

新材料技術による1.3 μm 帯の温度特性の優れた半導体レーザ

Excellent Temperature Performance Lasers Operating in 1.3 μm Range
Developed with New Material Technology

あらまし

通信に使われている波長1.3-1.55 μm 帯の半導体レーザには、短波長帯(0.8-1.0 μm)のレーザに比べて、特性の温度依存性が大きいという問題がある。21世紀に向けて新しい応用分野を開くために、この温度特性の問題を解決することが強く望まれている。本稿では、温度変動に対して特性変化の少ない、波長1.3 μm 帯のレーザを実現するための、新しい材料技術によるInGaAs三元基板を用いたレーザの研究を紹介する。三元基板に格子整合した材料系を用いることで、波長1.3 μm 帯の深いポテンシャル井戸の量子井戸を形成でき、高い温度でも完全にキャリアを閉じこめることができるため、優れた温度特性を実現できる。著者らは基板のためのInGaAs三元バルク結晶製作技術から開発を行っており、この基板上のレーザの研究開発を、光インターコネクションを目標の一つとした通産省プロジェクト「次世代情報処理基盤技術開発」通称Real World Computing (RWC)の研究として進めている。これまでに、三元基板を用いて、波長1.23 μm で210 mWまで発振するレーザを実現、波長1.32 μm でも従来のレーザに比べて、温度特性が大幅に改善されたレーザを実現することに成功した。これらの結果を踏まえて、面型レーザへの適用など、今後の展望についても議論する。

Abstract

The characteristics of semiconductor lasers with a communication wavelength of 1.3 to 1.55 μm are more dependent on temperature than those of semiconductor lasers with the shorter wavelength of 0.8 to 1.0 μm . For the new application fields of the next century, it is an urgent task to develop lasers whose characteristics are not largely affected by temperature changes.

This paper introduces a laser with excellent temperature performance which operates in the 1.3 μm wavelength range and is realized by using a new ternary InGaAs substrate. We can grow a very-deep-potential quantum well for the 1.3 μm wavelength range on the ternary substrate. Because carrier overflow can be completely suppressed even at high temperature, this laser has an excellent temperature performance. Research and development of such a ternary-substrate laser has been conducted under the Real World Computing (RWC) Project for future optical interconnections, which is promoted by the Ministry of International Trade and Industry.

We developed a laser that operates at a wavelength of 1.23 μm at up to 210 mW. We have also developed a laser that has a wavelength of 1.32 μm and temperature characteristics which are remarkably better than those of conventional lasers.

Based on these developments, we also discuss the prospect of applying the ternary substrates to surface-emitting-type lasers.



石川 浩(いしかわ ひろし)

1972年東京工業大学大学院修士課程了。同年(株)富士通研究所入社。以来、半導体レーザを中心とした、光半導体デバイスの研究開発に従事。1984年工学博士(東京工業大学)。1976年電子通信学会学術奨励賞、1990年日本発明協会地方発明表彰奨励賞、1998年SSDM Paper Awardを受賞。
基盤技術研究所

ま え が き

波長0.8-1.0 μmの短波長帯のGaAlAs/GaAs系の材料を用いた半導体レーザは、優れた温度特性(温度を変えたときに、しきい値電流や効率の温度依存性が小さい)を示すのに対して、通信に使われる波長1.3 μmあるいは1.55 μmの長波長帯のInGaAsP/InP系材料を用いた半導体レーザは温度特性が悪く、これが長波長帯のレーザ開発当初からの大きな問題であった。長波長帯の半導体レーザを周囲温度の変化の幅が大きな環境で使用するには、温度を制御するペルチェウラを組み込んだモジュールが使われる。しかし、アクセス系などの分野ではレーザの温度制御を不要にして、低コスト化することが必要である。このため、長波長帯のInGaAsP/InP系のレーザに対して種々の改良が進められ、最近では、-45 ~ 85 の使用条件下でも温度制御が不要なレーザが開発され実用化されるようになった。

しかし、このような改良にもかかわらず、短波長帯のレーザに比べると、長波長帯のInGaAsP/InP系レーザの温度特性は依然劣っているのが現状である。21世紀に向けて、光技術の応用範囲を拡大して行くためには、より広い温度範囲でより特性の変化が少ないレーザを通信の長波長帯で実現していくことが強く望まれている。とく

に、光インターコネクションの分野で有望とされている長波長帯の面型レーザ⁽¹⁾を実現するには、短波長帯のレーザに比べて劣っている温度特性を大幅に改良することが前提となっている。

これまでに長波長帯のレーザの温度特性が悪い原因として種々のモデルが提案され議論されてきたが、必ずしも明快な結論が得られずに推移してきた。著者らは1993年に量子井戸(もしくは歪量子井戸)⁽²⁾活性層を用いた長波長帯レーザの量子井戸のポテンシャルが短波長帯のレーザに比べて浅いことが、温度特性を悪くしている要因の一つであることを理論的に示し、深いポテンシャル井戸を実現できれば大幅に温度特性を改善できる可能性があることを示した^{(2),(3)}。また、基板にInGaAsという新しい化合物半導体を用いるレーザを提案、これを用いることで波長1.3 μm帯で発光する深いポテンシャル井戸が実現でき、大幅な温度特性の改善が可能であることを示した⁽²⁾。そして、最近、InGaAs三元基板を用いた温度特性の優れた波長1.3 μm帯のレーザを実現することに成功した^{(4),(5)}。

本稿では、この三元InGaAs基板を用いたレーザについて、基本設計、InGaAs三元バルク結晶の成長技術、レーザ特性を報告し、面型レーザへの適用など今後の展望についても議論する。

なお、本研究の内、基板用バルク結晶の研究を除く三

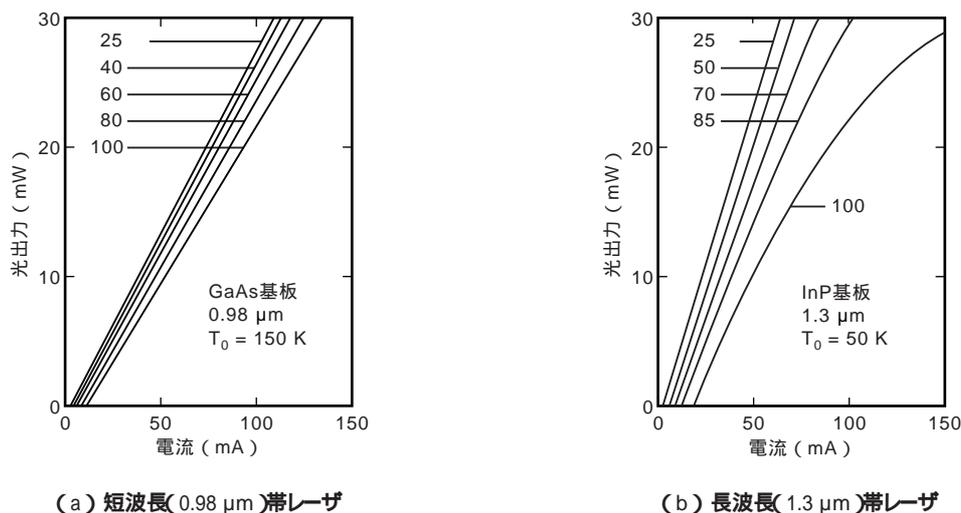
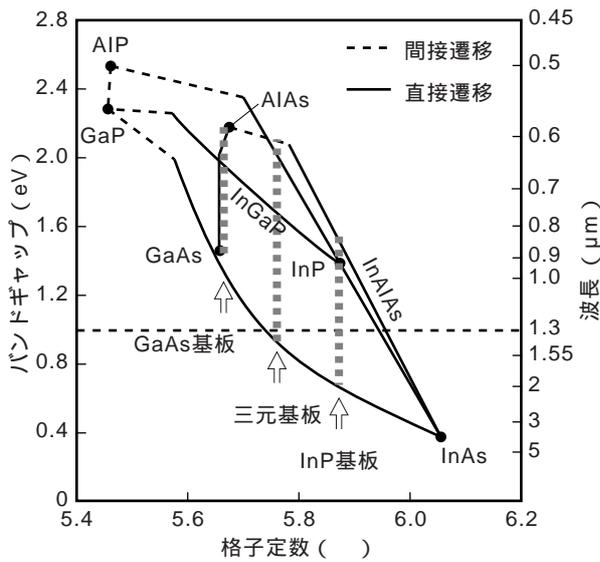


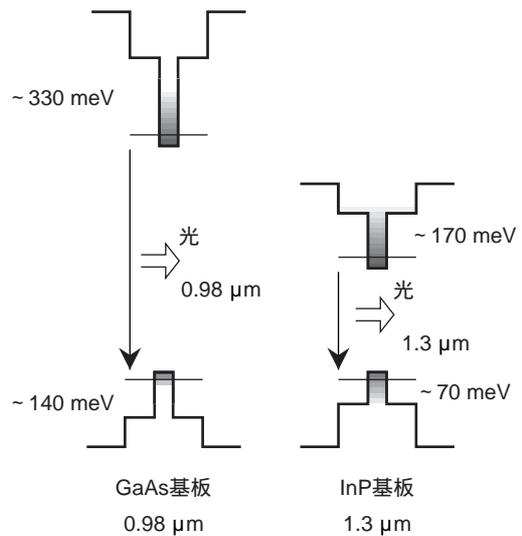
図1 短波長帯レーザと長波長帯レーザの電流対光出力特性の温度依存性の比較

Fig.1-Comparison of temperature dependence of light output versus current characteristics between short wavelength laser and long wavelength laser.

(注) 数nm程度の薄いバンドギャップの小さい層をバンドギャップの大きな層(バリア層)で挟んで、電子とホールを閉じ込める構造にしたものを量子井戸といい、半導体レーザの活性層として使われる。薄い井戸層の材料の組成を格子定数がバリア層と異なるようにしたもの歪量子井戸という。井戸層が薄いため、格子定数がバリア層に一致するように歪む。井戸層の格子定数がバリア層よりも大きい場合には井戸層が圧縮されるように歪む。これを圧縮歪の量子井戸という。また、逆の場合を引っ張り歪の量子井戸という。歪み加わることによってバンド構造が変化し、レーザ特性の向上が得られる。



(a) 格子定数とバンドギャップの関係



(b) 歪量子井戸ポテンシャルの比較

図2 化合物半導体のバンドギャップと歪量子井戸のポテンシャルの深さ

Fig.2-Energy bandgap of compound semiconductor and the potential profile of strained quantum well lasers.

元基板上的レーザの研究は光インターコネクションを用いた並列コンピュータを研究目的の一つとする、通産省プロジェクト「次世代情報処理基盤技術開発」通称Real World Computing(RWC)の研究として、行っているものである。

半導体レーザの温度特性と三元 InGaAs 基板上的レーザの提案

短波長帯のGaAsを基板とする0.98 μmの半導体レーザと長波長帯のInPを基板とする波長1.3 μmの半導体レーザの電流対光出力特性の典型的な温度依存性を図-1に示す。図から分かるように温度特性に大きな違いがある。1.3 μm帯のレーザの方がしきい値電流の温度依存性が大きく、また電流対光出力特性の傾きである微分効率の温度依存性も大きい。通常、半導体レーザの温度特性を表すのに、つぎの式で表現されるしきい値電流 I_{th} の温度依存性の特性温度 T_0 を用いる。

$$I_{th}(T) = I_{th}(0) \exp(T/T_0) \dots \dots \dots (1)$$

ここで温度 T は絶対温度を用いている。特性温度 T_0 が大きいほど発振のしきい値の温度依存性が小さい。短波長帯のレーザは T_0 の値が通常110-150 Kであるのに対して、長波長帯のレーザは40-60 K程度と小さい。

図-2(a)に主要な化合物半導体のエネルギーバンドギャップと格子定数の関係を、同図(b)に典型的な短波長帯のレーザと長波長帯レーザの歪量子井戸構造のポテンシャルを示す。歪量子井戸では、井戸のバリア層やそれ

を取り巻くクラッド層に基板と格子定数が一致した材料を使う。図-2(a)から分かるように、GaAsを基板とする短波長帯のレーザはバリア層やクラッド層として格子定数がほぼGaAsに一致したバンドギャップの大きいGaAlAsを用いることができる。このため、図-2(b)に示すように深いポテンシャルの井戸を形成することが可能である。一方、InPを基板とする長波長帯のレーザは材料系をInGaAsP系に限るとバンドギャップの最も大きな材料はInPであり、深い井戸を形成できないことが分かる。図-2(b)に井戸のなかのキャリア分布を濃淡で示しているが、井戸が浅いInGaAsP/InP系では、キャリアが井戸の縁にまで分布しており、温度が上がったときに容易にキャリアが井戸から漏れ出すことになる。歪量子井戸の光学利得を計算すると、同一のキャリア密度に対して、InPを基板とする長波長帯のレーザは光学利得が約半分しかなく、またその温度依存性も大きいことが分かった。⁽³⁾もし、GaAsとInPの中間の組成を有するInGaAs基板を用いることができれば、この基板に格子整合したバンドギャップの大きな、InGaAlAs, InGaP, InAlAsなどをバリア層やクラッド層として使用することができ、井戸層を圧縮歪みのInGaAsとすることで、深いポテンシャル井戸の波長1.3 μm帯の歪量子井戸を形成することが可能になる。理論解析で、InGaAs三元基板を用いることで、しきい値電流密度が低く、 T_0 が150 Kに及び短波長レーザと同等の優れた温度特性のレーザを実現できる可能性があ

ることを示すことができた。^{(2), (3)}

三元バルク結晶の成長

従来、化合物半導体基板はGaAsとInPの2種類しかなかった。そのため、三元基板を用いたレーザを実現するには、基板となるInGaAsの三元バルク結晶の成長技術から開発する必要がある。InGaAsの三元系は、従来の二元系のGaAsやInPに比べて、バルク結晶成長でいくつかの難しい点がある。まず、二元系では溶液状態から、温度を下げることで結晶成長を行うことができるが、三元系では、結晶の組成が成長温度で一意的に決まるといった特徴を持つ。このため、一定温度で結晶成長を行う必要がある。また、三元系では、溶液中の温度揺らぎが、組成の揺らぎとなり、多結晶化しやすいという問題もある。これらを考慮して、著者らはInGaAs三元の種結晶を製作するVGF (Vertical Gradient Freeze) 法と一定組成の三元結晶を成長する多元ゾーン成長と名付けた成長法を組み合わせた成長技術の開発を進めている。詳細はほかの発表論文^{(6), (7)}に譲るが、この成長技術で、In組成0.3程度の三元結晶の成長に成功している。現状で、得られる基板の直径は15 mmと小さく、結晶性もまだ十分ではない。長尺の結晶成長、結晶品質の向上など、まだ多くの課題が残っている。

レーザ特性

In組成0.22と0.31の三元基板を用いてレーザを製作した。^{(4), (5), (8)}レーザの断面模式図を図-3に示す。レーザは幅

17 μmのメサストライプ構造とした。井戸層は圧縮歪のInGaAsで、バリア層は組成波長0.9 μmのInGaAlAs、クラッド層はInGaPでそれぞれ三元基板に格子整合している。製作したレーザの緒元を表-1に示す。従来のInP基板を用いた歪量子井戸のポテンシャルの深さが、伝導体で約150 meV、価電子帯で80 meV程度であるのに比べると、三元基板レーザでは表-1に示すように、極めて深いポテンシャル井戸が形成される。

キャビティ長600 μmで両端面に95%の高反射率コーティングを施したレーザの電流対光出力特性の温度依存性を図-4

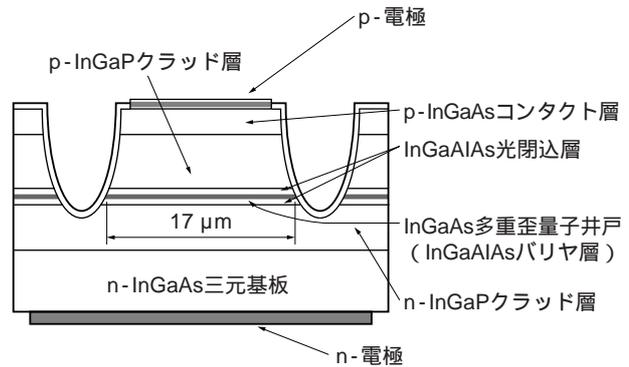
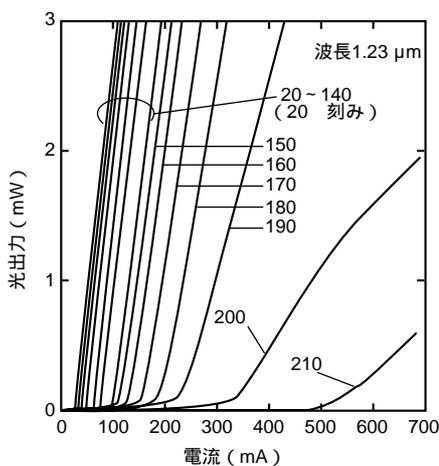


図-3 製作したレーザの断面模式図

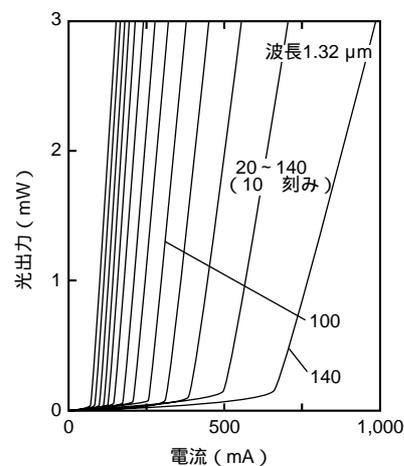
Fig.3-Schematic cross section of fabricated strained quantum well lasers.

表-1 レーザの諸元

基板In組成	活性層In組成	井戸数	伝導帯井戸深さ	価電子帯井戸深さ
0.22	0.41	2	288 meV	154 meV
0.31	0.47	3	335 meV	186 meV



(a) In組成0.22の基板を用いたレーザ



(b) In組成0.31の基板を用いたレーザ

図-4 三元基板を用いたレーザの電流対光出力特性の温度依存性

Fig.4-Light output versus current characteristics of lasers on ternary substrate.

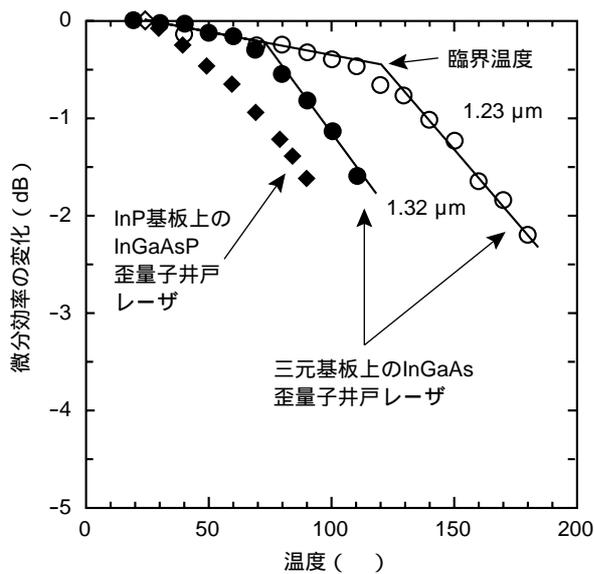


図-5 微分効率の温度依存性の比較

Fig.5-Comparison of temperature dependence of differential efficiency.

に示す。同図(a)はIn組成0.22の基板を用いたレーザーで1.23 μmで発振し、室温でのしきい値電流密度は176 A/cm²であった。同図(b)はIn組成0.31の基板を用いたレーザーで1.32 μmで発振し、しきい値電流密度は677 A/cm²であった。ポテンシャル井戸の深い、1.32 μmのレーザーの方がしきい値電流密度が高いのは、基板のIn組成が大きいため、その分基板結晶の質が劣っており、歪量子井戸活性層の平坦性が不十分で、光学損失が大きいためである。

三元基板上に製作したレーザーの特徴は、電流対光出力特性の傾きである微分効率の温度依存性が極めて小さいことである。微分効率の温度依存性を従来のInP基板上のレーザーと比較して図-5に示す。1.23 μmのレーザーは120までの微分効率の低下がわずか0.5 dBである。120以上で微分効率が急激に低下するが、この温度は臨界温度と呼ばれ、この温度以上でキャリアが井戸から光閉じこめ層に漏れ出すことに対応している。1.32 μmのレーザーの臨界温度はやや低く、70 °Cであるが、これはしきい値キャリア密度が高いためと推測される。いずれにせよ、三元基板上のレーザーは従来のInP基板上のレーザーに比べて、圧倒的に微分効率の温度による低下は小さい。これは深い井戸によるキャリア閉じこめの効果である。微分効率の温度依存性が小さいことはレーザーのシステム应用の上で極めて有利である。

三元基板上のレーザーは、基板の質がまだ不十分なことから、同じウエハから得られた素子でも、しきい値電流密度がばらつく。これは量子井戸層が十分に平坦でな

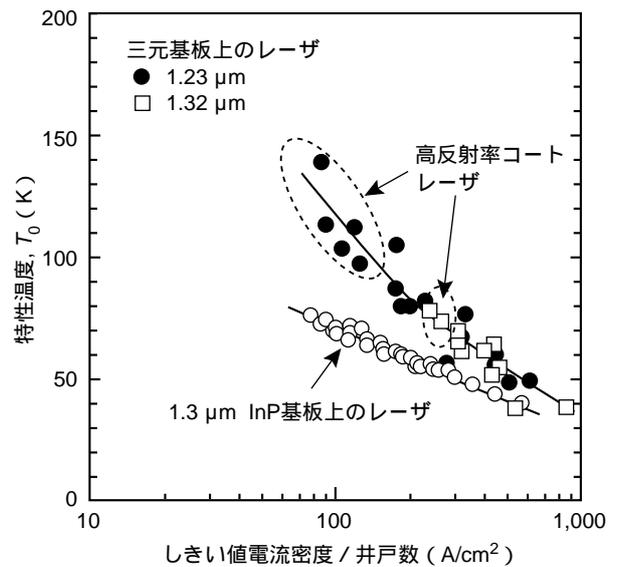


図-6 特性温度 T_0 の単位量子井戸層あたりのしきい値電流密度依存性

Fig.6-Dependence of characteristic temperature T_0 on the threshold current density/well.

く、光学損失が素子ごとにばらついているためである。特性温度 T_0 の単位量子井戸層あたりのしきい値電流密度依存性を図-6に示す。合わせて、比較のため従来のInPを基板としたレーザーの T_0 のしきい値電流依存性も示す。三元基板上のレーザーはしきい値電流密度の低減に伴い、 T_0 が大幅に上昇する。すなわち、これは式(1)で説明したように大幅に温度特性が良くなることを示している。また、波長1.23 μmのレーザーと波長1.32 μmのレーザーがほぼ同じ依存性のカーブの上に乗っている。1.23 μmの端面に高反射率コーティングを施した低しきい値電流密度のレーザー(図-6)では、短波長レーザーと同等の140 Kの特性温度 T_0 が得られている。

図-6に示した特性温度 T_0 はキャリアの漏れのない臨界温度以下の温度で定義しているため、この T_0 のしきい値電流密度依存性はキャリアの漏れ以外のレーザー活性層の本質的な性質を示しているものと考えられる。このような T_0 がしきい値電流密度に依存する要因として、Auger効果⁽⁹⁾と呼ばれる非発光再結合が考えられる。事実、この効果を取り入れた解析を行い、図-6の特性温度のしきい値キャリア密度依存性がよく説明できることを示すことができた⁽¹⁰⁾。図-6は、深いポテンシャル井戸を実現することでキャリアの漏れが抑制された三元基板上のレーザーでは、基板の品質を向上させ、しきい値電流密度をさらに下げることによって、一層の温度特性の改善が可能であることを示している。一方、従来のInP基板上のレーザーの場合は、しきい

値電流密度を下げても特性温度の改善は少ない。これは、キャリアの漏れが特性温度を決める主要因になっているためである。

今後の展望と課題

三元基板を用いてポテンシャルの深い井戸を形成することで波長1.3 μm帯のレーザのしきい値電流密度を大幅に低減させ、さらに温度特性を大幅に改善できることを示すことができた。波長1.23 μmでは、特性温度 T_0 が140 Kという短波長帯のレーザ並の特性を実現できた。波長1.32 μmのレーザは基板のIn組成が大きいことによる、結晶の品質の問題でしきい値電流密度が高く、特性温度は80 K程度であったが、それでも微分効率の温度依存性は従来のInP基板のレーザに比べて大幅に改善されている。また、基板の品質を向上させて、しきい値電流密度を低減することで、さらに一層の温度特性改良の可能性があることも示すことができた。より厳しい温度環境で使用でき、あるいは従来の温度環境でもより使い易い波長1.3 μm帯のレーザを実現することは、これまでの研究でその見通しが得られたと言える。

もう一つの大きな目標は、光インターコネクションに向けた波長1.3 μm帯の面型レーザを製作することにある。GaAsを基板とする短波長帯では、すでに優れた特性の面型レーザが開発されているが、長波長帯では満足な特性のレーザはいまだに実現されていない。これは、従来のInP/InGaAsP系では、量子井戸活性層の光学利得が低く、温度特性が悪いこと、さらにInP基板に格子整合した材料系では、大きな屈折率差の材料の組み合わせによる高い反射率のミラーが製作できないことによる。三元基板を用いると、温度特性のすぐれた高利得の活性層が得られることは本稿で述べたように実証された。著者らは三元基板に格子整合した材料系で高反射率のミラーが製作できることを示している⁽¹⁾。さらに、これらを取り入れた理論解析でしきい値電流密度200 A/cm²以下の低しきい値の波長1.3 μm帯面型レーザが実現できることを示した⁽²⁾。今後、ファブリペローレーザの次のターゲットとして、光インターコネクション用として実用に耐える高性能の波長1.3 μm帯の面型レーザの開発へと研究を展開していく。

1.3 μm帯レーザの温度特性の改善に向けて、著者らの提案後、深いポテンシャル井戸を実現して、レーザの温度特性を改良しようという、いくつかの別のアプローチが報告されて、研究が盛んになっている。いずれも新しい材料系を用いるもので、InP基板を用いて、InAsPの歪

量子井戸とInGaAlAsのバリア層を用いる方法⁽³⁾や、GaAs基板を用いてGaInNAsという新しい材料系を歪量子井戸活性層として用いる方法⁽⁴⁾などである。これらのアプローチは三元基板を用いるアプローチに比べて、従来の基板を用いることができることが有利な点である。一方、三元基板を用いたレーザは基板開発という、大きな課題を進めて行く必要があるが、電子とホールに対してともに深い井戸を形成できるため、最終的に、光学利得をほかのアプローチに比べて大きくできるという利点がある。これは低しきい値化につながり、図-6から分かるように、低しきい値化でさらに優れた温度特性のレーザを実現できる。三元基板を用いたレーザを実用化していくには、高品質の基板を低コストで製作する技術の開発に加えて、ほかのアプローチに比べて圧倒的に優れた特性を実現していくことがかぎであると考えている。また、ここで紹介したいずれのアプローチも、技術的に困難をかかえている新しい材料系の開発によるものである。これは従来技術の改良では、半導体レーザの特性改善がすでに限界にきていることを反映している。大幅な特性改善を図るためには、材料技術に立ち返って研究を進めることが不可欠となっている。

む す び

新しいInGaAs三元基板上に半導体レーザを製作することにより、優れた温度特性を実現する研究を紹介した。波長1.23 μmで特性温度が140 Kで微分効率の温度依存性の極めて小さいレーザを実現した。また、波長1.32 μmでは基板の品質が不十分なことから、ややしきい値電流密度が高いものの、従来のレーザに比べて圧倒的に小さい微分効率の温度依存性を実現できた。これらの結果は、深いポテンシャルの量子井戸を用いて温度特性の優れた波長1.3 μm帯のレーザが実現できることを実証するものである。また、通信用長波長帯レーザ研究開発の20年来の温度特性の問題に解答を与えるものと言える。現状の三元基板はまだ結晶性が不十分で、さらなる改善が必要である。今後、高品質の基板を開発して、一層の低しきい値化と優れた温度特性実現に向けて研究を進め、三元基板レーザの実用化を目指したい。また、通産省プロジェクト「次世代情報処理基盤技術開発」での本研究の最終目標である、光インターコネクションに向けた1.3 μm帯の高性能面型レーザ開発へと研究を進めていく。

参考文献

(1) 石川：面型レーザの低しきい値・高温動作化・レーザ研

- 究, 23, pp.497-405(1995)
- (2) H. Ishikawa : Theoretical gain of strained quantum well grown on a ternary substrate. *Appl. Phys. Lett.*, 63, pp.712-714(1993)
- (3) H. Ishikawa and I. Suemune : Analysis of temperature dependent optical gain of strained quantum well taking account of carriers in the SCH layer. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 6, pp.344-347(1994)
- (4) K. Otsubo et al. : High T_0 (140 K) and low-threshold long-wavelength strained quantum well lasers on InGaAs ternary substrate. *Electron. Lett.*, 33, pp.1795-1796(1997)
- (5) K. Otsubo et al. : 1.3 μm InGaAs/InAlGaAs strained quantum well lasers on InGaAs ternary substrates. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, pp.L312-L314(1999)
- (6) Y. Nishijima et al. : InGaAs single crystal using a GaAs seed grown with the vertical gradient freeze technique. *J. Crystal Growth*, 197, pp.769-776(1999)
- (7) 石川, 中嶋 : 三元基板を用いた温度特性の優れたひずみ量子井レーザー . *応用物理*, 68, pp.294-298(1999)
- (8) K. Otsubo et al. : Long-wavelength strained quantum well lasers oscillating up to 210 on InGaAs ternary substrates. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 10, pp.1073-1075(1998)
- (9) A. Sugimura : Band-to-band Auger recombination effect on InGaAsP laser threshold. *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-17, p.672(1981)
- (10) 石川, 大坪, 小路 : 三元基板上的高 T_0 レーザーの温度特性にオージェ効果の与える影響の解析 . 第59回応用物理学学会学術講演会, 論文15-a-7, 1998 .
- (11) K. Otsubo et al. : High-reflectivity $\text{In}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}/\text{In}_{0.28}\text{Al}_{0.72}\text{As}$ ternary mirrors for 1.3 μm vertical-cavity surface-emitting lasers grown on GaAs. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, pp.L227-L229(1995)
- (12) H. Shoji et al. : Calculated performance of 1.3 μm vertical-cavity surface-emitting lasers on InGaAs ternary substrates. *IEEE J. Quantum Electron.*, 33, pp.238-245(1997)
- (13) T. Anan et al. : 1.3 μm InAsP/InAlGaAs MQW lasers for high temperature operation. *Electron. Lett.*, 33, pp.1048-1049(1997)
- (14) M. Kondow et al. : GaInNAs : a novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, pp.1273-1275(1996)