que l'on veut toujours plus performants ce qui pousse les fabricants à produire des transistors de plus en plus rapides, moins chers et surtout moins gros. Dans cette présentation nous n'étudierons que les transistors à effet de champs (FET) qui sont les plus utilisés dans les appareils destinés au grand public.

Nous étudierons donc le développement des FinFET (ou transistors 3D) de la manière suivante : Dans un premier temps, nous verrons le fonctionnement des transistors à effet de champs afin de mieux comprendre celui des FinFET.

Nous verrons ensuite quels sont les principaux avantages de ces nouveaux transistors. Pour finir, nous présenterons les avancées dans le domaine de l'électronique que ces nouveaux composants permettent.

Le principe du transistor Tri Gate

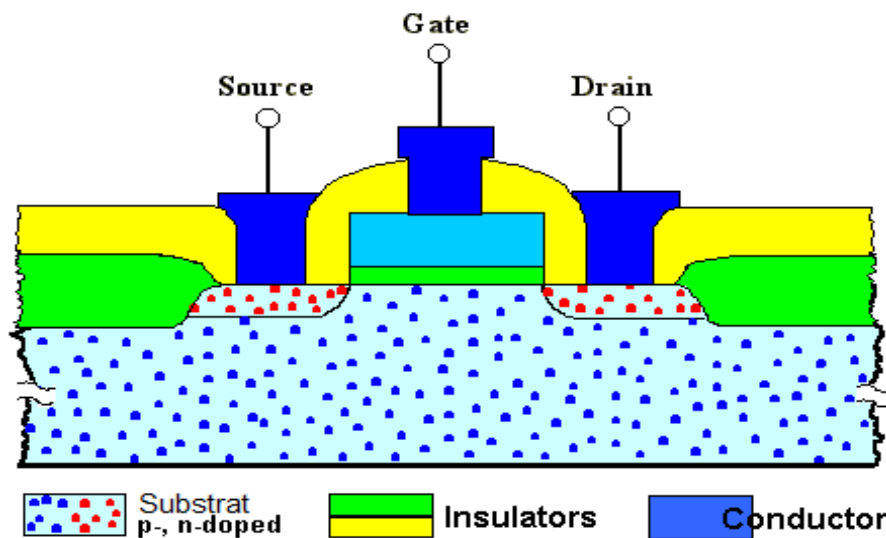
« Cofondateur de la société Intel, Gordon Moore avait affirmé dès 1965 que le nombre de transistors par circuit de même taille allait doubler, à prix constant, tous les ans. Il rectifia par la suite en portant à dix-huit mois le rythme de doublement. Il déduit alors que la puissance des ordinateurs allait croître de manière exponentielle, et ce pour des années. Il avait raison. Sa loi, fondée sur un constat empirique, a été vérifiée jusqu'à aujourd'hui. Il a cependant déclaré en 1997 que cette croissance des performances des puces se heurterait aux environs de 2017 à une limite physique : celle de la taille des atomes. » Pour que cette loi devenue économique soit toujours respectée, le fabricant doit aujourd'hui encore chercher à faire évoluer leurs transistors, cela ne passe pas comme dans les dernières années par un changement matériel mais par une évolution structurelle.



1) Fonctionnement du transistor à effet de champs (MOSFET)

Commençons par étudier le transistor à effet de champs de précédente génération afin de mieux appréhender le changement qui survient dans ce développement :

Les MOSFET utilisent comme leur nom l'indique une base MOS (Métal-Oxyde-Semi-Conductor) composée d'une électrode métallique disposée sur un oxyde métallique, l'isolant du substrat (semi-conducteur).



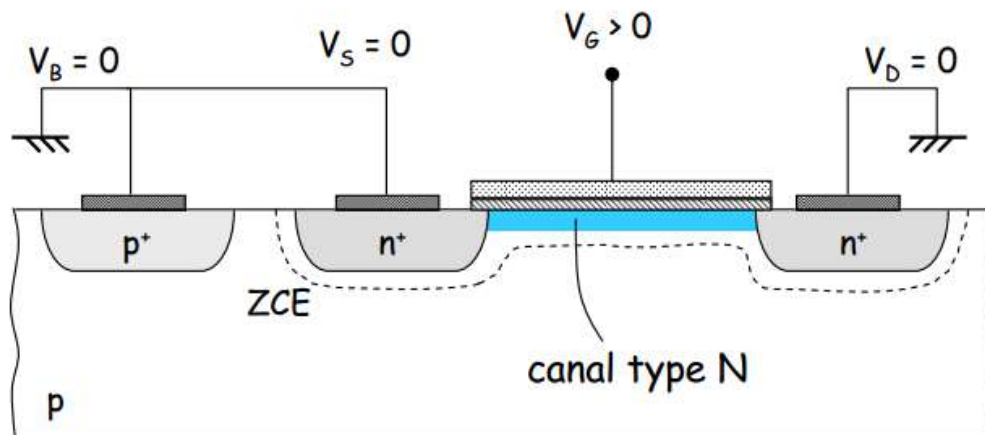
Le semi-conducteur est ici dopé, c'est-à-dire que ses impuretés sont remplies ou non d'électrons. Un substrat peut être de deux types différents :

- Le type P lorsqu'il est en déficit d'électrons.
- Le type N lorsqu'il est en surplus d'électrons.

On nomme la zone située entre la source, le drain et la grille une porte.

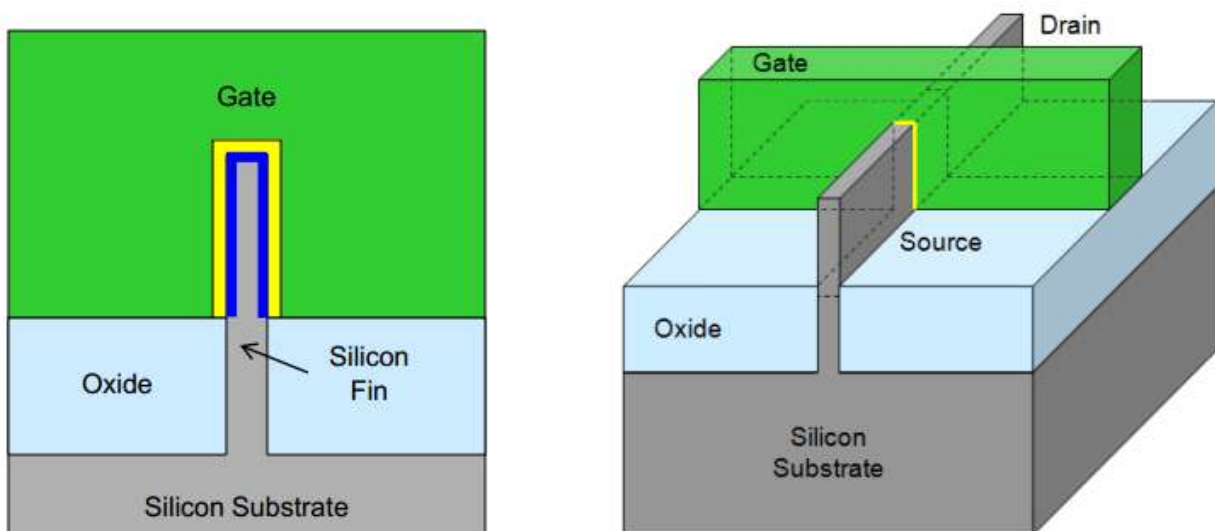
Lorsque la tension de la grille (V_G) est à 0, les électrons contenus dans le substrat restent dispersés, le transistor est donc à l'arrêt et il ne permet pas au courant de passer (la porte est « fermée »). Il reste toutefois un courant résiduel occasionnant une petite perte.

Lorsque $V_G > 0$, les électrons sont attirés vers la grille, et restent bloqués entre l'isolant, la source et le drain, créant un canal de type N ce qui permet au courant de passer (la porte est « ouverte »). Toutefois on observe une perte de courant, les électrons (du courant) étant quelque peu attirés dans le substrat de type P.



2) Les particularités du FinFET

Ces transistors tridimensionnels nommés tri-gate ou FinFet se caractérisent par l'abandon de la structure planaire (bidimensionnelle) qui est à la base de non seulement tous les ordinateurs, les téléphones mobiles et l'électronique grand public à de jour, mais aussi les commandes embarquées à bord des véhicules, de l'avionique, des appareils ménagers, des appareils médicaux et virtuellement des milliers d'autres appareils depuis des décennies.



Les transistors 3D tri-gate marquent une évolution majeure du transistor. En effet, le transistor subit une modification importante de sa structure :

Il n'a plus ici une porte planaire mais 3 portes créées par la mise en place d'un Fin (source + drain) sous la forme d'un aileron.

Une porte étant une zone où l'on crée un canal, ce procédé rend ainsi l'attraction des électrons vers le canal plus fort. Ce contrôle supplémentaire permet la transmission d'autant de courant que possible lorsque le transistor est en mode actif (dans un souci de performances) et aussi proche de zéro que possible quand il est en mode éteint (pour limiter la consommation électrique).

Cette configuration, permet de placer si on le veut plusieurs fins (sources et drains) commandé par une même porte, avec l'avantage d'avoir des tensions d'alimentation différentes pour chaque source.

Il faut savoir qu'il y a une différence entre les FinFet et le tri-gate d'Intel, en effet, un FinFet peut être un dual-gate (ayant une grille de chaque côté du substrat mais pas au-dessus) ou un tri-gate. Intel a surtout fait une bonne promotion de son produit, présentent un cout de fabrication bien plus bas que celui des dual-gate, qui ne sont que très peu utilisés d'ailleurs.

Ces transistors utilisent pour leur part une base dite SOI (Silicon-On-Insulator), composé d'une couche de silicone (semi-conducteur), une couche de silicone oxydé (microélectronique) ou couche de saphir (hautes fréquence) le tout surmonté d'une couche de silicium. Cette base permet un gain de performance de 20 à 35 % par rapport au MOS.

3) Etapes principales de la fabrication d'un FinFET (sans SOI)

1. Substrat :

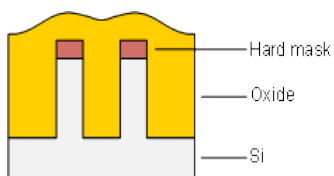
On pose tout d'abord la base du FinFET qui est un substrat dopé p avec, par exemple, du silicone dessus (hard mask en anglais).

2. Gravure du Fin



Les ailettes sont formées dans un processus de gravure très précis. Dans un transistor de 22 nm, celle-ci fait de 10 à 15 nm de haut.

3. Dépôt d'Oxide

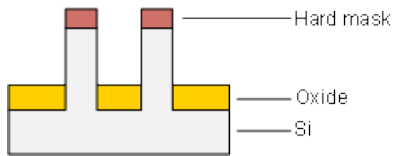


Dans cette étape, et dans le but d'isoler les ailettes l'une de l'autre, on dépose de l'oxyde qui va remplir jusqu'en haut le transistor.

4. Aplatissement

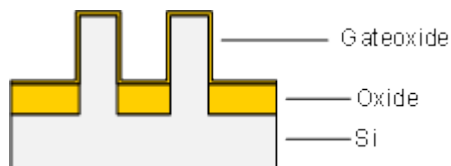
Ici, le dépôt d'oxyde est aplani par un procédé mécanique chimique qui va s'arrêter lorsqu'il rencontrera le silicium (hard mask).

5. Réduction de l'oxyde



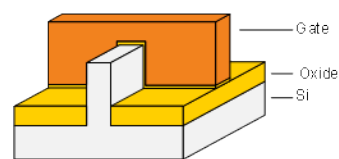
Il y a à nouveau une gravure pendant cette étape pour avoir une isolation latérale.

6. Oxydation de la grille



De l'oxyde de grille est déposé au-dessus des ailettes grâce à une oxydation thermique afin d'isoler le canal de la grille. Comme les ailettes sont toujours connectées en dessous de l'oxyde, on pose aussi un implant à la base de l'ailette pour créer une jonction de dopant et compléter l'isolation

7. Pose de la porte



Une porte dopée n est finalement déposée sur le haut des fins

Les avantages du transistor FinFET

1) Un procédé de fabrication simplifié

Tout d'abord, le procédé de fabrication de ce type de transistor est grandement simplifié par rapport aux générations antérieures.

Prenons l'exemple de la société française Soitec, la complexité de fabrication de l'aileron de silicium au cœur de la partie active de son transistor Tri-Gate est réduite car la hauteur du Fin et son isolation sont prédéfinies par la couche de silicium superficielle du substrat.

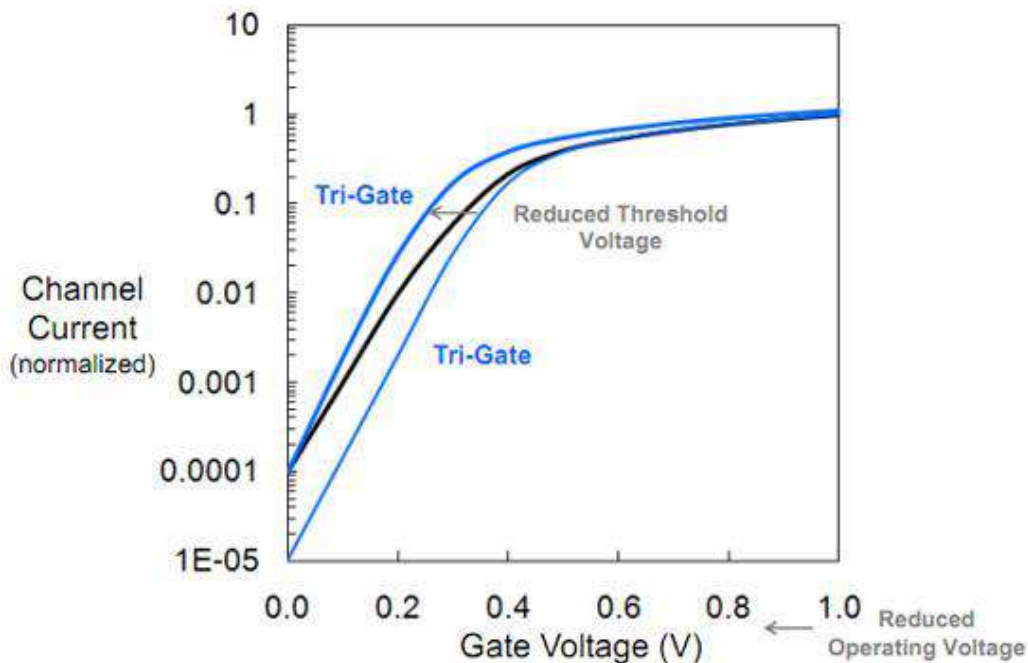
Comme cette société utilise aussi des substrats SOI (une couche de silicium monocristallin séparée d'une plaque de support par une couche de SiO₂ amorphe) qui améliorent les performances et réduisent grandement la consommation des circuits électriques, on peut aussi dire que le coût globale du procédé Tri-Gate est plus compétitif sur SOI que sur silicium massif. L'entreprise Soitec a réussi à supprimer 4 étapes de lithographie critique et 55 étapes de procédée de fabrication des circuits intégrés. Sur toute la chaîne de fabrication, cela signifie des coûts de recherche et développements réduits, une meilleure productivité et des frais limités. Et tout cela pour obtenir un produit encore plus performant au niveau des caractéristiques électroniques et énergétiques qu'auparavant.

Intel aussi développe ses propres puces mais comme ils ne possèdent pas le savoir-faire de cette entreprise française, ils estiment que la fabrication de transistors Tri-Gate leur coûtera uniquement de 2 à 3% plus que pour l'ancienne génération. Au vu des performances, il ne s'agit pas là d'un mauvais investissement pour ce leader dans le domaine du micro-processeur, bien au contraire !

On peut tout de même remarquer grâce à ces deux exemples de développement du FinFET que les entreprises françaises sont encore très innovantes et donc, un avantage économique non négligeable pour notre pays.

2) Des caractéristiques énergétiques et électroniques hors du commun

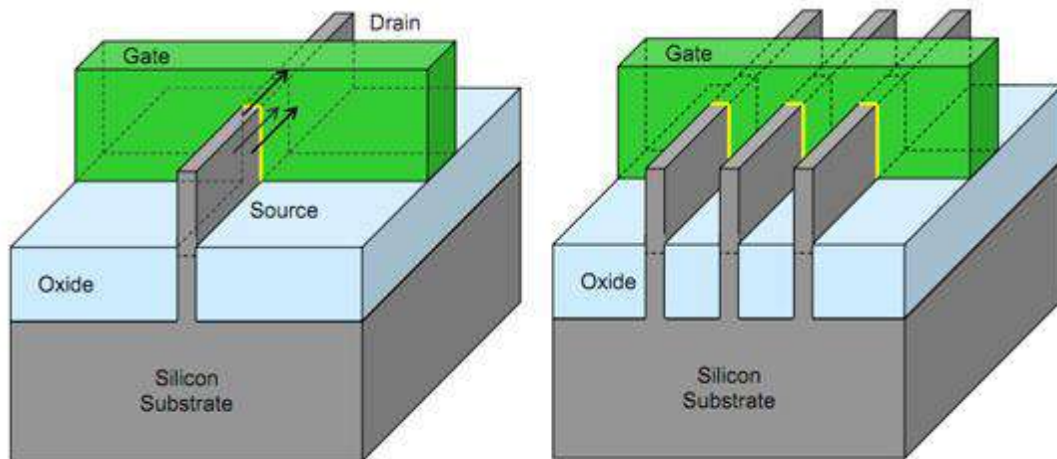
Comme expliqué dans la première partie, les fuites de courant seront réduites grâce à la grande surface d'échange du transistor Tri-Gate, et ce, même à l'arrêt. Voici une courbe d'Intel vantant les mérites de son transistor FinFET.



On voit sur la courbe bleue de droite les gains que l'on peut obtenir sur les courants de fuite en gardant une tension identique. La courbe bleue de gauche nous montre elle que la tension activant le transistor peut être réduite. C'est donc la consommation de charges qui est ici plus faible ! Le gain observé en pratique est de 37% sur la rapidité du transistor à bas voltage, 18% à haut voltage. Ou sinon, pour une vitesse égale, un gain de 0,2V sur la tension d'alimentation du transistor.

Sur la simple base de la comparaison, le gain de rapidité allait de 14 à 22% entre les transistors « traditionnels » de 45nm à ceux de 22nm.

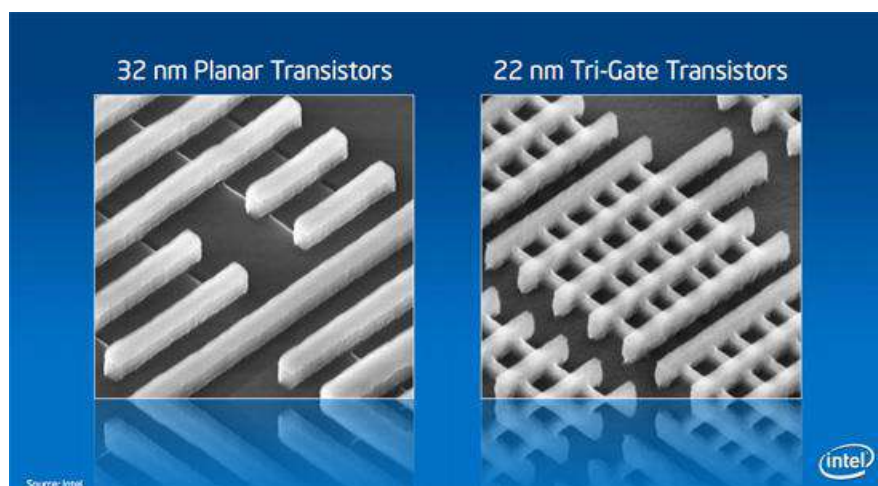
Un des autres avantages lié à la géométrie 3D de ce type de transistor est l'on peut également augmenter le nombre de fins. C'est ce que l'on peut voir sur l'illustration ci-dessous avec à gauche un transistor Tri-Gate utilisant un seul fin, et, à droite, un autre utilisant trois fins pour augmenter encore plus la performance du transistor, mais au détriment de la densité.



Pour résumer, on peut dire qu'en plus de réduire la consommation d'énergie, le transistor Tri-Gate permet d'augmenter l'efficacité du processeur. Ce transistor présente donc énormément d'avantages !

3) Une taille réduite

A titre indicatif et éducatif, prenons un banal point, oui, celui qui finit les phrases sur Word. Et bien, sur la surface qu'occupe ce point, plus de 6 millions de transistors Tri-Gate peuvent tenir ! Impossible de distinguer un tel transistor à l'œil nu, il faut un microscope. Voici deux images observées au microscope électronique : à gauche, des transistors traditionnels et à droite, des transistors Tri-Gate. On remarque bien que ces derniers sont plus petits.



Selon Intel, il est possible de mettre 2 fois plus de FinFET que de transistors traditionnels dans le même espace. Car il ne faut pas oublier la particularité de ce transistor, sa verticalité !

Les applications du FinFET

1) Introduction

Dorénavant, les transistors 3D sont de plus en plus utilisés dans le monde notamment grâce à Intel. En effet, Intel, numéro un de microprocesseurs a été un des acteurs principaux dans la création de ces transistors.

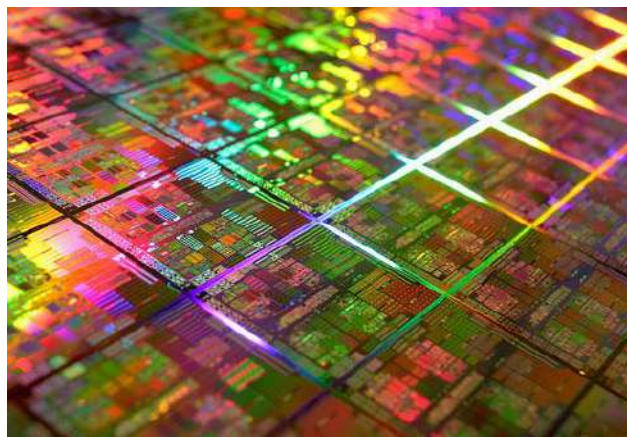
Cependant, Soitec est également présent dans le monde des transistors 3D. En effet, l'entreprise française jouent un rôle capital dans le développement de la photonique sur silicium. Les circuits photoniques intégrés, dans lesquels la lumière est transmise par des guides d'ondes gravés sur des films SOI, peuvent être combinés à des modulateurs, à des multiplexeurs, à des filtres et à d'autres composants optiques essentiels.

Les principales utilisations des transistors FinFET, aussi bien Intel que Soitec, sont dans les :

- Téléphones portables et tablettes
- Microprocesseurs haute performance
- Ordinateurs portables
- PC de bureau
- Consoles de jeux
- Domaine automobile et commandes d'affichage
- Modules de transmission RF et sans fil
- Applications d'éclairage

Les transistors à effet de champs peuvent être, comme nous l'avons dit précédemment, utilisés dans les microprocesseurs haute performance.

En effet, les transistors FinFET sont principalement utilisés en électronique numérique, réalisation d'opérations logiques. Ils peuvent être utilisés pour faire des blocs analogiques dans des circuits numériques (régulateur de tension par exemple).



Ci-dessus, la photo d'un circuit d'un microprocesseur avec des portes logiques composé de transistors.

Ils sont aussi utilisés pour faire des commandes de puissance (moteurs) et pour l'électronique haute tension (automobile).

Leurs caractéristiques s'apparentent plus à celles des tubes électroniques. Ils offrent ainsi une meilleure linéarité dans le cadre d'amplificateurs Hi-Fi, donc moins de distorsion.

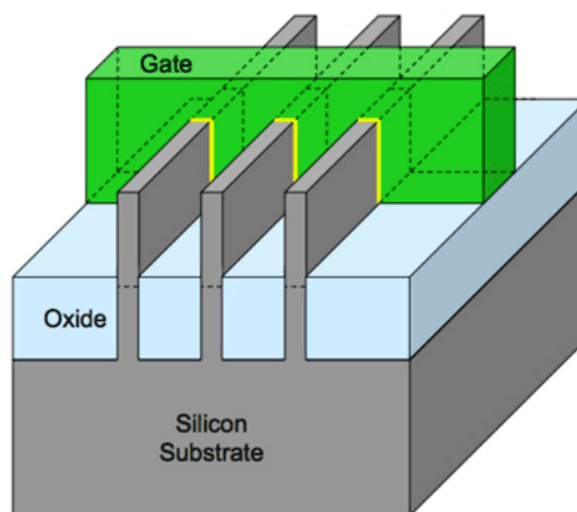
Après de nombreuses années de recherche, vers milieu 2011, Intel conçoit les transistors 3D avec une micro architecture Ivy Bridge.



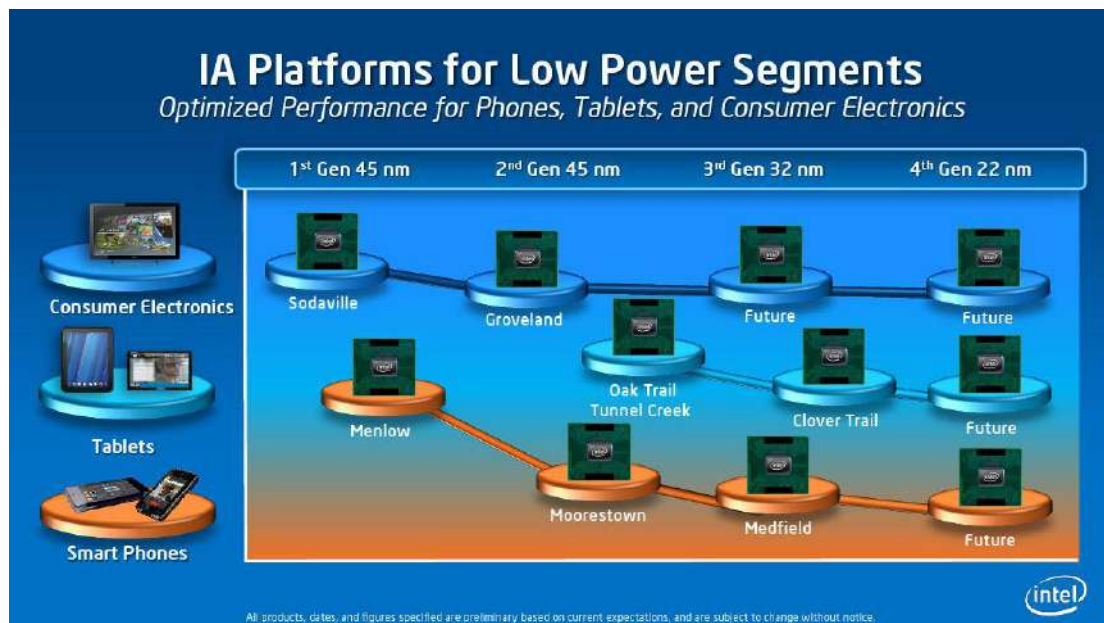
Tout d'abord, les transistors 3D ont été destinés aux ordinateurs de bureau et aux serveurs. Puis dans un second temps, des puces plus denses sur le marché des appareils mobiles, un domaine où l'entreprise est à la peine, distancée par les sociétés proposant des processeurs à architecture ARM (Advanced Risc Machine).

Les microprocesseurs 22 nm (au lieu de 32nm), appelé aussi processeur Ivy Bridge ont été les premiers à en bénéficier. En effet en Mai 2011, lors d'une conférence de presse, Intel a fait la première démonstration de ce processeur sur PC portable, serveur et PC de bureau.

22 nm Tri-Gate Transistor



Si les PC de bureau bénéficieront de la technologie Intel 3D Tri-Gate via Ivy Bridge, ce sont surtout les appareils mobiles, notamment les PC portables, netbooks, les smartphones et tablettes qui devraient au mieux en tirer partie : tout simplement parce qu'ils consomment moins d'énergie et que plus la demande en énergie est faible, plus les gains en performances et autonomie sont importants avec des transistors Tri-Gate.



Nous allons donc nous intéresser plus particulièrement aux transistors FinFet dans les smartphones, ordinateur portable et dans les tablettes.

2) Utilisation dans les smartphones, ordinateurs portables et tablettes

L'avantage des transistors FinFET serait de fournir aux appareils portables, secteur de plus en plus stratégique pour les fabricants et de plus en plus demandé par les clients, plus de puissance en épuisant moins les batteries.

"Les gains en performance et en économies d'énergie apportés par ces transistors ne ressemblent à rien de ce qu'on a vu jusqu'ici, a assuré un responsable d'Intel, Mark Bohr. Cela dépasse de loin ce qu'on voit normalement quand on passe d'une génération à une autre" de microprocesseurs.

De plus, dans des documents publiés, le groupe Intel affirme que ces innovations permet d'obtenir un gain de vitesse de 22% à 65% par rapport aux transistors traditionnels, tout en réduisant le problème des courants de fuite grâce à l'apport de Tri-Gate qui permet des transitions d'état des transistors plus efficaces par rapport aux transistors classiques.

Cela permettra à Intel de concurrencer plus efficacement dans le smartphone et la tablette monde. En effet, les transistors 3D 22nm d'Intel offrent une augmentation des performances de 37% à basse tension contre les transistors traditionnels. "Ce gain signifie que les transistors sont idéales pour une utilisation dans les petits appareils portables, qui fonctionnent en utilisant moins d'énergie pour «switch» d'avant en arrière. Alternativement, les nouveaux transistors consomment moins de la moitié de la puissance quand à la même performance que 2D transistors planaires sur puces 32nm », selon Intel.

CONCLUSION

Pour conclure, nous pouvons dire que tout d'abord, il existe plusieurs acteurs à des échelles différentes de la technologie dans le domaine des transistors FinFET, comme l'entreprise française Soitec et le géant Intel.

Intel a dans un premier lieu créé ces transistors 3D avec une micro architecture Ivy Bridge, puis cette idée a été suivie par l'entreprise Soitec.

Ces transistors vont petit à petit remplacer les transistors traditionnels. En effet, de part un procédé de fabrication simplifié, qui est donc caractéristique d'une baisse de prix et une baisse de temps de fabrication. Mais également des caractéristiques énergétiques et électroniques jamais vues jusqu'à aujourd'hui grâce à sa structure en 3 dimensions. De plus, un dernier avantage réside dans les FinFet, sa taille. Il est désormais possible de mettre 2 fois plus de FinFET que de transistors traditionnels dans le même espace.

Ces transistors 3D, contrairement aux classiques, ne sont pas utilisés spécialement pour les PC de bureau. En effet, ces transistors ont beaucoup de domaines d'applications comme l'automobile, les jeux vidéo, les applications d'éclairage ... etc, mais les principaux usages de ceux-ci sont les appareils portables (ordinateur et téléphone) et les tablettes.