

伊賀健一(1940-) 「面発光レーザーの発明と実現」
IGA Kenichi "Invention of a Surface Emitting Laser and Its Realization"

1. 伊賀健一略歴

1940年広島県呉市生まれ。1959年広島大学附属高等学校卒業。1963年東京工業大学理工学部卒業、1968年同大学院博士課程修了（工学博士）。同年より、東工大精密工学研究所に助手として勤務、1974年助教授、1984年教授に就任。面発光レーザー、微小光学の研究に従事。1979-1980年ベル研究所客員。2001年東工大名誉教授。2001-2007年日本学術振興会理事、2007-2012年東工大・学長。応用物理学会フェロー／微小光学研究会代表。電子情報通信学会名誉員・フェロー・会長（2002年度）。レーザー学会フェロー。電子情報通信学会業績賞、応用物理学会業績賞、紫綬褒章、東レ科学賞、市村学術賞（功績賞）、朝日賞、藤原賞、C&C賞、2013年フランクリン賞（ゴールドメダル・パワワー賞）、2018年瑞宝重光章、応用物理学会光工学賞、2021 IEEE Edison Medal。2021 町田市名誉市民。



伊賀健一
Kenichi Iga

2. 概要

業績をまとめると、「垂直共振器面発光レーザー（VCSEL:Vertical Cavity Surface Emitting Laser）の発明と、新しいフォトン分野開拓に向けた先導的な研究」と要約することができます。技術的な問題だけでなく、多くの本を書いたり、国際会議を開催したりすることで、VCSELの世界的なプロモーションへ貢献したと思います。

1977年に面発光レーザーのアイデアを提案しました。1979年に東京工業大学でVCSELの最初のデモンストレーションを行って以来、レーザーの基本的な技術および理論的基盤を確立し、この分野で多くの研究に影響を与えてきました。VCSELによる高速データ通信分野、主にギガビットイーサネット、ファイバーチャネル、および高速光相互、デジタルデータ転送、高解像度フルカラーレーザープリンター、光マウス、スマートフォンでの3D顔認識、LiDARなどです。VCSELのさまざまな応用が進行中で、2020年の世界市場は90億ドルを超えると報告されています。

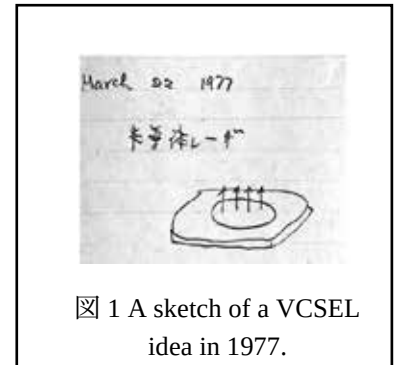


図1 A sketch of a VCSEL idea in 1977.

3. 面発光レーザーの研究成果

3.1 面発光レーザーの発明

1977年3月22日に面発光レーザーを考案しました。アイデアのスケッチを図1に示します。従来のファブリ-ペロ端面発光型半導体レーザーとは対照的に、このレーザーでは活性層を含む多くの層がモノリシックに成長でき、ウエハ表面に垂直なレーザー共振器で構成されます。その後、世界的にも垂直共振器型面発光レーザー（VCSEL）と呼ばれるようになりました。3月22日は、日本記念日協会から「面発光レーザーの日」として登録されています。

ここでの内容には、VCSELの提案、発明の背後にある動機、デバイス設計、実現のブレークスルー、および量子井戸、半導体ブラッグ反射器、AlAs酸化技術などの後のデバイスに不可欠になった技術が含まれます。機械的方法によるレーザー波長の連続掃引は初めての試みで、後年MEMS掃引VCSELのスキームになりました。

3.2 発明の動機

3.2.1 構想

1970年頃に東京工業大学精密工学研究所で始めた半導体レーザーの研究中、その製造とデバイスの特性評価の観点から、従来の半導体レーザーに不満を持っていました。それまでの半導体レーザーの共振器は、ウエハを劈開することによって得ていました。すなわち約数百ミクロンの共振器長を形成するため、結晶面(100)にエピタキシャル成長したウエハを、それと直角な(110)に切断することによって製造されていました。製造の初期段階では、切断プロセスは外科用ナイフが使用されていました。例えば10⁹個程度の量産には、ほど遠いものでした。端面発光レーザー構造に起因する別の欠点として、デバイスの特性評価は劈開プロセスが完了した後のみ可能であり、ウエハスケールでの初期品質テストを含むデバイスの特性評価は不可能でした。この結果、2次元半導体レーザーアレイの形成も困難でした。

もう1つの考慮事項は、単一モードレーザー、つまり横モードと縦モードをどのように単一にするかでした。1976年頃、短い共振器長によって自由スペクトル範囲（FSR）を広げることにより、動的な単一モード動作機能を維持する可能性に気がきました。コンピュータシミュレーションに基づいてなされた結論の1つは、

共振器の長さを 50 μm 未満にする必要があるというものでした。この結果は、三重県合歓の里で開催された IEEE 半導体レーザー会議で発表し、論文にもなりました。

3 番目の問題は、レーザー周波数をどのように制御するか、つまりレーザー周波数の再現性をどのように保証するかでした。多モード条件下でレーザー発振するファブリペロ端面発光レーザーの発振周波数は、正確に制御することはほとんど不可能です。また、共振器の長さを決定する切断位置には、波長よりもはるかに大きな誤差があります。分布帰還 (DFB) および分布ブラッグ反射鏡 (DBR) レーザーでは、発振周波数を制御するために回折格子が使用されます。共振周波数は回折格子の周期によって決定されますが、正確な周波数は等価屈折率に影響を与える導波構造に依存します。

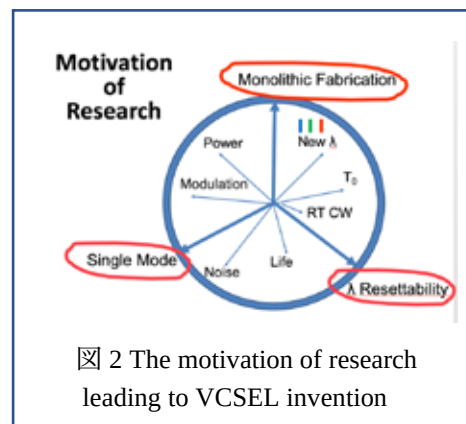
これらの従来の端面発光レーザーに関連する問題を解決するための、根本的な検討が必要だと感じました。そして、レーザー共振器を半導体ウエハ表面に沿うのではなく、垂直にする必要があるという結論に達しました。共振器は、手動の劈開プロセスではなく、半導体プロセスによって製造できる半導体層および/または誘電体層で作ることができると思いました。

3.2.2 動機

その発明の動機をまとめると、次のレーザーを実現することでした。

- (i) モノリシックプロセスで製造可能、
- (ii) 単一モード動作の場合、および
- (iii) 波長再現性あり。

動機を図 2 に示します。円内の項目は、1970 年代に産業界で達成されたものです。前述の 3 つの条件を満たすために別の方法を取りました。そして、図 1 に示す VCSEL の構造を考えました。小さい径の VCSEL の場合、横モードは単一で、共振器長が短いために自由スペクトル範囲 (FSR) が大きく、縦モードも単一にすることができるのです。



3.3 研究の初期段階

3.3.1 初期デバイス

面発光半導体レーザーの最初のアイデアに基づいて、新しい構造の理論的および実験的研究によりその実現を目指しました。GaInAsP/InP デバイスからの垂直共振に関する概念と最初の実験結果は、1978 年 3 月に日本で開催された第 25 回応用物理学会春季会議で発表しました。2 回目の報告は、1978 年 11 月に開催された第 26 回応用物理学会秋季大会で発表でした。この論文は、垂直共振器レーザーの鏡面反射率と発振条件の解析と、凸面鏡面による垂直共振器形成の実験結果で構成されています。

1979 年に、77 K のパルス注入電流条件下での GaInAsP/InP VCSEL の発振動作を実証しました。これは、電流注入された VCSEL 発振最初の発表であり、実用的な半導体レーザーとしての VCSEL の可能性を示したものです。その後、VCSEL の研究開発を継続的に実施し、多くの基本的な結果を達成してきました。VCSEL デバイスおよび関連応用に貢献した多くの論文を発表しています。

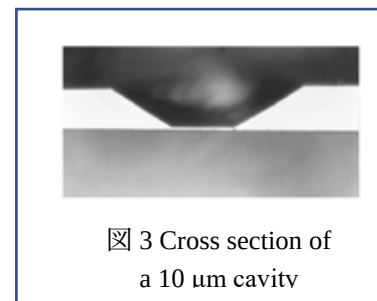
3.3.2 デバイス実現の成果

主なブレイクスルーは、1982 年に 77K で明確な VCSEL モードを実証した 10 μm 共振器 VCSEL の製作でした。つまり、単一モード、円形ビーム、直線偏光などです。図 4 に劈開した断面の画像を示します。中央部分は 10 μm の薄いレーザー共振器に対応します。

次いで、共振器長 7 μm の AlGaAs/GaAs VCSEL で、室温で 6 mA という小さなパルスしきい値電流を報告しました。最初の室温連続波 (CW) 動作は、図 5 に示すように GaAs システムを使用して小山二三夫と伊賀によって 1988 年に達成されました。この実験は、半導体レーザーデバイスとしての VCSEL の実用性を実証したものです。しきい値電流密度を下げるために、MOCVD 結晶成長と多層反射鏡形成技術を採用しました。また 1993 年には、グループの馬場俊彦らが先導し、1,300nm の VCSEL で室温に近い CW を達成しています。

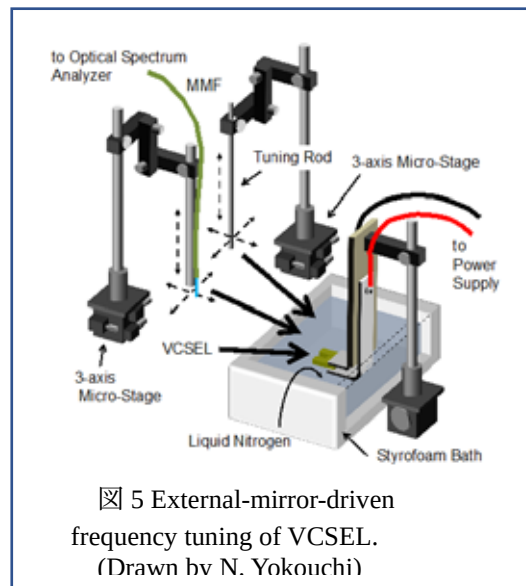
3.3.3 初期 VCSEL のしきい値電流の削減

共振器が短いと、レーザー共振器の体積が小さくなり、共振器内に十分な光子が閉じ込められれば、VCSEL のしきい値電流を大幅に低下できます。多くの応用では、低いしきい値電流が望ましいのです。1980 年代の終わりから 1990 年代にかけて、世界規模で強力な研究開発競争が起こり、私のグループはほとんど常に最前線に立っていました。



3.4.3 周波数掃引用の可動反射鏡

レーザー周波数の再現性は、半導体レーザーの研究を始めたときに考えた課題のひとつです。VCSELは、共振器長が短いため、純粋な単一波長の光を共振できます。正確な発光波長は実効共振器長によって定義されるため、共振器長を変更することで連続波長掃引が可能です。そこで、幅広い掃引可能性を実現するために、機械的な掃引方法で幅広い掃引を行う試みを試しました。まだ、デバイス自体が未熟な時期でした。反射鏡の1つを可動式の外部反射鏡に置き換え、InGaAsP/InP VCSEL を使用して実験的に実証しました。図6に示すように、チューニングロッドを押すことによって機械的に駆動します。波長は、モードホッピングなしで77 Kで40～86Åにわたって連続的に掃引できました。これは、VCSELでの広い範囲での連続波長掃引の可能性を示しており、後にMEMSの導入によりさまざまな応用に関心を集めました。周波数掃引可能なVCSELは、現在、分光センシングおよび波長分割多重を備えたDatacomにとって重要な光源になりつつあります。また、偏向可能なVCSELが、後継者の小山二三夫らによって提案、実現されました。発光ビーム角度が波長に依存する光ビーム偏向と組み合わせた測距センサーやLiDARに使用されています。波長可変VCSELは、さまざまな応用を開きます。



3.4.3 偏波面制御

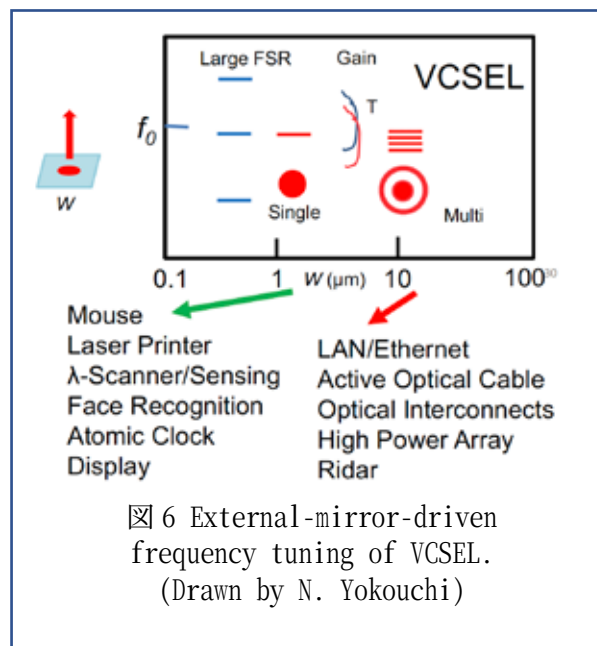
面発光レーザーでは、通常直線偏波で発振しますが、高出力時などに不安定になることがあり安定化が必要です。偏波による光損失や光利得に差をつければ良いのですが、研究室では、傾斜基板による制御を試しました。西山伸彦らによる(311)基板によるVCSEL製作では、極めて安定な偏波を実現しました。

3.5 応用システムにおけるVCSEL 応用

3.6.1 VCSEL の利点と可能な応用

デバイス性能の進歩に伴い、高生産性、高効率、低消費電力、円形ビーム、単一周波数、2次元アレイなどのVCSELの機能は、その応用によって広く認識されるようになってきました。1990年代半ば以降、インターネットのLANは爆発的に拡大しています。応用分野は、データ通信から始まり、センサー、プリンター、コンピュータのマウスの分野が続き、2010年代半ばまで続きました。その後、データ通信とセンシングの市場規模は着実に成長するとともに、VCSELは医用応用、励起光源、産業用加熱などの新しい分野での用途を見出しています。

図6に、VCSELの発振周波数と直径の関係を示します。VCSELの単一モードバージョンと多モードバージョン、およびそれらの適用分野を区別します。単一モードデバイスの場合、デバイスの直径を3ミクロン以下に縮小することで、単一横モード動作を実現できます。円形ビームと単一発振周波数が得られます。一方、8ミクロン以上の直径のマルチモードデバイスの場合、高い光出力と高速変調機能を実現できます。1999年から、VCSELはギガビットイーサネットなどの高速LANに適用され、量産が開始されました。これまで、VCSELは図6に示すように、さまざまなIoT分野に適用されてきました。生産の市場規模は2025年に40B\$に達すると予測されています(Yole/CIEO Reportなど17社の調査報告より)。



3.5.2 関連する微小光学

私はまた、関連する微小光学の分野でも足跡を残しています。1979年に平板マイクロレンズアレイを提案し、実現しました。いろいろな努力と日本板硝子との協力により、LCDプロジェクター用の1000×1000個のマイクロレンズアレイの開発に成功しました。

これを利用した積層光集積回路を提案しています。面発光レーザーと組み合わせて2Dアレイ光学デバイスを実現するという夢に向かって取り組んできました。また、平板マイクロレンズアレイに基づく新しい自己整合光学系を提案し、実証しました。この提案された概念は、大規模な並列光ファイバ通信で使用する光部品を実現するなど役に立ちます。また、1981年に応用物理学会・微小光学研究グループを組織し、1988年から2021年に至って代表を務めています。

4. 特記

VCSEL とそのアレイは、並列マイクロオプティクスの世界を開き、新しいオプトエレクトロニクスシステムの工業化に貢献しました。ここで紹介した応用は、VCSEL 市場に大きな可能性をもたらしました。VCSEL は、高い生産性、高い信頼性、低消費電力、小型サイズによる低コストなどの利点があるため、幅広い応用に最適な光源です。VCSEL は、データコムからスマートセンシングまで、現在および将来の情報社会 (AI, IoT) , エネルギーシステムをサポートするために不可欠な主要コンポーネントになりつつあります。2021 年現在、VCSEL のない社会を想像するのは難しいかもしれません。

5. 参考文献

- [1977IGA] Iga, K., Laboratory Notebook, March 22 (1977).
- [1978IGA] Iga, K. T. Kambayashi and C. Kitahara, "GaInAsP/InP Surface Emitting Laser(I)," The 25th Spring Meeting of Applied Physics Societies, 27p-C-11, p.63, Mar. (1978)
- [1978KIT] Kitahara C., T. Kambayashi and K. Iga, "GaInAsP/InP Surface Emitting Laser (II)," The 39th Fall Meeting of Applied Phys. Societies, 5p-Z-1, p.497, Nov. (1978)
- [1979IGA] Soda H., K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP Surface-Emitting Injection Lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, no. 12, pp. 2329-2330, Dec. (1979)
- [1980IGA] Iga, K., Y. Suematsu, K. Kishino, and H. Soda, Japan. Patent, Hei1-56547 (1980)
- [1982MOT] Motegi Y., H. Soda, and K. Iga, "Surface-Emitting GaInAsP/InP Injection Laser with Short Cavity Length," Electron.Lett., Vol. 18, No. 11, pp. 461-463, May (1982)
- [1987IGA] Iga, K., S. Kinoshita, and F. Koyama, "Micro-cavity GaAlAs/GaAs Surface-Emitting laser with $I_{th}=6$ mA," Electron. Letters, Vol. 23, No. 3, pp. 134-136, 29th, Jan. (1987)
- [1987UEN] Uenohara H., F. Koyama, T. Sakaguchi, and K. Iga: "Multi quantum well structure for surface emitting lasers", National Conference Record, Semiconductor Devices and Materials, IEICE, No. 279, Nov. (1987).
- [1988IG] Iga, K., F. Koyama, and S. Kinoshita, "Surface Emitting Semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 24, No. 9, pp. 1845-1855, Sept. (1988)
- [1988KOY] Koyama F., S. Kinoshita and K. Iga, "Room temperature CW operation of GaAs vertical cavity surface emitting Laser," Trans. IEICE, Vol. E71, No. 11, pp. 1089-1090, Nov. (1988)
- [1988SAK] Sakaguchi T., Koyama F., and K. Iga, "Vertical Cavity Surface-Emitting Laser with an AlGaAs/AlAs Bragg Reflector," Electron. Lett., Vol. 24, No. 15, pp. 928-929, July (1988)
- [1989KOY] Koyama F., Kinoshita S., and K. Iga, "Room temperature continuous lasing characteristics of a GaAs vertical Cavity surface emitting laser", Appl. Phys. Lett. 55(3), 221-222 (1989).
- [1992YOK] Yokouchi N., T. Miyamoto, T. Uchida, Y. Inaba, F. Koyama, and K. Iga: "40 Å continuous tuning of a GaInAsP/InP vertical-cavity surface-emitting laser using an external mirror," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 7, pp. 701-703, July (1992)
- [1993BAB] Baba T., Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama and K. Iga, "First Room Temperature CW Operation of GaInAsP/InP Surface Emitting Laser," IEICE Trans. Electron., Vol. E76-C, No. 9, pp. 1423-1424, Sept. (1993)
- [1995HAY] Hayashi Y., T. Mukaiharu, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, "Record low-threshold Index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure", Electron. Lett., Vol. 31, No. 7, pp. 560-562, Mar. (1995)
- [1997MIY] Miyamoto T, K. Takeuchi, F. Koyama, and K. Iga, "A novel GaInNAs-GaAs quantum well structure for long wavelength semiconductor lasers", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 9, No 11, Nov. (1997)
- [1999NIS] N. Nishiyama, A. Mizutani, N. Hatori, M. Arai, F. Koyama, and K. Iga: "Lasing characteristics of InGaAs-GaAs polarization controlled vertical-cavity surface-emitting laser grown on GaAs [311] B substrate," IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., vol. 5, no. 3, pp. 530-536 (1999).
- [2000IGA] Iga, K., "Vertical cavity surface emitting laser - Its birth and generation of new optoelectronics field", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol.6, No.6, pp.1201-1215, Nov./Dec., (2000)
- [2001KAG] Kageyama T., T. Miyamoto, S. Makino, Y. Ikenaga, N. Nishiyama, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga: "Room temperature continuous-wave operation of GaInNAs/GaAs VCSELs grown by chemical beam epitaxy with output power exceeding 1mW", Electron. Lett., Vol. 37, No.4, pp.225-226, Feb. (2001).
- [2008IGA] Iga K.: "Vertical-cavity surface-emitting laser: Its Conception and Evolution", Jpn J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 1, pp.1-10, (2008)
- [2013IGA] Iga, K., "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)", Proc. IEEE, Vol. 101, No. 10, pp. 2229-2233, Oct. (2013)
- [2018IGA] Iga, K. "Forty Years of VCSEL: Invention and Innovation (Review) ", Japanese J. Applied Physics, 57(8S2)1-7(2018)
- [2020IGA] K. Iga: "VCSEL: Born small and grown big", Proc. SPIE 11263, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) X, 1126302, 2 March (2020); doi: 10.1117/12.2554953.
- [2020IGAa] K. Iga: "VCSEL Odyssey", in English, SPIE-Press, September 2020.
- [2020IGAb] 伊賀健一, 波多腰玄一: "光エレクトロニクスの玉手箱", 第 18-21 章, Vol.II (PDF 版), アドコム・メディア社, April 2020. (<https://contendo.jp/store/contendo/Product/Detail/Code/J0010425BK0095429004/>)
- [2020IGAc] 伊賀健一, 波多腰玄一: "面発光レーザー: 原理と応用システム", アドコム・メディア社(2020) PDF 版 (<https://contendo.jp/store/contendo/Product/Detail/Code/J0010425BK0101116001/>)
- [2021IGA] 伊賀健一: "面発光レーザー発光レーザーが輝く", 第 2 版 (PDF 版), オプトロニクス社, (2021) PDF 版 (http://optronics-ebook.com/products/detail.php?product_id=168)

(2021.10.4 伊賀健一談)