
MOCVD法による1.3 μm 帯GaInNAs量子井戸半導体レーザー

1.3 μm Range GaInNAs Quantum Well Laser Diodes Grown by MOCVD

佐藤 俊一*

Shunichi SATO

要 旨

長波長半導体レーザーにとって魅力的な新しいIII-V族半導体材料であるGaInNAsに関し、量産に有利なMOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) 法で、1.3 μm 帯GaInNAs高圧縮歪み量子井戸半導体レーザーを試作した。0.92 kA/cm² (22°C)の低しきい値電流密度と205 K (22 - 80 °C)の高い特性温度の両立を初めて実現した。また、1.3 μm 帯GaInNAs レーザでは最高温度となる170°Cまでの高温動作、及び27 mAの低しきい値電流での連続動作を7.5 μm 幅のリッジストライプレーザーで確認した。GaInNAs/GaAs材料系は、環境温度に対して安定であり特別な冷却システムを必要としない次世代の長波長帯半導体レーザーの材料として極めて有望であることが実証された。

ABSTRACT

GaInNAs is a novel III-V semiconductor material and is a very attractive material for long wavelength laser diodes. Highly strained 1.3 μm range GaInNAs/GaAs double quantum-well laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) are demonstrated. A high characteristic temperature of 205 K (22 - 80 °C) was obtained with a low threshold current density of 0.92 kA/cm² (22°C) in a broad area laser diode. The highest operating temperature of 170°C, and continuous-wave operation with a low threshold current of 27 mA were also obtained in a 7.5 μm wide ridge stripe laser diode. The GaInNAs/GaAs material system is very promising for next generation long wavelength laser diodes without any cooling device because they have stable characteristics at ambient temperature.

* 研究開発本部 中央研究所
Research and Development Center,
Research and Development Group

1. 背景と目的

近年、高度情報化に伴い扱われる情報量が飛躍的に増大している。今後更に加速すると考えられ、光による大容量情報伝送技術が極めて重要となるであろう。現在、加入者系ネットワークは電話サービスを主体としたメタルケーブルで構成されているが、今後のマルチメディアサービスに対応するため光ファイバー通信への置き換えが検討され、電話局間の基幹伝送路への光通信の導入が進んでいる¹⁾。今後は各家庭やオフィスへも光ファイバー化(Fiber To The Home (FTTH))が進む。更にはLAN (Local Area Network)や、コンピュータシステムにおいても配線が伝送速度のボトルネックとなるため、配線を光で置き換える光インターコネクション技術が必要となるであろう。リコーにおいても将来の充実したオフィスネットワークサービスを提供するために、コンピュータ、コピー、プリンタ等の各機器間、機器内における光による大容量情報伝送技術が重要になると思われる。

現在の光ファイバー通信には、石英系光ファイバーでの伝送損失が小さい1.3 μm 、1.55 μm 帯の波長の半導体レーザが用いられており、この波長に対応するバンドギャップを有するIII-V族半導体であるInP基板上のGaInPAs系材料が市場を独占している。半導体レーザの動作原理上、クラッド層との接合により発光層へ光と注入キャリアを閉じ込める必要があるが、InP系材料の半導体レーザは、クラッド層と発光層との間の伝導帯バンド不連続が小さく、発光層への注入キャリア(電子)の閉じ込めが温度上昇とともに悪くなる結果、環境温度が室温から80°Cになると動作電流が3倍にも増加する大きな欠点を持っている²⁾。このため、従来の光情報伝送用1.3 μm 帯半導体レーザ送信モジュールは、冷却システムを必要とし高価であった。幹線系においては、大幅なコスト上昇につながる冷却システムを用いている。今後の各家庭やオフィスへの光ファイバー通信導入を可能にするためには、モジュールの「桁違い」の低価格化と低消費電力化が最重要課題であり、消費電力が小さく、かつ冷却システムを必要としない良好な温度特性の長波長帯半導体レーザが強く求められている³⁾。

クラッド層と発光層との間の伝導帯バンド不連続を大きくしてキャリア閉じ込めを良くし、冷却システムを必要としない良好な温度特性の長波長帯レーザを実現するために、

InP基板上の材料系による構造検討^{4,6)}や、GaInAs三元基板の利用⁷⁾などが報告されている。そして更には、極めて強いキャリア閉じ込めを実現し得る新しい材料系としてGaAs基板上のGaInNAsが提案された¹²⁾。窒素(N)と他のV族元素(GaInNAsの場合As)を含んだIII-V族混晶半導体は非混和性が強く(混ざりにくい)、従来成長不可能と考えられていたが、Weyers et al.によりGaAsにNを数%添加したGaInAsの結晶成長の成功が初めて報告されて以来⁸⁾、MBE(molecular beam epitaxy)やMOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)のような非平衡度の高い成長方法による結晶成長の報告がされるようになった⁸⁻¹²⁾。また、Nの電気陰性度が他の元素に比べて大きいことに起因して、Nを少量添加することでバンドギャップが減少するなど、従来のIII-V族混晶半導体とは大きく異なる物性を持っていることがわかってきた。GaInNAsの場合、GaAsより格子定数が大きいGaInAsにNを添加することで、GaAsに格子整合させることが可能となるとともに、そのバンドギャップが小さくなり、1.3 μm 、1.55 μm 帯での発光が可能となる。GaAs基板格子整合系なので、ワイドギャップのAlGaAsやGaInPをクラッド層に用いることができる。更に、Kondow et al.によるバンドラインナップの計算によると¹²⁾、Nの添加によりバンドギャップが小さくなるとともに、伝導帯、価電子帯のエネルギーレベルがともに下がり、ヘテロ接合における伝導帯のバンド不連続が極めて大きくなると見積もられ、特性温度(T_0)が150 K以上(室温に対し80°Cでの動作電流が1.5倍以下)である半導体レーザを実現できると予想された。更に、小型、低消費電力及び2次元集積化による並列伝送に結びつく面発光レーザ(基板に対して垂直方向にレーザ光を放出する半導体レーザ)は従来のGaInPAs/InP系では実用化に絶え得る性能を得るのは困難だがGaInNAs系材料によるとその実現が期待できる¹³⁾。

GaAs基板上の1.3 μm 帯GaInNAsレーザは1997年に実際にリコー^{14,16)}と日立¹⁷⁾で初めて実現された。結晶成長法として日立はMBE法を用いている。我々は量産化に有利なMOCVD法を用い、GaAs基板に格子整合する長波長GaInNAsの結晶成長に初めて成功し¹⁴⁾、In組成10%、N組成1.5~3%、の厚膜GaInNAs活性層を用いたダブルヘテロ構造からなる半導体レーザを試作した。その結果、N組成増加とともに発振波長は長波長化し、N組成3%で1.3 μm での発振が得られた。しかしながらN組成増加とともに急激にしきい値電流密度が

増加した¹⁸⁾。このようにGaInNAsのようなNと他のV族元素を含んだIII-V族混晶半導体は、N組成が大きくなるほど結晶性が大きく劣化し、レーザの特性が悪くなるという問題があった。また活性層構造については、厚膜活性層を用いたダブルヘテロ構造よりも、量子効果が得られレーザ特性が向上する量子井戸構造の方が好ましく、一般に用いられている。更に量子井戸活性層にすることでN組成を低減できる効果がある。GaAsへのNの添加はバンドギャップが小さくなるとともに格子定数も小さくなる。一方、Inの添加はバンドギャップが小さくなるとともに格子定数は大きくなる。ある波長を得るためのGaInNAsの組成はいろいろ取り得る。In組成を大きくすることでN組成を小さくできるので、結晶性の劣化を低減でき好ましい。ただし、GaInAsに組成が近づくとGaAsの格子定数との差が大きくなり圧縮歪が増加するので、格子緩和が発生しない厚さにする必要がある。この点からも厚さの薄い量子井戸活性層構造が好ましい。以上のように、予想された高性能なGaInNAs系材料によるレーザを実現するためには、結晶性の改善と構造の最適化が重要な課題である。

そこで本報告では、結晶性の改善、素子構造の最適化を図ることで、期待される優位な性能を確かめることを目的とし、GaInNAs量子井戸のMOCVD法による結晶成長の検討、及びGaInNAs量子井戸半導体レーザの試作評価を行ったので、これらについて述べる。1.3 μm帯の半導体レーザにおいて、1 kA/cm²以下の低しきい値電流密度と200 Kを超える高い特性温度を初めて同時に実現し、期待される優位性を実証できた。

2. 技術

2-1 GaInNAs量子井戸の結晶成長

2-1-1 MOCVDによる成長

成長には横型炉のMOCVD装置を用いた。III族原料に有機金属を用いた気相成長法である。被成長基板を加熱することにより、反応室に導入された原料ガスの熱分解と基板表面での表面反応により結晶成長し、成膜される。MBE法のような高真空を必要とせず容易にスループットを上げられることから、極めて量産に適した成長方法であり、実際に半導体

レーザの生産にはほとんどの場合MOCVD法が採用されている。結晶成長の詳細は参考文献14,16,18,19を参照のこと。

2-1-2 クラッド層材料と熱処理効果

クラッド層としてはAlGaAsやGaInP(As)等を用いることができる。大きな歪みを有したGaInNAs活性層は低温(例えば600°C以下)で成長可能となる。しかしAlGaAsの成長温度は一般に高い(例えば700°C以上)。そこで、活性層成長後に、活性層の上部にAlGaAsクラッド層を成長することを想定して熱処理実験を行なった。具体的に、(100)GaAs基板に、GaAs層(膜厚が0.2 μm)、GaInNAs井戸層(膜厚が7 nm)、GaAs層(膜厚が50 nm)を順次に成長させた試料を4試料(a, b, c, d)作製した。各試料は、In組成は同じでN組成が違う。試料aのN組成は0.2%、試料bは0.2%、試料cは0.5%、試料dは0.8%である。その後、MOCVD成長装置を用いてAsH₃雰囲気中で、試料c,dについては680°Cの温度で、試料bは700°C、また、試料aは780°Cで、30分間熱処理した。Fig.1には、これらの試料のPL(photoluminescence)特性を示す¹⁹⁾。点線が熱処理前のスペクトルであり、実線が熱処理後のスペクトルである。熱処理によりピーク波長が短波長側にシフトし、熱処理温度が高い方がシフト量は大きいことがわかる。同じ温度では、N組成が違う試料間(c,d)でシフト量は同じであり、このシフトの原因としてはInの拡散が考えられる。また、発光強度は、780°Cでは低下しており、700°C以下では増加していることがわかる。発光強度の増加の原因は熱処理による活性層中の欠陥の減少と考えられ、低下の原因は結晶性の劣化と考えられる。

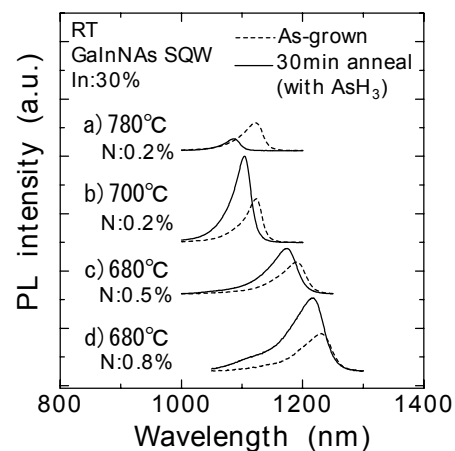


Fig.1 PL spectra of as-grown (dashed line) and thermally annealed (solid line) GaInNAs SQW layers¹⁹⁾.

このように大きな歪みを有したGaInNAs活性層を成長してから780°Cのような高温で上部の層を成長すると不具合が生じることがわかった。このため上部クラッド層は780°Cより低い適した温度で成長する必要がある。もちろんAlGaAsでも780°C以下の適した温度で成長すれば用いることができるが、ここではAlGaAsより低温成長に向いているGaInP(As)系を用い、700°C以下の低温で成長することにした。

2-2 1.2 μm帯GaInNAs量子井戸レーザーの特性

GaInNAs量子井戸を用いて、(100)just基板上にGaInNAs-DQW(Double Quantum Well)レーザー構造を成長し、1.2 μm帯レーザーを試作した。比較のためにGaInAs-DQWレーザーも試作した。Fig.2に作製したレーザーの構造を示す。InとN組成がそれぞれ33%と0.6%であるGaInNAs量子井戸層(膜厚が7 nm)およびGaAsバリア層(膜厚が13 nm)からなる活性層と、GaAs層(膜厚が100 nm)からなる光ガイド層、Ga_{0.5}In_{0.5}P層(膜厚が1.5 μm)からなるクラッド層を用いた構成とした。リファレンスのGaInAsレーザーとGaInNAsレーザーとの違いはNの原料であるDMHy(dimethylhydrazine)の供給の有無だけである。ストライプ幅50μmでGaAsキャップ層はリッジにした。

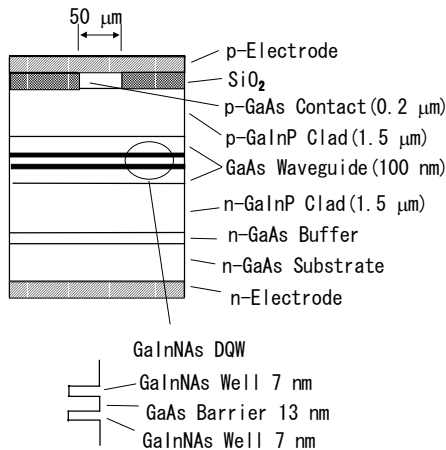


Fig.2 Schematic structure of the GaInNAs DQW laser¹⁹⁾.

Fig.3に作製したレーザーのI-L(電流-光出力)特性を示す。しきい値電流密度(J_{th})は660 A/cm²であった。1kA/cm²以下の低い J_{th} で室温連続動作を実現した¹⁹⁾。波長は1.245 μmであった。また組成の分布や量子井戸活性層の厚さの分布を反映して、波長は1.22~1.245 μmに分布した。Fig.4に示すように J_{th} は波長に依存し400~660 A/cm²に分布した。これらの値は報告さ

れているGaInNAsレーザーの中で最小値である。これらの J_{th} の値はリファレンスのGaInAs(1.13 μm)レーザーに比べて2~3倍大きい。井戸層の数を多く必要とする従来材料GaInPAs/InPレーザーと比較すると遜色ないレベルである。

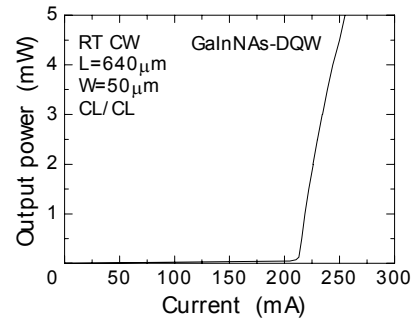


Fig.3 I-L characteristics of the GaInNAs DQW laser¹⁹⁾.

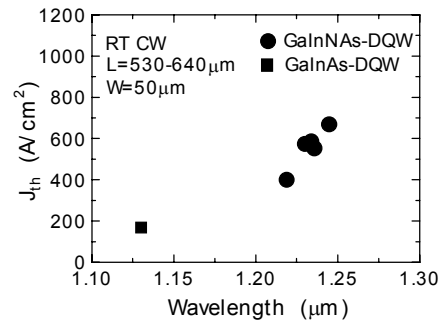


Fig.4 Wavelength dependence of threshold current density of the GaInNAs DQW laser¹⁹⁾.

2-3 高歪GaInAs量子井戸の結晶成長と長波長化

光ファイバーの伝送損失の小さい1.3 μmでの動作を得る手段としてN組成の増加が考えられるが、それ以外にも更なるIn組成の増加で実現できることがわかった。N組成の増加は結晶性を劣化させ、しきい値電流密度の増加を招いてしまうので、N組成を増加させないで実現できる方法は極めて好ましい。

GaInAsはIn組成を大きくすることでバンドギャップは小さくなり、その格子定数はIn組成に従って大きくなり、GaAsとの格子定数差が拡大する。下地の基板に対して格子定数の違う材料を成長すると、格子は弾性変形してそのエネルギーを吸収する。しかし、格子定数の違う材料を厚く成長していくと、弾性的な変形だけでは歪みエネルギーを吸収できずにミスフィット転位が生じてしまう。この膜厚を臨界膜厚という。ミスフィット転位が生じてしまうと、良いデバイ

スを作製することは困難である。また逆に膜厚が薄くなると量子サイズ効果により短波長化する。このような理由から従来GaAs基板上での長波長化には限界があった。その限界歪み量は、約2%程度であり、発振波長は1.1 μmが限界であると言われている²⁰⁾。

理論的には、力学的にミスフィット転位が生じる厚さである臨界膜厚(h_c)が、Matthews and Blakesleeによって次式により与えられており²¹⁾、一般に支持されている。

$$h_c = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \alpha)}{8\pi f(1 + \nu) \cos \lambda} \left(\ln \left[\frac{h_c}{b} \right] + 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ν はポアソン比($\nu = C_{12}/(C_{11}+C_{12})$; C_{11}, C_{12} は弾性スティフネス定数である)、 α は界面でのバーガスベクトルと転位線の線分とのなす角($\cos \alpha = 1/2$)、 λ は滑り面と界面の交差線に垂直な界面内での方向とバーガスベクトルのなす角($\cos \lambda = 1/2$)、 $b = a/\sqrt{2}$ (a ; 格子定数)、 f は格子不整合度($f = \Delta a/a$)である。なおこれは無限大の厚さの基板上に単層膜を成長する場合の式であり、以後、この数式1によって与えられる臨界膜厚 h_c を、Matthews and Blakesleeの理論に基づく臨界膜厚と称する。

Fig.5には、Matthews and Blakesleeの理論に基づいて計算されたGaAs基板上のGaInAs層の臨界膜厚が示されている。

なお、 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ にNを添加した $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{NAs}$ の格子定数は、N添加1%当たり、In組成 x が3%小さい $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$ ($y=x-0.03$)とほぼ同じ格子定数となる。GaAs基板上にGaInAsを形成する場合、In組成を増加すると歪み量が大きくなるので平面に二次元で成長できる膜厚である臨界膜厚は薄くなっていく。これに対し、歪み量子井戸層において、低温成長等の非平衡条件での成長により、実質的な臨界膜厚 h_c' を、Matthews and Blakesleeの理論に基づいて計算した臨界膜厚を越えた厚さとすることが可能であり、これにより従来限界と考えられてきた1.1 μmより長波長である1.2 μmを越える長波長までの半導体レーザが実現可能であることがわかった。Fig.5には実験例も示されている。例えば、In組成32%、厚さ8.6 nmの場合、PL中心波長は1.13 μmであり、また、In組成36%、厚さ7.8 nmの場合、PL中心波長は1.16 μmであり、また、In組成39%、厚さ7.2 nmの場合、PL中心波長は1.2 μmであった。これらは、Matthews and Blakesleeの理論に基づいて計算した臨界膜厚 h_c を越えた厚さとなっている。なお、GaInAs井戸層の歪み量と層厚はX線回折測定により見積もった。

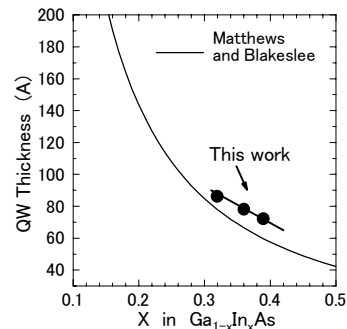


Fig.5 Experimentally results of QW thickness versus critical thickness with the results calculated using the Matthews and Blakeslee model.

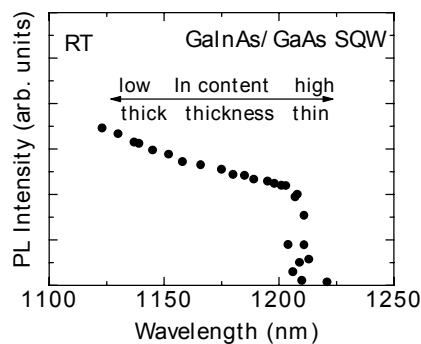


Fig.6 Wavelength dependence of PL intensity of highly strained GaInAs SQW structure ²²⁾.

Fig.6には、GaInAs-SQW(Single Quantum Well)からのPL中心波長とPL強度との関係が示されている²²⁾。GaInAs井戸層のIn組成 x は31%~42%とした。また、各井戸層の厚さは、In組成 x の増加に合わせて、約9 nm~約6 nmと薄くしていった。波長1.2 μm程度までPL強度の強い量子井戸層が得られた。波長1.2 μmまではPL強度は徐々に低下しているのに対して、1.2 μmを越えると、PL強度は急激に低下していることがわかる。これは表面性にも対応しており1.2 μmまでは鏡面であった。これらの結果から、PL強度の上記急激な低下は量子井戸層の厚さが実質的な臨界膜厚 h_c' を越えたためと考えられる。一般にMOCVD法やMBE法において低温成長、高い成長速度等の強い非平衡成長条件で、実験的に得られる臨界膜厚が増加することが報告されている²³⁻²⁵⁾。また成長条件(例えば高温成長)により、理論に基づく臨界膜厚より薄い厚さでも三次元成長、表面荒れが起こることも報告されている。よって本結果は、理論に基づく臨界膜厚 h_c よりも低温成長等の非平衡条件での成長による実質的な臨界膜厚 h_c' の方が厚いために、ミスフィット転位が生じることなく、より厚い膜を二次元に成長できたものと考えられる。

これを元にレーザを試作した。Fig.7にGaInAs/GaAs-DQWレーザの発振波長と J_{th} の関係を示す¹⁹⁾。最長で1.225 μm までの動作が室温で得られた。従来報告されているGaInAs/GaAsレーザの発振波長は1.1 μm 程度までであった¹⁷⁾。よってこの結果はGaAs基板上的歪みGaInAs-QWレーザでは最長の波長である。しかも1.2 μm 程度まで低しきい値であることがわかる。また、1.21 μm まで室温連続発振を得た²²⁾。これらの結果はFig.6に示したPL特性の結果を反映している。Nフリーで1.2 μm 程度で発振する高歪GaInAs量子井戸層にNを添加すれば、1.3 μm を得るためには、わずか0.5%程度のN組成で良い。従来得られていた1.1 μm のGaInAsに対しては1%程度のN添加が必要であった¹⁷⁾のに対して半分となり、結晶性劣化が抑えられることによって高性能の1.3 μm 帯レーザの実現が期待できる。

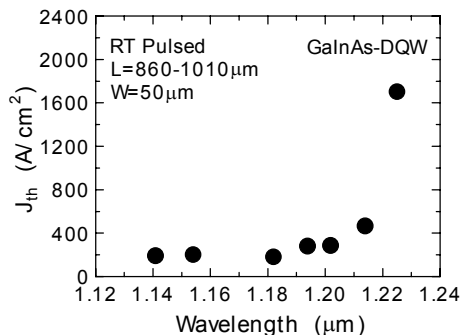


Fig.7 Wavelength dependence of threshold current density of the highly strained GaInAs DQW laser ¹⁹⁾.

2-4 1.3 μm 帯高歪GaInNAs量子井戸レーザの特性

2-4-1 ブロードエリアGaInNAsレーザ試作

高歪GaInAs量子井戸層にNを添加して1.3 μm 帯GaInNAs-DQW構造を成長した。このような高圧縮歪量子井戸層において格子緩和が起きていないことを確かめるために、高分解能X線回折装置を用いて(115)面近傍の逆格子マッピング測定を行った。その結果をFig.8に示す²⁶⁾。GaAs基板とGaInNAsの格子は面内方向で一致しており、格子緩和は起きておらずコヒーレント成長していることが確認された。

次に、レーザを試作した。エピウエハの特性評価に適したブロードエリア型レーザを試作した。GaAsコンタクト層はFig.2とは違いリッジにしていない。ストライプ幅は50 μm

とした。X線回折測定よりGaInNAs井戸層の歪み量と厚さ、及びGaAsバリア層の厚さは、2.48%、井戸7.7 nm、バリア14.7 nmと見積もられた。これらからGaInNAs井戸層の組成をIn:37%, N:0.5%と見積もった。

Fig.9には共振器長 $L = 960 \mu\text{m}$ である素子のしきい値電流密度の温度依存性を示す。室温でしきい値電流密度(J_{th})は $0.92 \text{ kA}/\text{cm}^2$ であり、 $1 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 以下が得られた²⁶⁾。この素子の発振波長は室温で1.29 μm であった。測定装置の電流値上限(2 A)の範囲で160 $^{\circ}\text{C}$ まで発振が得られた。また、22 $^{\circ}\text{C}$ -80 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で特性温度(T_0)は205 Kと高い値が得られた。これは室温でのしきい値電流密度に対する80 $^{\circ}\text{C}$ でのしきい値電流密度がわずか1.3倍にしか増加していないということであり、従来のGaInPAs/InP系材料によるレーザでは3倍に増加するのに比べて、極めて温度特性が良好であることを示す。

高温特性が期待できると予想された新材料GaInNAsの結晶性改善、構造最適化を図ることにより、長波長帯半導体レーザにおいて、初めて $1 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 以下の低しきい値と200 K以上の高特性温度を同時に実現した²⁶⁾。

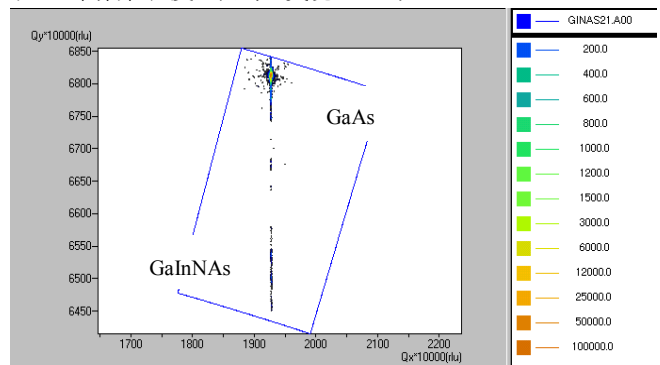


Fig.8 Reciprocal space map around the asymmetric (115) Bragg reflection of the highly strained GaInNAs DQW structure ²⁶⁾.

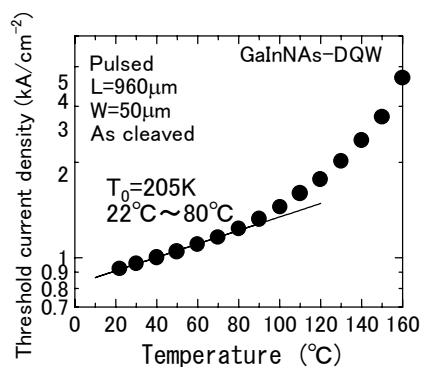


Fig.9 Temperature dependence of threshold current density of the highly strained GaInNAs DQW broad area laser ²⁶⁾.

2-4-2 リッジGaInNAsレーザ試作

次に、リッジストライプレーザを試作した。Fig.10に試作したリッジストライプレーザの構造を示す。リッジ幅は7.5 μm であった。ブロードエリアレーザに用いたエピウエハとほぼ同様の構造である。

Fig.11に共振器長 $L = 920 \mu\text{m}$ の素子を 10°C ステップで素子の温度を変えて測定したパルス動作でのI-L特性を示す。170 $^\circ\text{C}$ までレーザ動作を確認した²⁶⁾。この温度は1.3 μm 帯GaInNAsレーザで最高温度である。室温でのしきい値電流密度は1.1 kA/cm^2 であった。GaInNAsの組成を適正化することで低減できた。また、Fig.12には共振器長 $L = 240 \mu\text{m}$ である短共振器素子の連続動作でのI-L特性を示す²⁶⁾。しきい値電流は27 mAであり、しきい値電流密度は1.5 kA/cm^2 であった。スロープ効率0.29 W/Aであった。へき開面を共振器面しているにもかかわらず、長共振器素子に比べてしきい値電流密度の上昇は小さく、利得の大きい材料系であることがわかる。このことは基板に垂直方向にレーザ光を放出する面発光レーザに適していることを示す。更なる低しきい値化はストライプ幅の狭幅化、高反射膜端面コート等で実現できる。Fig.13に共振器長 $L = 700 \mu\text{m}$ の素子の20~80 $^\circ\text{C}$ での連続動作での波長の温度依存性を示す。0.5 $\text{nm}/^\circ\text{C}$ であった²⁷⁾。GaInPAs/InP系と同等の値である。GaInPAs/InP系では T_0 が高いレーザは温度依存性が大きいことが見積もられているがGaInNAs系は小さい波長変化と高い T_0 を併せ持つようである。なお、これらの連続動作でのデータはボンディングが不充分であるため放熱が悪く熱の影響も含んでいると考えられ、充分な実装を行うことで更に良好なデータが得られると考えられる。

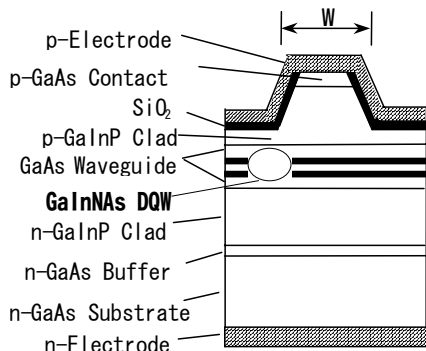


Fig.10 Schematic structure of the highly strained GaInNAs DQW ridge stripe laser.

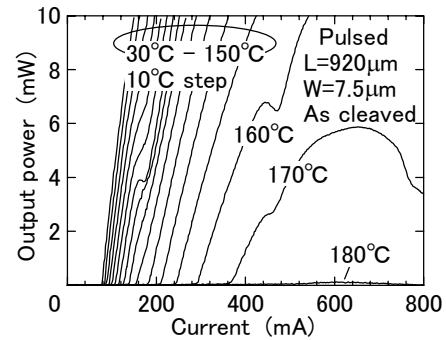


Fig.11 Temperature dependence of I-L characteristics of the highly strained GaInNAs DQW ridge stripe laser²⁶⁾.

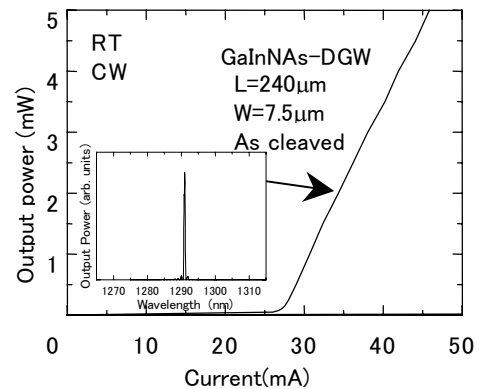


Fig.12 I-L characteristics of the 240 μm -long as-cleaved laser under CW condition²⁶⁾.

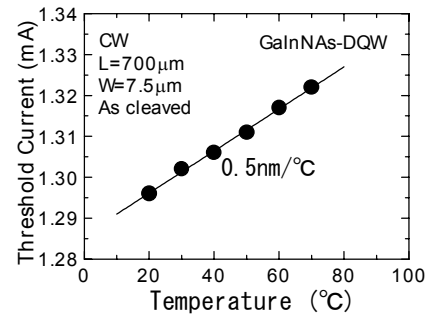


Fig.13 Temperature dependence of lasing wavelength of the highly strained GaInNAs DQW ridge stripe laser²⁷⁾.

3. 成果

量産に有利なMOCVD法で、1.3 μm 帯GaInNAs高圧縮歪み量子井戸半導体レーザを試作した。0.9 kA/cm^2 の低しきい値電流密度と、205 Kの高い特性温度の両立を初めて実現し、予測されたGaInNAs系材料の優位性を実証した。新材料GaInNAsによる半導体レーザが環境温度に対して安定であり、

特別な冷却システムを必要としない次世代の1.3または1.55 μm 帯長波長半導体レーザーとして極めて有望であることを示した。

4. 今後の展開

1.3 μm 帯面発光レーザーは、低消費電力、低コスト、大容量伝送に有利な光情報伝送用光源として注目されているが、従来材料系では材料的問題のため実用化は困難であった。GaInNAs系材料によると原理的に高性能な1.3 μm 帯面発光レーザーの実現が期待できる。GaInNAs材料による高性能な1.3 μm 帯面発光レーザーの実現を目指す。

謝辞

ディスカッション、測定などご協力を得た東京工業大学精密工学科の伊賀先生、小山先生、宮本先生をはじめ伊賀・小山・宮本研究室のみなさまに感謝いたします。また、高分解能X線回折装置を用いた逆格子空間マッピング測定で協力を得た、日本フィリップス(株)の三宅氏、斎藤氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 三木哲也：光通信網の発展，OPTRONICS，13，4(1994)pp.95-96.
- 2) H. Ishikawa and I. Suemune：Analysis of temperature dependent optical gain of strained quantum well taking account of carriers in the SCH layer, IEEE Photon. Technol. Lett., 6, 3 (1994) pp.344-347.
- 3) 橋利雄：今後の光通信用デバイス，OPTRONICS，13，4(1994)pp.106-110.
- 4) C. E. Zah et al.：High-performance uncooled 1.3 μm Al_xGa_{1-x}In_{1-x}yAs/InP strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications, IEEE J. Quantum Electron., 30, 2, (1994) pp.511-523.
- 5) H. Oohashi et al.：High-power and high-efficiency 1.3 μm InAsP compressively-strained MQW lasers at high temperatures, Electron. Lett., 31, 7 (1995) pp.556-557.
- 6) M. Yamada et al.：High-temperature characteristics of 1.3 μm InAsP-InAlGaAs ridge waveguide lasers, IEEE Photonics Technol. Lett., 11, 2 (1999) pp.164-166.
- 7) K. Otsubo et al.：High T₀ (140K) and low-threshold quantum well lasers on InGaAs ternary substrates, Electron. Lett., 33, 21 (1997) pp.1795-1797.
- 8) M. Weyers, M. Sato and H. Ando：Red Shift of Photoluminescence and Absorption in Dilute GaAsN Alloy Layers, Jpn. J. Appl. Phys. 31, Pt.2, 7A (1992) pp.L853-L855.
- 9) X. Liu et al.：Band gap bowing in GaP_{1-x}N_x alloys, Appl. Phys. Lett., 63, 2 (1993) pp.208-210.
- 10) M. Kondow et al.：Extremely large N content (up to 10%) in GaNAs grown by gas-source molecular beam epitaxy, J. Cryst. Growth., 164 (1996) pp.175-179.
- 11) 尾鍋研太郎：立方晶GaNとGaPN混晶の有機金属気相成長，応用物理，63，2 (1994) pp.48-52.
- 12) M. Kondow et al.：GaInNAs: A novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance, Jpn. J. Appl. Phys., 35, 2B (1996) pp.1273-1275.
- 13) T. Miyamoto et al.：Design and Expected Characteristics of 1.3 μm GaInNAs/GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, 1997 OSA Tech. Dig. Ser., Quantum Optoelectronics, vol.9, (1997) pp.126-128.
- 14) S. Sato, Y. Osawa, and T. Satoh：Room-temperature operation of GaInNAs/GaInP double-heterostructure laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition, Jpn. J. Appl. Phys., 36, 5A (1997) pp.2671-2675.
- 15) S. Sato et al.：Room-temperature pulsed operation of 1.3 μm GaInNAs/GaAs laser diode, Electron. Lett., 33, 16, (1997) pp.1386-1387.
- 16) 佐藤俊一：MOCVD法によるGaAs基板上の長波長帯GaInNAs半導体レーザー, Ricoh Technical Report, No.23 (1997) pp.11-18.
- 17) K. Nakahara et al.：1.3- μm continuous-wave lasing operation in GaInNAs quantum-well lasers, IEEE Photon. Technol. Lett., 10, 4, (1998) pp.487-488.
- 18) S. Sato and S. Satoh：Metalorganic chemical vapor deposition of GaInNAs lattice matched to GaAs for long-wavelength laser diodes, J. Cryst. Growth, 192 (1998) pp.381-385.
- 19) Shunichi Sato and Shiro Satoh.：Room-Temperature Continuous-Wave Operation of 1.24 μm GaInNAs Lasers Grown by Metal-

- Organic Chemical Vapor Deposition, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 5, 3 (1999) pp.707-710.
- 20) A. M. Jones et al. : Strained-layer InGaAs–GaAs–InGaP buried-heterostructure quantum-well lasers on a low-composition InGaAs substrate by selective-area MOCVD, IEEE Photon. Technol. Lett., 10, 4, (1998) pp.489–491.
- 21) J. W. Matthews and A. E. Blakeslee : Defects in Epitaxial Multilayers, J. Cryst. Growth 27 (1974) pp.118-125.
- 22) Shunichi Sato and Shiro Satoh. : 1.21 μ m Continuous-Wave Operation of Highly Strained GaInAs Quantum Well Lasers on GaAs Substrates, Jpn. J. Appl. Phys. 38, Pt.2, 9A/B, (1999) pp.L990-L992.
- 23) N. Grandjean et al. : Improved GaInAs/GaAs heterostructure by high growth rate molecular beam epitaxy, Appl. Phys. Lett., 64, 20 (1994) pp.2664-2666.
- 24) H. Toyoshima et al. : Suppression of In surface segregation and growth of modulation-doped N-AlGaAs/InGaAs/GaAs structure with a high In composition by molecular-beam epitaxy, J. Appl. Phys. 75, 8 (1994) pp.3908-3913.
- 25) M. Kudo and T. Mishima : Improved photoluminescence properties of highly strained InGaAs/GaAs quantum wells grown by molecular-beam epitaxy, J. Appl. Phys., 78, 3, (1995) pp.1685–1688.
- 26) Shunichi Sato. : Low Threshold and High Characteristic Temperature 1.3 μ m Range GaInNAs Lasers Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Jpn. J. Appl. Phys., 39, 6A (2000) pp.3403-3405.
- 27) Shunichi Sato and Shiro Satoh. : 1.3 μ m Continuous-Wave Operation of GaInNAs Lasers Grown by Metal Organic Chemical Vapour Deposition, Electronics Letters, 35, 15, (1999) pp.1251-1252.