

サムコ科学技術振興財団 2022年度 第6回 研究助成金贈呈式 記念講演「面発光レーザーが拓く世界」

サムコ科学技術振興財団 2022年度 第6回 研究助成金贈呈式が、9月14日に京都市リサーチパークにおいて開催されました。そこの記念講演として、伊賀健一先生(東京工業大学 元学長・名誉教授)にお話をいただきました。記念講演の要旨をご紹介します。

東京工業大学 元学長・名誉教授 **伊賀 健一 先生**

プロフィール	学歴	略歴	受賞歴
	1963年 東京工業大学 理工学部 卒業		1990年 市村賞・功績賞(新科学技術財団)
	1965年 東京工業大学大学院 修士課程修了		1992年 ウィリアム・ストライファー科学業績賞 (IEEE/LEOS)
	1968年 東京工業大学大学院 博士課程修了(工学博士)		1993年 電子情報通信学会業績賞(小林宏治メダル付与)
	1968年 東京工業大学 助手		1993年 Microoptics Award (応用物理学学会)
	1974年 東京工業大学 助教授		1995年 東レ科学賞(東レ科学財団)
	1979年 ベル研究所 客員研究員(1980年9月まで)		1998年 朝日賞(朝日新聞文化財団)
	1984年 東京工業大学 教授		1998年 ジョン・チンダル賞 (IEEE/LEOS, OSA)
	1995年 東京工業大学 精密工学研究所長		2000年 The 3rd Millennium Medal (IEEE)
	2000年 同マイクロシステム研究センター長、 同図書館長		2001年 紫綬褒章
	2001年 東京工業大学 名誉教授(現任)		2002年 ランク賞(英国ランク財団)
	2001年 日本学術振興会 理事(2007年9月まで)		2003年 IEEE Daniel E. Noble Award (IEEE)
	2001年 工学院大学 客員教授(2007年9月まで)		2003年 藤原賞(藤原科学財団)
	2003年 電子情報通信学会長(2003年度)		2003年 電子情報通信学会功績賞
	2003年 応用物理学会微小光学研究会 代表(～現在)		2006年 応用物理学会業績賞
	2007年 東京工業大学 学長(2012年9月まで)		2006年 同SSDM賞
	2014年 一橋大学 監事(2016年3月まで)		2007年 The Welker Award (ISCS)
			2007年 C&C賞(NEC C&C財団)
			2009年 NHK放送文化賞(NHK)
			2013年 フランクリン賞・パウワー賞(フランクリン財団)
			2015年 小錦香椎子賞(応用物理学会)
			2016年 泰山賞((公)レーザー技術総合研究所)
			2018年 瑞宝重光章
			2021年 応用物理学会光工学賞功績賞(高野榮一賞)
			2021年 IEEE Edison Medal



▶ 面発光レーザーについて

本日は「面発光レーザーが拓く世界」と題してお話をします。面発光レーザーとは、図1のようなビーム状の光を放つ非常に小さなレーザーのことです。基板と垂直方向に共鳴し、表面から光が出るため、**VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser / 垂直共振器型面発光レーザー)**と呼ばれています。これはディスプレイなどの画素を意味するピクセル (PIXEL) をもじったダジャレのような呼び方ですが、今は世界中で通用する言葉になりました。

VCSELの構造は、半導体基板上に活性層 (Active Layer) と呼ばれる光を放ちかつ増幅する層があり、その上下に反射鏡を設け、垂直方向に共鳴させて光を表面から取り出す構造になっています。パンでおかずを挟むハンバーガーのようなイメージです。その直径は10 μm 以下と小さく、基板上に多くのレーザーを一度に並べて作ることが出来る特徴があります。VCSELは、皆さんが日頃から使っているマウス、レーザープリンター、スマホの顔認証機能など、様々なところで使われています。

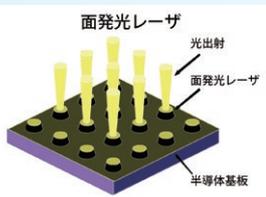


図1 面発光レーザーアレイのイメージ

▶ レーザーの出現と歴史

レーザーの歴史は1960年、米国ヒューズ社のテオドル・メイマンさんが、初めてルビーレーザーを作ったことに始まります。以降、1962年に米国で半導体レーザーが発表され、その後10年程をかけて実用化されました。当時は横型のレーザーで、端面発光半導体レーザー (水平共振器レーザー) と呼ばれ、その技術は現在の長距離光通信、中距離光インターコネクト、光ディスク (CD、DVD、BD)、大出力レーザー加工などに応用されています。水平方向に寝かされたストライプ状の発光領域によって横方向に光

が往復して共振し、大きさは300 μm 程です。ただ、光の波長である1 μm に比べると大きく、楽器に例えると倍音が多く出て、光のスペクトル純粋性が損なわれ、薄膜形成による一貫プロセスでは製造できないといったデメリットがありました。

私が半導体レーザーの研究を始めた1975年頃は、LSI (大規模集積回路) が出来始めた時代でした。私は当時の半導体レーザーに不満を持っていました。具体的には、結晶をへき開する必要があり、波長が単一でなく、同じものが繰り返し作れないといった不満です。そこで私は、「レーザーもLSIのようにプロセス技術によって作ることが出来ないか?」と考え、それを解決すべく、**単一モード、モノリシック製造、波長再現性という3つの研究ミッションを自らに与え、当時のLSIと同じように製作できるレーザーの創出を目指しました。**何か良い方法はないかと四六時中考えた結果、横向きを縦向きに、線から面に、長いものを短くすればよいというアイデアが閃きました。1977年3月22日の真夜中のことです。枕元に置いていた研究ノートに「面発光レーザー」の元となる絵をスケッチしました。図2に示すこのアイデアによって3つの研究ミッションをクリアする半導体レーザーを作ることが出来ると考えました。

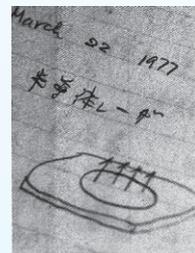


図2 研究ノートのスケッチ (1977.3.22)

余談になりますが、この3月22日は、一般社団法人日本記念日協会に「面発光レーザーの日」として登録されています。2021年4月に応用物理学会微小光学研究会から申請したところ、審査の結果採択になり登録されました。

▶ IEEEエジソンメダルについて

2021年5月に、IEEE (電気電子学会) から最高位メダルの一つである図3に示すエジソンメダルを受賞することが出来ました。IEEEは米国に本部を置く学会で会員数は全世界で43万人

にも及びます。受賞理由は「垂直共振器型面発光レーザーの概念創出、物理および開発への先駆的貢献」です。ちなみに、発明王であるトーマス・エジソンは1877年にフォノグラフ (蓄音機) を発明しましたが、私がVCSELを開いたちょうど100年前の1877年のことであり、何かの縁を感じ非常に光栄に思っています。



図3 IEEEエジソンメダル

▶ 世界初の面発光レーザーの実現から、3つの研究ミッション解決へ

さて、話を戻します。面発光レーザーの構造を開いた翌年 (1978年) 3月、応用物理学会にて概念と製法について発表し、同時に論文も書きました。思い返せば物事をドキュメントとして残しておくことは大切だと思います。最近の若い方は出し惜しみをされると聞きますが、学会で公開資料とすれば記録として残りますし、非常に大事なことだと感じます。その1年後、液体窒素で冷やしながらか発振する面発光レーザーが出来ました。この時、世界で初めての面発光レーザーが実現し、世界中が認めてくれた瞬間でした。

続いて、先ほどの3つの研究ミッションについて話します。まず、単一モード性です。1982年、選択エッチングにより厚さ10 μm 程のエピタキシャル層のみを残す面発光レーザーの製作に取り組んだ結果、液体窒素温度ながら縦・横方向ともに単一モード発振が得られました。これは非常に大きなブレイクスルーでした。

続いて、モノリシック製造です。基板の上のエピ成長し、望みの構造にエッチングし、基板を薄くした後、ダイシングで細かく裁断し、ワイヤーボンディングを施せば、1個のレーザーが出来上がります。これはLSIと同じプロセスで制御できるという意味を持ちます。ただ当時の技術からは「光るところが薄い、平らな結晶が作れない、小さな反射鏡が作り難い、電流を小さくところに流し難い、熱が逃げない。」など厳しい課題がありました。これらの課題をクリアするため、末松安晴教授が1986年に大学院博士課程

を修了したばかりの小山三夫君(現:東京工業大学 教授)を助手(Assistant Professor)としてよこしていたが、一緒に実験を進めました。その結果、1988年に室温で連続的に動作する世界で初めての面発光レーザーが実現しました。面発光レーザーが革新的なデバイスとして認識されたのです。

最後に3番目、波長の再現性です。共振器長を変化できれば、原理的にモード跳びがなく波長変化が連続的にできることをイメージしました。なお、発振器と言うものには必ずと言って良いほどに周波数の調整機能が必要なのです。例えば、電圧制御水晶発振器(VCXO)がその例ですが、パソコンやスマホには必ず搭載されているものです。この周波数のチューニングが至難の業でした。1992年当時、まともな面発光レーザーも作れていない時代でしたが、文部省からの特別予算が無くなり研究費が枯渇していました。研究を続けていくためにも、第3のミッションであった周波数チューニングに取り組むことにしました。レーザーの片方を液体窒素に入れ、上からマイクロチューナーで下ろして間隔を変えるという実験により、40Å(オングストローム)もの掃引をモード跳び無しに計測することが出来ました。これが初めての面発光レーザーの機械式連続波長掃引でした。その後1995年には、カリフォルニア大学バークレイ校のコンニー・チャン・ハスナイン教授により、MEMSを使った面発光レーザーが製作されました。現在は、OCT(Optical Coherence Tomography / 光干渉断層像撮影)の波長可変レーザーとして実用化され、眼底や眼球の断層像の測定などに使われております。

▶ 面発光レーザーの論文数

面発光レーザーの論文数を時系列で紹介いたします。私が最初に出した論文は1979年ですが、その後の数年は私ども以外の論文は無く、世界的に論文数が急増したのは1988年頃からです。米国、ドイツを始め世界各国でVCSELの講義をして回ったことが功を奏しました。これまでの世界の総論文数は5万件を超えており、VCSELの世界的な発展に貢献したと自負しています。

▶ 広がり続ける応用分野

2000年頃から面発光レーザーが先導する製品が市場に出始めました。図4に示すように、光通信(LAN、光配線、光デジタル転送)、レーザーディスプレイ、OCT、スーパーコンピューター、レーザープリンター、マウス、スマホの顔認証機能、自動運転、お掃除ロボットなど、様々な製品に応用されています。なお、東京工業大学のスパコン「TSUBAME 3.0」には1万6千個のVCSELが使われており、「富岳」には64万個が使われているそうです。2017年に発売したApple社のiPhoneXでは約500個のVCSELが

搭載され、3次元の顔認証が可能となり、iPhone14などの後継機種にも受け継がれています。お掃除ロボットにはLiDARが載っており、部屋を隅々まで計画的に掃除することが出来ます。現在、自動運転車への実装のための研究開発も進められています。

VCSELチップの市場規模は、2022年現在20億ドル(約2,600億円)で、今後更なるマーケットの広がりにより2030年頃には6倍の120億ドル(約1兆5,600億円)まで拡大すると予測されています。また、モジュールでは、2022年現在90億ドル(1兆1,700億円)から2025年頃には400億ドル(5兆2,000億円)に拡大し、データ通信、スマホ、保安、ガス検知など幅広い分野での伸びが期待されています。

また、6インチのGaAs(ガリウム砒素)エピウエハは年間1万枚ほどにも達し、それを使った面発光レーザーが大量に生産されています。今は6インチウエハが主ですが8インチウエハに移行する動きがあります。ちなみに人間の目で見ることが出来る可視光線の波長は400nm ~ 800nmですが、面発光レーザーは様々な材料を組み合わせることで、この範囲の波長や赤外領域もカバー出来るようになっていきます。最近ではソニーグループ(株)の濱口達史さんらが、赤・青・緑の光の三原色の面発光レーザーを重ねて投影することで白色を映し出す実験もされており、将来はスマートグラスやVRなどへの応用が期待されています。これから先、AIやIoTが進展する中で、VCSELは最先端技術の根幹を支えるものとして活躍の場を広げるでしょう。私が考えもしなかったような製品に応用されていくことにも期待が膨らみます。

▶ 大谷翔平選手とお父さんのノート

最後にメジャーリーガー大谷翔平選手とお父さんのノートを紹介します。大谷選手が子供の頃、お父さんは大谷選手と交換日記のような野球ノートを書いていて、3つの「一生懸命」をノートに記したそうです。それは、「一生懸命走ること、一生懸命声を出すこと、一生懸命キャッチボールをすること」の3つです。一番になればとか優勝しろとか、そういった数値目標ではないことは非常に興味深いです。大谷選手自身「勝つことは目的ではない。勝つ方が楽しいから勝ちに行く。」と言っており、野球に取り組む意識付けや姿勢の原点となったようです。

私もそれに倣いまして、「一生懸命考えること、一生懸命書くこと、一生懸命準備をすること」の3つをノートに書いています。やはり何事にも一生懸命考えることが大切で、かつ文字に残しておく方が良いと私は考えてきました。脳は無理をして考え続けると、ふとした時にアイデアが閃きます。また何事にも準備は欠かせないようにしています。この反対が分かりやすいのですが、「何も準備せずに失敗し、くよくよする」のは良くないことです。

さて、最後になりますが、世界では戦争やコロナで多くの人がお亡くなり、困窮している人達が沢山いらっしゃると思います。私は長年コントラバスを弾いておりますが、平和への祈りを込めまして、スペイン、カタロニア民謡の『鳥の歌』をご視聴いただきながら、本日の講演を終わりたいと思います。コントラバス演奏動画は学長の時に撮ったもので、ピアノ伴奏は、一緒にレーザーの本を書いたりしている波多腰玄一さんです。

本日はご静聴ありがとうございました。



図4 面発光レーザーの応用例