
MOCVD法によるGaAs基板上の長波長帯GaInNAs半導体レーザ

Long Wavelength GaInNAs/GaAs Laser Diodes Grown by MOCVD

佐藤 俊一*
Shunichi SATO

要 旨

光通信用長波長半導体レーザの温度特性を顕著に改善できるとの期待が寄せられている新材料GaInNAsに関し、窒素原料としてジメチルヒドラジンを用いたMOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) 法で、GaAs基板に格子整合する条件での結晶成長を初めて実現した。さらにGaInNAs/GaAs構造の半導体レーザを試作し、波長1.29 μm までの室温パルス発振に成功した。この発振波長はGaAs基板格子整合材料による半導体レーザとしては世界最長波長である。1.17 μm 半導体レーザのしきい値電流密度の特性温度 T_0 としては96K (環境温度10~50 $^{\circ}\text{C}$)、69K (環境温度50~70 $^{\circ}\text{C}$) なる値が得られた。これらの値は、従来のGaInPAs/InPレーザの特性温度の値 (60K前後) よりも大きい。これらの結果から新材料GaInNAsによる半導体レーザ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1.3または1.55 μm 帯長波長半導体レーザとして極めて有望である。

ABSTRACT

We have performed the growth of a GaInNAs lattice matched to GaAs by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) using dimethylhydrazine (DMHy) as a nitrogen source for the first time. Pulsed operation of GaInNAs/GaAs double-heterostructure laser diodes is accomplished at room-temperature at a wavelength of 1.29 μm , which is the longest for a material lattice matched to GaAs substrate. The threshold current characteristic temperature T_0 of 1.17 μm laser diodes is found to be 96K (at ambient temperature from 10 to 50 $^{\circ}\text{C}$) and 69K (at ambient temperature from 50 to 70 $^{\circ}\text{C}$). This value is excellent compared to the value (around 60K) of conventional GaInPAs/InP laser diodes. These results indicate the potential of GaInNAs for application to laser diodes without any cooling method due to the stable characteristics at ambient temperature at wavelengths of 1.3 or 1.55 μm .

* 研究開発本部 応用電子研究所
General Electronics R&D Center,
Research and Development Group

1. 背景と目的

1-1 21世紀に向けて

21世紀には現在とは比較にならない程の超高度情報化社会が実現していることが容易に想像できる。音声、文字、データ、画像等、伝送する情報量は膨大になる一方である。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を実現するために光ファイバー通信への置き換えが検討されている。すでに電話局間の基幹伝送路への光通信の導入が進んでおり6~7割が光ファイバー化されている。¹⁾ 今後は幹線系のみならず各端末へも光ファイバー化が進むであろう。さらには各機器間、機器内においても光による情報伝送が導入され、リコーにおいてもコピー、プリンタ等のネットワーク化の進展に伴い、ネットワークの光ファイバー化に対応した「光による情報伝送技術」がますます重要になるものと思われる。

現在の光ファイバー通信には、石英系光ファイバーでの損失が小さい $1.3\mu\text{m}$ または $1.55\mu\text{m}$ 帯の波長の半導体レーザ(Laser Diode (LD))が用いられており、この波長に対応するバンドギャップエネルギーを有する

III族半導体であるGaInPAs/InP系材料が現在市場を独占している。LDの動作原理上、クラッド層(Cladding Layer)との接合により発光層(Active Layer)へ光と注入キャリアを閉じ込める必要がある。しかしながらGaInPAs/InP系材料のLDは、クラッド層と発光層の間の伝導帯のバンド不連続が小さく、発光層への注入電子の閉じ込めが温度上昇とともに悪くなる結果、性能が大幅に劣化するという大きな欠点を持っている。このため幹線系では、通常大幅なコスト上昇につながる冷却システムを用いることによりLDの安定動作を保って使用しているのが実状である。

将来の各家庭、オフィスを結ぶ加入者系光ファイバー通信(Fiber To The Home (FTTH))を実現するためには、光通信モジュールの「桁違い」の低価格化が最重要課題である。²⁾ 光通信モジュールの中でもLDの周辺はコスト的に大きな比重をしめる。光通信モジュールの価格を上げている理由の一つとしてLDの光出力安定化のため冷却システムが必要なことがあげられる。このため冷却システムを必要としない良好な温度特性を持つ長波長帯LDが強く求められている。

1-2 Nを含んだ III族混晶半導体材料

近年、GaAs, GaP等の従来のIII族半導体にNを添加したGaNP, GaNAsのような新規混晶半導体の研究が行われるようになってきた。³⁻¹⁰⁾ このような混晶半導体は、Nの電気陰性度が他の構成元素に比べて非常に大きいことに起因して混晶のバンドギャップエネルギーの

組成依存性が大きなボーイング(曲がり)を持つことが予想され、実際に小さなN組成の領域では実験的にも確認されている。一例をGaNAsで説明する。GaNAsはGaNとGaAsの混晶であり、GaNとGaAsのバンドギャップエネルギーはそれぞれ 3.8 eV , 1.42 eV である。GaNAsのバンドギャップエネルギーは、GaAsの値からN組成とともに大きくなりGaNに近づくのではなく、N組成の増加にともない一度大きく減少してから増加するという従来のIII族混晶半導体とは異なる非常に興味深い物性を持っていることがわかってきた。このように、Nを従来のIII族半導体に添加した混晶半導体は物性的にも未知の新しい材料であり、従来の材料では実現できない新しい機能素子、従来材料をはるかに越えた性能の素子を実現できる可能性を秘めている。

しかしながら一般的にNを含んだIII族混晶半導体材料の結晶成長は非常に困難である。⁹⁾ その理由としては、まず終端物質の構造的不整合があげられる。GaNのような窒化物は通常ウルツァー型結晶構造をとるのに対してGaAs, GaP等はせん亜鉛鉱型結晶構造をとる。前者は六方晶であるのに対して後者は立方晶である。さらに、GaNPやGaNAsのような混晶はGa-PまたはGa-AsとGa-Nとの原子間距離の大きな差により、極めて非混和性が大きいことが予想される。Nの平衡固溶限界の見積もりは、 $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ では $x < 10^{-10}$ (650°C)、⁸⁾ $\text{GaN}_x\text{P}_{1-x}$ では $x < 10^{-6}$ (700°C)¹⁰⁾ であり非常に小さく、ほとんどの組成が非混和領域(miscibility gap)にある。つまり熱平衡のもとではほとんどの組成の混晶が得られないということを意味している。

ところが最近、GaNのように通常六方晶の方が安定である材料を立方晶結晶基板上にエピタキシャル成長した場合、六方晶ではなく立方晶が得られる場合があることがわかってきた。⁹⁾ さらに、非混和性の強い材料の結晶成長は一般に非平衡度の高い方法で行うことが必要であると言われており、実際にMBE(molecular beam epitaxy)法³⁻⁵⁾ やMOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)法⁶⁻¹⁰⁾ により数%のN組成の混晶が得られるようになってきた。

1-3 長波長LD用新材料GaInNAs

上記混晶半導体材料の中で新規材料として提案されているGaInNAs(Fig.1)は、GaAs基板に格子整合可能であり、しかも長波長帯LDに対応するバンドギャップエネルギー(バンドギャップエネルギーの減少は長波長化に対応)を持つことが可能な材料であると予想されている。更にGaAs基板上に形成できることからワイドバンドギャップであるAlGaAsやGaInPAsとヘテロ接合を形成することで、従来の長波長帯半導体LD材料のGaInPAs/InP系に比べて伝導帯のバンド不連続が非常に大きくなることが見積もられており、温度特性を画期

的に改善できる長波長帯LDの材料としての可能性が報告されている。¹¹⁾ 実験結果として、ガスソースMBE法により0.5%程度のわずかなN組成ではあるがIn組成を30%と大きくした圧縮歪GaInNAs量子井戸層を用いることで1.2 μmまでの室温でのレーザ発振が実現されている。¹²⁾ GaInAsはIn組成を大きくすることでバンドギャップエネルギーは小さくなり、N無添加の場合、1.1 μmまでの長波長に対応できるが、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。そのため被成長基板であるGaAsとの格子歪により、ある臨界膜厚以上ではミスフィット転位(結晶欠陥)なしには成長できなくなる。このようなミスフィット転位を含んだ膜ではLD動作は実現不可能である。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してしまう。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。もちろんGaAsより格子定数が大きいInP基板上には長波長となるGaInAsを充分形成できるが、前述のように伝導帯のバンド不連続を大きくできるクラッド層の材料として適当なものがなく、LDの温度特性が悪いという問題があった。このため最近GaAs基板上のGaInNAs系材料が新しい長波長帯LDの材料として世界の注目を受けるようになった。

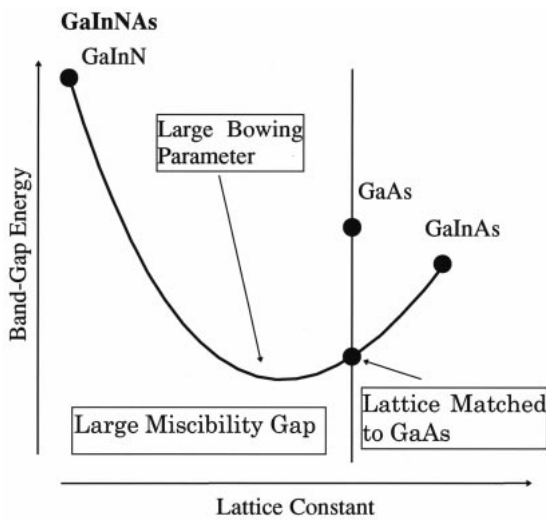


Fig.1 Schematic diagram of GaInNAs.

1-4 本報告

我々はMBE法に比べて量産化に適したMOCVDによるGaInNAs系材料の結晶成長を試み、GaAs基板上の長波長帯LD実現の可能性について検討を行った。

2. GaInNAsの結晶成長と膜特性

2-1 MOCVDによるGaInNAsの結晶成長

成長には横型炉のMOCVD装置を用いた。¹³⁾ 族原

料としてtrimethylgallium (TMG), trimethylindium (TMI), Asの原料としてAsH₃, Nの原料としてdimethylhydrazine (DMHy) を用い、キャリアガスであるH₂と同時に供給した。最近注目されている短波長材料AlGaInN系の成長では、窒素の原料としてNH₃が良く用いられている。NH₃は分解効率が低く、この観点からは高温成長が望ましい。しかし高温(通常1000程度)ではNもAsも表面から離脱しやすいので、GaInNAsの成長は低温で行なうことが望ましく、この観点からNの原料としては低温で分解する有機系窒素化合物原料が望ましい。有機系窒素化合物原料としてはmonomethyl hydrazine (MMHy) 等いろいろ考えられるが、今回はその中で蒸気圧の高いDMHyを採用した。⁷⁻¹⁰⁾ 成長温度は580~680, 成長圧力は1.3×10⁴ Pa(100 Torr), トータル流量は6 l/min, 被成長基板として(100) GaAs, [011] 方向に2°, 15° offしたSiドーブ(100) GaAsウエハを用いた。

成長温度600, AsH₃に対するDMHyの気相比; [DMHy]/([DMHy]+[AsH₃])=0.92, 成長速度1.7 μm/hで成長したGaInNAs層のsecondary ion mass spectrometry (SIMS) 分析結果をFig.2に示す。N濃度は約6.5×10²⁰ atoms/cm³であった。これはN組成約3%に対応する。N組成が3%であるとしてX線回折測定(X-ray diffraction measurement)により求めたGaInNAs層の格子定数から、In組成は約6%と求められた。この値はX-ray photoemission spectroscopy (XPS) により求めたIn組成とほぼ一致した。また、DMHyを供給しない他はGaInNAsと同じ条件で成長したGaInAsとGaInNAsのXPSにより求めたIn組成は有意差がなかった。このため、他のGaInNAsのN組成はGaInAsのIn組成がNを添加しても変化しないと仮定して、格子定数から求めた。

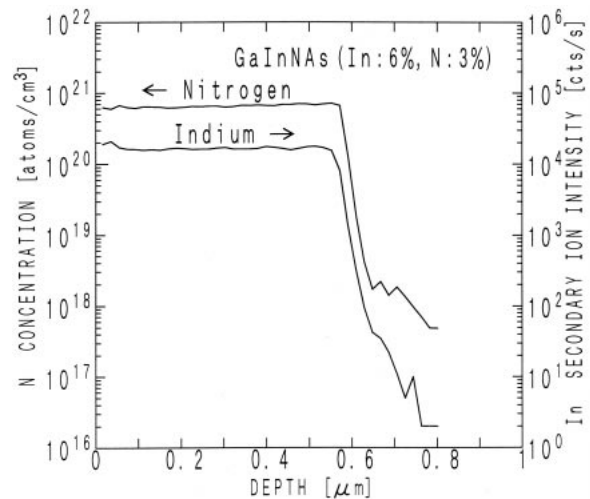


Fig.2 Depth profile of N atoms analyzed by SIMS

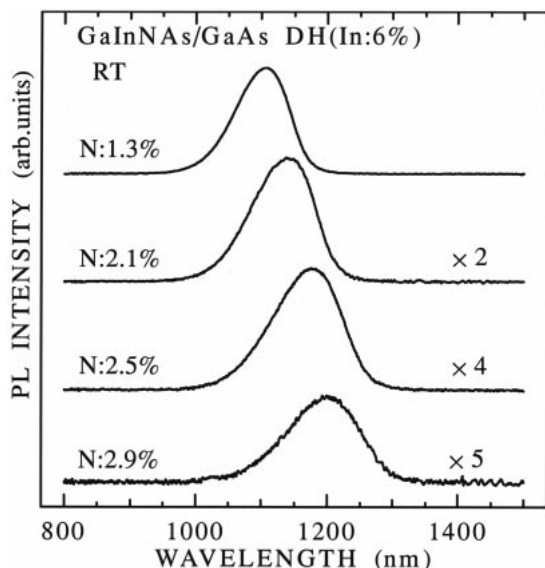


Fig.3 PL spectra at room temperature

Fig.3にIn組成6%でN組成を変えた時のGaAs/GaInNAs/GaAs-DHの室温PLスペクトルを示す．中心波長は約1.1 μm ~ 1.2 μm であり，N組成が大きくなるほど長波長化し，強度は低下することがわかった．また，本報告にデータは示していないが，N組成は成長条件に大きく依存し，成長温度が低いほど，また成長速度が速いほど，DMHy気相比:[DMHy]/([DMHy]+[AsH₃]) が大きいほど，さらには成長圧力が低いほどN組成は大きくなる傾向があった．

3. GaInNAsの屈折率

この材料でLDを実現するためには，注入キャリア及び光をGaInNAs活性層に閉じ込められるように，GaInNAs活性層よりバンドギャップエネルギーが大きかつ屈折率が小さいクラッド層が必要となる．しかしながら現在までGaInNAsの物性はほとんど知られていない．そこで今回GaInNAsを活性層とした場合，光閉じ込め構造が実現可能か否かを見積るためにGaInNAsの屈折率をエリプソメトリー (ellipsometry) により測定した．測定サンプルは，GaAs基板にほぼ格子整合しており，In組成=13%，N組成=4%程度，PL中心波長は約1.35 μm ，膜厚は0.1 μm であった．

Fig.4にGa_{0.87}In_{0.13}N_{0.04}As_{0.96}，Ga_{0.5}In_{0.5}P，GaAsの屈折率の測定値の波長依存性を示す．屈折率は大きい順に並べるとGa_{0.87}In_{0.13}N_{0.04}As_{0.96}，GaAs，Ga_{0.5}In_{0.5}Pであり，Ga_{0.87}In_{0.13}N_{0.04}As_{0.96}の屈折率はGaAsに比べて0.1以上大きい値が得られた．この差はGaAsとInAsの差に相当し，Ga_{0.87}In_{0.13}Asの値より大きい．このことはNを添加することでGaInAsよりも屈折率が大きくなることを示す．

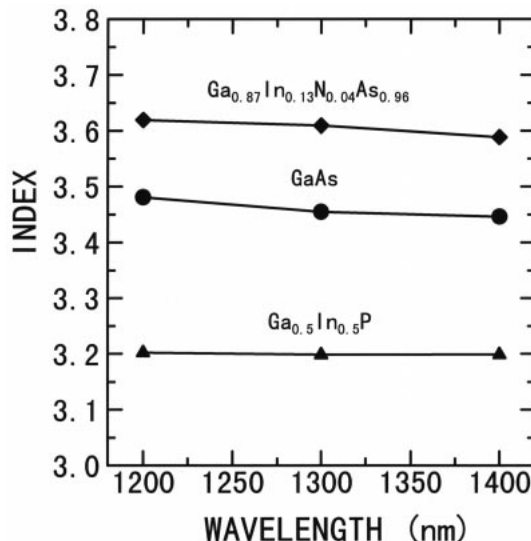


Fig.4 Refractive indices as a function of wavelength.

以上の結果から，GaAs基板上に格子整合する化合物半導体材料において，GaInNAsが最も屈折率を大きくできる材料系であることが初めて確認された．この結果は，活性層にGaInNAsを用いたデバイスにおいて，クラッド層にAlGaAs系やGaInPAs系を用いることで，活性層への光の閉じ込めが可能であることを示している．¹⁴⁾

4. ヘテロ接合形成

LDを作製するためには，ワイドギャップ材料であるAlGaAs系やGaInPAs系をクラッド層としてGaInNAs発光層と接合させる必要がある．そこでAlGaAs上へのGaInNAsの成長を試みた．GaInNAs成長後の表面は平坦ではなく凹凸が激しく，白濁していた．一方GaAs上へのGaInNAsの成長の際は，その表面は平坦であり鏡面が得られている．この原因としてAlGaAsとGaInNAsの界面ではAlGaInNAsの五種の原子相互の結合が必要であるが，それらの結合を作るよりGaInNAsの結合を作る方が安定であるために三次元成長することが考えられる．そこで，AlGaAsとGaInNAsとの間にGaAsスペーサ層を挿入することで二次元的な成長が可能となりAlGaAsクラッド層とGaInNAs発光層とを接合させることができた．¹⁵⁾ GaInPをクラッド層に用いても同様に直接接合は困難が予想されるため，LD，LED作製にはGaAsスペーサ層を挿入した．

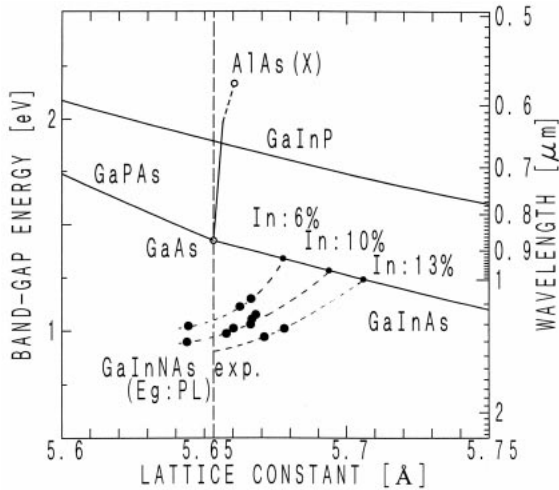


Fig.5 Relationship between peak PL wavelength and lattice constant of GaInNAs.

Fig.5にはデバイスに用いたGaInNAs層のPL中心波長に対応するエネルギーと格子定数の概略の関係を示す。In組成は6%, 10%, 13%とした。N組成は格子歪がGaAs基板に対して 4×10^{-3} (a/a_0) 以下となる組成を用いた。N組成がより大きい領域では誘電理論をもとに予想されているバンドギャップ⁽¹¹⁾より大きい値となっている。このためGaAs基板上に本材料で1.55 μmまたはそれ以上長波長のLDの実現は困難であることが予想される。

5. 絶縁膜ストライプ型LDおよびLEDの試作と評価

5-1 素子構造

まずはじめに最も基本的なLDの構造である絶縁膜ストライプ型の素子を試作した。^(13,16) Fig.6に試作したLDおよびLEDの構造を示す。[011]方向に15° offしたSiドープ (100) GaAs基板上に、Seドープn-GaAsバッファ層 (d~0.3 μm), Seドープn-GaInPクラッド層 (d~1.5 μm), Seドープn-GaAsスペーサ層 (d~20nm), アンドープGaInNAs活性層, Znドープp-GaAsスペーサ層 (d~20nm), Znドープp-GaInPクラッド層 (d~1.5 μm), Znドープp-GaAsコンタクト層 (d~0.2 μm) を順次成長した。(100) GaAs基板上にGaInPを成長させた場合、我々の条件では結晶欠陥(ヒロック)が多数発生した。[011]方向に15° offした(100) GaAs基板上ではそれが激減したので、素子作製には[011]方向に15° offしたSiドープ (100) GaAs基板を用いた。活性層であるGaInNAs層の条件をTable 1に示す。絶縁膜にはSiO₂ (厚さ0.3 μm)を用い、P側電極にはAuZn/Au, N側電極にはAuGe/Ni/Auを用いた。ストライプ幅は5 μmとした。へき開面を共振器とし、共振器長は300~400 μmとした。

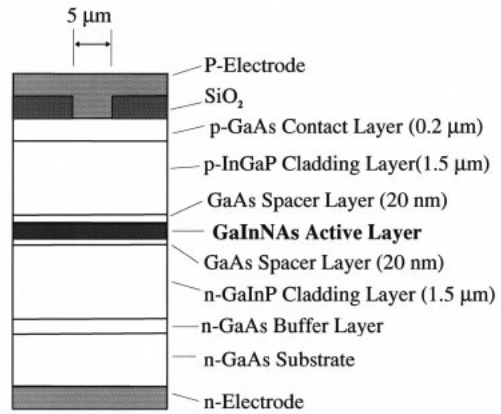


Fig.6 Schematic geometry of stripe LD and LED.

Table 1 Growth parameters of GaInNAs layer.

In content	N content	thickness
6%(LD)	1.3~2.9%	0.1 μm
13%(LED)	2.0, 4.0%	0.05 μm

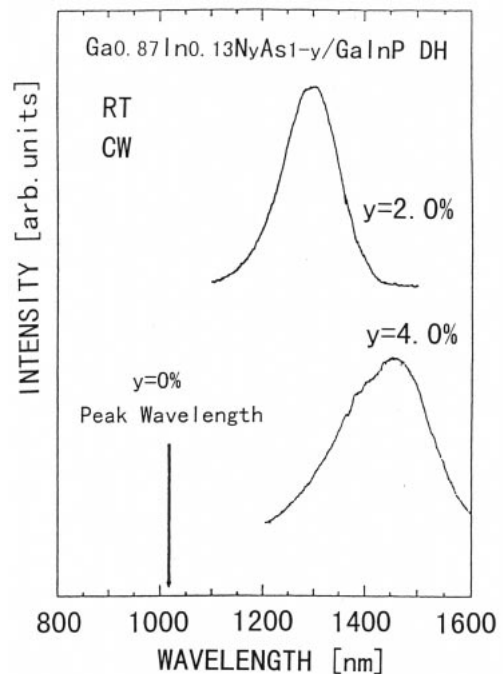


Fig.7 Emission spectra of GaInNAs LEDs.

5-2 素子特性

5-2-1 GaInNAs LEDの特性

Fig.7に発光スペクトルを示す。In組成13%, N組成4%のGaInNAsを活性層に用い、中心波長は最長で1.45 μm程度までが得られている。Nを添加していないGaInAs (y=0%) のPL中心波長も示してあるがNを添加することで長波長化していることがわかる。光量は長波長になるほど低下し、発光スペクトルの半値幅が大きく

なる傾向があった．アイセーフの波長(1.4 μm 以上)の素子も得られ，GaInNAsがアイセーフLDまたはLEDとして利用できることが明らかとなった．そのため本素子は光空間伝送用光源にも応用できる可能性が示された．また，素子の発光スペクトルの中心波長はPLスペクトルの中心波長よりも長波長である．これはデバイス構造が端面発光型であるため，短波長側の光は活性層において吸収されるためであると考えられる．

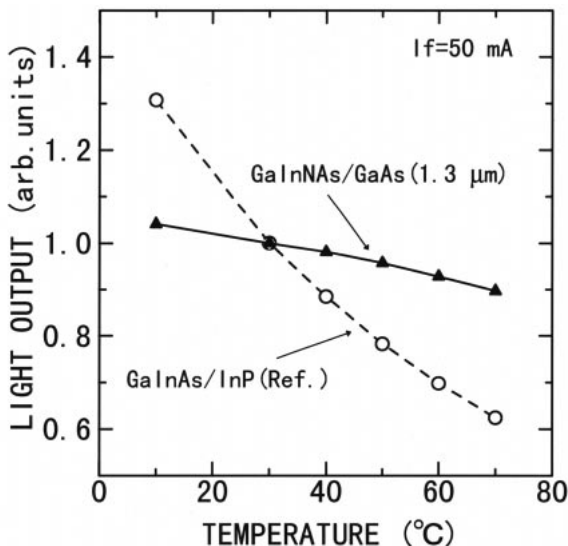


Fig.8 Temperature dependence of light output power of GaInNAs LEDs.

中心波長1.3 μm のGaInNAs系素子，及び比較用に作製したInGaAs/InP(中心波長1.6 μm)の素子のI-L特性の温度依存性を測定した．注入電流 $I=50\text{mA}$ での光出力の温度依存性をFig.8に示す．GaInNAs系素子はInGaAs/InP素子に比べて温度依存性は小さく，良好な温度特性が得られていることがわかる．本材料系の予想される最大のメリットは，伝導帯のバンド不連続(E_c)が大きくとれるために注入キャリアのオーバーフローが低減されて良好な温度特性を有していることであり，今回それが実験的に示された．本材料系は予想通りLDとしての高性能化が期待できる材料系であると考えられる．

5-2-2 GaInNAs LDの特性

Fig.9に室温パルス励起による注入電流 - 光出力の関係を示す．測定条件は室温，繰り返し周波数10kHz，Duty0.5%である．In組成6%の素子においてLD動作が得られており，中心波長1.17 μm の素子のしきい値電流は450mAであった．しきい値電流密度は22kA/cm²となる．N組成とともに発振波長は長くなるが，波長が長くなるほどしきい値電流LD動作の始まりを示す電流値)は大きくなっている．この原因としてはN組成とともに結晶性が悪化していることが考えられる．また，価電子帯のバンド不連続が小さくなってしまふことも原因とし

て考えられる．近藤らによるバンドラインナップの見積もりでは，GaAs基板に格子整合するまでNを添加した場合GaAsとGaInNAsの価電子帯のエネルギーレベルは同じレベルになる(バンド不連続がほぼなくなる)と予想されている．¹¹⁾

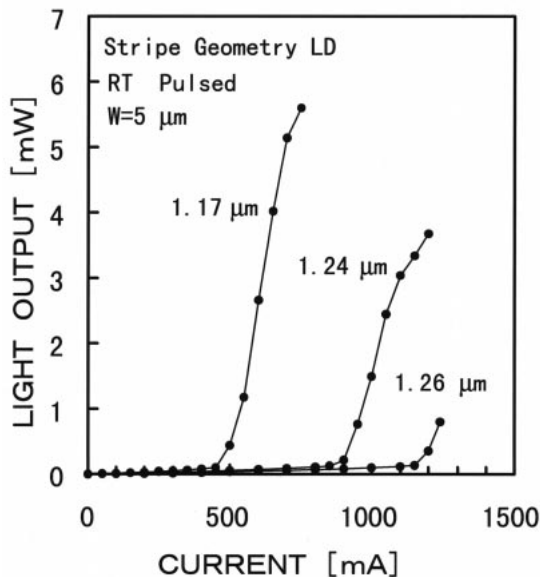


Fig.9 Current versus light output power characteristics at room temperature under pulsed operation

Fig.10には中心波長1.24 μm の素子の $I=1000\text{mA}$ での遠視野像(FFP)を示す．基板に水平方向の半値幅=8°，垂直方向の半値幅=48°が得られている．

Fig.11には中心波長1.17 μm の素子のしきい値電流密度の温度依存性を示す．特性温度は50 μA までは $T_0=96\text{K}$ ，50 ~ 70 μA では69Kが得られている．従来材料であるInGaPAs/InP系LDでは特性温度は50 ~ 70KでありGaInNAs系材料の有効性が実験的に示された．

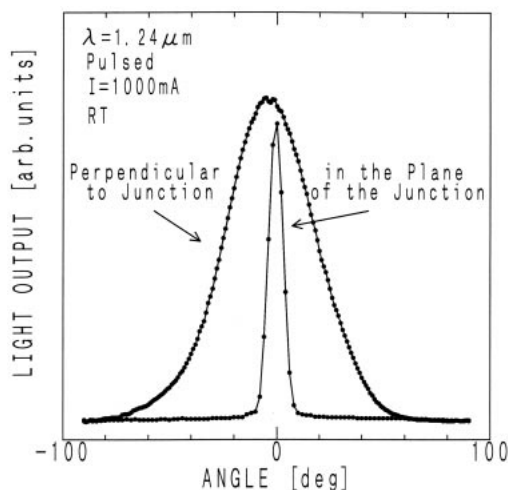


Fig.10 Far-field patterns of 1.24 μm laser diodes.

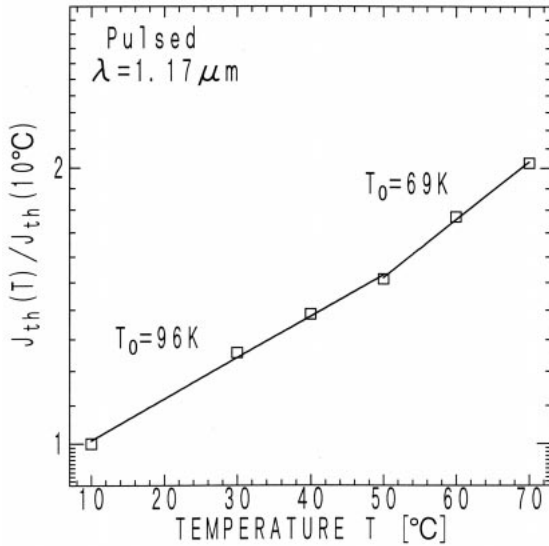


Fig.11 Temperature dependence of threshold current density of 1.17 μm laser diodes.

6. リッジストライプ型LDの試作と評価

6-1 素子構造

次に、しきい値電流の低減のためにリッジストライプ型の素子を試作した。¹⁵⁾ クラッド層にはGaInPに比べて成長の容易なAlGaAsを用いた。Fig.12にリッジストライプ型LDの構造を示す。前記のようにGaInNAsとAlGaAsの直接接合は现阶段では困難であるため、間にGaAsスペーサ層をはさんでいる。リッジ幅は頂部で2 μm または5 μm である。活性層のIn組成は10%、N組成は1.5、2.3、2.9%である。GaInNAs層の条件をTable 2に示す。

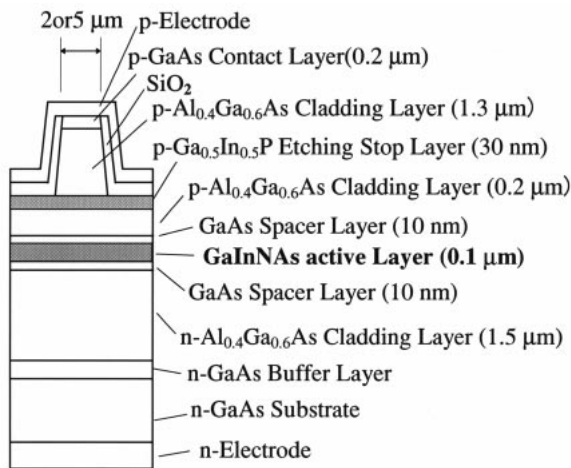


Fig.12 Schematic geometry of ridge wave-guide LD.

Table 2 Growth parameters of GaInNAs layer.

ridge width	In content	N content	thickness
5 μm	10%	1.5%, 2.9%	0.1 μm
2 μm	10%	2.9%	0.1 μm

6-2 素子特性

Fig.13にリッジ幅5 μm の素子の室温パルス励起による注入電流 - 光出力の関係を示す。測定条件は室温、繰り返し周波数10kHz, Duty 0.5%である。LD動作が得られており、N組成1.5%、2.3%で発振波長はそれぞれ1.16 μm 、1.25 μm であり、しきい値電流はそれぞれ250mA、550mAであった。共振器長はそれぞれ360 μm 、320 μm であり、しきい値電流密度はそれぞれ13.9、34.4kA/cm²と求められた。絶縁膜ストライプ型の素子に比べてしきい値電流は約半分に低減されており、リッジ構造にすることでストライプ外への電流の漏れが少なくなったことが主たる理由であると考えられる。

さらにN組成2.9%、リッジ幅2 μm の素子の注入電流 - 光出力の関係と発振スペクトルをそれぞれFig.14とFig.15に示す。¹⁷⁾ 測定条件は室温、繰り返し周波数10kHz, Duty 0.1%である。1265~1295nmにかけてマルチモード動作となっている。ピーク波長は1293nmであり、光通信で使われる波長1.3 μm に極めて近い波長での発振が確認された。この発振波長はGaAs基板上的LDでは世界最長波長である。しかしながらしきい値電流密度は非常に大きく、実用化に向けて今後、結晶性の改善、素子構造の最適化による低減が必要である。

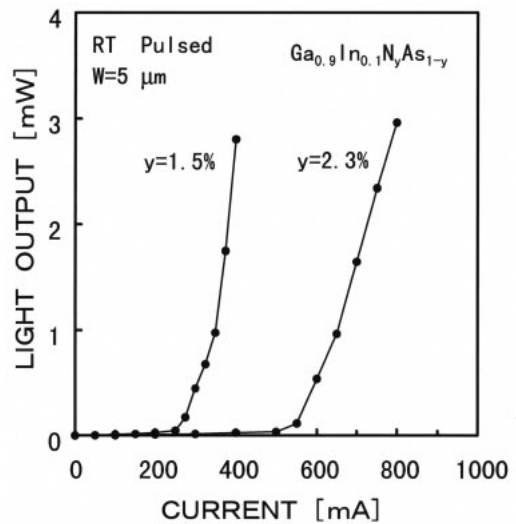


Fig.13 Current versus light output power characteristics at room temperature under pulsed operation

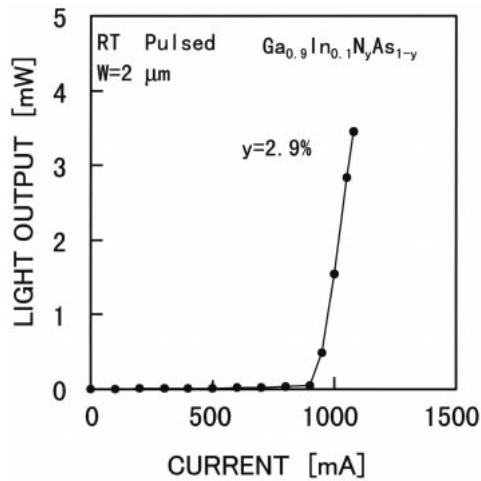


Fig.14 Current versus light output power characteristics at room temperature under pulsed operation

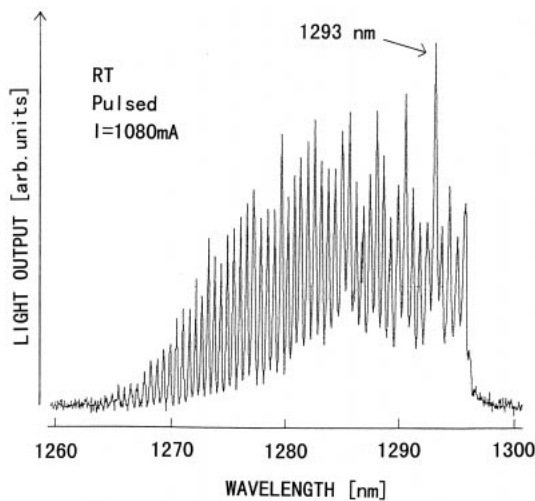


Fig.15 Lasing spectrum.

7. 結論

- (1) Nの原料にDMHyを用いたMOCVD法により初めてGaAs基板に格子整合するGaInNAsを成長できた。
- (2) GaInNAsの屈折率はGaAsより大きくAlGaAs系, GaInPAs系材料をクラッド層とすることによりGaInNAs活性層への光閉じ込めが可能であることを確認した。
- (3) GaAs基板格子整合系材料では最も長波長である中心波長1.45 μmの発光素子(LED)を得た。
- (4) 室温パルス励起により, GaAs基板格子整合材料では最長発振波長である1.29 μmを有するLDを実現した。波長1.17 μmの素子の特性温度は50℃まで: $T_0=96K$ 50 ~ 70 : 69Kであり従来のInGaAsP/InP系材料によるLDより高い値が得られた。

以上より, GaAs基板上的新規材料GaInNAsは温度特性

が良好な長波長LDの材料として極めて有望であり, その結晶成長手段としてMOCVD法の有効性が確認された。

8. 今後の展開

MOCVD法によるGaInNAsの結晶性の改善, および素子構造の最適化により, 1.3 μm帯, 1.55 μm帯での室温連続発振を実現する。

参考文献

- 1) 三木哲也:光通信網の発展, OPTRONICS, 13, 4 (1994) pp.95-96.
- 2) 橋利雄:今後の光通信デバイス, OPTRONICS, 13, 4 (1994) pp.106-110.
- 3) X. Liu et al.: Band gap bowing in GaP_{1-x}N_x alloys, Appl. Phys. Lett., 63 (1993) pp.208-210.
- 4) S. V. Novikov et al.: Auger investigation of group nitride films grown by molecular beam epitaxy, J. Cryst. Growth., 146 (1995) pp.340-343.
- 5) 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.
- 6) M. Sato: J. Cryst. Growth., 145 (1994) pp.99-.
- 7) S. Miyoshi et al.: Intermediate range between N-doped GaP and GaP_{1-x}N_x alloys: difference in optical properties, J. Cryst. Growth., 145 (1994) pp.87-92.
- 8) N. Ohkouchi et al.: MOVPE Growth of GaAs_{1-x}N_x Alloys, 12th Alloy Semiconductor Physics and Electronics Symp., Izu Nagaoka, (1993) pp.337-340.
- 9) 尾鍋研太郎:立方晶GaNとGaP-N混晶の有機金属気相成長, 応用物理, 63, 2 (1994) pp.48-52
- 10) S. Miyoshi et al.: Metalorganic vapor phase epitaxy of GaP_{1-x}N_x alloys on GaP, Appl. Phys. Lett., 63 (1993) pp.3506-3508.
- 11) M. Kondow et al.: GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance, Jpn. J. Appl. Phys., 35 (1996) pp.1273-1275.
- 12) M. Kondow et al.: Room-Temperature Pulsed Operation of GaInNAs Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance, Jpn. J. Appl. Phys., 35 (1996) pp.5711-5713.
- 13) S. Sato, Y. Osawa, T. Saitoh: Room-Temperature Operation of GaInNAs/GaInP Double-Heterostructure Laser Diodes Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Jpn. J. Appl. Phys., 36 (1997) pp.2671-2675.
- 14) 佐藤: MOCVD法により成長したInGaNAsの評価, 第57回応用物理学会学術講演会予稿集, (1996) p.148
- 15) 佐藤 他: MOCVDによる長波長帯GaInNAs/GaAsレーザ, 1997年電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-4-57, (1997) p.429
- 16) 佐藤: MOCVD法によるInGaAs/InGaP-DHレーザの室温発振, 第57回応用物理学会学術講演会予稿集, (1996) p.951
- 17) S. Sato et al.: Room-Temperature Pulsed Operation of GaInNAs/GaAs Laser Diodes Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Record of the Electronic Materials Symposium., Minoo, (1997) pp.9-10.