



Lorsque les lasers deviennent nano

Lorsque les lasers deviennent de dimensions submicroniques, la physique qui les gouverne est significativement modifiée, car la mécanique quantique commence alors à affecter les mécanismes qui régissent l'émission de lumière. Si ces lasers ont largement été explorés théoriquement par le passé, leur réalisation récente a réouvert un grand nombre de questions, lançant ainsi un nouveau pan de recherche en physique des lasers.

➤ Alexios BEVERATOS, Isabelle ROBERT-PHILIP

Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, CNRS - Marcoussis.

Alexios.beveratos@lpn.cnrs.fr
Isabelle.robert@lpn.cnrs.fr

➤ Philippe LALANNE

Institut d'Optique, CNRS - Palaiseau.

Philippe.Lalanne@institutoptique.fr

Il existe une grande diversité de sources laser, en termes par exemple de puissance, de longueur d'onde d'émission, mais aussi en termes de taille. Les dimensions des sources laser s'étendent sur un intervalle de plus de cinq ordres de grandeur, depuis l'immense laser MégaJoule à Bordeaux jusqu'aux lasers rubans miniatures en semiconducteur qui équipent nos lecteurs DVD. Les plus petits lasers commercialisés à ce jour sont des lasers entièrement semiconducteurs à cavité verticale (VCSELs), en forme de micropiliers formés d'une cavité de 10 μm de diamètre enfermée par deux miroirs de Bragg de 10 μm de haut. Devant un tel facteur d'échelle spatiale, se pose la question de savoir si l'on peut comprendre le fonctionnement de toutes ces sources à partir d'un unique modèle ? On est en droit de se poser cette question, en particulier lorsque les dimensions des lasers deviennent encore plus petites, pour opérer à des échelles nanométriques.

Quelle nouvelle physique ?

Dans de tels lasers de dimensions submicroniques, le nombre de modes optiques supportés par la cavité est faible et leur densité peut être fortement augmentée ou réduite à certaines longueurs d'onde. Ceci conduit à l'émergence d'effets quantiques qui marquent la lumière produite. Apparaissent notamment une modification de la dynamique et du diagramme de rayonnement de l'émission spontanée qui est alors préférentiellement véhiculée dans le mode laser. La fraction d'émission spontanée dirigée vers le mode laser augmente de 4 ordres de grandeur, atteignant quelques 10^{-1} , contre 10^{-5} dans les lasers conventionnels. La réponse du laser devient alors radicalement différente. Il s'ensuit en particulier une augmentation de la bande de modulation directe (le laser répond 10 000 fois plus

vite) ainsi qu'une diminution du seuil laser et a priori du bruit. Dans les années 90, les effets liés à cette nouvelle physique ont été discutés théoriquement, mais il a fallu attendre la fin des années 2000 et les progrès considérables à la fois en nanotechnologie et en nanoscience, pour que de tels lasers miniatures voient le jour, notamment dans le domaine des semiconducteurs. Pour le milieu amplificateur, on recourt généralement à des semiconducteurs micro ou nanostructurés (jonction p-n, multipuits quantiques, boîtes quantiques...), alors que pour la cavité optique, on recourt soit à des cavités de dimensions de l'ordre de la longueur d'onde, soit à des structures à plasmons de surface.

Réaliser des cavités laser à la limite de la diffraction

Pour réaliser des cavités laser miniatures, on exploite généralement un confinement hybride, mariant effets de réflexion interne totale, effets d'interférences et diffraction. Prenons l'exemple des cavités à cristaux photoniques sur membrane suspendue (voir Fig. 1). La lumière est confinée verticalement par réflexion interne totale dans la membrane de fort indice ($n = 3,5$) et dans le plan de la membrane par diffraction sur le cristal photonique bidimensionnel composé de trous. Par un agencement judicieux des trous dans la membrane ou bien en omettant de percer quelques trous dans le cristal photonique, on forme une cavité optique. Le volume de telles cavités peut être de l'ordre de $(\lambda/n)^3$ soit quelques $10^{-2} \mu\text{m}^3$ dans l'infrarouge (volume ultime essentiellement limité par la diffraction). Leurs facteurs de qualité sont de 10^4 à quelque 10^6 , correspondant à des temps de vie du photon dans la cavité de quelques dizaines de picosecondes à quelques nanosecondes.

En isolant un milieu amplificateur dans ces microcavités, plusieurs équipes ont construit des lasers opérant aux échelles nanométriques. Des lasers semblables aux lasers à cavité verticale mais offrant des volumes 100 fois plus petits ont été fabriqués à l'Université de Würzburg en Allemagne. Des nanolasers à cristaux photoniques encore 10 fois plus petits ($V=0,05 \mu\text{m}^3$) avec des seuils de l'ordre de la dizaine de microWatts ont vu le jour au Caltech, à l'Institut des Nanosciences de Lyon ou bien au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures à Marcoussis par exemple.

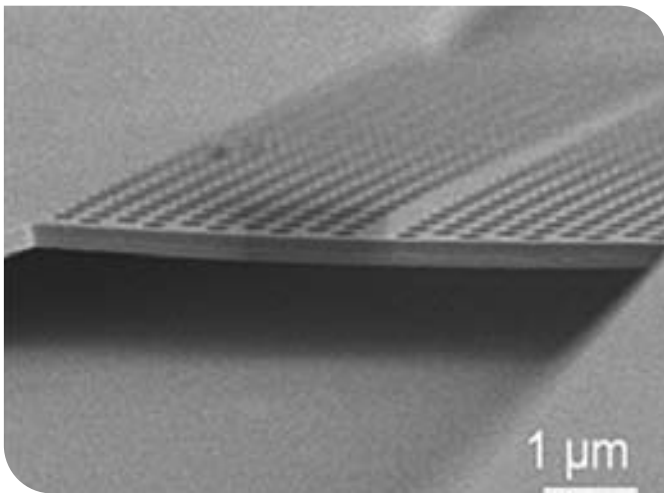


Figure 1. Cavité à cristal photonique sur membrane d'InP suspendue. L'épaisseur de la membrane est de l'ordre de 200 nm.

Réaliser des cavités laser en deçà de la limite de diffraction

Il est possible de réduire encore le volume de la cavité laser en utilisant des structures métallo-diélectriques et en particulier en exploitant les propriétés des plasmons de surface. Physiquement, les plasmons de surface sont des modes électromagnétiques couplés au gaz d'électrons libres du métal qui se propagent le long des surfaces des métaux. Leur fort confinement à l'interface métal-diélectrique donne lieu à une exaltation importante du champ à l'interface, sur des échelles bien plus petites que la longueur d'onde optique. Ce fort confinement vient d'être exploité pour réaliser des nanolasers dans lesquels le volume de la cavité laser est de l'ordre de seulement quelques 10^3 nm^3 .

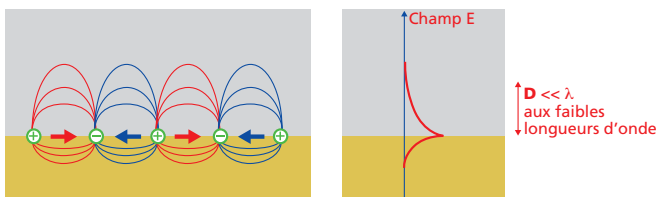


Figure 2. Principe d'un plasmon de surface : l'oscillation collective des électrons dans la direction du plan de l'interface (métal en jaune, diélectrique en gris) induit une onde électromagnétique qui décroît exponentiellement dans la direction perpendiculaire à l'interface et se propage le long de celle-ci.

À titre d'exemple, une équipe de l'Université d'État de Norfolk en Virginie a dernièrement construit un des premiers lasers à plasmons de surface, en entourant des nanobilles d'or de 14 nm de diamètre par une mince enveloppe de silice incorporant des molécules organiques de colorant. Parallèlement, des chercheurs de l'Université de Berkeley ont quant à eux utilisé comme milieu amplificateur des nanofils de semiconducteur, d'un diamètre de l'ordre de la centaine de nm, déposés juste au-dessus d'une surface plane en argent tapissée d'une >>>

Emission et détection TeraHertz : G10620



Un nouveau détecteur pour de nouvelles applications

- Modules d'émission et de détection pour le domaine 0.5 à 6 THz
- Configuration en dipole, queue d'aronde et spirale

Applications :

- Contrôle non destructif
- Spectroscopie IR lointain
- Analyse de matériaux

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

www.hamamatsu.fr
infos@hamamatsu.fr - Tél. +33 1 69 53 71 00

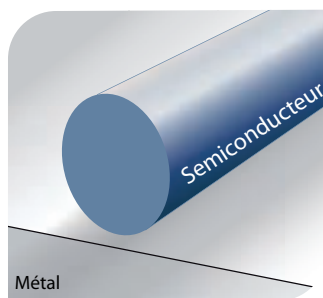


Figure 3. Représentation schématique du laser réalisé à l'Université de Berkeley, formé d'un fil de semi-conducteur d'une centaine de nm de diamètre et reporté sur une couche métallique.

fine couche de fluorure de magnésium. Avec ces lasers à plasmons, des records viennent d'être battus, mais attention aux pertes par effet joule dans le métal pour les applications !

Revisiter la physique des lasers...

Cette réduction en taille des sources laser s'accompagne de l'émergence d'une physique nouvelle qui gouverne le fonctionnement du laser. Illustrons ce point avec le passage du seuil. Dans les lasers conventionnels, la courbe traçant l'intensité émise en fonction de la puissance d'excitation est caractérisée par une augmentation abrupte et non-linéaire de l'intensité émise, au-delà d'une certaine puissance d'excitation dite puissance seuil (voir Fig. 4). Cette augmentation abrupte traduit le passage du laser d'un régime d'émission spontanée à un régime d'émission stimulée. Que se passe-t-il dans les lasers de très faibles dimensions ? Du fait de l'accélération de l'émission spontanée et de sa redistribution spatiale vers le mode « utile » de la source, le passage du seuil n'est plus abrupt mais progressif. Dans la limite où les phénomènes d'absorption sont négligeables et où toute l'émission spontanée est véhiculée dans le mode laser, il devient même impossible d'identifier une plage de puissance correspondant au passage entre émission spontanée et émission stimulée. Que se passe-t-il réellement ? La question n'est toujours pas tranchée.

Outre des questionnements sur le passage du seuil, ces lasers suscitent un grand nombre d'interrogations. On s'attend ainsi à une réduction du temps d'allumage et donc à une augmentation de la bande directe de modulation. La largeur de raie du rayonnement produit cesse-t-elle de décroître avec la puissance d'excitation contrairement aux lasers usuels ? Peut-on

s'attendre comme prédit à une réduction du bruit d'intensité du faisceau laser ? Pour répondre à ces questions, il conviendra de revisiter la physique des lasers semiconducteurs, en y associant notamment des concepts issus de l'électrodynamique quantique en cavité. Cette compréhension de la physique gouvernant de tels lasers miniatures est une étape essentielle pour ensuite imaginer de possibles applications de ces sources nouvelles. À titre d'exemple, on remarquera que les dimensions de ces lasers ultimes deviennent comparables à celles des plus petits transistors et les chercheurs imaginent déjà faciliter ainsi l'entrée de l'optique dans le monde de l'électronique. ■

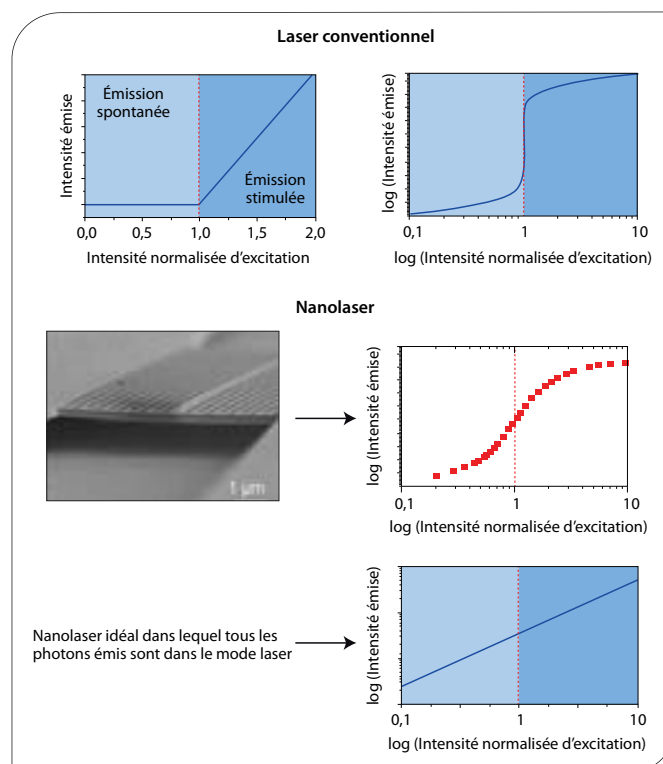


Figure 4. Intensité émise en fonction de l'intensité d'excitation. En haut : laser conventionnel (en échelles linéaires à gauche et logarithmiques à droite). En bas : nanolasers en échelles logarithmiques (la courbe du haut correspond à des mesures obtenues sur un laser à cristal photonique, tandis que la courbe de la figure du bas correspond à un cas idéal dans lequel tous les photons émis sont dans le mode laser).

PV Direct Nouvelle revue internationale open access

Destinée aux acteurs (chercheurs, ingénieurs, etc.) dans le domaine photovoltaïque, *PV direct* publie des articles originaux dans les différents secteurs de la conversion de l'énergie solaire : modules, composants, systèmes...

Composée d'un comité éditorial international, sa formule "open access" lui offre de nombreux avantages : grande visibilité, rapidité de publication, figures couleurs...

Pour plus d'information sur cette revue et envoyer vos articles, visitez le site internet

www.pvdirect-journal.org