

解説

半導体レーザー

伊藤 良一

東京大学工学部物理工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1995年4月4日受理)

Semiconductor Lasers

Ryoichi ITO

Department of Applied Physics, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに

私たちは毎日半導体レーザーのおかげをずいぶん被っている。LPはすっかりCDにとって代られ、買い物に行くとバーコードスキャナーが値札を読む。職場ではパソコンの出力はレーザープリンターで行われ、電話やFAXの信号は光ファイバーを通して相手に届いている。カラオケパーではレーザーディスクが活躍している。これらの機器、装置、システムでキーデバイスとして働いているのはいうまでもなく半導体レーザーである。

現在、半導体レーザーはレーザーの中で圧倒的にたくさん使われているレーザーである。表1はレーザーの年間生産数を用途別にリストアップしたものである¹⁾。3列目の数字はそれぞれの用途に使われているレーザーのうち半導体レーザーが占める割合(%)を表している。レーザーの主要用途である光メモリー、プリンター、娯楽、バーコードスキャナー、通信で半導体レーザーが主役を演じていることがわかる。半導体レーザーの出現でレーザーが本格的な実用化時期を迎え、モダンなフォトニクスが開花したといっても過言ではないであろう。

この半導体レーザー、いまや押しも押されぬ製品だが、その成長、発展の道は必ずしも平坦ではなかった。そしてその道を切り開くのに日本の研究者、技術者が少なからぬ貢献をしたのである。わたしは、1970年から1979年の間、企業(日立製作所中央研究所)の一研究者として半導体レーザーの研究開発に従事する幸運に恵まれた。どのような研究でもそうだが、半導体レーザーが一人前のデバイスに育つまでには、世界中の研究者が闇夜に手探りで進むような時期があった。渦中にい

たものの一人として、その時期の様子を記すことは、若い人々のために多少の参考になるかもしれない。ただし、まことに狭い体験なので、よしの髓から天井のぞく、の弊を免れない。ご寛容を請う次第である。

2. 半導体レーザーの誕生

レーザー(LASER: light amplification by stimulated emission of radiation)はメーザー(MASER: microwave amplification by stimulated emission of radiation)から発展して生まれたデバイスである。誘導放出を利用した光領域の発振器、増幅器を最初に提案したのは東北大学の渡辺 寧・西澤潤一である(1957. 日本特許出願。この特許は最初の半導体レーザー特許でもある)²⁾。ほぼ同時期に、ソ連のBasov, Prokhorov, アメリカのTownes, Schawlowらもレーザーの可能性を考えていた。特に、1958年のSchawlow-Townesの論文³⁾はレーザーの可能性を理論的に詳しく論じたもので、研究者の間にレーザーフィーバーを引き起こした。一方、Townesの学生GouldはTownesからレーザーのヒントを得てその構想をノートに記した(1957. その中でLASERという言葉を使っている)。Gouldはのちにノートを基に特許を出願した(長い係争の末、レーザーの基本特許(アメリカ)はGouldに与えられた)。実際に、レーザー発振に初めて成功したのはHughes研究所のMaimanである(1960)。ルビーメーザーの研究をしていたMaimanは、おおかたの研究者が4準位系の気体レーザーを検討していたのに反し、意表を突いた3準位系の固体ルビー(クロム3価イオンを不純物として含むアルファアルミナ)でレーザー発振に成功した⁴⁾。

表1 レーザーの用途別生産規模 (世界市場, 1995)

	個数(千個)	左のうち半導体レーザーの占める割合(%)
光メモリー	86,821	100
プリンター	2,858	99
娯楽	1,052	99
バーコードスキャナー	528	86
通信	488	100
測定・検査・制御	111	67
機器・装置	41	20
医用	21	24
材料加工	20	40
研究	17	34
センシング	7	92
その他	89	100
合計	92,052	~100

(Laser Focus World, January, 1995)

また、フラッシュランプ励起のパルス発振を行ったのも彼の独創である。Maimanの業績はノーベル賞に十分値すると思う。ちなみに、彼の実験に理論的な指針を与えたのは、ルビーの690 nmの発光線に関する菅野 暁・田辺行人の理論計算であった⁵⁾。ルビーレーザーの成功に刺激され、その後様々な媒質でレーザー発振が観測されるようになった。そのうち最も重要なものの一つが半導体レーザーである。

半導体レーザーで初めてレーザー発振が観測されたのは1962年のことである。アメリカの4グループがほとんど同時にGaAsダイオードの電流注入によるレーザー発振に成功した。そのうち最も早かったのはGeneral Electric社研究所のHallが率いるグループであった⁶⁾。彼らは77 Kに冷却したGaAsダイオードにパルス電流を流し、あるしきい電流 (~8500 A/cm²) を境に、放射パターンが急に狭まり、同時にスペクトル幅が125 Åから15 Å以下に減少することを観測した。Fabry-Perot共振器を構成する2枚の反射鏡はpn接合面に垂直な結晶の2面を磨いて作った。この構成は現在でも半導体レーザーの基本構造となっている。GaAsがレーザー材料として選ばれたのは、当時、江崎の発明したトンネルダイオードやトランジスタの新材料としてGaAsが関心を集めていたことが大きな理由である。また、1962年には、RCA研究所のPankoveらがGaAsダイオードから高効率の注入発光を観測し、IBMのDumkeが、半導体レーザーの材料は直接遷移型のバンド構造をもつ必要があることを指摘していた。GaAsが最初の半導体レーザー材料として選ばれたのは、いわば偶然といってよいが、現在最も大量に作られている半導体レーザーがGaAsをベースにしていることを考えるとまことに幸運な偶然であったといえる。

3. ダブルヘテロレーザー

半導体レーザーの出現は研究者の強い関心を引いた。半導体レーザーはきわめて小型・堅牢で電流励起で発振する。そのため光の変調が容易で効率が高い。また大量生産が可能でローコストで生産できる。これらの特徴から、半導体レーザーは光通信など多くの応用に向けたレーザーであると期待されたのである。GaAsのほかに、InAs, InPをはじめとして多くの化合物半導体でレーザー発振が観測され、また発振のメカニズムの研究など、半導体レーザーの物理の基礎が築かれた。しかし、1960年代の後半にはいと、半導体レーザーに対する関心は急速に失われていった。半導体レーザーがはじめ期待されたように使いやすいデバイスでないことがわかってきたからである。特に、室温では発振のしきい電流密度は数万 A/cm² にもなり、マイクロ秒以下のパルスでしか使えないことは致命的であった。

ブレイクスルーはAlGaAs/GaAsダブルヘテロレーザーの発明によってもたらされた(1970)。ダブルヘテロレーザー(double heterostructure laser)では、薄い(≤1 μm) GaAs活性層がこれよりも大きなバンドギャップをもつAl_xGa_{1-x}Asクラッド層で両側からサンドイッチされている。活性層に注入された電子とホールはヘテロ接合のポテンシャル障壁のために活性層に閉じ込められる。このため、発振に必要な光増幅率が比較的低い電流密度で得られるようになった。また、活性層の屈折率がクラッド層のそれより大きく、ダブルヘテロ構造が効率のよい光導波路として働くことも重要なポイントであった。キャリアと光の閉じ込めのおかげで、室温における発振しきい電流密度は一挙に1000 A/cm² 近くまで下がり、適当なヒートシンクを装着したレーザーで室

温連続発振が可能になった。ほとんど同時にこの快挙を成し遂げたのは Bell 研究所の林 厳雄-Panish のグループ⁷⁾ とソ連 Ioffe 研究所の Alferov のグループ⁸⁾ であった。

ダブルヘテロレーザーの開発を可能にしたのは次の三つの要素である。(1)エピタキシャル成長技術、(2)混晶半導体、(3)格子整合。Pankove による GaAs の注入発光の観測以来、化合物半導体を材料とする発光ダイオードに対する関心が高まった。その中で、気相エピタキシーと液相エピタキシーの技術が発展した。特に、RCA の Nelson (1963) の始めた液相エピタキシーは良質の pn 接合を可能にした⁹⁾。また、混晶によってバンドギャップ、すなわち発光波長をコントロールすることができるようになった。発光ダイオードの材料としては GaAsP や GaP が人気があったが、三菱電機の須崎らのグループと IBM の Rupprecht らは GaAs 上に成長した AlGaAs に着目した (1967)。彼らはいずれも AlGaAs 可視レーザーを試作し、第 1 回半導体レーザー国際会議で報告した (1967)。また、Rupprecht らは、GaAs 上の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ は x の如何にかかわらずいつも格子整合がとれている、ということに気づいた。この点はきわめて重要で、格子不整合系で欠陥の少ないヘテロ接合を作ることは現在でも非常に困難なのである。また、3元混晶とその成分 (2元) 化合物の間で「自動的に」格子整合がとれる組合せは、実は AlGaAs-GaAs-AlAs の組合せしかない。神からの贈り物というべきか、おかげで AlGaAs/GaAs 系で欠陥のきわめて少ない理想的なヘテロ接合が得られた。

林らと Alferov らはいずれも液相成長技術を使って GaAs 基板上に AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ構造を作り、室温連続発振に成功した。その基になっている技術は発光ダイオードの中で発展したものであることは教訓的である。技術は常に普遍的で、どんな技術でも一つの目的にだけ役に立つわけではない。一方、最初に AlGaAs レーザーを試作した Rupprecht ら、須崎らはダブルヘテロレーザーに最短距離にいたはずで、にもかかわらず大魚を逃したのは発光ダイオードという本来の開発目標に縛られたためかもしれない。

ヘテロ接合レーザーのアイデアそのものは 1963 年に Kroemer によって提案されていた¹⁰⁾。しかし、当時はヘテロエピタキシーの技術はなく、混晶に関する理解も乏しかった。そのため彼のアイデアは研究者の注目するところとならなかった。科学・技術のブレイクスルーも、広い意味で「機が熟する」必要がある。

4. 実 用 化

1969 年に、わたしのいた研究所では次世代の計算機用主メモリーを目指してレーザーホログラフィックメモリーのプロジェクト研究が発足した。半導体メモリーはまだ生まれていなかった。光源として半導体レーザー励起 YAG レーザーの第 2 高調波を使うことにした。YAG レーザーは、励起用のランプが効率の点でも寿命の点でも問題で、連続発振の GaAs レーザーが理想的のように思われたからである。GaAs レーザーはまだ室温連続発振の域に達していなかったが、シングルヘテロレーザーはすでに発表されており、その可能性は十分あるようにみえた。

このプロジェクトはもちろん実を結ばなかったが、四半世紀前を振り返ると、技術についていろいろと考えさせられる。まず、プロジェクトの目標である計算機用主メモリーという点では、予測を全く誤った。しかし、レーザーでアクセスする光メモリーは光ディスクという形で実現したので、ねらいはそれほど的外れでなかったといえるだろう。ホログラフィックメモリーは、現在フォトリフレクティブ効果を利用した大容量光メモリーとしてなお研究対象であり、将来いつか実用化されるにちがいない。半導体レーザー励起の YAG レーザー、またその高調波光源は現在重要な製品になっており、きわめて先見性のある目標設定だった。ただ、現在の立場からは、なぜ半導体レーザーそのものを光源として設定しなかったのかと思う。いずれにせよ、このプロジェクトのおかげで半導体レーザーの研究が始まった。このようなことを瓢箪から駒というのだろうか、これだから技術はおもしろいといえないだろうか。

わたしが半導体レーザーの小さな研究グループに参加したちょうどその頃、林らのダブルヘテロレーザーの室温連続発振の報告があり、またその直後にコーニング社から低損失光ファイバーの発表があった¹¹⁾。この二つのブレイクスルーは一見独立のようにみえるが、いずれも光通信をねらった研究から生まれていることを見逃すべきではない。光源と媒体の二つが同時に出現したことはきわめて幸運なことであった。この展開で、にわかにか光ファイバー通信という超超級の目標が生まれたわけである。我々も早速林らの結果を追試し、ダイヤモンドをヒートシンクにして室温連続発振にこぎ着けた。どういふわけか、できたレーザーは非常に短命で、スペクトルをはかっているうちに発振を停止してしまうものが多かった。それでも、翌 1971 年の春には社内の研究発表会の

展示で、光通信のおもちゃのような実験をしてみせた。それは、レーザー光をレンズで平行光線にして、やや離れたところにあるディテクターに入射させるだけのもので、モーツアルトのフルート協奏曲をオーディオアンプで増幅してレーザーを変調した。我々はそれをレーザー通信といったが、実際にはデバイスは発光ダイオードとして動作していたかもしれない。

半導体レーザーの短寿命はすぐ深刻な問題として認識された。劣化モードには、数分~数十時間で現れる早いモードと、長時間にわたってしきい電流が徐々に増加する遅いモードがあることがわかった。1973年頃、早い劣化では素子の動作中に転位網の増殖が起こることがわかってきた。転位網は、活性層の発光分布に暗い(発光効率の低い)領域として現れるので dark line と呼ばれた。なぜ dark line が発生するのかはよくわからなかったが、すべての素子が短寿命ではないことは早い劣化が intrinsic な理由で起こっているわけではないことを示していた。そこで、転位の少ない基板を使う、柔らかいはんだ材料を使う、活性ストライブの上にはボンディングしないなど、できるだけ「きれいな」素子を「注意深く」作ることに努力した。また、三菱電機のグループは、長寿命化にはエピタキシーの雰囲気ガス(水素)中の酸素を減らすことが重要であると発表し、日本電気のグループは活性層中にアルミニウムを入れることが有効であると主張した。転位網の増殖は、その後、電子・ホール再結合によって増進された転位運動によることがわかり、富士通の上田らが系統的な研究をした。ともかく、レーザーを作るプロセスに習熟するにつれ、よい素子を得る歩留りは少しずつ上がっていった。とはいえ、ある特定の素子が長生きするかどうかは神のみぞ知る。たとえば、たしか1973年頃、会社全体の技術展で光ファイバーの実験をしたときにはまことに冷や汗ものであった。伝送している映像が展示の最中に消えてしまったので、これははっきりレーザーが死んだに違いないと思われたが、そうではなく、温度の上昇によってファイバーに張力がかかったためであることがわかった。1976年には Bell 研究所が多数の素子を使った加速寿命試験の結果を発表し¹²⁾、22°C で平均5万時間の寿命を推定した。この頃には、日本の半導体レーザーの研究レベルはアメリカ、特に Bell 研究所のレベルに追いついたと噂されていたものだから、ワイブルチャートにプロットされた厚みのある寿命試験の結果にはショックを受けた。わたしはワイブルチャートとは何たるかも知らなかったし、寿命試験結果をこのような形で出すことは技術

レベルをさらけ出すことになるので日本ではとてもできないことと思っていたので、非常に感銘を受けた。その後、信頼性についても学会でフランクな議論ができるようになったが、その背景には Bell 研究所のこの態度が影響していると思う。ともかく、このようにして半導体レーザーもようやく実用化への準備がととのったように思われた。

半導体レーザーを応用するにはきれいなビームが必要で、またしきい電流が低いことが望ましい。この観点から、何らかのストライブ構造が必要なことはダブルヘテロレーザー以前から知られていた。Bell 研究所の D'Asaro らはプロトン打込みによる半絶縁化を利用してストライブ構造を作った(1971)。これはプロセスが簡単なことから Bell 研究所のお気に入りの構造になったが、横モードの安定化が不十分な構造で、彼らが日本の技術に後れをとる遠因となった。日立では塚田が中心になってまずメサストライブ構造を発表した(1972)。50 mA というしきい電流は当時としては記録的な低さであった。塚田は、ついでメサストライブの側面を完全に AlGaAs で埋め込んだ構造(埋込みヘテロ構造; buried-heterostructure; BH)を作り 15 mA という低いしきい電流を得た(1974)¹³⁾。わたしは、はじめ、本質的な量はしきい電流密度であり、しきい電流ではないと思い、彼の仕事をあまり評価しなかったが、これは全くの間違いで、実用の上ではしきい電流の方が重要なのである。またストライブをどんどん狭くしてビーム断面形状を円形に近づけることも実用上はきわめて大きな意味がある。BH レーザーはその後モード安定化レーザーの代表的な構造として、特に長波長帯で大活躍することになった。技術において何が重要で本質的かを知ることの難しさはその後繰り返し経験することになる。BH レーザーの開発と同じ頃、三菱電機の浪崎らは TJS (transverse junction stripe) 構造という非常に独創的なレーザー構造を発表した(1974)¹⁴⁾。TJS レーザーでは狭いストライブが自動的に得られ、BH レーザーと同様低いしきい電流と安定な発振モードが特徴であった。彼らはまた TJS レーザーでは単一縦モードになると主張したが、わたしも含め、汚い発振モードに慣れていた多くの研究者には、縦単一モードに再現性があるとはわかには信じられなかった。のちに、横モード単一レーザーでは縦モードも単一になることがわかり、これが雑音に関して重大な問題を引き起こすことになる。

1975年頃から、光ファイバー通信の実証試験が始まった。東京電力、関西電力と日立製作所、日本電気、富

士通が日本では初めての光ファイバー通信の実験をすることになった。光通信が半導体レーザーの応用として本命であることはわかっていたが、我々半導体レーザーの研究者は長寿命化で忙しく、応用に関する検討はほとんど進んでいなかった。実際のところ、わたしは光通信はおろか通信についてまるで無知だった。そこで、レーザーの実装、ファイバーとの結合をはじめ実用化に必要な多くのことを大急ぎで準備しなくてはならなかった。応用グループとの共同研究の中で、寿命スクリーニングを通った素子が次々と簡単に死ぬという現象が頻発した。このため素子側と応用側との間に不信感やいさかいが起こったりしたが、結局電源から入るサージが原因であることがわかった。特に、定電圧電源のスイッチを入れたときに発生するサージは致命的で、過大な光出力のためにレーザーの端面が溶融することがのちになって明らかになった。

我々は必要なパワー (20 mW)、信頼性、製造歩留りの観点から、メサストライプ型レーザーの改良版を採用することにした。実証試験の条件は、当然のことながら、大変厳しいもので、密閉した中継器は電柱の上、マンホールの中などに設置されることになった。したがって素子温度は軽く 50°C を越す可能性があり、レーザーが長持ちするとはとても思えなかった。わたしには中継器がまるで棺桶のようにみえた。ともかく、素子側の我々ができることは、厳しい条件 (たとえばヒートシンク温度 50°C) でスクリーンした素子を提供することしかなかった。これはもちろん歩留りを著しく下げたが、これとは別に深刻な事態が発生した。100 Mbit/s で変調するとビットエラーが多発することがわかったのである。レーザー出力が小さいときはこのようなことは起こらないし、また 6 Mbit/s といった低ビットレートでは実質上あまり問題にならない。この現象は、直流駆動時の電流-出力特性 (I-L 特性) のキンク (非直線性) と関係していることがわかってきた。

はじめ、キンクがないのが本来の特性で、キンクは素子構造の不均一で起こると考えた。そこで実証試験にはとにかくキンクのない素子を選ぶことにした。ところが、キンクのない素子も寿命試験や動作の間に「キンク持ち」になることが多く、さらに、素子を作れば作るほど「キンク歩留り」が上がってきた。一方、電力会社との実証試験が開始し、試験で使用中の素子に不良 (キンク、発振停止など) が発生すれば直ちに取替える必要があった。しかし、キンクのない「良品」の歩留りはきわめて低く、人海戦術で対処するしかないという事態に

なった。半導体レーザーグループの責任者であったわたしは、上司、顧客に状況や対策を説明しようにも説明のしようがないという苦境に立たされた。

このキンクが利得導波型のレーザーに本質的であることはのちに明らかになったが^{15,16)}、そのきっかけは国内の半導体レーザー研究者のインフォーマルな研究会であった。誰が口火を切ったのか (日本電気の米津氏ではなかったかと思う)、I-L にキンクが頻発し、それに悩まされているという話になり、キンクが多くのレーザーに共通の、普遍的な現象であるという認識が一挙にできあがった。このことが日本のレーザーの発展を著しく促進したことはいくら強調しても強調しすぎることはない。キンクが日本の研究者の間で早く共通の認識になったのは、一つには光通信の応用に (否応なく) 世界に先んじて取り組まされたことと、フランクに情報交換のできる雰囲気研究者の間に生まれていたことが重要である。

キンク以外にもいろいろのトラブルが起こったが、そのうちの一つは光帰還によるものである。ある中継器で、夕方に限ってビットエラーが増えるという不思議なことがあった。システム側の努力で、これが光コネクタからの反射光によって起こることがつきとめられた。ある温度のとき、発振波長がちょうど外部共振器の共振条件を満たすようになっていたのである。応急処置として、マッチングオイルを充填する、マイラーシートを挟む、ファイバー端面に無反射コーティングするなどを試みた。光ディスクへの応用のとき、この光帰還が再び重大な問題となるが、光通信においてはアイソレーターが必須の部品として浮かび上がるきっかけとなった。考えてみれば、レーザーは発振器であり、発振器と負荷とをアイソレーターやバッファで切り離すのはラジオ波やマイクロ波では常識ではないか。

キンクが空間的ホールバーニングの結果生じる横モードの不安定性によることがわかってきたので、レーザー構造を考え直す必要に迫られた。我々はすでに BH レーザーというモード安定化レーザーをもっていたのでこのレーザーの実用化を真剣に検討し始めた。ただ BH レーザーは小出力という欠点があったので、もっと出力の大きな素子が必要だった。我々のグループの中村、相木らが中心になって溝付き基板型 (channeled-substrate planar; CSP) と称する新構造を提案した¹⁷⁾。これはエッチングで掘った溝に結晶成長し、ダブルヘテロ構造を作るもので、高次横モードは大きな伝送損失のために抑制されるように設計した。CSP レーザーにはキンクがなく、かなりの高出力まで安定な単一横モードで発振し

た。また同時に単一縦モード発振が再現性よく観測され、TJS レーザーについての三菱電機グループの主張を確認した。CSP レーザーは、構造をもつ基板上に結晶成長を行ってデバイスを作るという技術のパラダイムを作ることになった。光通信用素子としてのBH レーザーとCSP レーザーは1977年、日本で開催された第1回IOOC国際会議で発表された。その後国内外で各社がそれぞれ独自のモード安定化レーザーを相次いで発表した。ある調査によれば1982年時点で、累計45件のモード制御構造が発表されていたが、その多くは日本で開発されたものであった。BH レーザー、CSP レーザーをはじめほとんどのモード制御レーザーは、製造プロセスが複雑で、また結晶成長やプロセスに厳しいコントロールが要求されるものであった。Bell研究所の研究者たちはこういう方向に進むことに消極的で、プロセスの簡単なプロトンアイソレーション型に固執したように思われる。彼らの方針は裏目にでたが、これは結果論で、彼我の好みの違いが現れた例である。わたしとしては、細かいことよりも大局をみ、現象よりも本質を求めようとする彼らの態度を見習いたいと思う。

BH レーザーとCSP レーザーという、きれいなモードで発振する2種類のレーザーを手にした私たちはこれを市販することにした。1978年のことである。三菱電機のTJS レーザーを別にすれば、モード安定化レーザーは世界にほかにない、必ずいい値段で売れるというもくろみであった。もちろん工場は半導体レーザーのような得体の知れない新デバイスを作るつもりはなく、研究所で作ったものを国の内外に売ろうというのである。研究所製品にはGaAs FETという先輩があったので、それに習って事業部から出荷するという形にした。外販の目的は、(1)売り上げの一部を開発・試作費に当てる、(2)事業部に関心をもたせる、(3)半導体レーザーに対する性能要求・ニーズをつかむ、などであった。顧客に売るとなれば、パッケージ、信頼性保証、テクニカルデータをはじめ、広告、マニュアルの作成、そして営業など、慣れないことをしなければならぬ。また販売した製品が故障を起こすとそれにきちんと対処しなければならぬ。研究者がする仕事ではないという批判もあったが、世界で初めての製品を出すのだという気負いがこのようにことをさせたと思う。外販の反応はかなりよかった。研究用に少数個を買う顧客が大部分であったが、我々のレーザーを当てにして大きな通信システムを計画するアメリカの会社も現れ、技術の動きを肌で感じた。また、私たちの作った英文のマニュアルは大変好評で、

しばしば論文に引用されたりした。三菱電機のグループも同じころ研究所製のTJS レーザーを市販し始めたので我々と競争する形になった。

日立では1979年頃から半導体レーザーの技術を工場に移管するプロジェクトが始まった。わたしはちょうどそのとき大学に移ることになり、工場生産というある意味で最も苦しい部分を経験することができなかった。その意味で、技術者として不完全なキャリアしか経験していないという意識がある。

半導体レーザーを光ディスク装置やレーザープリンターの光源として使用することも1975~1976年頃から検討され始めた。光ディスクははじめビデオディスクとして日立の武田、米沢、角田らが検討を始めた。ビデオディスクはレーザー方式と針方式が競っていたが、レーザー方式はパイオニアが単独でHeNe レーザーを光源として実用化した。RCAは針方式で一敗地にまみれ、これが会社倒産の直接の原因となった。一方、ソニーとPhilipsは半導体レーザーをピックアップとしたデジタルオーディオディスクを開発、1982年にコンパクトディスクプレイヤーを発売した。その後、パイオニアのレーザーディスクもHeNe レーザーを半導体レーザーに置き換えた。

光ディスク用と光通信用の半導体レーザーの最大の違いは要求される値段である。コンシューマエレクトロニクス用部品としては、はじめから1個数百円という値段が要求された。一方生産個数も桁違いに多い。半導体レーザーは複雑な構造をもつデバイスであるとはいえ、半導体pnダイオードである。日本の各社は難しい大量生産に成功し、半導体レーザーはレーザーとして初めて家庭の中に入るようになった。特性の点では光帰還に伴う雑音と温度変化に伴う縦モードジャンプによって起こる雑音が問題になった。いずれも縦モードの不安定性によるものである。光ピックアップではディスクからの反射光がわずかではあるがレーザーに戻ってくる。条件によってはこれが出力の変動をもたらすのである。この現象はデジタルシステムではそれほど問題にならなかったが、アナログのレーザーディスクでは深刻な問題となった。二つの解決策が実用化されている。高周波重畳方式と自励パルセーション方式である。いずれもレーザーを縦多モード発振にして使う点で共通している。縦単一モード発振が実は温度変化や光帰還に弱いというのは光ディスクへの応用の中ではっきりしてきたことである。日立から大学に移ったわたしは発振モードのジャンプに伴って起こる顕著な出力変化に関心を抱いた。結局、共同

研究者の小笠原がきれいな実験と綿密な理論でこの現象がスペクトルホールバーニングで説明されることを示した^{18,19)}。

レーザープリンターははじめ HeCd レーザーなど短波長の気体レーザーを光源とした高速プリンターとして実用化された。日立をはじめいくつかの会社が半導体レーザーの採用を検討したが、Canon が最も成功し現在の世界の半導体レーザープリンター市場で最大のシェアを握っている。Canon は 1975 年頃から、当時まだ市販されていなかったダブルヘテロ構造 GaAs レーザーを光源としたプリンターの開発を進め、1979 年には半導体レーザープリンターを発売した。低価格、高精細のプリンターとしてパーソナルコンピュータの重要な周辺機器となっている。半導体レーザーのプリンターへの応用におけるポイントは波長である。レーザープリンターは電子写真の一種で、多くの感光体は赤から赤外にかけて低い感度しかもたない。Canon は光学器械の専門会社であると同時に複写機メーカーであり、長波長に高い感度をもつ光導電材料の開発に成功したのである。最近、赤や青、緑の領域の半導体レーザーが開発されつつあるが、半導体レーザープリンターのいっそうの高性能化が期待されるゆえんである。

このようにして、1970 年代に、AlGaAs ダブルヘテロレーザーとその主要な応用—光通信、光メモリー、レーザープリンター—の開発が進み、1980 年代にこれらを中心としたフォトンクスが一挙に開花することになった。半導体レーザーは新しい応用に直面するたびに新しい性能要求を突きつけられ、レーザーとして飛躍的な成長を遂げた結果、最も well-behaved, well-controlled なレーザーといわれるまでになったのである。

5. 発 展

半導体エレクトロニクスは、1947 年の点接触型トランジスタの発明以来 50 年近くになるが未だに成長、発展を続けている珍しい分野である。半導体レーザーも、単一のデバイスとしてはずいぶん息長く発展してきた。これまで述べてきたレーザーは液相エピタキシーによって作られる AlGaAs ダブルヘテロレーザーであった。これに対し、1970 年代の中頃から、材料、デバイス構造、製造プロセスの各分野で新しい発展の芽が出てきた。

光導波路に波長程度の周期をもつ周期構造を導入することにより、導波路特性—透過率や反射率—に周波数選択性をもたせることができる。周期構造をもつ代表的な

半導体レーザーは分布帰還型 (distributed feedback ; DFB) レーザーとブラッグ反射型 (distributed bragg reflector ; DBR) レーザーである。最初の DFB レーザーを作ったのはカリフォルニア工科大学の Yariv 教授のところに日立から留学していた中村である (1973)²⁰⁾。これは光励起で発振したが、電流注入型の室温連続発振 DFB レーザーは日立に帰った中村らによって作られた (1975)²¹⁾。翌 1976 年の半導体レーザー国際会議 (合歓の里) では、日立グループは 6 個の異なった発振波長をもつ集積 DFB レーザーを発表し世界の研究者を驚かせた。DFB レーザーは高速変調時でも安定な単一縦モードで発振するレーザーとして、のちに、特に長波長帯光通信で主役を演ずることになる。

現在光ファイバー通信のほとんどは 1.3~1.6 μm の長波長帯で行われている。シリカ系ファイバーの透過損失がこの波長帯で最小になるからである。この波長帯で使われているレーザーは InP 用に成長した InGaAsP-InP レーザーであるが、これを初めて作ったのは MIT Lincoln 研究所の Hsieh である (1976)²²⁾。これより前 1975 年に Bell 研究所から、不純物の少ないシリカファイバーの最低損失が 1 μm 以上にあることが報告され、長波長帯の重要性がにわかに認識され始めていた頃である。それでも、わたしを含め、研究者たちの多くは AlGaAs レーザーの長寿命化やモード制御レーザーの開発に忙しく、長波長帯の重要性をすぐ認識したわけではない。レーザー研究者の立場では、光通信はレーザーとディテクターのそろっている 0.8 μm 帯で行うべきだという気持ちだった。また 4 元混晶で格子整合をとるのも非常に難しそうに思われ、さらに、新しい材料でまたゼロから長寿命化対策をするのは考えるだけでもうんざりすることだった。技術者は自分のもっている技術にこだわるから、どうしても保守的になる傾向がある。技術は、しかし、技術者の主観にかかわらず前進する。光ファイバー通信では、ファイバーが王様で、すべてはファイバーに従わざるを得ないのである。日本では KDD グループが長波長帯レーザーに真っ先に取り組み、日立では土居が一人で研究を始めた。土居が最初に作ったレーザーは DFB レーザーで、これが長波長帯で最初の DFB レーザーとなった (1979)²³⁾。光通信にとって非常に幸いなことに、長波長帯では AlGaAs レーザーであれば深刻だった dark line による劣化がほとんど起こらず、光通信は一挙に 1.3~1.6 μm 帯に移行することになった。

これまで述べた半導体レーザーはすべて Nelson の始

めた液相エピタキシーで作られたが、エピタキシー技術でもこれに代る新しい芽が出てきた。結晶表面と分子線の相互作用の研究は、1960年代の中頃からBell研究所のArthurらによって行われていたが、高真空中で分子線を使ったエピタキシーが可能であることを初めて示したのは同じBell研究所のChoである(1970)²⁴⁾。彼はさらに最初のGaAs-AlGaAs超格子(1971)、最初のAlGaAsダブルヘテロレーザー(1974)を作った。このレーザーの特性はあまりよくなかったが、その後Bell研究所のTsangが改良を重ね、分子線エピタキシー(molecular beam epitaxy; MBE)でよい特性のレーザーを作ることになった(1979)。

MOVPE (metal organic vapor phase epitaxy) 法はRockwellのManasevitが1960年代に始めた気相エピタキシーである。日立でも皆川らがこの方法で発光ダイオードを作ったが、発光効率が低いものしか得られなかった。その後、Rockwellでは原材料の精製法を改善し、1977年にDupuisらが低しきい電流のGaAs-AlGaAsレーザーを作ることになった²⁵⁾。

液相エピタキシーはもちろんのこと、MBEやMOVPEもアメリカで生まれた。日本ではその有効性が実証されてから初めて、猫も杓子も争ってこれらの成長装置を購入し、それを利用した。わたしはMBEやMOVPEの論文に初めて接したときには強い関心はもったが、その将来性を見通すことはできなかった。新しい技術を生み出したり、新しい技術に取り組んだりすることは、喫緊のテーマを抱えている人間には難しい。したがって、研究組織には「遊び」が必要なのである。また、個々の研究者も、ある程度のゆとりをもたないとquantum leapは望めまい。現在、これらのエピタキシー法によって量子井戸レーザーをはじめとする様々な量子構造デバイスが作られており、またIII-V半導体だけでなくSi, Ge, II-VI半導体など多くの材料が成長されているのを見ると、技術というのは、特に大型の技術は、普遍的なものだという感を深くする。これからはなるべく普遍的な技術、generic technologyを生み出したものだと痛感する。

MBE法とMOVPE法の出現で極薄膜が再現性よく成長できるようになり、活性層の厚さが20 nm以下の半導体レーザーが作れるようになった。このような半導体レーザーでは、活性層内の電子の運動が層に垂直な方向には量子化され、発光波長が膜厚を薄くすると短波長に移動する。このタイプのレーザーを量子井戸レーザーと呼ぶ。最初の量子井戸レーザーはBell研究所のvan

der ZielらによってMBE法で作られた(1975)²⁶⁾。量子井戸レーザーはふつうのダブルヘテロレーザーと比べ高出力などの利点があるので、現在では実用的なデバイスとして大量に生産されている。

わたしは1979年に大学に移り半導体レーザーの現場から離れた。そこで以降の発展はごくかいつまんで述べるにとどめたい。光メモリーでは短波長レーザーが記録容量を上げる上で必須の要件であることがわかっていたので、わたしは短波長レーザーを研究テーマとした。液相エピタキシーしか使えなかった私たちは残念ながらブレイクスルーを生み出すことはできなかったが、東芝、NEC、ソニーのグループがMOVPEによってGaInP-AlGaInP赤色半導体レーザーの開発に成功した(1988)。

1983年に、わたしは応用物理学会誌に「半導体レーザーにおける高出力化と短波長化」と題する解説を書いた²⁷⁾。その中で短波長化について次のように述べた。

500 nm帯のレーザ材料としてはAlGaInP系が有力な候補で、580 nm~560 nm間での短波長化が可能である。この材料についても結晶成長が成否の鍵を握っている。

さらに短波長化をねらうにはGa_{0.5}N_{0.5}、II-IV族半導体、カルコパイライトなどの“exotic”な材料に頼らなければならない。これらの材料のいくつかは古くから研究されているが、未だに伝導型の制御すら困難なものが大部分である。半導体レーザー実現のための技術的な障壁は非常に高いといわねばならない。これらの材料では、高効率のp-n接合発光ダイオードが作られるだけで工業的に大きな価値がある。挑戦しがいのある研究テーマといえる。

以上はいわばオーソドックスなアプローチであるが、このほかに従来の常識に捕らわれない行き方もブレイクスルーを生み出す可能性がある。すでにおおかたの関心を集めているトピックとしてはstrained superlattice、超格子におけるBrillouin帯の折り畳み効果などがある。……こういったゲリラ的なアプローチの中では、高調波の発生が半導体レーザーから短波長のコヒーレント光を得る近道のように思われる。高効率の非線形光学材料をレーザーとモノリシックに集積することができれば理想的であろう。

半導体レーザーの短波長化は、実際にはわたしの予想よりも速いスピードで進行した。AlGaInPレーザーは1988年に実用化され、現在HeNeレーザーの波長633 nmのデバイスも市販されている。“Exotic”な材料の一

つ、II-IV族の青-緑色レーザーは、p型ドーピングで日本が先手をとっていたにもかかわらず、最初の注入レーザー発振は3Mに名をなさしめた。現在世界の研究者は長寿命化でしのぎを削っている。この材料のdark lineはGaAs中でよりも動きやすいと想像されるので、結晶の質に対する要求は厳しい。良質の結晶をいかにして作るか、エピタキシーが決め手である。もう一つのexoticな材料であるGaNは、赤崎らによるp型ドーピングとアニールプロセスを基にして、日亜化学の中村らが高輝度・長寿命の青色発光ダイオードの開発に成功した(1994)。現在世界の研究者がGaNレーザーの開発に躍起になっている。最後に、わたしが「ゲリラ的なアプローチ」といった非線形光学効果による半導体レーザー光の高調波発生はわたし自身の現在のテーマであるが、今や「正規軍」化しつつあると考えている。半導体レーザーからの比較的小さなパワーでいかにして高効率の第2高調波を発生するか、これは材料、デバイスの両面で挑戦しがいのあるテーマである。非線形光学デバイスをぜひ家庭の中にもち込みたいと思う。いずれ青色半導体レーザーが実現するだろうが、そうなれば紫外域の高調波発生が目標になるだろう。一方紫外線の発光ダイオード、半導体レーザーも実現するかもしれない。原理的に可能であり、ニーズがある限り、技術はいつかは現実のものになる。今日の“exotic”な材料、技術もあすは当たり前材料、技術になるかもしれないのである。

6. おわりに

半導体レーザーの研究開発の歴史を、わたしの体験を中心に述べてきた。わたしは大きな流れの中でほんのわずかの部分を経験しただけなので、半導体レーザーの一部にふれたにすぎない。それでも、世界各国の、そしてとりわけ日本の、多くの研究者、技術者が次々と積み木を積み上げるようにして半導体レーザーの技術を発展させてきた状況をかきまみることができたと思う。

わが国がこの分野で少なからぬ寄与をすることができたのは、一つには応用研究者が光通信、光ディスク、レーザープリンターといった応用に、世界に先駆けて取り組んだことがあげられる。デバイスは実際に使われてこそ一人前のデバイスになるのである。また立派なデバイスが登場するのを待って応用を考えるようでは必ず後れ

をとるであろう。もう一つの理由として、学会を通じた半導体レーザー研究者間の切磋琢磨がある。年に2回の応用物理学会では、ライバルの日本電気や三菱電機の研究者たちと火花を散らして議論を戦わせた。このようなとき秘密主義では議論が成り立たない。同じ技術を作り上げているというある種の連帯感のようなものが研究者の間になければならない。このような雰囲気が生まれるのに、ダブルヘテロレーザーのパイオニア、林 敏雄氏(Bell研究所から日本電気に就職)の人柄が大きな力になったことを最後に強調しておきたい。

文 献

- 1) Laser Focus World, **31**, January (1995) 54.
- 2) 渡辺 寧, 西澤潤一: 日本特許 273217号, 1957年4月22日出願.
- 3) A. L. Schawlow and C. H. Townes: Phys. Rev., **112** (1958) 1940.
- 4) T. H. Maiman: Nature, **187** (1960) 493.
- 5) S. Sugano and Y. Tanabe: J. Phys. Soc. Jpn., **13** (1958) 880.
- 6) R. N. Hall, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **9** (1962) 366.
- 7) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy and S. Sumski: Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 109.
- 8) Zh. Alferov, *et al.*: Fiz. Tekh. Poluprovodn., **4** (1970) 1826.
- 9) H. Nelson: RCA Rev., **24** (1963) 603.
- 10) H. Kroemer: Proc. IEEE, **51** (1963) 1782.
- 11) F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer: Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 423.
- 12) W. B. Joyce, R. W. Dixon and R. L. Hartman: Appl. Phys. Lett., **28** (1976) 684.
- 13) T. Tsukada: J. Appl. Phys., **45** (1974) 4899.
- 14) H. Namizaki, H. Kan, M. Ishii and A. Ito: J. Appl. Phys., **45** (1974) 2785.
- 15) K. Kobayashi, *et al.*: J. Quantum Electron., **QE-13** (1977) 659.
- 16) N. Chinone: J. Appl. Phys., **48** (1977) 3237.
- 17) M. Nakamura, *et al.*: Tech. Dig. Int. Conf. Integ. Opt. Opt. Fib. Commun., A-6-2 (1977).
- 18) N. Ogasawara and R. Ito: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) 607.
- 19) N. Ogasawara and R. Ito: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) 615.
- 20) M. Nakamura, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **22** (1973) 515.
- 21) M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda and A. Yariv: Appl. Phys. Lett., **27** (1975) 403.
- 22) J. J. Hsieh: Appl. Phys. Lett., **28** (1976) 283.
- 23) A. Doi, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **35** (1979) 441.
- 24) A. Y. Cho: J. Appl. Phys., **41** (1970) 2780.
- 25) R. D. Dupuis and P. D. Dapkus: Appl. Phys. Lett., **31** (1977) 466.
- 26) J. P. van der Ziel, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **26** (1975) 463.
- 27) 伊藤良一: 応用物理, **53** (1984) 128.