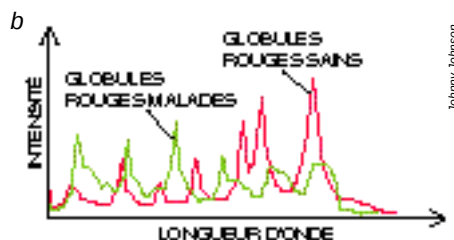
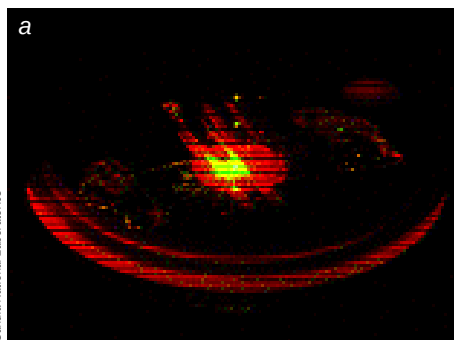


Des biocavités laser pour détecter les maladies

Plus les lasers semi-conducteurs seront rapides et efficaces, plus ils auront d'applications. Avec mes collègues des Laboratoires *Sandia*, nous les utilisons pour le diagnostic médical : nous avons mis au point une «biocavité laser» (a) qui permet, par exemple, de distinguer des cellules cancéreuses d'avec des cellules saines.

Le dispositif est un microlaser, minuscule morceau d'arséniure de gallium entouré de deux miroirs, qui émet un rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est réfléchi par les miroirs et amplifié jusqu'à ce qu'il sorte sous la forme d'un faisceau laser fin. Lorsqu'on interpose une mince couche de tissu humain entre l'arséniure de gallium et l'un des miroirs, le tissu se comporte comme une lentille interne qui focalise la lumière : les cellules modifient le faisceau laser en introduisant des harmoniques, dont la signature spectrale est caractéristique de la taille, de la forme ou de la composition cellulaires. Les médecins peuvent utiliser cette information pour différencier les tissus malades d'avec les tissus sains, car ils détectent en sortie de laser des spectres lumineux différents (b), comme un piccolo et une flûte qui jouent la même note peuvent être distingués par leurs spectres d'harmoniques différents.



Nous avons breveté une version portable de cette biocavité laser, afin que les médecins n'aient plus à envoyer des échantillons aux laboratoires pour obtenir des analyses. Dans ce dispositif, le sang circule dans de minuscules rainures dont la largeur est à peine le dixième de l'épaisseur d'un cheveu, gravées dans l'un des miroirs. En analysant le faisceau laser résultant, le dispositif détecte rapidement la présence de globules rouges en forme de croissant, caractéristiques de l'anémie falciforme. Les médecins peuvent aussi utiliser le laser pour étudier les modifications de la structure des cellules du sang causées par le virus du SIDA ou dépister des cellules cancéreuses dans des prélèvements du col de l'utérus. Des perfectionnements permettront l'analyse d'ADN.

Les méthodes classiques d'analyse des tissus requièrent une coloration chimique pour rendre visible la structure des cellules lors de l'examen au microscope en laboratoire ; les lames sont parfois difficiles à examiner. Les biocavités laser produisent directement des spectres simples qu'un dispositif portable peut analyser presque instantanément et n'importe où.

longueur d'onde de la lumière émise, l'énergie des photons ne peut prendre que des valeurs particulières. Les grands lasers émettent des photons de plusieurs longueurs d'onde, comme une longue corde de guitare que l'on pince produit un son constitué d'une fréquence fondamentale et de plusieurs harmoniques, multiples de la fréquence fondamentale. Plus la corde de guitare est courte, plus la note fondamentale est aiguë et plus le nombre d'harmoniques est petit, jusqu'à une limite fixée par l'épaisseur et la nature du matériau de la corde. De même, lorsqu'on réduit la taille des lasers, on réduit aussi le nombre de modes possibles pour les photons. La plus petite dimension pour laquelle les photons continuent de rebondir entre les miroirs est la demi-longueur d'onde du mode laser. Si les photons sont confinés dans ce petit espace dans les trois dimensions, seul le mode laser peut alors exister, et aucun photon n'est gaspillé : le laser n'a pas de seuil d'amorçage.

Il y a une dizaine d'années, avec des collègues des Laboratoires *Sandia*, nous avons ainsi réduit le spectre d'émission d'un microlaser à quelques modes seulement, en rapprochant les miroirs situés à ses extrémités. Toute-

fois, nos systèmes, et même les plus perfectionnés des nanolasers actuels, n'ont pas un courant de seuil nul : une centaine de modes sont encore possibles, bien moins que les dizaines de milliers des diodes laser, mais trop pour supprimer toutes les pertes.

Comment améliorer encore les nanolasers ? Richard Slusher et ses collègues des Laboratoires *Bell* ont fabriqué des microdisques laser. Avec des techniques de micro-électronique, ils ont découpé un disque de quelques micromètres de diamètre et de seulement 100 nanomètres d'épaisseur. Ce disque semi-conducteur est entouré d'air et monté sur un minuscule support, ce qui donne à l'ensemble l'aspect d'une table microscopique. La petite taille du disque limite le nombre de modes optiques possibles.

Comme le semi-conducteur et l'air ont des indices de réfraction très différents, la lumière émise dans le disque se réfléchit à l'intérieur de la structure, par un phénomène similaire à celui qui permet d'entendre des paroles chuchotées à l'autre extrémité d'une pièce voûtée : les vibrations sonores se réfléchissent sur les murs et se renforcent mutuellement. Chaque photon fait ainsi un grand nombre de

tours dans le disque avant de s'échapper, et il stimule l'émission de beaucoup d'autres photons. Ces lasers ont un très bon rendement, et un courant de seuil très petit.

Une variante du microdisque est le micro-anneau laser, où les photons circulent. Seng-Tiong Ho et ses collègues de l'Université Northwestern ont sculpté un tel anneau d'un diamètre de 4,5 micromètres et dont la section, rectangulaire, ne mesure que 0,4 par 0,2 micromètres. Pour collecter la lumière émise, ils ont entouré le micro-anneau d'un guide en forme de U, dont les branches guident les photons en deux faisceaux parallèles.

Une autre voie de recherche pour l'amélioration des nanolasers concerne le remplacement des miroirs par des réseaux dont la disposition réduit le nombre de modes optiques du composant. Au début des années 1900, William Henry Bragg et son fils William Lawrence Bragg, physiciens anglais qui se partagèrent le prix Nobel en 1915, étudièrent la réflexion des rayons X par la structure périodique d'un réseau cristallin. Selon la «loi de réflexion de Bragg», l'intensité du rayonnement réfléchi dépend de la longueur d'onde des rayons X, de l'espacement des

Des diodes électroluminescentes plus rapides et plus efficaces

Les composants opto-électroniques émetteurs de lumière, lasers et diodes électroluminescentes, sont formés d'un matériau semi-conducteur au sein duquel des électrons, excités par un courant électrique, se dés excitent en émettant chacun un photon. L'introduction de microcavités optiques dans ces composants permet de tirer un meilleur parti des photons émis spontanément. Dans les lasers, le courant de seuil, courant d'excitation minimum nécessaire à l'obtention de l'effet laser, a ainsi été divisé par cent ; le rendement de conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse des diodes électroluminescentes a été multiplié par dix.

Fabriqués industriellement depuis 1994, les microlasers à cavité verticale sont aujourd'hui commercialisés par plusieurs sociétés. Ces composants présentent l'avantage sur les diodes laser classiques, utilisées par exemple dans les lecteurs de disques compacts, d'émettre un faisceau laser circulaire dans une direction bien définie : leur raccordement à une fibre optique est plus facile. On peut aussi les fabriquer et les tester en grand nombre simultanément, ce qui réduit considérablement les coûts de production et de montage (les coûts du test et du montage en boîtier d'une diode laser entrent pour 80 pour cent dans le coût total).

Leurs performances sont bien adaptées aux besoins de transmission à haut débit entre serveurs informatiques ou entre processeurs au sein d'ordinateurs massivement parallèles. On commercialise aujourd'hui des câbles optiques qui utilisent en parallèle une dizaine de microlasers et qui transmettent jusqu'à six milliards d'informations binaires à la seconde sur quelques centaines de mètres. La réalisation récente de lasers à cavité verticale émettant de la lumière bleue (de longueur d'onde plus courte, donc permettant une résolution spatiale plus fine) ouvre par ailleurs de nouvelles perspectives pour l'impression laser ou le stockage d'informations sur des disques optiques.

Ces microlasers commerciaux ont une longueur d'une dizaine de micromètres et un courant de seuil d'environ un milliampère. Les microdisques laser, les fils photoniques ou les microlasers à cavité verticale de faible diamètre, qui ne sont encore que des objets de laboratoire, ont des courants de seuil beaucoup plus faibles, le record étant huit micro-ampères, ce qui leur ouvrira de nouveaux champs d'applications.

Toutefois, le marché des diodes électroluminescentes, en pleine expansion, engendre aujourd'hui un chiffre d'affaires cinq fois plus grand que celui des diodes laser. En effet, les diodes électroluminescentes remplacent progressivement les lampes à incandescence pour la visualisation (feux tricolores, signalisation autoroutière), les écrans plats actifs en couleur et bientôt l'éclairage domestique. Leurs atouts principaux sont leur rendement d'émission supérieur et leur fiabilité (leur durée de vie est de l'ordre du siècle). Nous allons voir que la réduction de la taille de ces diodes améliore, comme pour les lasers, et pour des raisons analogues, leur efficacité.

Une diode électroluminescente est formée d'un semi-conducteur qui, excité par un courant, émet spontanément des photons à une longueur d'onde fixée par la nature du matériau (au contraire de ce qui se passe dans un laser, la lumière n'est pas amplifiée par une émission stimulée). L'une des principales limitations physiques de ces diodes est liée au phénomène de réflexion interne à l'interface entre le semi-conducteur, de fort indice de réfraction, et l'air : deux pour cent seulement des photons émis spontanément le sont dans une direction proche de la normale à l'interface et peuvent donc sortir de la diode. Les autres restent piégés à l'intérieur du semi-conducteur, où ils sont réabsorbés. Le rendement de l'émission lumineuse vers l'extérieur de la diode est donc faible.

L'insertion d'une couche mince de semi-conducteur entre deux miroirs a récemment permis à des chercheurs de l'Université de Gand d'extraire d'une diode 23 pour cent des photons émis. Les réflexions multiples de la lumière piégée entre les deux miroirs ne sont en effet en phase que pour certaines directions de propagation des photons, et l'effet d'interférence y concentre l'ensemble de l'émission spontanée. On obtient un fin pinceau lumineux normal à l'échantillon en choisissant, entre les miroirs, une distance multiple de la demi-longueur d'onde. Des calculs d'optimisation portant sur les matériaux qui constituent les miroirs, effectués par H. Benisty et C. Weisbuch, à l'École polytechnique, montrent que l'on pourrait extraire ainsi jusqu'à 50 pour cent des photons.

En réduisant encore le nombre de modes photoniques (les modes photoniques correspondent aux ondes lumineuses stationnaires qui peuvent s'établir dans le milieu), on ajuste en outre le rythme auquel les photons spontanés sont émis. Dans une microcavité qui confine les photons sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde dans les trois dimensions de l'espace, le nombre de modes photoniques est faible, et ils sont d'énergies bien différentes. Pour un émetteur placé dans une telle cavité et qui n'émettrait des photons qu'à des longueurs d'ondes différentes de celles des modes photoniques, l'émission spontanée serait complètement inhibée. En revanche, si l'émetteur peut émettre des photons à une longueur d'onde qui correspond à l'un des modes de la cavité, son émission spontanée dans ce mode est favorisée par le confinement des photons et le renforcement du champ électromagnétique du mode dans la cavité : l'émission spontanée dans ce mode est accélérée.

En 1983, l'équipe de Serge Haroche, à l'École normale supérieure, a réalisé un système fondé sur ce principe qui émettait dans le domaine des micro-ondes : des atomes placés au sein de petites cavités supraconductrices émettaient spontanément des photons 500 fois plus vite que dans le vide. De nombreuses équipes ont ensuite cherché à observer un tel phénomène pour des microcavités optiques semi-conductrices. Les techniques de micro-fabrication ont rapidement permis d'obtenir un confinement tridimensionnel des photons à l'échelle du