



半導体ヘテロ構造の開発 —半導体レーザーの室温連続発振への道程— (2000年ノーベル物理学賞)

荒川 泰彦

東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

Development of Semiconductor Heterostructures —The Path to Room Temperature Continuous-Wave Operation of Semiconductor Lasers— (The Nobel Prize in Physics 2000)

Yasuhiko ARAKAWA

Institute for Nano Quantum Information Electronics, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

(Received July 12, 2023)

The Nobel Prize in Physics 2000 was awarded for “fundamental research in information and communication technology.” This review discusses the history of the development of semiconductor lasers, focusing on the outstanding contributions of Zhores Alferov and Herbert Krömer, who achieved continuous-wave operation at room temperature in semiconductor double heterostructure lasers. The subsequent evolution of the double heterostructure lasers, including quantum well lasers, quantum dot lasers, and quantum cascade lasers, is also briefly discussed.

Key Words: Double heterostructures, Semiconductor lasers

1. はじめに

1947年末の米国ベル研究所の J. Bardeen, W. Brattain, W. Shockley によるトランジスタ効果の発見は、現代の半導体時代の始まりとされている(1956年ノーベル物理学賞受賞)。この偉業により、半導体技術が急速に発展し、固体物理学や材料科学の研究も大きく進展した。さらに、これらの進歩が現代の情報技術の隆盛をもたらした。今、情報社会を支える基盤技術の多くは、半導体集積回路とダブルヘテロ構造半導体レーザーに立脚している。

上記の進展に基づいて、2000年のノーベル物理学賞は、「情報通信技術における基礎研究」として、二つの重要分野の研究者3人が受賞した¹⁾。一つは、米国テキサスインスツルメント社の研究員である Jack Kilby に、「集積回路の発明の一翼を担ったこと」に対して授与された。また、もう一つの分野として、ソ連(当時)のヨッフェ物理技術研究所教授の Zhores Alferov とカリフォルニア大学サンタバーバラ校教授の Herbert Krömer が、「高速エレクトロニクスおよび光エレクトロニクスに用いられる半導体ヘテロ構造の開発に貢献」に対して受賞した。

1959年2月6日、Kilby は「小型化された電子回路」である IC(Integrated Circuit, 集積回路)のアイデアで特許を

申請した²⁾。彼のノーベル物理学賞受賞の根拠はこの発明にある。すなわち、物理学の進歩に直接的な貢献ではなく、物理学に基づく技術の基本的な概念を創造し情報技術に革新をもたらしたことに對して授賞がなされたのである。この点で、この授賞はノーベル物理学賞としてはやや異例といえる。一方、もう一つの柱である半導体ヘテロ構造に関する Alferov と Krömer への授賞は、物理学および応用物理学の体系的な発展に對してなされたといえることができる。

本解説では、集積回路については触れず、後者の半導体ヘテロ構造、特にダブルヘテロ構造レーザーの実現に至る道程とその後の発展に絞って述べることにしたい。本誌の読者諸氏は、ダブルヘテロ構造レーザーの概念は熟知していると思うので、ここでは、物理の詳細を述べるのではなく、その発展史と二人の受賞者の位置づけについて整理することを目指す。また、ダブルヘテロ構造の発展に関する記述は、伝聞と文献に基づいているため、文献の内容をそのまま引用している箇所もあることを了解いただきたい³⁻⁶⁾。なお、用語として、「ヘテロ構造(Heterostructure)」と「ヘテロ接合(Heterojunction)」の両方が使われているが、本稿では「ヘテロ構造」を用いる。ただし、単なる一種類の半導体の p-n 接合については、「ホ

モ接合(Homojunction)」と呼ぶことにする。

2. ホモ接合レーザー

2.1 ホモ接合における誘導放出

誘導放出の概念は、A. Einstein(1917年)やJ. von Neumann(1953年、ただし未出版)らによって早くから議論されていた。その後、1958年頃には、ソ連のA. M. Basov, N. Prokhorovや米国のC. Townes, A. Schawlowらにより、レーザーの可能性が検討された。日本でも西澤潤一が特許を出願していた。このような状況下で、1960年5月16日、カリフォルニア州マリブのヒューズ研究所の研究員であったT. Maimanは、合成ルビーの円柱の両端を銀でコーティングして反射鏡にすることにより、初のレーザー発振に成功した⁷⁾(このレーザー発振に関連していろいろな話題があるが、本題から外れるのでここでは述べない)。

このレーザー発振の成功と同じ時期に、じつは半導体レーザーの可能性が検討されていた。1961年、フランス国立電気通信研究センターのA. G. BernardとG. Duraffourgは、半導体の誘導放出に必要な条件を明らかにした⁸⁾。彼らは、半導体の光利得が正になるための必要な条件として、電子と正孔の非平衡キャリア密度に対応する擬フェルミ準位のエネルギー差が、放出される光のエネルギーを上回らなければならないことを示した。いわゆる有名なBernard-Duraffourgの反転条件である。これは、半導体レーザーの発振可能性を初めて定量的に議論した研究と位置付けられている。

電流注入レーザーの実現の可能性に言及したのは、ゼネラル・エレクトリック(GE)社のR. Hallである⁹⁾。じつは、当初彼は半導体レーザーに懐疑的であった。当時のレーザーは長い光路長を必要とし、半導体の強い自由キャリア吸収とは相容れないと考えたからである。また、半導体の発光スペクトル幅が、他のレーザーの鋭い発光スペクトルよりも、はるかに広いことも彼を否定的な考えにさせた。しかし、上述のBernardらによって、誘導放出に関する概念が明らかになるにつれて、これらの疑義は払拭されていった。

2.2 ホモ接合レーザーの開発

1962年、GE社、IBM社、MITリンカーン研究所の研究者たちは、ほぼ同時に、p-n接合を有するGaAsレーザー(ホモ接合レーザー)の発振を低温において実証した¹⁰⁻¹²⁾。GEのHallは、GaAs結晶の端部を研磨して形成したミラーでファブリ・ペロー共振器を実現し、9月にGaAs結晶からのコヒーレント光を77Kで観測した¹⁰⁾。発光スペクトルの狭窄と、遠視野発光パターンの挙動から、誘導放出と判断した。論文のタイトルは“Coherent Light Emission from GaAs junctions”であるが、このようなデバイスを「半導体レーザー」と呼ぶことが既に一般的になっていたようである(やや微妙ではあるがここでもすべてレーザーと呼ぶことにする)。一方、IBMのワトソン研究所のM. I. Nathanら¹¹⁾と、MITリンカーン研究所の

T. Quaisらも¹²⁾、GaAsレーザーの発振を、独立にApplied Physics Lettersに発表した。また、可視光領域でも、当時GEにいたN. HolonyakらがGaAsPにおいてレーザー発振を観測した¹³⁾。

当時の半導体レーザーの共振器のミラーは、上述の如く、切り出したGaAsのチップの両端を平行に研磨して形成したが、Holonyakは、結晶面に沿って劈開する方法が有効であることに気づいていたようである。しかし、ミラーの形成に実際に劈開を用いたのは、1963年のベル研究所のW. L. Bondらによる報告が最初である¹⁴⁾。

ホモ接合レーザーの研究は、米国を中心に行われた。1964年から1966年にかけて、IV-VI化合物のような興味深い新材料を含め、いくつかの新材料でレーザー発振が達成された。しかし、その殆ど全て液体窒素温度(77K)での発振であった。1967年、カナダのベル・ノーザン・リサーチ社のJ. C. Dymantは、ダイヤモンドのヒートシンクを用いて200KでGaAsホモ接合レーザーの連続発振を達成した¹⁵⁾。以上がホモ接合レーザーの主な発展史である。

3. ダブルヘテロ構造

3.1 ダブルヘテロ構造の概念の創出

Krömerは1950年代にドリフトトランジスタを発明し、半導体デバイスへのヘテロ構造の導入を最初に指摘するなど、常に主流技術に先駆的に取り組んだ固体デバイスの研究者である。ヘテロ構造バイポーラトランジスタ(HBT)についても、バンドギャップをベースより大きくしてエミッタ効率を上げる原理は、Shockleyが広範なトランジスタの特許(1948年出願)において言及したが、具体的な解析と提案は、プリンストンのRCA社にいたKrömerが1957年に行った¹⁶⁾。

さて、1963年、Krömerは、当時パロアルトのバリアン社に勤務していたが、あるとき半導体レーザー(具体的にはホモ接合レーザー)に関する研究談話会が開かれた。そこでの議論は、注入キャリアが接合部の反対側で急速に拡散してしまうため、室温で反転分布を達成することは原理的に不可能であるということであった。それを聞いたKrömerは、半導体レーザーにダブルヘテロ構造を導入するアイデアを思いつき、さっと論文を書き上げた。早速Applied Physics Lettersに論文を投稿したが、却下された。しかし、その判断に抗議しないことを上司に説得されたため、KrömerはProceedings of the IEEEに論文を投稿し、そのアイデアは公表された¹⁷⁾。若い研究者は想像できないかもしれないが、当時のApplied Physics Lettersは、この分野の最高峰の論文誌であった。しかも、内容がアイデア論文に近いので、あっさり挑戦をあきらめたと思える。しかし、机にしまい込まずに、この論文を出版したことは、ソ連との競争において極めて意義深いことであった。Fig. 1は、ダブルヘテロ構造のバイアス印加時のバンドダイヤグラムを示す。この図は、文献17)の図を実質再掲したものである。なお、Krömerは、その後カリフォルニア大学サンタバーバラ校の教授に就

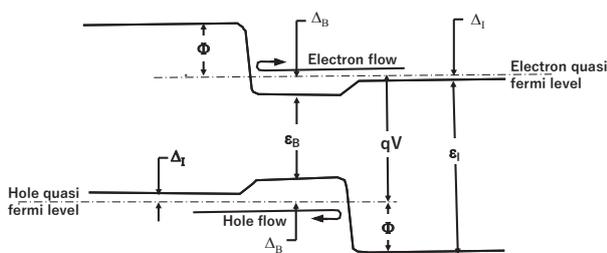


Fig. 1 Double heterostructure lasers with an applied biased.¹⁷⁾

任した。

3.2 提案のインパクトとソ連との競争

提案当時、適切な半導体を選択するための知見は十分ではなかった。実際、Krömer の論文では、エネルギーギャップの広い材料として GaAs を、狭い材料として間接遷移半導体の Ge を選択していた。このこともあって、Krömer の論文は、半導体レーザーの実現に取り組んでいた研究者にはあまり知られていなかった。実際、後述のように、ベル研究所の林 厳雄は自らの研究を投稿するまで(1967 年ごろ) Krömer の仕事を知らなかったようである。これは、Krömer が電子デバイスの物理を専門としており、光デバイスの研究者コミュニティの外にいたことに起因している。なお、ダブルヘテロ構造レーザーの特長は、バンドギャップ差によりキャリアの閉じ込めとともに、屈折率差により光の閉じ込めが同時に実現されることにある。しかしながら、Krömer の論文では光の閉じ込め効果は言及されていない。このことも半導体レーザーの研究者から注目を集めなかった要因の一つである。

前節において、論文をともかく発表したことは意義深いと述べたが、じつは、同じ 1963 年にソ連のヨッフエ研究所の Alferov は、GaAs-GaPAs のダブルヘテロ構造を Krömer と独立に提案し、しかも、その後一連の実験研究を推進した^{18,19)}。しかし、低閾値レーザーの実現は容易ではなかった。それは、試みた 2 つの異なる半導体間の格子不整合に起因する結晶の低品質性が理由の一つである。

4. ダブルヘテロ構造レーザーの室温連続発振

4.1 室温における閾値電流密度の低減

1962 年に本格的に開始されたホモ接合レーザーの研究開発は、閾値電流密度が低減できないため、1965 年以降、次第に衰退していった。一方、1967 年、IBM 社の J. M. Woodall らは、液相エピタキシー法による GaAs 上に AlGaAs を成長し、GaAs と AlAs の格子定数がほぼ同じであるため、高品質なエピタキシャル層を得ることができることを見出した²⁰⁾。この研究から数ヶ月後、同じグループの H. Rupprecht らは、AlGaAs のホモ接合レーザーでの強い発光を確認した²¹⁾。

同じころ、ベル研究所では、固体エレクトロニクス研究所の所長の J. K. Galt の指示により、M. Panish と林が半導体レーザーの研究開発を開始した。Galt は、半導体

レーザーの実現が光通信システムの実用化に大きな意味を持つと考えていた。じつは、2 人とも半導体レーザーの研究者としては新参者であった。Panish は化学熱力学の実験家であった。林は、実験物理学者であり、東京大学原子核研究所助教授で計測を担当していた。米国で在外研究をしているうちに東大助教授職を辞してベル研究所に加わることを決意した。当時のベル研究所の研究水準や米国での滞在の魅力が、林の情熱をとらえたと思われる。林と Panish は、室温での閾値電流を下げることを目標にして、半導体レーザーの開発を共同で推進することにした。当初、林らはバンドテールが GaAs の注入キャリア分布に及ぼす影響に関心があり、室温の閾値電流密度を下げるために、ドーパントを使ってバンドテール形状を制御できないか検討していた。

林らは 1963 年に発表された Krömer の論文や、Rupprecht の直前に出版された論文²¹⁾ を知らずに、1968 年に開催された半導体レーザー国際会議に出席した³⁾。Rupprecht は、この会議で AsGa1As ホモ接合レーザーでは短波長での発振が得られることを強調するとともに、GaAs と AlGaAs が Al 組成に関わらず格子整合することも指摘した。この Rupprecht の発表に刺激を受けて、林と Panish は、研究開発の方針を大幅に変更した。彼らは、格子整合した GaAs-AlGaAs において、AlGaAs 層が電子の拡散のポテンシャル障壁として機能し、注入されたキャリアの拡散とエネルギー分布の考察から、この層がレーザー閾値の低減に有効である可能性を見出した²²⁾。

林らは、1969 年 1 月、単一の GaAs-AlGaAs ヘテロ構造を有するレーザーを開発した。彼らは、このレーザー構造のオリジナリティに自信満々で同じ 1 月に論文を投稿し、最終的には出版された²³⁾。しかし、査読段階で Krömer の論文の引用の漏れを指摘されたこと、および、投稿直後に RCA 社の H. Kressel と H. Nelson が本質的に同じ構造を有するレーザーの論文を発表したこと²⁴⁾により、その自信は打ち砕かれた。なお、このころから、このレーザーはシングルヘテロ構造レーザーと呼ばれるようになった²⁵⁾。

林らや Kressel らがシングルヘテロ構造レーザーに取り組んでいる間、レニングラードのヨッフエ研究所の Alferov らも、GaAs-AlGaAs レザーの研究を着実に進めていた。彼らは 1969 年 9 月に発表した論文で、300 K で約 $4 \times 10^3 \sim 13 \times 10^3$ A/cm² の閾値電流密度を報告した^{26,27)}。レーザーは、GaAs 基板上に成長した p-GaAlAs と n-AlGaAs 層で p-GaAs 層を挟んだ構造、すなわちダブルヘテロ構造で構成されていた。この構造により、光とキャリアの両方が GaAs 領域に閉じ込められる。林らも、1969 年末には、ダブルヘテロ構造レーザーの研究を開始していた。

4.2 室温連続発振

林らは、1970 年春には、300 K で約 1.6×10^3 A/cm² までしきい値を下げ、ヒートシンクによって、遂に室温連続発振に成功した。この成果は、1970 年 6 月、ワシントン州シアトルで開催されたデバイス・リサーチ会議で初

めて外部に発表した²⁸⁾。この成果を報告した論文は、1970年6月上旬に Applied Physics Letters に投稿され、8月1日号で発表された²⁹⁾。しかしながら、1970年9月号の Fizika iT ekhnika Poluprojdnikov 誌で、Alferovらにより300 Kにおける連続発振が報告されており、その論文の投稿は5月であった³⁰⁾。論文投稿日が最終的に研究のゴール到達を決めるとすれば、Alferovのヨッフエ研究所は、ベル研究所に先行したといえよう。

4.3 ノーベル賞受賞者について

以上をまとめると、ダブルヘテロ構造レーザー概念は、1963年に当時パリアン社に在籍していた Krömer が提案し、論文に発表した⁷⁾。ただし、同じ年、ヨッフエ研究所の Alferov と、F. Kazarinov は特許を出願していた。一方、ダブルヘテロ構造レーザーの室温連続発振の達成は、Alferov と林らがほとんど同時に報告したが、Alferov がわずかに早かった。

このような認識にもとづき、ダブルヘテロ構造レーザーに関して、ノーベル物理学賞に相応しい研究者2名をあらためて考えてみよう。まず、ダブルヘテロ構造を提案した Krömer は当確であるといえる。問題は、もう一人である。Alferov は1963年にダブルヘテロ構造を独立に提案し、しかもその後一貫して実験的に挑戦し続け、室温連続発振にもやや早めに到達した。たしかに、林と Panish は米国でのレースには勝利したが、彼らは、ホモ接合レーザーの初期の開発には参加しておらず、また、最後のゴールも文献的には若干遅れ気味であった。

よって、ダブルヘテロ構造レーザーに関してノーベル賞委員会が Krömer と Alferov を2名の受賞者に選んだ判断は、妥当であったといえる。

5. ヘテロ構造半導体レーザーのその後の発展

5.1 超格子、量子井戸への展開

室温連続発振以後、GaAs レーザーは寿命の問題と発振モードの不安定性の克服に苦労した。他方、InP 基板上の InGaAsP 系ダブルヘテロ構造レーザーは、そのような問題が顕著にならなかったため、光通信波長帯レーザーとして一気に発展を遂げた。ここでは、これらのレーザーの発展は他の解説に譲ることにして、ここでは、特に量子効果の観点から、ダブルヘテロ構造のその後の進展について概観する。

ダブルヘテロ構造は、その後、IBM の江崎 玲於奈の超格子と負性抵抗素子の提案³¹⁾に発展し、次節以降で述べる量子井戸レーザーや光変調器、さらには太陽電池などに展開された。一方、ベル研究所の R. Dingle により提案された変調ドープ構造³²⁾は、MOS 構造に適用されて高移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor: HEMT)として実用化された。さらに、固体物理学の発展として、Wuerzburg 大学の K. Von Klitzing は、強磁場中の2次元電子ガスの電気伝導を調べる過程で、量子ホール効果を発見した(1985年ノーベル賞)³³⁾。また、ベル研究所の D. C. Tsui と H. L. Störmer は、分数量子ホール効果

を見出した(1998年ノーベル物理学賞)³⁴⁾。さらには、電子の空乏化を利用して、ポイントコンタクトにおけるコンダクタンス量子化、単電子トンネル、人工原子・分子の電子構造などが探求された。このような電気伝導の量子効果の研究は、分子線エピタキシー(Molecular Beam Epitaxy: MBE)技術の発展に支えられてきた。

一方、ダブルヘテロ接合は、量子効果半導体レーザーの進展にも大きく貢献してきた。ここでは、量子井戸レーザー、量子ドットレーザー、および量子カスケードレーザーの発展について簡単に述べる。

5.2 量子井戸レーザー

ダブルヘテロ構造の狭いバンドギャップ層の厚さを10 nm オーダにした超薄膜構造が半導体量子井戸である。GaAs/AlGaAs 量子井戸の光物性の量子効果は、ベル研の R. Dingle と C. H. Henry によって1974年により報告され³⁵⁾、翌年の1975年には、量子井戸レーザーがベル研の J. P. Van der Ziel によって実現された。厚さ10 nm 程度の GaAs/AlGaAs 量子井戸を8層並べたものであり、窒素温度でのレーザー発振であった³⁶⁾。一方、イリノイ大学に移った Holonyak はロックウェルと共同で有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)法により量子井戸レーザーを実現するとともに、量子井戸レーザーの物理を深めた。特に、レーザー発振がLOフォノンを介してバンドギャップより長波長で行なわれることを主張し、当時の注目を集めた³⁷⁾(ただし、この現象は、今では高キャリア密度によるバンド縮退効果と理解されている)。

しかしながら、この段階では、ごく一部の半導体レーザー研究者や材料研究者のみが関心を向けていた。量子井戸レーザーが広く注目されるようになったのは、1982年にベル研の Tsang が0.25 kA/cm²の閾値電流密度を実現してからである³⁸⁾。この発表は日本の企業を含む各国の多くの研究機関に衝撃を与えた。さらに、1984年には、量子閉じ込め効果は、単に閾値電流の低減に有効であるだけでなく、動特性の性能向上にも寄与することを、カリフォルニア工科大学の荒川と A. Yariv らにより理論的に予測された³⁹⁾。半導体レーザーでは、変調帯域幅の増大と低量子雑音特性などの動特性が重要である。量子井戸レーザーでは、電子の2次元性により、従来の半導体レーザーと比べて、緩和振動周波数の増大と α パラメータの低減がなされるため、動特性の大幅な向上が得られる。この効果は、実験的にも荒川らや日立製作所の魚見和久らにより検証された^{40,41)}。

量子井戸レーザーは、その後窒化物半導体レーザーにも展開され、赤崎 勇、天野 浩、中村 修二らにより、青色レーザーの実用化の道が切り開かれた⁴²⁾。今や、あらゆる波長の半導体レーザーが量子井戸レーザーであるといっても過言ではない。このように、量子井戸レーザーは、ダブルヘテロ構造レーザーの発展的構造として、その地位を揺るぎのないものとしている。

5.3 量子ドットレーザー ～3次元量子井戸レーザー～

1982年、荒川と榊裕之は電子を3次元的に閉じ込める10 nmスケールの多次元ナノスケールのダブルヘテロ構造として、量子ドット概念とそのレーザー応用を提唱した⁴³⁾。また、しきい値電流の温度無依存性を理論的に予測するとともに、強磁場を用いてその可能性を実験的に示した。この論文では、このナノ立体ヘテロ構造を活性層とするレーザーを3次元量子井戸レーザーと呼んだが、1年後、量子箱レーザーに改名した。ただし、今では、量子ドットレーザーがすっかり定着してしまった。それは、3次元立方体ヘテロ構造を実現するのが容易ではなく、量子ドットはピラミッド形状になるためである。

1980年代の提案当初は、荒川自身も量子ドットは夢の3次元ナノ構造であり、実現は21世紀以降と考えていた。実際、当時は高品質の量子井戸を成長させることさえ容易ではなかった。このため、荒川と協力者は量子ドットレーザーの理論解析と前述の強磁場実験に注力した。しかし、成長技術の進歩は予想以上に早かった。1985年、GoldsteinはMBEによりInAs/GaAs歪み量子井戸の成長を試みたところ、透過電子顕微鏡(TEM)を用いた観察により、三次元立体構造、すなわち量子ドットが形成されていることを発見した⁴⁴⁾。結果的にこれはInAsとGaAsの格子定数の差に起因するStranski-Krasrtanow(S-K)成長モードと理解されたが、この発見は、いわゆるセレンディピティと言える。

S-K成長モードによる量子ドットレーザーの試みは、1994年にヨッフエ研究所とベルリン工科大学のN. Kirstaedter, Alferov, D. Bimbergらによって報告された⁴⁵⁾。レーザー発振が本当に量子ドットの利得で実現されていたかどうかは定かではないが、この報告は量子ドットレーザーの実現に向けた第一歩となった。その後、世界各地で次々と発振が報告され、現在、半導体レーザーの中で最も閾値電流密度は量子ドットレーザーで実現されている。Fig. 2は閾値電流密度の進歩(低減)を示しているが、半導体レーザーは、活性層がダブルヘテロ構造、

量子井戸、量子ドットへと進化することにより発展してきたことがわかる。特に、量子ドットレーザーでは電子状態のエネルギーの完全離散化が実現されており、キャリアの運動自由度(並進対称性)を有するバルクレーザーや量子井戸レーザーとは一線を画することに注意いただきたい。

2004年には、荒川と富士通研究所は、p変調ドーピング量子ドットレーザーの高い温度安定性を示すとともに⁴⁶⁾、全てのレーザーでの最高動作温度(220℃)を達成することにも成功した⁴⁷⁾。この高温動作もキャリアのエネルギー準位の完全量子化に起因するものである。今や、量子ドットレーザーは実用化されており、短距離光ファイバ通信システムの光源や光配線用シリコンフォトリソの光源として市場に出ている。

5.4 量子カスケードレーザー

量子カスケードレーザーは、半導体超格子におけるサブバンド間遷移を利用した単極性レーザーである。量子カスケードレーザーは、サブバンド間遷移を用いているため、中赤外から遠赤外領域で発光する半導体レーザーとして活用される。

量子カスケードレーザーの概念は、1971年にR. F. Kazarinovらによって提案され⁴⁸⁾、1994年にベル研究所のJ. Faist, F. Capasso, A. Choによって初めてレーザー発振が報告された⁴⁹⁾。最初の量子カスケードレーザーは、InP基板に格子整合したGaInAs/AlInAs材料系で作製された。この材料系は、伝導帯オフセット(量子井戸の深さに対応)が大きいのを特徴としており、高出力で室温連続発振を達成している。1998年、フランスのThomson-CSFのSirtoriらによってGaAs/AlGaAsによる量子カスケードレーザーも実証され、このレーザーが1つの材料系に限定されないことが示された⁵⁰⁾。

なお、本来量子カスケードレーザーは伝導体におけるサブバンド間遷移を利用する素子であるが、最近ではバンド間遷移を利用した量子カスケードレーザーも出現し

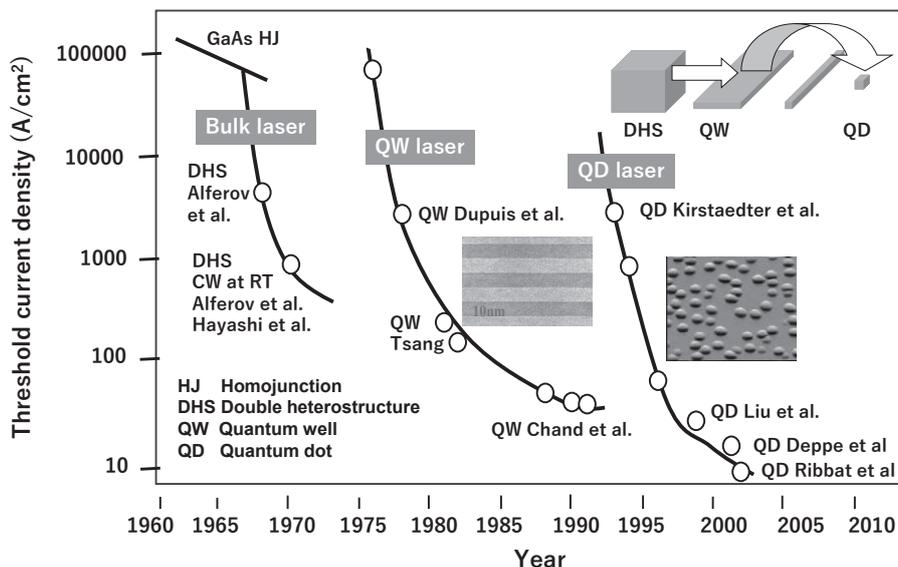


Fig. 2 Evolution of semiconductor lasers: Advances in threshold current-density reduction.

6 むすび

本解説では、2000年のノーベル物理学賞の重要な構成要素の一つであるダブルヘテロ構造レーザーについて、室温連続発振までの流れを概観した。また、半導体ヘテロ構造のその後の発展について、量子効果半導体レーザーを中心に紹介した。

これまで述べてきたように、ダブルヘテロ構造レーザーの開発は、米国と当時のソ連がリードしてきた。米国では、ベル研究所の貢献が圧倒的に大きく、ベル研究所の存在がいかに偉大であったか読者はあらためて認識したと思うが、IBMやGEなどの産業界の研究者も大いに貢献したといえよう。

なお、半導体ヘテロ構造は、屈折率(複素感受率の実部)の不連続性から光学的ダブルヘテロ構造も形成する。前述のように、この光学的効果も半導体レーザーの室温連続発振実現に重要であった。光学的ダブルヘテロ構造を有するレーザーのその後の発展としては、分布帰還型レーザー、垂直微小共振器面発光レーザー、フォトリソニック結晶レーザーなどが含まれるが、項数制限の関係上、これらについては全て説明を割愛した。

さて、二人の受賞者について少し個人的なつながりや感想を述べる(以下では敬意を込めて職名を付ける)。まず、Alferov教授については、同教授が主宰するロシアでのナノ物理の国際会議に筆者は何度も招かれた。また、同教授が執筆したいくつかのレビュー論文にも筆者の仕事を引用してもらっている。同教授は親方のような人で(政治家でもあるが)、会うと大げさに握手してくれたことが懐かしい。一方、Krömer教授は、1980年前半にNTTの前身である電電公社の武蔵野電気通信研究所と東京大学生産技術研究所に3ヵ月間滞在し、研究や講義などをした。同教授は、デバイス物理にフォーカスして業績を挙げた偉大な理論屋であり、孤高の人の印象も醸し出していたが、一方で気さくな方でもあった。残念ながらAlferov教授は2015年に、Krömer教授は2018年に、それぞれ鬼籍に入られた。

Alferov教授と並んで、半導体レーザーの室温連続発振の実現に貢献した林博士は、その後ベル研究所を辞して帰国し、NEC社でGaAs系レーザーの長寿命化に挑戦するとともに、光電融合技術を含め、我が国の光エレクトロニクス分野の発展に指導的な貢献を成した。林博士とPanish博士には、ノーベル物理学賞が授与された翌年の2001年に京都賞が授与されることにより、その偉大な業績が称えられた。

本解説では、文献を網羅することはせずに話を進めた。重要な業績への言及が十分でないかもしれないが、その場合にはご容赦いただきたい。本小文が、半導体レーザー室温連続発振に至る道程について、読者諸氏が理解を深めることに少しでもお役に立ったならば幸いである。

- 1) The Royal Swedish Academy of Sciences: *Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2000* (2000).
- 2) J. S. Kilby: US2892130A (1959).
- 3) H. C. Casey, Jr., and M. B. Panish: *Heterostructure lasers*, Elsevier (1978).
- 4) I. Hayashi: IEEE Trans. on Elec. Dev. **ED-31** (1984) 1630.
- 5) Z. Alferov: IEEE J. on Selc. Topics in Quant. Elec. **6** (2000) 832.
- 6) I. Hayashi: Oyo Buturi **58** (1989) 514 (in Japanese).
林 巖雄: 応用物理 **58** (1989) 514.
- 7) T. Maiman: Nature **187** (1960) 493.
- 8) M. G. A. Bernard and G. Duraffourg: Phys. Stat. Solidi **1** (1961) 699.
- 9) R. N. Hall: IEEE Trans. Electron Devices **ED-23** (1976) 700.
- 10) R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson: Phys. Rev. Lett. **9** (1962) 366.
- 11) M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. Lasher: Appl. Phys. Lett. **1** (1962) 62.
- 12) T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, and H. J. Zeigler: Appl. Phys. Lett. **1** (1962) 91.
- 13) N. Holonyak, Jr. and S. F. Bevacqua: Appl. Phys. Lett. **1** (1962) 82.
- 14) W. L. Bond, B. G. Cohen, R. C. C. Leite, and A. Yariv: Appl. Phys. Lett. **2** (1963) 57.
- 15) J. C. Dymont and L. A. D'Asaro, Appl. Phys. Lett. **11** (1967) 292.
- 16) H. Krömer: Proc. IRE **45** (1957) 1535.
- 17) H. Krömer: Proc. IEEE **51** (1963) 1782.
- 18) Zh. I. Alferov and R. F. Kazarinov: Authors Certificate 28448 (U. S. S. R.) (1963)
- 19) Zh. I. Alferov, D. Z. Garbuzov, V. S. Grigor'eva, Yu. V. Zhulyaev, L. V. Kradinova, V. I. Korol'kov, E. P. Morozov, O. A. Ninua, E. I. Portnoi, V. D. Prochukhan, *et al.*: Phys. solid state **9** (1967) 208 [Translated from Fiz. Tverd. Tela **9** (1967) 279].
- 20) J. M. Woodall, H. Rupprecht, and G. D. Pettit: Solid-State Device Conf., June, 1967, Santa Barbara, Calif. [Abstracts reported in IEEE Trans. Electron. Divices **ED-14** (1967) 630].
- 21) H. Rupprecht, J. M. Woodall, and G. D. Pettit: Appl. Phys. Lett. **11** (1967) 81.
- 22) I. Hayashi: IEEE J. Quantum Electron **QE-4** (1968) 113.
- 23) I. Hayashi, M. B. Panish, and P. W. Foy: IEEE L Quantum Electron. **QE-5** (1969) 211.
- 24) H. Kressel and H. Nelson: RCA **30** (1969) 106.
- 25) I. Hayashi and M. B. Panish: J. Appl. Phys. **41** (1970) 150.
- 26) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, V. I. Korol'kov, E. L. Portnoi, and D. N. Tretyakov: Sov. Phys. Semicond. **2** (1969) 843 [Translated from Fiz. Tekh. Poluprovodn. **2** (1968) 1016].
- 27) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, E. I. Portnoi, and M. K. Trukan: Soc. Phi'S. Senticond. **3** (1970) 107 [Translated from Fiz. Tekh. Poluprovodn. **3** (1969) 1328].
- 28) I. Hayashi and M. B. Panish: Device Research Conference. Seattle. Washington. June 1970.
- 29) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski: Appl. Phys. Lett. **17** (1970) 109.
- 30) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, D. Z. Garbuzov, Yu. V. Zhilyaev, E. P. Morozov, E. L. Portnoi, and V. G. Trofim: Soc. Phys. Semicond. **4** (1971) 1573 [Translated from Fi. Tekh. Poluprovodn. **4** (1970) 1826].
- 31) L. Esaki and R. Tsu: IBM J. of Res. and Dev. **14** (1970) 61.
- 32) R. Dingle, H. L. Störmer, A. C. Gossard, and W. Wiegmann: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 665.
- 33) K. von Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper: Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 494.
- 34) D. C. Tsui, H. L. Stormer, and A. C. Gossard: Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1559.
- 35) R. Dingle, W. Wiegmann, and C. H. Henry: Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 827.
- 36) J. P. van der Ziel, R. Dingle, R. C. Miller, W. Wiegmann, and W. A. Nordland, Jr.: Appl. Phys. Lett. **26** (1975) 463.
- 37) N. Holonyak, Jr., R. M. Kolbas, R. D. Dupuis, and P. D. Dapkus: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 73.
- 38) W. T. Tsang: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 217.
- 39) Y. Arakawa, K. Vahala, and A. Yariv: Appl. Phys. Lett. **45** (1984)

- 950.
- 40) Y. Arakawa and A. Yariv: IEEE J of Quantum Electron. **QE-22** (1986) 1887.
- 41) K. Uomi, T. Mishima, N. Chinone, Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 78.
- 42) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **Part 2** **36** (1997) L1568.
- 43) Y. Arakawa and H. Sakaki: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 939.
荒川 泰彦, 榑 裕之: 第 28 回応用物理関係連合講演会 (1981).
- 44) L. Goldstein, F. Glas, J. Y. Marzin, M. N. Charasse, and G. Le Roux: Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 1099.
- 45) N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, Z. I. Alferov, U. Richter, P. Werner, *et al.*: Electron. Lett. **30** (1994) 1416.
- 46) K. Otsubo, N. Hatori, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, M. Sugawara, and Y. Arakawa: Jpn. J. of Appl. Phys. **43** (2004) L1124.
- 47) T. Kageyama, K. Nishi, M. Yamaguchi, R. Mochida, Y. Maeda, K. Takemasa, Y. Tanaka, T. Yamamoto, M. Sugawara, and Y. Arakawa: CLEO Europe 5943701 (2011).
- 48) R. F. Kazarinov and R. A. Suris: Sov. Phys. Semicond. **5** (1971) 707.
- 49) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho: Science **264** (1994) 553.
- 50) C. Sirtori, P. Kruck, S. Barbieri, P. Collot, J. Nagle, M. Beck, and J. Faist: Appl. Phys. Lett. **73** (1998) 3486.