

通信用半導体レーザーの開発

勝山 造

Development of Semiconductor Lasers for Optical Communication — by Tsukuru Katsuyama — The performance of semiconductor lasers has been dramatically improved by applying quantum well structure including strained layer superlattice and innovation of crystal growth techniques such as organometallic vapor-phase epitaxy. The semiconductor laser used for optical communication came to be indispensable for our life as an optical component connecting not only long-distance, large-capacity optical transmission trunk lines but also access networks. This paper describes the development of the semiconductor laser for optical communication focusing mainly on Sumitomo Electric's R&D activities. With the progress of optical transmission technology, various kinds of semiconductor lasers have been developed for application to wavelength division multiplexing, high speed, low power consumption, and photonic integration.

Keywords: semiconductor laser, quantum well, optical communication

1. 緒言

半導体レーザーは、pn接合での光学遷移を利用して、電流を光（誘導放出）に変換する機能と、共振器による光の増幅機能とを併せ持つシンプルな構成によって、可干渉性の高い光を発光するデバイスである。1962年の発明から、その性能・機能、生産性は飛躍的な進歩を遂げ、通信関連の応用としては、幹線系の長距離・大容量通信だけでなく、家庭とインターネットとをつなぐ光部品などとして用いられ、我々の生活に不可欠な存在となっている。

インターネットの爆発的な普及が牽引する情報革命は、1969～1970年にかけての3つの技術革新、半導体レーザーの室温連続動作、低損失光ファイバの発明、ARPAnet (Advanced Research Projects Agency Network) の実験に源を発するとも言える。当時、当社は既に光ファイバ、半導体レーザーの基板材料となるGaAsなどの化合物半導体材料の研究開発を行っていた。そのような背景から素材、デバイス、システムまでを垂直統合した光通信事業を展開するという構想に基づき、光通信用半導体デバイスの研究開発を1980年代半ばより本格的に開始した。

本稿では、光ネットワークの高速、大容量、長距離伝送の流れに合わせ、当社の光通信用半導体レーザー開発の経緯を中心に述べる。1990年初頭までは、デバイス要素技術の確立と高性能化への取り組みの中で、地域網やアクセス網への応用を目指した、1.3 μm 帯ファブリ・ペロレーザ (FP: Fabry-Perot) の開発を進めた。1990年代は、波長分割多重 (WDM: Wave-length Division Multiplexing) 伝送が開花した時代で、WDMへの応用としてファイバアンプレックス励起用レーザー、分布帰還型 (DFB: Distributed

Feedback) レーザの開発に取り組んだ。2000年以降は、ITバブル崩壊からの回復に伴い、さらなる高速化、低消費電力化と多機能化を進展させるため、新材料の適用、面発光レーザー、集積デバイス開発などへの取り組みを促進した。

2. 高性能FPレーザーの開発

2-1 材料と結晶成長技術 光通信に使われる半導体レーザーの波長は、図1に示すように光ファイバの伝送損失と波長分散特性によって、長距離伝送用には伝送損失が最小となる1.55 μm 帯が、短距離用途では、波長分散が最小となる1.3 μm 帯が主に用いられている。しかし、最近では、後述するWDMの導入により、1260～1675nmの

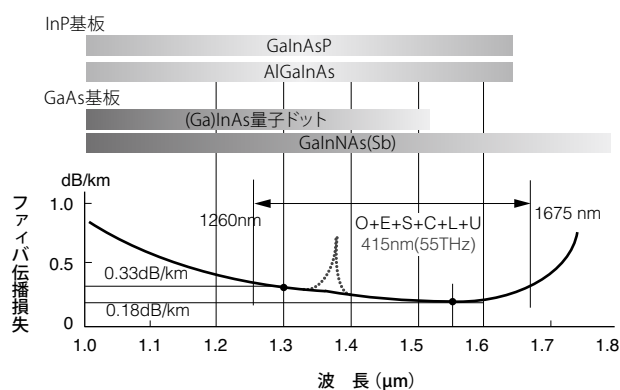


図1 ファイバ損失と発振波長・材料の関係

400nm以上もの帯域が使われるようになってきた。この波長帯で動作する半導体レーザを構成する材料は、そのバンドギャップが波長に対応し高品質な結晶性を維持するために、それらの格子定数が成長する基板の格子定数と一致することが要求される。これらの条件を満たす化合物半導体として、InP基板上に格子整合する材料系ではGaInAsP、AlGaInAsなどがあり、GaAs基板上に成長できる材料系ではGaInNAs、(Ga)InAsドット構造などがある。現在まで、プロセス上の扱いやすさや、信頼性の観点から主にGaInAsPが、用いられている。

これらの化合物半導体を成長する方法として、従来、高品質な結晶が得られる液相エピタキシャル成長（LPE：Liquid Phase Epitaxy）が用いられていた。しかし、80年代前半から、デバイスの高性能化に必須の極薄膜の成長が可能で、生産性に優れ、低コスト化に有利と考えられる、分子線エピタキシー（MBE：Molecular Beam Epitaxy）や有機金属気相成長法（OMVPE：Organometallic Vapor Phase Epitaxy）が注目されるようになった。特にOMVPEは、リン系化合物の成長に適し、均一性や柔軟性に優れると共に、基板面内で選択的な成長が可能といった利点を有する成長方法で、それらの潜在能力の高さが実証されるにつれ、ほとんどの半導体レーザの製造に用いられるようになった。我々は、OMVPE技術を半導体レーザ開発の基盤となる要素技術と位置付け、リアクター構造やガス供給系に独自の工夫を凝らし、均一性に優れ、原子層レベルの制御ができる結晶成長技術を80年代後半には確立し^{(1)~(3)}、その後の研究開発、製造に用いてきた。

2-2 量子井戸構造の開発 GaInAsPのような化合物半導体は、その組成を変えることで格子定数とバンドギャップを変化させることができるが、バンドギャップの異なる2つの薄層を交互に積み上げると、電子・正孔がバンドギャップの低い層に閉じ込められる構造ができる。バンドギャップの狭い層が電子の平均自由工程程度の厚み（数10ナノメートル）になると、電子・正孔のもつエネルギーが飛び飛びの準位を形成するが、このような電子・正孔のエネルギーが量子化される構造を量子井戸（QW：Quantum Well）構造、また多層化されたものを多重量子井戸（MQW：Multiple QW）構造と呼んでいる。MQW構造では、バルク材料では得られない物性が発現し、これを半導体レーザに応用することで、閾値電流、高温特性、変調速度などのデバイス性能の大幅な向上が期待できることが70年代半ばから後半にかけて明らかになり^{(4)、(5)}、半導体レーザの高性能化に必須の技術となった。

このMQW技術に加え、活性層の結晶に応力を加えることで、さらにレーザの性能を向上させる取り組みが80年後半より始まった。通常これらの化合物半導体は、良好な結晶性を維持するために、成長する基板に格子整合をとることが必須条件であった。しかし、量子井戸構造では、構成される材料の膜厚が非常に薄いために、**図2**に示すように、

多少の格子不整があっても、結晶格子は自らの弾性限界内で歪むことによって、格子不整による結晶欠陥を発生することなく良好な結晶性を維持することができる。このため、格子整合条件に制約されることなくバンドギャップを変えなど材料設計に自由度が増すことが示された⁽⁶⁾。これをきっかけに、応力の効果の研究が進み、レーザの発振閾値の低減や、変調特性の改善などが理論的に示され^{(7)、(8)}、それらの検証、信頼性に関わる基礎検討などが行われた^{(9)~(11)}。

我々は、前述の原子レベルの制御性を有する結晶成長技術を駆使し、世界で初めて応力をデザインした量子井戸（歪量子井戸）構造を可視光レーザ^{(12)~(15)}や、後述の光アンブレ励起用レーザ^{(12)、(16)}に適用し、極めて性能の良いレーザの開発に成功し、その有効性を実証した。この歪量子井戸技術は、量子効果の制御に加えて、応力による有効質量の制御というもう一つの新たな物性制御の手法を提供する技術となり、バンドエンジニアリングの幅をさらに拡大し、その後の多様な高性能デバイスを生み出す基盤技術となった。

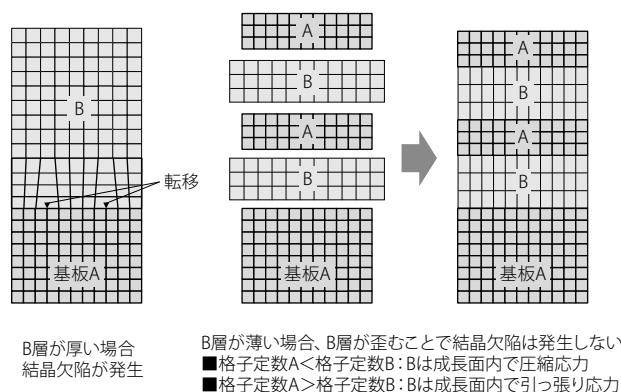


図2 歪量子井戸構造

2-3 全OMVPE成長量子井戸レーザの開発 当社における、MQW構造を用いた高性能レーザの開発は、地域網やアクセス網に使われる光データリンクへの搭載を目的にして、1.31μmのファブリ・ペロレーザ（FP：Fabry-Perot）からスタートした。デバイスの模式図を**図3**に示すが、組成の異なるGaInAsPで構成されるMQW構造活性層を成長後に、導波路ストライプをマスクとしてメサ状にエッチングし、p-InP及びn-InPを選択再成長している。これによって、逆バイアスによる電流ブロック層を形成し、電流をストライプ状に活性層に閉じ込める構造（PBH：Planar Buried Heterostructure）としている。その後、上部クラッド層、コンタクト層を成長し、容量低減のためのトレンチを設け、基板裏面を減厚後、電極を形成している。

我々は、量子井戸構造を採用したレーザの製造プロセスにおいて、3回の結晶成長をすべてOMVPEで行うことで、

低閾値で、130°Cの高温まで動作する温度特性に優れたデバイスを2インチ基板上に均一性良く作製することにいち早く成功した⁽¹⁷⁾。このMQW技術を含めたレーザ製造プロセスの革新は、それまで芸術品扱いであった通信用半導体レーザを量産化の段階へと進め、その後の生産性向上や製造コストの低減などに大きなインパクトを与え、当社の半導体レーザ製造技術の根幹をなすものとなった。

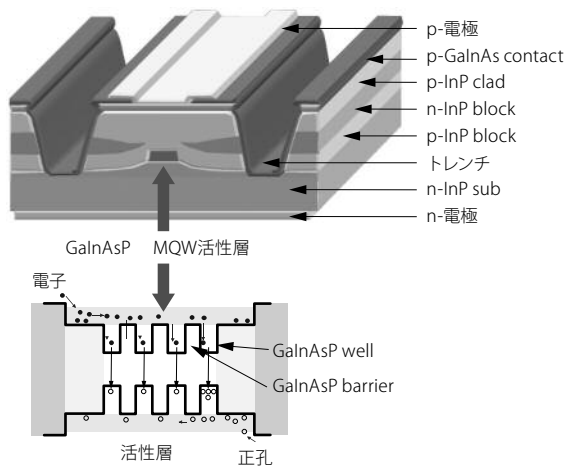


図3 FPレーザ構造

3. 波長分割多重 (WDM) 応用デバイスの開発

3-1 WDM 伝送技術の進展 WDM 伝送は、一本のファイバの中に、波長の異なる光信号を詰め込み伝送する方式で、新たにファイバを敷設することなく、既存の伝送装置で比較的容易に伝送容量を飛躍的に向上させることができる技術である。WDMは90年半ばから、幹線系の伝送容量増大を目的として、波長間隔の狭いDWDM (Dense WDM) の導入が進んだが、その後、地域網においても、経済性の観点から波長間隔の広いCWDM (Coarse WDM) 方式が導入されるようになり、ネットワークの大容量化が進展した。

このWDM技術を可能としたのは、光増幅技術の革新によるところが大きい⁽¹⁸⁾。光増幅技術は、図4に示すように、光信号を電気信号に変換することなく、光信号を光のまま増幅する技術で、比較的広い波長帯域の信号を、伝送速度、方式に関係なく一括増幅できる特長がある。光増幅器は、ファイバにエルビウム (Er) を添加し、波長0.98 μm 、及び1.48 μm の高出力レーザによって励起することで、1.55 μm 帯の光信号を増幅するEDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) が最も多く用いられている。

WDMによるネットワークの大容量化が進展する兆しが現れた90年初頭より、我々は前述のFPレーザ技術をベースにしてEDFAのキーデバイスとなる高出力ファイバアンプ励起用レーザの開発を行った。

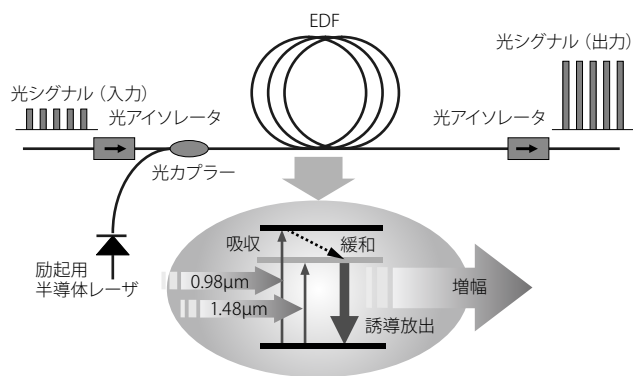


図4 光増幅器EDFAの原理

3-2 ファイバアンプ励起用レーザ 1.48 μm 励起レーザは、InP基板上に構成されるデバイスで、比較的高出力ではあるが、雑音指数が高く、効率、消費電力の改善が求められた。一方、0.98 μm 励起レーザは、GaAs基板上に構成されるデバイスで、効率が高く、雑音指数に優れているが、励起バンドが狭く、信頼性に課題があった。いずれのデバイスも高い信頼性を保ちながら光出力を増大させることが主要な開発課題であった。

1.48 μm 励起レーザでは、図3に示したFPレーザの活性層に圧縮応力を加えた歪量子井戸構造をいち早く導入した。これにより、図5の光出力-電流特性に示すように、光出力を従来より30%以上増大させることに成功し、最大出力250mW (共振器長900 μm)と当時としての世界最高出力を達成した。活性層への歪導入により懸念された信頼性についても、160mWの出力で5000時間以上の安定動作が確認でき、高い信頼性を実証することができた⁽¹⁶⁾、⁽¹⁹⁾。写真1に示す本レーザを用いた励起レーザモジュールは、社内外の顧客から高出力モジュールとして高い評価を得た。歪量子井戸構造を活用したレーザの高性能化は、本レーザの実用化などを経て、その後の半導体レーザに欠くことのできない技術となり、現在ではほとんどの半導体

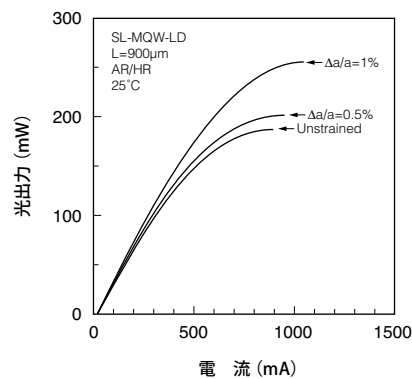


図5 1.48 μm ファイバアンプ励起レーザのI-L特性

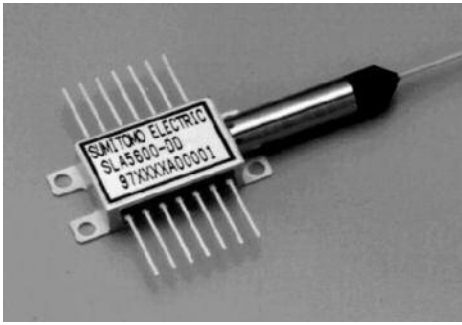


写真1 ファイバアンプ励起レーザモジュール

レーザに応用されている。

励起レーザモジュールの高出力化は、レーザチップの高出力化、ファイバ結合効率の改善に加えて、偏波や波長の異なるデバイスの合波によるアプローチも行われた。我々は、社内のファイバグレーティング技術を活用し、発振波長が、 $1.46\sim 1.49\mu\text{m}$ のファイバグレーティング励起レーザを作製し、これら4波をマッハチェンダ干渉型合波器で合波することで 520mW の高出力モジュールを実現した⁽²⁰⁾。

一方、 $0.98\mu\text{m}$ レーザは、効率が高く、波長が短いため、発熱による光出力飽和が起こる前に高い光密度による端面破壊 (COD: Catastrophic Optical Damage) で突然劣化することが問題となっていた。CODは、端面近傍での非発光中心などでの光吸収による温度上昇が半導体のバンドギャップを小さくし、それが光吸収をさらに増大させるという正帰還により、瞬時にレーザ端面が溶融、破壊する現象である。このため、端面近傍のバンドギャップを高め、光吸収を抑制する、いわゆる窓構造を有するデバイスを開発した。これは、端面近傍に窒素をイオン注入し、その後の熱処理によって、量子井戸構造を構成する原子を相互拡散させる技術を用いて作製された^{(21)~(23)}。これによって、COD耐性を大幅に改善すると共に、通電によるCOD耐性の低下を定量化することで事前にCOD劣化の可能性の高いデバイスを除去することが可能となった^{(24)、(25)}。これらの知見は、その後の高速デバイス開発における、COD耐性の向上などにも生かされている。

3-3 分布帰還型半導体レーザ トラフィックの増大とともに、地域網においても、WDMの導入が進展した。ここでは、波長間隔を 20nm と粗くすることで、温調装置なしでも隣接するチャンネル間の相互の影響をなくすことが可能で、小型・低価格なシステム構築ができるCWDM方式が主に用いられた。CWDMシステムで使われる光源は、単一モード性に優れ、かつ広い温度範囲で温調なしに動作することが要求される。一般に、良好な単一モードを実現するために、活性層の近傍に図6に示すように、回折格子が形成され、レーザはこの回折格子のピッチと光が感じる導波路の等価的な屈折率がブラッグ条件を満たす波長で発振する分布帰還型 (DFB: Distributed Feedback) レー

ザが用いられる。また、広い温度範囲で単一モード動作を実現するためには、レーザの利得ピークと発振波長の差 (ディチューニング) を最適化する技術が重要である。これは、DFBレーザの発振波長の温度依存性が図7に示すように、構成材料の屈折率の温度依存性 ($\sim 0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$) で決まり、利得の温度依存性 ($\sim 0.4\text{nm}/^\circ\text{C}$) と乖離が生じることに起因している。すなわち、高温では利得ピークが長波長側にずれ、利得低下により出力が低下する一方、低温では利得ピークは短波長側にずれ、マルチモード発振を起こしやすくなるためである。

DFBレーザに適用される回折格子は、一般に周期が 200nm 程度になるため、干渉露光あるいは電子ビーム露光によってパターンを形成し、エッチングにて周期的な段差を形成後、異なる屈折率を持つ結晶で平坦に埋め込むことによって形成される。我々は、干渉露光技術によって、 2イン チウエハ全面に均一な回折格子パターンを形成する技術を確認し、前述の全OMVPEによるFPレーザプロセスに組み込むことによって、 $-40\sim +85^\circ\text{C}$ の広い温度範囲で動作するDFBレーザを開発した⁽²⁶⁾。回折格子の形成場所は、活性層の上下で利害得失があるが、確立された高品質な量子井戸構造の成長技術の活用を優先し、回折格子を活性層成長後、すなわち活性層の上部に形成することにした。これは、結果としてディチューニング制御にも有利な構成

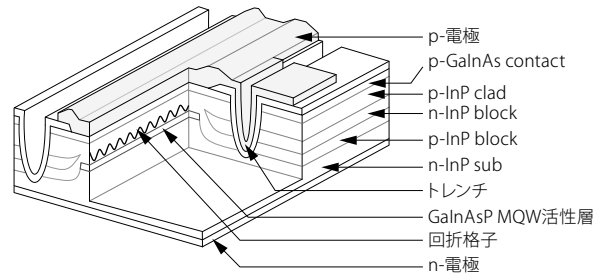


図6 DFBレーザ構造

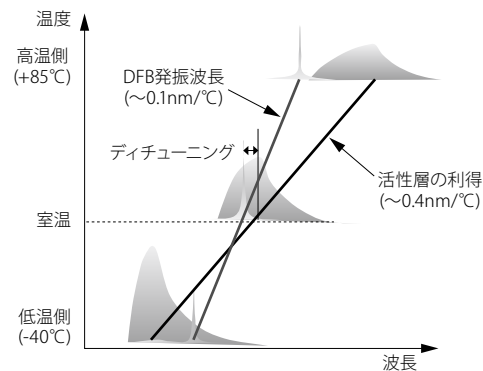


図7 発振波長と利得ピークの関係

であった。このため、早い時期にCWDM用途のDFBレーザ全波長（1270～1620nm）16波を揃えることができ、その後のCWDM応用の発展につながった。写真2に、S、C、L（S：1470、1490、1510nm C：1530、1550、1570nm L：1590、1610nm）バンドDFBレーザを搭載したTOSA（Transmitter Optical Subassembly）を示す。

波長のラインアップが揃ってくると、広い波長域でデバイスの特性に波長依存性がないことが望まれる。しかしながら、長波長領域では、短波長領域に比して、オージェ再結合や価電子帯間吸収といった損失要因の増加によりレーザ特性が劣化する。この波長特性の均一性向上と長波長帯レーザの性能改善に向けて、量子井戸内のキャリアを均一化させると共に、価電子帯間吸収による損失を低減する量子井戸幅や組成の最適化を試みた⁽⁷⁾。図8に、S,C,LバンドDFBレーザの85°Cでの電流-光出力特性を示すが、改善前に比べて大幅な閾値電流の低減とスロープ効率の改善が確認され、3つのバンド帯で非常に特性の揃ったレーザが実現できている。変調特性は、無温調で2.5Gbps動作に十分な高周波特性がいずれの波長域でも得られ、100km伝送においても、85°Cでのパワーペナルティが1dB以下の良好な伝送特性が得られた。

DFBレーザは、これまで述べたWDMなどのデジタル応用だけでなく、その良好な線形性を生かして、高い信号強

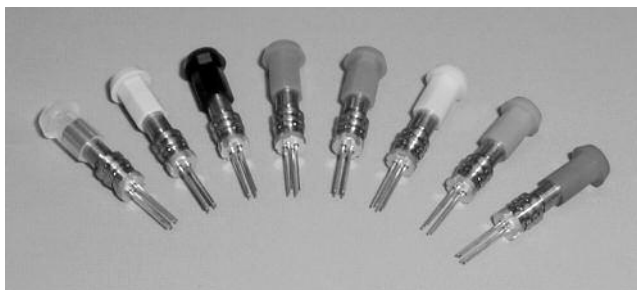


写真2 S,C,LバンドDFBレーザTOSA

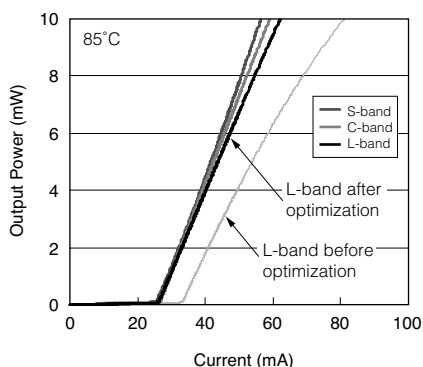


図8 S,C,LバンドDFBレーザのI-L特性

度比（CNR）が要求されるアナログCATV用途としても用いられ、-40～+85°Cの温度範囲で無温調動作する同軸型のモジュールが製品化されている⁽⁸⁾。

4. 高速、低消費電力デバイスの開発

4-1 高速化へのアプローチ WDMによる波長資源の有効活用が進む一方で、デバイスの高速化の進展も著しい。SDH（Synchronous Digital Hierarchy）、Ethernetの標準化の経緯を見ると、SDHは、91年の2.5Gbpsから約5年毎に4倍の、Ethernetは、95年の100Mbpsから約3年毎に10倍の速度規格が標準化されており、2010年5月には100GEの標準化が完了する予定である。

伝送速度が2.5Gbpsまでは、デバイス性能には余裕があったため、要求に応じた最適化は、トレードオフの厳しい制約を受けることなく進んだが、10Gbpsへの応用になってくると、様相が随分変わってきた。半導体レーザの変調周波数の上限を決める要因は、キャリア数の変化に誘導放出が追従できなくなる緩和振動周波数と寄生インピーダンスによる活性領域への電流注入効率の低下である。高速化の取り組みとして、先ず電気帯域を改善するために、寄生インピーダンスの低減を行った。図3に示す、GaInAsPレーザのトレンチ部分を低誘電率ポリマー（BCB：Benzocyclobutene）で埋め込み、デバイスの静電容量を低減することで、高周波帯域を15GHzまで改善した。これによって、10Gbps Ethernet対応の無温調デバイスを実現することができた。しかしながら、動作温度範囲や波形の規格が厳しいSDH対応の要求を満たすことが難しく、さらに10Gbpsを超える高速化には、物性の限界によって対応できないことが明らかになってきた。このため、新材料AlGaInAsを活性層に应用することでキャリアの漏れを抑制し、高温での緩和振動周波数を抜本的に改善することが必要となった。図9は、GaInAsP（InP）、AlGaInAs（InP）、GaInNAs（GaAs）三種の材料系のバンドギャップ構成を示したものである。従来のGaInAsP系に比して、AlGaInAs、GaInNAs系は、導電帯でのバンドギャップ差を大きくすることができ、効果的な電子の閉じ込めによって、高温においても、キャリアの漏れによる利得の低下を抑制することが期待できる。

AlGaInAs系材料は、InP基板に格子整合でき、V族元素がAs一種の化合物であることから、組成制御や均一性の向上の観点からも扱いやすく、従来のデバイスプロセスのほとんどの部分をそのまま使用できる利点がある。一方、Al系化合物特有の酸化し易い特性が、プロセス中の結晶欠陥や高い光密度に対する耐性劣化などの問題を誘発する可能性もあり、デバイスの信頼性を確保する取り組みの重要度が増した。このような、材料特有の性質に注意を払いながら、図3に示すPBH構造のレーザを試作した。その結果、85°Cで1万時間以上の通電から見積もられる推定寿

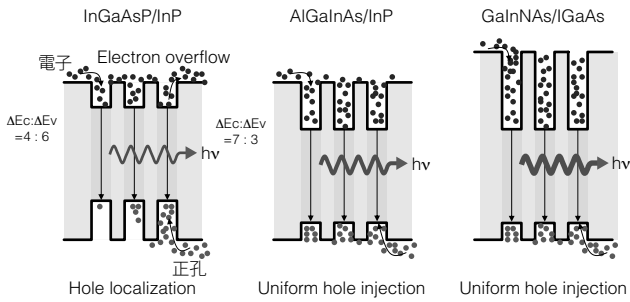


図9 異なる材料系のバンドギャップ構造

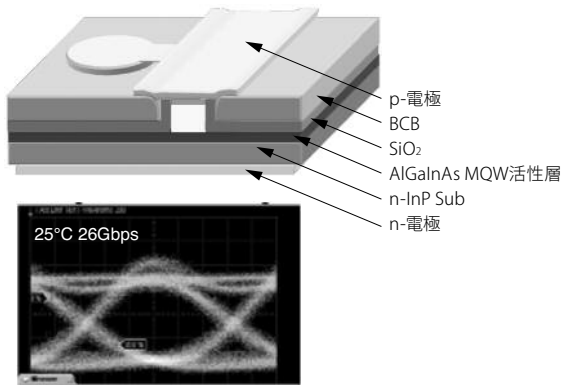


図10 BCB平坦化リッジ型DFBレーザ

命が24万時間と良好な信頼性を確認すると共に、高温で10Gbps動作するDFBレーザを実現した⁽³⁹⁾。

2010年に標準化が完了する100GEは、100Gbpsシリアル変調ではなく、25GbpsX4波（800GHz間隔）の波長多重の構成となるが、25Gbps直接変調動作を実現するには、これまでの低容量デバイスでも、電気帯域は不十分であった。このため、図10に示すようなBCBで平坦化し低容量化を図ったリッジ構造AlGaInAs系DFBレーザを試作した。その結果、デバイスの変調効率（注入電流に対する緩和振動周波数の変化量）は室温で3GHz/mA^{1/2}まで改善し、これまでに試作した端面発光型レーザの最高値が得られた。電気帯域も20GHzを超え、図10に示すように、26Gbpsで良好なアイ開口が確認され、10Gbpsを超える直接変調レーザとして応用が期待されている^{(30)、(31)}。

4-2 低消費電力デバイスへの展開 デバイスの省電力化は、高密度実装、小型化に向けた重要課題であるだけでなく、増加するトラフィックが、将来のエネルギー問題にまで発展しかねない光ネットワークの省エネを進める観点からも重要な取り組みである。ビット当たりのコストに加えて、ビット当たりの消費電力がデバイスを選択する重要な指標になってきている。

図9に示したように、GaInNAs系レーザは、GaAs基

板上に構成され、導電帯におけるバンドギャップ差はAlGaInAs系以上に大きくなることから、さらなる高温での特性の改善が期待できると共に、安価な大口径GaAs基板が使用できるという利点もある⁽³²⁾。さらに、AlGaAs系材料の組み合わせを自在に応用できることから、熱抵抗の低いAlGaAs/GaAsの半導体多層膜反射鏡（DBR：Distributed Bragg Reflector）の適用によって、消費電力の小さい面発光レーザ（VCSEL：Vertical Cavity Surface Emitting Laser）の実現が期待できる。これまでに、そのような、材料特性を反映したデバイスの可能性が高温動作FPレーザ^{(33)~(35)}、DFBレーザ⁽³⁶⁾、半導体増幅器⁽³⁷⁾、長波長帯VCSEL^{(38)、(39)}などで示されてきた。長波長帯VCSELの実用化には、既に端面発光型レーザを前提として決められた規格を満足することが大きな課題であり、特に高温での高速動作特性の向上が必要であった。そこで、光出力、温度特性、高速動作特性を向上させるために、新しい電流狭窄手法としてトンネル接合を採用し、上部ミラーを絶縁膜DBRで構成する図11に示すようなデバイスを開発した。これらの構成によって、熱抵抗と素子抵抗の低減、及び実効的な共振器長の短縮が図られ、高温特性と光出力が改善すると共に、高温での10Gbps動作が可能となった^{(40)~(42)}。

図12に典型的なVCSELの光出力-電流特性の温度依存性、85°Cでのアイパターンを示す。室温では、最大光出力4.2mW、85°Cでも2mW以上の光出力が得られ、85°Cに

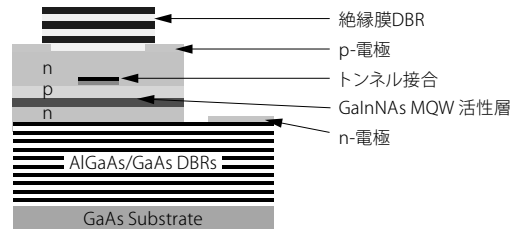


図11 VCSEL構造

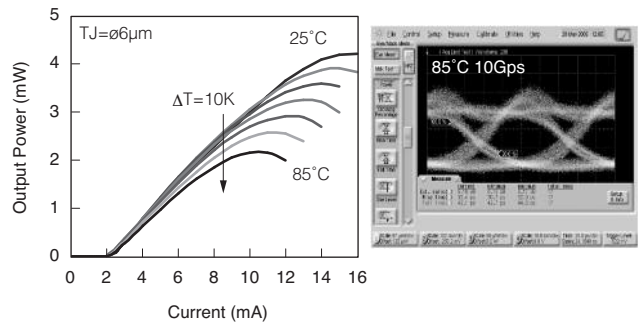


図12 VCSELのI-L特性及びアイパターン

においてもわずか7mA程度のバイアス電流で10Gbpsのきれいなアイ開口が得られており、短中距離の低消費電力高速光データリンク用光源などへの応用が期待される。

5. 集積デバイスの開発

光デバイスの集積化は、機能の異なる素子同志をつなげることによって、より高性能、多機能なデバイスを小型、低コスト、高信頼性で実現するためのアプローチであり、そのアイデアは1969年に提案されている⁽⁴⁾。この技術は光集積回路（PIC：Photonic Integrated Circuit）と呼ばれ、波長合分波器（AWG：Arrayed Waveguide Grating）やスプリッタなどの光受動部品を石英平面光導波路で構成したものなどが実用化されてきた。しかしながら、半導体基板上にウエハプロセスによってPICを形成する「モノリシック集積」は、進展が緩やかである。その大きな理由は、個別素子の完成度が高くないために、事前に素子を選別するためのスクリーニングが必要となり、検査の複雑化、歩留まりの低下などにより集積化のメリットが十分に発揮できないためである。

最もシンプルな半導体光集積デバイスの一つが、変調器とレーザを集積したもので、一般には、電界吸収型の変調器（EA：Electro Absorption）とDFBレーザを集積したデバイス（EA-DFBレーザ）である。EA-DFBレーザは、電界を変調器に印加することにより、変調器の吸収端を変化させ、DFBレーザから発した光を吸収することによって変調を行う。直接変調レーザのようにキャリアの注入を伴わないために、変調速度が速く、変調時の屈折率変化が小さい。このため、波長揺らぎ（チャープ）が小さく、中長距離の高速伝送に適したデバイスであり、100GEや40Gbpsへの応用が期待できる。

我々は、GaInAsP系の量子井戸構造を有する1.3 μ m DFBレーザとEA変調器を、選択成長技術を用いて、導波路を付き合わせ接合することで、低損失の接続を行った。その後ドライエッチングによりメサを形成し、半絶縁性のFe-InPで埋め込むことによって、電流狭窄と素子容量の低減を狙った図13に示すようなデバイスを開発した。このデバイスは、図14にそのアイパターンを示すように、室温において、100GE用光源として期待される25Gbps動作はもとより、40Gbpsでも良好な動作を示し、将来の320Gbps（40Gbps×8波）レベルの伝送にも適用が期待される⁽⁴⁾。

このような、集積化による既存デバイスの性能向上と共に、波長可変レーザ、波長変換器、モノリシック集積ONU（Optical Network Unit）、光ネットワークのノードデバイス⁽⁴⁾などの新しい機能の実現に向けた取り組みも多くの研究機関で活発に行われている。個別デバイスの完成度が高くなるにつれ、モノリシック集積のメリットは大きくなり、光ネットワークが直面する容量の増大や消費電力

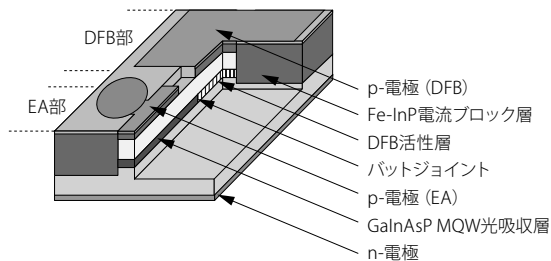


図13 EA-DFBレーザ

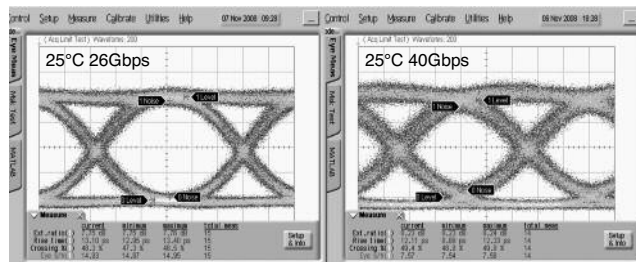


図14 EA-DFBのアイパターン

の低減に対する一つの有効な解決策を提供する技術となることが期待できる。このためには、光にしかできない、あるいは光が得意とする機能の実現に光を積極的に応用し、それ以外の部分は、電子回路技術を最大限に活用することで、システムトータルとして特長が発揮できるアプローチを考えていく必要がある。

6. 結 言

通信用半導体レーザの約20年間の開発状況を当社の取り組みを中心に述べたが、これらの開発を経て、長波長帯半導体レーザの累積出荷数は2007年1月には1000万デバイスに達した。通信用半導体レーザは、芸術品といわれた、高価で細心の注意を払って扱わなければ使いこなせない時代から、今やインターネットを中心にした情報化社会のインフラを支えるキーデバイスとして、一般家庭でも使われる時代となった。これは、80年代から90年代半ばにかけての、デバイス技術のイノベーション、すなわち量子井戸構造の適用と、それを可能とした結晶成長技術の革新、及びそれらのデバイスを使いこなす電子回路技術の飛躍的な進歩によるところが大きい。

2012年で誕生から半世紀を迎える半導体レーザではあるが、今後光ネットワークにおけるさらなるトラフィックの増大に伴い、物性の極限に迫る高速動作や、波長、偏波の高度利用、機能集積による応用展開などが期待され、新しい技術開発への挑戦は尽きない。

・ Ethernet は、富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 林秀樹、「化合物半導体デバイス —限りなき可能性を求めて—」、SEIテクニカルレビュー、第173号、p14 (2008)
- (2) H. Kamei et al., "OMVPE growth of GaInAs/InP and GaInAs/GaInAsP quantum well." J. Crystal Growth, p567 (1991)
- (3) T. Katsuyama et al., "Highly uniform GaInP and AlGaInP/GaInP QW structures grown by organometallic vapor phase epitaxy." International Symposium on GaAs and Related Compounds (1989)
- (4) J.P.van der Ziel, et al., "Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs-Al_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures", Appl. Phys. Lett. 26, 463 (1975)
- (5) R. D. Dupuis, et al., "Room-temperature laser operation of quantum-well Ga (1-x) Al_xAs-GaAs laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. 32, 295 (1978)
- (6) G. C. Osbourn, "Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials", J. Appl. Phys., 53, 1586 (1982)
- (7) A. R. Adams, "Band-structure engineering for low-threshold high-efficiency semiconductor lasers", Electron. Lett., 22, 249 (1986)
- (8) E. Yablonovitch et al., "Correction to "Reduction of lasing threshold current density by the lowering of valence band effective mass", J. Lightwave Technol., 4, 961 (1986)
- (9) P. J. Thijs, et al., "120mW cw output power from 1.5-um waveguide modulation doped InGaAs strained-layer quantum well lasers", WJ2, International Conference on Optical Fiber Communication, (1990)
- (10) T. Katsuyama et al., "Lifetime test for high-current-injection strained-layer superlattice light-emitting diode", IEEE Electron. Device Lett., 8, 240 (1987)
- (11) S. E. Fischer et al., "Long-lived InGaAs quantum well lasers", Appl. Phys. Lett., 54, 1861 (1989)
- (12) 林秀樹他、「歪み量子井戸レーザ」、電子情報通信学会技術研報告、DE91-115 v.91、No. 320、p.37 (1991)
- (13) T. Katsuyama et al., "Very low threshold current AlGaInP/GaIn_{1-x}P strained single quantum well visible laser diodes." Electronics Letters V. 26, p.1375 (1990)
- (14) T. Katsuyama et al., "High temperature (150 °C) and low threshold current operation of AlGaInP/GaIn_{1-x}P strained multiple." Appl. Phys. Lett. v.59, No.26, p.3351-3353 (1991)
- (15) T. Katsuyama et al., "AlGaInP strained quantum well visible laser diodes." Pro. of the 19th GaAs Related, Institute of Physics Conference Series (1992)
- (16) H. Kamei et al., "Ultra-high output power of 1.48um GaInAsP/GaInAsP strained-layer multiple quantum well laser diodes." International Conference on Optical Fiber Communication, TuH6 (1992)
- (17) H. Kamei et al., "Uniform lasing characteristics of 1.3-um multiple quantum-well Fabry-Perot laser diodes over a 2-in.-diameter wafer with excellent high-temperature operation." International Conference on Optical Fiber Communication, WM11 (1991)
- (18) 中川清司、中沢正隆、相田一夫、萩本和男 共著、「光増幅器とその応用」、オーム社 (1992)
- (19) N. Tatroh et al., "High-power, high-reliability 1.48-um strained-layer multiple-quantum-well laser and its application to a high-performance erbium-doped-fiber amplifier." International Conference on Optical Fiber Communication, WB4 (1993)
- (20) 中谷洋幸他、「波長合成による500mW級EDFA励起光源」、SEIテクニカルレビュー、第156号、p109 (2000)
- (21) N. Ikoma et al., "High Reliability of GaInP/GaInAs 980nm Window Laser." CLEO San Francisco (1998)
- (22) J. Hashimoto et al., "High Reliability of GaInP/GaInAs 980nm Window Laser." International Semiconductor Laser Conference, Nara (1998)
- (23) J. Hashimoto et al., "A Highly Reliable GaInAs-GaInP 0.98-um Window Laser." Journal of Quantum Electronics, vol. 36, No8, (2000)
- (24) J. Hashimoto et al., "Time dependence of catastrophic optical damage (COD) of 0.98um GaInAs strained quantum well laser." InP and related materials, Sapporo, Japan
- (25) J. Hashimoto et al., "Aging Time dependence of catastrophic optical damage (COD) of 0.98um GaInAs-GaInP strained quantum well laser." Journal of Quantum Electronics, vol. 33, No1, (1997)
- (26) T. Nakabayashi et al., "Uncooled DFB laser modules operating with low distortion over a wide temperature range for return paths of CATV network systems." International Conference on Optical Fiber Communication, (1996)
- (27) 松村篤志他、「CWDM用DFBレーザの開発」、SEIテクニカルレビュー、第169号、p21 (2006)
- (28) 吉田和宣他、「アナログ伝送用無温調同軸型DFB-LDモジュールの開発」、SEIテクニカルレビュー、第152号、p47 (1998)
- (29) N. Ikoma et al., "Highly Reliable AlGaInAs Buried Heterostructure Lasers for Uncooled 10Gb/s Direct Modulation." International Conference on Optical Fiber Communication, OThu1 (2005)
- (30) 八木英樹他、「BCB平坦化プロセスによるAlGaInAs/InPリッジ導波路型レーザの26 Gbit/s直接変調動作」、応用物理学会 (2009)
- (31) H. Yagi et al., "26 Gbit/s Direct Modulation of AlGaInAs/InP Lasers with Ridge-Waveguide Structure Buried by Benzocyclobutene Polymer" IPRM (2009)
- (32) M. Kondow et al., "GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance," Jpn. J. Appl. Phys., 35, p.1273 (1996)
- (33) S. Sato et al., "High-temperature characteristic in 1.3-um-range highly strained GaInNAs ridge stripe lasers grown by metal-organic chemical vapor deposition", IEEE Photon. Technol. Lett. 11, 1560 (1999)
- (34) S. Illek et al., "Low threshold lasing operation of narrow stripe oxide-confined GaInNAs/GaAs multiquantum well lasers at 1.28 um", Electron. Lett. 36, 725 (2000)
- (35) T. Katsuyama et al., "Very low threshold current GaInNAs quantum well lasers operating at 1.30um", CTuH3, CLEO, Baltimore, USA (2003)
- (36) J. Hashimoto et al., "GaInNAs Distributed Feedback (DFB) Laser Diode", CMFF1, CLEO (2007)
- (37) J. Hashimoto et al., "1.3um traveling-wave GaInNAs semiconductor optical amplifier", Jpn. J. Appl. Phys., 43, 3419 (2004)
- (38) L. A. Graham et al., "LW VCSELs for SFP+ applications," Proc. SPIE, 6908 (2008)
- (39) F. Romstad et al., "Photonic crystals for long-wavelength single-mode VCSELs," Proc. SPIE, 6908 (2008)
- (40) Y. Onishi et al., "High power and low resistive GaInNAs-VCSELs with buried tunnel junctions," Proc. International Semiconductor Laser Conference 2008, Sorrento, Italy, TuB2.
- (41) Y. Onishi et al., "100°C, 10 Gbps operation of buried tunnel junction GaInNAs VCSELs," Proc. European Conference on Optical Communications 2008, Brussels, Belgium, We.3.C.6.
- (42) 大西裕他、「埋め込みトンネル接合を用いたGaInNAs長波長VCSEL」、SEIテクニカルレビュー、第174号、p59 (2009)
- (43) S. E. Miller "Integrated Optics An Introduction" Bell System Technical Journal, 48, p2059 (1969)
- (44) 田和克久他、「40Gbps EMLを用いた1.3um帯LAN-WDMの伝送方式の検討」、電子情報通信学会 (2009)
- (45) 小山健二他、「フォトニックネットワーク用半導体集積光ラベル符号化デバイス」SEIテクニカルレビュー、第171号、p8 (2007)

執 筆 者

勝山 造 : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所
先端フォトンクス研究部 部長
工学博士
光通信半導体光デバイスの研究開発、
新規応用分野の開拓に従事

