

本田財団レポート No. 193

第 46 回 本田賞贈呈式 記念講演（2025 年 11 月 17 日）

「面発光半導体レーザー:小さく生まれて大きく育つ ～スマートフォンから巨大データセンターの心臓に～」

東京科学大学 栄誉教授
旧東京工業大学第 18 代学長

伊賀 健一 博士

公益財団法人 本田財団

伊賀 健一 博士

東京科学大学 名誉教授
旧東京工業大学第18代学長



■ 生まれ

1940年6月15日 広島県

■ 学歴

1963年 東京工業大学 理工学部卒業
1968年 東京工業大学 大学院 博士課程修了
(工学博士)

■ 研究歴

1968～1973年 東京工業大学 助手
1973～1984年 東京工業大学 助教授
1979～1980年 ベル研究所 客員研究員
1984～2001年 東京工業大学 教授
1995～1999年 東京工業大学 精密工学研究所 所長
2000～2001年 東京工業大学 図書館長
2001～現在 東京工業大学 名誉教授
2001～2007年 日本学術振興会 理事
2003～現在 応用物理学会 微小光学研究会 代表
2003～2004年 電子情報通信学会 会長
2007～2012年 東京工業大学 学長
2022～現在 東京工業大学 (現 東京科学大学) 名誉教授

■ 学会等の会員

電子情報通信学会 名誉員 フェロー
応用物理学会 功労会員 フェロー
レーザー学会 フェロー
IEEE Life Fellow
OPTICA Life Fellow
米国工学アカデミー (NAE) 外国会員

■ 表彰歴

2000年 東京都功労者表彰 (技術振興功労)
2001年 紫綬褒章
2007年 町田市功労者表彰 (文化芸術功労)
2013年 町田市市民栄誉彰
2018年 瑞宝重光章
2021年 町田市名誉市民
2022年 文化功労者 (文部科学省)

■ 受賞歴

1990年 市村清新技術財団 市村学術賞 (功績賞)
1993年 IEEE/LEOS William Streifer Award
1995年 東レ科学技術賞
1998年 IEEE/LEOS+OSA John Tyndall Award
1998年 朝日賞
2002年 英国 Rank 財団 The Rank Prize
2003年 電子情報通信学会 功績賞
2003年 藤原賞
2003年 IEEE Daniel E. Noble Award
2006年 応用物理学会 業績賞
2007年 NEC C&C 賞
2009年 NHK 放送文化賞
2013年 Franklin Institute, Bower Award and Prize
for Achievement in Science
2021年 IEEE Edison Medal
2024年 OPTICA Frederic Ives Medal/Jarus Quinn Prize
2024年 大川賞

■ はじめに



ご紹介いただきました伊賀健一でございます。面発光レーザーに関する研究により本田賞を頂戴いたしましたので、本日はそのお話をさせていただきます。

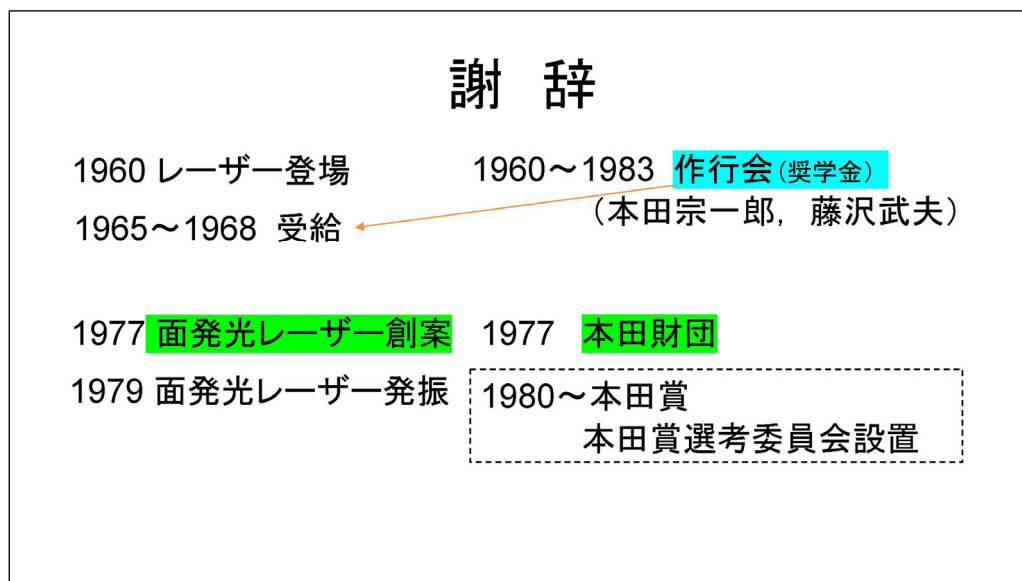


図-1

〈図-1〉先ほど倉石誠司様からご来賓祝辞の中でご紹介がありました「作行会」について、少し触れさせてください。これは大変ありがたい奨学金で、私が博士課程の学生のときに頂戴しました。金額は、当時の大学の初任給と同じくらいを毎月支給していただけるものでした。そのおかげでアルバイトをする必要もなく、本をたくさん購入し、勉強に没頭することができました。博士課程をそうした環境で過ごすことができたのは、ひとえに作行会奨学金のおかげであり、創設者である本田宗一郎さん、藤沢武夫さんに、あらためて感謝を申し上げたいと思います。

この奨学金は、実は提供者が誰であるかが伏せられており、私たちは最後まで分からないまま受給しておりました。1983 年に制度が終了し、その後この取り組みが Y-E-S へと発展したわけですが、それまで提供者の正体は明らかにされていませんでした。同じ時期に工学系の博士課程を修了した多くの人たちが、今でもこの奨学金に感謝しています。結果として、1000 人を超えるエンジニアが育った、大変意義深い奨学金であったと思います。

本田財団が発足したのは 1977 年と伺っておりますが、実は私が面発光レーザーの基本的な構想を得たのも同じ 1977 年でした。本田賞が創設されたのが 1980 年、そしてその前後で初めての面発光レーザーが実現しました。こうして時代の流れをほぼ同じくしながら研究を進めてこられたことに、深いご縁を感じております。あらためまして、石田理事長様の温かいお言葉、内田選考委員長をはじめとする選考委員の皆様に、心より御礼申し上げます。



図-2

〈図-2〉先ほど東京科学大学理事長の大竹尚登先生からもご紹介がありましたが、東京科学大学のすずかけ台キャンパスは、1975 年に開設されました。横浜市の最北部に位置しており、私は便宜上「横浜キャンパス」と呼んでいます。私が助教授になって間もない頃、大岡山キャンパスから移転し、この図に示した赤い矢印の場所に研究室を構えました。それ以来、今日こうして評価いただいた面発光レーザーの研究は、一貫してこのキャンパスで行われてきたということになります。

■ 半導体レーザーの背景

半導体レーザーの背景 1970 ~

1970: **室温連続動作**,
Bell Labs., Ioffe Inst.

1970~: **光ファイバー : 低損失化**

京都賞2001
撮影: 伊賀



伊賀 赤崎 池上 **Panish, Alferov, 林** 末松, 中村



Charles K. Kao IOOC1995

2007年度C & C賞受賞者

Group A C&C HP		
 ロバート D. マウラー博士 Dr. Robert D. Maurer (元) コーニング社 リサーチ フェロー Research Fellow, Corning Incorporated (Retired)	 ジョン B. マクチェスニー ★二 Dr. John B. MacChesney Bell Labs 研究員 フェロー Fellow, Bell Laboratories (Retired)	 伊澤 達夫 博士 Dr. Tetsuo Iwase 東京工業大学 理事・副学長 Executive Vice President for Research, Tokyo Institute of Technology

図-3

〈図-3〉半導体レーザーは、非常に小さな光源ですが、その背景を少し振り返ってみたいと思います。半導体レーザーが初めて実現したのは 1962 年ですが、当初はパルス動作に限られていました。それが 1970 年前後になって、室温で連続動作が可能になります。写真に写っているのは、右から 3 人目からの順で林厳雄博士、Alferov 博士、Panish 博士で、室温連続動作を初めて実現した研究者たちです。

また、左側に示した京都賞の受賞者に加えて、半導体レーザー分野を切り拓いてきた研究者が並んでおり、まさにレジェンドと呼ぶにふさわしい方々だと思います。

同じ頃、光ファイバーの研究も大きく進展しました。光ファイバーは髪の毛よりも細いガラスの繊維ですが、その中を光が伝わります。以前は散乱や吸収による損失が大きかったのですが、低損失で長距離伝送が可能になる見通しが立ちました。図中に示した Charles K. Kao 博士は、この可能性を理論的に示し、後にノーベル賞を受賞しています。

右上の集合写真は、IOOC という国際会議の際に撮影されたものです。私は右から 2 番目に写っています。光ファイバーの実用化については、コーニング社、ベル研究所、NTT の伊澤達夫さんらの貢献が大きく、これらの功績は C&C 賞としても顕彰されています。

■ 単一モードレーザーの必要性を提案した、恩師・末松安晴教授

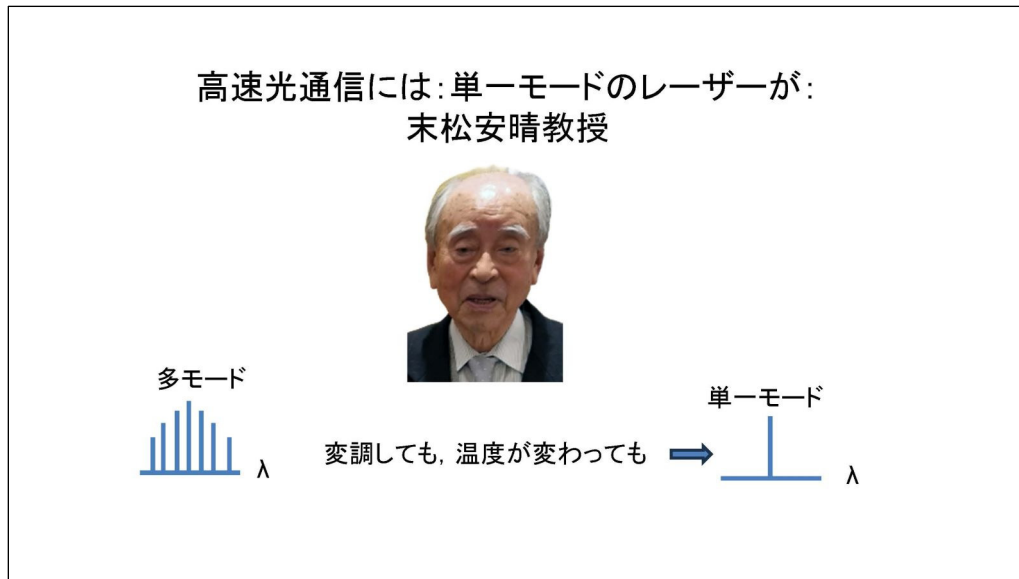


図-4

〈図-4〉当時、半導体レーザーが室温で連続動作するようになったこと自体は大きな前進でしたが、問題もありました。図の左に示したスペクトルのように、波長が一つではなく、複数の波長が同時に発振してしまうのです。これでは光通信に使う際、光ファイバー中で色ごとに伝わる速さが異なるため、信号が広がってしまいます。これを分散と呼びますが、通信品質の面で大きな障害になります。

したがって、通信に使うには、右側に示したように、発振する波長が一つであること、すなわち単一モードであることがどうしても必要になります。この点を早くから指摘され、単一モードレーザーの重要性を提案されたのが、私の恩師である末松安晴教授でした。末松先生は、この考えを提唱するだけでなく、ご自身の研究室で実際にそれを実証されました。

先ほど大竹先生のお話にもありました IEEE マイルストーンですが、末松先生は横型レーザーに関する業績で認定を受けておられます。今回、面発光レーザーと横型レーザーという、独立した二つの成果がともにマイルストーンとして認定されたことは、私にとっても大きな喜びです。研究者として歩み始めた当時、単一モードレーザーは重要であるという先生の考え方が、そのまま私自身の研究の出発点になったのは、ごく自然な流れだったと思います。

■ 1977 年 3 月 22 日、夢のあるレーザーのヒントがひらめく

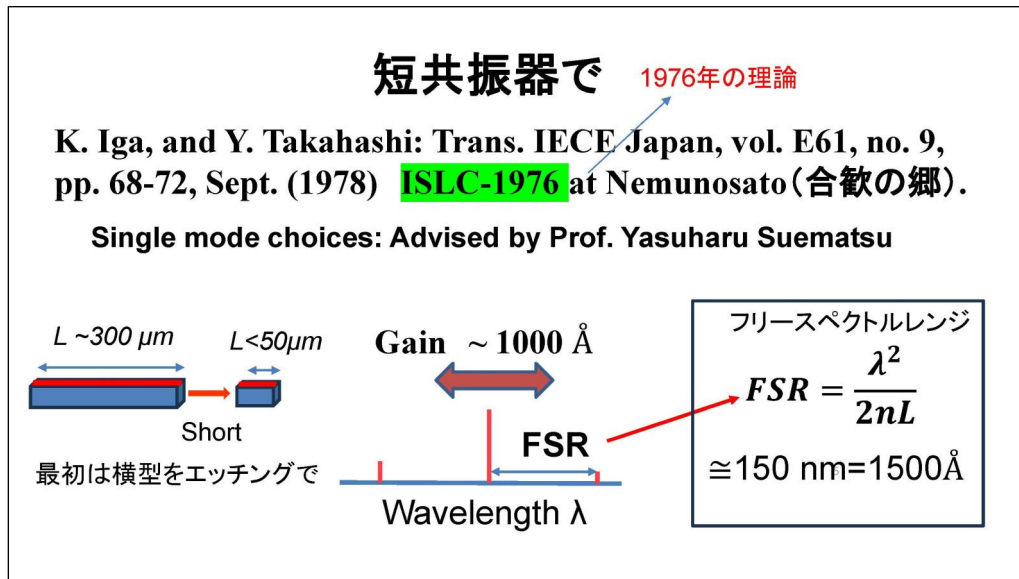


図-5

〈図-5〉少し複雑な図で恐縮ですが、ここでは共振器を短くできないかという議論を示しています。当時一般的だった横型レーザーでは、共振器の長さはおよそ 300 マイクロメートルありました。これを 50 マイクロメートル以下にできれば、単一モード動作が可能になるのではないかと。まずはそうした理論計算から始めました。

二つの鏡の間で光が往復する共振器では、長さが波長より十分に長いと、多くのモード、いわば楽器でいう倍音が同時に現れます。これを避けるには、共振器を短くすればよい。理屈としては非常に単純です。

しかし、横型レーザーの場合、結晶を割って鏡を作る必要があり、共振器を極端に短くするのは技術的に難しいという問題がありました。

Dream Laser 夢のレーザーを

- Single Mode Operation + 単一モード 
- ⊕ Monolithic Fabrication + ウエハで 
- ⊕ Wavelength reproducibility 波長再現性



短共振器だけど、もっと夢のあるレーザーを

長い熟慮の末、ある夜、ハッと！

図-6

〈図-6〉そこで考えた条件が三つあります。一つ目は、単一波長で動作すること。二つ目は、半導体レーザーであってもLSIのように、ウエハ上で一括して作れるモノリシック製造が可能なこと。そして三つ目は、波長の再現性があることです。私は助教授になる前の6年間、周波数標準の研究に携わっており、再現性の重要性を身をもって学びました。レーザーも同じでなければならなかったと考えたわけです。

この三つをすべて満たす、少し欲張った「夢のあるレーザー」を、1976年から1977年にかけて考え続けました。長い間考えたおかげか、ある夜ふっとひらめいたのです。

VCSEL: Initial Idea 1977.03.22

面発光レーザーの日

喜寿の時

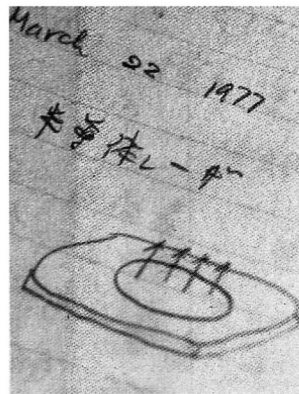


図-7

〈図-7〉それが、このスケッチです。横型では限界があるなら、縦にして、それを薄くすればよい。思いつくとすぐにノートに描きました。日付は1977年3月22日です。

ちなみに私は 77 歳、いわゆる喜寿のときに、この年を記念して自分でデザインした T シャツを作りました。家族や学会、オーケストラの仲間にも配り、着てもらいました。1977 年という年は、私にとって特別な意味を持っています。

この 3 月 22 日は「面発光レーザーの日」として記念日協会に登録されており、放送記念日と同じ日でもあります。

■ レーザーは小さなハンバーガーのようなもの

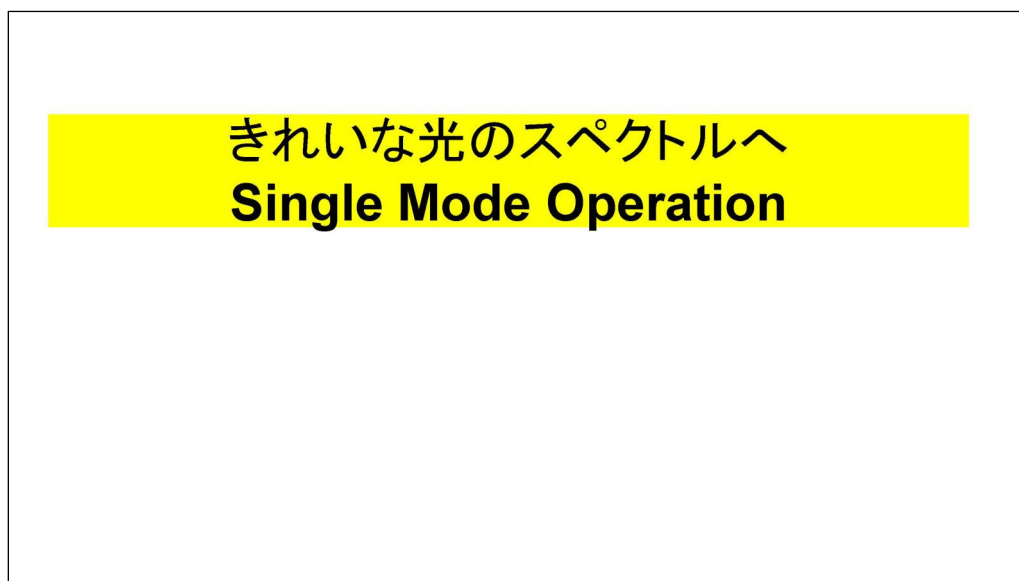


図-8

〈図-8〉ここからは、条件の一つ目、単一モードのきれいな光を作って、それをどう使うのか、という話に入っていきます。

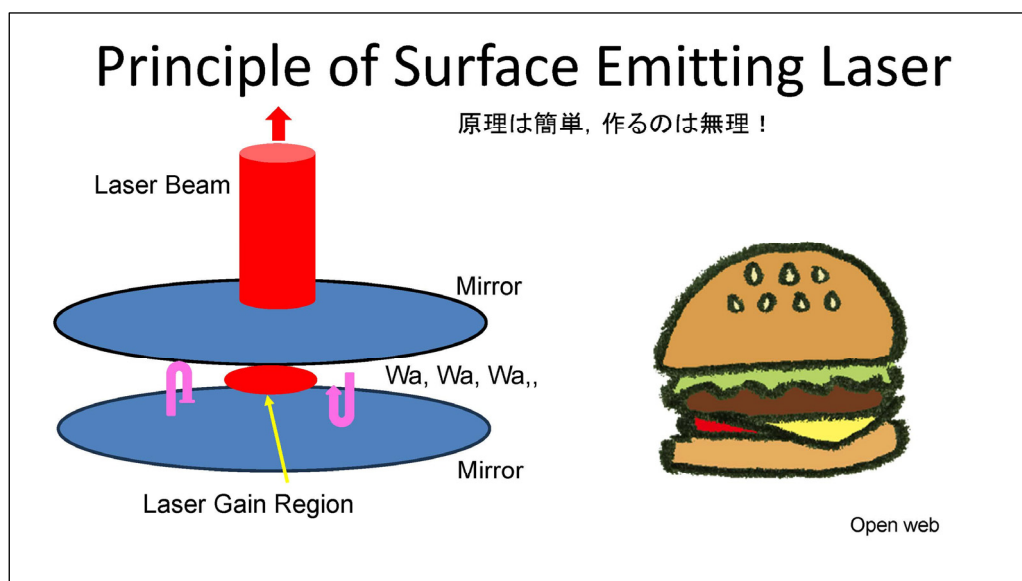


図-9

〈図-9〉面発光レーザーの原理自体は、実はそれほど難しいものではありません。図の左に

示した赤い板状の部分が、光ったり増幅したりするところで、これを活性層と呼びます。現在では量子井戸構造が使われていますが、基本的な役割は同じです。その上下に反射鏡があり、この間を光が行ったり来たりして共振します。

音でたとえると、ワーワーワーと鳴っているうちに、ある特定の音だけが強く残る、そんな感じです。光も同じで、ある条件がそろくと、特定の波長だけが強くなります。これを発振と呼びます。

発振という現象は、説明しようとする意外と難しいところがあります。中の光は増えたり減ったりしているのですが、あるところでちょうどつり合いが取れ、コヒーレント、つまり位相のそろった光が生まれます。電気の発振器も基本は同じ仕組みです。

面白いことに、「発振」という言葉は新聞や雑誌ではあまり使われません。どうしても別の言い方に置き換えられてしまうのですが、それは増幅する部分と反射する部分、二つの要素が同時に関係するため、直感的に説明しにくいからだと思います。マイクとスピーカーが近づくとピーツと音が鳴りますが、あれも一種の発振です。光でも同じことが起こっているわけです。

中学生や高校生に説明するときには、右の図のように、レーザーはハンバーガーみたいなものだ、と話します。中に具材があって、上下がパン、つまり反射鏡です。大きさにすると、だいたい10マイクロメートルくらいの、とても小さなハンバーガーです。

■ 原理が正しいか、まずはやってみる

The First Presentation, March 1978

K. Iga, T. Kambayashi, and C. Kitahara:

The 25th Spring Meeting of Applied Physics Societies 27p-C-11 (1978) 63.

GaInAsP/InP Surface Emitting Laser (I)

K. Iga, T. Kambayashi, and C. Kitahara

The demand for semiconductor lasers operating in single-mode and emitting a sharp beam is strongly recognized. For the purpose of solving this problem, we aim at the development of a surface emitting laser. As an initial stage, this study suggests a device idea as shown in Fig. 1 and presents a necessary etching technology. Also we confirmed the LED structure as a preliminary experiment for realization.

The surface emitting laser structure consists of p-electrode and etched surface of substrate as has been shown in Fig. 1 and the light is taken from the etched well. From theoretical estimation, it is led that the reflectivities r_1 and r_2 for two mirrors should be >0.97 assumed that cavity length $L=10\mu\text{m}$, active layer thickness $L_a=2\mu\text{m}$, optical loss $\alpha=10\text{cm}^{-1}$, and optical gain $g=200\text{cm}^{-1}$, respectively.

We grew the $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}_{0.5}\text{P}_{0.5}/\text{InP}$ wafer by a vertical LPE system. We formed a p-electrode of $50\mu\text{m}$ on the epi-side and etched a hole of $100\mu\text{m}$ in diam and $25\mu\text{m}$ in depth. We have used a so-called KCl etch consisting of $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}=1:2:1$ having a relatively large etching rate after a lot of trials. The etching rate is $1\text{mm}/\text{min}$ and there was no problem in the damage of photoresist OFPR. The photograph of etched surface is shown in Fig. 2 which shows a mirror surface. We observed a near field pattern under pulsed condition as shown in Fig. 3. We are going to improve the epitaxy and etched condition to realize a surface emitting laser together with the innovation of reflectors/electrode.

27p-C-11

面発光形 GaInAsP/InP レーザ (I)

東工大・精研 伊賀健一, 上越知之, 北原知之

要旨: 光電子機器等の用途に於いて高効率の低消費電力で動作するレーザーへの要求が急増している。本論文では、1μm 帯を想定する GaInAsP を用いて、この問題を解決するために、まず、面発光型半導体レーザーの構造を提案する。この構造は、活性層の両面に、不完全な化学エッチング法を用いて、一方向性で光を閉じ込める構造のダイオード素子を構成し、発光を期待した。

1. 構造: 図1に示すように、半導体基板の表面にエッチングしてエッチング面を形成し、そのエッチング面から光を放射する。このエッチング面は、長さ $L=10\mu\text{m}$ 、幅 $L_a=2\mu\text{m}$ 、光学損失 $\alpha=10\text{cm}^{-1}$ 、光学増幅率 $g=200\text{cm}^{-1}$ とする。この構造は、面発光型半導体レーザーの構造を形成し、発光を期待した。

2. 成長: 図2に示すように、GaInAsP/InP の成長は、垂直 LPE 法を用いて行われた。エピタキシャル層の厚さは $50\mu\text{m}$ とし、エッチングの深さは $25\mu\text{m}$ とした。エッチング液は、 $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}=1:2:1$ の組成で、エッチング速度は $1\text{mm}/\text{min}$ とした。エッチング後の表面は、鏡面状の光沢を呈した。

3. 近接場パターン: 図3に示すように、パルス駆動条件下で、近接場パターンを観測した。このパターンは、面発光型半導体レーザーの構造を反映した。

4. LED Symposium 1978.10



北原知之

図-10

〈図-10〉このアイデアを思いついたのが1977年で、翌1978年には、応用物理学会で初めて発表しました。細かい部分は小さくて見えにくいかもしれませんが、原理と基本構造だけを示したものです。これは、当時卒業研究で研究室に入っていた北原知之君が作ったデバイスです。

研究者としてやっていく以上、学会で発表することは避けて通れません。野球選手で言えば、試合に出るようなものです。これが、面発光レーザーにとって最初の論文になります。

Laser Oscillation 最初の発振:1979

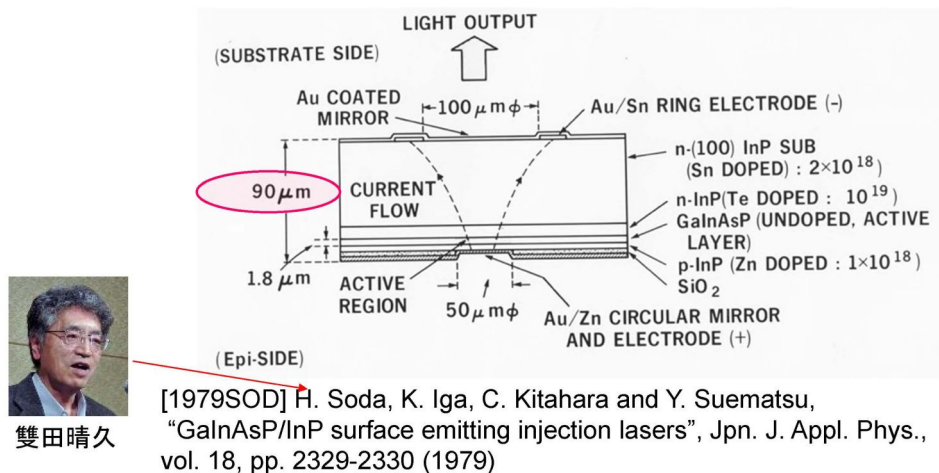


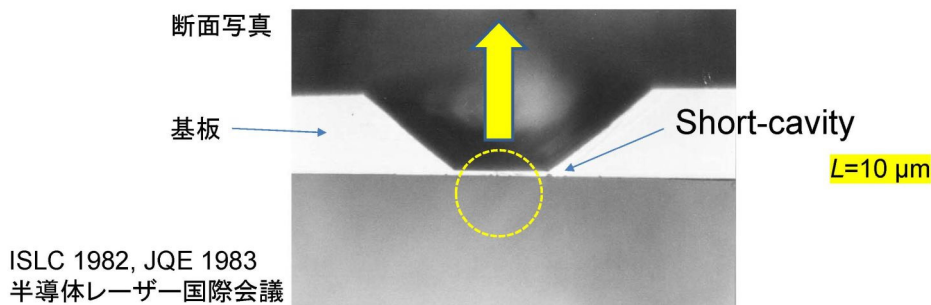
図-11

〈図-11〉翌 1979 年には、インジウム・ガリウム系の結晶を用いた面発光レーザーを作り、初めて発振を確認しました。活性層を中央に置き、その上下に金属鏡を配置し、電流を注入する構造です。これを作ったのは、博士課程の雙田晴久君でした。

この論文は、日本応用物理学会の英文誌 JJAP に掲載され、面発光レーザー関連の論文の中でも、最も多く引用されるものの一つになっています。これが、いわば原点です。

A Short Cavity VCSEL 短共振器面発光レーザー Oscillation 発振 in 1982.

Output emission 光出力



A cross section image of a short cavity VCSEL.
Thickness of the center etched portion is about 10 microns.

図-12

〈図-12〉先ほどのレーザーでは、共振器の厚さが 90 マイクロメートルあり、単一モードとしてはまだ厚すぎました。そこで 1982 年に、基板を取り除き、レーザーとして本当に必要な活性層の部分だけを残して、厚さを 10 マイクロメートルにまで薄くした構造を作りました。

これによって、きれいな単一スペクトルと、丸く鋭いビームが得られました。面発光レーザーとして、頭の中で思い描いていた姿に、かなり近づいた瞬間だったと思います。

ただし、このときは液体窒素で冷却しており、室温ではありませんでした。ですから、この段階で分かったのは、「原理は正しい」ということです。ここから先は、技術の問題になります。

大学の研究で一番大事なのは、新しいことを考えることですが、新しいというのは、ときに「珍奇」と紙一重です。最初は、本当に意味があるのかどうか分からない。やってみて初めて、原理が正しいかどうか分かる。その一線を越えるまでが、一つの大きな壁だと思っています。

■ 室温連続発振の成功、量子井戸による初めての実験、そして大量生産へ

板の上にレーザーを作りつける Monolithic Production

その前にやることがある: 室温連続発振。だが, **Mission Impossible!**

室温パルス発振
Kenichi Iga, Shin **Ishikawa**,
Shunsuke Ohkouchi, and
Takayuki Nishimura, "Room
temperature pulsed oscillation of
GaAlAs/GaAs surface emitting
injection laser," *IEEE J. Quantum
Electron.*, vol. QE-21, no. 6, pp.
663-668, 1985.



木下 進

しきい値 **6mA** のパルス発振
Kenichi Iga, Susumu **Kinoshita**, and Fumio
Koyama, "Micro-cavity GaAlAs/GaAs surface
emitting laser with $I_{th} = 6\text{mA}$," *10th Int.
Semiconductor Laser Conf. (ISLC'86)*, paper
PD-4(post-deadline), Oct. 1986. 金沢

図-13

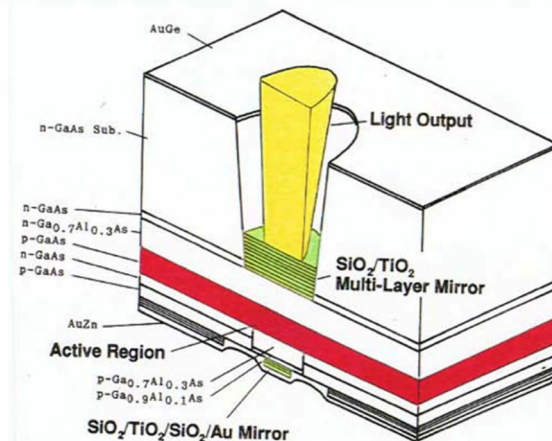
〈図-13〉次の課題は、温度を上げてもレーザーが発振するかどうかです。学生たちと一緒に試行錯誤を重ね、二つの重要な論文を経て、1985 年には、パルス動作ではありますが、室温での連続発振が実現しました。

Room Temperature CW Operation 室温連続発振1988

一步一步の毎日から



F. Koyama and K. Iga



1988 Fumio Koyama

図-14

〈図-14〉さらに 1988 年には、当時助手であった小山二三夫君（のちに教授）が中心となって、さまざまな技術を組み合わせた実験を行いました。一つは結晶成長装置です。ガスを吹き付けて結晶を成長させる、いわゆる気相成長装置が研究室で完成し、それを使用しました。

もう一つは、誘電体の多層膜反射鏡です。眼鏡のコーティングのような技術ですが、これによって高品質な反射鏡が作れるようになりました。こうした技術を結集し、小山君の実験で、初めて室温での連続動作が可能になりました。一步一步、毎日の積み重ねだったと思います。

研究室のメンバー



植之原裕行

初の量子井戸
VCSEL 1988
量子障壁1987

Just Before
Room-Temperature CW
1988.9.6



図-15

〈図-15〉これは当時の研究室のメンバーです。この中に植之原裕行君がいます。彼は現在教授ですが、面発光レーザーで初めて量子井戸構造を用いた実験を行いました。非常に薄い層の中に電子を閉じ込めるという考え方です。

さらにこの研究を発展させ、電子を反射させる「量子障壁」という概念も提案しました。ノーベル賞で知られる量子トンネル効果の、いわば逆の発想です。このアイデアは、紫外LEDなどにも応用されており、面発光レーザーの高出力化にも役立つ可能性があります。アメリカ特許も取得しました。



図－16

〈図－16〉続いて、条件の二つ目である「ウエハ上で一括して作れるモノリシック構造」について触れます。先ほどお見せしたウエハですが、直径 15 センチのガリウムヒ素結晶です。2021 年に執筆した本の中で触れていますが、当時でも年間 1 万枚ほどが生産されていました。1 日に 30 枚という計算です。

この 1 枚の中に、およそ 100 万個の面発光レーザーが入っています。図中の点はマーカで、レーザーそのものではありませんが、それだけの数が一度に作れるわけです。現在では 6 インチから 8 インチへと大型化し、さらに大量生産が進んでいます。



図－17

〈図－17〉これは、当時東芝で赤色の面発光レーザーを開発されていた波多腰玄一さんのグループが撮影した写真で、ビームの様子が非常に分かりやすく写っています。まさに、イメージ通りの光だと思います。

■ 常に同じ波長を作り出すというミッションへの挑戦

いつも同じ波長の Wavelength Reproducibility

That's impossible from the engineering point of view.

図－18

〈図－18〉そして、三つ目の条件、いつも同じ波長ができるかどうかという話です。英語で書いてありますが、「That's impossible from the engineering point of view.」——工学的な見地から見ると、同じものを作るのは不可能だ、というわけです。

自動車はどうかというと、一見同じように見えますが、やはり少しずつ違いますよね。ですから、まったく同じものはできない。それに挑戦する、そこにエンジニアリングがあるわけです。



図－19

〈図－19〉私が主宰している室内合奏団の演奏です（講演では演奏音を）。この写真で、私は一番右でコントラバスを弾いています。なぜこの写真をお見せするかというと、オーケストラでは、いろいろな楽器が集まってハーモニーを作るわけですが、その基音が合っていなければいけない。その基音を合わせることをチューニングと言います。

To Make a Harmony ハーモニーを作るには



Contrabass

Everybody should have the same tone.

It's **Tuning** ! 同じ基音に調音

A= 442 Hz



図-20

〈図-20〉実際には、こんなふうにチューナーを使って各楽器が基準の音に合わせます。最近は442Hzが多いですね。アナログのラジオの時報は440Hzですが、こうやって基準を決めて合わせるわけです。そして、オーケストラ全体でもチューニングをします（講演ではAの音を）。

Tunable Surface Emitting Laser 波長掃引面発光レーザー

Mechanical !!
機械式に !!

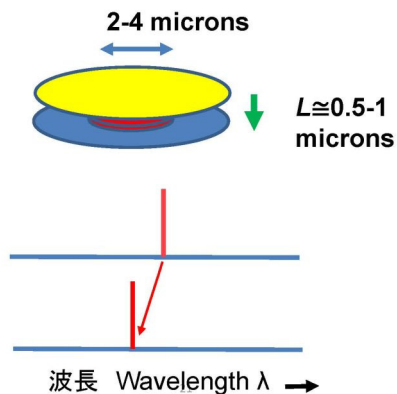


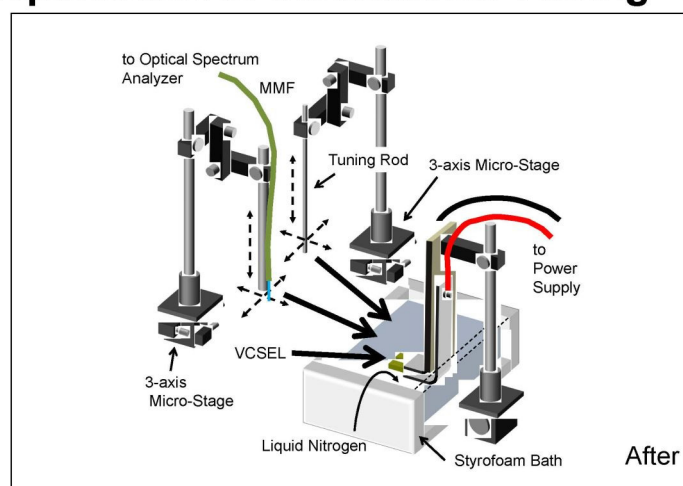
図-21

〈図-21〉ですから、電子機器でもチューニングが必要になります。例えば水晶振動子。スマートフォンやパソコンの中に入っていますが、あれも全部調整している。調整が必須なものなんです。

では、面発光レーザーの場合はどうするのか。詳しい話は時間の関係でできませんが、原理としては鏡を少し動かせば共振波長が変わるのではないかと、という発想です。これを機械的にやろうとしました。

実験

Experiment of Mechanical Tuning (1992)

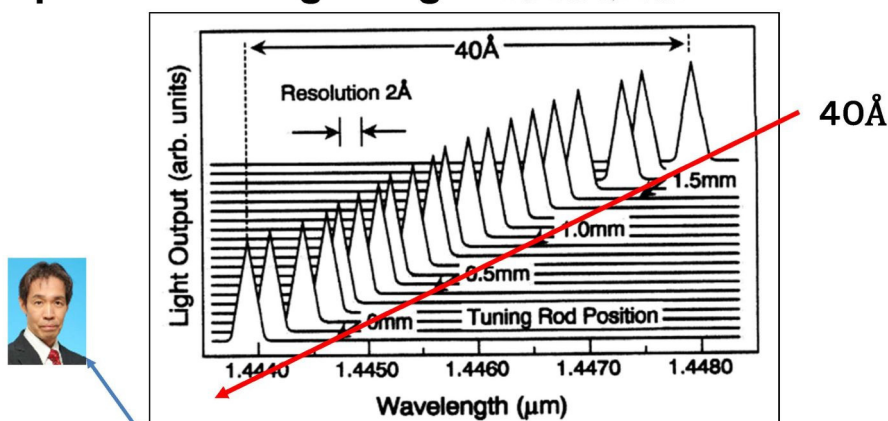


After N. Yokouchi

図-22

〈図-22〉面発光レーザーのエンジンで、片側に鏡のない構造のものを液化窒素につけて、上から外部鏡を下ろし、マイクロステージでわずかに動かす。こういう実験を行いました。これは横内則之君が博士課程の学生のときにやった実験です。

Spectral Tuning Range 可変波長幅 : 1992



N. Yokouchi, T. Miyamoto, T. Uchida, Y. Inaba, F. Koyama, and K. Iga:
IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 7, pp. 701-703, Jul. 1992.

図-23

〈図-23〉贈呈式が始まる前の受賞者紹介のビデオにも出てきましたが、この実験で波長を連続的に変えられることが分かりました。このチームでは横内君が実験を担当し、現在教授になっている宮本智之君も同じチームで、化学ビーム成長装置で結晶成長を受け持っていました。

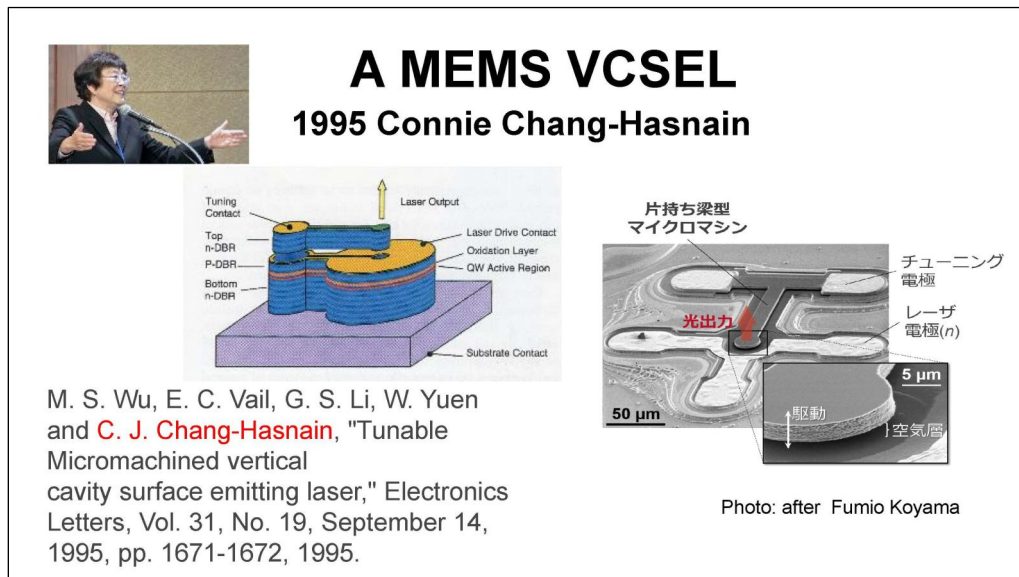


図-24

〈図-24〉先ほどの話は1992年ですが、その後1995年になると、カリフォルニア大学バークレー校のコニー・チャン＝ハスナイン(Connie Chang-Hasnain)教授が、MEMSを使うという方向に進めました。MEMSはマイクロ・エレクトロ・メカニカル・システム、つまり微小機械です。

これは手作りではなく、LSIのように一括して作ることができる。その結果、カンチレバーの間隔を変えて連続的に動かすことが可能になりました。右の写真は東京科学大学の小山二三夫教授の研究室のデバイスですが、MEMSの導入によってデバイスとしての連続的な波長可変が実現しました。

■ 夢のレーザーはできたか

夢のレーザーはできたか？

- **Single Mode Operation +**
- **Monolithic Fabrication +**
- **Wavelength Reproducibility**

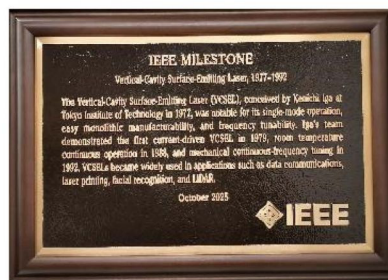
Maybe yes.

図-25

〈図-25〉では、夢のレーザーはできたのか。単一モードは何とか実現できた。モノリシックな製造もできるようになった。さらに、チューニングによって再現性も確保できた。

そう考えると、答えはイエスだろう、ということになります。

VCSEL IEEE Milestone Monument 石碑に



Kenichi Iga, Stone Monument
At Yokohama Campus
Institute of Science Tokyo

図-26

〈図-26〉先ほど、大竹尚登先生のご来賓祝辞の中でもご紹介がありましたが、IEEE マイルストーンを頂戴しました。授賞式は3週間前、10月28日に行われました。これは大学として頂いたもので、横浜キャンパスにモニュメントとして設置されています。右は古賀逸策先生の水晶振動子のマイルストーン、左は大隅良典先生のノーベル賞のモニュメントです。その中央に VCSEL の石碑を入れていただいています。キャンパスに入る小道の左側にありますので、ぜひご覧ください。

■ 面発光レーザーの進化

その後、どのように進んだのか？
Evolution to Industrialization

図-27

〈図-27〉その後、どのように発展してきたかを、ざっと見ていきます。

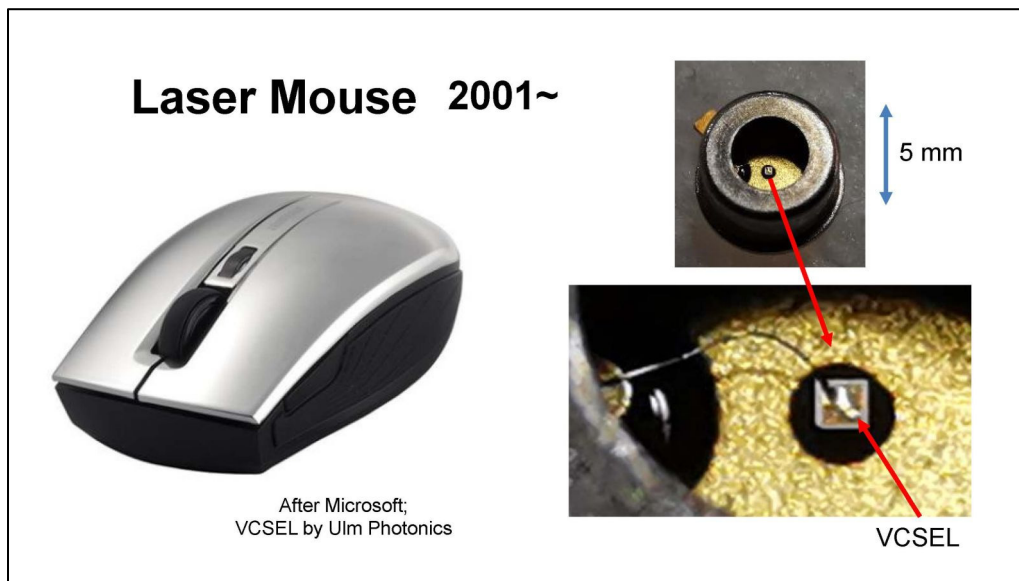


図-28

〈図-28〉 まずマウスです。実際には直径 5mm ほどのキャンの中に非常に小さな四角いチップが入っていて、その中のさらに小さなレーザー一部から光が出て、位置を検出しています。

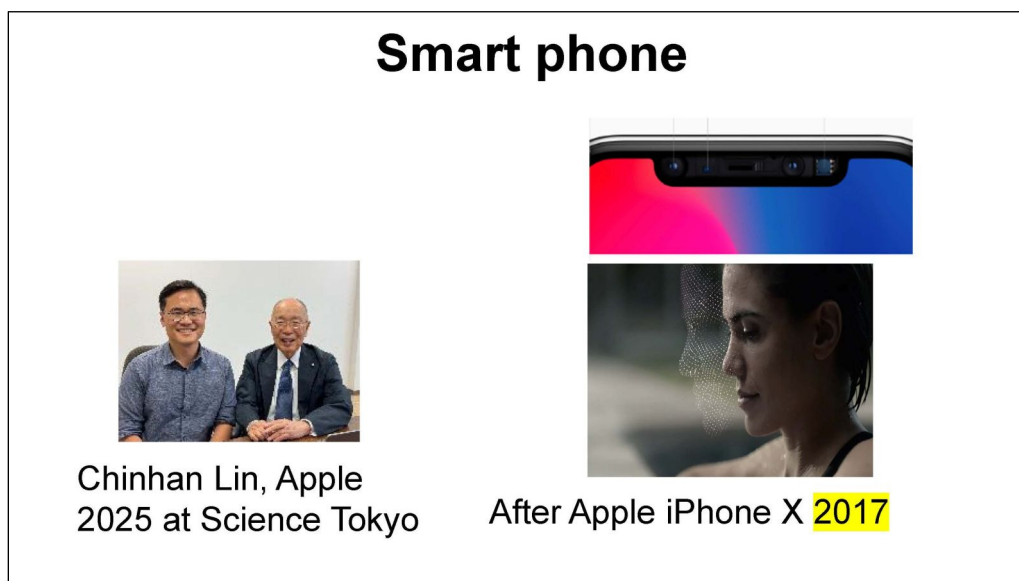
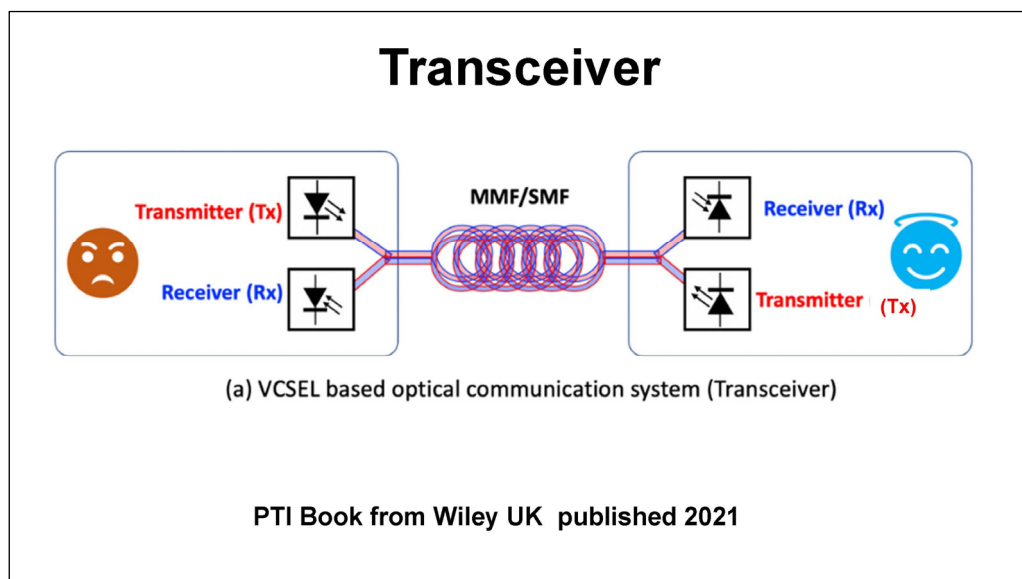


図-29

〈図-29〉 こちらはスマートフォン、iPhone X です。2017 年に発売されました。左の Chin Han Lin さんは Apple の技術者で、最初からこの 3 次元顔認証を開発して実用化した方です。今年（2025 年）、「面発光レーザーのご本尊に会いたい」と言って訪ねてきてくれました。



図－30

〈図－30〉データセンターでは光ファイバーがデータのやり取りに大量に使われています。送信機からデータがファイバーを通して受信機に届き、別の経路でまた送り返される。送信機と受信機が一体になったものをトランシーバーと呼びますが、これが一対になって双方向通信が行われます。その端に使われているのが面発光レーザーです。

VCSEL Transceiver 50m 400GBASE

ホーム / 光でシユール / InfiniBandネットワーク / 400G QSFP/QSFP12 ID / SKU:200963



最大消費電力 8.5W

西山伸彦君による

タップまたはクリックで画像を拡大する

**NVIDIA/Mellanox MMA4Z00-NS400互換
400GBASE-SR4 QSFPフラットトップ InfiniBand
NDR光トランシーバーモジュール(PAM4 850nm
50m DOM MPO-12/APC MMF ConnectX-7 HCA
用)** Hot

PN:40SFP-SR4-400G-F1 SKU:200963

110,785円

100,714円 (消費税込)

6.6K 販売数 | 10 レビュー | 30 Q&A

Transceiver Models:

- MMA4Z00-NS400 | 400G SR4
- MMS4X0C-NS400 | 400G DR4
- MMA3Z00-NS40C | 400G SR4
- MMS3X0C-NS400 | 400G DR4
- QSFP117-FR4 400G | 400G FR4
- QSFP117-XDR4 400G | 400G XDR4

Compatible Brands:

NVIDIA InfiniBand (1.6T)

NVIDIA InfiniBand (400G)

NVIDIA InfiniBand (800G)

NVIDIA InfiniBand (200G)

図－31

〈図－31〉商品としては、だいたい歯ブラシの箱くらいの大きさでしょうか。黒い部分に光ファイバーが繋がります。これは 400 ギガ相当で 50 メートル対応のトランシーバーで、価格は 11 万円ほど。現在、実際に販売されています。

■ 面発光レーザーとトランシーバー

VCSEL Transceivers



Chuck Mattera, Retired CEO of Coherent Corp.
2024.10.17 At Science Tokyo

Chuck Mattera
スペインにおける講演より

「1977年、日本の伊賀はクロマーのヘテロ構造を組み込んだ新しい構造を発明し、さらに進化させました。

その後、私の同僚であるジュリー・エングがVCSELトランシーバーを開発し、データセンターの光配線に投入しました。」

図－32

〈図－32〉 トランシーバーの歴史を振り返ってみます。チャック・マテッラ (Chuck Mattera) さんという、コヒーレント社の元 CEO がいます。昨年リタイアして、「ご本尊と話をしたい」と、それだけの目的で伊賀のところを訪ねてきました。

彼のスペインでの講演が公開されていますが、その中で、1977 年に伊賀が発明し、その後、彼の弟子筋にあたるジュリー・エングさんがトランシーバーを開発し、データセンターに納めるようになった、という経緯が語られています。

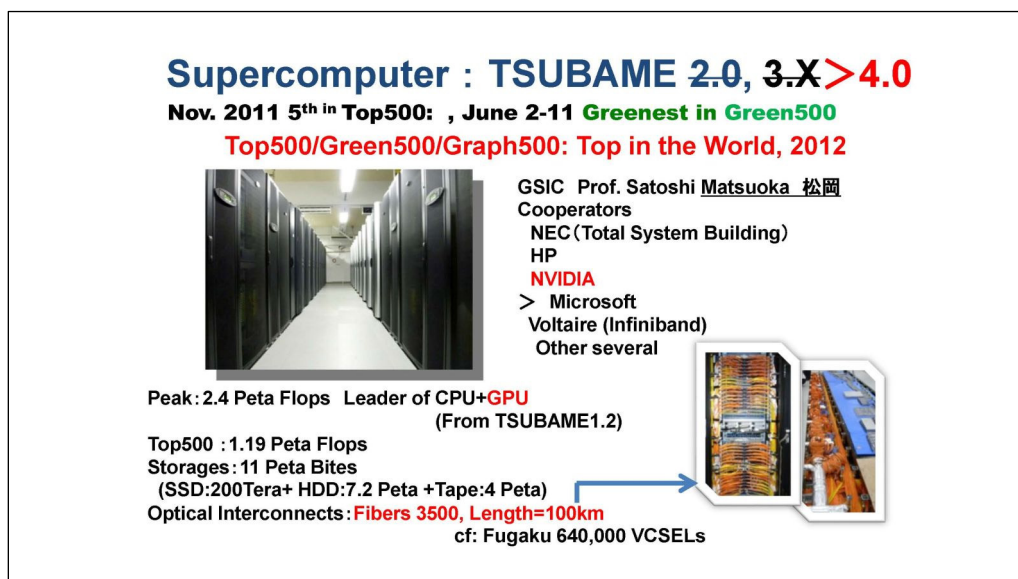
Data Center/Transceiver



After Jim Tatum, PTI : "VCSEL Industry", Wiley 2021 to be published, 2021
taken from www.redditt.com.

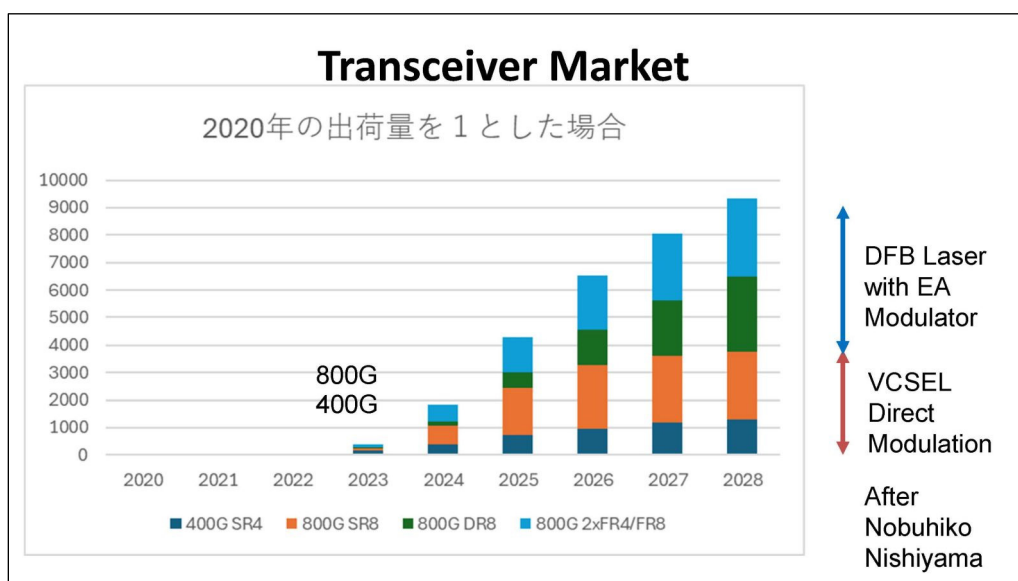
図－33

〈図－33〉 これはデータセンターの内部で、天井一面に光ファイバーが張り巡らされている様子です。



図－34

〈図－34〉 こちらは東京科学大学、旧東工大のスーパーコンピューター「つばめ」です。私が学長のときは Ver 2.0 か 2.1 でしたが、現在はさらに進化して 3.X になっています。やはり光ファイバーと面発光レーザーが大量に使われています。



図－35

〈図－35〉 トランシーバーの市場を見ると、2020 年以降、特に 2023 年頃から伸びています。下の二つの色のついた棒グラフは面発光レーザーの直接変調方式によるもので、電流で直接デジタル光信号を作る方式です。一方で、上の 2 つは DFB 型レーザーを使った高速・長距離の方式で、両者が並行して発展しています。

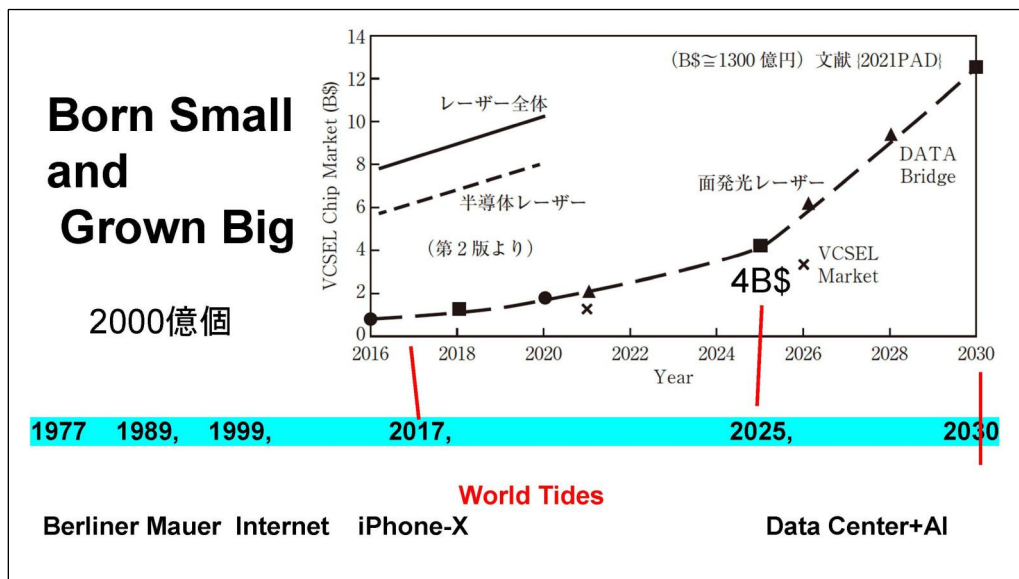


図-36

〈図-36〉面発光レーザーのチップ1個あたりの市場規模は、2025年予測で40億ドル。これまでに作られた数は、推定で約2000億個だそうです。とにかく、非常に多く使われているということです。

■ 次世代自動車にも面発光レーザーが使われている

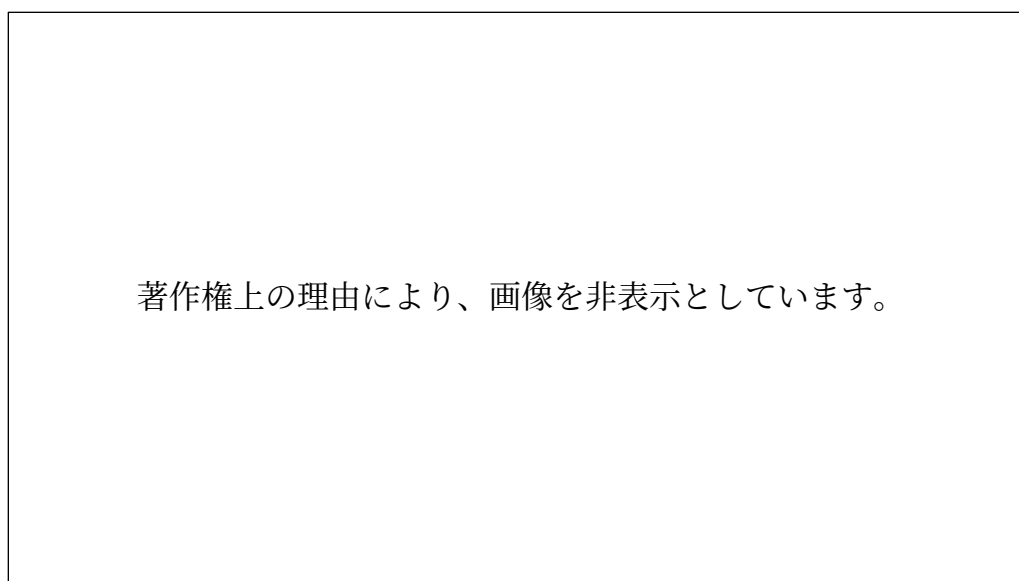


図-37

〈図-37〉自動運転にはLiDARが必要です。カメラやマイクロ波レーダーに加えて、光のLiDARが重要になります。これはアメリカの自動運転車のモデルです。

著作権上の理由により、画像を非表示としています。

図－38

〈図－38〉 こちらはホンダ・レジェンドの第5世代。世界で初めて自動運転レベル3を達成した市販車です。YouTube の試乗記もありまして、私自身も1時間半ほど視聴しました。ずっと自動運転で走っている感覚ですね。

ただし、この車は非常に高い。本田賞の賞金では買えません（笑）。

カーネットワーク: 車載通信規格

IEEE802.3cz 25・50G 石英多モード VCSEL 980 nm 40m

信号	電気	光			
規格名	25/50G BASE-T1 IEEE802.3ch (Multi-Gig) 2020年	25G BASE-T1 IEEE802.3cy (B10G) 2023年	100G BASE-RH-c IEEE802.3bv (GEPOF) 2016年	10G BASE-RH-c IEEE802.3dh (審議中) 2026年目標	25/50G BASE-AU IEEE802.3cz (OMEGA) 2023年
伝送速度	2.5/5/10 Gbit/s	25 Gbit/s	1,000 Mbit/s	2.5/5/10/25 Gbit/s	2.5/5/10/25/50 Gbit/s
物理メディア	メタル2線式 STP: シールドより線	メタル2線式 STP: シールドより線	STP: シールドより線 (A4a: SE80) 光源 LED 波長 650 nm	GI-POF 光源 VCSEL 波長 850 nm (審議中)	石英 MMF (OM3, GI-50) 光源 VCSEL 波長 980 nm
構成	1対1	1対1	1対1	1対1	1対1
伝送距離	15 m 中継数 4	11 m	40 m 中継なし 15 m 中継数 4	15 m 中継数 3 (2.5-10 Gbit/s) 中継数 2 (25 Gbit/s)	40 m 中継数 4 (2.5-25 Gbit/s) 中継数 2 (50 Gbit/s)
変調方式	PAM4	PAM4	PAM16	NRZ	NRZ (2.5-25 Gbit/s) PAM4 (50 Gbit/s)
エラー訂正	RS-FEC	RS-FEC	RS-FEC	未定	RS-FEC

小池康博
GI-POF
VCSEL 850nm

高橋亮, 岩瀬正幸,
津田裕之: 電子情報
通信学会誌, Vol.
107, No.2, p.127,
2024

図－39

〈図－39〉 カーネットワークでは、車内のデータ量がオフィス並みになっています。IEEE802 の標準では、波長 980 ナノメートルの面発光レーザーと石英ファイバーを使った 40 メートル通信が定義されています。

もう一つは、波長 850 ナノメートルの面発光レーザーとプラスチック光ファイバー。これは慶應大学・小池康博教授の世界的な普及活動によって、短距離通信で活躍するようになりました。自動車用として標準化の審議中です。

■ 身近なところのエコテクノロジー

身近なところの エコテクノロジー

Eco-Technology around us.

図－40

〈図－40〉最後に、身近なエコテクノロジーを少し紹介します。

東京科学大学エコテクノロジー：グリーンヒルズ



2016.7.11 Photo by Kenichi Iga

図－41

〈図－41〉先ほど東京科学大学の大竹尚登理事長の話にありました東京科学大学・大岡山キャンパス。緑の部分がグラウンドです。私が学長のとき人工芝にして、野球部、サッカー部、アメフト部の諸君からすごく喜ばれました。近隣の住宅の皆さんにも感謝されました。それは砂埃が立たなくなったためです。これ2億円かけたんですけど、役に立ちましたね。

写真にあるようにちょうど大井町線の電車が走っておりますが、その向こうにありますのが、いわゆるガンダムビルと呼ばれる、私はグリーンヒルズと呼んでおります。というのは、この左に駅がありまして、その駅の名前が緑が丘。なので、グリーンヒルズ。この呼び名、ちょうど

いいですね。環境対応のビルなんです。この壁は太陽電池。50cm 角くらいの標準太陽電池が4000枚張ってあります。

屋上に2台の燃料電池がありまして、それから地下水温14度、これを熱交換で使うので、冷暖房を全部それで賄う。ちょうど私が学長のときにエコビルのモデルとして建設したビルでございます。

■ 面発光レーザーの将来

面発光レーザー：力を発揮するのはこれから

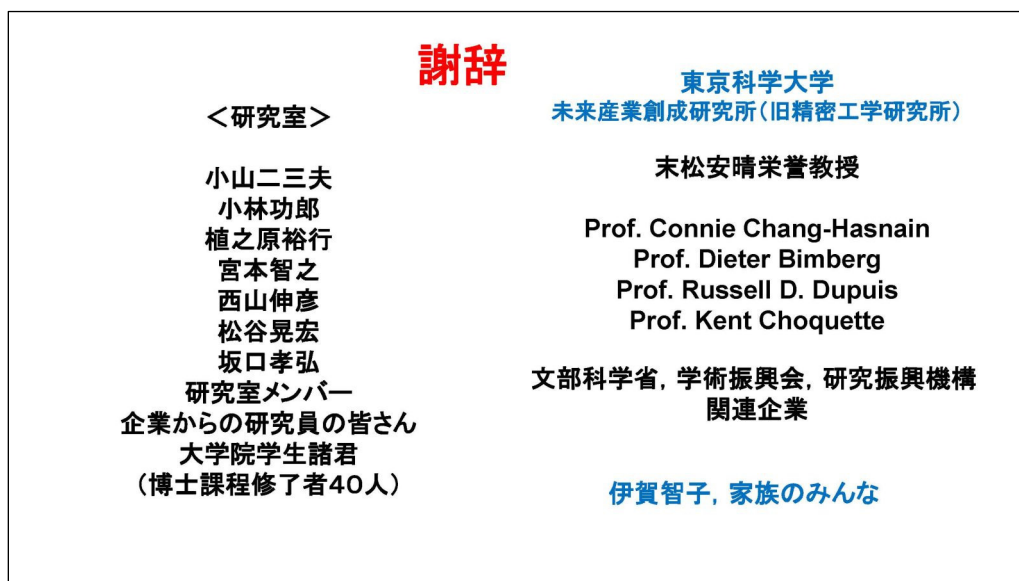
- ・新しい材料：有機物，酸化物（ CaTiO_3 など）
- ・2次元アレイによる高出力化
- ・位相制御アレイによる光ビーム走査
- ・極微小電力のRGB
- ・エコ・超高速・大容量の光接続（電子部品の排除）
- ・世の中のシステム：微小光学導入によるエコ化
（自動車，ロボット，微小ディスプレイ，医療，農業，安全センシング，
AIデータセンター，光量子工学，Beyond AI，など）

図－42

〈図－42〉面発光レーザーが本当に力を発揮するのは、これからだと思います。現在はガリウムやインジウムといった希少金属を使っていますが、将来的には有機物や酸化物材料も候補になります。

また、ウエハ全体をレーザーとして使えば、大出力の加工用光源になる可能性もあります。位相制御によるビーム操作や、AR用の微小RGB光源、超低消費電力の光接続など、課題は多いですが、可能性も大きい。

そのためにはレーザーだけでなく、周辺を支える微小光学が重要になります。自動車、ロボット、医療、農業、AIデータセンター、光量子工学——そうした分野で役立っていくのではないかと思います。



図－43

〈図－43〉最後に、これまで支えてくださった多くの方々に謝辞を申し上げます。本日はご清聴、ありがとうございました。

■このレポートは、2025 年 11 月 17 日、帝国ホテル東京において行なわれた、第 46 回本田賞贈呈式記念講演の要旨をまとめたものです。本資料は本田財団のホームページでご覧いただけます。本田財団の書面による承諾なしに、私的使用の目的以外で使用することはできません。



発 行 日 2026 年 3 月

発 行 所 公益財団法人 本田財団

104-0028 東京都中央区八重洲 2-1-1 YANMAR TOKYO 6 階

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

www.hondafoundation.jp

発行責任者 角 田 正 樹

©公益財団法人本田財団 2026 本書を無断で複写・複製することを禁じます。