

いが けんいち

伊賀健一

(日本学術振興会理事、東京工業大学名誉教授)

横のものを縦に - 常識をくつがえした面発光レーザーの着想と実現への道 -



半導体表面から垂直に光を発する面発光レーザーのアイデアを生み出し、実用化まで育て上げる。極めて小さな消費電力で動作し、高速動作、長寿命、シンプルな製作工程による2次元アレイ構造を特徴とする。高速データ通信のキーデバイスなどに実用化されている。

ラジオ少年からレーザー研究へ¹

伊賀は、子どもの頃から工作が好きで、いわゆる「ラジオ少年」だった。最初は鉱石ラジオ、その後、真空管ラジオを自分で組み立てて、音楽番組を熱心に聞いたが、その頃のスピーカーでは期待したほど低音の迫力が出なかった。受験生向けのラジオ講座も自作の受信機で聴いた。蔵の中には祖父が買い集めた電気部品がたくさんあったので、これを利用した。

広島大学附属高校に進学し、理科系の学科が得意だったので、東京工業大学に入りたいと考えて、数学と物理を必死に勉強した。英語はすでに中学時代に大学入試の文法書をマスターしていたから、その頃配点の比重が高かった東京工業大学の入試では役に立った。入学してみると、勉強の他にもいろいろ興味が広がって無線研究部というサークルに入ったり、サッカー部に入ったりした。広島の高校はサッカーが強く、東洋工業の選手になった者もいるくらいであったのが影響している。しかし、眼鏡をかけていたので、ボールが当たって眼を悪くすると医者に言われ、サッカー部は途中で辞め、子どもの頃聞いた音楽をやるうと考えて、オーケストラに入り、コントラバスを始めた。コントラバスはその後ずっと続けて、専門家の教えも受け、地元の市民オーケストラである町田フィルハーモニー交響楽団の団員として活躍している。

2年生から電気コースに進み、超短波通信などで有名な森田清教授の在職最後の年に

¹東京工大クロニクル No. 353 Mar. (2001) 6.

電磁気学を教わった。しかし、午後の最初の時間帯だったので眠くなり、一番前の席で寝てしまい、ひどく怒られたことがある。オーケストラばかりやっていて成績も悪くギリギリで合格した。

4年の時に、後に学長を務めた末松安晴助教授の研究室に卒業研究生として入り、レーザを中心とする光・量子エレクトロニクスの勉強を始めた。これが、その後 40 年近く続いたわけである。卒業研究生であった 1962 年秋には、田中郁三教授(元学長)から譲り受けたルビー結晶を加工してレーザ発振に成功した。これは、東工大における最初のレーザ発振だという。

このときもらったルビー結晶は、銀座の宝石店で円柱状にカットし、端面を平面に研磨してもらって反射膜を蒸着した。筐体などは大学の機械工場で作ったが、子供の頃からのラジオ製作で慣れていたので電源作りは簡単だった。連日夜遅くまで実験を続けて、ピカッと光ったときは感激だった。この「感激」が大事で、学生にもこの点を強調しているという。

しかし、このときの発振はいわゆる多モード発振で、ビーム形状もきれいではなかった。単一モード化には苦労したが、末松助教授の助言で反射鏡の反射膜の一部を宝石店ではがしてもらって小さくしたところ、うまくいき、丸いビームで規則的な発振が得られた。この結果は、国内の発表会で発表した後、IEEE のプロシーディングに載った。当時は外国の論文誌に載るのはまれだったので大いに勇気づけられた。

大学院時代から一貫して光関連の研究

ルビーレーザの研究は修士のときにも続け、安定共振のために、一方の反射鏡を凹面鏡にすることにした。このときは残りのルビー結晶を内側から見て凹面に研磨するように発注したのだが、どういうわけか凸面のものが出来てきた。研磨し直すまえに、とにかく試してみたところ、発振は一度だけで止まってしまったが、きれいなモードで規則的な発振が得られた。

理論的な考察を試みたが、解析が難しく、途中結果だけを電子情報通信学会で発表した。ところが、その少し後で、スタンフォード大学のシーグマン教授が不安定共振器として発表し、固体レーザの高出力化に有効であることを示した。伊賀は、計算機の当時の能力とものごとを一般化する力の弱さを痛感したという。その後、ルビーレーザは企業化のレベルになり、博士課程ではテーマを変えることになった。光ファイバ伝送の理論と実験というものだった。

修士の間に理論的な勉強の足りなさを痛感していたので、末松助教授から薦められた電磁気学の古典である J. A. ストラットンの「電磁気学」を博士課程の 3 年間かけてじっくり読んだ。600 ページ以上もある大部だが、式の導出などもきちんと追いかけて、自分のものにした。この本と L. I. シッフの「量子力学」は後々まで理論的基礎として役に立ったし、自信にもなった。

大学院を終えた後、精密工学研究所福与人八教授研究室の助手として採用され、ルビジウム原子周波数標準の研究およびガスレーザの周波数安定化の研究を始めた。東工大オーケストラの大先輩である中田孝名誉教授の本拠である精密工学研究所に赴任できたのはまことに光栄であったと伊賀は述懐している。1974年に超音波工学部門の助教授に採用され、分布屈折率ファイバによる通信・画像伝送と半導体レーザの研究を始めた。前者は後に平板マイクロレンズの発明から並列微小光学分野へとつながった。伊賀自身も「思いがけない結びつき」と述べている。

後者の半導体レーザについては、伊賀が卒業研究を行ったときの指導教官であった末松安晴教授やKDD研究所と共同して、InP基板上にGaInAsPを結晶成長させて、世界のトップを切ってシリカファイバの低損失波長に対応する長波長レーザを実現した。

夢うつつで思いついた面発光レーザのアイデア

半導体レーザに関しては、さらに結晶成長の改良とデバイス構造の最適化を進めたが、伊賀はそれまでの反射鏡として結晶の劈開面を使うやり方に不満を感じていた。劈開面を使うと反射面は非常に平坦でよいのだが、半導体基板に多数のレーザチップを形成した後、チップに切断して組み立てた後でないと良品かどうかテストができなかった。チップを一つ一つ手作業で劈開していたため、良品率は非常に低く、コストが高かった。また、チップに切断した後でないと特性を測定できないので、一層無駄が多くなる。劈開面を使わない構造も提案されていたが、やはり組み立てないと発振の良否は判断できなかった。そこで、それまでの構造とは異なる劈開を使わない半導体レーザを目指した。何か新しい構造は無いかと四六時中考えていて、とうとう1977年の3月に面発光レーザの発想に至った。夜中、夢うつつの中でアイデアを思いついたという。伊賀はこのアイデアをいつも枕元に置いていたノートに書き留めた。図1の構造である²。

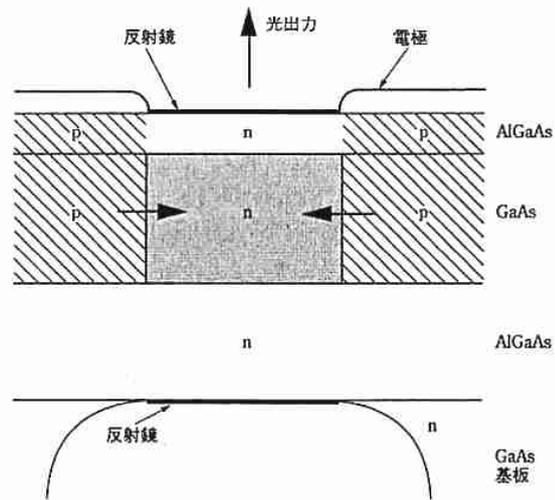
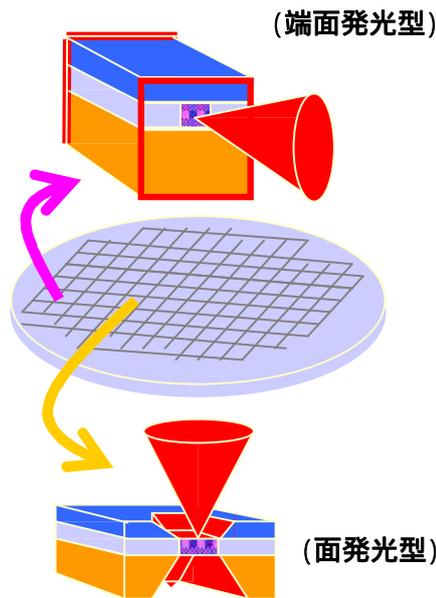


図1 面発光レーザの基本概念(研究ノートに描かれたアイデア)

² 伊賀健一、電子情報通信学会誌、Vol. 84(2001)462-466.

図1の半導体レーザーは、3層構造の上層からプラスの電気を持った正孔を供給し、下層からマイナスの電気を持った電子を供給して、中間の活性層で両者が会すると光が生じる。通常の端面発光レーザーでは、図2の上のように、活性層の端面を反射鏡として用いるのだが、これを、いわば、ヨコの



端面発光レーザーの特徴

- ・基板端面から発光
- ・楕円形のビーム形状
- ・基板の劈開が必要
- ・二次元アレイ化に難点

面発光レーザーの特徴

- ・基板表面から発光
- ・円形のビーム形状
- ・低動作電力
- ・ウェハーレベルで検査可能

図2 端面発光型と面発光型

ものをタテにして、反射鏡を上下に配置して表面から発光するアイデアに到達したわけである。

半導体基板上で特性をチェックできれば、その後の工程は良好なチップだけ行うことができ無駄が無く、コストを低くできる。しかも、難しい手作業の劈開を使わないから、その点でも無駄が出ない。ただ、半導体材料で高い反射率を示す界面を作ることは非常に難しいだろうと思われた。

翌 1978 年春の学会で基本的なアイデアを発表³したが、「アイデアはおもしろいが、実用的とは思えない」と反応は否定的だった。活性層に GaInAsP を用いた素子を試作した結果も報告したが、発光するだけで光の位相が揃ったレーザー発振を起こさせるまでには至らなかった。端面発光型に比べて活性層の容積が小さく、すなわち、レーザー発振に寄与する領域が小さ過ぎて光を増幅する効果が少なく、発振に必要なだけのエネルギーが供給されないためではないかと思われた。

伊賀は、学会発表での反応が良くなかったことから、実用化レベルの面発光型が可能かどうかの理論的な追求とともに、何とかして実際にレーザー発振するものを作ってみせなくては面発光型の良さをアピールできないと考えた。

レーザー発振できるようにするには、高品質の結晶成長が必要だった。大学院修士課程の雙田晴久が手作りの装置を使い、徹夜も厭わずがんばって実験を繰り返し、1979 年には、基

³ 伊賀健一、上林利生、北原知之、第 25 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、27p-C-11(1978)63.

板表面に形成した金属膜を反射鏡として用いる構造のものを試作するまでに漕ぎ着けた⁴。

さっそく特性を測定してみたところ、液体窒素温度(-196℃)に冷却した状態でパルス発振した。発振開始に必要なしきい値電流が大きく、スペクトルもやっと測定できたものではあったが、レーザ発振をようやく確認し、面発光レーザ(Surface Emitting Laser)と命名した。名付け親は末松安晴教授である。

このときの構造は、図3に示すようなもので、レーザ発振に寄与する領域が小さいという問題をカバーするために反射率の高い反射ミラーが必要と考え、金属膜による

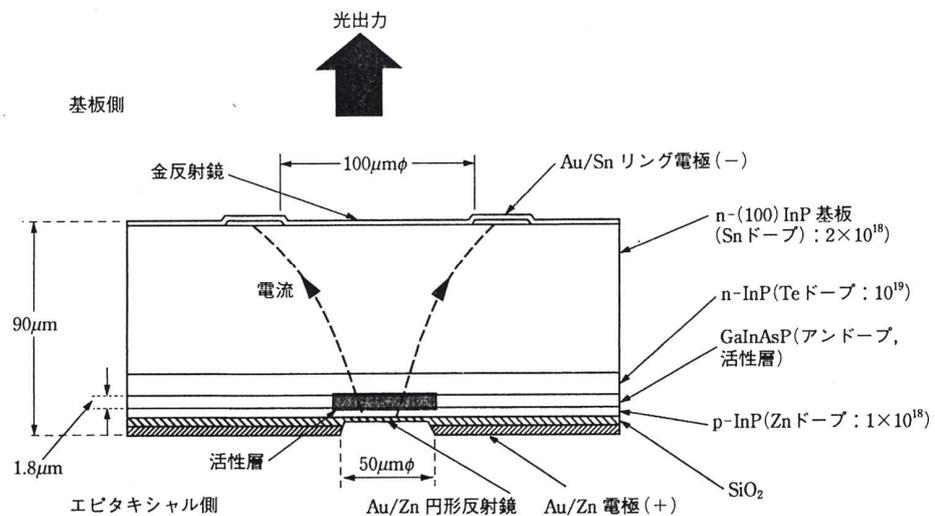


図3 最初の面発光レーザ

反射ミラーを用いる構造にした。負電極側に数十μmの厚さの金電極を設けて反射率を高かったのである。この金電極が無い場合にも発振はしたが、パルスで1アンペア位の電流が必要であった。また、発振したとはいえ、どうにか発振スペクトルを測定できた程度で、寿命も短く、面発光レーザの特徴をアピールできるようなレベルには達していなかった。この当時は、さらに動作特性を改善して室温でも発振できるようにするには、活性層の厚さを厚くして増幅性能を上げ、必要な電流を抑えるには、電流注入電極の面積を小さくする必要があると考えていた。

面発光レーザが一応の成果を上げた1979年から1年半ほど、米国の半導体レーザ研究のメッカであるベル研究所に滞在して研究を行った。この期間には、面発光型ではないが、劈開面を使わないその他の方法であるエッチングにより反射面を作るレーザについて研究した。一方、大学の研究室では分布帰還型やエッチング反射鏡型の研究を行っていた。いずれも端面発光型の改良に有効な技術であったが、伊賀にとっては、やはり面発光型の魅力の方が大きいことを再確認する結果となった。いずれにせよ、人と情報が渦巻くベル研究所での経験とそこで得た友人は伊賀にとって生涯の無形の財産となった。

⁴ H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, Jpn. J. Appl. Phys. 18(1979)2329-2330.

ベル研究所では、結晶成長の専門家である B・ミラーと組んで、彼が成長した結晶を加工してレーザとしての性能を評価する仕事を、1日で1サイクルというような早いサイクルで繰り返した。テクニカルアソシエイトの R・マートンはグループの仕事を支える名人で、エッチング、成膜、測定など何でもこなして、電極用の合金作りには二元合金の相図をもとに理論的仕組みを教えてくれた。

ベル研究所全体としては、日本に少し遅れて長波長半導体レーザの研究をスタートしており、他のいくつかのグループとともに、時々セミナーが開かれた。幸い東工大での経験があり、伊賀は優位に議論を展開できたという。

このころがベル研究所最後の黄金期であった。その後ベル研究所が分割され、研究者もあちこちに分散してしまった。しかし、逆に人脈が広がるという結果にもなった。後に DARPA の責任者になった R・ルヘニーやカリフォルニア大学の教授になった L・A・コールドレンなどもいて、伊賀のその後の仕事にも役立っているという。

低消費電力という面発光レーザのメリット

ベル研究所から戻ってきた後、面発光レーザの動作特性を理論的に解析したところ、レーザ発振に寄与する領域が小さいという問題点は、逆に、しきい値電流を小さくできる可能性を秘めていることが分かった。しきい値電流が小さいということは、消費電力を小さくできるということであり、同じ電力でも高出力が

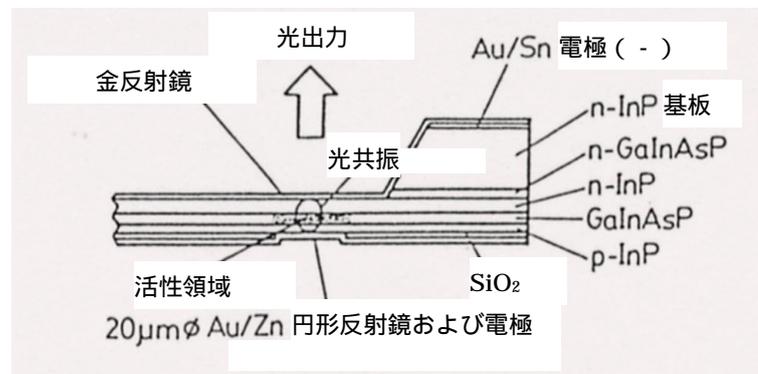


図4 低温パルス動作を実現した面発光レーザ

期待できることになる。ただし、この本質的な長所を生かすには、反射鏡の間隔をできるだけ狭めて活性層の厚さに近づけることが必要になることも分かった。

そこで、反射鏡には金属膜を用い、反射鏡の間隔を狭めるための構造を工夫したところ、1982年に、低温でのパルス発振ではあったが、本当のレーザらしい発振を確認できた⁵。このときの素子構造は図4のようなものであった。反射鏡間隔を狭めるために、InP基板を一部エッチング除去している。

その測定結果ではレーザ発光するのに必要なしきい値電流も小さく、面発光レーザの特徴を明確に示しており、「非常にうれしかった」と伊賀は述懐している。それまでの数年間、決め手となるデータがなかなか得られず、学会発表でもポスターセッションに回されたり、

⁵ H. Soda, Y. Motegi and K. Iga, IEEE J. Quantum Electron. QE-19(1983)1035-1041.

オーラルセッションの最後ということが多く、苦しい時期が続いたのである。

理論的な不十分さか技術力の弱さかのどちらかが原因で思うような結論に至らないのは、未知のものを探求するときの宿命だが、あまり細かく考えると行き詰まってしまう。「優秀」な研究者だとかえってあきらめてしまうかもしれないと伊賀は振り返った。

長波長では反射鏡が難しい

この当時は、光通信用の石英ファイバの開発が進み、その光源として軽量で長寿命の半導体レーザが期待されていたが、図5⁶に示すように、石英ファイバでの減衰が少ない波長は 1.3 μm または 1.5 μm であることが分かり、半導体レーザ開発の目標はこの長波長帯に集中していった時期である。現在では伝送損失の最小値はさらに小さくなっているが、減衰が少ない波長が 1.3 μm または 1.5 μm であることには変わりはない。

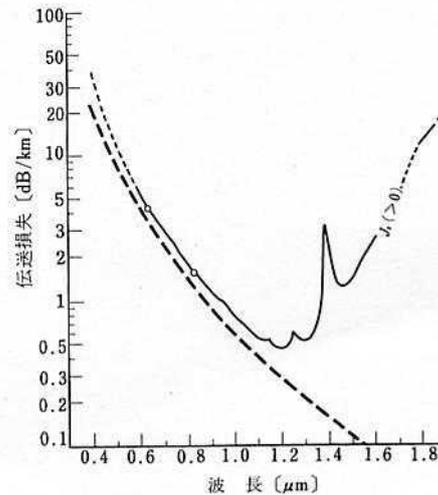


図5 1976年当時の石英ファイバ減衰特性（堀口、小山内による）

半導体レーザの発振波長は、図6のように、材料の種類によって決まる⁷。伊賀も、面発光

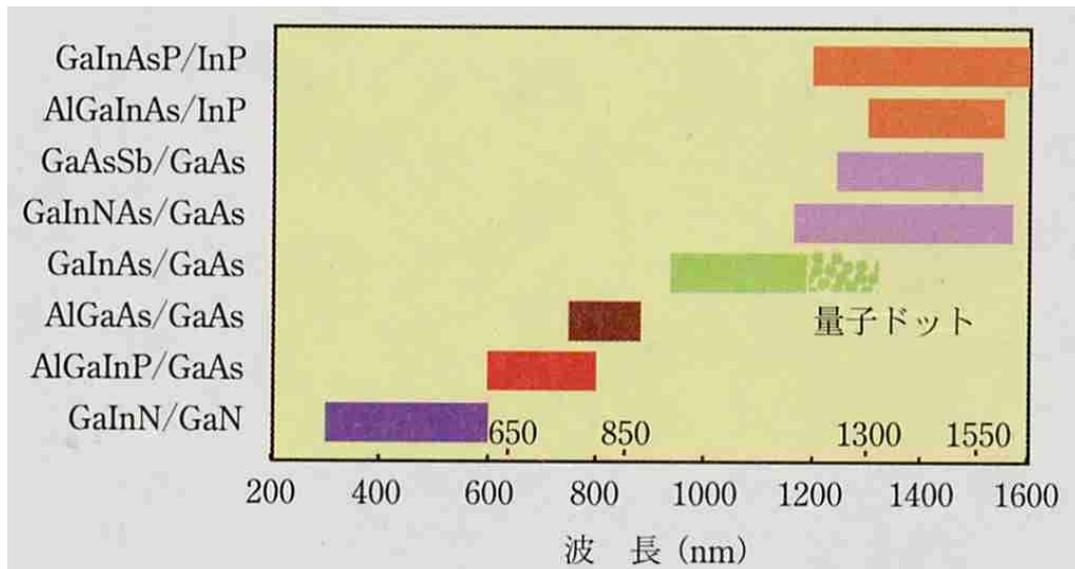


図6 材料と発光波長の関係

レーザの波長として光通信用の長波長領域を狙い、材料として GaInAsP を選んでいた。

しかし、試作と理論的解析を重ねるうちに、このような長波長レーザのための材料では面

⁶ 末松安晴、伊賀健一、「光ファイバ通信入門(改訂3版)」オーム社(2005年3月)p.96.

⁷ K. Iga, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 6(2000)1201-1215.

発光レーザの実現は相当難しいことが分かってきた。

問題点は反射鏡に必要な反射率である。すなわち、理論的な解析から、発振開始のしきい値電流が小さいというメリットを発揮するには、95%以上の高い反射率を必要とすることも分かってきたが、反射鏡として金属膜を使う方法では、金属膜なしの場合の反射率 30%よりもずっと大きな反射率を実現できるが、それでも80%程度が上限であった。

しかも、GaInAsPを活性層とする場合には、材料中での非発光再結合が起こりやすく、効率が悪いために、それをカバーするだけの特別高い反射率が必要であることも分かってきた。

そこで、伊賀は、1984年頃から、反射鏡として組成の違う絶縁薄膜からなる多層膜ミラーを採用した上で、材料にはGaAs系を用いて、0.8~0.9 μm という短波長の面発光レーザの実現を目指すことにした。

その当時の半導体レーザの用途は石英ファイバによる光通信が第一であったが、短波長用の面発光レーザは、新しく登場しつつあったレーザディスクの光源としての必要性も出てきた。しかし、結晶成長装置を新たに用意しなければならないなどの壁が立ちふさがった。

ただ、短波長で成功すれば、その技術を土台にして長波長領域の面発光レーザも必ず実現できる道が拓けるだろうと、伊賀は思っていた。

コンパクトディスク(CD)の追い風

ちょうどこの頃から、音楽のレコードに代わってコンパクトディスク(CD)が出現したことは短波長レーザの開発を大いに元気づけたことを忘れてはならない。CDは、1982年に初めて売り出され、その後順調に発展してそれまでの円盤レコードを駆逐していったのだが、その再生・書込用ピックアップには波長780nmの半導体レーザが使われていたのである。実際に使われたのは、従来構造の端面発光レーザではあったが、短波長面発光レーザの研究者にとっても、格好の応用分野が出現した訳である。

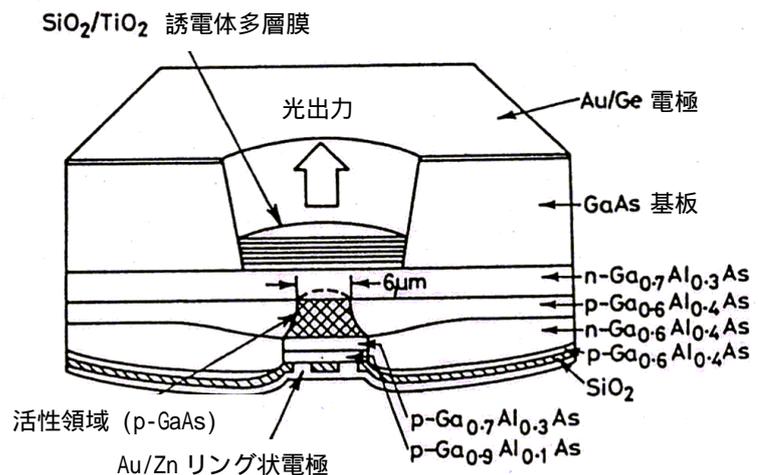


図7 6mAで室温パルス発振した
GaAs系面発光レーザ

GaAs を活性層とする面発光レーザの研究は順調に進み、1984 年には室温パルス発振⁸、1986 年にはその改良版⁹、1988 年には、面発光レーザでは初の室温連続発振を実現した¹⁰。しかも、共振器長(反射鏡間隔)は桁違いに小さく、しきい値電流も小さいという面発光レーザの特徴が大いに発揮されたものだった。

1986 年に室温パルス発振した素子の構造は図7に示すものである。大学院博士課程の木下進が主に作ったもので、反射鏡として、 SiO_2 と TiO_2 の多層膜を用いて反射率を向上させ、正電極側の反射鏡にはリング状の接続部を設けて金属電極との接続を確保した。

レーザ発振に寄与する共振器(キャビティ)の容積をできるだけ小さくするために、活性領域(GaAs)の周囲をバンドギャップの大きな GaAlAs で取り囲み、電流の流れを狭めるようにした。活性領域の直径は $6\ \mu\text{m}$ 、反射ミラーの間隔は $7\ \mu\text{m}$ と端面発光型の反射ミラー間隔(数 $100\ \mu\text{m}$) に比べて桁違いに小さくなっていることがこのような結果をもたらしたものである。このパルス発振した素子のしきい値電流は 6mA であり、端面発光レーザの標準的なしきい値に比べて桁違いに小さい値であった。低温(77K)では連続発振も可能であった。

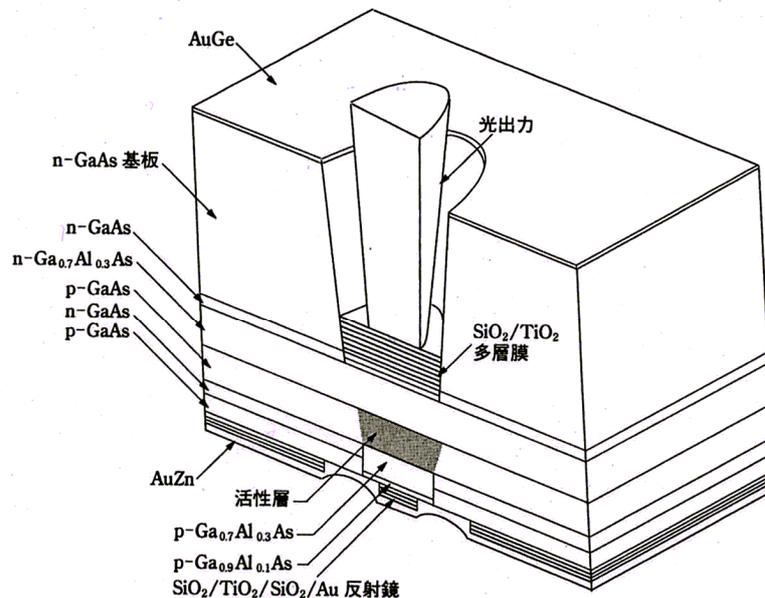


図8 室温連続発振 GaAs 系面発光レーザ

また、室温連続発振した素子の構造は図8に示すものである。活性領域(GaAs)の周囲は同じ材料 GaAs であるため、電流の流れは電極部分から次第に広がる形になっており、活性領域の直径は $10\ \mu\text{m}$ とそれほど小さくないが、反射ミラーの間隔は $5.5\ \mu\text{m}$ と図7の構造より

⁸ K. Iga, S. Ishikawa, S. Ohkouchi and T. Nishimura, Appl. Phys. Lett. 45(1984)348-350.

⁹ K. Iga, S. Kinoshita and F. Koyama, Electron. Lett. 23(1987)134-136.

¹⁰ F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga, Appl. Phys. Lett. 55(1989)221-222.

もさらに小さくした。その結果、面発光型では世界初となる室温での連続発振を実現することができた。このときのしきい値電流は 30mA とやや大きい、端面発光型に比べれば十分小さい値だった。

室温発振した素子の試作においては、助手の小山二三夫が中心になって力を発揮した。小山は、大学院のときに末松研究室で端面発光半導体レーザの高性能化に取り組んでおり、1.5 μm 波長領域の単一モード室温連続発振の実現やその動作特性の理論的解析にも実績を上げていた。彼が中心になってそれまでの結晶成長方法である液相結晶成長(LPE)から、当時、まだ必ずしも一般的ではなかった有機金属化学気相成長法(MOCVD)をほぼ自分たちで設計・製作し、平坦性の良い薄膜形成が可能になったことがこの成果に結びついた。

この室温連続発振の成果の影響は非常に大きなものであった。それまで面発光レーザに冷淡であった学会での反応が大きく変わり、伊賀らの成果に刺激されて世界中で面発光レーザ研究が始まり、加速された。伊賀は、ベル研究所時代の知人をはじめとして世界中のレーザ研究者に面発光レーザの利点を説いて回った。その結果、ベル研究所、カリフォルニア大学、ウルム大学などで面発光レーザの研究が盛んになり、伊賀のグループと競うように成果を生み出すなど、大きな流れを作り出していった。その頃から、垂直共振器を用いることから、面発光レーザは Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)とも呼ばれ始めている。

クリントン大統領も言及した国際的な面発光レーザの開発競争

特に米国では、光ネットワークの光源として重要な面発光レーザに対する関心が高まった。その背景には、端面発光半導体レーザの開発で日本企業に先行された米国企業や研究機関、ソ連崩壊と軍事研究予算のイノベーション技術への転用など、米国政府の思惑があった。LSI技術でシリコンバレーを形成したように、イノベーション技術とアレイ構造を持つ面発光レーザで光エレクトロニクスの振興をねらったものである。

2000年1月、米国のクリントン大統領は、21世紀の国家戦略として、「情報技術(IT)」と並んで「ナノテクノロジー」¹¹を打ち出したが、その中で、ナノエレクトロニクス分野の具体例として取り上げたのが、高電子移動度トランジスタ(HEMT)と並んで面発光レーザだった。それを契機にして、ナノテクノロジー国家戦略(National Nanotechnology Initiative: NNI)¹²がスタートしたが、その数年前から、米国では、近距離大容量データ通信用に面発光レーザの開発・実用化が進められていたのである。すなわち、1999年頃から、米国では、面発光レーザがギガビット・イーサネットなどの近距離データ通信回線に使われ始め、低コストであるために、急速に普及していった。

一方、日本では、従来からの端面発光レーザが通信用として大きな市場を獲得しており、

¹¹ <http://clinton4.nara.gov/WH/SOTU00/book/09.html>

¹² <http://www.ostp.gov/NSTC/html/iwgn/iwgn.fy01budsuppl/nni.pdf>, Appendix B10.

半導体レーザの製造企業は、面発光型を新たに開発するリスクをとるよりも端面発光レーザの改良で対応することを中心とする戦略を進めた。その方がリスクが少ないと考えたのである。どの企業も面発光レーザの研究は続けてはいたが、商品開発を進める積極性において欧米企業の後塵を拝したといえよう。また、単一モードファイバに比べて伝送距離が短い、ファイバの接続が容易な多モードファイバを用いて近距離ネットワークを構築するという考えは、日本ではすでに古いとされていたにもかかわらず、米国にはこれを実現しようという意欲があり、高性能かつ量産性の高い半導体レーザ光源が求められていたという事情もある。

このような背景の下で、面発光レーザは米国市場を中心として、システム内のコンピュータ・大容量データメモリ間ネットワーク(ファイバチャンネル等)、コンピュータ間ネットワーク(ギガビット・イーサネット等)に広く採用されるようになってきた。現在、この分野では、低消費電力、低コストを武器に、面発光レーザの独り舞台といった状態になっている。

なお、近距離データ通信回線を束ねた基幹通信回線には波長多重方式が使用されて、大容量化するデータ通信網の土台となっているが、そこでは光結合・分岐用の微小光学デバイスが必須となっている。この微小光学デバイスの分野も面発光レーザとともに、伊賀が早くから手がけてきたテーマであり、面発光レーザと微小光学デバイスのこのような展開は研究の当初では予想もつかないことであったが、「これができたら、きっとすごいことになる」といつも思っていたという¹³。伊賀は、「文部省の科学研究費を中心とするサポート、強力な研究チームと熱心な学生達のおかげで研究も世界的な評価を受けることができた」と述懐している。

長波長・短波長面発光レーザ開発への新たな挑戦

伊賀は、結晶成長技術など面発光レーザ素子の試作が比較的容易な GaAs 基板上の AlGaAs 結晶を活性層とする構造で、レーザ素子としての実用性を示した後、長年の課題であった、長波長レーザへの取組を本格的に開始した。

それまでの GaAs 基板上での結晶成長技術の蓄積を生かして、GaAs 基板上に格子間隔の異なる GaInAs 結晶層を成長できるようになり、1.2 μm までの長波長レーザを実現した。

最近では、さらに GaInNAs 結晶層を採用して、1.3~1.5 μm といった長距離伝送用石英ファイバに適合した長波長レーザの研究が進められている。一方、光記録の高密度化に必要な短波長レーザ光源への応用を目指して、GaN 結晶層を用いた面発光レーザの研究や、多重データ通信に必要な波長可変レーザ光源への応用を目指して、面発光レーザとマイクロマシン(MEMS)とを融合した大規模多波長光源の研究なども進められている。現在、これらの面発光レーザ研究の新たな展開について、伊賀の後を継いで教授となった小山二三夫らが中心になって研究を進めている。

¹³ 東京工業大学精密工学研究所ニュース, No.13(2001).

面発光レーザーの特長と開発における課題

ここで、面発光レーザーの特徴と課題を整理してみよう。面発光レーザーは、基板表面から発光するので、前述のように、

(1) ウェハ段階でテストして良品だけ組み立てることはできるという特長がある。これがそもそもの狙いであった。ところが、研究を始めてみると、それ以外にも良い点が分かってきた。すなわち、

(2) 劈開して作るよりも、レーザー素子の面積を小さくできるので、その点でもコストが低くなる。また、レーザー発振に寄与する共振器部の体積が小さいために、

(3) 発振を開始する電流値であるしきい値電流が小さくなるという特徴が分かった。これは、入力電力に対する発光効率が良いことになり、

(4) 高出力レーザーが容易に実現できることになる。また、

(5) 円形状の出射ビームが得られるために、従来の端面発光レーザーの出射ビームが楕円形状であるのに比べて、効率よく伝送用のファイバに光信号ビームを入射させることができることも分かった。

共振器部の体積が小さいことは、高速で信号のオンオフが切り替わる場合にも入力信号に追従できることを意味しており、これは、すなわち、

(6) 多量の情報量を送受信できるための高速変調が可能であることを意味する。また、製造段階でレーザー素子の2次元的な配置を決めることができるので、

(7) 2次元アレイ状光源が容易に構成できるという特徴もある。

しかし、これらの特長を実現するには、端面発光レーザーとは別の課題があった。

第1に、反射鏡の問題である。最初の段階では、金属膜を基板の表面と裏面に形成したが、反射率がまだ十分大きくないという問題があった。この対策としては、異なる材料からなる薄膜を交互に積層した多層膜が反射鏡として使えることが分かってきて、その多層膜の構成に半導体を使うという新しい考えを1986年ころに導入したのである。

第2の問題は、発振波長を長波長化した場合に適当な反射鏡用の材料や構成が無いことである。波長が1.3あるいは1.55 μm の長波長レーザーは、通信用石英ファイバにおいて減衰が少ない波長領域に対応しており、端面発光型の半導体レーザーが盛んに開発され、実用化が進んだが、面発光型では反射率の大きい反射鏡の構成が難しく、2004年ころまで実用的レベルになりにくかった。

第3は、面発光レーザーは、軸対称構造であるため、円形状の出射ビームが得られ、従来の端面発光レーザーの出射ビームが楕円形状であるのに比べて、効率よく伝送用のファイバに光信号ビームを入射させることができることは既に説明したが、しかし、逆に、偏波面が一定しないために、偏光を利用した光通信機器において雑音が大きいという問題点があった。

第4は、発振に寄与する領域が広がってしまうのを防ぐための電流狭窄構造や光閉じ込め構造をどう実現するかである。これは端面発光型にも共通する課題であるが、面発光型の構造に適した解決策が必要であった。

伊賀は、これらの課題について明らかにするとともに、それらの課題に次々に取り組んで、解決を図っていった。上記の第1、第2の課題とその解決については既に紹介したので、以下には第3、第4の課題への取組について説明する。

独自の構造を採用して安定化、効率化を実現

伊賀らは、偏波面が一定しないために、偏光を利用した光通信機器において雑音が大きいという問題について理論的にも詳しく検討して、傾斜基板を用いれば良いことを確認した。通常の(100)面から大きく傾いた(311)面を用いて、偏波面が安定化され、同時に発振のためのしきい値も小さくすることができた¹⁴。これは博士課程の西山伸彦が主に担当した。

この結果、多量の情報量を送受信できるための高速変調が可能であるという面発光レーザーの特徴を十分に生かすことができるようになり、高速データ通信が安定して行えるようになった。

また、発振に寄与する領域が広がってしまうのを防ぐためには、注入電流や発光した光の領域を制限するための構造が重要な役割を果たす。この事情は、端面発光レーザーでも同様であり、両者に共通する課題であるが、面発光型には独自の工夫が必要になる。

GaAs 基板上に成長させた

GaInAs 結晶層を発光領域とする面発光レーザーにおいて、反射鏡として GaAs / AlAs の積層構造が用いられるが、このうち発光領域の周辺部分の AlAs を酸化すると電流を発光領域だけに閉じ込める電流狭窄構造が実現できる。後に一般的になった面発光レーザーの構造を図9に示す。

ここで Oxide Confinement と書かれているアルミニウム・ヒ素層の酸化法を最初に採用したのは、テキサス大学のグループであったが、伊賀らはこれを多層膜全部に適用する新しい方法を試み、その当時の世界記録であるしきい値電流 $70 \mu\text{A}$ を確認した。その後両者および南カリフォルニア大学、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、ウルム大学などによる効率化

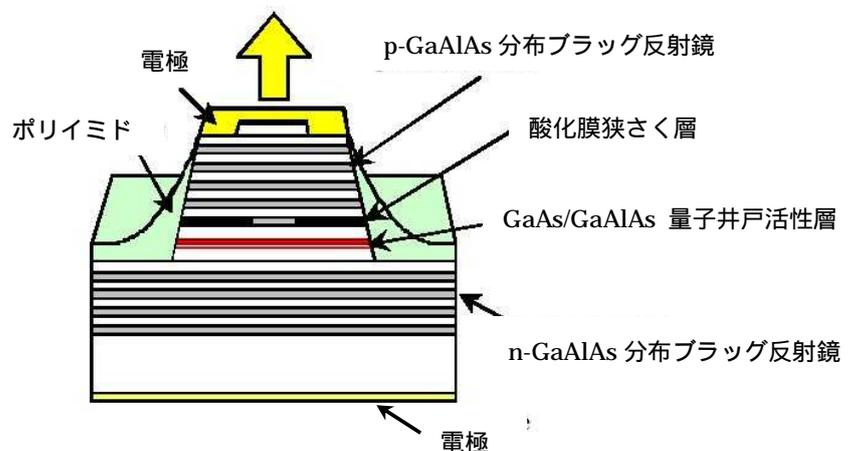


図9 面発光レーザーの一般的構造

¹⁴ N. Nishiyama, A. Mizutani, N. Hatori, M. Arai, F. Koyama and K. Iga, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 5(1999)530-536.

の競争が行われた。

この構造は、電流狭窄だけでなく、光を閉じ込める作用も有していることが後に分かり、全体として、入力電力を効率的に光に変換し、電力変換効率 57%という高い効率が米国やドイツの研究者から報告された。その結果、低電流動作での高速変調が可能であり、特に低消費電力が要求される大量情報処理機能搭載システムの高速度配線である光インタコネクへの応用に大きな期待がかけられるようになってきている。

面発光レーザ実用化の進展

2005 年現在、世界中の多くの企業で面発光レーザが生産されている。主な応用分野は、面発光レーザを使った構内光 LAN システムであり、低コストなギガビット光通信の手段として 2002 年に 500 万個以上生産され世界中で普及している。この分野で使われる面発光レーザは、2002 年現在、レーザ製造数全体の 80ないし 90%を占めているといわれている。波長は、口径の大きい多モードのシリカファイバに適合した 850nm である。この波長領域の場合には、反射率の高い界面構造が比較的容易に得られる。主要な製造企業は、ハネウェル、アジレント、インフィニオン、エムコアなどである。日本国内メーカーも 2002 年以降面発光レーザを採用してこの分野に参入している。ギガビット・イーサネットやファイバチャネルといった近距離光伝送規格には結合が容易な多モードシリカファイバと面発光レーザの組み合わせが適している。

近年は通信システムの低コスト化が注目され、光 LAN は広域ネットワークへ応用される一方で、小型化、モジュール化による家内ネットワークなど民生機器への応用が期待されている。今後は小型化、低消費電力、高温動作などレーザの高性能化を実現して、2004 年に 1000 万個以上の生産量が予想されている。また、長距離伝送に適した波長 1.3 μm あるいは 1.5 μm の面発光レーザの開発も各社で盛んになってきている。

その他に、面発光レーザが 2 次元アレイ状に多数高精度に配列できることを利用して、2003 年には、高精度で高速のプリンタ用光源として富士ゼロックス社により実用化された¹⁵。このプリンタでは 32 個の面発光レーザアレイを使用して、2,400dpi というカラーでは世界最高のプリント解像度を実現している。

手仕事・音楽への関心・執着

伊賀は、音楽を聴くためにラジオを自作した少年時代に低音の再生の難しさを痛感したが、大学生時代にはその低音に惹かれて、コントラバスに熱中し、現在も市民オーケストラの町田フィルハーモニー交響楽団に所属している。2003 年 9 月には国立情報学研究所主催の「軽井沢土曜懇話会」にて夫人の伊賀智子氏(ヴァイオリン)とともに演奏した。ベル研究所

¹⁵ http://www.fujixerox.co.jp/release/2003/0814_dc1256ga.html

に滞在した時には、研究所内のオーケストラで演奏し、さらに、英会話の練習を兼ねて、地元のマンモス(Monmouth)郡のオーケストラに夫人とともに参加したという。伊賀が顧問を引き受けた東工大管弦楽団は、120回以上の定期演奏会を重ねているが、伊賀自身も、そのうちの40回くらいは学生に混じって舞台に立ったとのことである。東工大管弦楽団主催の最終講義のタイトルは「音と光と」であったが、光エレクトロニクスに関する研究活動のポイントと長く続けてきた演奏活動にまつわるエピソードを話して、その最後は伊賀自身の演奏で締めくくったほどである。

理論的に突き詰めることが性分の伊賀は、コントラバスの弓の圧力と弓の位置をパラメータにして良い音の出る範囲を探してグラフにまとめるなどの「研究」も行っている¹⁶。このときは、弓の圧力を測定するために台所の秤を使ったとのことである。

コントラバスはほとんど独学だったが、芸大の学生であった鈴木良範氏(現ミュンヘンフィルハーモニー)や、河内秀夫氏(後にバンベルク交響楽団)に奏法を教えてもらったという。フランクフルト市立歌劇場管弦楽団首席コントラバス奏者の野田一郎氏は、ドイツにまでやって来てレッスンを請う伊賀氏の熱心さについて、「食いついて離れないエネルギーにあふれた、少年のような表情が忘れられない」と語っている。2002年以来、伊賀は東京工業大学での管弦楽セミナーに野田氏を講師として招き、司会と生徒を務めるなど、野田氏の考案したコントラバス奏法の普及に一役買って、レッスンを受けた恩返しをしている。2005年8月には第4回目を開講する。



図10 コントラバスと
演奏用の箱台

伊賀は、我流でスタートしたコントラバスの奏法について、「我流では後々苦勞する。しかし、それが幸いして色々な人に気軽に教えを請うことができた」と述懐しており、また、「いずれにせよ、良い理論に早くたどり着くことと独創(独奏?)が大事だ」と強調している。研究面での伊賀のスタイルに通じるものを感じさせる言葉である。

このような徹底した音楽への執着には、伊賀の研究における、新たな着想を最後まで育て上げる粘り強さや、研究用装置作りのためのガラス細工が得意であることとも共通するものが感じられる。また、持ち運びに便利なコントラバス演奏用の台と椅子とを組み合わせた自作の「装置」を作るなど、独自のアイデアを生み出す力は趣味の世界でも遺憾なく発揮されている。

¹⁶ 伊賀、「コントラバスの響き - その物理と音色 - 」, 日本物理学会誌、60(2005)387-388.

略歴

- 1940年 広島県生まれ
- 1968年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了(工学博士)
- 1968年 工学博士東京工業大学精密工学研究所助手
- 1973年 東京工業大学精密工学研究所助教授
- 1979年から1980年まで ベル研究所客員研究員
- 1984年 東京工業大学精密工学研究所教授
- 2000年 東京工業大学マイクロシステム研究センター長
- 2001年 東京工業大学名誉教授
- 2001年 日本学術振興会理事
- 2003年 電子情報通信学会会長

主な受賞

- 市村学術賞・功績賞、電子情報通信学会 業績賞・功績賞、東レ科学技術賞、朝日賞、東京都科学技術功労者、IEEE ミレニアムメダルなど受賞
- 2001年 紫綬褒章
 - 2002年 ランク賞(英国ランク財団)
 - 2003年 IEEE ダニエル・E・ノーブル賞
 - 2003年 藤原賞