



La nanophotonique aux Etats-Unis

Sommaire

Février 2007

Introduction

I Nanophotonique sur silicium

I.1 Définition

I.2 Enjeux

I.3 Les fonctions optiques sur silicium

I.3.1 L'émission de lumière

I.3.2 Transport, traitement et stockage de lumière

I.3.3 Vers les premiers routeurs optiques intégrés

I.4 Luxtera, une start-up aux grandes ambitions

II La plasmonique

II.1 Définition

II.2 Exemples de recherches en cours

II.3 Le point de vue du chercheur : Eli Yablonovitch

III Nanophotonique et nanotubes de carbone

III.1 Propriétés et applications potentielles

III.2 les principaux axes de recherche

IV Des nanofils pour contrôler la lumière

IV.1 Des propriétés intéressantes pour la nanophotonique

IV.2 les nanofils comme guides d'onde

IV.3 L'émission de lumière

IV.4 Les dispositifs détecteurs de lumière

V Nanoparticules et boîtes quantiques

V.1 Définitions

V.2 les nanoparticules pour la nano-biophotonique

V.2.1 les nanoparticules métalliques

V.2.2 les nanoparticules semiconductrices

V.3 les autres applications des nanoparticules semiconductrices

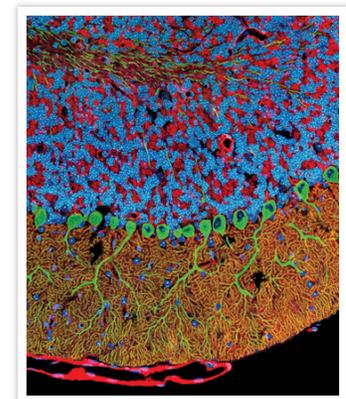
V.4 les Quantum Dots épitaxiés ou îlots semiconducteurs

VI Développement et commercialisation

Conclusion



Solutions de boîtes quantiques de divers diamètres constituées de nanocristaux de CdSe/ CdTe
Crédits : Evidenttech



Section d'un cerveau de souris visualisée en utilisant des Quantum Dots
Crédits: Invitrogen

Editorial

Les raisons pour lesquelles nous avons décidé de consacrer ce numéro de février du Dossier Sciences Physiques Etats-Unis à la nanophotonique sont nombreuses. Tout d'abord, nous sommes partis d'une constatation: l'optoélectronique est de plus en plus présente dans la vie courante, que ce soit sous forme de lasers pour CD, DVD, et bientôt HD-DVD, de LED pour l'éclairage, ou de LCD pour les écrans plats. Ces composants semblent sur le point d'envahir le marché mondial des biens de consommation. Leurs performances ont en effet énormément progressé ces dernières années. Les LEDs blanches, par exemple, ont récemment dépassé l'efficacité des tubes fluorescents. Les économies d'énergie que cela promet à l'échelle mondiale représentent un enjeu incontestable dans le contexte environnemental actuel.

Le deuxième constat est que les nanotechnologies sont devenues omniprésentes dans les recherches en optoélectronique. Ceci s'explique par les avancées récentes faites dans les moyens de fabrication et caractérisation, qui permettent aujourd'hui aux chercheurs de manipuler la matière à l'échelle nanométrique avec une aisance sans précédent. Les composants semi-conducteurs sont analysés et compris avec plus de finesse, et de nouvelles idées émergent, qui n'auraient pas été envisageables il y a une dizaine d'années. Les cristaux photoniques, les boîtes quantiques, la plasmonique, les nanotubes de carbone, sont autant d'outils qui sont maintenant à la disposition des laboratoires, pour aider les chercheurs dans leur quête constante d'amélioration des performances. Ce succès des nanotechnologies est d'ailleurs bien visible dans les budgets fédéraux américains : 344 millions de dollars leur étaient consacrés par la NSF en 2006, un record.

La popularité des nanotechnologies dans les recherches en photonique a d'ailleurs pu être constatée lors de l'édition 2007 du salon Photonics West, qui s'est tenu fin janvier à San José. Sur les quatre sessions de la conférence, une session à part entière était dédiée à la nano-photonique. Ce salon a également connu une affluence record, avec plus de 17000 participants, témoignage s'il en faut de la vitalité du secteur. Les applications biomédicales et les recherches en photonique sur silicium semblent avoir eu beaucoup de succès. Ces dernières sont en effet au seuil des applications commerciales avec en particulier l'arrivée d'une jeune entreprise californienne : Luxtera.

Pour toutes ces raisons nous avons jugé que la nanophotonique méritait que l'on s'y intéresse. Nous avons donc commencé à enquêter par nous-mêmes, en visitant des laboratoires en Californie et au Texas, ce qui nous a donné suffisamment de matière pour rédiger ce numéro spécial. Le domaine est cependant si vaste que nous avons dû nous focaliser sur quelques thèmes principaux : la nanophotonique sur silicium, la plasmonique, ainsi que les nanoparticules, nanofils et nanotubes. Malgré tout, le document final s'est avéré plus étoffé qu'à l'accoutumée, et nous avons donc décidé de le compter comme un numéro double.

Notre étude de la nanophotonique ne s'arrête pas avec ce numéro spécial. Nous y consacrons une mission, qui aura lieu fin mars 2007 en Californie, et à laquelle nous convierons 9 spécialistes français du domaine. Trois ateliers seront organisés à Stanford, Caltech et UCSB avec les meilleurs chercheurs de ces universités, et nous visiterons plusieurs instituts et laboratoires : le CNSI à Los Angeles, la Molecular Foundry à Berkeley, les laboratoires HP... Cette mission permettra d'une part de promouvoir la recherche française en nanophotonique, d'autre part de créer des liens entre les groupes de recherche, ce qui pourrait idéalement aboutir à des collaborations, et enfin de faire un état de l'art précis des recherches américaines dans ce domaine.

Daniel Ochoa
Attaché pour la Science et la Technologie
Consulat Général de France à San Francisco

Introduction

La nanophotonique est la science qui étudie le comportement de la lumière à l'échelle nanométrique. Les chercheurs en nanophotonique tentent de comprendre et de contrôler l'émission de lumière, sa détection et son guidage en développant des dispositifs dont les dimensions sont le plus souvent inférieures à la centaine de nanomètres. Les avancées dans ce secteur doivent beaucoup aux progrès de notre connaissance et de notre contrôle de la matière à l'échelle submicronique, et elles sont associées à celles de la microélectronique et de la nanoélectronique, puisque ce sont le plus souvent les mêmes matériaux et les mêmes techniques qui sont utilisés. Les recherches en nanophotonique couvrent un très large domaine d'activité, et connaissent actuellement un développement croissant en raison des nombreuses applications potentielles envisagées dans des domaines aussi différents que les sciences de l'information et la médecine. L'objectif de ce dossier est de tenter de dresser un panorama de l'activité nanophotonique dans les laboratoires aux Etats-Unis, certes pas exhaustif, mais qui en dégage les principales tendances et souligne les principaux acteurs. On décrira tout d'abord la nanophotonique sur silicium qui, tout comme la microélectronique occupe une place à part, et ouvre des perspectives d'applications à relativement court terme. Nous aborderons ensuite la plasmonique qui connaît depuis 5 ans un intérêt croissant à travers le monde. Nous nous intéresserons finalement aux recherches menées sur d'autres types de matériaux et de nano objets, comme les nanotubes, nanofils et quantum dots, dont la plupart des applications semblent relever du plus long terme.

I La nanophotonique sur silicium

I.1 Définition

La nanophotonique sur silicium a pour objectif principal de développer des circuits intégrant des fonctions optiques compatibles avec la technologie CMOS. Au delà de ce point, les définitions divergent. La plus large inclut l'intégration dite hybride de dispositifs non silicium fabriqués hors puce sur des circuits CMOS silicium conventionnels. Le terme nanophotonique regroupe aussi un ensemble de dispositifs : sources, détecteurs, modulateurs et composants passifs tels que guides d'ondes et filtres fabriqués à partir de silicium, de diélectriques et de divers métaux en exploitant les procédés disponibles en microélectronique. Entre ces deux définitions, il existe tout un ensemble de solutions intermédiaires. Pour offrir des fonctionnalités accrues à bas coût, la nanophotonique sur silicium devra respecter un haut degré d'intégration monolithique avec tout au plus un faible degré d'intégration hybride (sources laser par exemple), qui impliquera probablement l'emploi de nouveaux matériaux photoniques : Ge, BaTiO₃, SiON, etc... Bien que ceci augmente la complexité de fabrication, cette tendance s'observe déjà pour la

technologie CMOS avancée et ses nouvelles fonctionnalités, avec par exemple les diélectriques de grille à forte constante diélectrique et les mémoires magnétiques MRAM.

I.2 Enjeux

La nanophotonique et plus largement la photonique intégrée sur silicium est un domaine de recherche actuellement en plein essor. Les grandes entreprises américaines du semi-conducteur, de l'optoélectronique ou des télécommunications (Intel, HP-Agilent, Analog Device, JDS Uniphase, CISCO, IBM, Google, etc) ainsi que les agences fédérales de recherche comme la DARPA et la NSF financent une grande partie des projets de recherche menés dans les universités. Cette thématique n'est pas nouvelle mais ce n'est que depuis quelques années que les chercheurs ont réussi à démontrer la faisabilité de dispositifs efficaces, tels que des transmetteurs mono-puce haute performance, des récepteurs, des capteurs, des guides d'ondes, des convertisseurs de longueur d'onde, etc...

Ces avancées récentes ont été possibles grâce aux progrès des techniques et outils de l'industrie microélectronique qui ont véritablement révolutionné le domaine de la nanophotonique et des nanotechnologies en général. La technologie SOI (Silicon On Insulator) a également permis de résoudre le problème des pertes optiques dans le substrat et a ouvert la voie à la réalisation de dispositifs optiques à base de silicium. La nanophotonique sur silicium offre donc de nouvelles applications très prometteuses comme :

- Les interconnexions optiques pour circuits intégrés CMOS,
- Les télécommunications optiques,
- Le stockage optique
- Les biocapteurs
- L'informatique quantique
- Le solaire photovoltaïque.

De très nombreux groupes de recherche aux Etats-Unis travaillent actuellement sur les interconnexions optiques car elles représentent potentiellement le futur de l'industrie des télécommunications et de l'industrie informatique. En raison du besoin sans cesse croissant en vitesses de traitement élevées suscité par l'explosion des applications Internet (voix sur IP, vidéo conférence, transfert de données, etc...) et plus généralement du monde numérique, des bandes passantes de 10Gb/s et plus sont nécessaires. Ce besoin d'échanger plus vite plus de données requiert un changement de technologie. En effet, les données traitées par les circuits qui équipent nos appareils du quotidien (ordinateurs, téléphones mobiles, PDA, etc...) circulent via des fils métalliques généralement en cuivre. A de telles fréquences (>10GHz), ces derniers engendrent des pertes de puissance trop importantes. Si l'on compare l'évolution des bandes passantes CPU avec celle des bus

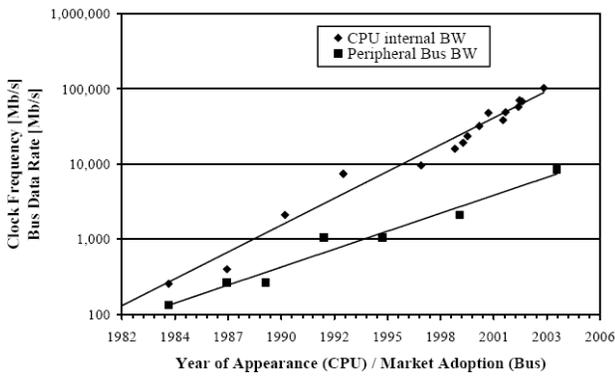


Figure 1 : Evolution au cours des 20 dernières années des bandes passantes CPU et des bus périphériques

périphériques, au cours des deux dernières décennies (cf. figure. 1), on constate que le débit des bus est un ordre de grandeur inférieur à celui des processeurs.

Autrement dit, ce n'est plus l'horloge du processeur qui détermine la rapidité d'un ordinateur mais plutôt la vitesse avec laquelle les données sont échangées entre les différents composants. La vitesse de ces flux de données devient de plus en plus difficile à augmenter en raison des limites physiques imposées par les interconnexions métalliques. La nanophotonique sur silicium vise donc à offrir de nouvelles solutions pour surmonter ces barrières technologiques, on parle de convergence entre électronique et photonique. Cependant encoder un signal de lumière n'est pas aussi simple qu'encoder un signal électrique et de nombreuses années de recherche seront nécessaires pour développer l'ensemble de fonctions optiques sur silicium qui manquent aujourd'hui.

Grâce au développement d'un système de multiplexage optique et une nano-photodiode, le géant japonais de l'électronique, NEC, a fait un pas de plus vers le remplacement des connexions métalliques par des connexions optiques. Ce travail a été présenté lors de la conférence internationale annuelle de 2006 : « International Solid-State Circuits Conference » (ISSCC). La nano-photodiode en silicium développée par NEC se caractérise par une grande vitesse de réponse (>50GHz) et un faible encombrement (<10 μm^2). La taille des multiplexeurs/démultiplexeurs, d'environ 100 μm^2 , correspond à un centième de la taille des dispositifs conventionnels. Cette réduction de taille a été réalisée en augmentant la capacité électrique de la photodiode. La figure 2 ci-dessous présente la transition technologique des connexions en cuivre conventionnelles aux nouvelles connexions optiques. Pour des distances comprises entre 10mm et 100mm et des débits supérieurs à 10 Gb/s, on parle de connexions optiques inter-composants. En dessous de 10mm, il s'agit de connexions optiques intra-composant. Les composants mis en jeu dans la technologie de multiplexage optique par division de longueur d'onde (WDM) développée par NEC incluent entre autres des guides d'ondes optiques, un modulateur et une nano-photodiode.

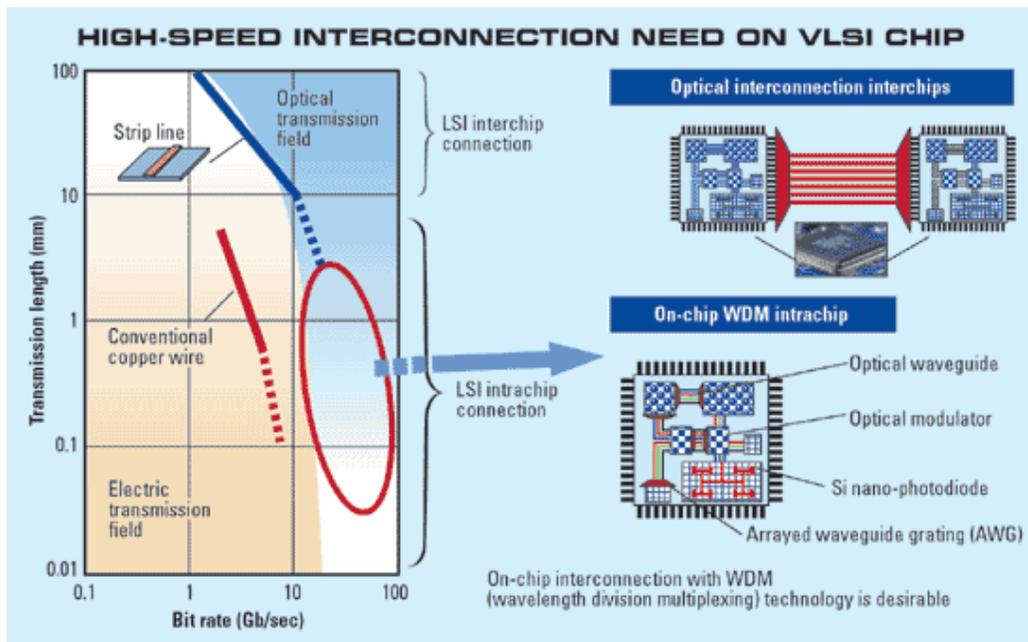


Figure 2 : Schéma illustrant la technologie de multiplexage optique par division de longueur d'onde (WDM) développé par NEC.

I.3 Les fonctions optiques sur silicium

I.3.1 L'émission de lumière

Du fait de son gap indirect, le silicium présente une très faible efficacité de recombinaison radiative des paires électrons-trous, de sorte qu'à l'heure actuelle, aucune source de lumière efficace à base de silicium n'a pu être développée. De nombreuses pistes ont été explorées pour tenter de combler ce manque et le sujet reste encore très ouvert : émetteurs à boîtes quantiques SiGe insérés dans des cavités à cristal photonique sur SOI, nanocristaux de silicium dans SiO₂, report de sources III/V (SiGe, SiGeC, SiGeSn, etc) sur silicium, effet Raman dans des guides d'ondes en silicium, silicium contraint, etc... Parmi toutes ces voies d'études, nous présenterons ici quelques travaux récents issus de groupe de recherche américains.

- Source laser hybride

La fabrication d'un laser hybride (matériau actif de type III/V couplé à un guide d'onde sur silicium) exige trois composants clés. Il faut tout d'abord un matériau actif à la longueur d'onde désirée et qui amplifie la lumière ; Une cavité optique dans laquelle ce matériau doit être placé pour créer l'effet laser et enfin un pompage approprié et efficace pour entretenir cet effet. Un pompage par injection électrique est favorable à l'intégration.

Le groupe de recherche du professeur John Bowers de l'Université de Californie à Santa Barbara (UCSB) en collaboration avec Intel vient récemment de développer le premier prototype (cf. Fig. 3) de circuit silicium intégrant 36 lasers hybrides. La partie laser est constituée d'une couche de matériau actif de type III/V (AlGaInAs) collée sur un guide d'onde en silicium fabriqué sur wafer SOI.

La nouveauté de cette structure est que le mode optique, obtenu par pompage électrique dans la région active, est concentré dans le guide d'onde en silicium sous-jacent. En raison de la symétrie de la région III-V dans la direction latérale, aucune étape d'alignement n'est

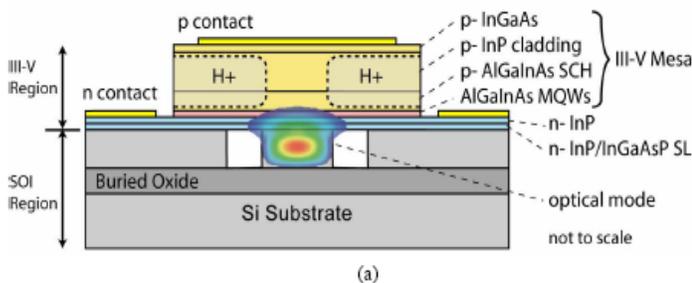


Figure 3: Structure du laser hybride InP sur Silicium développé par le groupe de John Bowers en collaboration avec Intel. Le mode laser est concentré principalement dans le guide d'onde silicium

nécessaire avant le collage avec le guide d'onde en silicium. Cette technique permet de fabriquer une source laser auto alignée avec le guide d'onde sur laquelle elle est posée. Ces recherches ont reçu des crédits de l'agence fédérale de recherche américaine pour les projets de défense avancée (DARPA). Le département de la Défense (DoD) finance également à hauteur de 6 millions de dollars pour 5 ans, un projet inter-universités¹ (Boston, Caltech, Cornell, Lehigh, Stanford, Delaware, Rochester et le MIT) dont l'objectif est de concevoir un laser hybride pompé électriquement et compatible CMOS.

- Nano cristaux de silicium

Les nano cristaux de silicium sont comme les quantum dots, des cristaux semiconducteurs de dimensions nanométriques qui présentent des propriétés physiques (optique, thermique, électrique, etc...) ajustables par le contrôle de leur diamètre (entre 2 et 50 nanomètres). Du fait du confinement des porteurs, ces nanocristaux émettent, sous excitation lumineuse ou électrique, des photons dans le spectre visible. Leur longueur d'onde varie du rouge au bleu quand leur taille diminue. Les nano cristaux de silicium sont des candidats prometteurs pour réaliser des dispositifs actifs (modulateurs, amplificateurs optiques, et diodes électroluminescentes) car ils sont parfaitement compatibles avec la technologie CMOS.

Une difficulté majeure que posent les dispositifs à base de nano cristaux de silicium intégrés dans SiO₂ est l'injection des porteurs. Les chercheurs, Robert J. Walters et H. Atwater, de l'Institut de Technologie de Californie (CalTech) ont proposé une méthode pour pomper électriquement une matrice de nano cristaux de silicium par un mécanisme d'électroluminescence à effet de champ². Contrairement à une diode électroluminescente classique où les porteurs des deux régions p et n sont injectés simultanément, dans cette structure, les électrons et les trous sont injectés par effet

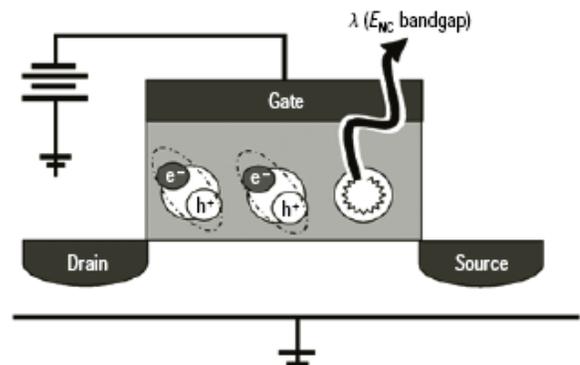


Figure 4 : Schéma du mécanisme d'électroluminescence à effet de champ des nano cristaux de silicium à l'intérieur d'un transistor à grille flottante.

tunnel à partir du même matériau et de manière séquentielle. Les nano cristaux sont alternativement chargés positivement et négativement grâce à l'injection par effet tunnel de trous et d'électrons. L'émission de lumière a lieu lors du changement de polarisation du composant, les porteurs étant injectés dans les nano cristaux chargés au préalable par des porteurs de charge opposée. La recombinaison des paires électrons-trous dans les nano cristaux crée alors de la lumière (cf. figure. 4).

- Quantum dots

Quand une couche mince de germanium est déposée sur un substrat de silicium, elle s'agglomère et forme de petits îlots de matière, ou quantum dots (QDs). Ceci est dû à la différence de paramètre de maille (distance entre les atomes) entre les deux matériaux et à la relaxation qui en résulte. Ces QDs qui peuvent emprisonner des électrons, les confinant dans chacune des trois dimensions. C'est un peu analogue au piégeage des électrons par les atomes. Les quantum dots sont souvent désignés sous le nom "d'atomes artificiels", et peuvent produire des photons plus ou moins de la même façon : par des déplacements d'électrons entre différents niveaux d'énergie. Ils ont l'avantage d'émettre aux longueurs d'ondes utilisées en télécommunications : 1,3µm et 1.55µm.

Un des problèmes est que les photons sont émis dans des directions aléatoires, limitant sévèrement la quantité de lumière utile. L'équipe du professeur J. S. Xia³ et ses collègues vient récemment de mettre au point une méthode pour augmenter cette quantité de lumière en entourant les QDs d'un cristal photonique. Les réflexions sur les surfaces périodiques du cristal forcent l'émission dans la direction unique. Le dispositif a l'avantage de fonctionner à température ambiante.

Une équipe de chercheurs⁴ de CalTech, a également développé une méthode pour améliorer la photoluminescence (PL) de quantum dots silicium en les

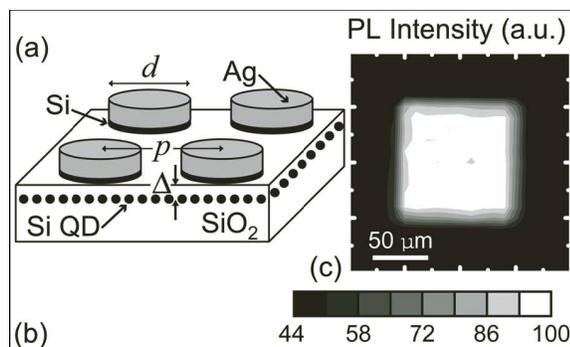


Figure 5: a) Matrice de nanoparticules d'argent (diamètre $d=320$ nm et espacement $p=400$ nm) sur du silicium. b) Cartographie de l'intensité de photoluminescence (unité arbitraire).

couplant avec une matrice d'îlots d'argent fabriqués par lithographie à faisceau d'électrons (figure 5). Lorsque l'émission des quantum dots en silicium est accordée avec la résonance de plasmon de surface des îlots d'argent extérieurs, on observe une augmentation de l'intensité de photoluminescence. Ceci est directement dû à une augmentation du taux d'émission radiatif des QDs.

I.3.2 Propagation et traitement de la lumière

La propagation de lumière au sein d'une puce silicium passe par la fabrication de guides d'ondes. Grâce à la technologie « Silicon-On-Insulator » (SOI) et aux progrès réalisés en lithographie, il est possible de fabriquer des guides d'ondes sous la forme de bandes de silicium, dont l'épaisseur est de 0,3 µm et la largeur comprise entre 0,3 µm et quelques microns. La figure 6 présente l'évolution, depuis ces vingt dernières années, des tailles des structures utilisées pour guider la lumière dans les circuits intégrés.

Une des faiblesses de tels guides d'ondes est qu'il est difficile de réaliser de fortes courbures car les pertes optiques sont alors trop importantes. Pour limiter les pertes, le rayon de courbure doit rester grand par rapport à la longueur d'onde du signal optique. C'est un problème sérieux en photonique et nanophotonique sur silicium car la taille des circuits n'autorise pas de grands rayons de courbure. Pour remédier à ce problème, les chercheurs font appel à une structure aux propriétés fort intéressantes appelée cristal photonique. Il s'agit d'une structure périodique de matériaux diélectriques ou métalliques conçues pour modifier la propagation des ondes électromagnétiques à condition que la variation d'indice de réfraction soit suffisante. Les cristaux photoniques en silicium sont réalisés en creusant des trous dans le silicium. Avec un arrangement et une taille des trous adéquats, il existe alors des directions dans lesquelles les photons ne peuvent plus se propager. Les cristaux photoniques permettent ainsi de créer des guides d'ondes avec des courbures de 90 degrés et de très bonnes transmissions.

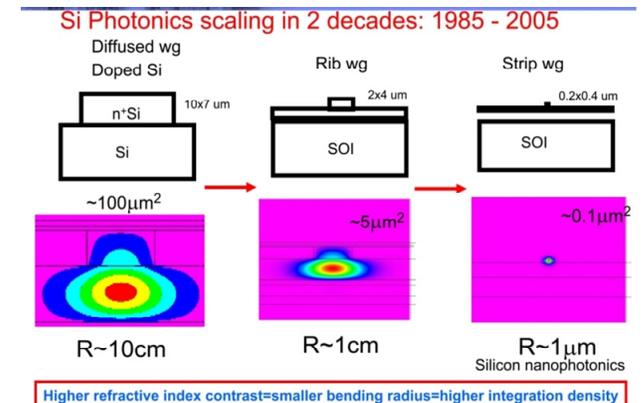


Figure 6 : Evolution des tailles des guides d'ondes de silicium au cours des 20 dernières années (1985 - 2005). Source : © IBM

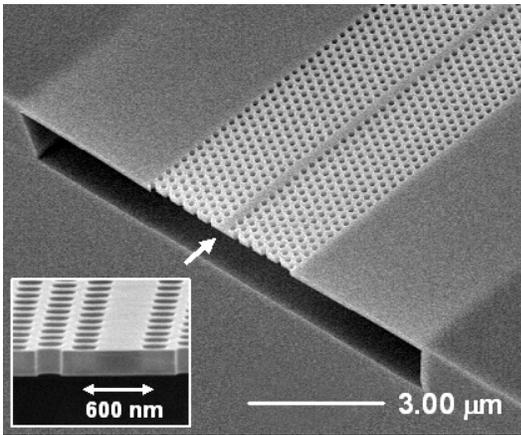


Figure 7 : Exemple de guide d'onde à base de cristal photonique : la lumière est guidée dans la direction de la flèche située au milieu de l'image.

De nombreux groupes de recherche aux Etats-Unis travaillent sur les cristaux photoniques⁶, ce sont des structures essentielles en nanophotonique sur silicium, ils permettent de réaliser de nombreuses fonctions optiques telles que le filtrage (miroirs à cristal photonique), l'amplification (microrésonateurs), la modulation de phase (interféromètre). Le professeur Ray Chen⁷ de l'université d'Austin au Texas, vient récemment de mettre au point le plus petit modulateur sur silicium. Ce dernier consomme dix fois moins que les dispositifs existants. Il contrôle la transmission de la lumière laser grâce à un cristal photonique et un courant de commande ($I_{max} < 150 \mu A$).

Le stockage de la lumière au niveau des circuits silicium est aujourd'hui un sujet qui suscite l'intérêt des principales agences fédérales de recherche⁸ et notamment celui de la DARPA. Le programme, « *Slowing, Storing*

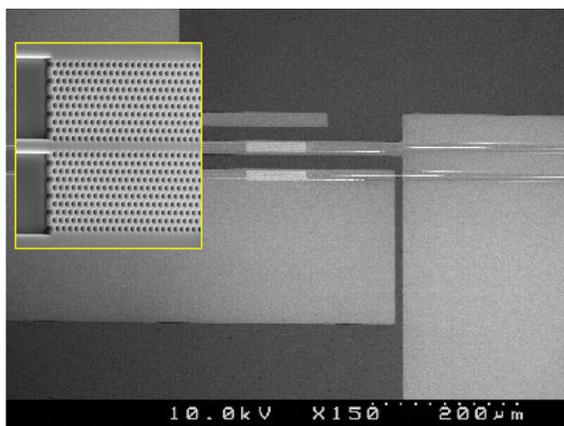


Figure 8 : Image prise par microscope électronique du modulateur en silicium développé par le professeur R. Chen. Les deux guides d'ondes sont définis par un cristal photonique (détails dans le cadre jaune en haut à gauche). Ils mesurent 80μm de long. Le guide d'onde supérieur est encadré par une paire d'électrodes horizontales (foncées).

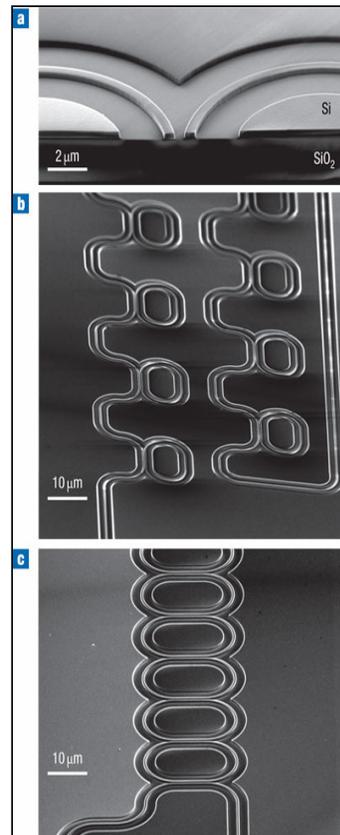


Figure 9 : a) Vue d'une zone de couplage entre un guide d'onde courbé et un micro résonateur circulaire. Le guide d'onde est un fil de silicium fabriqué en gravant deux "tranchées" parallèles jusqu'à la couche de SiO₂ sous-jacente. Le rayon de courbure du guide est de 6,5 μm. b) Lignes de délais composées de plusieurs résonateurs circulaires en cascade. Chaque résonateur est couplé sur le côté à un guide d'onde qui représente le bus commun de données. La distance entre les résonateurs et le bus dans la zone de couplage est de 200nm. c) Ligne de délais composée de plusieurs résonateurs circulaires reliés en cascade. La distance entre chaque résonateur est de 200μm.

and Processing Light⁸», par exemple vise à développer des dispositifs tels que des mémoires optiques, des commutateurs performants et des convertisseurs de longueur d'onde très efficaces.

Dans l'édition de Janvier 2007 de la revue, *Nature Photonics*⁹ une équipe de chercheurs d'IBM vient de présenter le premier démonstrateur de mémoire optique permettant de stocker 10 bits sur une surface de silicium aussi petite que 0,03mm². Le dispositif est composé de plus de 100 microrésonateurs circulaires qui permettent de produire un retard du signal optique de 500ps. Lorsque le signal optique correspond à la fréquence de résonance des anneaux circulaires, la lumière conduite par les guides d'ondes est forcée à circuler en boucle dans les micros anneaux ce qui permet d'augmenter les délais.

I.3.3 Vers les premiers routeurs optiques intégrés

Aujourd'hui, l'essentiel du trafic internet passe par des fibres optiques qui permettent de faire circuler l'information à très haut débit. Néanmoins, le traitement de cette information nécessite des conversions optiques / électroniques qui constituent de véritables goulots d'étranglement. Les routeurs typiques actuels traitent moins de 1% de la capacité des fibres optiques! Une des voies de recherche explorée en nanophotonique sur silicium est le développement de routeurs « tout-optique ». Sans aucune conversion optique / électronique, les routeurs « tout-optique » pourraient facilement

permettre la vidéoconférence 3D aussi bien que la téléprésence, ou la capacité de voir, toucher et même sentir un événement à distance.

La DARPA a lancé en 2004 un projet de recherche, intitulé LASOR pour « *Label Switched Optical Router* », associant l'université de Santa Barbara (UCSB), l'université Stanford avec des entreprises leaders en télécommunication : CISCO, JDS Uniphase et Calient Networks. Il s'agit d'un financement sur 4 ans (de 2004 à 2008) d'un montant de 6,3 millions de dollars pour la première phase de recherche avec une option qui pourrait permettre d'atteindre un total de 15,8 millions de dollars. L'objectif est de réaliser un routeur optique de capacité égale à 100 Tb/s et entièrement intégré sur silicium. Son fonctionnement s'appuie sur le principe du "switching" optique multi paquets. Le dispositif final (8x8 ports) devrait être terminé en 2008. Un tel dispositif inclut des composants tel que des convertisseurs de longueur d'onde, des commutateurs, des mémoires optiques, et des amplificateurs.

I.4 Luxtera, une start-up aux grandes ambitions

Luxtera est une jeune start-up situé à Carlsbad dans le sud de la Californie. Elle a été créée en 2001 à partir des travaux de recherche du groupe dirigé par le professeur Axel Sherer de CalTech et son collègue de l'université de Los Angeles, le professeur Eli Yablonovitch. Les deux chercheurs font partie des 5 co-fondateurs et restent impliqués dans la gouvernance de l'entreprise. Luxtera emploie aujourd'hui environ 70 personnes et s'est spécialisée dans la conception de circuits CMOS intégrant des composants photoniques : réseaux diffractant pour coupler la lumière dans le circuit, photo détecteurs en germanium, diviseurs de longueurs d'ondes, filtres, lasers InP à émission latérale et coupleur vertical... Sa technologie photonique, « *CMOS Photonics™* », est entièrement compatible avec les procédés CMOS traditionnels. Elle inclut parfois le recours à des cristaux photoniques. La fabrication des circuits est sous-traitée à l'usine Freescale d'Austin au Texas, qui les traitent comme n'importe quels autres circuits CMOS, sans aucune particularité concernant l'aspect photonique. Luxtera dispose d'un panel de 50,000 circuits différents conçus sur wafers 8", et peut effectuer 10,000 tests différents en 24h. Depuis sa création en 2001, ses ingénieurs ont dessiné l'équivalent de 127km de guides d'ondes sur substrats SOI.

Le prochain (et premier) produit Luxtera, attendu début 2007, sera un émetteur-récepteur utilisé pour réaliser les communications inter-processeurs dans les grosses machines de calcul. Ce produit n'inclura pas de cristaux photoniques.

Luxtera vient récemment de signer un contrat de recherche de 5 millions de dollars avec la DARPA pour développer un récepteur de photons avancé. Le coût total du projet a été évalué à 15 millions de dollars. Alex Dickinson, le PDG et co-fondateur de Luxtera a annoncé

que la première phase du projet consistait à intégrer sur une puce CMOS un multiplexeur optique à division de longueur d'onde doté de 4 canaux de 10Gb/s. L'objectif de la DARPA, à travers le nouveau programme intitulé, *Epic*, est de développer un émetteur-récepteur capable d'envoyer et recevoir des données à des débits de 100 gigabits par seconde.

II La plasmonique

Un des objectifs de la Nanophotonique consiste à confiner les photons et façonner les champs optiques à des échelles sub-longueur d'onde pour réaliser de nouveaux composants optiques et optoélectroniques. Pour atteindre cet objectif, trois stratégies sont possibles et souvent complémentaires : les guides d'ondes de dimensions nanométriques, les cristaux photoniques, et enfin l'interaction dite plasmonique entre la lumière et un gaz d'électrons à la surface d'un matériau conducteur. La plasmonique connaît depuis environ cinq ans, un intérêt scientifique croissant stimulant la curiosité de nombreux laboratoires à travers le monde.

II.1 Définition

Les plasmons de surface sont des ondes qui se propagent à l'interface entre un diélectrique et un matériau métallique. Il s'agit d'une oscillation collective des électrons qui engendre un champ électromagnétique évanescent des deux cotés de l'interface (cf. figure.10). Dans le milieu diélectrique au-dessus du métal, typiquement de l'air ou du verre, la longueur d'affaiblissement du champ, δ_d , est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde de la lumière incidente, tandis que la longueur d'affaiblissement dans le métal, δ_m , est déterminée par l'épaisseur de peau.

En modifiant la structure de la surface d'un métal, il est possible de contrôler les propriétés des plasmons de surface, en particulier leurs interactions avec la lumière, ce qui permet de développer de nouveaux types de

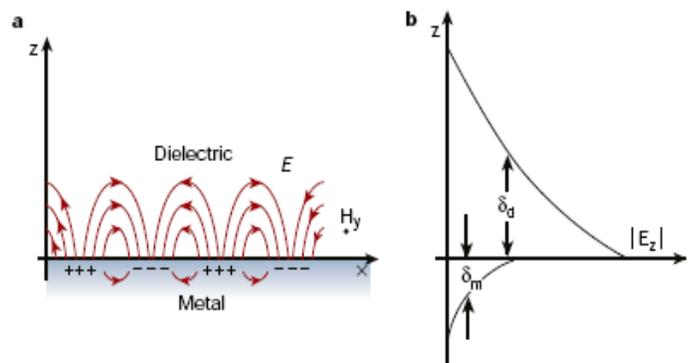


Figure 10: a) Schéma illustrant la propagation des plasmons de surface à l'interface entre un diélectrique et une couche mince métallique. b) Profil dans la direction x du module, $|E_z|$, de la composante normale du champ électrique.

dispositifs photoniques. Les applications potentielles sont nombreuses, elles comprennent notamment l'optique sub-longueur d'onde, le stockage de données, la spectroscopie non-linéaire, la biophotonique, etc...

II.2 Exemples de recherches en cours

En 2004, le bureau de la recherche scientifique de l'Armée de l'Air (AFOSR), lançait sur une période de 5 ans, un projet inter universités¹⁰ regroupant: Caltech, Harvard, UCLA, UC Berkeley, Duke University. Ce projet, intitulé "Novel Devices for Plasmonic and Nanophotonic Networks: Exploiting X-Ray Wavelengths at Optical Frequencies." est piloté par le professeur Harry Atwater¹¹ de Caltech. Les objectifs et résultats attendus sont multiples :

- Application des plasmons de surface dans le développement d'un laser à cascade quantique à base de cristal photonique pour la spectroscopie et la microscopie en champ proche.
- Démontrer l'intérêt des plasmons de surface dans l'amélioration de l'émission de lumière et de l'efficacité quantique des dispositifs électroluminescents à base de nanocristaux de silicium, de silicium dopé à l'erbium (Er) et de GaN.
- Étudier la modulation électro-optique, tout optique et piézoélectrique par guide sub-longueur d'onde à effet plasmon.
- Développer les premières connections métalliques aux fréquences optiques.
- Réaliser un couplage entre une fibre optique monomode et un circuit plasmonique afin d'évaluer les performances du dispositif d'imagerie associé.
- Déterminer le champ électrique maximum et la variation de constante diélectrique la plus élevée qui peuvent être atteints avec un circuit plasmonique.
- Développer des méthodes combinées de lithographie et d'auto assemblage pour fabriquer des nanostructures métalliques utiles pour la spectroscopie et la formation d'images in-situ.

Les premiers résultats obtenus ont confirmé tout l'intérêt de la plasmonique pour des applications multiples¹²

Zongfu Yu, Georgios Veronis, Shanhui Fan et Mark L. Brongersma¹³, chercheurs à l'Université Stanford viennent de développer un détecteur infrarouge exploitant les propriétés uniques des plasmons de surface pour augmenter le rapport signal/bruit. Le photo détecteur proposé se compose d'un matériau semi-conducteur absorbant (HgCdTe) à l'intérieur une fente très étroite formée dans une fine couche d'or (*figure 11*). L'absorption de la lumière est augmentée grâce à une résonance Fabry-Perot qui a lieu dans la largeur de la fente. Cette absorption est optimisée en ajoutant de part et d'autre de la fente, une série de cannelures périodiques qui permettent l'excitation des plasmons de surface portant l'énergie électromagnétique vers la fente.

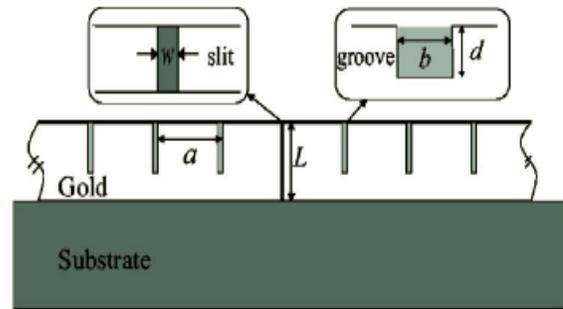


Figure 11 Photo détecteur constitué d'une couche d'or (épaisseur = $1 \mu\text{m}$) déposée sur un substrat de faible indice ($n=2,25$). La fente centrale est remplie avec un matériau actif, le tellurure de cadmium de mercure (HgCdTe). Les deux encarts illustrent la fente centrale ($w=50 \text{ nm}$) et les cannelures périodiques ($b=0,5 \mu\text{m}$ $d=0,6 \mu\text{m}$).

En utilisant cette structure, les chercheurs ont conçu un photodétecteur opérant à une longueur d'onde de $9,8 \mu\text{m}$ et absorbant approximativement 250 fois plus de lumière par unité de volume de matériau actif que les photo détecteurs conventionnels opérant à la même longueur d'onde.

II.3 Le point de vue du chercheur : Eli Yablonovitch

Le professeur E. Yablonovitch de UCLA considère la plasmonique comme un moyen privilégié pour focaliser efficacement la lumière et développer des nano-fils fonctionnant aux fréquences optiques. Contrairement à d'autres chercheurs, il ne pense pas qu'elle permette de réaliser efficacement des connections optiques, à cause des pertes par absorption importantes.

Son groupe travaille sur un nouveau dispositif de focalisation des ondes de surface dans un "entonnoir optique" dont l'architecture nous a été présentée lors d'une visite. Ce type de structure basé sur la plasmonique pourra être utilisé à court terme pour le stockage de données dans une nouvelle génération de disque dur 2,5 Tb. Elle permettrait d'une part de focaliser le faisceau laser sur une très petite zone d'écriture, et d'autre part de chauffer localement cette zone, facilitant ainsi l'inversion magnétique. Selon E. Yablonovitch il ne faudra pas plus de cinq ans avant que cette technique d'enregistrement magnétique par chauffage assisté soit utilisée par les leaders industriels du disque dur, dont Seagate. La deuxième application à court et moyen terme du dispositif concerne les détecteurs infrarouge (IR), dont il permettrait de réduire la taille en focalisant le faisceau du signal IR d'entrée. Ceci améliorerait les performances du capteur en diminuant le courant de bruit.

III Nanophotonique et nanotubes de carbone

III.1 Propriétés et applications potentielles

Les nanotubes de carbone sont certainement les nano-objets les plus étudiés actuellement, tant leur propriétés intrinsèques sont intéressantes, aussi bien du point de vue fondamental que de celui des applications. D'un point de vue mécanique, ils présentent à la fois une excellente rigidité comparable à celle de l'acier, tout en étant extrêmement légers, et sont ainsi particulièrement attractifs pour des applications dans le domaine des matériaux composites. Du point de vue électrique, selon leur structure, les nanotubes de carbone ont un comportement soit métallique, soit semiconducteur, et de nombreux travaux de recherche visent à exploiter ces propriétés pour réaliser des dispositifs électroniques de dimensions nanométriques. La grande sensibilité à leur environnement de ces propriétés électriques en font également des objets de choix pour le développement de nouveaux capteurs chimiques.

L'utilisation des nanotubes pour la nanophotonique reste à ce jour très spéculative, même s'il est déjà proposé de les incorporer dans des dispositifs émetteurs ou de les exploiter comme éléments actifs de photodétecteurs. L'application la plus mature concerne la réalisation d'écrans plats, dans lesquels les nanotubes de carbone sont utilisés comme émetteur de champ nanométrique, mais c'est là le comportement électrique du nanotube qui est exploité pour exciter un matériau phosphorescent¹⁴. Au niveau des dispositifs photoniques, le groupe leader est certainement celui de Phaedon Avouris à IBM (Yorktown Heights, NY), qui s'appuie sur les avancées qu'il a faites en réussissant à mettre au point un transistor à effet de champ dont la partie active est constituée d'un seul nanotube pour proposer à partir de cette structure des dispositifs émetteurs ou détecteurs de lumière, mais il s'agit encore de travaux très en amont.

III.2 Principaux axes de recherche

En ce qui concerne l'optique, une part importante des travaux réalisés sur les nanotubes visent à caractériser leurs propriétés d'absorption pour en déduire des informations sur leur structure électronique (groupe du Professeur Weisman, Rice University, Houston).

Les nanotubes de carbone présentent une fluorescence dans le proche infra-rouge qui peut être très intéressante pour les applications biomédicales. En effet dans ce domaine spectral, les tissus humains et les fluides biologiques sont transparents et ne fluorescent généralement pas. On peut donc exploiter la fluorescence des nanotubes pour en faire des marqueurs biologiques, dans la mesure où on a pu montrer que leur luminescence n'était pas affectée par leur incorporation dans les milieux biologiques¹⁵. L'équipe du Professeur Dai à Stanford University, très active dans ce domaine, a montré qu'il

est possible de localiser avec précision les nanotubes à l'intérieur des cellules en utilisant simplement un microscope équipé pour la fluorescence infra-rouge¹⁶.

Au niveau émission de lumière, on retiendra essentiellement les travaux des laboratoires IBM qui ont pu mettre en évidence une électroluminescence des nanotubes de carbone dans le domaine infra rouge. L'équipe a développé des transistors à effet de champ dont la partie active est constituée d'un nanotube semiconducteur (monofeuillet). Le transistor est maintenu à ses extrémités par deux électrodes métalliques et le rôle de la grille est assuré par le substrat sur lequel repose (ou au dessus duquel est suspendu) le nanotube, généralement un matériau conducteur ou semiconducteur recouvert d'une couche isolante (voir *figure 12a*). Les contacts métal-nanotube ont un comportement de barrière Schottky, et en fonction de la polarisation appliquée, il est possible d'injecter simultanément des électrons et des trous à chaque extrémité du nanotube¹⁷. La recombinaison de ces porteurs est à l'origine d'une émission de lumière, mais comme la probabilité de recombinaison radiative est relativement faible, la zone d'émission est localisée sur le nanotube dans la zone où la concentration des porteurs est la plus élevée. Les chercheurs ont pu montrer qu'il était possible de déplacer cette zone en jouant sur la polarisation de grille, comme on peut le voir sur la *figure 12b*.

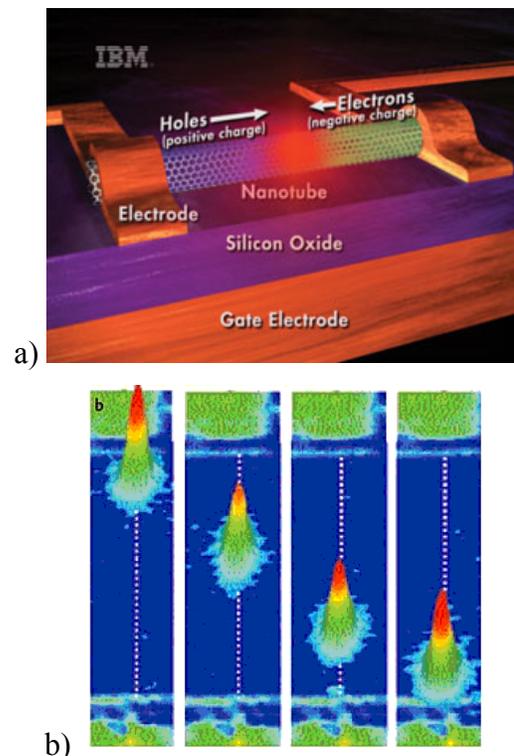


Figure 12: a) La recombinaison de trous et d'électrons injectés simultanément aux extrémités du nanotube produit de la lumière infra-rouge b) Déplacement de la zone d'émission de lumière selon la polarisation de la grille

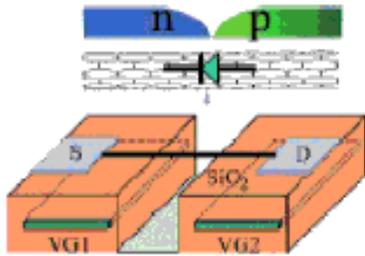


Figure 13: Structure d'un détecteur de photon obtenu à base d'un nanotube polarisé par les grilles VG1 et VG2 pour former une jonction PN.

Il est aussi possible de se placer dans des conditions de polarisation qui correspondent à une injection unipolaire: ceci est obtenu avec un nanotube dans lequel on crée de chaque côté du nanotube des zones n et p par application d'un champ électrique pour induire ainsi une jonction PN. On peut ainsi accélérer fortement les porteurs injectés qui acquièrent assez d'énergie pour créer par impact des excitons qui se recombinent ensuite en émettant des photons. Ce mécanisme d'excitation s'avère 1000 fois plus efficace que celui résultant d'une injection ambipolaire et produit une densité d'excitons 100 fois plus importante¹⁸. On peut également dans cette configuration où le nanotube est équivalent à une jonction PN l'exploiter comme photodétecteur. Un groupe de General Electric Global Research à New York a ainsi mis en évidence l'apparition d'un photocourant dans le nanotube sous rayonnement lumineux (voir *figure 13*).

Ces exemples démontrent que les nanotubes offrent des perspectives intéressantes pour la nanophotonique. Cependant, tout comme pour leur utilisation en nanoélectronique, il reste des progrès importants à faire quant aux procédés de fabrication, de purification, de tri et de manipulation de ces derniers pour atteindre un niveau de contrôle de ces nano objets qui permette leur exploitation.

IV Des nanofils pour contrôler la lumière

IV.1 Des propriétés intéressantes pour la nanophotonique

Les nanofils sont des objets que l'on peut assimiler à des cylindres dont la section est de dimension nanométrique et qui présentent donc un facteur de forme qui peut dépasser largement 1000. On est capable de fabriquer des nanofils de différents types, conducteur (Ni, Pt, Au), semiconducteur (Si, Ge, InP, GaN, ZnO, CdSe) ou bien isolant (SiO₂, TiO₂). Les méthodes de fabrication des nanofils sont très diverses et dépendent beaucoup du matériau utilisé. Pour les semi-conducteurs, le procédé le plus largement utilisé est le VLS¹⁹ (pour Vapeur-Liquide-Solide).

Les nanofils sont des objets unidimensionnels, dans lesquels les électrons sont confinés latéralement, ce qui

modifie leur distribution énergétique qui ne correspond plus à la structure de bande d'énergie qui est observée pour les mêmes matériaux sous forme massive. L'intérêt des nanofils réside bien sûr dans les applications électroniques, qui font l'objet de nombreux travaux. On étudie la possibilité de doper ces nanofils, et de réaliser ainsi des jonctions PN unidimensionnelles, avec l'espoir de réaliser ainsi des dispositifs actifs de dimensions nanométriques intéressants aussi bien pour l'électronique intégrée que pour le développement de capteurs. Toutefois, le contrôle de la conductivité des nanofils reste difficile, en raison de l'importance des effets de surface et des défauts structurels.

Ce sont également des objets prometteurs pour des applications liées à l'optique, notamment en optique intégrée. Leurs propriétés optiques modulables grâce à la possibilité de contrôler leur taille, leur dopage et leur composition avec une grande précision offrent de nouvelles perspectives pour l'élaboration de dispositifs photoniques aussi bien comme composant actif que comme composant passif.

IV.2 Les nanofils comme guides d'onde

La faible rugosité des parois des nanofils permet de les utiliser comme guide d'onde, les matériaux les plus couramment utilisés étant le SiO₂ et le SnO₂. Les travaux menés par le groupe du Professeur Peidong Yang à Berkeley (University of California) montrent que ces nanofils sont d'excellents guides sub-longueur d'onde car leurs pertes restent faibles sur des longueurs de l'ordre du millimètre²⁰. Il est ainsi possible de guider un rayon lumineux avec une grande précision au centre d'une gouttelette de colorant fluorescent pour en réaliser la spectroscopie (voir *figure 14*), et donc utiliser ces nanofils pour analyser précisément une région restreinte d'un échantillon²¹.

En exploitant les propriétés de guidage des nanofils, des chercheurs ont développé des filtres passe bas dont la longueur d'onde de coupure dépend des dimensions latérales du guide d'onde²². L'utilisation des nanofils en optique intégrée nécessite la réalisation de jonctions

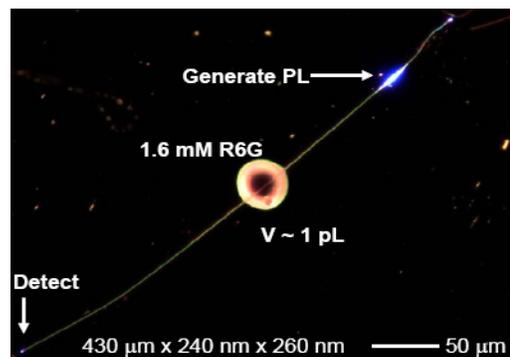


Figure 14 : Spectroscopie d'une gouttelette de colorant réalisée par injection et collection de la lumière à l'aide d'un nanofil

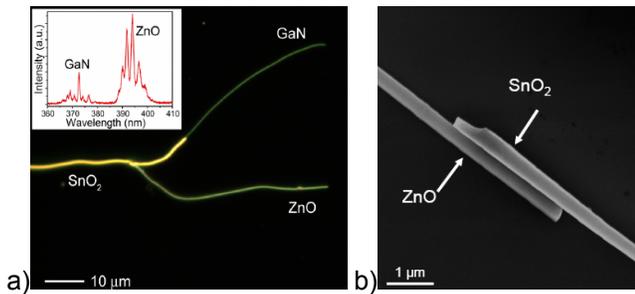


Figure 15:
a) Jonctions entre nanofils de nature différente
b) Jonction latérale entre deux nanofils

ayant des faibles pertes en transmission. Différentes techniques de couplage ont été développées notamment par l'équipe du professeur Yang afin de coupler efficacement deux nanofils²⁰. La technique la plus simple conceptuellement consiste à placer les deux fils face contre face (voir *figure 15a*), une autre technique plus spécifique à ces guides de faible dimension consiste à utiliser les propriétés des ondes évanescentes pour coupler la lumière. Deux guides joints latéralement sur une distance de quelques microns se transmettent la lumière via les ondes évanescentes (voir *figure 15b*). Ce type de jonction offre la possibilité de créer de nombreux composants passifs tels que des séparateurs d'onde Y, des interféromètres Mach-Zehnder et des oscillateurs en anneau.

IV.3 L'émission de lumière

Un des groupes leaders aux Etats-Unis de la recherche sur les nanofils est certainement celui de du Professeur Lieber à Harvard (Cambridge), et il n'est pas étonnant que ce soit de ce groupe que viennent les avancées les plus marquantes pour l'émission de lumière à partir de nanofils. Cette émission est obtenue à partir de jonctions PN réalisées à partir de nanofils semiconducteurs, en utilisant deux méthodes différentes, l'une consiste à modifier le dopage du nanofil suivant son axe et l'autre à amener au contact deux nanofils de dopage différent. A partir de ces structures de base, l'équipe a réalisé des diodes électroluminescentes (DEL) de très petites

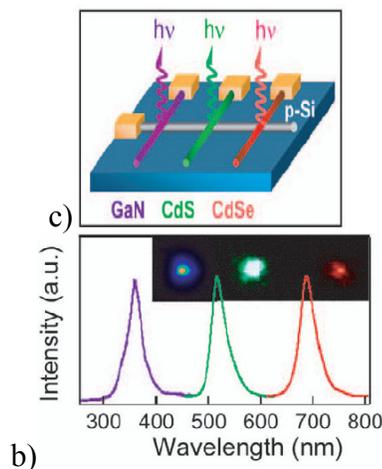


Figure 16:
a) Schéma représentant la structure de DEL réalisées à partir de jonctions entre nanofils de différents matériaux
b) Emission de lumière dans l'UV, le vert et le rouge obtenues à partir de nanofils de GaN, CdS et CdSe.

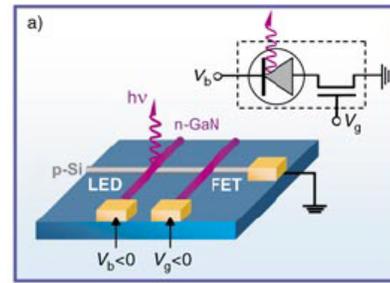


Figure 17: Système nano-optoélectronique intégrant une DEL et un transistor à base de nanofils

dimensions, et a montré qu'il est possible d'émettre des rayonnements de longueurs d'onde différentes en faisant reposer des nanofils de matériaux différents (GaN, CdS, CdSe) sur un même nanofil de Si²³ (voir *figure 16*). Ce type de DEL peut être amélioré en ajoutant au système un second nanofil de type N qui sous polarisation se comporte comme la grille de commande (voir *figure 17*) d'un transistor à effet de champ (FET) et permet l'utilisation de la diode à une fréquence plus élevée.

Le groupe de Lieber a proposé un autre dispositif qui exploite une géométrie différente : la jonction est obtenue dans l'épaisseur du nanofil (ici, de section triangulaire) qui est constitué de couches successives différentes comme le montre la *figure 18a*. En appliquant une différence de potentiel entre le cœur (dopé n) et la couche extérieure (dopée p) (voir *figure 18b*), les chercheurs ont réussi à générer une émission de lumière incohérente qui guidée par réflexion interne dans le cœur d'indice plus élevé est émise à l'extrémité du nanofil²⁴. Quand les faces externes du nanofil sont réfléchissantes, la structure est celle d'une cavité Fabry-Pérot et une émission de lumière cohérente peut être obtenue²⁵. Par ailleurs le facteur de qualité optique peut être modifié lorsque les nanofils sont soumis à un champ électrique extérieur, et on peut alors réaliser de la modulation électro-optique (EOM)²⁶.

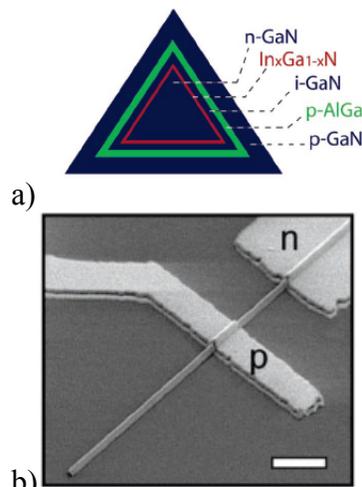


Figure 18:
a) Schéma de la section d'un nanofil composé de plusieurs couches de dopage différent
b) Image au microscope à balayage électronique de la DEL de section triangulaire, les électrodes positives et négatives sont respectivement représentées par un n et un p

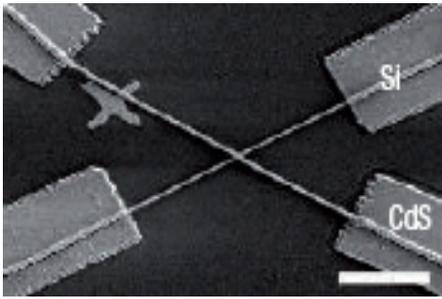


Figure 19 : Image d'une photodiode à avalanche composée réalisée par une jonction entre un nanofil

IV.4 Les dispositifs détecteurs de lumière

Les nanofils peuvent également être utilisés pour détecter un signal optique de faible puissance, leur forte photoconductivité leur conférant une grande sensibilité. L'équipe de Jia G.Lu (University of California à Irvine) a ainsi développé des photo-détecteurs sensibles aux UV constitués d'un nanofil de ZnO. Le nanofil est relié à deux électrodes et suspendu au dessus d'un substrat dans une configuration semblable à celle d'un transistor à effet de champ, cette configuration permettant le contrôle de la photoconductivité par la tension de grille. Ce composant peut être utilisé comme interrupteur optique réversible et ultra rapide avec des rapports signal actif / signal passif de 100 sous une faible intensité lumineuse ultraviolette²⁷.

L'équipe de Lieber propose également d'exploiter la grande sensibilité des nanofils pour réaliser la détection de photons uniques. Deux configurations de photodiodes à avalanche (APD) sont étudiées, semblables à celles déjà décrites pour les DEL, l'une basée sur l'utilisation d'un nanofil de Si dont le dopage est modulé selon son axe pour réaliser une jonction PN, l'autre est réalisée en croisant deux nanofils différents, l'un en Si p et l'autre en CdS n, chaque extrémité des nanofils étant connectée à une électrode métallique. Ces APD possèdent une grande sensibilité avec un seuil de détection de l'ordre de 100 photons (*figure 19*). Les APD constituées de nanofils peuvent également être utilisées en réseau afin d'obtenir une détection spatiale dont la résolution est inférieure à 250 nm²⁸.

La détection optique peut aussi se faire à partir de nanofils supraconducteurs. L'équipe du Professeur Berggren au MIT a développé des détecteurs de photon unique à partir de nanofils en NbN supraconducteur à faible température. La géométrie du nanofil de NbN peut être conçue pour offrir une surface de détection importante sans que cela modifie la section du détecteur (voir *figure 20a*). L'échauffement résultant de l'absorption des photons modifie la supraconductivité du fil, ce qui permet de détecter la lumière en mesurant la variation de la résistance du fil²⁹.

Les nanofils sont aussi utilisés dans des composants de taille micrométrique tels que certains photo-détecteurs et cellules solaires³⁰. Empilés aléatoirement sur la surface du détecteur permettent d'augmenter le coefficient

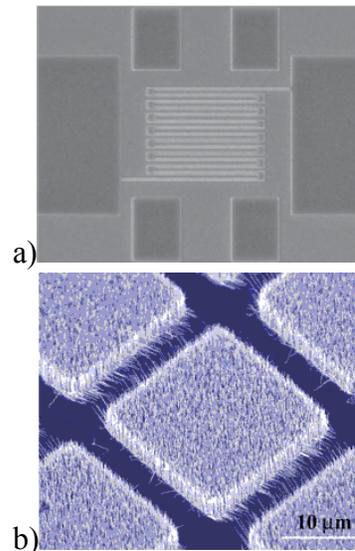


Figure 20:
a) Détecteur de photon unique réalisé à partir d'un nanofil supraconducteur de NbN

b) Image de nanofils de ZnO implantés sur la surface active d'une cellule solaire.

d'absorption optique et d'améliorer le coefficient d'extraction des porteurs photo excités (voir *figure 20b*). Le choix des dimensions et de la composition des nanofils permet de modifier la sensibilité spectrale du détecteur.

V Nanoparticules et boîtes quantiques

V.1 Définitions

Une nanoparticule est un objet tridimensionnel de dimension nanométrique, et donc constitué de l'assemblage d'un nombre limité d'atomes, variable de quelques dizaines à plusieurs milliers. On sait fabriquer des nanoparticules à partir de matériaux métalliques, semiconducteurs, ou magnétiques. Certaines nanoparticules métalliques sont le siège d'une résonance plasmonique de surface, les nanoparticules semiconductrices aussi appelées Quantum Dots (points ou boîtes quantiques) présentent des propriétés particulières dues au confinement des porteurs de charge, et les nanoparticules magnétiques peuvent posséder des propriétés de superparamagnétisme. Ces propriétés remarquables font des nanoparticules des objets passionnants, aussi bien pour des raisons fondamentales que pour leurs applications potentielles.

Les applications en nanophotonique restent encore relativement limitées, et mettent en jeu uniquement les nanoparticules métalliques et semiconductrices. Le secteur le plus développé aujourd'hui est celui du biomédical, où ces nanoparticules peuvent notamment être utilisées comme marqueurs optiques. Les nanoparticules semiconductrices sont également étudiées pour être employées dans la fabrication de DEL ou de sources de lumière cohérente.

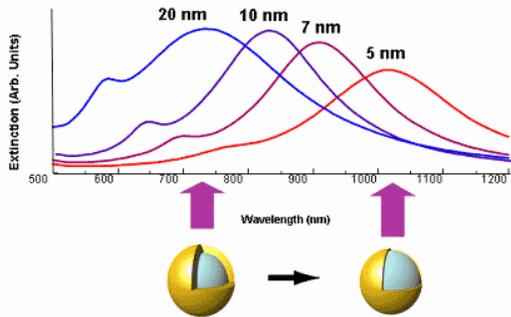


Figure 21: Evolution des spectres optiques de nanoshells d'or avec l'épaisseur de la couche métallique – Source : Nanospectra Biosciences

V.2 Les nanoparticules pour la nanophotonique

V.2.1 Les nanoparticules métalliques

Les nanoparticules métalliques les plus couramment utilisées en nanophotonique sont celles constituées de matériaux nobles tels que l'or ou l'argent³¹. Les propriétés optiques de ces objets sont dominées par le phénomène de résonance plasmonique de surface, qui est une oscillation collective des électrons de conduction. La position spectrale et la largeur de la bande plasmonique dépend d'un grand nombre de facteurs, comme la taille et la forme des particules, mais aussi de leur environnement. Ces nanoparticules qui sont le siège d'une diffusion intense sont donc utilisables pour le développement de capteurs chimiques et biochimiques. Leur surface peut aussi être fonctionnalisée de façon à ce que ces nanoparticules puissent s'accrocher à des espèces moléculaires particulières, et servir ainsi de marqueur optique. On peut aussi les cibler pour qu'elles s'accrochent à des cellules cancéreuses, et ensuite les irradier au moyen d'un rayonnement infra-rouge afin que l'échauffement localisé qui en résulte permette la destruction thermique de la cellule malade³².

Une famille particulière de nanoparticules métalliques a été développée par le groupe de Naomi Halas, à Houston (Rice University), appelées nanoshells (pour nanocoquilles) en raison de leur structure obtenue à partir de nanosphères de silice entourées d'une couche de quelques nanomètres d'or. Ces nanoparticules sont très bien calibrées en taille, et le choix de l'épaisseur de la coquille d'or permet d'ajuster la position de leur spectre d'absorption (voir *figure 21*). L'équipe a montré récemment que la forme influençait également la position du spectre, en développant notamment des nanoparticules de forme allongée ("nanorice")³³. Tout comme les nanoparticules d'or pleines, ces nanoshells s'avèrent aussi très prometteuses pour le traitement des cancers lorsqu'elles sont élaborées de façon à absorber l'infrarouge. En effet, puisque les tissus humains sont transparents dans cette gamme de longueur d'onde, il est possible d'exciter optiquement les nanoshells accrochées

aux cellules cancéreuses d'un organe sans détériorer les cellules saines. Les premières expériences réalisées sur des souris ont permis de montrer qu'il était ainsi possible de faire disparaître totalement certaines tumeurs cancéreuses³⁴.

D'autres groupes étudient des structures de forme allongée, comme par exemple des nano bâtonnets d'or de 40 à 200 nm de long dont les diamètres varient de 10 à 20 nm. Comparées aux nanoshells, ces objets ont un spectre moins étendu en longueur d'onde mais un coefficient d'extinction plus élevé.

Les procédés de fabrication de ces bâtonnets sont difficiles à maîtriser, mais plusieurs groupes tels que celui de Catherine Murphy à Columbia (University of South Carolina) et de Mostafa El-Sayed au Georgia Institute of Technology (Atlanta, GA) ont réalisé récemment des avancées importantes permettant de synthétiser des bâtonnets ayant une grande homogénéité. L'utilisation des bâtonnets d'or a été démontrée en thérapie photo thermique et imagerie de cellules cancéreuses³⁵.

Un troisième type de géométrie a été proposé récemment par l'équipe de Younan Xia (University of Washington à Seattle) : il s'agit de nano cubes d'or creux qui sont obtenus en déposant une fine couche d'or de 3 nm sur les faces d'un cube de très petite dimension (de l'ordre de 40 nm de côté) en argent qui est ensuite dissout chimiquement. Ces objets, appelé nanocages par leur inventeur, présentent l'intérêt d'avoir un spectre encore plus étroit en longueur d'onde, avec un maximum compris entre 400 et 1200 nm, et paraissent particulièrement intéressants pour des applications en tomographie de cohérence optique.

V.2.2 Les nanoparticules semiconductrices

Les nanoparticules semiconductrices ou Quantum Dots (QD) sont des cristaux semiconducteurs à trois dimensions constitués d'atomes formant une sphère d'un rayon de quelques nanomètres à plusieurs centaines de

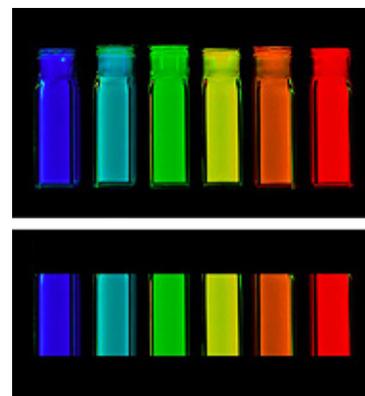


Figure 22: Solutions de boîtes quantiques de divers diamètres constituées de nanocristaux de CdSe/ CdTe – Crédits : Felice Frankel

nanomètres. Les premières recherches sur les QD menées par Aleksey Ekimov (Nanocrystals Technology), Louis E. Brus (Columbia University) et Alexander L. Efros (Naval Research Laboratory), dans les années 1990 ont permis de mettre en évidence le confinement dans les trois directions de l'espace induit par les QD, d'où le nom de dot (point en français). Ce confinement important confère aux QD un spectre d'énergie discret quantifié et ainsi des propriétés quantiques très intéressantes pour des utilisations en nanophotonique. Ainsi, leurs spectres d'émission et d'absorption peuvent être décalés en longueur d'onde en changeant leurs dimensions. La *figure 22* donne un exemple des différentes couleurs obtenues pour des solutions de nanocristaux de différentes tailles.

Les nanocristaux semiconducteurs sont très souvent constitués de l'association de 2 matériaux différents, dans une structure où le matériau de plus grand gap recouvre comme une coquille le cœur constitué du matériau de plus petit gap, comme par exemple les nanocristaux de CdSe enveloppés dans ZnS³⁶. Les composés les plus couramment développés sont constitués de semi-conducteurs de type II-VI tels que ZnS, CdSe, CdTe, et PbSe³⁷. D'autres nanocristaux moins courants possèdent un cœur semi-conducteur et une enveloppe organique ou d'oxyde minéral.

L'emploi des nanocristaux en imagerie biomédicale est actuellement l'application la plus avancée. Aux Etats-Unis, les groupes leaders de ce domaine sont certainement ceux du Professeur Alivisatos à Berkeley (University of California) et du Professeur Bawendi au MIT. On exploite les propriétés de fluorescence des QD pour le marquage moléculaire en accrochant des nanocristaux à des molécules biologiques, comme on le fait avec des colorants organiques. Il y a plusieurs avantages à utiliser les nanocristaux à la place des colorants : leur spectre d'absorption est ajustable par le choix de la taille du nanocrystal, et l'émission se fait dans une bande spectrale bien plus étroite qu'un colorant. On n'observe pas non plus de phénomène de blanchiment

(bleaching) qui se produit lorsque la molécule organique se dégrade et arrête d'émettre. Par ailleurs, la surface des nanocristaux peut être "habillée" d'une couche organique, qui peut être fonctionnalisée pour cibler une molécule ou des cellules particulières (voir par exemple les travaux du Professeur Weiss de l'University of California à Los Angeles). Les nanocristaux ont également un comportement optique non-linéaire ce qui permet de les utiliser en imagerie par absorption de deux photons³⁸.

L'utilisation in vivo des nanocristaux pour l'imagerie a déjà été développée chez la souris par plusieurs équipes et notamment celle du professeur Gao de l'University of Washington³⁹ (voir *figure 23*). Avant de pouvoir passer à l'expérimentation humaine, des études de toxicité sont nécessaires : comme le souligne le Professeur Hardman (Duke University) qui s'intéresse à ces aspects⁴⁰, l'utilisation de nanocristaux risque d'être nocive à long terme ne serait-ce qu'en raison de la nature de leurs constituants et du caractère toxique des produits utilisés lors de leur fabrication.

V.3 les autres applications des nanoparticules semiconductrices.

La principale difficulté rencontrée pour exploiter les QD reste liée à l'inhomogénéité de leur taille : les nanocristaux obtenus par synthèse colloïdale présentent généralement une distribution de diamètres centrée autour d'une valeur moyenne, de sorte qu'il n'est pas possible d'exploiter ces QD dans des dispositifs optiques monomode. Les chercheurs s'intéressent donc à la réalisation d'émetteurs et de récepteurs multimodes, en déposant sur un matériau support une ou plusieurs couches de nanocristaux (synthétisés par ailleurs) qui constitueront la partie active du dispositif⁴¹.

Ainsi, une DEL hybride organique/inorganique⁴² combinant les avantages des nanocristaux (stabilité chimique et finesse spectrale) à ceux de la synthèse

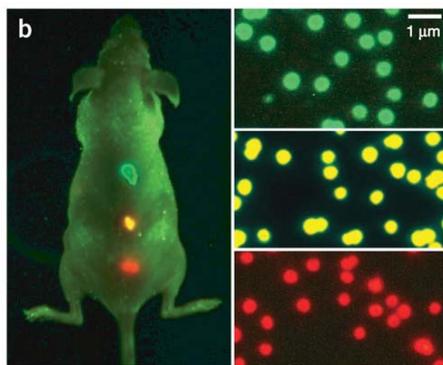


Figure 23: Utilisation de nanocristaux en imagerie in vivo chez la souris, les couleurs verte, jaune et rouge, sont émises par des nanocristaux différents localisés sur des organes de la souris – X.Gao et S.Nie, Emory University School of Medicine

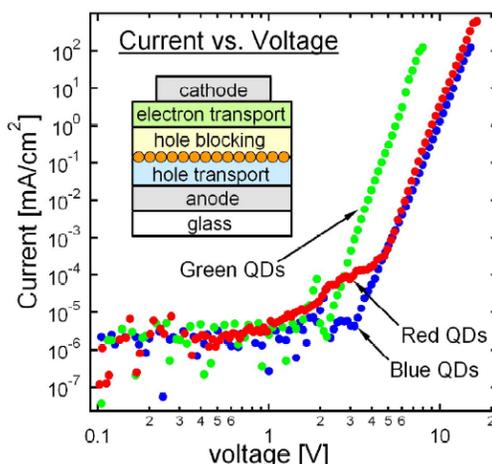


Figure 24 : Exemple de caractéristique en courant-tension d'une LED à base de QD

organique (procédés peu coûteux) a été développée par l'équipe des Professeurs Bulovic et Bawendi du MIT à Cambridge: elle est constituée d'une anode transparente déposée sur un substrat de verre, sur laquelle on a déposé deux couches organiques pour le transport des électrons et des trous, séparées par une couche de nanocristaux, une cathode métallique venant coiffer la structure (voir *figure 24*). La recombinaison radiative des porteurs injectés dans les nanocristaux est caractérisée par un excellent rendement énergétique, et la longueur d'onde d'émission peut être ajustée en choisissant la taille des nanocristaux, de sorte que des DEL émettant dans le vert, le rouge et le bleu ont été obtenues. Un ancien PhD du groupe, le Dr Coe, qui a contribué à ces travaux a créé QD Vision, une start-up qui vise à développer ces dispositifs.

La même équipe a par ailleurs réalisé des photo détecteurs large spectre⁴³ en déposant une couche de nanocristaux de CdSe de diamètres différents en sandwich entre deux couches de semiconducteurs, l'un dopé n et l'autre p. Lorsque la surface de détection est illuminée, les paires électrons-trous photo-générées dans la couche de QD sont séparées et on observe le passage d'un photocourant. Là encore, le spectre d'absorption du photo détecteur peut être ajusté du visible vers l'infrarouge proche selon les applications ciblées en modifiant la composition et la taille des nanocristaux.

Les nanocristaux ont également été proposés pour réaliser des guides d'onde dont les limites se situent en dessous de celles de la diffraction. L'équipe du Dr. Lin à Seattle (University of Washington) a développé des structures guidantes pour un rayonnement de 633nm de longueur d'onde constituées d'un alignement de nanocristaux de 10nm de diamètre espacées de quelques nanomètres⁴⁴. Lors de la propagation, les pertes optiques sont compensées par un laser de pompe qui excite les différents QD (voir *figure 25*).

Par ailleurs, de nombreux travaux sont consacrés à l'utilisation des nanocristaux semiconducteurs dans le domaine des cellules solaires comme élément de détection. Ce sujet a été traité dans le numéro de Juin 2006 de la Lettre Sciences Physiques Etats-Unis.

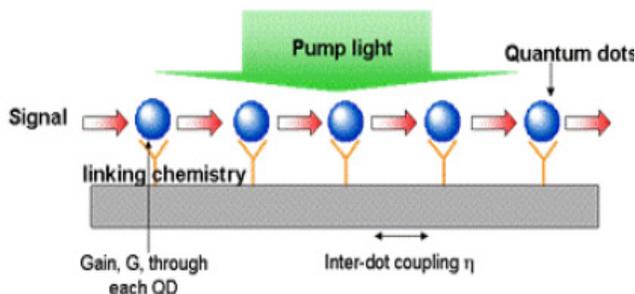


Figure 25 : Principe de fonctionnement d'un guide d'onde à base de boîtes quantiques

V.4 les Quantum Dots épitaxiés ou îlots semiconducteurs.

Il s'agit là de nanocristaux semiconducteurs qui sont implantés directement sur un substrat du fait même de leur processus de fabrication. En effet, ce type de QD se forme naturellement dans certaines conditions durant le processus d'épitaxie par jets moléculaire (MBE) ou pendant l'épitaxie en phase vapeur d'organo-métalliques (MOVPE), lorsque le matériau déposé possède un paramètre de maille différent de celui du substrat (croissance de type Stranski-Krastanov). Les QD peuvent par exemple être des îlots de InAs sur un substrat de InGaAs. Les QD formés par cette technique sont généralement constitués de matériaux III-V tels que InP, InAs, AsGa, GaN et possèdent une meilleure homogénéité de taille comparée à celle des nanocristaux. Ceci permet d'envisager leur utilisation dans des applications nécessitant une grande finesse spectrale telles que les télécommunications optiques, par exemple.

La réalisation de diodes lasers à QD est l'application la plus étudiée. Les lasers à QD sont constitués comme les DEL de trois zones caractéristiques : une couche de confinement de dopage n, une couche de confinement p et une zone active comprise entre les deux zones précédentes constituée d'îlots répartis uniformément. Lorsque la diode est polarisée en direct les électrons et trous se répartissent dans les boîtes quantiques. Lorsqu'une densité d'états suffisante est obtenue, les porteurs se recombinent en émettant spontanément des photons. Guidés entre les couches n et p ces photons participent à une émission stimulée lorsqu'ils sont réfléchis sur les faces de sortie de la diode et qu'ils passent à proximité d'une boîte quantique⁴⁵. L'équipe du Professeur Krishna de l'University of New Mexico a développé un laser basé sur des îlots d'InAs qui constituent la région active du composant (voir *figure 26*). Ces travaux ont débouché sur la création d'une start up Zia Laser, récemment reprise par une autre start up allemande (Nanosemiconductor)⁴⁶.

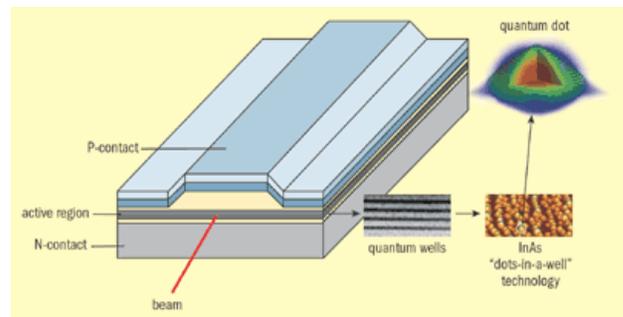


Figure 26 : Structure d'un laser à semi-conducteur à base de QD épitaxiés comprenant une région active organisée en puits quantiques contenant chacun une multitude d'îlots d'InAs. Chaque îlot mesure 20nm en largeur et 8nm en hauteur. Pour couvrir une surface d'1cm² il serait nécessaire de former 100 milliards d'îlots.

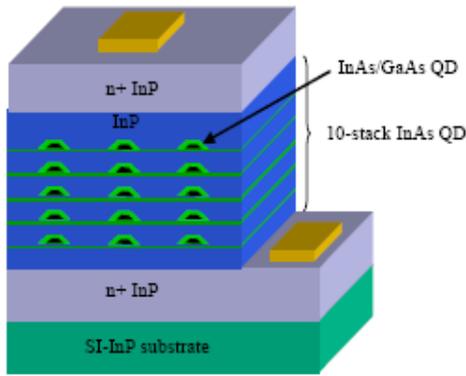


Figure 27 : Vue en coupe d'un photo détecteur composé d'un empilement de couches contenant chacune des OD

La même équipe a également développé des photodétecteurs en empilant plusieurs plans d'îlots de InAs séparés par des couches de GaAs. Le détecteur obtenu possède un meilleur temps de réponse et une température de fonctionnement maximale plus élevée que les détecteurs à puit quantique⁴⁷(voir figure 27)

VI Développement et commercialisation

L'exploitation des recherches développées en nanophotonique reste encore très embryonnaire. Comme nous l'avons vu, de nombreuses pistes différentes sont étudiées, mais peu sont suffisamment avancées pour donner lieu à une production industrielle de dispositifs.

Le domaine qui est actuellement le plus développé est celui de la production de nanocristaux destinés au marquage biologique et à l'imagerie médicale. Parmi les

entreprises qui commercialisent ce type de produits, on citera Invitrogen (Carlsbad, CA), Nanocrystals (Briarcliff Manor, NY) et Evident Technologies (Troy, NY). Toujours dans le domaine de l'imagerie médicale, quelques entreprises proposent l'utilisation de nanotubes de carbone, comme par exemple Carbon Nanotechnologies (Houston, TX), ou bien de nanoshells comme Nanospectra (Houston, TX) pour l'imagerie in vivo et éventuellement la destruction de cellules cancéreuses.

Dans le domaine de l'optoélectronique, certains composants à base de boîtes quantiques tels que les DEL, diode laser et photodétecteurs commencent à être commercialisés, mais ils nécessitent encore quelques années de développement avant de pouvoir concurrencer les dispositifs actuels à base de puits quantiques: en effet, si les performances des composants à base de boîtes quantiques sont excellentes, leur coût sensiblement plus important freine leur commercialisation. Cependant, ce secteur devrait à terme représenter la part la plus importante du marché des applications de la nanophotonique. Les exemples les plus connus d'entreprises qui commercialisent ces produits sont Lumileds (San Jose, CA) et Cree (Durham, NC) qui exploitent les cristaux photoniques et les boîtes quantiques pour développer de nouvelles DEL. D'autres entreprises de type startup, de taille plus restreinte ne commercialisent encore que peu de produits et travaillent plutôt au niveau du développement, on peut notamment citer QDvision (Watertown, MA), Nanolume (Cary, NC) et Zia Lasers (Albuquerque, NM) qui développent des divers composants optoélectroniques. Le tableau de la Figure 28 rassemble un certain nombre d'entreprises identifiées dans le secteur de la nanophotonique.

Elément utilisé	Entreprise	Site Internet	Domaine spécifique
QD	Applied Nanotech (ANI) , TX	www.nano-proprietary.com	Si QD R&D
	Cambrios Technologies, CA	www.cambrios.com	QD R&D
	Evident Technologies , NY	www.evidenttech.com	II-VI dots Production
	Lucent Technologies, NJ	www.lucnet.com	QD R&D
	Nanocrystals Technology, NY	www.nanocrystals.com	II-VI dots Production
	Nanosys, , CA	www.nanosysinc.com	QD III-V, II-VI R&D
	Quantum Dot, CA	www.qdots.com	II-VI dots Production
	ASIP, NJ	www.asipinc.com	III-V dot lasers R&D
	Nanolume, NC	www.nanolume.net/	QD III-V
	Invitrogen, CA	www.introgen.com/	QD domaine médical
QD Vision, MA	www.qdvision.com/	DEL organique/inorganique	
Nano-particules	Nanospectra Biosciences, TX	www.nanospectra.com	Nanoshells métalliques
	Seashell Technology , CA	www.seashelltech.com	Nanoshells métalliques
	Nanoplex Technologies , CA	www.nanoplextech.com	Nanocylindre Production
	Nomadics , MA	www.nomadics.com	Fluorophore polymers R&D
Nanotubes	Nanomix, CA	www.nano.com	Nanofils R&D
	Xintek, NC	www.xintek.com/	Ecrans à base de nanotubes

Figure 28: Tableau présentant des entreprises développant des produits en nanophotonique

Conclusion

Il est clair que les laboratoires de recherche américains concentrent beaucoup d'efforts en nanophotonique sur silicium, notamment pour des applications en télécommunications afin de développer des connexions optiques inter et intra-composant. Les industriels se recentrent progressivement sur cette thématique, au détriment des recherches sur les matériaux III-V. Ils sous-traitent par ailleurs une grosse partie de leur recherche aux universités, en restant focalisés sur les applications proches du marché. Deux autres thématiques semblent bénéficier de soutiens financiers importants de la part des agences fédérales : les bio-senseurs pour la défense et les nouvelles sources d'énergie. Finalement il s'agit d'un domaine qui paraît actuellement proche d'une véritable entrée dans le monde commercial.

La situation est tout autre en ce qui concerne les nano objets, comme les nanotubes de carbone, nanofils, et quantum dots. Les recherches orientées vers leur exploitation en nanophotonique restent encore très amont: beaucoup d'efforts sont encore nécessaires pour contrôler les matériaux et les nano structures et rendre possible le développement de prototypes aux propriétés reproductibles, pour permettre ensuite la commercialisation de dispositifs qui soient compétitifs aussi bien en ce qui concerne leurs caractéristiques que leur coût de production. L'activité de recherche fondamentale est donc très développée, mais très diverse et finalement assez dispersée sur le territoire. Comme le montre le tableau ci-dessous, les meilleures universités y sont engagées, et on doit s'attendre à enregistrer d'importants progrès dans les prochaines années.

Spécialité	Organisme	Responsable Groupe	Site internet
Boîtes Quantiques	Caltech	Kerry Vahala	http://www.vahala.caltech.edu/
	University of Harvard	charles marcus	http://marcuslab.harvard.edu/
	Naval Research Laboratory	Richard J. Colton	www.nrl.navy.mil/nanoscience/nanooptics.html
Ilots	University of Albuquerque	Sanjay Krishna	http://www.chtm.unm.edu/~yagya/
	UC Santa Barbara	P. Petroff & E. Hu	http://www.materials.ucsb.edu/
	University of Colorado	Arthur J. Nozik	www.colorado.edu/chemistry/people/nozika.html#
	Duke University	A. Stiff-Roberts	www.ece.duke.edu/faculty/profile.php?id=354
	University of Illinois	James J. Coleman	http://sll.micro.uiuc.edu/people/jim/index.htm
	NIST Boulder	Richard Mirin	www.boulder.nist.gov/div815/NFM_Project/NFMP.htm
	Los Alamos National Laboratory	Victor I. Klimov	http://quantumdot.lanl.gov/
Nanocristaux-Dispositifs opto-électroniques	Columbia University	Louis E. Brus	www.columbia.edu/cu/chemistry/fac-bios/brus/group/
	UC Santa Barbara	D. Bouwmeester,	www.physics.ucsb.edu/~quopt/bouwmeester.html
	MIT	Bucolic-Baldo	www.rle.mit.edu/organic/
	University of Washington	Lih Lin,	http://www.ee.washington.edu/research/photonicslab/
	Cornell	Frank W. Wise	www.aep.cornell.edu/
Nanocristaux-Médecine	UC Los Angeles	Shimon Weiss	http://smb.chem.ucla.edu/
	Florida State	G. F. Strouse	www.chem.fsu.edu/editors/strouse/synthesis.html
	MIT	Moungi Bawendi	http://web.mit.edu/chemistry/nanocluster/
Nanocristaux-Synthèse	UC Berkeley	Paul Alivisatos	www.cchem.berkeley.edu/~pagrp/
	University of Chicago	P. Guyot-Sionnest	http://chemistry.uchicago.edu/
	IBM Research Division	Cherrie Kagan	www.research.ibm.com/journal/rd/451/murraaut.html
	University of Berkeley	Peidong Yang	www.cchem.berkeley.edu/pdygrp/main.html
Nanofils	University of Harvard	Charles Lieber	http://cmliris.harvard.edu
	UC Irvine	Jia grace lu	http://box43.bluehost.com/~hscucior/cms/
	MIT	Karl Berggren	www.rle.mit.edu/qnn/research_single.htm
	University of Buffalo	Wayne Anderson	www.ee.buffalo.edu/
	Harvard	Federico Capasso	www.deas.harvard.edu/capasso/research.html
	Rice University	Naomi Halas	www.ece.rice.edu/~halas/
Nanoshells	IBM Research Division	Phaedon Avouris	www.research.ibm.com/nanoscience/
	Global Research Center	Ji Ung Lee	www.ge.com/research/
	Stanford University	Hongjie Dai	www.stanford.edu/dept/chemistry/faculty/dai/

Références :

- 1 - http://mphotronics.mit.edu/about_mphc/MURI/siliconlasers.php
- 2 - “Field-Effect Electroluminescence In Silicon Nanocrystals”, Robert J. Walters, Georges I. Bourianoff and Harry A. Atwater, <http://rwalters.caltech.edu/publications/nmat1307.pdf>
- 3 - “Strong resonant luminescence from Ge quantum dots in photonic crystal microcavity at room temperature”, Xia, J. S., Ikegami, Y., Shiraki, Y., Usami, N. & Nakata, Y.. Appl. Phys. Lett. 89, 201102 (2006)
- 4 - “Spectral tuning of plasmon-enhanced silicon quantum dot luminescence”, Julie S. Biteen, Nathan S. Lewis, and Harry A. Atwater, Hans Mertens and Albert Polman., Appl. Phys. Lett. 88, 131109, 2006 http://daedalus.caltech.edu/publication/pubs/Biteen_APL_2006.pdf
- 5 - Le professeur Ray Chen dirige un groupe de recherche qui travaille sur les interconnexions optiques à l'université du Texas à Austin. Le site internet du groupe est accessible à l'adresse suivante : <http://www.mrc.utexas.edu:16080/Chen/optic-inter/>
- 6 - <http://www.pbglink.com/usa.html>
- 7 - Department of Energy (DoE), Department of Defense (DoD), Office of Naval Research, National Aeronautics & Space Administration (NASA), Air Force Office of Scientific Research, Ballistic Missile Defense Organization , National Institute of Standards and Technology (NIST)
- 8 - <http://www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/slowing.htm>
- 9 - “Ultracompact optical buffers on a silicon chip”, Fengnian Xia1, Lidija Sekaric1 and Yurii Vlasov1, Nature Photonics 1, 65 - 71 (2006)doi:10.1038/nphoton.2006.42.
- 10 - MURI - <http://www.plasmonmuri.caltech.edu/index.html>
- 11 - <http://www.plasmonmuri.caltech.edu/news/PosterAFOSR.pdf>
- 12 - <http://daedalus.caltech.edu/>
- 13 - “Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures”, Zongfu Yu, Georgios Veronis, Shanhui Fan, Mark L. Brongersma, Appl. Phys. Lett. 89, 151116 , 2006 http://www.stanford.edu/group/fan/publication/Yu_APL_89_151116_2006.pdf
- 14 - “High-Definition Carbon Nanotube TVs”, MIT technology Review, <http://www.technologyreview.com/Nanotech/17824/>
- 15 - “Fluorescence spectroscopy of single-walled carbon nanotubes in aqueous suspension”, R. B. Weisman R. B, M. Bachilos, D. Tsyboulski, Appl. Phys. A Mater. Sci. process. 2004, vol. 78, no8, pp. 1111-1116
- 16 - “Carbon nanotubes as multifunctional biological transporters and near-infrared agents for selective cancer cell destruction”, N. Wong Shi Kam, M. O'Connell, J. A. Wisdom, and H. Dai, PNAS, 102, 11600-11605, (2005)
- 17 - “Mobile Ambipolar Domain in Carbon-Nanotube Infrared Emitters”, M. Freitag, et al., Phys. Rev. Lett. 93, 076807 (2004); J. Tersoff et al. Applied. Physics. Letters. 86, 263108 ,2005.
- 18 - “Bright Infrared Emission from Electrically Induced Excitons in Carbon Nanotubes” ,Jia Chen, Vasili Perebeinos, et al, Science; Vol. 310. no. 5751, pp. 1171 - 1174
- 19 - “Controlled Growth of ZnO Nanowires and Their Optical Properties”, P. Yang et al, Advanced Functional Materials, Volume 12, Issue 5 , Pages 323 - 331
- 20 - “Nanoribbon Waveguides for Subwavelength Photonics Integration”, Matt Law, et al., Science 305, 1269 (2004)
- 21 - “Optical routing and sensing with nanowire assemblies”, Donald J. Sirbully, Matt Law and al, PNAS, vol. 102 | no. 22 | 7800-7805, <http://www.pnas.org/cgi/content/full/102/22/7800>
- 22 - “Oxide Nanowires for Sensing, Photonics and Photovoltaics”, Matt Law, <http://www.iupac.org/news/prize/2006/Law.pdf>
- 23 - “Nanowires for Integrated Multicolor Nanophotonics”, Yu Huang, Xiangfeng Duan, Charles M. Lieber, Small Journal 2005, No1
- 24 - “Core/Multishell Nanowire Heterostructures as Multicolor, High-Efficiency Light-Emitting Diodes”, Fang Qian, Silvija Gradečak, Yat Li, Cheng-Yen Wen, Charles M. Lieber, Nano Letters, Vol 5, No11, 2287-2291
- 25 - “GaN nanowire lasers with low lasing thresholds”; Silvija Gradečak and al., Applied Physics Letters 87, 173111, 2005
- 26 - “Semiconductor nanowire laser and nanowire waveguide electro-optic modulators”, Andrew B.Greytak, Carl J.Barrelet, Yat Li, Charles M. Lieber, Applied Physics Letters 87, 2005
- 27 - “Photoluminescence and polarized photodetection of single ZnO nanowires”, Z Y. Fan, P C. Chang, Jia G. Lu, E C. Walter, R M. Penner, C H. Lin, and H P. Lee, 2004. Applied Physics Letters. 85 (25), pp. 6128-6130.
- 28 - “Nanoscale avalanche photodiodes for highly sensitive and spatially resolved photon detection”, Oliver Hayden, Ritesh Agarwal, Charles Lieber, Nature Materials, Vol 5, Mai 2006
- 29 - “Nanowire Single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating”, Karl K. Berggren and al, Vol. 14, No. 2 / Optics Express 527
- 30 - “Nanowire dye-sensitised solar cells”, M.Law, L. E Greene, J. C Johnson, R Saykally, P Yang. Nature Mater. 4, 455-459, 2005.
- 31 - “Plasmonics: Gold nanoparticles are shaped for effect”, Jason Hafner, Laser Focus World, Avril 2006.
- 32 - “Selective Laser Photo-Thermal Therapy of Epithelial Carcinoma Using Anti-EGFR Antibody Conjugated Gold Nanoparticles”, El-Sayed, Ivan; Huang, Xiaohua; El-Sayed, Mostafa A., Cancer Letters, 2005
- 33 - “Controlling the Surface Enhanced Raman Effect via the Nanoshell Geometry”, J.B Jackson, S.L Westcott, L.R Hirsch, J.L West et N.J Halas, Applied Physics Letters, Jan 2003
- 34 - “Immunotargeted Nanoshells for Integrated Cancer Imaging and Therapy”, C. Loo, A. Lowery, N. J. Halas, J. L. West, and R. Drezek Nano Letters, 5, 709-711, 2005
- 35 - “Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods”, Huang X, El-Sayed IH, Qian W, El-Sayed MA, J Am Chem Soc. Feb 15;128(6):2115-20, 2006
- 36 - <http://probes.invitrogen.com/products/qdot/overview.html>
- 37 - <http://www.evidenttech.com/qdot-definition/quantum-dot-introduction.php>
- 38 - “Water-Soluble Quantum Dots for Multiphoton Fluorescence Imaging in Vivo”, Daniel R. Larson, Warren R. Zipfel and al. <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/300/5624/1434>
- 39 - Site internet du groupe du professeur gao consacré à l'imagerie par nanocristaux <http://faculty.washington.edu/xgao/pub.html>
- 40 - “A Toxicologic Review of Quantum Dots: Toxicity Depends on Physicochemical and Environmental Factors”, Ron Hardman, Environmental Health Perspectives ,Volume 114 | Numéro 2 | Février 2006
- 41 - “Quantum Dots in Semiconductor Optoelectronic Devices”, Figure 3, Edward B. Stokes, Adrienne D. Stiff-Roberts, and Charles T. Dameron
- 42 - “Organic and Nanostructured Materials in Optoelectronic Applications”, Progress report, 2005, http://www.rle.mit.edu/rleonline/ProgressReports/1809_29.pdf
- 43 - “Quantum Dot Photodetectors”, A.C. Arango, D.C. Oertel, M.G. Bawendi, V. Bulovic, MIT annual research report 2005 http://mtlweb.mit.edu/research/annual_reports/2005/ph/ph_21.pdf
- 44 - “Fabrication and Testing of Nano-photonics Quantum Dot Waveguides”, C.-J. Wang, B. A. Parviz, L. Y. Lin, IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, Aug. 21-24, 2006.
- 45 - “Laser et Diode Laser, Première partie : Les Bases”, G. Hincelin – Optoélectronique ,
- 46 - “Quantum-dot pioneers target telecoms rebound”, Opto & Laser Europe
- 47 - “Self Assembled Quantum Dot Devices”, <http://cq.d.ece.northwestern.edu/research/qdots.pdf>

SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS

NANOSCIENCES, MICROELECTRONIQUE,
MATERIAUX

Février 2007

Pour vous abonner gratuitement à :

SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS
et être informé en priorité de la disponibilité
des prochains numéros, il suffit d'envoyer un
courrier électronique à l'adresse:
subscribe.be.etatsunis@adit.fr
Vous recevrez en retour une confirmation
d'abonnement.

Directeur de la publication :
Michel ISRAEL

Rédacteurs en chef :
Roland HERINO
Daniel OCHOA

Rédacteurs :
Raphaël ALLEGRE
Romaric FAYOL

SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS
est une publication trimestrielle de
la Mission pour la Science et la Technologie
de l'Ambassade de France aux Etats-Unis,
dont la diffusion est assurée par l'ADIT

Vous y trouverez un archivage des anciens numéros
et découvrirez aussi les autres publications de la Mission
pour la Science et la Technologie

-S&T Presse
-Flash TIC
-Revue santé Etats-Unis
-Revue de l'environnement
-Etats-Unis Espace
-Etats-Unis Microélectronique/ Matériaux
(archives précédant la fusion)

Retrouvez SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS ainsi
que toute l'actualité technologique aux Etats-Unis et dans
le reste du monde sur le site:

<http://www.bulletins-electroniques.com/>

DOSSIERS ETATS-UNIS SCIENCES-PHYSIQUES

- Octobre 2006 : Comment maîtriser les risques posés par les nanotechnologies ? L'approche Américaine.
- Juin 2006 : Recherche et Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats Unis
- Février 2006 : Recherche et production industrielle des nanotubes de carbone - Recherche américaine : vers un modèle ouvert basé sur la collaboration
- Octobre 2005 : Nanotechnologies et santé publique - A l'interface du nanomonde - De nouvelles cellules photovoltaïques - Du nouveau dans les semiconducteurs
- Août 2005 : La photolithographie
- Février 2005 : L'électronique grand public aux Etats-Unis
- Juillet 2004 : L'International Roadmap for Semiconductors
- Mai 2004 : Les Nanocomposites aux Etats-Unis

AUTRES RAPPORTS ETATS-UNIS

- Janvier 2007 : Retour des Démocrates au Congrès : orientation des politiques dédiées à l'environnement, au développement durable et à la santé
- Novembre 2006 : Aperçus sur l'énergie aux Etats-Unis
- Mars 2006 : Forum Energie et Nanotechnologie : stockage et distribution
- Mars 2006 : Associations, accréditation, autorégulation : les règles du marché de l'enseignement supérieur américain
- Janv 2006 : Regards français sur la Silicon Valley
- Janv 2006 : Présence française dans le domaine High Tech dans la region de San Francisco
- Sept 2005 : Les efforts de Recherche et Développement en nanotechnologies aux USA
- Sept 2005 : La Politique Fédérale de R&D en Nanotechnologies aux Etats Unis
- Sept 2005 : Initiative jeunes entrepreneurs - Mobilité de jeunes chercheurs/entrepreneurs vers la France
- Sept 2005 : Enseignement universitaire et recherche : comparaison entre les USA, le Japon et la France
- Sept 2005 : Le développement technologique dans la région de San Francisco
- Sept 2005 : Le Devenir des Post-doctorants en Amérique du Nord
- Mars 2005 : La spintronique aux Etats-Unis - Un Aperçu des Recherches
- Jan 2005 : Nanoélectronique – USA
- Jan 2005 : Comment fonctionnent les universités américaines ?
- Jan 2005 : L'environnement au sortir des élections américaines : bilan et perspectives