

# 通信をはじめ 幅広い分野で実用化

## — VCSEL 構造を利用した新たな展開も

VCSELが考案されてから今年で35年。いまや低コスト、低消費電力といった特性により実用化が着々と進んでいる。さらに研究は短距離通信に向けた波長多重化やVCSEL構造を利用した新機能素子など、単なるレーザにとどまらない領域へと広がりつつある。

半導体レーザには、光の発振方向が基板に対して水平のものと垂直のものが存在する。はじめに実現された水平型は、基板のへき開によってできた結晶端面を共振ミラーとする。いっぽう垂直型の主流となっている垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL: vertical cavity surface emitting laser)は、半導体プロセスによって活性層の上下に成膜した多層膜ミラーを共振器とする。

端面出射型の半導体レーザと比べて、VCSELには以下のようなメリットがある。端面出射レーザは素子を分離した時点で初めて発振の検査が可能だが、

VCSELは検査がウェハの状態で行えるため生産性に優れる。また多数を並べたアレイ構造を形成できる。VCSELは活性領域を微小化でき、しきい値電流や消費電力を大幅に下げられる。

VCSELは1977年に東京工業大学の伊賀健一氏(現同大学学長)によって発案され、1979年に同氏の研究室でInP基板、GaInAsP活性層において約1Aでの発振が確認された。現在、東京工業大学 精密工学研究所 フォトニクス集積システム研究センターでVCSELの研究を行っている小山二三夫教授は、1985年に伊賀氏の研究室で有機金属

化学気相成長法(MOCVD)装置の立ち上げに加わった。厚さおよび水平方向のサイズの大幅な小型化の成功がターニングポイントとなり、同研究グループでは2年後の1987年には6mAでのパルス発振に成功。1988年にはついに室温での連続発振を実現し、この頃から研究者が増えて加速的に面発光レーザの研究が進んだという。また90年代には短距離通信のニーズの高まりが予測されたため、企業による取り組みも増えた。当時は通信用レーザの400 Mbit モジュールが100万円もした時代であり、VCSELであれば大幅にコストを下げられると期待された。

### インターコネクタやマウスで実用化

現在のVCSELの応用先の1つがデータセンターやスーパーコンピュータなどのインターコネクタやデータリンクである。東工大のスパコン「TSUBAME 2.0」にも光インターコネクタが使われており、消費電力が1.3MW、1Wあたりの計算能力は958.35MFLOPSで、2010年11月のスパコン省エネ性能ランキングで2位を獲得している。

またVCSELが多く使われているのがコンピュータマウスだ。ピーク時で年間2億個が出荷され、今も多くの数量が製造・販売されている。スマートフォンなどに指紋を読み取るポインティングデバイスとして搭載されている。一方レーザプリンタへの採用も進んでいる。従来はポリゴンミラーのみで転写用レーザを走査していたが、VCSELアレイのマルチビームとポリゴンミラーを組み合わせることによって、従来よりも高速なプリントが可能になった。またインコヒーレントアレイによる高出力用レーザの励起光源、ビル間空間光通信など幅広い分野で実用化が進んでいる。

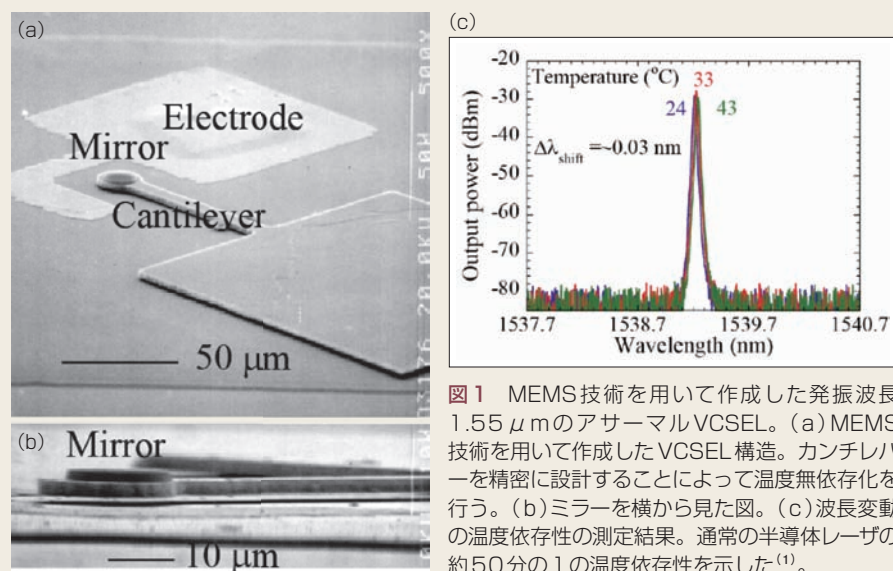


図1 MEMS技術を用いて作成した発振波長1.55 μmのアサーマルVCSEL。(a)MEMS技術を用いて作成したVCSEL構造。カンチレバーを精密に設計することによって温度無依存化を行う。(b)ミラーを横から見た図。(c)波長変動の温度依存性の測定結果。通常の半導体レーザの約50分の1の温度依存性を示した<sup>(1)</sup>。

## 高機能VCSELの研究

現在、同研究室ではGaAs系およびInP系VCSELについて、波長可変と絶対波長安定化を両立させる研究を進めている。通常VCSELでは温度によって材料の屈折率が変わるため、波長に変動が生じる。そこでMEMS加工技術を用い、温度上昇によって膨張する材料と収縮する材料を積層したカンチレバーを作成。その先にミラーをつけ、周囲の温度が変化しても発振波長の変動しない構造を作成した(図1)。「温度によるミラー間隔の変位量は、積層材料の線膨張係数とカンチレバーの厚さや長さなどの形状によって精密にコントロールできる。通常の半導体レーザの50分の1程度の波長変化率を実現しており、ほぼ温度無依存と言えるだろう」(小山氏)。

温度無依存のまま波長を変化させる研究も行っている。カンチレバーの根元をマイクロヒーターで加熱することにより、周囲の温度変化とは独立してGaAs系VCSELの波長を約8nm掃引することに成功している。「レバーと基板の間に電圧を印加することによっても、波長掃引を行える。20~30nmの掃引が可能になると考えられ実現すれば波長の電気制御が可能になる」(小山氏)。

この素子が実用化すれば、パルチエ素子など消費電力の大きい温度制御手法を使わない波長多重化技術の実現が見込まれる。

## VCSELの周期構造を他機能に応用

VCSELの構造を利用して新しい機能デバイスの創成にも取り組んでいる。たとえば光スイッチング、変調、ビーム偏向などだ。VCSELに用いられる周期構造を使って光を閉じ込めたときに生じるスローライト現象を利用する。多

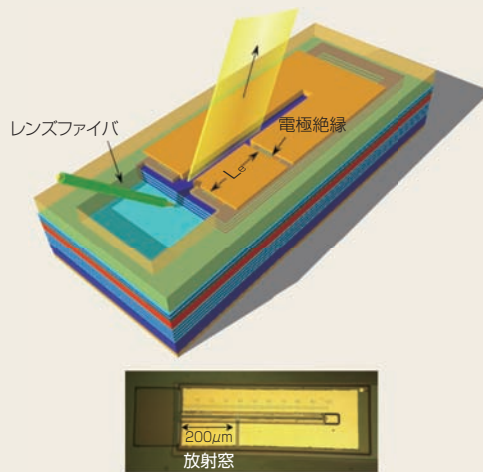


図2 スローライト増幅器によるビーム走査の模式図(上)と写真(下)<sup>(2)</sup>。

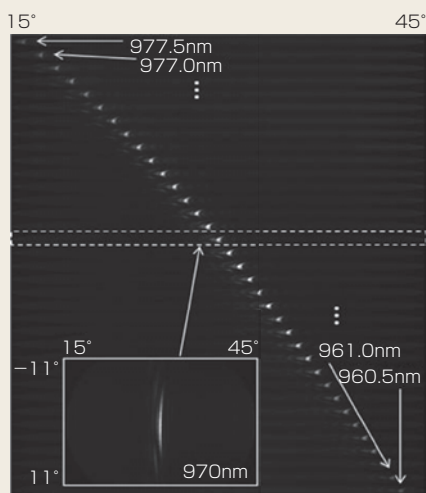


図3 ビームを走査した図<sup>(2)</sup>。

層構造間に光をレーザのように垂直でなく、垂直から少しずれた角度で入射させると、光は上下を行ったり来たりしながら進むため、基板面と平行な向きにはゆっくり進むように見える。これにより、光スイッチや変調器などをより小型にできるという。

光スイッチについては、従来より大幅な小型化につながる素子の実現に成功している。通常、光を半導体構造内で曲げる場合、材料の一部にキャリアを注入したうえで電流を流すことによって屈折率を変化させて全反射させる。しかし全反射の臨界角は大きくても数°しか取れないため、サイズが大きくなって

しまう。しかしスローライトモードを使えば光を理論上90°近くまで曲げることができる。実験では30μm角の素子において、入射角15°で数ns周期の反射・透過のスイッチングに成功している。

VCSEL構造を利用した、ビーム走査の研究も進めている。これは波長を変化させ、スローライトの上方から放射された光の方向を変えるというもの(図2)。シミュレーションによると波長が30nm程度変わると角度を50°程度まで変化させることができる。解像点数については「実験的には約40°の偏向角において最近解像点数1000を実現している。ポリゴンミラーなどメカニカルでなく電気制御によるビーム操作としては最高の解像度になる」(小山氏)。図3が実際にビームを走査した例だ。またVCSELと同時に半導体プロセスによって光増幅器も集積できる。そのため放射によって減衰した光を補い、シミュレーションではmmオーダーの長いビームを作ることも可能だという。

これらの研究分野の呼称として伊賀氏が提唱しているのが「面発光レーザフォトンクス」という名前だという。面発光レーザを単なるレーザ素子として高機能化を追求することはもちろん、素子の構造を応用した新デバイスの創成へと展開する可能性を示す言葉だ。今後も新たな機能を提供する素子の実用化が期待できそうだ。

### 参考文献

- (1) W. Janto, K. Hasebe, N. Nishiyama, C.Caneau, T. Sakaguchi, A.Matsutani, P. B. Dayal, F. Koyama, C.E. Zah., ILSC 2006, PD1.1, 2006.
- (2) X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A.Imamura and F.Koyama, Electron. Lett., vol. 48, no. 6, pp. 336-337, 2012.

### 訪問した研究室

東京工業大学 精密工学研究所 フォトニクス集積システム研究センター 小山 二三夫研究室