表面プラズモンとナノレーザ：極小レーザが秘める大きな可能性

ジェフ・ヘクト

半導体/金属のハイブリッドレーザは、ナノテクノロジの分野で大きな進歩を遂げており、さらなる小型化と連続波動作が実現されている。しかし、理論的には、あまりにサイズを小さくすると損失が増大するため、レーザの小型化には限界があると言われている。

レーザを電子部品とともにソリッドステート回路に集積しようとすると、マイクロレーザでは大きすぎる。最新の電子回路チップの幅はわずか数十ナノメートル程度だが、今日のダイオードレーザはマイクロメートルスケールの構造を持つ。どうすればレーザのサイズを電子回路部品のレベルにまで縮小することができるのだろうか？

それは難しい問題である。従来型の光共振器は波長スケールである必要があり、光の波長は数百ナノメートル以上で、チップのサイズよりも一桁以上大きいためだ。しかし開発者らは、表面プラズモンを利用することによってレーザをナノスケールに縮小し、体積を波長の3乗未満にできることを発見した。表面プラズモンとは、光の周波数で振動する電子のコンパクトな集団である。最初のナノレーザはパルス波しか放射できなかったが、連続波（CW：Continuous Wave）を放射するものがこの1年間で発表されている。ここで生じる大きな疑問は、どこまで小型化が可能か、そしてそれはどれだけ実用的になり得るかというものである。

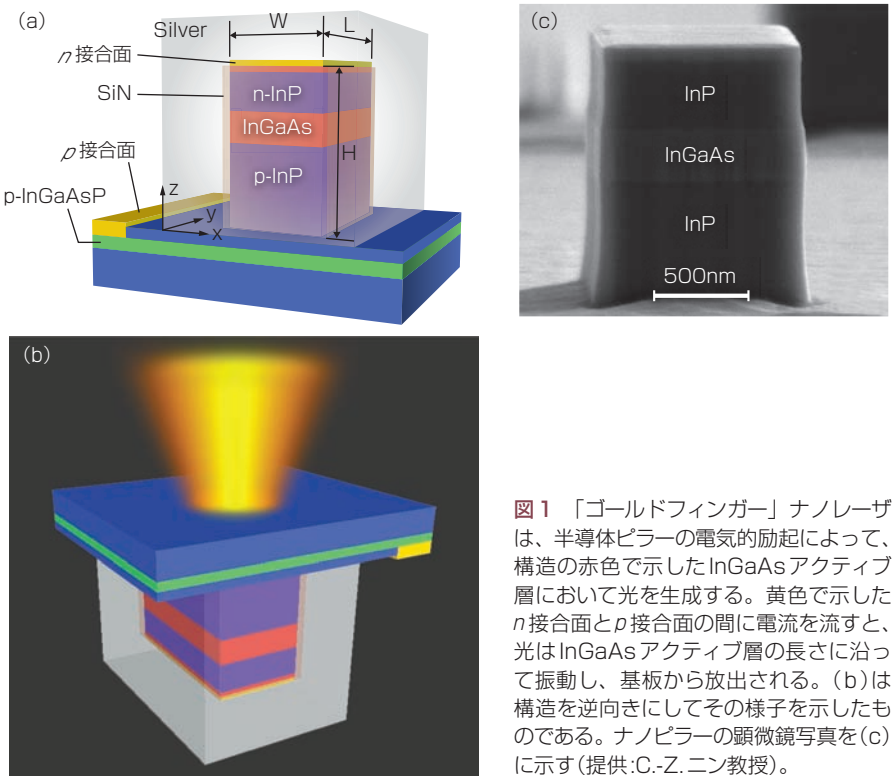


図1 「ゴールドフィンガー」ナノレーザは、半導体ピラーの電気的励起によって、構造の赤色で示したInGaAsアクティブ層において光を生成する。黄色で示した*n*接合面と*p*接合面の間に電流を流すと、光はInGaAsアクティブ層の長さに沿って振動し、基板から放出される。（b）は構造を逆向きにしてその様子を示したものである。ナノピラーの顕微鏡写真を（c）に示す（提供:C.-Z.ニン教授）。

表面プラズモンの基礎

光を放射する誘電体キャビティは、各方向に波長の半分が十分に収まる大きさでなければならないが、複合構造に金属を混入することによって、空孔をそれよりも小さくすることができる。金属と誘電体または半導体の間の接合面にある電子は、光の周波数でコヒーレントに振動することができる。この効果を表面プラズモンと呼ぶ。表面プラズモンは電気的に励起するか、光子との作用によって発生させることができる。表面プラズモンは光子と結合して、表面プラズモンポラリトンを生成する場合がある。表面プラズモンポラリトンとは、金属-誘電体の表面に沿って伝播するハイブリッド振動である。

表面プラズモンとポラリトンは、対応する光の波長よりも小さい領域で振動する。その動作は、無線周波数アンテナにおける電子の振動に似ている。このアンテナは、アンテナよりも長い無線波長を送受信することが可能だ。最近では、ナノレーザの体積は、真空中の波長の3乗未満にまで縮小されているが、無線アンテナと同様に、ナノレーザは細長いことが多いため、少なくとも1つの次元は波長よりも長くなる。新しい研究分野にはよくあるように、用語はやや紛らわしい状態にある。すべてのナノレーザが表面プラズモン効

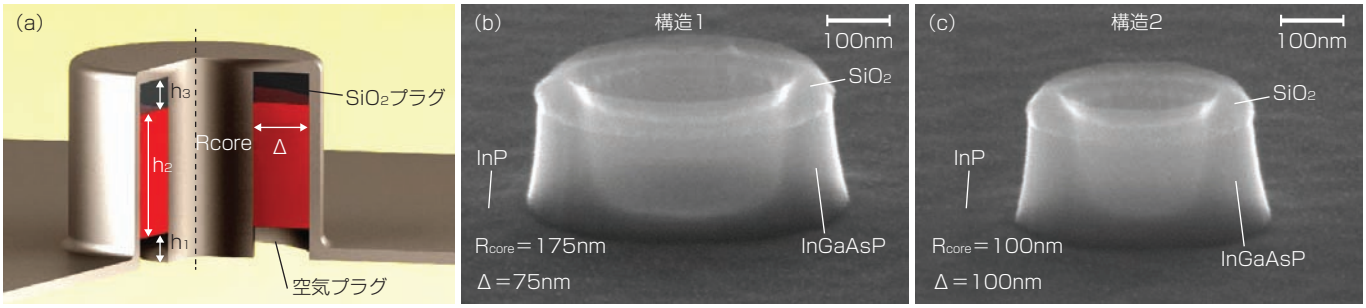


図2　同軸構造の断面図。光は、赤色で示された同軸の半導体環で生成される。各層は上下面に平行である（a）。半導体環は、中心の金属製ピラーの周囲を囲んでおり、金属層で覆われている。金属層は側面も覆っている。（b）と（c）の構造1と2の画像は、この半導体構造の2つのバージョンを示している。構造2の方は、しきい値なし動作を示した（提供:S･ファインマン教授（5））。

果に依存するが、自らの素子を「spaser」（surface plasmon amplification by the stimulated emission of radiation の頭文字）と呼ぶ開発者はほんの一部にすぎない。spaserは、10年近く前に生み出された用語である[1]。

オランダのアイントホーフェン工科大学（Technical University of Eindhoven）のマーティン・ヒル教授（Martin Hill）は2007年、初めての金属／半導体ナノレーザを実証した[2]。その後、多数のパルス波ナノレーザが発表され、筆者は2011年にこれに関する記事を執筆している[3]。この1年間で、初めての連続波ナノレーザを含む、さらに数種類の設計が実証された。慣例として、素子サイズは、屈折率nの物質の実際の波長λ/nではなく、真空中の波長λと比較される。

ゴールドフィンガー

ヒル教授の最初のプラズモンナノレーザは、複合半導体のピラーが金の層で被覆されていることから、「ゴールドフィンガー」と呼ばれている。基本概念は、半導体ゲイン材料の中の光増幅を、金属-半導体の接合面において表面プラズモンと結合させることによって、光を生成するものになる。

米アリゾナ州立大学（Arizona State University）のツンジョン・ニン教授（Cun-Zheng Ning）と、ヒル教授を含むそのチームは2012年1月、この手法を利用して、室温で連続波を放射する、初めての電気的励起によるサブ波長のレーザを開発したと発表した[3]。中心の長方形のピラーは**図1**に示すように、基板上にn型ドープInP（リン化インジウム）、非ドープInGaAs（インジウムガリウムヒ素）p型ドープInPが積み重なった3層構造で、屈折率の違いによって、発光が屈折率の最も大きいInGaAs層にほとんど封じ込められる。ピラーの4面すべてが20nmの窒化ケイ素（SiN）の層で覆われ、幅0.34μm、長さ3μm、高さ1.53μmの構造となっている。続いて、基板を除くピラーの部分を銀で被覆することで、金属-絶縁体-半導体-絶縁体-金属の導波路が形成されている。

光は、赤色で示されたInGaAsアクティブ層で生成され、キャビティの長さに沿って振動するが、ピラーを覆う銀の10～20nmの深さまでしか透過することができない。そのため、光は結合してメタライズされていない基板を透過する。室温において1554nmを中心とする4nm幅の帯域での連続波のレーザ放射が観測されており（Q値400に対応）、確かにレーザ発振があったことがわかる。この波長において、この半導体構造は、真空中の波長の3乗の0.42倍であった。ニン教授のグループは、熱によって素子の性能が制約されたと報告しており、素子設計と熱パッケージを改良する予定だと述べた。

ニン教授らは2012年5月に開催されたCLEOにおいて、窒化ケイ素（SiN）のクラッド層を30nmに増加して、損失の大きい金属クラッドからのコアの絶縁性を高めたことと、最大2μmの銀を蒸着して粒子サイズを大きくしたことによって、損失を低減したと発表した。これによって空孔のQ値が改善され、1.15×1.39×1.7μm（0.67λ3）の空孔に対し線幅が0.54nmに減少した[4]。電気的励起は、エレクトロニクス分野での今後の応用に向けた重要な利点である。

同軸ナノレーザ

光励起（光ポンピング）の同軸ナノレーザ構造も室温で連続波を放射し、4.5Kにおいて1400nm近くで無しきい値発振することが実証されている。同軸ケーブルの中心導体のように、中心には金属ロッドがある。**図2**に示すように、ロッドの周囲は半導体の環で囲まれており、同軸ケーブルの外側のシールドのように、この環は金属被膜で覆われている。構造の一端は金属キャップで、シリカ層によって半導体から隔離されている。もう一端は空気にさらされているが、同軸被膜の端からは内側に奥まっている。

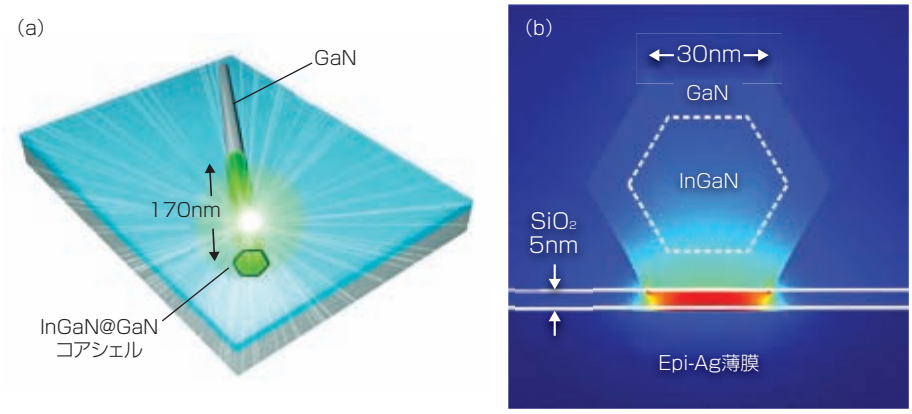


図3 テキサス大学では、単結晶銀の層の上に横たえられたGaN/InGaNナノロッド(a)が、光励起によって発光することを確認した。六角形ロッドの構造(b)からは、発光の大部分が、シリカ被膜で覆われた単結晶銀のすぐ上の半導体からであることがわかる。極低温で動作した場合、510nmで発光した(提供:G·シュベッツ氏)。

ゴールドフィンガーの構造と同様に、この半導体構造も層で構成され、6つのInGaAsP量子井戸で光が生成される。ゲインは約1.26～1.59μmである。半導体と自由空間の間のインピーダンスの不整合によって、Q値の高い共振器が構成される。この共振器は、単一の共振モードしかサポートせず、自由空間のモードに弱く結合する。米カリフォルニア大学サンディエゴ校(University of California at San Diego)のシャヤ・ファインマン教授(Shaya Fainman)のグループは、2つの設計をテストした。一方は100nmのコアが100nmの環に囲まれた構造で、もう一方は175nmのコアが75nmの環に囲まれた構造だった。環が厚い方の構造は室温でレーザ発振したが、ファイマン教授は、しきい値なし動作を実現するには、環のサイズを縮小してシングルモードで動作させる必要があると述べている。これによってゲインが低下する。そこでこの構造を4.5Kに冷却し、ノイズフロアが0.72nW～100μW強のポンプパワーに対し、細い線状のレーザ放射を観測したと同教授らは2012年2月の科学誌「ネイチャー」で発表した[5]。これは、オンチップの光通信用途で電流を光子へと非常に効率よく変換できることを示すものであるため、重大な成果となる可能性がある。

単結晶銀による効率の向上

米テキサス大学オースティン校(University of Texas at Austin)のジカン(「ケン」)・シー教授(Chih-Kang "Ken" Shih)と国立清華大学(台湾新竹市)のShangjr Gwo教授が率いる国際的なチームは2012年7月、3種類のプラズモニックレーザによる初めての連続波動作に成功したと発表した。同レーザはもともと、米カリフォルニア大学バークレー校(University of California at Berkeley)でシアン・ジャン教授(Xiang Zhang)のグループによってパルス波モードで発表されたものである[6]。薄い絶縁層で覆われた金属スラブ上に横たえられた半導体ナノロッドにおいて、レーザ発振を光学的に励起させるという概念に基づいている。

同チームは、長さ480nmの六角形のGaNロッドを使用した。長さ170nmのInGaN製のコアを含み、六角形の一辺は30nmである。**図3**に示すように、厚さ28nmの単結晶銀の層上に蒸着された厚さ5μmのシリカ薄膜の原子レベルで平坦な表面上に、これが配置された[7]。単結晶銀によって、これまでの実験で使用されていた多結晶金属と比べて、レーザしきい値が3桁も低下したと、科学誌「サイエンス」のレポートの共著者であるテキサス大学の物理学者ゲナディ・シュベッツ氏(Gennady Shvets)は述べている[7]。多結晶銀は表面が平坦ではなく、結晶粒界があるため、表面プラズモンポラリトンは拡散し、構造の長さに沿ってエネルギーを放出するという。単結晶銀の場合は、光が構造の両端のみで放出される。この構造をシュベッツ氏とシー教授は「spaser」と呼んでいる。405nmの青色ダイオードで励起した、InGaNコアからのレーザ放射は510nmで最大となる。放射は8Kで最も高く、80Kを超えると消えた。同チームはこれを、世界最小の半導体レーザと呼んでいる。

今後の展望

ナノレーザは発振面積が小さいことが、しきい値を低く、変調を高速にできるという点において好都合だが、発振がすぐに拡散してしまう点が問題である。ジャン教授は、指向性を高めることにより、ナノレーザをオンチップ通信などの応用に対してより魅力的なものにしたいと考えている。

ナノレーザの進歩から、ファインマン教授は25年前のVCSEL開発を思い出すという。「それが何の役に立つのか誰もわからなかったし、性能はエッジエミッタと比較すると劣っていたが、今では新しいコンピュータを購入すると必ず、ファイバ出力とともにVCSELが搭載されている」と同教授は述べる。ナノレーザは現在、未熟な段階にあるが、数十年後には準備の整った状態になっている可能性がある。

シュベッツ氏は、バイオセンサーなど、

高い磁束に耐えられない材料の励起に応用できる可能性があると予測している。同氏は特に、分子に対する高度な非線形分光法に関心を抱いている。

ナノレーザは2つの次元において小型化が可能だが、3つめの次元では少なくとも材料の波長の半分を超える長さが必要だと米ジョンズ・ホプキンス大学（Johns Hopkins University）のジェイコブ・カーギン（Jacob Khurgin）教授は述べる。金属は光を封じ込めることができるが、キャビティをさらに小さくするとより多くの光が金属へと押し出されることになり、そこで非常に大きな損失が生じて、しきい値が高くなる。電気的励起を生じさせるには、しきい値電流は10μA未満でなければならないと同氏は算出する。これは、電流密度100kA/cm^{2}未満という非現実的な値に対応する。同氏は「Nanophotonic」において、より優れたナノスケールの光源としてLEDの超小型版である「surface plasmon emitting diode」（SPED）を提案している[8]。同氏が正しいかどうかは、時間が経てば明らかになるだろう。

参考文献

(1) D.J. Berman, and M.I. Stockman, "Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: Quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems," Phys. Rev. Lett., 90, 027402（2003）.
(2) M.T. Hill et al., "Lasing in metallic-coated nanocavities," Nature Photon., 1, 589（2007）.
(3) J. Hecht, "Photonic Frontiers: Novel Lasers--The incredible shrinking laser makes a big impact," Laser Focus World, 47, 10, 41-45（Oct. 2011）.
(4) K. Ding et al., "Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection," Phys. Rev. B, 85, 041301（R）（2012）; doi:10.1103/PhysRevB.85.041301.
(5) K. Ding et al., "Record Performance of a CW Metallic Subwavelength-Cavity Laser at Room Temperature," CLEO 2012 Tech. Dig., paper CTh4M.3.
(6) M. Khajavikhan et al., "Thresholdless nanoscale coaxial lasers," Nature, 482, 204（Feb. 9, 2012）; doi:1RI40.
(7) R.F. Oulton et al., "Plasmon lasers at deep subwavelength scale," Nature, 461, 629-632（Oct. 1, 2009）; doi:10.1038/nature08364.
(8) Y.-J. Lu et al., "Plasmonic Nanolaser Using Epitaxially Grown Silver Film," Science V, 337, 450（July 27, 2012）.
(9) J.B. Khurgin and G. Sun, "How small can 'Nano' be in a 'Nanolaser'?" Nanophoton., 1, 3-8（2012）; doi:10.1515/nanoph-2012-0017.

LFWJ

http://www.oceanphotonics.com

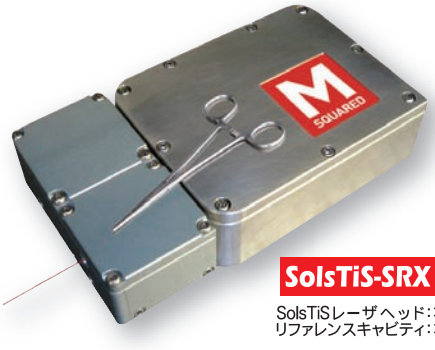
M SQUARED

Mスクエアレーザー社

✔超小型　✔メンテナンスフリー　✔完全自動

CW単一周波数波長可変Ti:Sレーザ　SolsTiS®

SolsTiS®は、超小型で自動波長可変のCW単一周波数Ti:Sレーザです。最新のエレクトロニクス、メカニクス、コーティング技術を駆使してクラス最高の低ノイズ・高出力を達成し、さらに独自の超小型共振器により高い周波数安定性を実現しました。全ての操作・制御は付属ノートPCで行います。



SolsTiS-SRX

SolsTiSレーザヘッド：右側
リファレンスキャビティ：左側

SolsTiS-SRX 仕様（カスタム品、SHGのご提供も可能です）	
出力[1]	>4.0 W
波長可変領域	725～975nm（交換ミラー必要なし）
線幅（FWHM）[2]	<50 kHz
掃引幅	>25 GHz
ノイズ	<0.1% rms
レーザヘッド寸法	260×144×70 mm (L x W x H)

※ 全仕様は、チューニングカーブのピーク、周囲温度変化＜±2°C、システムウォームアップ30分以上の条件下で測定。
[1]CWグリーン(532nm)DPSS励起レーザ使用、TEMoo。 [2]チューニングカーブのピーク、最大励起出力において付属リファレンスキャビティでの比較測定。

主なアプリケーション

高分解分光、ホログラフィー、原子冷却、ボーズ＝アインシュタイン凝縮、量子コンピュータ、光ピンセット、共鳴ラマン、フォトルミネッセンスなど

『赤外線フェア2012』に出展します。 2012/11/27（火）～29（木） 東京都立産業貿易センター浜松町館

Ocean Photonics

日本総代理店 オーシャン フォトニクス 株式会社 M2レーザー課

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田3-30-16 ホリゾン1ビル
TEL 03-6278-9470 FAX 03-6278-9480 E-mail: sales@oceanphotonics.com URL: http://www.oceanphotonics.com