窒化VCSELがもたらす困難な課題

ジェフ・ヘクト

良好な研究結果から青色の窒化VCSELに対する期待が高まっているが、GaN VCSELを実用化するにはやっかいな課題を克服する必要がある。

GaN（窒化ガリウム）は、青色の端面発光ダイオードレーザで多大な成功を収めていることから、垂直共振器面発光レーザ（VCSEL：Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）向けにそれを開発しようという動きは理にかなった流れのように思われる。VCSELには、一部の用途に対する重要なメリットがある。例えば、しきい値が低いこと、ビーム品質が高いこと、高密度の2次元アレイを構成しやすいこと、直接変調が高速であること、ウエハレベルで試験できることなどである。GaAs（ヒ化ガリウム）VCSELはかなりの成功を収めており、窒化VCSELの研究はこの数年間で、室温での光励起から電気励起へと進歩した。新しい青色光源の登場は近いと思われていた。

しかし最近になって、窒化VCSELの進歩は減速している。窒化化合物の性質に主に起因する「深刻な性能上の制約がまだ存在する」と、米NUSODインスティテュート社（NUSOD Institute）のヨアヒム・パイプレック氏（Joachim Piprek）は2013年、同分野の評価に記している[1]。ピーク出力はまだ、1ミリワット未満にとどまっている。窒化VCSELを実証しているのはほんの一握りのトップレベルの研究所のみで、しかもその成功は、量産には程遠い、最先端の研究技術がなければ成立しない。

VCSELの課題

VCSELは1970年代に初めて提案されたが、作製条件が複雑であることから開発までには時間を要した。ダイオードレーザの薄い活性層に垂直な光共振器（キャビティ）からの出力を効率的に抽出するために、非常に反射率の高いミラーが必要となる。GaAsにおける標準的な手法は、2種類のGaAs合金からなる薄層を交互に多数積層したものをエピタキシャル蒸着させ、分布ブラッグ反射器（DBR：Distributed Bragg Reflector）を形成するというものである。背面の共振器ミラーの反射率が99.9%で、出力ミラーの反射率が99.7%程度になれば理想的だと、米ニューメキシコ大（University of New Mexico）のダニエル・フィーゼル氏（Daniel Feezell）は述べる。

厳しい仕様だが、GaAsではそれが達成可能だ。パイプレック氏によると、GaAsはVCSELに対する「完璧な材料」だという。最大のメリットは、GaAs組成物は格子間隔のばらつきが小さいことから、エピタキシャル蒸着時に屈折率差の大きい合金の格子を整合させることができるという点にある。しかし、GaNとInP（リン化インジウム）には、屈折率差が大きく格子が整合する、適切な2つの合金が存在せず、反射率が非常に高いDBRの作製はGaAsよりも格

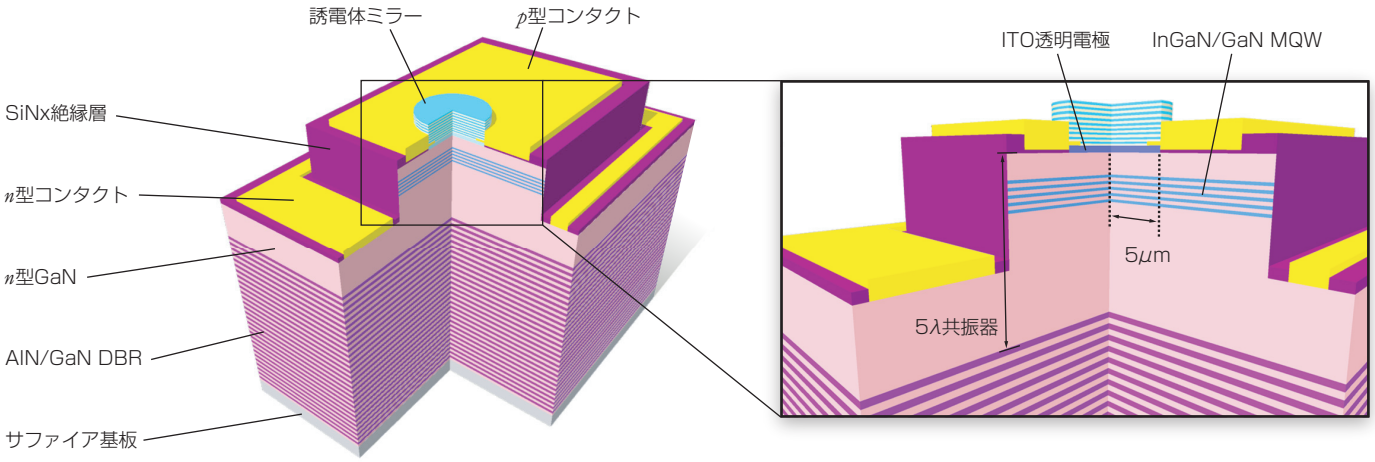


図1　台湾の国立交通大で2008年に初めて開発された窒化VCSELの構造。最下層にあるサファイア基板上の窒化DBRに、活性層上に蒸着された誘電体ミラーが組み合わされたハイブリッド構造をとる（資料提供：T.C.ルー氏）。

段に難しい。誘電体のみでDBRを形成するという代替策があるが、それには後述する別の問題が伴う。

関連する問題としては、誘電体DBRに導電性がないために共振器間のコンタクトが必要になることと、p-GaNは導電率が低すぎることから活性領域に電流を均一に分布するためには使えないことがある。半透明の導電体である酸化インジウムスズ（ITO）の層を追加することができるが、ITOにはそれ独自の制約がある。「約10μmを超えるデバイス開口部に電流を均一に分布するには、導電率が不十分だ」とフィーゼル氏は最近のレビュー論文に記している[2]。また、紫外線と可視波長における光損失がかなり大きいために、共振器内に配置することは極めて難しい。

共振器の長さが短く、数μmしかないことから、問題はさらに複雑になる。共振器の定在波形状を整合させることが非常に重要である。つまり、ピーク部分を活性層の量子井戸に、ゼロ部分をITOなどの損失の高い層に合わせる。その上、量子井戸のピークゲインを、共振器内の共振波長に整合させる必要がある。

GaN VCSELの作製

GaN VCSELの電気励起という課題を最初に克服したのは、台湾の国立交通大（National Chiao Tung University）のティエンチャン・ルー教授（Tien-Chang Lu）とその同僚で2008年のことだったが、それは液体窒素温度においてのみ動作するものだった。同教授らは**図1**に示すように、1つの半導体DBRと1つの誘電体DBRという2種類のミラーを用いるハイブリッド手法を採用した。サファイア基板から開始して、まずは29対のAlN層とGaN層からエピタキシャル成長によってDBRを形成した。続いて、n型GaN、InGaN/GaNの多重量子井戸（MQW：Multiple Quantum Well）を含む活性層を配置する。最上部には240nmのITOを蒸着し、それによって10μmの開口部にわたって電流を分布した。続いて、Ta_2O_5層とSiO_2層を交互に積層して形成した誘電体DBRを追加した。99.4%の反射率を達成し、エピタキシャル成長させた窒化DBRに亀裂が生じないようにしたことが、主な成功要因だった。同教授らは、レーザが1.4mAのしきい値電流で動作することを発表したが、最大出力については報告しなかった[3]。

同年にはこれに続き、日亜化学工業の樋口裕氏とその同僚らが、2つの誘電体DBRを用いた室温で動作するレーザを実証した。亀裂のない窒化DBRの作製が不要な代わりに、複雑なフリップチップ製造プロセス（27ページの「フリップチップ型VCSELの作製」を参照）を必要とするものだった。まずは、サファイア基板上に活性層を成長させ、続いてp型GaN、50nmのITO層、Nb_2O_5/SiO_2を積層したDBRを追加し、DBR層を導電性のシリコン基板に接合する。次に、サファイア基板をウエハから除去し、**図2**に示すように、2つ目の誘電体DBRをその表面上に蒸着させた。これによって、室温において12mAの駆動電流で、0.14mW、414.4nmの連続波（CW：Continuous Wave）を出力させることができたと同氏らは発表している。

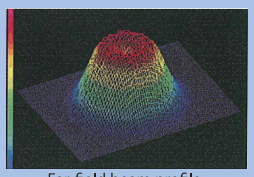
その後には、さらなる進歩が続いた。日亜化学工業の研究者らはGaN基板に移行することで、欠陥レベルを引き下げ、連続波出力を0.62mWにまで引き上げた。同社は動作持続時間の延長にも成功したが、わずか10分間でしきい値電流が増加したとも報告している[4]。台湾国立交通大のグループは、電流フローやコンタクトを改良し、ITOの厚みを30nmに減らして光損失を抑

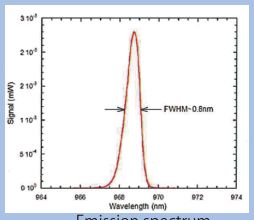
PRINCETON OPTRONICS

これが
高出力 VCSEL
です

この高出力半導体レーザーはエッジエミッター方式に比べ数々の特徴があります！

◆ビームの質がよい

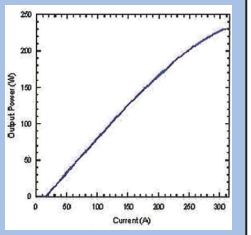

Far-field beam profile



Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケーラビリティ

100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴
◆温度依存が低い
◆製品間のばらつきが小さい
◆バックトークが少ない
◆波長の安定度が高い
◆FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL http://www.autex-inc.co.jp
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp
東京本社 〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342

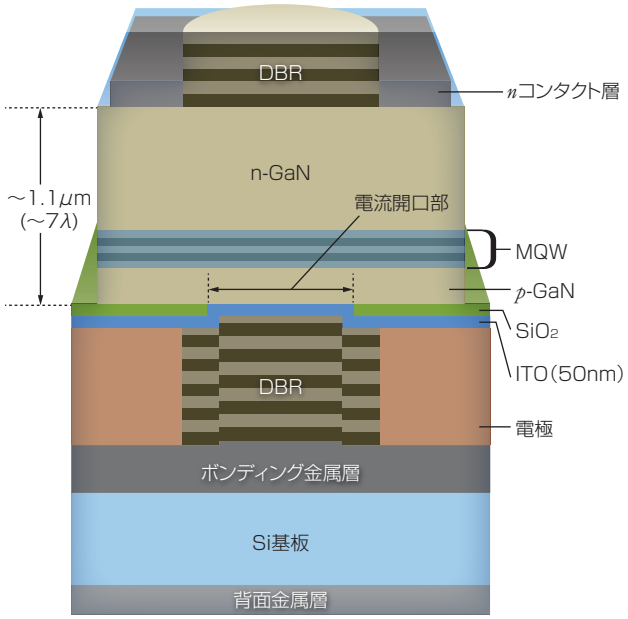


図2 日亜化学工業がフリップチップ構造を採用して開発した、室温で連続波を出力する初めての窒化VCSEL。n-GaN以下の構造をサファイア基板上に作製してから、チップを反転させ、サファイア基板をエッチングにより除去して、最上部に2つ目のDBRを作製している[4]。

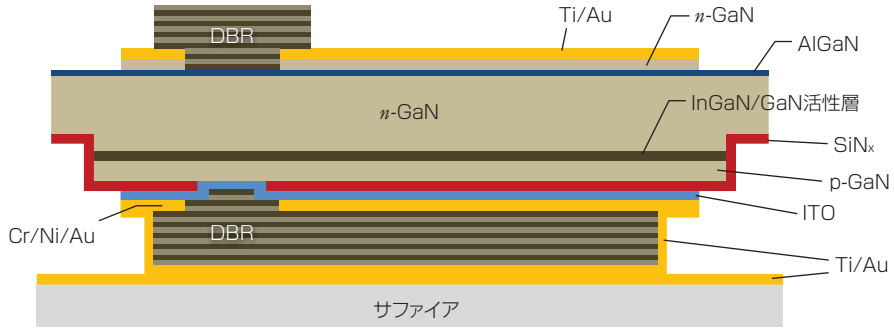


図3 UCSBで開発された、2つの誘電体を用いた窒化VCSELは、活性領域の上部と下部に作製された誘電体DBRの周囲に電流を流すために、金属層(金色部分)とITO(青色部分)が配置されている。構造は反転されて、最下部のサファイア基板に接合されている(資料提供:ダニエル・フィーゼル氏)。

えるといった一連の工夫を加えることによって、室温動作を達成した[5]。

新規参入企業と新たな手法の出現

2012年には、さらに3つのグループから注目に値する結果が報告され、進歩のペースがさらに加速したように思われた。

パナソニックは、ZrO_2層とSiO_2層の交互積層によって作製した2つの誘電体DBRを用いて、室温での最大3μWの連続波動作に成功したと報告した。同社は、共振器が2μmと短く疑似シングルモード発振を行うVCSELと、共振器が6μmと長くマルチモードで動作するVCSELの両方を発表し、窒化VCSELとしては初となる5×5の平面アレイを発表した。パナソニックは当時、マルチモード照射は、レーザディスプレイやエネルギー効率の高い固体照明(SSL:Solid State Lighting)などの用途におけるスペックルを低減するので、アレイに適していると述べていた[6]。2014年初頭の招待論文では、パナソニックの川口真生氏が最新情報として、ITOとp-GaNの直列抵抗や、極性GaN量子井戸の電荷分離といった技術的課題を挙げている[7]。

スイス連邦工科大ローザンヌ校(EPSL:Swiss Federal Polytechnic Institute in Lausanne)のニコラス・グランドジーン教授(Nicolas Grandjean)のグループは、製造の簡素化を目指して2012年、GaNに格子整合する$Al_{0.18}In_{0.82}N$層を含むエピタキシャルDBRを用いて、ハイブリッドモノリシック型のVCSELを作製したと発表した。c面GaN基板上に欠陥のある窒化DBRを成長させてから、5つの量子井戸を含む活性層、電子遮断層、そして最上部にTiO_2/SiO_2の誘電体DBRを蒸着させている。連続波動作には至らなかったが、300μWを超えるパルス波出力を報告している。この手法は処理が容易で、歩留まりとチップ品質の向上につながると同教授らは主張した[8]。

フィーゼル氏は、ニューメキシコ大に移る前に率いていた米カリフォルニア大サンタバーバラ校(UCSB:University of California at Santa Barbara)で、非極性基板であるGaNのm面上でのGaN VCSELの成長を初めて成功させている。「非極性材料の主な利点は、ゲインが高いことと、極性が結晶の既知の方向に沿って固定されることだ。それは、極性の影響を受けやすい多くの応用分野において重要な性質である」と同氏は述べている。**図3**に示すように、高い反射率を得るために2つの誘電体DBRを用いているが、光電気化学的な除去処理を開発することにより、1枚の高価な基板から多数のVCSELが製造できるようにした。そのフリップチップ除去処理によって、共振器の厚さも均一になる。これは、定在波を量子井戸に整合させて最大限の出力を得るための重要な要素である。同校の研究者らは2012年、412nmで19.5μWのピーク出力を得たと発表した[9]。続報となる2014年7月の論文では、共

振器長の制御を検証し、同じウエハから作製されたVCSELが同じ方向に極性化されることを報告した[10]。

その他にも改良に向けた取り組みが続いている。中国の厦門大（Xiamen University）のウェンジエ・リウ氏（Wen-Jie Liu）とその同僚は2014年6月、2つの誘電体DBRを持つ、線幅がわずか0.12nmのVCSELを開発したと発表した。Q値は3570に相当するが、出力はわずか0.5μWだった[11]。パイプレック氏は続く7月、活性層内にトンネルダイオードを配置したコンピュータシミュレーションについて説明した。それによって、キャリアをより均等に量子井戸に分布させ、出力を2倍にできる可能性があるという[12]。

今後の展望

「どのグループも、これらの構造を機能させるという意味において素晴らしい成果を上げている」とフィーゼル氏は述べる。同氏は、現在の停滞の主な理由は資金不足だとしつつも、パナソニックや日亜化学工業の取り組みからは、長期的には利益が得られる可能性があることがうかがえると指摘している。

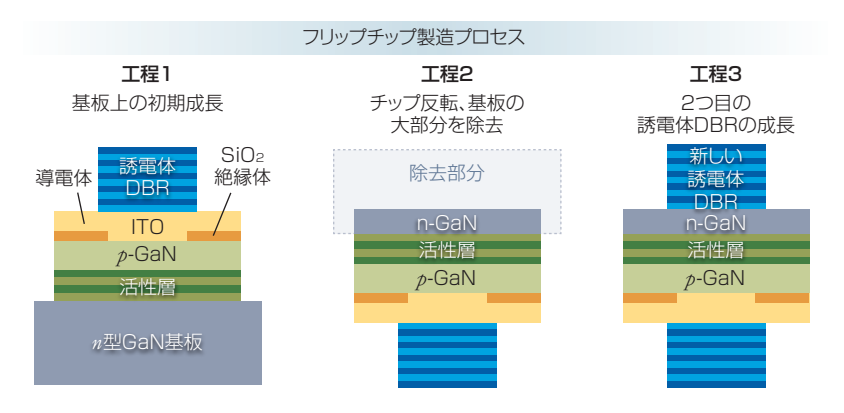
現在の窒化VCSELは寿命が短すぎ、出力が低すぎると、スウェーデンのチャルマース工科大（Chalmers University）のイーサン・ハシェミー氏（Ehsan Hashemi）は述べる。同氏は、「窒化VCSELの展望はかなり明るい」と付け加えつつ、「材料の制約を克服するためのさらに優れた技術的ソリューション」が必要だとした。

UCSBにおける窒化VCSELプロジェクトを最近引き継いだジョン・レオナード氏（John Leonard）は、「われわれがこれまでに抱える最大の課題の1つは、p型GaNにプラズマ損傷を与えることなく、導電率が非常に高く、滑らかで透明なITOを得ることだ」と述べる。同氏は、ITO膜のRMS表面粗さを1nm未満として散乱損失を低減したいと考えている。「ITOとは全く異なる材料が必要かもしれない」とフィーゼル氏は述べている。同氏によると、その他の大きな問題としては、DBR、駆動電流の開口部全体にわたる分布、極性制御、共振器長の制御があるという。

高性能な窒化VCSELを実現するには、「資金と革新的なアイデアの両方が必要だ」とフィーゼル氏は言い、「最終的には、窒化VCSELが実現されるだろう。ただしそれまでにはまだ、多くの時間がかかるだろう」とつけ加えた。

フリップチップ型VCSELの作製

窒化物は一般的に、誘電体DBR層上に成長させることはできない。そのため、2つの誘電体DBRを持つVCSELを作製するには、基板上における通常のエピタキシャル成長以外の処理が必要である。まず、活性層、p型層、コンタクト層、1つの誘電体層を基板（通常はGaN）上に成長させる。続いてチップを反転し、エッチング、またはそれよりも非破壊的な処理によって基板の大部分を除去する。最後に、チップの最下面だった部分に2つめの誘電体DBRを成長させることにより、VCSELの最上面と最下面の両方で高い反射率を得る。



参考文献

(1) J. Piprek, "What is the problem with GaN-based VCSELs?" at NUSOD 2013 Conference, http://www.nusod.org/2013/nusod13_WB1.pdf.
(2) D. Feezell, "The evolving GaN VCSEL," Compd. Semicond.（March 2014）, http://www.compoundsemiconductor.net/article/91717-the-evolving-gan-vcsel.html.
(3) T. C. Lu et al., "CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser," Appl. Phys. Lett. 92, 141102（2008）; doi: 10.1063/1.2908034.
(4) K. Omae et al., Appl. Phys. Express 2, 052101（2009）, http://iopscience.iop.org/ 1882-0786/2/5/052101.
(5) T. C. Lu et al., Appl. Phys. Lett. 97, 071114（2010）, http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/97/7/10.1063/1.3483133.
(6) T. Onishi et al., IEEE J. Quant. Electron. 48, 1107（2012）; doi: 10.1109/JQE.2012.2203586.
(7) M. Kawaguchi et al., Proc. SPIE 8986, 89861K,（2014）; doi: 10.1117/12.2037484.
(8) G. Cosendey, et al., Appl. Phys. Lett. 101, 151113（2012）; doi: 10.1063/1.4757873.
(9) C. Holder et al., Appl. Phys. Express 5, 092104（2012）; doi: 10.1143/APEX.5.092104.
(10) C. O. Holder et al., Appl. Phys. Lett. 105, 031111（2014）, doi: 10.1063/1.4890864.
(11) W.-J. Liu et al., Appl. Phys. Lett. 104, 251116（2014）; doi: 10.1063/1.4885384.
(12) J. Piprek, Appl. Phys. Lett. 105, 011116（2014）; doi: 10.1063/1.4887377.

LFWJ