

# Contenu de l'unité

## [La nano dans l'électronique]

Nom des auteurs : [Christopher Fischer, Andrea Deißberger, Peter Grambow]

Date de dernière modification : [05.11.2021]

### La nano dans le domaine de l'électronique a une histoire de 56 ans environ.

#### Première introduction

L'utilisation de la nano dans l'électronique a une longue histoire. L'un des tournants caractéristiques a été une déclaration importante de Gordon Moore il y a environ 56 ans. En tant que l'un des cofondateurs d'Intel (l'une des plus importantes sociétés de semi-conducteurs au monde), il a intégré son idée de croissance industrielle dans ce domaine dans une règle simple. Il prévoyait que la capacité de stockage d'un CI (circuit intégré, appareil électronique important) augmenterait d'un facteur de deux tous les deux ans environ. C'était une déclaration incroyable à l'époque, car la plupart des gens n'avaient aucune idée de la façon dont cela pourrait être possible. Les conditions limites de cette règle sont toujours le moteur de l'industrie électronique dans le monde entier. La capacité de stockage maximale et la vitesse de transmission des données continuent d'augmenter. Sans ces développements, les smartphones ou les ordinateurs n'existeraient pas.

#### Pertinence pratique – C'est pour cela que vous aurez besoin de connaissances et de compétences

Les produits électroniques modernes, tels que les smartphones et les tablettes, ne fonctionneraient pas sans une connaissance approfondie des nanotechnologies. Par conséquent, il est important de comprendre la signification de la taille des structures dans ce domaine.

#### Aperçu des objectifs d'apprentissage et des compétences

L'un des facteurs les plus importants de l'électronique de nos jours est la taille. Produire des structures aussi petites que possible est le seul moyen de contrôler de grandes quantités de données, comme dans un smartphone ou une tablette. Vous apprendrez les principales caractéristiques dans le champ de l'électronique. Quels sont les développements les plus importants aujourd'hui et quelles sont les limites physiques à l'avenir.

Objectifs d'apprentissage	Objectifs connexes
LO_ Exemples dans l'électronique 01	FO_Capacité de stockage il y a 20 ans et maintenant_01_01 FO_Caractéristiques des ordinateurs d'aujourd'hui et il y a 30 ans_01_02 FO_Smartphones et cabines téléphoniques_01_03 FO_Exemples de capteurs actuels/phyphox_01_04
LO_ Le transistor, l'outil magique 02	FO_Qu'est-ce qu'un ordinateur ?_02_01 FO_Qu'est-ce qu'un CI ?_02_02 FO_Qu'est-ce qu'un transistor ?_02_03

LO_La taille est importante, en particulier dans l'électronique 03	FO_Les plus petites structures électroniques visibles à l'œil nu_03_01 FO_Limitation des microscopes optiques_03_02 FO_L'un des défis actuels de l'électronique est de construire des structures aussi petites que possible. Comment cela fonctionne-t-il ? _03_03 FO_Explication de la loi de Moore_03_04 FO_Où sont les limites ? Que pouvons-nous apprendre des Grecs ? _03_05
--	---

## 1. Exemples dans l'électronique

Dans cette section, nous voulons comprendre l'impact des nanotechnologies sur les applications électroniques. Une bonne façon d'aborder ce sujet est d'examiner comment les ordinateurs sont devenus si puissants en si peu de temps. Ainsi, l'ordinateur est essentiellement construit à partir de plusieurs « puces », également appelées « circuits intégrés ». Nous en parlerons plus en détail plus tard. Pour l'instant, il suffit de savoir que les éléments clés de ces puces sont les « transistors ». Ce sont des blocs de construction qui nous permettent de contrôler si un courant électrique passe ou non à travers une certaine ligne conductrice. Il y a donc deux cas pour l'ordinateur : courant électrique ou pas de courant électrique. Ceci est interprété comme 1 et 0 — les chiffres **binaires**, ce qu'on appelle les « bits ». Ces deux chiffres codent toutes les informations utilisées par un ordinateur. Pour le dire autrement, un ordinateur décompose chaque problème jusqu'au degré où il doit juste gérer ces 1 et 0.

### Important

#### Concept de base d'un ordinateur

Un ordinateur décompose chaque problème jusqu'au point où il doit juste traiter des 1 et 0. Cela se fait en contrôlant si un courant circule (1) ou non (0).

Après cette discussion, nous pouvons comprendre qu'un nombre croissant de transistors sur la puce s'accompagne d'une plus grande capacité de calcul ou, en général, d'un traitement des données plus rapide. De toute évidence, ces exigences sont devenues de plus en plus importantes dans notre monde moderne, ce qui a conduit à une recherche et un développement intenses de ces puces. Cela semble très logique maintenant, mais à l'époque, cette tendance n'était pas évidente. Il est donc encore plus remarquable, que Gordon E. Moore ait prédit non seulement le nombre croissant de transistors sur une puce, mais l'ait aussi quantifié correctement. Il déclarait que le nombre de transistors d'un circuit intégré doublerait environ tous les deux ans. Le schéma ci-dessous prouve que sa prédiction s'est révélée correcte.

### Important

#### Loi de Moore

Le nombre de transistors donne à une puce informatique sa vitesse de traitement. Le nombre de ces transistors sur une puce double environ tous les deux ans.



exemple comment tous les superbes jeux vidéo réalistes d'aujourd'hui fonctionnent de manière si fluide et sans problèmes.

### Se rappeler

#### Caractéristiques des ordinateurs au fil des ans

Le CPU traite toutes les données en arrière-plan, ce qui fait fonctionner votre ordinateur. Les performances de ces puces se sont considérablement améliorées. Au début il suffisait de contrôler les feux de signalisation, de nos jours les ordinateurs peuvent projeter des jeux vidéo ou des films très fluides sans aucun problème.

Jusqu'à présent, nous avons donc acquis des connaissances sur la miniaturisation et l'optimisation des performances du matériel informatique. Pourtant, il ne s'agit pas d'une discussion qui n'intéresse que les spécialistes. L'énorme impact sur notre vie quotidienne apparaît clairement lorsque nous examinons la situation d'il y a 30 ans et celle prévalant maintenant. En Europe, la plupart des habitants au moins avaient un téléphone chez eux. Mais, parfois, passer des appels téléphoniques était une tâche difficile, car il fallait être à la maison pour appeler quelqu'un et il fallait essentiellement avoir la chance d'être à la maison lorsque l'on recevait un appel. C'est alors que les cabines téléphoniques ont représenté une solution à ce problème. Par conséquent, les personnes pouvaient s'appeler lorsqu'elles n'étaient pas chez elles. Sauf si la cabine téléphonique était occupée, si vous n'aviez pas de monnaie, si vous aviez oublié le numéro de téléphone ou si vous ne trouviez tout simplement pas de cabine. Considérant tous ces inconvénients, aucune explication ne devrait être nécessaire pour expliquer l'avancée triomphale des smartphones. L'aspect important ici est que l'utilisation des téléphones va au-delà des appels téléphoniques. Fondamentalement, le développement dont nous avons discuté au début du sujet est arrivé à un point tel que nous avons aujourd'hui dans nos poches un million de fois la puissance de calcul des anciens PC. Nous pouvons donc dire que les nanotechnologies ont permis de concentrer toute cette efficacité dans des puces de la taille d'une pièce d'un cent, avec laquelle vous activiez la cabine téléphonique à l'époque.

Outre l'énorme puissance de calcul des appareils miniaturisés modernes, vous pouvez trouver plusieurs capteurs sur le même petit espace. Voyons donc rapidement quels types de capteurs existent et ce qu'ils font. Les capteurs de position indiquent la position de votre smartphone. À cet égard, le magnétomètre pointe toujours vers le nord, le capteur de proximité noircit votre écran lorsque vous prenez un appel téléphonique, afin que vous ne touchiez rien accidentellement sur votre écran et le GPS (Global Positioning System) utilise des satellites pour vous localiser. Un autre type de capteur analyse votre mouvement en détectant la vitesse et la rotation. Le gyroscope indique à l'appareil où il pointe dans une pièce tridimensionnelle. Les accéléromètres détectent la vibration et l'inclinaison de l'accélération, ce qui permet de voir votre vitesse dans les applications de navigation ou de changer l'orientation du téléphone lorsqu'il est tourné. De plus, de nombreux capteurs environnementaux sont courants dans les smartphones modernes. Leur fonction est assez explicite : Thermomètre, hygromètre, baromètre, détection de la lumière ambiante. Nous pouvons imaginer qu'une image assez claire de notre vie quotidienne est brossée lorsque plusieurs de ces capteurs fonctionnent ensemble. D'un autre côté, cela présente de nombreux avantages. Par exemple, lorsque le gyroscope et le magnétomètre fonctionnent ensemble, des inclinaisons et des rotations peuvent être ajoutées aux cartes, ce qui nous permettra d'améliorer la navigation à l'avenir. L'application « phyphox » donne un aperçu pratique de tous les capteurs que vous emportez avec vous. L'application vous permet de réaliser des expériences physiques directement avec votre smartphone. Par exemple, si vous vous êtes déjà demandés dans un ascenseur quelle est la vitesse de votre mouvement actuel, cette application vous y aide. En utilisant le baromètre de votre smartphone, la pression atmosphérique et sa variation peuvent être détectées, ce qui permet de tirer une conclusion concernant la vitesse. Réaliser différentes expériences donne vraiment une idée de la précision avec laquelle votre smartphone détecte votre environnement et comment il a pu réunir de nombreux éléments tels que des cartes et des trackers de fitness sur un seul écran.

### Important

#### Exemples de capteurs actuels

Les smartphones actuels sont équipés de nombreux capteurs nanométriques, qui permettent une haute fonctionnalité des appareils.

## 2. Le transistor, l'outil magique

Au tout début, nous avons brièvement évoqué le fonctionnement d'un ordinateur. Examinons ce concept étape par étape, en partant de l'ensemble jusqu'au transistor.

De toute évidence, vous pouvez écrire des documents, envoyer des e-mails à vos amis ou naviguer sur le web mondial avec votre ordinateur. Mais que se passe-t-il réellement dans cette machine pour faire fonctionner ces choses ? Exprimé de manière très simple, un ordinateur ne manipule que des données. Dans ce contexte, les informations sont stockées, récupérées et traitées. Néanmoins, de quel type de données ou d'informations parlons-nous ? Dans le passé, l'entrée et la sortie étaient limitées à des chiffres, ce qui explique également pourquoi le nom de l'appareil est dérivé du verbe « calculer ». Même si les PC modernes peuvent également gérer des lettres ou des sons, ceux-ci sont à leur tour codés avec des chiffres. Par conséquent, l'ordinateur est une machine à calculer « simple » jusqu'à ce jour. Nous devons nous rappeler à ce stade que nous utilisons le système binaire pour ce codage, qui n'utilise que des 1 et des 0. Par exemple, chaque lettre est codée avec un nombre défini et une série de ces chiffres binaires. Ainsi, chaque film, image ou chanson devient une série de 0 et de 1 pour votre PC.

Maintenant que nous connaissons le principe de fonctionnement de base d'un ordinateur, une question en suspens est la suivante : Comment générer ces 0 et 1 ? Cela peut être imaginé en considérant l'ordinateur comme un ensemble de commutateurs. Chacun d'entre eux peut être activé ou désactivé, ce qui est défini comme 0 ou 1. L'augmentation du nombre de commutateurs signifie que vous augmentez le nombre de 0 et 1.

### Définition

#### Qu'est-ce qu'un ordinateur

Un ordinateur est une machine à calculer. L'appareil ne fonctionne qu'avec des 0 et des 1. Ces derniers sont créés avec des interrupteurs miniaturisés.

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un ordinateur, nous devons nous poser la question suivante : À quoi ressemblent ces circuits contenant les interrupteurs ? Quelle est la différence par rapport à ceux que nous connaissons d'après nos cours de physique à l'école ou une boîte à fusibles à la maison ? Ces derniers sont constitués de blocs de construction discrets tels que des transistors, des diodes, des condensateurs et des résistances. D'autre part, le circuit de votre PC prend toutes les fonctions simples et discrètes de tous les appareils et les intègre sur une seule puce. C'est la raison pour laquelle ils sont appelés circuits intégrés. Si vous avez déjà ouvert un tel appareil électrique, vous avez pu les voir sous la forme de petits carrés ou rectangles noirs comme sur l'image ci-dessous.

L'une de ces boîtes noires contient essentiellement une seule puce de silicium à l'intérieur, sur laquelle sont imprimés tous les blocs de construction mentionnés ci-dessus. Le fait qu'il soit aujourd'hui possible d'apporter des milliards de composants électroniques sur ces semi-conducteurs a ouvert la voie à des microprocesseurs ne dépassant pas quelques millimètres carrés. Vous pouvez imaginer qu'avec la miniaturisation des circuits intégrés, le développement de technologies de traitement physique et chimique innovantes est devenu de plus en plus intéressant. Juste pour que cela soit mentionné : C'est à ce moment-là que les nanotechnologies rencontrent à nouveau les différentes disciplines de la science, pour produire de superbes appareils si modernes. Et nous savons déjà que les efforts de nombreux développeurs ont porté leurs fruits, en nous rappelant à nouveau le graphique de la loi de Moore. Nous avons vu que le nombre de transistors sur une seule puce a considérablement augmenté et continue d'augmenter jusqu'à aujourd'hui. Actuellement, nous devrions comprendre qu'avec un plus grand nombre de ces structures sur la puce, les microprocesseurs peuvent atteindre de meilleures

performances, car ils peuvent gérer plus de 0 et de 1 en même temps. Et pour implémenter un nombre croissant de composants sur une puce de même taille, tous ces blocs de construction individuels doivent réduire leur taille. Pour cette raison, c'est un bon moment pour regarder de plus près le transistor, qui peut être compris comme notre interrupteur miniaturisé.

<b>Définition</b>
-------------------

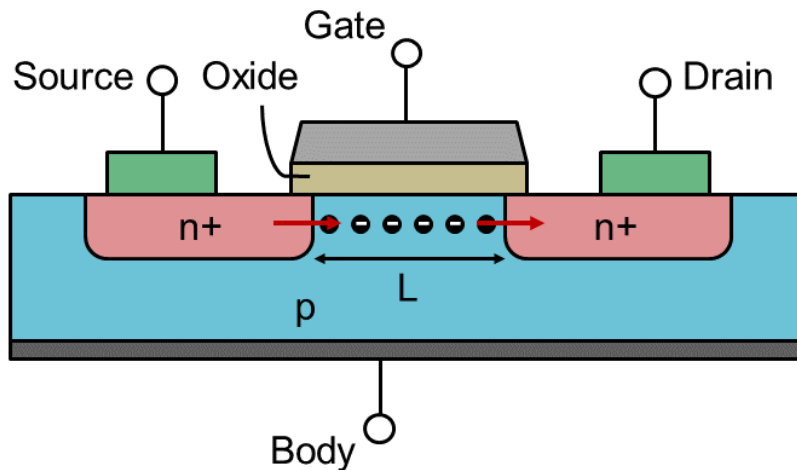
<b>Qu'est-ce qu'un CI</b>
---------------------------

Un circuit intégré est constitué de composants électroniques discrets d'une seule puce de silicium.
---

Il existe différents types de transistors. Nous voulons comprendre la structure et le principe de fonctionnement du « MOSFET ». Le nom MOSFET signifie Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor et nous indique déjà la structure de l'appareil. La base de l'appareil est un matériau plat de substrat de silicium, qui contient des impuretés voulues. Il est appelé « dopage ». Ce matériau en substrat peut être dopé en p (NMOS) ou dopé en n (PMOS). Ces types de matériaux diffèrent par leurs porteurs de charge, qui sont des électrons pour les NMOSFET et des trous pour les PMOSFET. Notre discussion portera sur les NMOSFET. Dans ce cas, le substrat de silicium dopé en p (vous pouvez l'imaginer comme une région chargée légèrement en positif) est dessiné en bleu sur l'image ci-dessous. Dans ce matériau se trouvent deux zones rouges dopées avec un type d'ion différent. Cela génère des régions d'un matériau de type n (vous pouvez l'imaginer comme une région chargée légèrement en négatif), appelées « source » et « drain ». La zone située entre les deux est appelée « canal » et est recouverte d'une couche d'oxyde isolant. Au-dessus de cette couche d'oxyde se trouve un matériau métallique conducteur, appelé « grille ».

Le concept de base d'un MOSFET est de contrôler le flux d'électrons entre la source et le drain, qui est commandé par une tension entre la source et le drain. Le flux d'électrons est ensuite contrôlé en appliquant une tension à la grille, ce qui induit un champ électrique et influence les porteurs de charge dans notre matériau dopé. Ce dernier a un effet sur la façon dont les bons ou les mauvais électrons peuvent être déplacés de la source au drain. Néanmoins, plongeons un peu plus en profondeur dans ces processus étape par étape.

Tout d'abord, nous voulons décrire l'état « off » de notre commutateur. Lorsqu'aucune tension n'est appliquée à la grille, aucun porteur de charge libre (électrons dans notre cas) n'est présent dans le canal. Par conséquent, aucun électron ne se déplace de la source au drain et il n'y a pas de courant. Avec ce cas simple, nous avons déjà défini le 0 pour l'ordinateur. Mais comment obtenons-nous les 1 ? Ce que nous devons faire, c'est appliquer une tension à la grille, appelée tension de grille. Cette tension dans le cas des NMOSFET est toujours positive. Pour les processeurs modernes, une tension de grille d'environ 0,2 V peut suffire, ce qui est très faible. Pour avoir une idée : Une pile domestique normale fonctionne à 1,5 V, une sonnette à 8 V et une batterie de voiture à 12 V. Nous n'avons donc vraiment pas besoin de beaucoup d'énergie. Mais pourquoi avons-nous besoin de cette tension de grille ? Ce qui vient avec cette tension, c'est le champ électrique qui affecte le matériau de substrat dopé en p même à travers la couche d'oxyde. Cela induit des trous dans le substrat massif de type p à proximité de la couche isolante à repousser. Il y a donc de moins en moins de trous à cette surface avec une tension de grille croissante. Il est logique que nous appelions cette zone « zone d'appauvrissement ». Après cela, les électrons des zones de type n (la source et le drain) sont attirés dans cette ancienne zone d'appauvrissement et nous avons généré un canal avec une amplitude de porteurs de charge négative. C'est ce que nous appelons la « couche d'inversion ». Pour ne pas perdre son chemin, cette situation est illustrée dans le schéma ci-dessous.



Nous nous retrouvons maintenant avec un canal de type n entre la source et le drain également de type n. Cela permet aux électrons de circuler à travers le dispositif, représenté par les flèches rouges. Ainsi, nous avons atteint notre objectif et pouvons définir le chiffre 1 pour notre ordinateur. À propos : Nous pouvons imaginer que des tensions de grille plus élevées attirent plus de porteurs de charge, que la couche d'inversion s'élargit et que nous créons un canal qui peut potentiellement transporter plus d'électrons.

#### Définition

#### Qu'est-ce qu'un transistor

Le type le plus courant sur les circuits intégrés est le MOSFET (transistor à effet de champ à oxyde métallique-semi-conducteur). L'une des applications de ces transistors est de réaliser des 0 et des 1 dans les ordinateurs, comme nous l'avons décrit précédemment.

### 3. La taille est importante, en particulier dans l'électronique

Enfin, nous voulons avoir une idée de la taille réelle de ces circuits intégrés et transistors et des défis qui en découlent. Après l'observation schématique du MOSFET, le désir d'en voir un sur une puce s'est atténué. Pour une meilleure compréhension : Dans le tout premier texte, nous avons appris à quel point est petit un cheveu humain (50-80  $\mu\text{m}$ ) pour comprendre l'échelle nanométrique. Lorsque nous posons deux cheveux l'un sur l'autre, il devient très difficile ne serait-ce que de voir la coupe transversale. En fait, derrière cette section transversale se trouvent des milliers de MOSFET.

Examinons d'autres possibilités pour rendre visibles de très petites structures, par exemple au moyen d'un microscope optique. Cette discussion nous mènera également aux problèmes que nous rencontrons lors de la fabrication des MOSFET. Fondamentalement, en microscopie optique, un ensemble organisé spécifique de lentilles crée l'image agrandie d'un objet plus petit. Dans ce contexte, un faisceau lumineux traverse l'objet et les lentilles jusque dans l'œil. La question que vous pouvez maintenant vous poser est la suivante : Quelle pourrait être la taille d'un objet à cet égard ? Pour répondre à cette question, il faut savoir que les microscopes optiques fonctionnent dans la zone de longueur d'onde visible. Cela signifie qu'il n'y a qu'une plage définie et que la moitié de la longueur d'onde la plus courte est le plus petit objet que l'on puisse voir avec un tel microscope. Ou exprimé en d'autres termes : Deux lignes doivent être la moitié de la plus petite longueur d'onde distante l'une de l'autre, afin qu'elles puissent être distinguées. Cette loi est connue sous le nom de limite d'Abbe et est décrite par l'équation suivante :

$$d = \frac{1\lambda}{2NA}$$

Dans ce cas  $\lambda$  est la longueur d'onde, NA l'ouverture numérique (contenant l'indice de réfraction et l'angle de la lumière). Ainsi, vous pouvez atteindre la limite de résolution  $d$ , qui vous indique la distance entre les lignes pour pouvoir être distinguées. L'équation montre également comment les performances d'un microscope peuvent être améliorées : Soit en augmentant l'ouverture numérique, soit en utilisant des longueurs d'onde plus courtes.

La longueur d'onde de la lumière visible varie entre 380 et 780 nm, par conséquent, en utilisant l'équation d'Abbe, nous pouvons estimer la plus petite résolution possible d'un microscope optique à 200 nm. Pour cette estimation, nous supposons que la plus petite longueur d'onde est d'environ 400 nm et que l'ouverture numérique (NA) de l'air est d'environ 1.

### Se rappeler

#### Limitation de la résolution

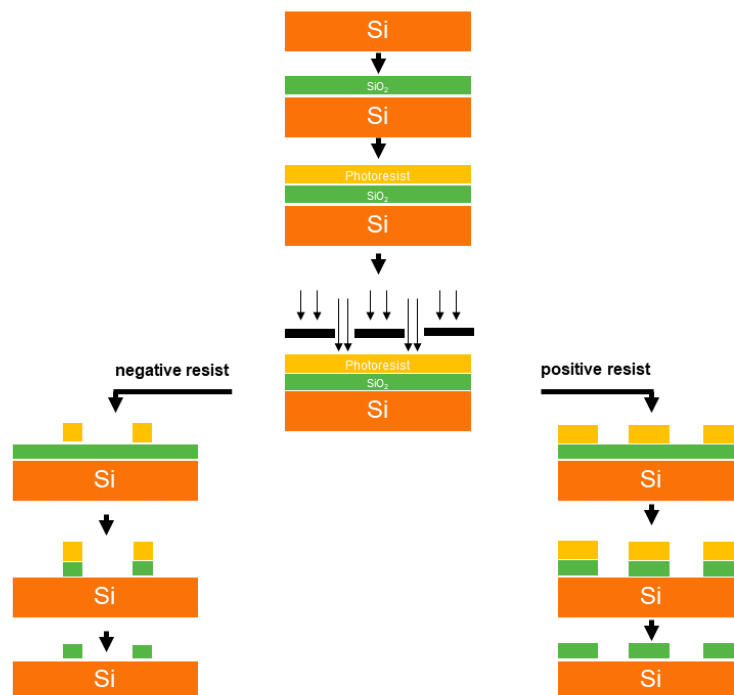
La limite d'Abbe est la formule pour la résolution en fonction de la longueur d'onde : Dans ce cas, une longueur d'onde inférieure permet une résolution plus élevée.

Le moment est bien choisi pour examiner la fabrication des puces. Comment développer quelque chose qui est trop petit pour être vu ? L'ère moderne utilise une procédure appelée « photolithographie ». Dans cette procédure, un motif d'un masque est transféré sur la surface d'une plaquette de silicium. Cette dernière est le substrat que nous avons déjà vu dans le schéma plus tôt. Le concept est très similaire au principe de fonctionnement de votre imprimante à domicile. La différence est que le jet d'encre est remplacé par un faisceau lumineux. Cela s'avère très utile lorsque nous créons nos structures extrêmement petites, car les molécules de colorant dépassent la longueur d'onde de la lumière plusieurs fois par leur taille.

### Définition

#### Photolithographie

Procédé d'impression de très petites structures sur une surface en silicium. La longueur d'onde doit être courte pour obtenir une résolution plus élevée.



Les étapes de la photolithographie sont illustrées dans le schéma ci-dessus. Au début, le substrat de silicium est recouvert d'une couche de dioxyde de silicium. De la résine photosensible est ensuite appliquée sur cette couche par un procédé appelé « revêtement par centrifugation ». Le processus

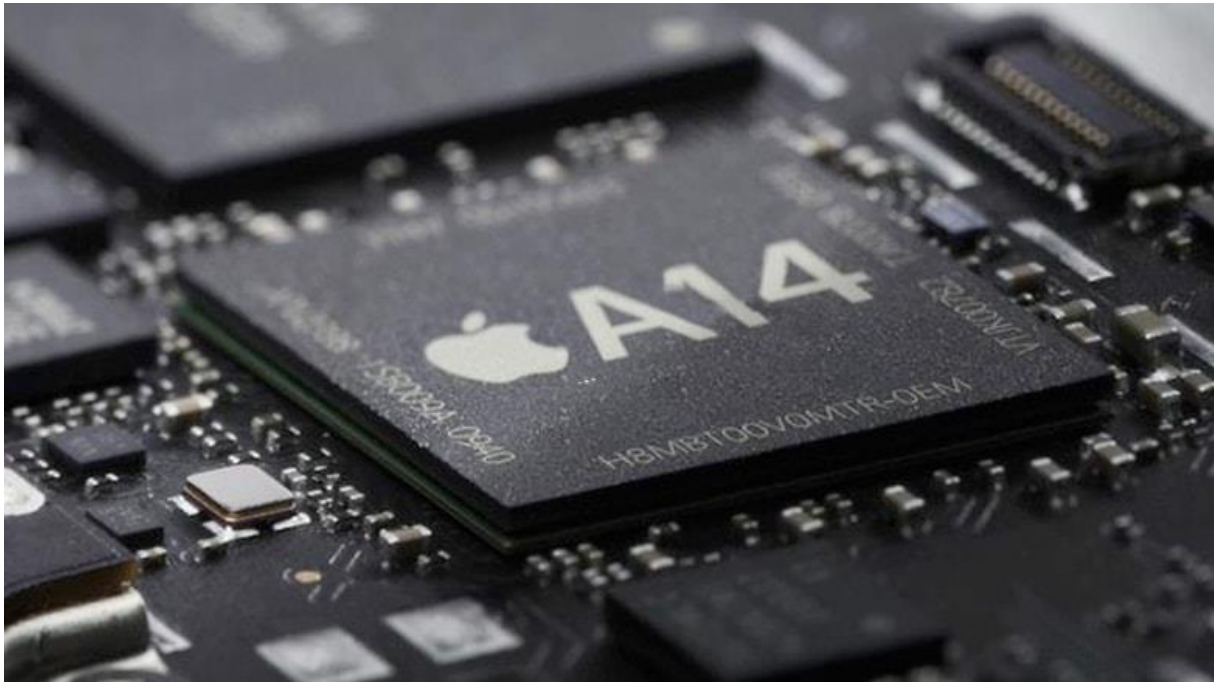


d'impression proprement dit peut maintenant avoir lieu : Un masque avec un certain motif est placé au-dessus du système et est exposé à des faisceaux lumineux. Par conséquent, seuls certains points de la résine photosensible rencontrent la lumière. Il existe à ce stade deux types différents de résines photosensibles : La première option (côté gauche du schéma) est la « résine négative ». Dans ce cas, la zone exposée à la lumière change de structure de manière à devenir stable vis-à-vis d'un solvant. Ainsi, les zones masquées peuvent être emportées. Maintenant, les zones non protégées sont gravées par des produits chimiques et nous avons déjà transféré notre motif sur la plaquette. La dernière étape est une procédure de lavage au cours de laquelle la résine photosensible restante est retirée. La « résine positive » est visible sur le côté droit du schéma. Ici, les zones exposées à la lumière deviennent solubles et sont emportées, ce qui distingue les deux procédures. Avec cet exemple, nous pouvons comprendre comment nous apportons le  $\text{SiO}_2$  isolant dans la structure MOSFET, ce que nous avons vu précédemment.

Nous pouvons maintenant assembler les pièces du puzzle afin d'obtenir une vue d'ensemble plus large. Nous avons vu que la longueur de la couche isolante est approximativement la longueur de grille. Nous avons également vu la fabrication de ce composant par photolithographie. Cela nous fait comprendre que les performances du photo-traitement sont essentielles pour la construction de très petites structures de surface, respectivement nos minuscules MOSFET. En conclusion : Nous devons améliorer la photolithographie pour continuer à respecter la loi de Moore avec plus de transistors sur moins d'espace. La limite de la photolithographie en général est également donnée par la limite d'Abbe.

Le facteur le plus important est donc la longueur d'onde. Nous remarquons à plusieurs reprises qu'une longueur d'onde plus petite est le facteur essentiel dans l'optimisation des nanostructures dans le bâtiment. Ainsi, une technologie de pointe est l'utilisation de la lumière « ultraviolette profonde », qui est d'environ 193 nm. Dans ce cas, nous remarquons donc qu'il est possible de quitter le domaine visible en comparaison avec le microscope optique. L'objectif pour l'avenir est de 13,5 nm et s'appelle la lumière « ultraviolette extrême ». Néanmoins, la loi de Moore est toujours présente à ce jour. Fondamentalement, dans toutes les applications de circuits intégrés, le nombre de transistors sur une puce a augmenté rapidement.

Enfin, nous pouvons nous plonger dans le sujet des « nœuds technologiques ». Ce terme définit les techniques les plus récentes dans les processus de fabrication. Par exemple, le « nœud technologique 45 nm » décrit une certaine procédure. Dans ce contexte, il inclut une manière spécifique de construction de la photolithographie avec tous ses composants, la longueur d'onde utilisée dans le système, etc. Le nombre 45 nm décrit le « demi-pas ». Ce dernier représente la moitié de la distance entre deux structures individuelles telles que des contacts ou des lignes conductrices. Il ne s'agit donc pas de la longueur de la grille (la longueur de la grille peut être encore plus petite). Lorsque nous explorons brièvement l'historique de ce développement des processus, nous avons une idée de l'importance d'une fabrication optimisée à ce jour : 1971 à 1998 a été l'époque des nœuds de 10 à 0,25  $\mu\text{m}$ . 1999 a été l'année où nous sommes passés des micro aux nanomètres avec le nœud 180 nm. Les décennies suivantes ont montré d'énormes améliorations jusqu'au nœud de 5 nm en 2020, qui ont conduit à la puce Apple A14 Bionic (illustrée ci-dessous). Dans ce contexte, seul TSMC a pu placer 11,8 milliards de transistors sur 88,45  $\text{mm}^2$ . À propos : Si vous lisez ce texte sur un iPhone 12 ou un iPad de 4ème génération, l'une de ces puces fonctionne actuellement dans votre main.



Et pour suivre le rythme des prévisions de Moore, TSMC est prêt à proposer le nœud 4 nm en 2022. IBM, quant à lui, a déjà introduit un prototype de puce sur un nœud de 2 nm en mai 2021, qui est la première du genre.

#### Définition

#### Nœuds technologiques

Description du processus de fabrication des puces modernes. Les nouvelles générations de nœuds technologiques sont essentielles pour suivre le rythme de la loi de Moore.

Mais cette miniaturisation peut-elle être infinie ? Il est intéressant de noter que la réponse à ce sujet extrêmement moderne peut être trouvée à une époque qui remonte à très loin. Le philosophe grec Démocrite affirmait déjà que rien ne peut être réduit sans limite. À un moment donné, vous vous retrouverez dans une unité indivisible – l'atome. Si nous pensons à la puce sur un nœud de 2 nm, il n'y a pas plus de 20 atomes de silicium à travers un seul transistor. On pourrait donc penser que la fin de la loi de Moore ne peut pas être évitée.

#### Important

#### Quelles sont les limites de la loi de Moore ?

Une longueur de grille, qui se rapproche de la taille d'un seul atome de silicium, ne peut pas être réduite davantage.

# 1. Enregistrer les connaissances

## Résumé

Vous avez atteint la fin du contenu de l'unité sur les **nanotechnologies dans l'électronique**. Comme il y avait beaucoup à apprendre, voici une répétition rapide des choses les plus importantes que vous avez apprises à ce sujet :

Les ordinateurs sont essentiellement construits à partir de plusieurs « puces », également appelées « circuits intégrés ». Les éléments clés de ces puces sont des « transistors ». Un ordinateur décompose chaque problème jusqu'au degré, où il doit juste gérer des 1 et des 0. Ces 1 et 0 sont exprimés par le courant circulant (1) ou non (0) dans les transistors.

Au cours de l'histoire récente, la capacité de stockage et la vitesse des ordinateurs ont évolué extrêmement rapidement. Gordon Moore avait déjà prédit ce phénomène en 1965. Il a même quantifié l'augmentation en disant que tous les deux ans le nombre de transistors sur une puce et, donc, la capacité doubleront. Jusqu'à aujourd'hui, il avait raison avec ses prédictions.

Le développement de structures plus petites est étroitement lié aux nanotechnologies. Le fait que la loi de Moore soit toujours valide aujourd'hui est dû à de grands efforts technologiques, notamment dans le domaine des nanotechnologies.

Les nanotechnologies sont utilisées pour maintenir les systèmes informatiques très petits, même avec de plus en plus de fonctionnalités. Avec votre smartphone, vous pouvez avoir un ordinateur très rapide et hautement fonctionnel dans votre poche, vous permettant de regarder des films en haute résolution, de communiquer n'importe quand et n'importe où, de jouer à des jeux et d'autres choses que les générations précédentes n'auraient peut-être même pas imaginées.