光通信用長波長帯面発光レーザーの研究開発の現状

近藤 正彦

RWCP光インターコネクション 日立研究室 (〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280)

Present State of Long-Wavelength Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Masahiko KONDOW

RWCP Optoelectronics Hitachi Laboratory, c/o Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-8601

(Received June 18, 2001)

Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are required as light sources for next-generation optical communications. In this review, technical issues concerning fabrication of long-wavelength VCSELs are discussed, and approaches to make a breakthrough regarding these issues are presented.

Key Words: Long-wavelength, Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), Optical communications

1. まえがき

面発光レーザー, VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laserの略でビクセルと読む。), とともに音の響きが良く, 研究者のロマンをかき立てる。しかし, 実際のビジネスでは, そうそう甘いことを言わせてくれない。半導体レーザーの主市場のひとつである光ファイバ通信では, 市場の黎明期から端面発光型レーザーが使用されてきた。従って, 面発光レーザーが世に出るためには, 先行する端面発光型レーザーに取って代われなければならない。面発光レーザーは, 本小特集の他の解説論文などに記載されているように, 従来の端面発光型レーザーにはない多くの利点(および多少の欠点)を持っており, 優れたレーザー構造である。しかし, 利点の多くはシステムの低価格化に結び付くものであり, 端面発光型レーザーに無かった機能を実現するのは未だ少ない。一般に, 工業製品は大量生産することでコストが下がり生産性が向上する。逆に言えば, 生産技術の立ち上がり時に低価格化を実現することは難しい。従って, 低価格を売りにして市場に挑む面発光レーザーにとって, 技術開発および生産設備への投資を市場のニーズとタイミングを整合させて, 生産技術の立ち上がりを如何にスムーズに行うかが非常に重要である。

現在市販されている面発光レーザーは, 作製の容易さ(実際には困難さの少なさ)からレーザー波長が, 850nmもしくは980nmに限定されている。この波長帯では, 高速・長距離伝送に適合するシングルモードファイバが利用できず, マルチモードファイバを使用せざるを得ない。そこで, 面発光レーザーのデビュー市場は, 従来の長距離光ファイバ通信市場ではなく, それほど高速および長距離伝送特性が

必要とされない光LAN(Local Area Network)になった。光ファイバ通信の市場は, 数は出ないが単価の高い幹線系, 数が出るが単価の低いアクセス系, その中間のメトロ系と, 伝送距離により住み分けされている。光LANは, アクセス系よりも更に下の最ローエンドの市場である。(尚, 階層の上下関係と市場の大きさとは, 全く無関係である。)低価格を売りにする面発光レーザーとシステム価格の低さが非常に重要なLAN市場は, よく合致した。実際, 90年代後半からのインターネットブームにも乗り, 面発光レーザーはギガビットイーサ(1000BASE-SX)などのLAN市場を得ることに成功した。ところが, 最近電気接続(1000BASE-T)でもギガビットイーサに対応できるようになってきた。面発光レーザーは, 低価格の利点が失われつつあるばかりでなく, より低価格化に適する電気接続に反対に市場を奪われつつある。ギガビットイーサにおける光接続と電気接続の大きな特性の違いは, 伝送距離である。1000BASE-SX及び100BASE-T規格の最大延長距離は, それぞれ, 500mと100mである。100mあれば室内の配線には十分対応できるが, 500mでは階が異なる部屋や建物間の接続には不十分な場合が多い。従って, 500mと云う距離は, 「帯に短し, タスキに長し」で中途半端である。

面発光レーザーが次なる市場を得るためには, 電気接続では実現できない光接続ならではの高速伝送特性を売りにする必要がある。現在, LANの高速化が進み, 必要とされる最高伝送速度は1Gb/sから10Gb/sへ移行しようとしている。従って, 新たな市場が必要な面発光レーザーにとっては, 追い風と言える。この場合, 要求される伝送距離は, 望ましくは10km, 最低でも2-3kmである。10Gb/s・10kmの仕様は, まさにアクセス系光ファイバ通信と同じである。

従って、デビュー時には避けた従来型の端面発光型レーザーとの勝負となる。(次期市場は、10Gb/sと超高速なので伝送距離は数100mでも良いとの意見もあるが、伝送距離が長いほど早く高速性が要求され市場が先に立ち上がるので10kmは死守すべきであろう。)

現在の面発光レーザーシステムの伝送特性が良くない理由は、上述したように波長帯が異なるため高性能なシングルモードファイバを使用できないからである。決して素子そのものの特性が不十分なためではない。面発光レーザーシステムの伝送特性を改善するには2つのアプローチがある。1つは、レーザーの波長帯を現在のままとし、使用できるファイバの特性を改善する。もう1つは、既存のシングルモードファイバを使用できるように、レーザーの波長を1.3 μm 帯もしくは1.55 μm 帯へ移す。

第1のアプローチに関しては、最近10Gb/sで1.6kmの距離を伝送する事が出来る新構造のマルチモードファイバが研究室レベルで開発された¹⁾。しかし、ファイバの内部構造が複雑で、高価格になりそうである。LAN応用と云えども、数キロの伝送距離ではファイバのコストは無視できない。しかし、量産技術がひとたび完成されれば問題がなくなり、本命技術になる可能性も十分高い。

第2のアプローチは、正攻法である。また、面発光レーザーが先行する端面発光型レーザーに取って代わって主流になるためには避けてはならない道でもある。一方、現在までの多くの努力にもかかわらず未だに長波長面発光レーザーが実用化できていないのは、技術的に大変困難なことの裏返しでもある。また、繰り返しになるが、低価格を売りにして市場に挑む面発光レーザーにとって、技術開発を市場のニーズに整合できるかどうかが生死を決める。数年後には10ギガビットイーサネット市場が本格的に立ち上がる状態にある。長波長面発光レーザーの開発は、端面発光型レーザーの低価格化および上記第1のアプローチとのレースとなり、時間的余裕があまりない。現在、その実現を目指して幾つかのアプローチが試みられている。ここ数年の進展を全般的にみるとなんとかかなりそうな状況であるが、このアプローチが当確だと言えるにはまだ至っていない。しかし、逆に考えると、複数のアプローチが競合している現状には望みがあるのかもしれない。

本論文では、結晶材料の観点から、長波長面発光レーザーが何故困難なのか説明し、それを打破するために現在試みられているアプローチを紹介する。最後に、ポスト10ギガ

ビットイーサネットについて述べる。

2. 長波長帯面発光レーザーが難しい理由

Fig.1に、従来の端面発光型レーザー(Edge-emitting laser)と面発光レーザー(VCSEL)の構造概念図を示す。端面発光型レーザーでは、基板結晶(Substrate)の上方に光を出す活性層(Active layer)がエピタキシャル成長により作製されている。そして、活性層の上下には、光とキャリア(電子と正孔)を活性層内に効率良く閉じ込めるためのクラッド層(Cladding layer)が配置されている。また、1対の端面(へき開面)が反射鏡となり、レーザー発振を得るための共振器が形成される。従って、レーザー光は基板結晶と平行に出射される。長波長帯端面発光型レーザーを構成する結晶材料に求められる主な条件は、活性層が1.3 μm もしくは1.55 μm 帯で発光する事、クラッド層のバンドギャップが活性層より0.3eV程度大きい事、そして、活性層とクラッド層が基板結晶上にエピタキシャル成長できる事の3つである。

面発光レーザーでも、基板結晶の上方に光を出す活性層がエピタキシャル成長されている。大きな違いは、活性層の上下に屈折率が異なる材料を交互に積層した多層膜反射鏡(DBR: Distributed Bragg Reflector)が配置されていることである。上下の多層膜反射鏡の間が、共振器となる。一般に、面発光レーザーでは実効的な共振器長が半導体中でのレーザー波長と同程度と非常に短い。その場合、多層膜反射鏡がクラッド層の役割も果たすので、クラッド層を別に設けない場合が多い。レーザー光は、多層膜反射鏡と垂直、即ち、基板結晶と垂直な方向に出射される。面発光レーザーでは、レーザー光が共振器間を往復する際に発振に必要な利得が得られる距離はわずかに活性層の厚みのみである。因って、光の損失を極力押さえなければレーザー発振を実現できない。そのため、多層膜反射鏡の反射率を99.5%以上と極めて高くしなければならない。多層膜反射鏡を構成する材料の屈折率差が大きい場合、比較的少ない積層ペア数で必要な反射率を実現できる。しかし、屈折率差が小さい場合、多層膜の積層ペア数を大幅に増やさなければならない。必要な積層ペア数が20対から30対程度までなら技術的に対応可能であるが、50対以上になると作製誤差などが原因して積層ペア数をいくら増やしても必要な反射率を得ることができなくなる。長波長帯面発光

Fig.1 Schematic structures of an Edge-emitting laser and a VCSEL.

レーザーにおいて材料的に求められる主なる条件は、活性層が $1.3\mu\text{m}$ もしくは $1.55\mu\text{m}$ 帯で発光する事、多層膜反射鏡を構成する材料のバンドギャップ差が 1eV 以上、最低でも 0.5eV 以上大きい事(おおざっぱに言って屈折率はバンドギャップに反比例する。以下での議論のためにここではバンドギャップを用いて条件を記述する。)、そして、活性層と多層膜反射鏡が基板結晶上にエピタキシャル成長できる事の3つである。多層膜反射鏡はレーザー光を吸収してはならないので、多層膜反射鏡の高屈折率(低バンドギャップ)材料のバンドギャップは活性層のバンドギャップよりも大きくなければならない。多層膜反射鏡の高屈折率材料と活性層とのバンドギャップ差は 0.1eV 程度必要なので、上記の第2の条件は、多層膜反射鏡の低屈折率(高バンドギャップ)材料のバンドギャップが活性層よりも 1.1eV 以上、最低でも 0.6eV 以上大きい事、と言い変えても良い。尚、多層膜反射鏡のうち活性層より上部のものは、必ずしも半導体である必要は無く SiO_2 や TiO_2 等の誘電体材料を使用しても良い。しかし、下部多層膜反射鏡はその上部に活性層をエピタキシャル成長させなくてはならないので、上記第3の条件は緩まない。(下部多層膜反射鏡にも誘電体材料を使用するアプローチもあるが²⁾、あまり有望とは言いがたく現在は殆ど行われていない。)

以上の端面発光型レーザーと面発光レーザーに必要な条件の違いを整理すると、端面発光型レーザーでは活性層よりもバンドギャップが 0.3eV 程度大きい材料で良いが、面発光レーザーでは 1.1eV 以上、最低でも 0.6eV 以上大きい材料をエピタキシャル成長させなければならぬことになる。Fig.2に、III-V族化合物半導体の格子定数とバンドギャップの関係を示す。網掛けを施した従来材料に注目して頂きたい。全般的に、格子定数が大きくなる程、バンドギャップが小さくなる。エピタキシャル成長を行うには、基板結晶が必要である。現在、量産されているIII-V族

基板結晶は、GaP, GaAs, 及びInPだけである。エピタキシャル成長では、エピ層の格子定数を基板結晶に整合させなければならない。従って、エピタキシャル成長できる材料は、同図で縦方向に延びる点線の上またはその近傍(層厚が薄ければ、点線から多少離れていても成長可能である。)に限定される。 $1.3\mu\text{m}$ もしくは $1.55\mu\text{m}$ の長波長帯材料は、バンドギャップの値が 0.95 から 0.8eV の範囲になければならない。GaP及びGaAsと格子整合する点線上では対応する材料が存在せず、長波長帯を実現できるのはInP基板上に限られる。

長波長面発光レーザー作製の難しさを説明する前に、既存の 850nm および 980nm 帯面発光レーザーで使われている材料について述べる。基板結晶には、GaAsが使用される。 850nm 帯(1.45eV)および 980nm 帯(1.27eV)の活性層には、それぞれ、GaAsまたはGaAsに少量のInを加えたGaInAsが用いられている。 850nm および 980nm 帯の多層膜反射鏡には、それぞれ、AlAsとGaAsに少量のAlを加えたAlGaAs、及び、AlAsとGaAsが使用される。AlAsおよびAlGaAsは、GaAsとほぼ格子整合するのでGaAs上にエピタキシャル成長できる。AlAsとGaAsとのバンドギャップ差は 0.7eV で十分大きいとは言いがたいが、多層膜反射鏡に必要な積層ペア数は25対程度で技術的に対応できる。AlAsは2元化合物半導体であり、3元、4元の混晶半導体に比べると結晶成長が遥かに易しい。(従って、生産性が高く低価格化に向いている。)また、2元化合物半導体のAlAsは、3元、4元の混晶半導体に比べると熱抵抗が1桁程度低い利点も有している。さらに、AlAsは高温の水蒸気中で酸化すると絶縁体の AlO_x になるので、電流狭窄構造などの素子構造作製においても、強い利点を有している。

次に、長波長面発光レーザーの難しさを説明する。InP基板上に成長できる材料で、バンドギャップが最大のものは、AlPSbとAlAsSbである。それらのバンドギャップは 1.8eV

Fig.2 Bandgap Energy vs. Lattice Constant in III-V alloy semiconductors.

なので、活性層と十分なバンドギャップ差を有する。しかし、残念なことに、Sb(アンチモン)を含む材料の結晶成長は非常に難しく、現在まで商用化されている発光素子はない。(ここ数年の結晶成長技術の進展により、かなり良質なものが得られるようになってきており将来性はある。)次にバンドギャップが大きいものは、AlInAsである。そのバンドギャップは1.5eVなので、活性層の発光波長が1.55 μm 帯(0.8eV)なら、かろうじて必要なバンドギャップ差を得ることができる。一方、1.3 μm 帯(0.95eV)では非常に苦しい。1.55 μm 帯の活性層とAlInAs/AlGaInAs多層膜反射鏡の組み合わせで、なんとか必要な反射率を得ることができるが多層膜反射鏡に必要な積層ペア数は35対程度にもなる。そのため、多層膜反射鏡、特にp型の伝導型を有する多層膜反射鏡の熱抵抗と電気抵抗が非常に大きくなる。InP基板上に形成される1.3 μm 及び1.55 μm 帯の活性層では、材料にGaInAsPが使用される。しかし、GaInAsP活性層は物性的な理由により高温での動作に難点がある。従って、1.55 μm 帯のGaInAsP活性層とAlInAs多層膜反射鏡の組み合わせでは、高温での動作自体が極めて難しくなる。(LAN系およびアクセス系光ファイバ通信システムでは、価格を下げるためにレーザーの温調装置を省かなければならない。PC内や屋外にも置かれる光伝送モジュールでは最高85 $^{\circ}\text{C}$ までの環境温度を想定する必要がある、レーザーはその温度でも伝送に十分な特性を有する必要がある。)以上の理由により、長波長面発光レーザーを実現するのは極めて難しい。

ここで、面発光レーザーにおける長波長化による利点について言及しておく。仮に長波長帯面発光レーザーの素子抵抗が既存の850nmおよび980nm帯面発光レーザーと同程度(約50 Ω)なら、動作電圧は活性層が低エネルギー化した分だけ下がる。すなわち、1.55 μm 帯では、850nm帯から0.5V以上の動作電圧の低下が期待できる。レーザーの動作電圧低減に対するシステム要求は非常に強いので、長波長面発光レーザーはこの点で非常に有利である。もう1つの利点は、高出力化の可能性である。面発光レーザーの活性領域の体積は非常に小さいので、低しきい電流や超高速動作を実現できるが、同時に活性領域から取り出せる光出力が制限されてしまう。(伝送速度が上れば1ビットあたりの時間が短くなる。受光素子に同量の光子数を与えるためには、レーザーの光出力を上げなければならない。因って、高速伝送時にはレーザーに高出力特性が要求される。)既存の850nmおよび980nm帯面発光レーザーにおいて単一横モード動作が得られる活性領域の最大直径は2から3 μm であるが、この最大直径はレーザー波長に比例して増加すると予想される。活性領域の体積は半径の2乗に比例して増加するので、長波長面発光レーザーの基本特性を既存の850nmおよび980nm帯面発光レーザーと同様まで改善することができれば、活性領域の体積増大に応じて高出力化も可能である。まだ初期的実験ではあるが、1.3 μm 帯で8 μm^3 、1.55 μm 帯で12 μm^4 まで活性領域の直径を広げても単一横モード動作が得られたとの報告がある。これらの値は予想よりもかなり大きく今後の検証が必要であるが、長波長化により単一横モードが得られる活性領域の最大直径が増加することは間違いなさそうである。

3. 長波長面発光レーザーへのアプローチ

個々のアプローチを説明する前に、1.3 μm 帯と1.55 μm 帯のどちらが相応しいか議論しておく。石英材料を用いた通常分散ファイバは波長が1.31 μm 近傍で屈折率の波長分散値が最小となり、長距離伝送しても光パルスの時間波形が劣化しない。但し、光ファイバの損失は1.55 μm 帯よりも大きい。1.55 μm 帯の光ファイバの特徴は、その逆で、損失は小さいが波長分散がある。1.55 μm 帯の光ファイバの波長分散は、分散補償ファイバを使用すれば無くすることができる。しかし、分散補償ファイバを用いると、その分価格が高くなる。端面発光型レーザーを使用する現在の光ファイバ通信の市場では、長距離伝送が必要な幹線系では1.55 μm 帯、システム価格の低さが重要なアクセス系では1.3 μm 帯となっている。面発光レーザーが、将来端面発光型レーザーの牙城である幹線系の市場を狙うには1.55 μm 帯でなければならない。しかし、次期市場のアクセス系では、低価格化の観点から1.3 μm 帯が好ましいと言える。(長波長面発光レーザーが実用化に至っていない現状では、選り好みは言えないが...)以下に、各アプローチの詳細を説明する。

A. 直接接着法⁵⁾

本法では、GaInAsP活性層をInP基板上に、AlAs/GaAs多層膜反射鏡をGaAs基板上に別々にエピタキシャル成長させ、それらを高温で圧着して一体化させる。エピタキシャル成長の概念をやぶる画期的方法である。1.3 μm 帯と1.55 μm 帯のどちらにも適応可能である。接着界面も原子的に繋がり、なかなか良好である。しかし、複数の基板結晶が必要なので低価格化において有利とは言えない。GaAs基板は6インチまでのものが市販されているが、InP基板は3インチまでしかなく、直接接着法では大口径GaAs基板の利点を生かせない。また、接着界面はヘテロ接合となるので接触電圧が発生し動作電圧が高くなる。この点に関しては、直接接着法で作製した長波長面発光レーザーと850nmまたは980nm帯面発光レーザーを更に一体化し、長波長面発光レーザーを光励起することで接着界面に電流を流さない回避方法もある⁶⁾。実際、この方法で作製された長波長面発光レーザーが既に市販されている。問題点は、活性層が元々高温動作に難点があるGaInAsPであり、素子構造も複雑なため熱放出が悪く高温特性が悪いことである。また、GaInAsP活性層の光学利得はあまり高くなく、高速動作に難点がある。他には、一般に大面積基板では均一な直接接着が難しく、量産性が懸念されるが、歩留まり率などは明らかにっていない。

B. トンネル接合を利用する方法^{7,8)}

前章で述べたように、従来材料を用いて1.55 μm 帯長波長面発光レーザーを作製する場合の問題は、p型多層膜反射鏡の熱抵抗と電気抵抗が大きい事である。逆に考えれば、p型多層膜反射鏡を使用しなければ問題が解決される可能性がある。トンネル接合は、 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 程度と極めて高濃度にドーピングしたp型とn型の半導体の接合であり、低抵抗

かつ低電圧損でp型半導体とn型半導体を接合することができる。n型の基板結晶上にn型多層膜反射鏡、活性層、p型のクラッド層、そして、トンネル接合を形成すれば、その上にはn型多層膜反射鏡を作製すれば良い。従って、p型多層膜反射鏡を作製する必要がなくなる。実際、トンネル接合を利用した1.55 μm 帯長波長面発光レーザーは高温でも比較的良好な素子特性を示している⁹⁾。因って、トンネル接合は長波長面発光レーザーを実現する有力なアプローチと見なされている。今後の課題は、以下のとおり。トンネル接合を作製する際の超高濃度ドーピングでは、材料や成長方法が制限される。AlAsを酸化させて電流狭窄を作製する技術が利用できないので素子構造作製が複雑になる。InP基板を使用するので、大口径でかつ安価なGaAs基板と比べると低価格化で不利。多層膜反射鏡に3元もしくは4元の混晶半導体を使用するので、結晶成長に非常に高度な再現性、面内均一性が要求される。(AlAs/GaAs多層膜反射鏡を作製するだけでも技術的には非常に難しい。混晶半導体を用いた多層膜反射鏡が量産できるかどうかは今後の大きな課題である。)

トンネル接合を利用するアプローチは、歴史的経緯から1.55 μm 帯長波長面発光レーザーの場合が多いが、後述する材料と組み合わせれば、1.3 μm 帯長波長面発光レーザーでも適応可能であり、発展性が期待できる。

C. GaInAs3元混晶半導体を基板結晶に利用する方法¹⁰⁾

前章で示した問題点は、使用できる基板結晶がInPしかない事に由来している。仮に、GaAsとInPの中間の格子定数を有する基板結晶があったなら、すべての問題は解決されるであろう。そこで、GaInAs3元混晶半導体を基板結晶に利用するアプローチがある。実際、研究室レベルではGaInAs3元基板が作製されており、その上に作製した端面発光型レーザーの特性も良い。しかし、混晶基板へのチャレンジは長波長面発光レーザーよりも更に昔から試みられており、量産化を達成するには極めて難しい技術である。

以下に、GaAs基板上にエピタキシャル成長可能な材料を用いて活性層の波長を長波長化しようとするアプローチを4つ示す。

D. GaInAsを活性層に利用する方法¹¹⁾

本法は、0.98 μm 帯面発光レーザーでも使われているGaInAs量子井戸層のIn組成を増やし、発光波長を長波長化する手法である。活性層に使われる量子井戸の厚みは、一般に10nm以下と非常に薄い。格子定数が基板結晶と多少異なっても、臨界歪(これ以上格子歪が増えると転位が発生して結晶性が急激に悪化する限界の格子歪量)に達するまではエピタキシャル成長が可能である。実験の結果、1.2 μm 近傍で臨界歪に達する事が判った¹²⁾。尚、限界波長直前まで素子特性の劣化はあまりない。レーザー波長が1.2 μm だと、1.3 μm 帯のシングルモードファイバが何とか使える。但し、現在の光ファイバ通信の規格からは外れる。LAN用に新たな規格を作る事も可能だろうが、今後の発展性を考えると中途半端な妥協は躊躇される。他方、以下に

示す3つの新材料と比べると結晶成長が格段に容易であり、生産性が高い利点がある。

E. GaAsSbを活性層に利用する方法¹³⁾

Fig.2を見ると、GaAsとGaSbを結ぶGaAsSbはGaAsとInAsを結ぶGaInAsの曲線よりも上方にあり、長波長化に向かない。しかし、ある成長条件で成長すると結晶内部に周期構造が自然発生しバンドギャップが低エネルギー化することが判った。成長条件を探る事で長波長化を実現する研究が進められている。しかし、丁度1.3 μm 近傍で臨界歪に達するらしく、長波長化にはそれほど余裕がなさそうである¹⁴⁾。また、GaAsSb活性層はGaInAsPと同じく物性的な理由で高温動作に難点がある。

F. 量子ドットを活性層に利用する方法¹⁵⁾

GaAs上に、臨界歪を越える(Ga)InAsを成長すると、テフロンフライパン上の水滴の様に凝縮して直径が数十nmのドット形状になる。こうして形成された量子ドットは、発生の極初期では結晶欠陥が無く、発光材料として利用できる。臨界歪を越えてIn組成を増やすことが可能になるので、長波長化も可能である。現状での課題は、ドットは自然発生するので制御性が悪くあまり高密度に形成できないことである。従って、活性領域の体積を増やすことが難しく、レーザー発振に十分な光学利得を得にくい。そのため、特に高温においてレーザーの特性が大きく劣化する。量子ドットレーザーは、ドットの密度を如何に増やせるかに将来が託されている。量子ドットレーザーは、長波長化以外でも従来の量子井戸レーザーにはない多くの利点が期待できる。一方、物性的理由から高速動作特性に難があり10Gb/s動作は難しいとの指摘もある¹⁶⁾。

G. GaInNAsを活性層に利用する方法^{17,18)}

今まで説明してきたアプローチは全て従来材料を使用しており、利用できる材料の制限から様々な困難に直面している。一方、本アプローチのGaInNAsは著者によって作られた新材料である。Fig.2においてGaAsより真下に延びる太線がGaInNAsである。GaAsと格子整合でき、1.3 μm および1.55 μm のバンドギャップをカバーする。(実際にはIn組成を大きくN組成を小さくして結晶成長するので、GaInNAsには圧縮の格子歪がかかっている。)また、深い量子井戸を活性層に利用できるので高温特性に優れる。よって、長波長面発光レーザーを実現する理想的な材料と考えられる。新材料のGaInNAsで一番心配される点は、素子寿命である。しかし、実験してみると大きな問題がないことが判った¹⁹⁾。その他の問題点は、結晶成長の手法やその条件が確立していないこと、素子を設計する際に必須な物性定数が不明なことである。しかし、最近の研究によりこれらもかなり明らかになって来ている。その結果、少なくとも1.3 μm 帯レーザーでは諸特性が実用化に十分なレベルに達している。米国のベンチャー企業Cielo社は、GaInNAs 1.3 μm 帯面発光レーザーで10Gb/s・10kmの伝送を実証し²⁰⁾、2001年中の製品化を発表している。従って、本アプローチが、長波長面発光レーザーのブレイクスルー技術として現

在本命視されている。

4. ポスト10ギガビットイーサー

LAN市場は、凡そ3-4年毎に、3倍の価格で10倍の伝送速度を実現することを要求してくる。10Gb/sの後には、100 Gb/s、1Tb/sの伝送速度が必要になる。現状の半導体レーザーの動作速度限界は、数~数10Gb/sなので、100Gb/s以上の伝送速度を実現するためには複数のレーザーを使用しなければならないと予想される。面発光レーザーは、原理的に消費電力が小さくアレー化にも適しているので、複数のレーザーが必要なシステムに好適である。1Tb/sでは、少なくとも数十のレーザーを集積しなくてはならず、従来の端面発光型レーザーでは実現が難しい。また、システム価格を抑えるためには、1本の光ファイバで波長の異なるレーザー光を複数使用して伝送する波長多重法が必須になる。面発光レーザーは、MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) との集積が容易なので、共振器長を機械的に調節することが可能であり、波長可変に対応しやすい⁴⁾。従って、この点でも面発光レーザーは、有利である。以上を鑑みると、10年後には面発光レーザーが主流になる可能性が十分ある。

5. あとがき

面発光レーザーやGaInNAsは日本で生まれた技術である。しかし、ビジネス的に成功しているのは欧米の企業である。これは、チャレンジすることが賞賛される社会と、maverickが許されない社会との違いによると思われる。尚、Maverick氏は、所有する家畜に嫌がる焼印を押さなかった心優しい人である。日本の社会は、米国の10-20年前を後追いついており、10年後には日本の社会も変わっているかもし

れない。その頃に、面発光レーザーと日本の社会・経済がどうなっているか楽しみである。

参考文献

- 1) R. Michalzik, G. Giaretta, A. J. Ritger, and Q. L. Williams: *Proc. LEOS* (1999) PD1.6.
- 2) T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga: *Electron. Lett.* **29** (1993) 913.
- 3) J. F. Klem, Kent D. Choquette, A. J. Fischer, O. Blum, A. A. Allerman, I. J. Fritz, S. R. Kurtz, W. G. Breiland, R. Sieg, and K. M. Geib: *Proc. DRC* (2000) PD.
- 4) D. Vakhshoori, P. D. Wang, M. Azimi, K. J. Knopp, and M. Jiang: *Proc. OFC* (2001) TuJ1-1.
- 5) J. J. Dudley, D. I. Babic, R. Mirin, L. Yang, B. I. Miller, R. J. Ram, T. Reynolds, E. L. Hu, and J. E. Bowers: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 1463.
- 6) V. Jayaraman, J. C. Geske, M. H. McQuigal, F. H. Peters, T. D. Lowes, and T. T. Char: *Proc. LEOS* (1998) W12.
- 7) Y. Kotaki, S. Uchiyama, and K. Iga: *Ext. abst. 1984 SSDM*, p. 133.
- 8) M. Ortsiefer, R. Shau, G. Bohm, F. Kohler, and M. C. Amann: *Electron. Lett.* **36** (2000) 437.
- 9) S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J. K. Kim, D. A. Buell, H. Kroemer, and L. A. Coldren: *Proc. LEOS* (2000) ThF3.
- 10) H. Ishikawa: *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 712.
- 11) D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, F. Koyama, and K. Iga: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** (1999) 946.
- 12) S. Sato and S. Satoh: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L990.
- 13) T. Anan, K. Nishi, S. Sugou, K. Kasahara, M. Yamada, K. Tokutome, and A. Gomyo: *Proc. LEOS* (1997) PD1.4.
- 14) O. Blum and J. F. Klem: *Proc. DRC* (2000) p. 121.
- 15) K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara, and S. Yamazaki: *J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1710.
- 16) D. G. Deppe, D. L. Huffaker, H. Huang, T. F. Boggess, and L. Zhang: *Proc. LEOS* (2000) TuV3.
- 17) M. Kondow, S. Nishimura, K. Shinoda, and K. Uomi: Japanese patent AP07-340520 (filed on 27 December 1995), US patent #5912913 (registered on 15 June 1999).
- 18) K. Iga: *Proc. IPRM* (1996) ThA1-1.
- 19) M. Kondow, T. Kitatani, K. Nakahara, and T. Tanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L1355.
- 20) R. L. Naone, A. W. Jackson, S. A. Feld, D. Galt, K. J. Malone, and J. J. Hindi: *Proc. CLEO* (2001) CPD13-1.

レーザーワード

長波長面発光レーザー (long-wavelength VCSEL)

長波長帯の光を出す面発光レーザー。光ファイバの伝播波長(1.3~1.55 μ m)は、最初に開発されたGaAs系半導体レーザーの波長(0.85 μ m)に比べて長いので長波長帯と呼ばれている。長波長面発光レーザーは、高性能で低コストな光ファイバ通信用光源になる可能性が原理的に高いの

で、市場から熱望されている。一方、使用する材料の制限から作製が難しい。2001年現在、長波長面発光レーザーの本格的な実用化に向けたブレイクスルー技術が世界中で研究開発されている。
(近藤 正彦)