

一橋大学 GCOE プログラム
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」
大河内賞ケース研究プロジェクト

株式会社東芝
0.6 μ m 帯可視光半導体レーザーの開発

工藤悟志
清水洋

2010 年 1 月

CASE#10-01

本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している。なお、本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいております、心よりお礼を申し上げます。
(プロジェクト活動の詳細については [http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize\(A\).html](http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize(A).html) を参照のこと)。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

株式会社 東芝

「0.6 μ m帯可視光半導体レーザの開発」¹

一橋大学大学院商学研究科博士後期課程 工藤悟志

一橋大学イノベーション研究センター 清水洋

¹ 本稿を作成するにあたり、多くの方々にインタビュー調査に協力いただいた。お忙しい中、貴重な時間を割いてご協力頂き感謝する。特にインタビュー調査だけでなく、講演の依頼も快諾頂いた波多腰玄一氏には、深く感謝する。本ケースは講演やインタビュー調査、後掲の資料などを参考にしている。ただし、本稿の記述はあくまでも筆者の理解に基づくものであり、その責任はあくまでも筆者にある。また、本稿は企業経営の巧拙を示すことを目的としたものではなく、分析並びに討議上の視点と資料を提供することを目的としている。

1. はじめに

レーザーは20世紀最大の発明であると言われてきた。レーザーの理論上の重要な基礎は1950年代にさかのぼる。1954年には、アメリカでチャールズ・タウンズ (Charles Townes) がレーザーの基礎となる理論的な提案を発表した²。1957年にコロンビア大学の大学院生がレーザーの理論を提案し、**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)** とレーザーを名付けた。世界で最初に実際にレーザー光を発振したのは1960年であった。この最初のレーザーの発振以来、様々な種類のレーザーが開発されてきている。

次節で詳しく見るが、レーザーとはコヒーレンスの高い光であり、太陽光や炎の明かりなどの自然の光とは大きく性質が異なる。最初のレーザー発振からおよそ30年が経とうとする1980年代後半から次々とレーザーを応用した製品が生み出されている。現在では、通信や計測、加工、印刷、音響、記録、視覚など様々な分野で使われている。また、ここで取り上げる半導体レーザーも様々な用途で使われている。その中でも主たるアプリケーションは海底ケーブルなどの光通信やコンパクトディスクやバーコードリーダー、プリンタなどの情報記録・処理である。半導体レーザーはまさに、20世紀のIT革命を牽引した基幹技術の一つであった。

本ケースでは、1988年に東芝が開発した0.6 μ m帯可視光半導体レーザー³の技術開発とその事業化の経緯を記述する。東芝は1988年2月に世界初の半導体赤色レーザー⁴の製品化 (TOLD9200, 波長 670nm) を実現した。この技術は、バーコードリーダーによるPOS (Point of Sales : 販売時点情報管理) システムの高度化、小型化、低価格化の市場ニーズを捉え、バーコードリーダー市場の拡大普及に大きな貢献をした。また、この0.6 μ m帯可視光半導体レーザーは、1980年代から始まった半導体レーザーの短波長化の技術トラジェクトリの中の重要な技術の一つであった。この技術開発の成果によって、東芝は第39回 (平成4年度) に大河内賞を受賞している。

半導体レーザーは物理や光学などさまざまな技術が複雑に絡み合っている分野である。そのため、東芝における0.6 μ m帯可視光半導体レーザーの開発の事例の理解を助けるために、初めに半導体レーザーの技術的な基本構造を見た上で、その技術発展の歴史を概観する。次に東芝における0.6 μ m帯可視光半導体レーザーの技術開発の歴史を記述する。最後に、技術開発から事業化までのプロセスを記述し、どのように0.6 μ m帯可視光半導体レーザーがバーコードリーダーやポインターなどのアプリケーションに使われていったのかを考察する。

² レーザーの理論の歴史については Townes, C. H. (1999) *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*, Oxford University Press. (C.H.タウンズ, 霜田光一訳 (1999) 『レーザーはこうして生まれた』岩波書店。) が詳しい。

³ 目に見える波長域を発光させるレーザーのことを指す。(平田照二 (2001))

⁴ 赤色レーザーとは、630~680nm帯を発光するレーザーのことである。(平田照二 (2001))

2. 半導体レーザーの技術と歴史

ここではまず初めに、レーザーの基本的な構造について概観する。その上で、半導体レーザーの技術開発を歴史的に振り返る。ここで取り上げる東芝の $0.6\mu\text{m}$ 帯可視光半導体レーザーが半導体レーザーの技術史上で位置づけることがここでの目的である。

2.1. レーザの基本構造

レーザーとは、**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)**の略であり、誘導放出という光の発光である。誘導放出とは次のようなステップを踏んで起こる光の発光である。電子は外部からエネルギーを受けると、励起しエネルギー準位が上がる。これをポンピングという。上の準位から下の準位へと電子が落ちるときに、光子をはき出す。電子が上の準位から下の準位へと落ちるときに、光が出るわけである。アインシュタインは、この落ち方に2つのタイプがあることを発見した。1つは自然放出と言われるもので、上の準位にある電子が自然に落ちて光をだすものである。自然放出の場合、その光波の位相はバラバラなインコヒーレント⁵な光となる。もう1つは上の準位にある電子に外部の光が刺激を与え、電子を強制的に下の準位に落とすものであり、誘導放出と呼ばれる。このときに放出される光は、電子を落とす引き金となった光と同じ位相を持つ。同じタイミングで同じ波長の光が出るため、波長と位相のそろったコヒーレントな光が放出される。2枚の平行に向かい合わせた鏡の間で、この誘導放出を利用して作った光が種になり、新たな誘導放出が繰り返され増幅されていくとレーザー発振となる。

現在、レーザー光を発振させるためのデバイスは、光を増幅させる媒質によってヘリウム・ネオン (He-Ne)レーザーや YAG レーザ、金属レーザーなどいくつかに分けられている⁶。1960年にアメリカのヒューズエアクラフトのセオドア・メイマン(Theodore Maiman)によって世界で最初のレーザー発振の時に使われたのは、ルビーレーザーであった。

半導体レーザーは、半導体を媒介としてレーザーを発振するもので、レーザー発振のためのデバイスの1つである。半導体レーザーの最も大きな特徴はその小型さにある。半導体レーザーの大きさは、およそ $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}\times 0.4\text{mm}$ であり、キャップなどをつけ、パッケージングをした状態でもわずか 1cm たらずである。他のレーザーと比べるとかなり小型あるだけでなく、消費電力も少ない。そのため、現在、様々な用途で広範囲に使われており、生産台数において最も大きいレーザーである。

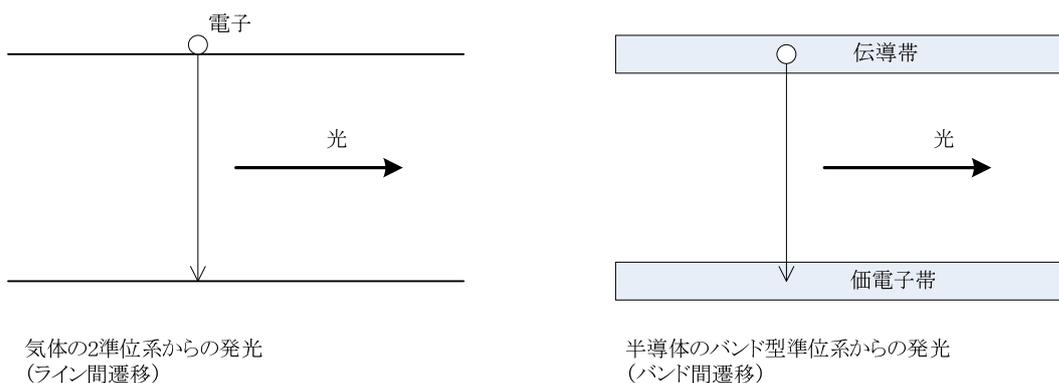
電子は上の準位と下の準位という2つの準位を持ち(2準位系)、上の電子が下に落ちることで光が出る。半導体でもその基本的な仕組みは変わらない。しかし、気体レーザーでは電子が比較的狭いラインの間を移動するライン間遷移であるのに対して、半導体の電子は

⁵ レーザ光は「波長が純粋で(単一で混じりけがなく)位相のそろった光」である。普通の光は「いろいろな波長が混ざり、位相がランダムな光といえる。このような光や位相の整い具合をコヒーレンス(coherence)という。(平田照二(2001))

⁶ Appendix の表1はレーザーの種類と出力、発振波長、主な用途をまとめている。

伝導帯から価電子帯と呼ばれる領域に落ちてくる（図 2-1）。半導体バンド間遷移と呼ばれている。伝導帯も価電子帯もともにある幅を持った領域であり、このバンドの幅の分だけ、波長域は広くなる一方で、共振器長の大きい気体レーザなどと比べるとレーザ光の波長の純度ではわずかに劣る。

図 2-1：気体と半導体の 2 準位系の差異

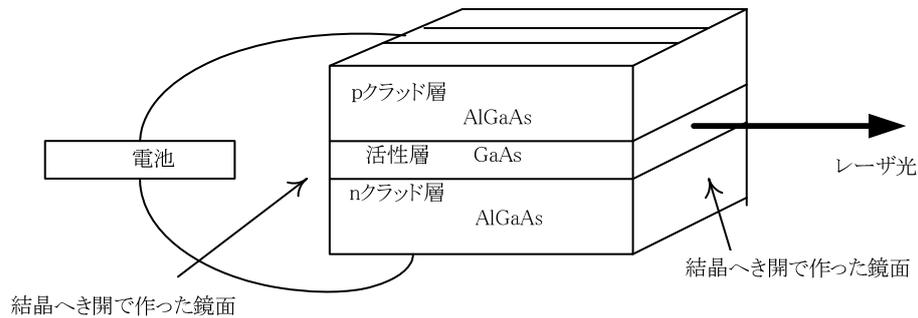


出所：平田照二（2001）『わかる半導体レーザの基礎と応用』CQ 出版社，44 頁．

それでは具体的に半導体レーザの構造を見てみよう⁷。現在，さまざまな構造を持つ半導体レーザがあるが，その多くに共通する基本的な構造はダブル・ヘテロ（DH）と呼ばれるものである。図 2-2 で示されるように，半導体レーザは 3 層のサンドウィッチ状の DH 構造を持っている。真ん中に挟まれた活性層は誘導放出光を生み出す層である。ここで例示されているものは GaAs（ガリウムヒ素）を材料にした半導体レーザである。この活性層を挟み込み，誘導放出光を閉じ込めるのがクラッド層である。ここでは AlGaAs（アルミニウム・ガリウムヒ素）がクラッド層の材料として使われている。活性層とクラッド層に異なる材料を用いて結晶を接合させる構造をヘテロ接合と呼ぶ。ヘテロ接合が 2 カ所あるため，DH 構造と呼ばれている。活性層に閉じ込められた光は両端の結晶へき開の鏡面の間で往復し，増幅した上で，レーザ光として放出される。

⁷ 半導体レーザの構造に関しては，栖原敏明（1998）『半導体レーザの基礎』共立出版．平田照二（2001）『わかる半導体レーザの基礎と応用』CQ 出版社．神戸宏（2001）『はじめての半導体レーザ技術』工業調査会．などが詳しい。

図 2-2：半導体レーザの基本的な構造



出所：平田照二 (2001) 『わかる半導体レーザの基礎と応用』CQ 出版社, 54 頁.

安藤幸司 (2003) 『光と光の記録』産業開発機構株式会社, 194 頁.

次に半導体レーザ製造の工程を見てみよう。半導体レーザの製造の流れは大きく分けて 4 つに分けられる⁸。(1)結晶成長、(2)電極プロセス、(3)ペレタイズ、(4)測定/評価の 4 つである。

(1). 結晶成長

半導体レーザを製作するときに、最初に必要になるのが結晶成長（エピタキシー）である。結晶成長によって、半導体レーザに必要なサンドイッチ構造⁹を単結晶として作り込むことである。基板結晶（ウェハ：wafer）に原子の並び（格子）が整っていて、原子結合がしっかり形成しながら積み重なっていくように結晶成長をする。このような結晶を得るためには成長条件（成長温度、原料供給量や原料混合比など）を正確にコントロールする技術が必要である。

この工程でレーザの基本構造である、クラッド層/活性層/クラッド層の 3 層と電極をつけるための層が、半導体結晶として作られる。エピタキシー技術は半導体レーザの寿命や波長、生産コストなどを大きく左右するものであり、半導体レーザの技術の中で最も重要なものの 1 つであると考えられている¹⁰。

結晶成長の方法は大きく分けて 2 つある。1 つは液体中で固体結晶を成長させる液相成長法（Liquid Phase Epitaxy）である。もうひとつは、気体から直接固体を結晶させる気相成長法（Vapor Phase Epitaxy）である。気相成長法には、化学的な反応を利用した MOCVD 法（有機金属気相成長法：Metal Organic Chemical Vapour Deposition）と蒸着を利用した MBE 法（分子線成長法：Molecular Beam Epitaxy）がある。

(2). 電極プロセス

結晶成長のプロセスの後は、電気を流すための電極を結晶基板（ウェハ）の上部と裏面に電極付けを行うプロセスである。p クラッド層の上部に電氣的接触のためのコンタクト層

⁸ 平田照二 (2001), 114-130 頁.

⁹ ダブル・ヘテロ構造 (DH 構造)

¹⁰ 応用光エレクトロニクスハンドブック編集委員会編 (1989), 105 頁.

と呼ばれる補助層をつくる。コンタクト層の表面に真空蒸着によって電極金属を貼り付ける。次に n クラッド層の底面を研磨して $100\mu\text{m}$ 程度にした上で、電極を貼り付ける。

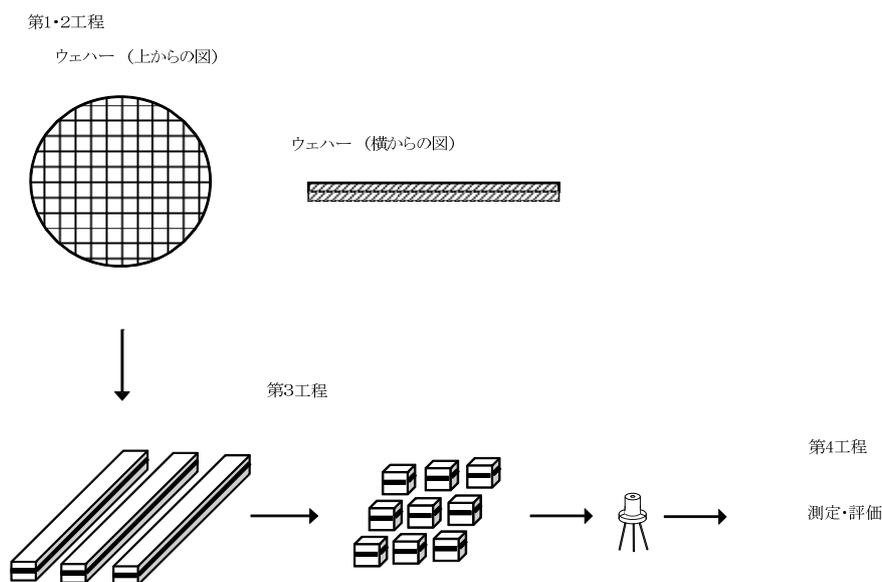
(3). ペレタイズ

ペレタイズは、レーザの側面に鏡面を作るプロセスである。レーザ光の発生に必要な「バー状へき開」から始まる。ダイヤモンド・カッタで電極を付けたウェハ表面にキズをつけて、その裏面から裂くように割り出す。これはレーザの命ともいえる「鏡作り」のための作業であり、重要なプロセスである。このプロセスにおいて、ウェハをバー状に切り、さらにそれを個別のレーザ・チップに切り分けていく（ペレタイズ）。そしてこのレーザ・チップにキャップを付けて外気と遮断し酸化を防止し、パッケージングする。

(4). 測定/評価

最後のプロセスは、検査である。発振や波長、寿命などのレーザの特性の計測を行う。通常は全数の測定評価をおこなう。図 2-3 は半導体レーザが製造されるまでの 4 つのプロセスを簡単に図示したものである。

図 2-3 : 半導体レーザ製造工程



出所：平田照二 (2001) 『わかる半導体レーザの基礎と応用』 CQ 出版社， 114-130 頁を参考に筆者作成。

半導体レーザの発光にとって、発光層に用いる半導体のバンドギャップエネルギーが重要な役割を果たしている。バンドギャップエネルギーが大きいほど、波長の短い光が出る¹¹。半導体の材料が異なれば、そのバンドギャップエネルギーも異なり、その結果、発光されるレーザ光の波長も異なる。波長が違えば、想定されるアプリケーションも異なる。例え

¹¹ 半導体材料のバンドギャップエネルギー(E_g)と発光波長の関係は、 $\lambda = 1,240/E_g$ で求められる。(平田照二 (2001))

ば、光通信においては $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ の波長のレーザが使われており、その材料は InP (インジウム・リン) 系である。コンパクトディスクに使われている半導体レーザの波長は $0.78\mu\text{m}$ であり、AlGaAs (アルミニウム・ガリウムヒ素) 系の材料が使われていた。さらに、材料が異なれば、エピタキシー技術やデバイスの構造のデザインなど生産技術が大きく異なる。

半導体レーザは現在様々な用途で用いられている。コンパクトディスクなどの光記録や光ファイバを使った光通信、バーコードリーダー、プリンタ、医療機器、機械加工、センサー、レーザ核融合など多様である。それぞれの用途に必要な波長や出力などの特性は異なるそれに合わせて、材料の選択や構造のデザイン、エピタキシー技術などが開発されている。

2.2. 半導体レーザの歴史

この半導体レーザはどのように開発されてきたのだろうか。最初の半導体レーザを用いたレーザ発振の理論は、1953年にフォン・ノイマン (Johann von Neumann) によって着想されたと言われている。しかしながら、ノイマンはこれを公表しなかったため、この着想が直接技術開発に影響を与えることはなかった。公表された半導体レーザの原型は、1957年の東北大学の西澤潤一による半導体メーザの特許であった。メーザ (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation : MASER) とは、レーザと同じ誘導放出の原理を使ったものであり、マイクロ波を放出する。前述のように最初のレーザ発振は1960年にカリフォルニアのヒューズエアクラフトのメイマンがルビーレーザで達成した。

最初の半導体レーザの発振は1962年にアメリカで達成された。ほぼ同時期に、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 (UIUC)¹²、ゼネラル・エレクトリック (GE)¹³、インターナショナル・ビジネス・マシーンズ (IBM)¹⁴、マサチューセッツ工科大学 (MIT)¹⁵ の4つの組織が半導体レーザの発振を報告している。GE、IBM、MITのレーザはGaAsを材料に使い、UIUCのレーザの材料はGaAsPであった。小型で消費電力も低い半導体レーザでレーザ発振に成功したため、大学や企業など多くの組織が1960年代に研究開発を開始した。日本電気や日立、東芝、三菱電機など日本企業もこのころ半導体レーザの研究開発を始めていた。

この1962年のレーザ発振は77K (マイナス196度) でのパルス発振であった。室温での発振が達成されない限りは、半導体レーザの用途は極めて限られたものになるため、1962年の半導体レーザの発振以降、室温連続発振の達成が重要な研究課題となった。レーザを発生させるためには大きな電流を流さなければならなかったが、室温ではすぐに過熱して

¹² Holonyak, N. Jr. and Bevacqua, S.F. (1962), pp.82-83.

¹³ Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D., Soltys, T.J. and Carlson, R.O. (1962), pp.366-368.

¹⁴ Nathan, M.I., Dumke, W.P., Burns, G., Dill, F.J. and Lasher, G.J. (1962), pp.62-64.

¹⁵ Quist, T.M., Rediker, R.H., Keyes, R.J., Krag, W.E., Lax, B., McWhorter, A.L. and Zeiger, H.J. (1962), pp.91-92.

しまいレーザが劣化する。そのため、研究者は様々な方法を試みていた。コロラド大学のハーバート・クレーマー (Herbert Kroemer) は、1963年に室温での連続発振のために、2つの異なる材料の間に、薄い活性層を挟み、サンドイッチ状にする構造を提案した¹⁶。前節の DH 構造である。レーザ発振に寄与する電子が薄い活性層の部分に閉じ込められるので、必要な電流はごくわずかで済み、熱の発生も抑えられる。この提案は理論的には重要なものであったものの、実際に室温連続発振が達成されるのには時間がかかった。半導体結晶の原子は格子状に並び、電子によって化学結合を構成している。そのため、2つの異なる材料の多層構造の半導体レーザを作るためには、素子全体を1つのまとまりをもった結晶として成長させる必要があった。この実現は難しく、日本の企業でも半導体レーザの研究開発を中止するところもあった。

室温連続発振が達成されたのは1970年になってからであった。最初の半導体レーザが1962年に発振してから8年が経っていた。まず、ソ連のヨッフエ研究所のジョレス・イヴァノヴィッチ・アルフォーロフ (Zhores Ivanovich Alferov) によって室温連続発振が報告された。この報告はロシア語でロシアのジャーナルに発表されたため、西側諸国にはすぐには伝わらなかった。アルフォーロフとは別に、同年にベル研究所の林巖雄とモートン・パニッシュ (Morton Panish) が室温発振を達成した¹⁷。GaAsを材料にしたものであり、その波長は $0.8\mu\text{m}$ であった。

この室温連続発振が達成された同じ1970年に、アメリカのコーニング社が通信用の光ファイバーを開発した。この光ファイバーの光源の波長は、 $0.8\mu\text{m}$ が想定されていた。1970年に半導体レーザの室温発振がなされたことと、光ファイバーの実用化が進んだことによって、多くの企業が光通信をアプリケーション先として半導体レーザの研究開発を進めた。

日本ではNTT(当時、日本電信電話公社)やKDD, 日本電気, 東芝, 富士通, 日立, 三菱電機などが中心となり、信頼性の向上や長寿命化などの光通信用の半導体レーザの研究がすすめられた。その後、光ファイバーの研究開発が進み、光の損失が少ない波長が $0.8\mu\text{m}$ から $1.3\mu\text{m}$, さらには $1.5\mu\text{m}$ へと進んだため、通信用の半導体レーザもその波長に合わせて長波長帯での開発がなされていった¹⁸。

光通信用から始まった半導体レーザの研究開発であったが、1970年代後半から情報記録・処理用の用途が徐々に広まっていった。3Mとスタンフォード大学は1961年にフォトグラフィック・ビデオディスクの研究を行った。これは半導体レーザを光源としたものではなかったが、ビデオディスクの研究開発の最初の1つであった。1970年代に入ると、フィリップやMCA (Music Corporation of America), RCA (Radio Corporation of America),

¹⁶ クレーマーは、1970年に室温連続発振を達成したアルフォーロフとともに2000年にこれらの業績でノーベル物理学賞を受賞している。

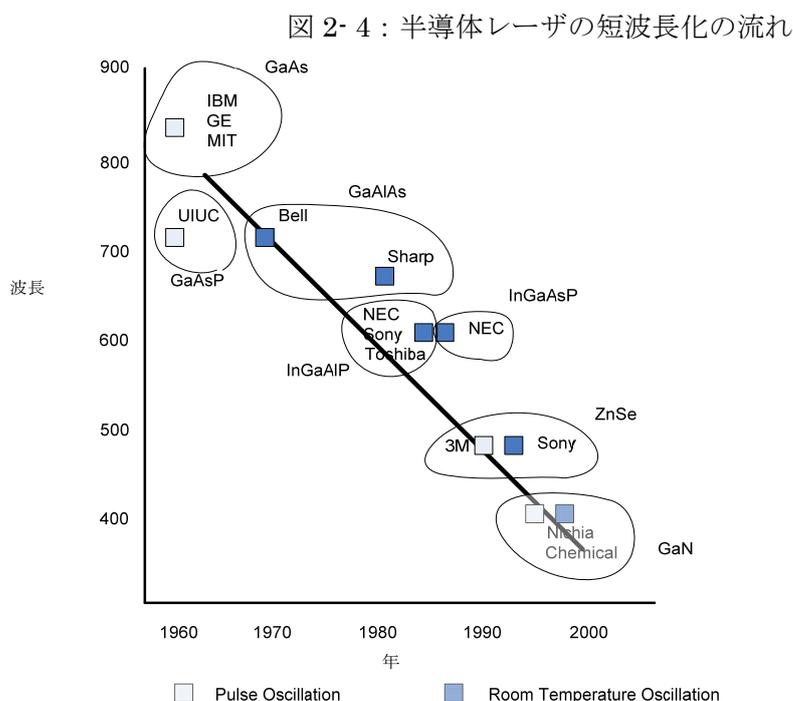
¹⁷ Panish, M.B., Hayashi, I. and Sumski, S. (1970), pp.326-327.

¹⁸ 光通信用の半導体レーザについては、伊賀健一編 (1994)『半導体レーザ』オーム社。歴史については、渋谷寿 (2003)『光通信物語—夢を実現した男たちの奇跡』オプトロニクス。などが詳しい。

三菱電機や東芝など多くの企業がビデオディスクや文書管理システムなどの研究開発を開始していた。最初の大きなアプリケーションは 1982 年に発売されたコンパクトディスク (CD)であった。CD プレーヤには $0.78\mu\text{m}$ の波長のレーザが使われていた。そこでの材料は AlGaAs であった。

1980 年代から、高密度の光記録やディスプレイへの応用などへの期待がさらに高まっている。記録・再生が可能な容量が光源の波長の 2 乗に反比例するため、半導体レーザの波長を短くしていく研究が進められている。例えば、CD 用の $0.78\mu\text{m}$ の赤外の光を DVD 用の $0.65\mu\text{m}$ の赤、さらには $0.4\mu\text{m}$ の青紫へと短くすることによって、それぞれ 1.5 倍、3.7 倍の情報を記録できることとなる。

図 2-4 は半導体レーザの技術発展を波長からみた技術のトラジェクトリである。1962 年の最初の半導体レーザの発振から、赤外から赤、緑、青、そして紫外と波長が短くなってきていることが分かる。また、波長が短くなるに従って、その材料も変化している。



出所 : Hatakoshi, G. (1997) "Visible Semiconductor Lasers," *The Journal of The Institute of Electronics Information and Communication Engineers*, Vol.80, pp.692-96.をもとに筆者作成。

短波長化を進める半導体レーザの研究では、材料の選択がひとつの大きな課題であった。GaAlAs 系では 680nm までの室温連続発振が達成¹⁹されたが、短波長レーザの実用化のため

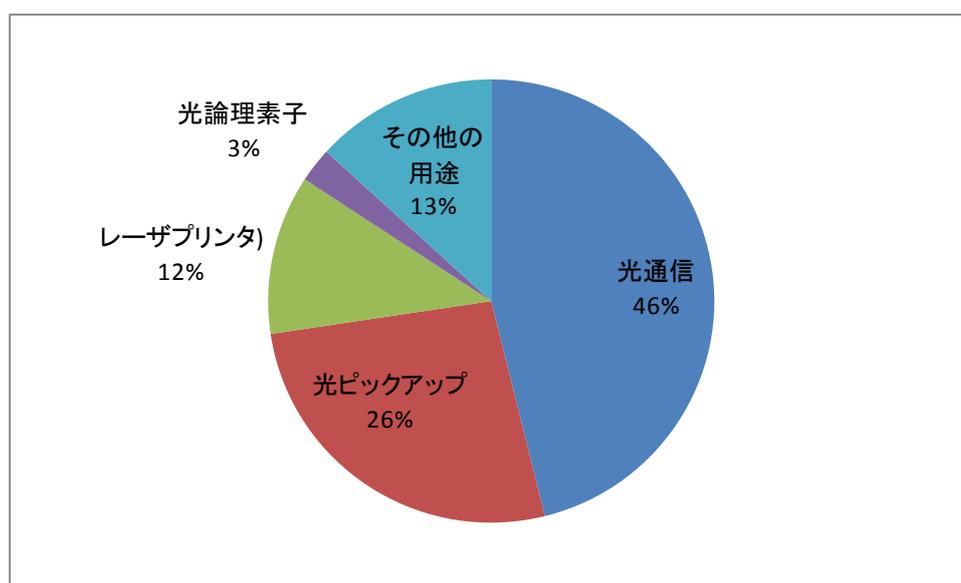
¹⁹ Yamamoto, S., Hayashi, H., Hayakawa, T., Miyauchi, N., Yano, S. and Hijikata, T. (1982), pp.796-798.

めには、よりバンドギャップエネルギー²⁰の大きい材料が必要であった。そのため、材料の選択とそれにもなう結晶成長などの生産技術の開発が短波長化の研究開発の中心になっていった。本ケースで取り上げる InGaAlP を材料にした 0.6 μ m 帯可視光半導体レーザは、まさにこの短波長化を目指す研究開発競争において生み出されたものである。

2.3. 日本の半導体レーザの技術開発と特許

ここでは日本の半導体レーザの技術開発を特許から見てみよう。初めに、半導体レーザにおける特許をその用途別に見たものが図 2-5 である。これは 1971 年から 1996 年までの累積の特許出願件数を用途別に分類したものである。この図から半導体レーザにおける技術開発の牽引役は光通信分野の研究であることが分かる。

図 2-5 半導体レーザの用途に関する出願構成比



出所：特許庁 (1998) 「技術分野別特許マップ (電気 10 半導体レーザ)」に筆者加筆

光通信に続く半導体レーザの研究分野は、民生用ではレーザープリンタおよび光情報記録ディスク用などの光ピックアップ分野である。1968 年にプリンタの光源として半導体レーザを用いる発明があり、1979 年にレーザープリンタが発売された。また光情報記録への応用は、1974 年に始まり、1982 年に CD が発売された。それぞれの用途によって、半導体レーザの波長が異なることは注意したい。

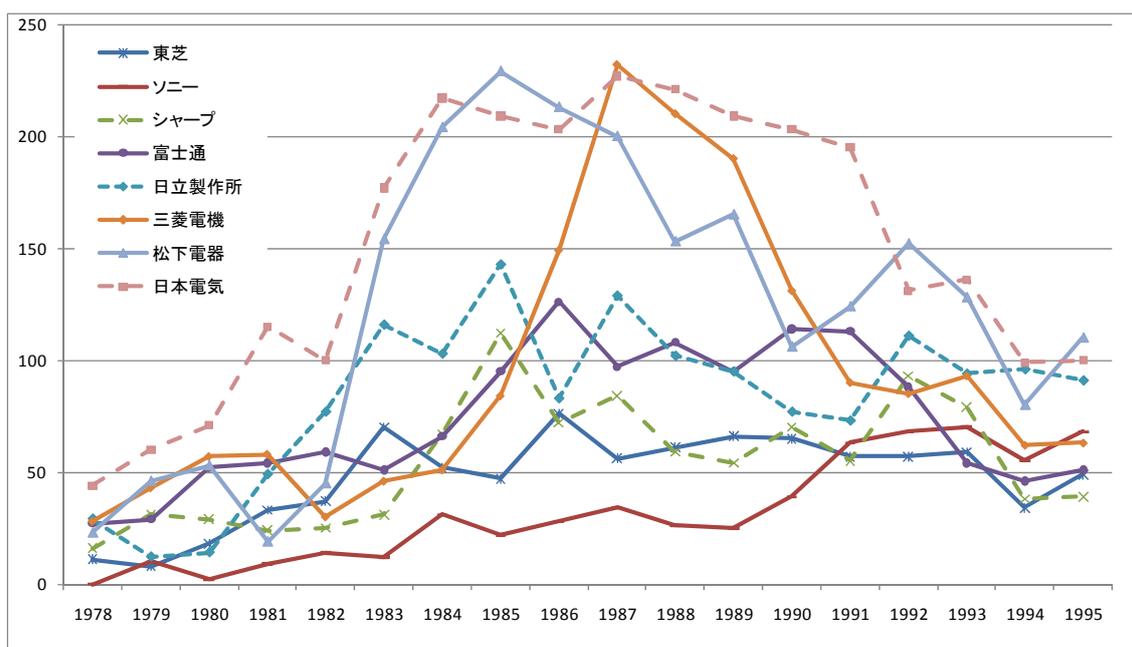
本ケースで取り上げている東芝の 0.6 μ m 帯可視光半導体レーザは、最初はバーコードリ

²⁰ 半導体中の電子が存在できるエネルギー帯間のエネルギー・レベル差をいう。このエネルギー差で発光色 (発光波長) が決定される。また素子に印加する電圧の指標となる。(平田照二 (2001))

ーダーで使われたため、図 2-5 の用途分野にあてはめると、「その他の用途」に該当する。しかし東芝における半導体レーザの研究は、競合他社と同様に半導体レーザの波長を短くする研究開発に取り組んでいた。CD 用として $0.78\mu\text{m}$ の半導体レーザが開発された後は、DVD の事業化など想定した一層の短波長化が目指されていた。本ケースで取り上げている東芝の $0.6\mu\text{m}$ の半導体レーザも、この短波長化の研究開発において生み出された技術である。

半導体レーザに関する特許出願件数を 1978 年から 1995 年まで、各主力メーカーの年次推移を示したものが図 2-6 である。1980 年代は、半導体レーザの出願件数のピークである。日本電気、松下電器、三菱電機は年間 200 を超える特許を出願していた。東芝は、他社を圧倒するほどの特許出願はしていないが、毎年 50~100 件の特許出願をしていたことが分かる。1983 年に開始された東芝の $0.6\mu\text{m}$ 半導体レーザの開発は、1980 年代の熾烈な開発競争の中で時期に開発されたものである。

図 2-6 半導体レーザの特許出願社構成比推移

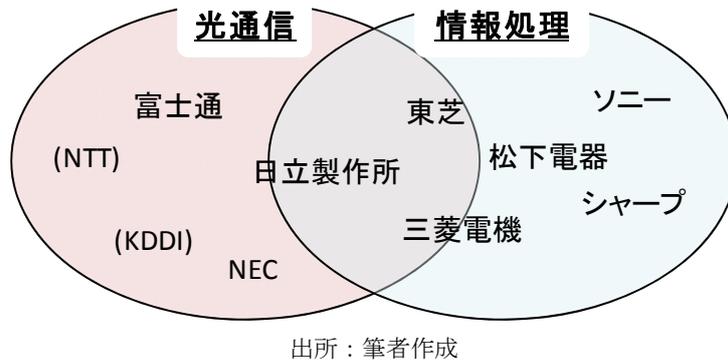


出所：特許庁（1998）「技術分野別特許マップ（電気 10 半導体レーザ）」

ここで注意しなければならないことは、図 2-7 で示す通り、研究開発の軸を光通信分野に置いた企業（日本電気と富士通など）と民生用の情報処理分野に軸を置いた企業に分かれるということである。特許出願数を考慮すると、光通信分野の出願数は民生用の情報通信分野よりも多い（図 2-5）。そのため、情報記録・処理といった民生用のみに半導体レーザを開発していた企業の特許数は少なくなる。東芝は光通信用のレーザも開発していたものの、日本電気や富士通とは異なり、民生用の半導体レーザに研究開発の重きは置かれ

ていた。

図 2-7 主要メーカーの主力分野マップ

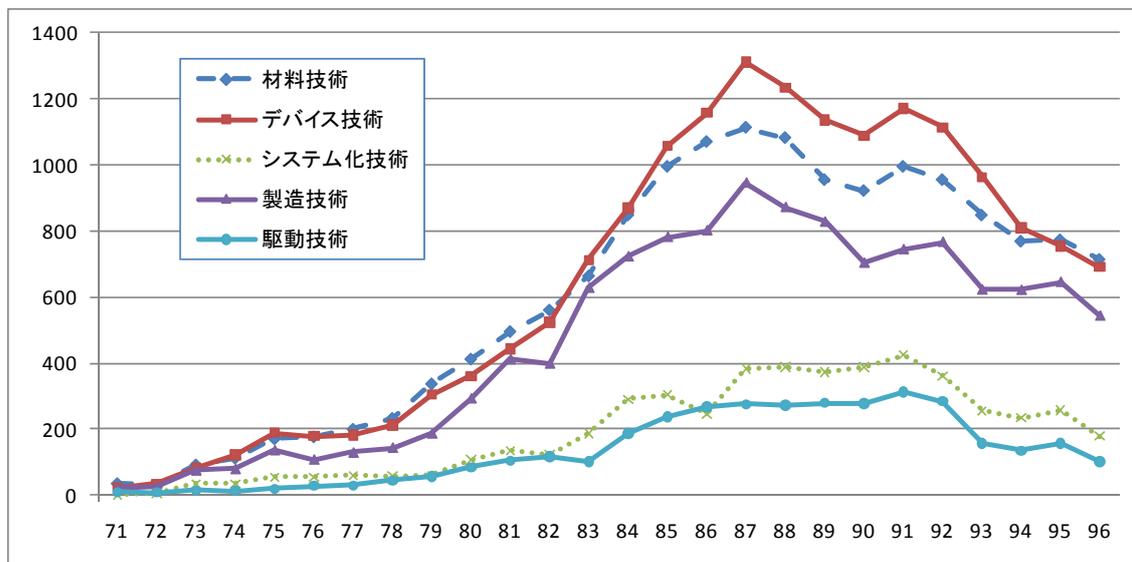


技術ごとに少し詳しく特許を見てみよう。半導体レーザは、さまざまな技術から構成されている。その半導体レーザの技術構成を特許庁の分類をもとにまとめた。分類は以下のとおりである。

- (1). 材料技術
- (2). デバイス技術
- (3). 製造技術
- (4). 駆動技術
- (5). システム化技術

これら5分野に関する特許出願件数は全体で25,496件（1971年～1996年の累積）である。その構成をみると、デバイス技術(32%)、材料技術(29%)、製造技術(23%)が大きな割合を占め3本柱を形成している。これに、システム化技術(9%)、駆動技術(7%)が続いている。図2-8は、半導体レーザの技術分野別における出願件数の推移を表したものである。

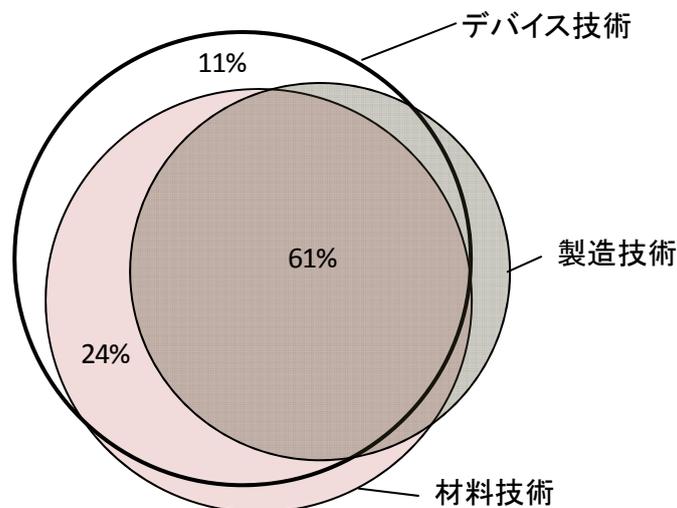
図 2-8 半導体レーザの技術分野別出願件数推移



出所：特許庁（1998）「技術分野別特許マップ（電気 10 半導体レーザ）」

特許庁（1998）は、材料技術、デバイス技術、製造技術の 3 つの技術は、技術開発の中心となっているだけでなく相互に密接な関係があることを指摘している。その各技術における技術開発の重なりを表したものが図 2-9 である。図 2-9 は、デバイス技術分野における材料技術と製造技術の重なりを示したもので、3 つの技術が重なる割合は、デバイス技術分野の 61% である。この重なり部分は材料技術分野からみると図示していないが、66% に達し、製造技術材料分野からみると 84% に達する。この様に半導体レーザの開発は、各技術分野の粋を結集して進められていることが分かる。

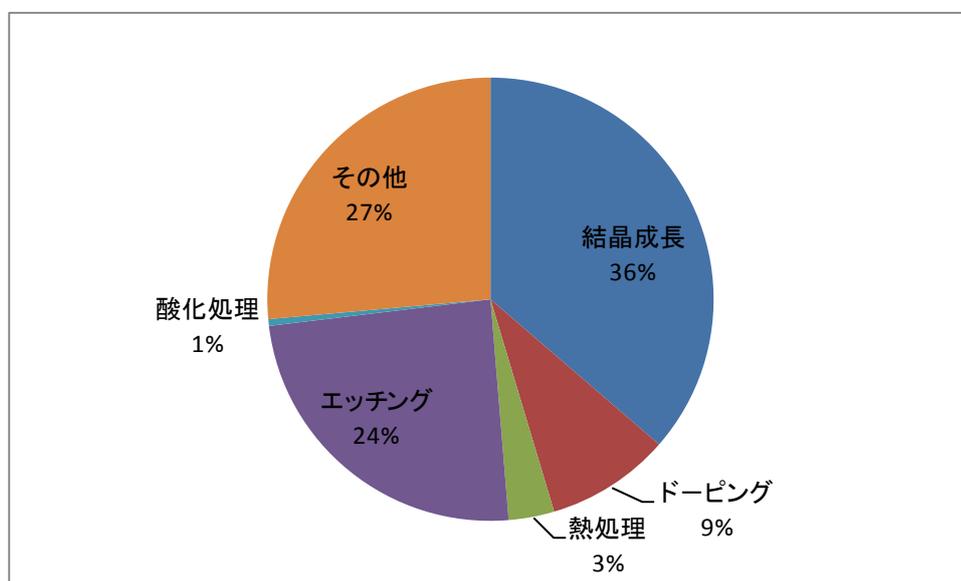
図 2-9 半導体レーザの材料技術，デバイス技術，製造技術の関連性



出所：特許庁（1998）「技術分野別特許マップ（電気 10 半導体レーザ）」に筆者一部加筆

後述するように、東芝の $0.6\mu\text{m}$ の半導体レーザにおいても、これら材料技術、デバイス技術、製造技術の 3 つの分野が開発の中心になっていた。ここでは、その中でも特に重要であった製造技術について見てみよう。製造技術には、結晶成長、不純物のドーピング、熱処理、エッチング、酸化膜形成などの諸技術がある。これら製造技術の 1971 年から 1996 年にかけての出願構成比を示したのが、図 2-10 である。結晶成長とエッチングが製造技術の開発において重要なテーマであったことがわかる。結晶成長は、半導体レーザの寿命や波長、生産コストなどを大きく左右する。そのため、半導体レーザの技術の中で最も重要なものの 1 つであると考えられていた。

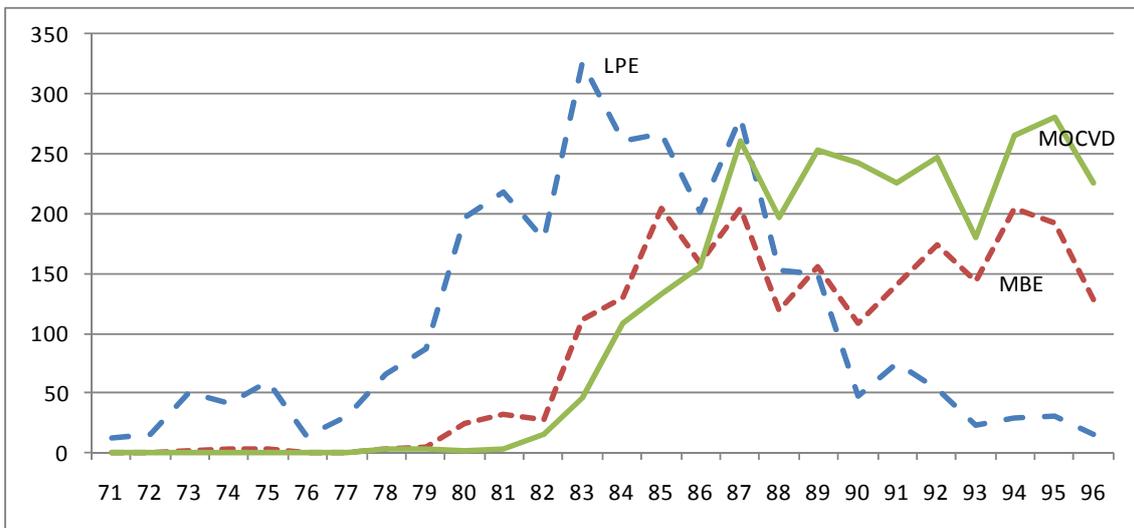
図 2-10 半導体レーザの製造技術の出願構成比



出所：特許庁（1998）「技術分野別特許マップ（電気 10 半導体レーザ）」

図 2-11 は、結晶成長法ごとの特許出願件数推移を示したものである。結晶成長法には、液相成長法（LPE : Liquid Phase Epitaxy）と気相成長法（VPE : Vapor Phase Epitaxy）がある。気相成長法の分類には代表的な 2 つの方法である、MOCVD 法（Metal Organic Chemical Vapour Deposition）と MBE 法（Molecular Beam Epitaxy）を取り上げた。この図から LPE の技術は 1980 年代半ばに技術転換期を迎え、VPE である MOCVD 法と MBE 法の技術に交代していることがわかる。これは半導体レーザの短波長化にともない、材料選択が変わっていくにつれて、LPE の技術では対応できなくなったことを示している。東芝は、1980 年代はじめから MOCVD 法の技術開発に取り組んでいた。

図 2-11 半導体レーザの結晶成長技術の出願年次推移



出所：特許庁(1998)「技術分野別特許マップ（電気 10 半導体レーザ）」をもとに筆者作成

3. 0.6 μ m 帯可視光半導体レーザーの開発

ここでは、東芝における半導体レーザーの研究の経緯と 0.6 μ m 可視光半導体レーザーの開発から事業化までについて見てみる。1983 年に開始された研究開発は、室温連続発振の達成と横モード制御構造の実現を経て、1988 年に製品化に至った。この開発の過程で実現した、InGaAlP 半導体レーザーは POS(Point of Sales)のシステムの高性能化、小型化を可能にし、バーコードリーダーの拡大普及に大きな貢献をした。

3.1. 東芝における半導体レーザーの研究開発

ここでは、0.6 μ m 帯半導体レーザーの研究開発を見る前に、東芝における半導体レーザーの開発がどのような経緯でなされるようになったのかを簡単に見てみよう。

前述のように、半導体レーザーは 1962 年にアメリカのイリノイ大学、GE、IBM、MIT の 4 つの組織がほぼ同時に達成した。半導体レーザーはルビーレーザーやガスレーザーと比べると小型で大きな可能性があると考えられていた。

東芝もすぐに半導体レーザーの研究開発を開始した。1963 年には東芝、三菱電機そして静岡大学が GaAs レーザ発振の追試を行った²¹。日立や日本電気もこの頃半導体レーザーの研究を開始していた。ただし、この研究開発は極めて小規模な実験レベルのものであった。また、当時の GaAs レーザは室温連続発振を達成するものではなく、実用化のためにはかなりの時間が必要だと考えられていた。

そのため、1960 年代中頃には半導体レーザーの研究を中断する企業が多かった。三菱電機は発光ダイオードの研究開発を進めるために半導体レーザーの研究を中断した。東芝も 1963 年に研究開発を開始していたものの、それ以降はほとんど手がつけられないままであった。

1968 年頃、東芝は半導体レーザーの研究を再開した。トヨタ自動車と、赤外の半導体レーザーを使って衝突防止のシステムを構築する構想が背後にあった²²。この衝突防止システムは実用化されなかったものの、東芝において GaAs レーザの室温連続発振を目標とした研究開発が再開されたのである。

1970 年に Bell 研究所とコーニングが達成した 2 つの技術的なブレークスルーは企業の半導体レーザー研究開発に大きな影響を与えた。Bell 研究所は GaAs レーザの室温連続発振を達成した²³。これによって半導体レーザーの実用化に向けた研究が大きく前進した。コーニングは光ファイバーを開発した²⁴。この光ファイバーは損失のロスが 0.8 μ m で最も小さくなるものであった。この波長は偶然 Bell 研究所で室温連続発振を達成したものと近かった。そのため、日本電気や富士通を初めとして、日立や三菱電機など多くの企業が光通信用の光源として半導体レーザーの研究開発を進めたのである。

²¹ 岡田純一、中川隆、櫛田孝司、飯田誠之(1963)、920-925 頁。

²² 筆者による 2009 年 10 月 19 日 (13:00-14:30) の海野陽一氏インタビューによる。

²³ Panish, M.B., Hayashi, I. and Sumski, S. (1970), pp.326-327.

²⁴ Kapron, F.P., Keck, D.B. and Maurer, R.D. (1970), pp.423-425.

1970年以降、光通信が半導体レーザーのアプリケーションとして注目されていた一方で、東芝は光通信よりもむしろ文書管理システムやビデオディスクといった光情報処理をアプリケーションとして構想していた。もちろん、光通信用の半導体レーザーの開発も進めたが²⁵、日本電気や富士通とは異なり、日本電信電話公社との関係がなかったため、これらの企業と比べると光情報処理に重きが置かれた。

1970年に室温連続発振を達成したものの、当時の半導体レーザーは寿命やレーザーのモード制御など多くの問題を抱えていた。これらを解決するために多くの企業が研究開発競争をしていた。当時の半導体レーザーの寿命は数分であり、寿命は深刻な問題であった。三菱電機が、長寿命化にはエピタキシーにおける酸素を減らすことが重要だと発表し、日本電気は活性層にアルミニウムを入れることが有効であると主張していた²⁶。1976年にはベル研究所が22度で平均5万時間の寿命を推定した²⁷。

寿命の問題とともに、問題となっていたのが、レーザービームの性質であった。光通信にとって半導体レーザーから発信されるレーザービームがきれい（単一モード）であることは重要であった。また、しきい電流が低いことも実用化の面から重要な課題であり、日本電気や三菱電機など多くの企業がモードの安定化やしきい電流の低減の問題に取り組んでいた。1976年に三重県志摩市の合歓の郷で開催された半導体レーザーの国際会議では、様々な半導体レーザーの構造が発表された。図3-1は各社が提案していた半導体レーザーの構造である。1982年の時点で、累計45件の構造が発表されていたという²⁸。

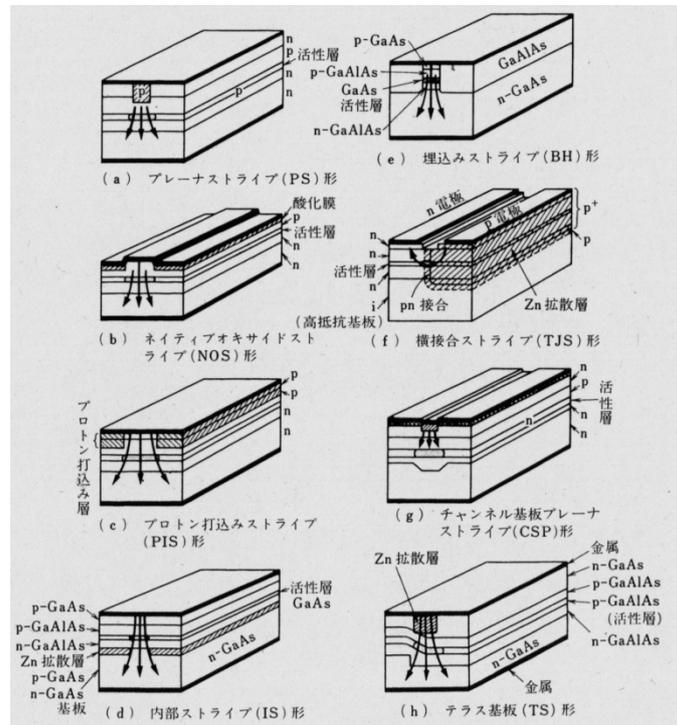
²⁵ 例えば、植松豊，奥田肇，木下順一（1984），521-524頁．茂木直人，武藤雄平，玄永康一，飯塚佳男（1985年），564-566頁．などがある。

²⁶ 当時の研究開発については、伊藤良一（1995），486-494頁．が詳しい。

²⁷ Joyce,W.B., Dixon,R.W., and Hartman,R.L. (1976), pp.684.

²⁸ 伊藤良一（1995），491頁．

図 3-1 半導体レーザの構造



出所：後藤顕也 (1991) 『オプトエレクトロニクス入門 (改訂 2 版)』 オーム社, 87 頁.

東芝も半導体レーザの構造を提案していたものの、注目を集めていたのは、日立が開発した埋め込みストライプ (BH) 形やチャンネル基板プレーナストライプ (CSP²⁹) 形や、三菱電機が提案していた横接合ストライプ (TJS³⁰) 形などであった。

1970 年代後半になると、多くの企業が光ディスク装置やレーザプリンタの光源として半導体レーザを検討し始めた。東芝も文書管理システムやレーザディスク、デジタル・オーディオディスク用の光源として半導体レーザを本格的に検討し始めた。

当時のエピタキシャル法は LPE であり、東芝も LPE を用いて GaAs 系の半導体レーザの開発を行っていた。デジタル・オーディオディスク用としては、1970 年代の終わりから LPE を用いた半導体レーザをパイオニアに試験的に納入していた。また、1983 年頃からはコンパクトディスク用のレーザのサンプルをソニーの厚木工場に納めていた³¹。コンパクトディスク用のレーザを開発する一方で、1980 年代に入ると文書管理用の光ディスクの開発も進めた。例えば、1982 年には文書管理用の光ディスクとして、Buried Multi Heterostructure (BMH) という構造を提案していた³²。

このように東芝の半導体レーザの研究は 1960 年代から始まったものの、それが本格化す

²⁹ Channeled Substrate Planar 屈折率分布導波形構造の 1 つである。

³⁰ Transverse Junction Stripe 屈折率分布導波形構造の 1 つである。

³¹ 筆者による 2005 年 10 月 27 日 (15:30-21:30) の後藤顕也氏インタビューによる。

³² 茂木直人, 岡島正季, 栗原春樹 (1982), 764-767 頁。

るのは 1970 年代後半になってからであった。1970 年代後半から東芝は、光ディスクや文書管理システムなどといった民生用の半導体レーザの研究開発を本格化させていったのである。

ここで少し当時の市場の状況を見てみよう。矢野経済研究所（1984）は、半導体レーザ市場を長波長・短波長と可視光の 2 つに分類し、それぞれの市場の規模とその成長を分析している。その調査によると、半導体レーザ市場の 1983 年度の市場規模は、主に通信用として使用される長波長・短波長レーザが 141 億円の実績で、構成比は 64%である。可視光レーザの市場は 81 億円であり、構成比は 36%となっている。その成長を見てみると 1983 年から 1984 年度にかけて長波長・短波長で 86%、可視光で 225%の伸びがそれぞれ見込まれるとしている。このデータは、可視光半導体レーザ市場が、CD の事業化を皮切りに拡大するであろうと考えられていたことが分かる。

可視光半導体レーザ市場をみると、1983 年に CD ($0.78\mu\text{m}$) が登場し、このレーザが生産台数では最も大きなものであった。その市場規模は、1983 年は 26 万 3000 個で、1984 年は 72 万個に拡大する³³勢いであった。当時の CD 用のレーザの価格はおよそ 2500～3000 円/個³⁴であった。1983 年において可視光半導体を生産していたメーカーは、主にシャープ、三洋電機(鳥取三洋)、三菱電機、日立製作所、松下電子工業、日本電気、富士通、東芝であった。そして同調査では、市場が活発化しているなかで、最も先行しているのがシャープであると指摘している。シャープの可視光半導体レーザの生産体制は、1983 年 3 月に 4 万個/月であり、その後順次ライン増設を行い、1983 年末時点で生産体制は 10 万個/月となっていることも調査で明らかにしている。他社の当時の生産体制としては、松下電子工業、三洋電機、日本電気等のメーカーの生産能力は月産 2 万個以上の規模であり、シャープが大きく先行していたことが分かる。東芝に関しては、「可視光半導体の分野で出遅れていた東芝も、1983 年 6 月に CD 用半導体レーザを新たに開発しており 1984 年春から量産を開始する予定である」とされている。1970 年代後半から民生用の光半導体レーザの研究を本格化させていった東芝であったが、他の企業との競争において必ずしも抜きに出ているわけではなかった。

3.2. 東芝： $0.6\mu\text{m}$ 可視光半導体レーザの開発

東芝の技術開発の重要な課題は、レーザの波長を短くする点にあった。光ディスクやプリンタ用としての半導体レーザはできるだけ短波長で発振するものが望ましいということは当時すでに研究者の間で強く認識されていた³⁵。

1970 年代後半から 1980 年代中頃までは半導体レーザの材料は GaAs 系³⁶であり、結晶成

³³ 矢野経済研究所 (1984).

³⁴ 矢野経済研究所 (1984).

³⁵ 例えば、後藤顕也 (1982), 395 頁.

³⁶ 発光領域である活性層の材料として GaAs で代表される III-V 族化合物半導体が広く用いられている。それは、電子が低いエネルギー準位に遷移して発光する際、直接遷移といわれる格子

長技術はLPEであった³⁷。コンパクトディスク用としてはGaAs系のレーザが使われたが、将来的により短波長で発振するレーザが望まれるという認識があり、波長を短くするためには、新しい材料で半導体レーザをつくる必要があった。

1980年はじめ、東芝は半導体レーザの短波長化のための新しい材料を探していた。当時、活性層/クラッド層の新しい素子材料として考えられていたのがGaAlAs系、InGaAsP系、InGaAlP系の3つの材料であった。その中でもInGaAlP系が、0.6 μ m帯可視光半導体レーザを実現する素子材料として東芝のなかで有望視されるようになった。

InGaAlPは必ずしも東芝が初めて研究を開始する材料というわけではなかった。1970年代後半から少しずつ研究はなされていた。1982年には日本電信電話公社がMBEを用いて可視光の発振に成功していた³⁸。NECはMOCVDを用いた可視光の発振を1984年に発表していた³⁹。このようにInGaAlPについては研究はなされていたものの、実用化はまだなされていなかった。当時は、CDが発売され、大きな売上げを上げようとしていた状況であった。そのため、多くの企業はCD用のGaAs系のレーザの量産技術の開発を進めており、次世代の短波長化のための研究が始まったばかりという状況であった。

1983年、東芝の0.6 μ m可視光半導体レーザの開発が開始された。研究開発は総合研究所のなかのメンバーで、3~4人の1つのチームから始まった。それまで別のメンバーにより、GaAlAs系レーザ(0.78 μ m)の開発が行われていたが、InGaAlP系材料の開発はこれらの技術がそのまま使える訳ではないので、東芝としては全く新規なプロジェクトといえる。ただし、プロセス技術や評価技術等は従来の半導体レーザと共通する部分があり、GaAlAs系レーザ開発で蓄積された技術、人材も活用された。

技術開発に関わった東芝の波多腰氏は、0.6 μ m半導体レーザの開発を振り返り、「実用化への大きなブレイクスルーは、室温連続発振の達成と横モード制御構造の実現であり、こ

振動などをともなわない状態変化をするため、発光効率を高くする上でもシリコンやゲルマニウムなどの間接遷移形に比べて優れていることによるものである。

また、GaAsはシリコンよりも高速で動作する次世代の半導体材料として注目され、結晶成長技術や不純物拡散技術が他の化合物半導体から先行していた。半導体レーザとして直接遷移形が必須条件となり、真っ先にGaAsが取り上げられ、その後のIII-V族化合物半導体隆盛の時代へ進んでいった。半導体レーザとIII-V族化合物半導体は幸運なめぐり合わせをしたのである。その後の素子材料技術はデバイス特性に対するさまざまな要望を満足させるために、例えばGaAs系材料に注目すると、GaAlAs、GaAlAsPなど多元化合物を使用する方向へ発展していった。

2元系では、バンドギャップエネルギーEGが固定され、発振波長はその材料固有の波長に定められる。3元系になると、第3成分の組成を変えることによって発振波長を希望する波長にデザインすることができる利点が生まれる。さらに4元系では、発振波長を目的の値にした上で歪を緩和させるために格子定数を最適化したり、光の屈折率を最適化することができる。多元にするほど材料設計の自由度は増すが、他方製造方法は複雑化するのでデバイスの特性とコストを考慮して実用にできる材料が選択されて行くことになる。(特許庁(1998))

³⁷ 図2-10参照のこと。

³⁸ Asahi,H., Kawamura,Y. and Nagai,H. (1982), pp.492-498.

³⁹ Hino,I., Kobayashi,K. and Suzuki,T. (1984), pp.746-748.

れを皮切りに製品化が開始された」としている⁴⁰。このレーザは、まずバーコードリーダーに応用され、それ以降高出力化、高性能化等のさまざまな開発が進められて、現在では光ディスク用光源として必須のデバイスとなっている。以下では、 $0.6\mu\text{m}$ 半導体レーザの技術開発における課題とその克服を、室温連続発振の達成と横モード制御構造の実現という2つの点を中心に取り上げる。

3.2.1. 室温連続発振の達成 (InGaAlP 材料と MOCVD 法)

前述のように、短波長化を達成するために新しい材料を探していた東芝は、InGaAlP 系の材料に注目し研究開発を開始した。

InGaAlP 系の材料で半導体レーザを製作しようとした場合に、結晶成長の2つの問題がでてきた。1つは材料を変更したときに結晶成長に関して起きた問題である。それまで CD 用として使われてきた GaAlAs 系材料と InGaAlP 材料を比較した場合、前者が3元系であるのに対し、後者は4元系という違いがある。これは結晶成長の難しさに大きく影響する⁴¹。GaAlAs 系では幸運なことに GaAs と AlAs との格子定数がほとんど同じのために GaAs 上の GaAlAs 成長では格子整合条件⁴²が自動的に満たされていた。それに対して InGaAlP 系では、In と Ga,Al との原子半径が大きく異なるために格子整合条件を満たすためには組成の精密な制御が要求された。この制御ができないと、組成変動で格子整合条件が満たされなくなってしまう。格子整合条件が満たされなければ、満足なレーザ光が発振されない。これが材料特性における課題であった。

もう1つの課題は、従来広く用いられていた液相成長 (LPE) 法が InGaAlP 系材料の組成制御が極めて難しく、レーザ製作のための半導体結晶が得られないということであった。液相成長 (LPE) では Al の偏析係数⁴³が大きいために成長中に Al 組成が変動 (減少) してしまい、組成制御が困難であることが原因であった。これまでの結晶成長方法では InGaAlP という新しい材料で半導体レーザを製造することが難しかったのである。

1983 年、東芝は材料と結晶成長に関する課題を克服するために、液相成長 (LPE) に代わって、有機金属気相成長 (MOCVD) 技術の開発に着手した。結晶成長方法を変更する大

⁴⁰ 波多腰玄一, 大場康夫, 石川正行, 菅原秀人 (2005), 27-32 頁.

⁴¹ 化合物半導体には、それを構成する元素の数が2つの2元系のほかに、3元、4元、5元系などの多元系がある。2元系は1組の元素を選ぶと、エネルギーバンドギャップエネルギーが決まり放射する光の波長が定まる。3元系になると組成によってエネルギーが連続的に変化するので、目的に合致する発光波長をもつ活性層材料を設計することができる。さらに、4元系では格子定数、光の屈折率などもう1つの自由度を最適化することができる。成分が多くなると製造技術が複雑になり制御性の問題がでてくる。

⁴² エピタキシャル成長においては、基板とエピタキシャル層 (薄膜) の格子定数を一致させる必要がある。格子整合しない場合には、結晶中には弾性力学的に歪エネルギーが導入され結晶内の結合エネルギー (バンド構造) を変化させるとともに、熱力学的にも不安定になる。(平田照二 (2001))

⁴³ 偏析とは、物質中の不純物元素の分布が不均一になる現象である。凝固が始まった部分は不純物が取り込まれないが、後から凝固した部分には多くの不純物が含まれるという現象である。

きな決断であった。技術的には、精密な組成制御を可能にするため減圧 MOCVD を採用し、また中間反応による組成変動をなくすために原料としてメチル系有機金属を選択した。さらに半導体レーザ構造の基本となるダブル・ヘテロ構造を実現するために、伝導型制御をはじめとする結晶成長技術の開発に取り組んだ。

InGaAlP 材料による開発は、競合他社の研究、学会等の発表、研究論文等からすると、研究がそれほど進んでいない材料であった⁴⁴。しかし東芝は InGaAlP で $0.6\ \mu\text{m}$ の可視光半導体レーザの研究開発に取り組み、1985 年、InGaAlP の MOCVD による結晶成長技術を確立した。この MOCVD 法による InGaAlP 結晶の成長で注目された技術の 1 つとして傾斜基板上の成長があった。InGaAlP 系では結晶の組成が同じであっても、III 族原子が規則的に並んで自然超格子を形成している状態と無秩序に並んでいる状態とでバンドギャップエネルギーが異なり、後者の場合のほうがバンドギャップエネルギーが大きくなった。このような結晶の秩序状態は成長条件や基板の面方位に依存して変わった。しかしある一定方向に傾いた面方位の基板結晶上に InGaAlP を成長させると自然超格子の形成が制御され、同じ組成でもバンドギャップエネルギーの大きい結晶が得られたのである⁴⁵。これを利用すると Al 組成比の小さい InGaAlP 活性層で短波長化を実現できるため、Al 増加に伴う酸素不純物の存在に起因した非発光再結合⁴⁶を低減できた。またクラッド層として用いる場合にも、バンドギャップを大きくできるため、活性層から p クラッド層へのキャリアオーバーフロー⁴⁷を低減できる効果があった。短波長化という点での大きな成果であった。

また、デバイスの電気特性の改善もなされた。InGaAlP 結晶への p 型不純物 Zn の取り込みが基板面方位に依存して変わった。傾斜基板を用いることにより、p 型結晶の高濃度ドーピング⁴⁸ができると同時に、Zn アクセプタの活性化率を低くしてしまう酸素の取り込まれを低減する効果のあることも確認できており、両者の効果で高いキャリア⁴⁹濃度の p 型結晶を実現することも分かっていた。p 型結晶の高濃度ドーピングはデバイスの電気特性改善に大きな効果があった。そのため p-InGaAlP の高濃度ドーピングは重要な技術であった。

1985 年、東芝はこれらの材料の変更と、それに伴う結晶成長法の技術変化に伴う問題を解決して、 $0.6\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザの室温連続発振を達成した。1983 年に新しい材料で研究を開始し、2 年が経っていた。MOCVD 装置は大きな投資が伴うものであり、研究所としても投資への大きな決断が必要であった。この室温連続発振の結果は早速その年の化合物

⁴⁴ 筆者による 2009 年 5 月 18 日の波多腰玄一氏インタビューによる。

⁴⁵ Suzuki, M., Nisikawa, Y., Ishikawa, M. and Kokubunn, Y. (1991), pp.127-130.

⁴⁶ 発光現象は、互いに注入されたキャリア同士が、禁制帯を介して再結合する際に、電気エネルギーを光のエネルギーに変換して発光する。再結合する際に放出するエネルギーは、光になるものと熱になるものがある。光になるものを発光再結合、熱になるものを非発光再結合という。結晶中に欠陥や不必要な不純物があると、非発光再結合の中心となり熱に変わってしまう。(平田照二 (2001))

⁴⁷ 活性層に注入したキャリアが DH 構造の障壁を超えてクラッド層に流れ出し、無効電流になる現象のこと。

⁴⁸ 半導体に極性をもたせるために不純物を混入させる操作のこと。

⁴⁹ 半導体中の電流の担い手である、電子とホールを総称をいう。

半導体国際会議において報告され大きな注目を集めた。しかし開発競争の熾烈さを物語るかのように、同じ国際会議で当時の競合企業であった日本電気やソニーも 0.6 μ m 帯可視光半導体の室温連続発振達成の報告を行っていた。当時の東芝の研究担当者の一人である波多腰氏は、「他社がおおよそどのようなことをやっているかは予想していたので焦りはなかったが、発表にも 1 日を争うような状況で、極めて緊迫した時期であった。」⁵⁰と当時を振り返っていた。

3.2.2. 横モード制御構造⁵¹の実現

東芝は室温連続発振を達成した後は、このレーザの製品化にあたっての最大の課題であるデバイスの信頼性確保⁵²の研究に移った。そのなかでも横モード制御は、大きな課題であり、この横モード制御ができないと光ディスクや光通信への応用が不可能になるものである。具体的にどのような問題が生じるかという点、①光出力特性に折れ曲がりやゆがみ（キック）が生じ、安定動作ができなく、しきい値もあがる、②光スポットが拡がり、分布形状が変わる。その為 FFP⁵³が単峰性を失い「中央が暗いモード」となる、③ノイズの発生が多く、情報伝達能力が低下する、ということになる。この横モード制御の研究のなかで、関連するいくつかの課題が出てきた。

まず東芝が採用した InGaAlP 系の材料は、1985 年に開発された CD 用レーザ (0.78 μ m) の GaAlAs 系材料と比較した場合、伝導バンドオフセットが小さいこと、熱低効率が大きいことに加え、結晶成長法が限定されることから、実現できるデバイス構造にも制約があった。図 2-9 でみたように、半導体レーザの技術開発では、デバイス技術、材料技術、製造技術の 3 つは密接に関連している。InGaAlP 材料の特性および用いる製造技術である結晶成長法に起因して、デバイス設計の上でいくつかの課題があった⁵⁴。それらの課題は光ディスク応用で求められる半導体レーザの寿命などの信頼性に関してのものであった。そのためこのレーザの実用化のためには乗り越えなくてはならない課題であった。

さらに赤色レーザの応用上重要な高出力化および短波長化の開発に関わる課題が出てき

⁵⁰ 筆者による 2009 年 5 月 18 日の波多腰玄一氏インタビューによる。

⁵¹ 共振器軸に垂直な横方向の光分布に対応する導波モードを、導波構造によって（通常は基本モードに）安定化させることをいう。（波多腰玄一（1997））

⁵² 信頼性の評価は、素子寿命を推定するために高温加速試験をする。通常 70°C 程度の高湿環境下で一定出力の動作状態と駆動電流の変化を調べる。通常 APC 駆動で駆動電流が 20% 上昇するまでの時間を素子寿命という。（平田照二（2001））

⁵³ Far Field Pattern。半導体レーザからどのような拡がり角で光が放射されているかという状態を表す特性のこと。（平田照二（2001））

⁵⁴ 大きく 5 つの問題があった。(1).MOCVD 法では溝や段差上の成長が困難である。(2).組成差に対して伝導帯側バンド不連続が小さく、電子のオーバーフローが起き易い。(3).(2)と逆に価電子帯側バンド不連続が大きく p 型層ヘテロ界面の電気抵抗が大きい。(4).材料の熱低効率が大きいため、温度特性を考慮したデバイス設計が必要である。(5).赤色光に対して吸収係数の大きい GaAs を含む層構造に対するデバイス設計が必要である。（波多腰玄一（2005））

た。いずれも温度特性の向上が実用化のための大きな課題となっていた。温度特性は素子の信頼性に密接に関係していた。簡潔に言えば、レーザが連続発振できる温度の上限が低いと、それが劣化の原因となり信頼性が損なわれるのである。高出力化、短波長化やデバイスの信頼性確保のためには、レーザの低しきい値化⁵⁵および熱抵抗の低減が極めて重要な技術であることが分かっていたため、これに向けた研究開発を進めていった。InGaAlP レーザの連続発振可能な最高温度を制御する大きな要因のひとつは、活性層から p クラッド層へのキャリアオーバーフローであった。この課題の対策として開発された p クラッド層の高濃度ドーピング技術やひずみ活性層技術は、赤色レーザの高温高出力発振の実現に大きく寄与した。低しきい値化や低熱抵抗化は最高発振温度を上げるのに大きな効果があった。また、傾斜基板上の成長、引張ひずみ活性層⁵⁶、多重量子井戸 (MQW) 構造⁵⁷、多重量子障壁 (MQB) 構造⁵⁸ 等の半導体レーザの短波長化に必要な各技術を開発していった。その結果、InGaAlP レーザにおける最高発振温度も各種技術開発により年々上昇し、信頼性確保の課題に解決の道が見えた。

1986 年、光ディスク応用、特に高出力化で必須の横モード制御構造の開発に成功して、さらに実用化に向けての長時間の信頼性が達成できた。信頼性が確保できたということは、それまでの研究成果の積み重ねであることはもちろん、InGaAlP が赤色レーザの材料として適したものであることを実証するものでもあった。これにより横モード制御構造の基本的なデザインが出来上がったのである。

この InGaAlP 半導体レーザの開発の過程において、副産物として重要な技術が生まれた。InGaAlP レーザのデバイス設計は、電気特性⁵⁹、光学特性⁶⁰、温度特性⁶¹を含めた解析が非常に重要であり、その解析は困難なものであった。そのため、1988 年に東芝は、デバイス開発と並行してこれらの解析をパソコン上で容易にできる光半導体デバイスシュミレータを開発した⁶²。これは 0.6 μm 可視光レーザの研究の大きな副産物であった。光半導体デバ

⁵⁵ しきい値とは、光が急に立ち上がる電流値のことである。

⁵⁶ 結晶格子定数がクラッド層と異なる活性層を用いた構造である。活性層にかかるひずみの効果で発振波長や利得特性等が変化する。ひずみの正負により、圧縮ひずみと引張ひずみがある。活性層は格子緩和の発生する臨界膜厚以下にする必要があるため、量子井戸構造と組み合わせて用いられることが多いのである。(波多腰玄一 (1997))

⁵⁷ 電子のドブロイ波長以下の超薄膜 (井戸層) をそれより禁制帯幅の大きい層 (障壁層) で挟んで形成されるポテンシャル井戸にキャリアを閉じ込める構造のことをいう。(波多腰玄一 (1997))

⁵⁸ 伊賀健一教授により考案された構造で、半導体多層膜中における電子の干渉効果を利用して活性層からあふれ出す電子を反射させることにより、実効的なエネルギー障壁を大きくできる超薄膜多層構造をいう。(波多腰玄一 (1997))

⁵⁹ レーザ光線が注入電流に対してどのくらい出てくるかという光出力特性である。

⁶⁰ 端面での光の発光形状、光の反射角の特性、反射パターン特性、発光している波長成分、光の強さ、波長ゆらぎ、非点隔差などである。

⁶¹ 温度が上昇すると「しきい値が上がる」「効率が下がる」「最高出力が減る」といった特性の劣化が生じること。

⁶² Hatakoshi,G., Kurata,K., Iwasawa,E. and Motegi ,N. (1988), pp.923.

イスでは、電子、正孔の分布、バンド構造、発光分布などの解析が必要だった。特に半導体レーザでは発振導波モードとその分布および光出力に依存した誘導放出再結合項が電子、正孔分布を決める電流連続方程式の中に入り、また電子、正孔分布に依存した利得分布が導波モードを決める屈折率虚数部に関わるため、電子系方程式、光学系方程式を自己無撞着（セルフコンシステント）に解く必要があった。さらに InGaAlP 系レーザでは上述のように熱特性も重要であるため、場合によっては熱伝導方程式も同時に解く必要があった。デバイスシュミレータで、これらを差分近似と行列解法による数値計算によって解くことができるようになった。

3.3. 事業化

このように 1983 年に開発を始めて、1985 年に室温連続発振を達成し、1986 年に横モード制御構造を確立して半導体レーザとしての基本的なデザインが出来上がった。そして 1988 年 2 月、東芝は世界初の赤色レーザ製品化 (TOLD9200⁶³, 波長 670nm) を実現した。

東芝はこのレーザをバーコードリーダーに実用化した。0.6 μ m 帯可視光半導体レーザは、これまでの He-Ne バーコードリーダーの代替技術として注目されていた技術⁶⁴であった。東芝はこれまで、He-Ne バーコードリーダーの製品市場では日本電気に後塵を拝していた⁶⁵。赤色半導体レーザを利用したバーコードリーダーの製品化は、POS システム自体の急速な市場ニーズをとらえた時期に開発に成功したこともあり、東芝の半導体レーザを利用したバーコードリーダーは急激に市場シェアを拡大した⁶⁶。

しかしながら、この 0.6 μ m 帯可視光半導体レーザをバーコードリーダーで実用化しようという計画が事前にあったわけではなかった。正確に言えば、このデバイスが研究所から事業部に引き渡されたときは、何の製品で実用化するか決まっていなかった。1984 年に東芝は、赤色半導体レーザの研究を進めているときに、ストライプ構造が利得導波型半導体レーザ⁶⁷が開発された。この時点で事業部が中心となって、このデバイスが何に使えるか検討を重ねた結果、バーコードリーダーで実用化することが決まったのである。後述する

⁶³ TOLD9200(S) Toshiba Laser Diode, 3mW Power, 680nm Wave Length, 70mA Current

⁶⁴ 技術的にはこれ以上の進歩は期待できず、また、その応用の大部分は今後半導体レーザ、特に可視光半導体レーザに取って代られていくことが予想される。(矢野総合研究所 (1984))

⁶⁵ POS スキャナ用 He-Ne レーザの場合、いまのところ、日本電気とスペクトラフィジック社の 2 社で占められており、他社の入り込む余地はほとんどない (矢野経済研究所 (1984))

⁶⁶ 筆者による 2009 年 5 月 18 日の波多腰玄一氏インタビューによる。

⁶⁷ ストライプ構造は基板面に平行な積層膜の横方向構造を不均一にして、活性領域を共振器に沿って帯状に限定する素子構造である。この構造は、電極形状を帯状にするなどして電流路を制限した利得導波型と、活性層またはクラッド層の横方向の構造を工夫して発光領域を限定した屈折率分布導波型の 2 種類に大別される。(特許庁 (1998))

⁶⁸ ゲイン・ガイド、利得ガイドとも呼ばれる。屈折率分布導波型、インデックス・ガイドと対比される用語である。レーザの横モードを整えるために作り込んだストライプ構造の一種である。(平田照二 (2001))

が、1989年に東芝は横モード制御構造レーザ（TOLD9211⁶⁹）を製品化したときのストライプ構造は屈折率導波型というもので、その後のスタンダードとなっていた⁷⁰。その意味でも、バーコードリーダーで事業化されたデバイスは、研究途中の中間生産物ということがいえる。

バーコードリーダーは、デジタル情報をバーの形で印刷したもので、光を使ってその情報を読み取るものである。スーパーのレジや輸送業の種分けなど、流通分野で広く利用されている。このバーコードリーダー用の半導体レーザに望まれる特性は波長であった。波長が短めの赤色波長が望まれていたのである。その理由は、バーコード印字のインクの反射率と波長依存性にあった。バーコードの黒バーの反射率は、波長が600nm付近に近づくと反射率が落ちるため、明暗比（コントラスト）が大きくなる。つまりバーコードが検知しやすくなる。また短波長赤色であると人の目にもよく見えるためバーコードにレーザ光線を当てる操作性が向上する。その結果、東芝にとって利得導波型の半導体レーザが製品として大きな市場を獲得したことがこれまでなかったが、このデバイスで大きな成功を収めたのである。

1989年、東芝は横モード制御構造レーザ（TOLD9211⁷¹）を製品化した。前述のSBR構造は、MOCVD結晶成長の制約と利点を巧みに活用した構造であった。この製品は光ディスクなどの高出力化に大きな貢献をした。その後各社で製品化された横モード制御構造赤色レーザの原形となった。東芝はその後、高出力化、高性能化等のさまざまな開発を進めて、現在では光ディスク用光源の重要な基幹技術となった。

⁶⁹ TOLD9211(S) Toshiba Laser Diode, 5mW Power, 680nm Wave Length, 40mA Current

⁷⁰ 開発当初多く用いられていた利得導波形は1980年代の半導体レーザ実用化期に向かって減少し、屈折率分布導波形の約1/2になって現在に至っている。（特許庁（1998））

⁷¹ TOLD9211(S) Toshiba Laser Diode, 5mW Power, 680nm Wave Length, 40mA Current

4. おわりに

本ケースは、半導体レーザーの技術開発において短波長化にともなう、高出力化、高密度化、高信頼性等の熾烈かつ漸進的な技術開発競争であった。半導体事業をおこなう企業にとっては「短波長化」は重要な意味をもっていた。換言すれば、明確な技術トラジェクトリが、すでに研究者のなかに成立していた。そのため研究の大義名分がはっきりしており、経営陣の理解も得られたことが、企業内における経営資源の獲得に大きく寄与したと考えられる。例えばMOCVD装置には1台あたり数億円の投資が必要だった。しかしそのような高額な装置も研究所に配備され、研究を行う環境が与えられた⁷²。目的が明確であったことだけでなく、「これまでに世の中になかった、目に見える光を発振する半導体レーザーを、自分達の手で実現したい」という研究者の熱意が、研究開発を推進できた大きな要因の一つであった。

また東芝のケースでは技術開発を先行で行い、そのデバイスが開発された後、製品化が検討された。東芝はこのケースのデバイスを当初からバーコードリーダーの光源として開発したものではなかった⁷³。むしろ短波長化することが研究開発の主題であった。このケースにおける東芝の0.6 μ m半導体レーザーにおいては、デバイスの技術開発が先行して進んでいた。バーコードリーダーの製品化は、半導体レーザーの波長を短くしていく競争の過程で、事業化できたものであり、あくまでも研究開発の最終的な目標はレーザーの短波長化であった。

⁷² 筆者による2009年5月18日の波多腰玄一氏インタビューによる。

⁷³ 筆者による2009年5月18日の波多腰玄一氏インタビューによる。

参考文献

- Asahi, H., Kawamura, Y. and Nagai, H. (1982) "Molecular Beam Epitaxial Growth of InGaAlP on (100) GaAs," *Journal of Applied Physics*, Vol.53, pp.492-498.
- Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D., Soltys, T.J. and Carlson, R.O. (1962) "Coherent Light Emission from GaAs Junctions," *Physical Review Letters*, Vol.9, pp.366-368.
- Hatakoshi, G., Kurata, K., Iwasawa, E. and Motegi, N. (1988) "General Two-Dimensional Device Simulator for Laser Diodes," *Trans. IEICE*, Vol.E71, pp.923.
- Hatakoshi, G. (1997) "Visible Semiconductor Lasers," *The Journal of The Institute of Electronics Information and Communication Engineers*, Vol.80, pp.692-96.
- Hino, I., Kobayashi, K. and Suzuki, T. (1984) "High Aluminum Composition AlGaInP Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition-Impurity Doping and 590 nm (Orange) Electroluminescence," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.23, pp.746-748.
- Holonyak, N. Jr. and Bevacqua, S.F. (1962) "Coherent (Visible) Light Emission from GaAs 1-xPx Junctions," *Applied Physics Letters*, Vol.1, pp.82-83.
- Joyce, W.B., Dixon, R.W. and Hartman, R.L. (1976) "Statistical Characterization of The Lifetimes of Continuously Operated (Al,Ga)As Double-Heterostructure Lasers," *Applied Physics Letters*, Vol.28, pp.684.
- Kapron, F.P., Keck, D.B. and Maurer, R.D. (1970) "Radiation Losses in Glass Optical Waveguides," *Applied Physics Letters*, Vol.17, pp.423-425.
- Nathan, M.I., Dumke, W.P., Burns, G., Dill, F.J. and Lasher, G.J. (1962) "Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n Junction," *Applied Physics Letters*, Vol.1, pp.62-64.
- Panish, M.B., Hayashi, I. and Sumski, S. (1970) "Double-Heterostructure Injection Lasers with Room-Temperature Thresholds as Low as 2300 A/cm²," *Applied Physics Letters*, Vol.16, Issue 8, pp.326-327.
- Quist, T.M., Rediker, R.H., Keyes, R.J., Krag, W.E., Lax, B., McWhorter, A.L. and Zeiger, H.J. (1962) "Semiconductor Maser of GaAs," *Applied Physics Letters*, Vol.1, 1, pp.91-92.
- Suzuki, M., Nisikawa, Y., Ishikawa, M. and Kokubunn, Y. (1991) "Effects of Substrate Misorientation on Improvement of Electrical Properties in Zn-Doped InAlP Alloys," *Journal of Crystal Growth*, Vol.113, pp.127-130.
- Townes, C. H. (1999) *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*, Oxford University Press. (C.H.タウンズ, 霜田光一訳 (1999) 『レーザはこうして生まれた』岩波書店.)
- Yamamoto, S., Hayashi, H., Hayakawa, T., Miyauchi, N., Yano, S. and Hijikata, T. (1982) "Room-Temperature CW Operation in the Visible Spectral Range of 680-700 nm by AlGaAs Double Heterojunction Lasers," *Applied Physics Letters*, Vol.41, pp.796-798.
- 安藤幸司 (2003) 『光と光の記録』産業開発機構株式会社.
- 伊賀健一編 (1994) 『半導体レーザ』オーム社.
- 伊藤良一 (1995) 「半導体レーザ」『光学』第24巻第6号, 486-494頁.
- 応用光エレクトロニクスハンドブック編集委員会編 (1989) 『応用光エレクトロニクスハン

- ドブック』昭晃堂.
- 岡田純一, 中川隆, 櫛田孝司, 飯田誠之 (1963) 「GaAs ダイオードレーザ」『東芝レビュー』第 18 巻第 8 号, 1963 年, 920-925 頁.
- 後藤顕也 (1982) 「シーズとニーズ」『応用物理』第 51 巻第 4 号, 395 頁.
- 後藤顕也 (1991) 『オプトエレクトロニクス入門 (改訂 2 版)』オーム社.
- 渋谷寿 (2003) 『光通信物語—夢を実現した男たちの奇跡』オプトロニクス.
- 植松豊, 奥田肇, 木下順一 (1984) 「集積化波長制御半導体レーザ」『東芝レビュー』第 39 巻第 6 号, 521-524 頁.
- 神戸宏 (2001) 『はじめての半導体レーザ技術』工業調査会.
- 栖原敏明 (1998) 『半導体レーザの基礎』共立出版.
- 特許庁 (1998) 「技術分野別特許マップ (電気 10 半導体レーザ)」
- 波多腰玄一 (1997) 「可視光半導体レーザ」電子情報通信学会誌 Vol.80, No.7, 692-696 頁.
- 波多腰玄一, 大場康夫, 石川正行, 菅原秀人 (2005) 「0.6 μ m 帯可視光半導体レーザ」『MICROOPTICS NEWS 23』No.4, 27-32 頁.
- 平田照二 (2001) 『わかる半導体レーザの基礎と応用』CQ 出版社.
- 茂木直人, 岡島正季, 栗原春樹 (1982) 「光ディスク書込み用高出力 GaAlAs BMH レーザ」『東芝レビュー』第 37 巻第 9 号, 764-767 頁.
- 茂木直人, 武藤雄平, 玄永康一, 飯塚佳男 (1985) 「MOCVD 方による光通信用 0.81/0.89 μ m GaAlAs レーザ」『東芝レビュー』第 40 巻第 7 号, 564-566 頁.
- 矢野経済研究所 (1984) 『拡大するレーザー産業の市場実態と今後の需要展望』矢野経済研究所.

Appendix

表 1 : レーザの分類

分類	レーザー	出力	発振波長	用途
ガスレーザー	ヘリウムネオンレーザー	10mW~100mW 連続発振	赤色, 単色 k, 632.8nm	光軸アラインメント調整 長さ測定・干渉計
	アルゴンイオンレーザー	100mW~20 W 連続発振	青~緑 マルチライン	光軸アラインメント調整 レーザープリンタ 高速度カメラ用光源
	炭酸ガスレーザー	1kW~50kW 連続発振	赤外 10.6 μ m	金属溶接・金属溶断・金属加工
	エキシマレーザー	1J~10J 低周波パルス発振	紫外 210nm~300nm	ポリマー微細加工・学術用光源 (LIF)
固体レーザー	ルビーレーザー	100mJ~1J 単発パルス	赤 694.3 μ m	ホログラフィー
	YAG レーザ	10mJ~2J 単発・連続	赤外 1.06 μ m	金属微細加工 学術用光源 (LIF) 高速度カメラ用光源
	ガラスレーザー	1J~2J 単発パルス	赤外 1.06~1.08 μ m	ホログラフィー
金属レーザー	ヘリウム・カドミウムレーザー	10mW~50mW 連続発振	青色, 白色	医学用・レーザープリンタ
	銅蒸気レーザー	10W~120W 高周波パルス	2 波長, 511nm, 578nm	高速カメラ用ストロボ光源 ウラン濃縮ポンプレーザー

				金属微細加工
	金属レーザー	1W～3W 高周波パルス	赤色 628nm	医学用 皮膚セラピー
半導体レーザー	半導体レーザー	1mW～100W 連続, パルス	青～赤外	通信 レーザー励起光源 高速度カメラ用光源 金属加工 レーザーポインタ オプティカルピックアップ光源
液体レーザー	色素レーザー	～200W, ～400W 連続, パルス	可変波長	理化学分析用 ウラン濃縮分離

出所：安藤幸司 (2003) 『光と光の記録』産業開発機構株式会社, 137 頁.

IIIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2010

NO.	著者	タイトル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003年2月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004年3月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004年3月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004年3月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004年3月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績V字回復への改革」	2004年3月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004年3月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004年3月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004年3月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004年3月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004年3月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004年3月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004年10月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004年10月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004年11月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
CASE#10-01	工藤悟志 清水洋	「東芝：0.6 μ m 帯可視光半導体レーザの開発」	2010 年 1 月