

解 説

励起光源としての近赤外半導体レーザー

川 井 義 雄

沖電気工業(株)半導体技術研究所 〒193 八王子市東浅川町 550-5

(1991年4月12日受理)

Near Infrared Semiconductor Lasers for Optical Pumping

Yoshio KAWAI

Oki Electric Industry Co. Ltd.,
550-5, Higashiasakawa-cho, Hachioji 193

1. まえがき

InGaAsP 系の半導体レーザーによる近赤外レーザーは 200 mW 以上の光出力が 1986 年には実現されていたが、当時は光ファイバ通信用光源として確固たる応用がなかったため近赤外高出力半導体レーザーの出現は一般にはあまり注目されなかった¹⁻³⁾。しかし 1989 年、Er ドープ・ファイバ增幅器 (erbium-doped fiber amplifier: 以下 EDFA と略す) が 1.48 μm の高出力半導体レーザーで実現されたことにより光ファイバ通信としての重要性が明らかとなり、以後 EDFA 用の高出力半導体レーザーの研究が盛んに行われるようになった⁴⁾。

光ファイバにドーピングされている Er³⁺ イオンは 3 準位系のエネルギー準位の増幅器を構成しており、その励起波長は 0.51 μm, 0.66 μm, 0.81 μm, 0.98 μm, 1.48 μm である。この中で今日特に注目されているのは 0.98 μm と 1.48 μm の波長であり、EDFA の励起用光源としてこれらの波長を比較した場合それぞれ一長一短がある。まず 1.48 μm 帯の吸収帯では Er³⁺ が 1.450 ~ 1.485 μm と 30 nm もの広い波長で吸収可能であるため広いスペクトル幅をもったレーザーを励起光源として用いることが可能である。しかし 0.98 μm レーザーでは 0.975 ~ 0.985 μm と吸収領域が 10 nm と狭く急峻であるため励起光源の波長制約が厳しくなることが問題となる。一方 0.98 μm 波長のレーザーの利点としては励起強度に対する増幅率が大きいこと、雑音指数も 1.48 μm 帯では 4 ~ 5 dB あるのに対し 0.98 μm では 3 dB と雑音発生量は少ない。

0.98 μm レーザーは InGaAs/GaAs 系のひずみ量子井戸構造で実現されるが、このひずみ量子井戸レーザーの出現は従来の半導体レーザーが格子整合系の結晶成長にこだわり続けた既成概念を全く変えてしまい、格子不整合系の結晶成長の重要性を認めさせるものであった。EDFA 用 0.98 μm レーザーの必要性がひずみ量子井戸レーザーの重要性を認めさせるきっかけをつくった点は大いに注目されるべきことであろう。

本稿ではまず、これまで開発が進みすでに実用段階にある 1.48 μm についてその現状を述べ、次にひずみ量子井戸を用いた InGaAs/GaAs 系の 0.98 μm レーザーの最近の開発動向を述べる。

2. 1.48 μm 波長 InGaAsP 系高出力 レーザー

半導体レーザーを高出力動作させるためには優れた電流狭窄機能をもつ埋め込み構造を実現する必要がある。図 1 には高出力動作が実現されている二つの埋め込み構造のレーザーの断面構造を示す。VIPS LD の埋め込みレーザー構造は基板に P-InP を用い、一回目の結晶成長で電流ブロッキング層を形成し、二回目の結晶成長で活性層を形成しており、活性層が三日月状の曲面であることが特長である。一方 DC-PBH LD は基板に N-InP を用い、一回目の結晶成長で活性層を形成し、二回目の結晶成長で電流ブロッキング層を形成しており、活性層が平坦であることが特長である。両者は用いる基板のタイプ、結晶成長プロセスの順序、活性層の形状が全く異なっているが、興味深いことはこれらのレーザーの光出

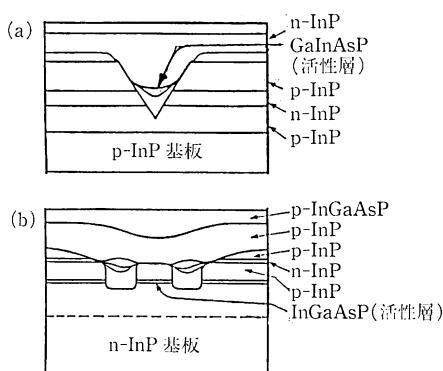


図 1 InGaAsP 系高出力レーザーの構造例
(a) VIPS (v-grooved inner stripe on P-substrate), (b) DC-PBH (double-channel planar heterostructure).

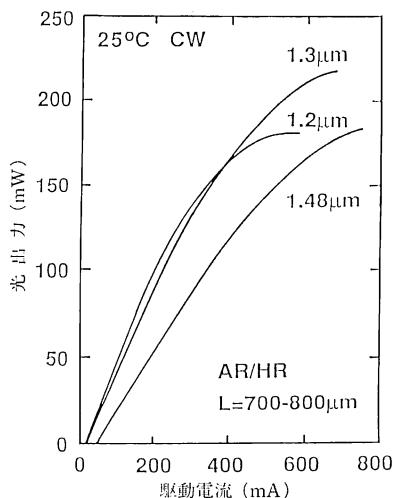


図 2 VIPS LD の光出力特性²⁾。1.2~1.55 μm の各種の波長で高出力化が試みられた。1.2 μm で 180 mW, 1.3 μm で 220 mW, 1.48 μm で 190 mW が得られている。

力特性がきわめてよく似ていることである。このことから両構造のレーザーともほぼ完全な電流狭窄機能を果たしていると推察される。

図 2 に VIPS-LD で 1.20 μm から 1.55 μm の波長領域で得られている光出力特性を示す。1.3 μm 付近の波長で 220 mW の最大出力が得られており、それより短波長および長波長領域で光出力は低下している。これは 1.3 μm より短波長側では光とじ込め効率が悪くなるためであり、長波長側では導波領域での光の吸収損失が増大するためである。図 3 に VIPS LD の内部吸収損失の

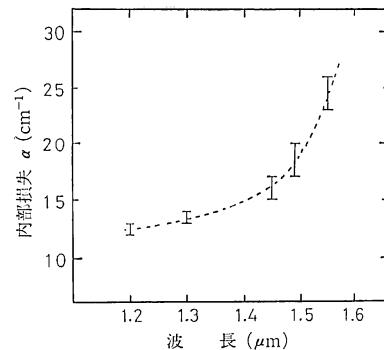


図 3 VIPS LD の内部損失 (α) の波長依存性。
1.50 μm より長波長側で損失が急増する。

波長依存性を示すが、1.5 μm より長波長側で急激に損失が大きくなってしまっており高出力動作が長波長側で困難になることを示唆している。EDFA 用の 1.48 μm では 1.3 μm とほぼ同程度の 190 mW の出力が得られている。

半導体レーザーを高出力動作させるためには閾値電流を小さくし、量子微分効率を大きくし、素子の熱抵抗を小さくする共振器設計が必要である。閾値電流を低くするためには共振器長を短くし、端面反射率を高めればよく、量子微分効率を大きくするためには共振器長を短くし、出射側の反射率を小さくすればよい。熱抵抗を小さくするためには共振器長を長くすればよい。このように高出力動作のための共振器長と端面反射率は必ずしも一義的には決まらず、全体的な最適化が必要であるが、InGaAsP 系のレーザーではこれらの相関関係がかなり明確にされている。共振器長は通常のレーザーが 300 μm 程度であるのに対し、高出力レーザーでは 700~1,500 μm 程度と長いものが用いられ、端面反射率は光取り出し側には反射防止膜が(3~10%)付けられ反対側の端面は反射増加膜(90~100%)が付けられている。

半導体レーザーを高出力動作で長期間使用する場合は最大光出力の 75% 以下に光出力を押さえて動作させることができ望ましい⁵⁾。これは最大出力点の近くで定出力動作させると(APC: automatic power control) 素子の特性のわずかな変動でも駆動電流が大きく変動してしまうことを防ぐためである。

VIPS LD の 1.3 μm と 1.5 μm の波長のレーザーに関する、最大光出力の 75% の光出力で APC 通電試験を行ったときの寿命試験の結果を図 4 に示す⁶⁾。駆動電流が初期値の 20% 上昇した時間を寿命とし、累積故障率をプロットしたものである。半数の素子が故障する寿命は 1.3 μm レーザーでは 15×10^4 h (25°C), 6×10^4 h (70°C) が得られ、1.5 μm レーザーでは 6×10^4 h (25°C),

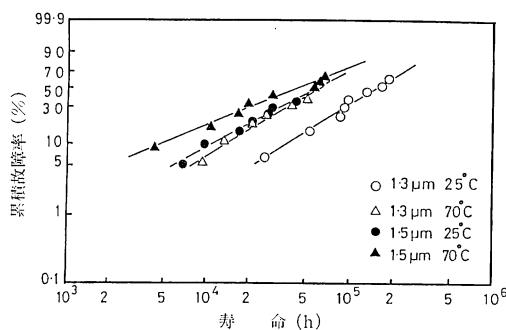


図 4 VIPS LD の高出力連続通電試験⁶⁾. 初期の P_{max} の 75% のレベルで一定出力通電, 寿命の定義は駆動電流が初期値の 20% 上昇した時点. 平均寿命; 1.3 μm : 15×10^4 h (25°C), 6×10^4 h (70°C), 1.5 μm : 6×10^4 h (25°C), 4.5×10^4 h (70°C).

4.5×10^4 h (70°C) の値が得られている⁶⁾.

図 5 (a) は EDFA 用の 1.48 μm のレーザーについて行った通電試験経過を示す. 通電試験は APC 動作で行っており, 試験条件は (50°C-65 mW), (25°C-100 mW), (25°C-65 mW) の 3 水準である. サンプルは合計 30 個で, 通電試験は約 6,000 時間行っており, 駆動電流の変動は非常に少ない. 図 5 (b) は 5,000 時間経過時点の駆動電流の変動量のヒストグラムである. 駆動電流の変動は 4% 以内で, しかも駆動電流は減少している. 他の二つの試験水準のレーザーも図 5 (a), (b) と同様な結果であり, 駆動電流の変動量も -4~0% と減少している⁷⁾.

浅野らは DC-PBH LD の活性層に MO-VPE 法で製作した多重量子井戸構造 (MQW-DC-PBH LD) を導入することで 1.48 μm レーザーの高出力化をはかることに成功している⁸⁾. MQW の構造は InGaAs ウェル層 ($d=40$ Å) と InGaAsP バリア層 ($d=130$ Å) を 4~5 層形成している. 共振器の両端面は誘電体多層膜により 10/90% の反射膜が施されている.

共振器長は 800~1,800 μm と通常のレーザーに比べ非常に長くなっている. 液相成長法で形成したレーザーでは 1,000 μm 以上の共振器長で高出力化を図ることは困難であるが, このレーザーでは活性層に MQW 構造を採用したことや MO-VPE により均一性に優れた活性層を形成できたのが理由かもしれない. このレーザーでは 20°C-100 mW, 50°C-100 mW, 70°C-100 mW の高出力な水準で 300~2,800 時間の通電が行われている. 図 6 に 70°C-100 mW の通電試験の例を示すが, これらの試験での平均劣化率は $2.8 \times 10^{-6}/\text{h}$ (ただし 20°C

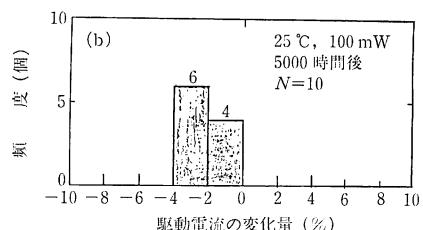
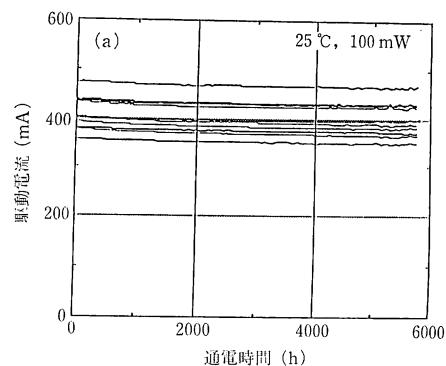


図 5 1.48 μm VIP LD による高出力通電試験⁷⁾. 試験条件は (50°C-65 mW), (25°C-65 mW), (25°C-100 mW) の 3 水準で各水準 10 個である. (a) に 25°C-100 mW の通電試験の例を示す. (b) は上記サンプルの 5,000 時間経過時の変動量のヒストグラム. 駆動電流の変動量は -4~0%.

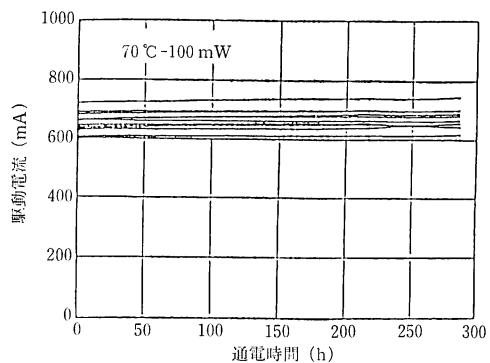


図 6 1.48 μm MQW-DC-PBH LD の 100 mW 高出力通電試験⁸⁾. 光出力は 100 mW, 温度は 20°C (共振器長: $L=800$ μm), 50°C ($L=800$ μm), 70°C ($L=1,800$ μm) の 3 水準, 上図は 70°C-100 mW の試験を示す.

と 50°C) が得られている.

1.48 μm 高出力レーザーを用いたモジュールの一例を図 7 に示す⁹⁾. このモジュールは特に高出力を目的として開発したもので, 1.48 μm 高出力レーザーを 4 個用い, 波長多重と偏波合成によりファイバ出力で 240 mW

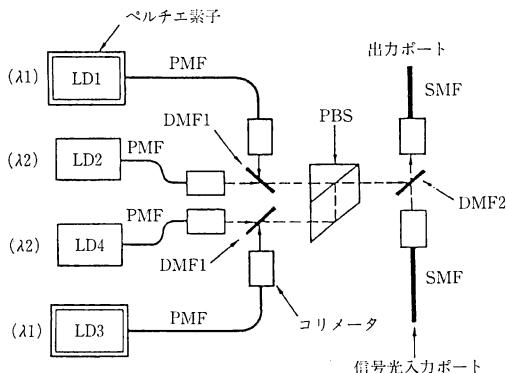


図 7 4 個のレーザーを用いた EDFA 励起用高出力レーザーモジュール⁹⁾. PMF: 偏波保存光ファイバ, DMF: 誘電体多層膜フィルタ, PBS: 偏向ビームスプリッタ. 信号光 ($\lambda=1.53\sim1.60\mu\text{m}$) の挿入損失は 1.0 dB 以下.

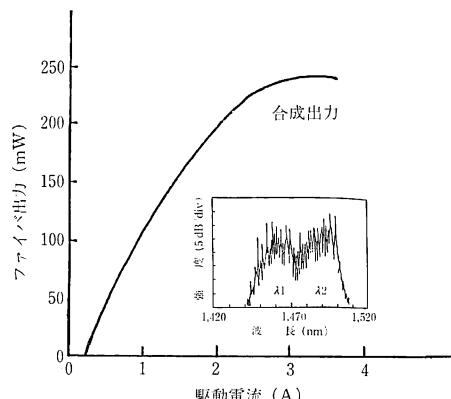


図 8 EDFA 励起用高出力レーザーモジュールの光出力特性

を達成したものである。偏波保存光ファイバ(PMF)を用いて LD1 と LD2 からのレーザーの偏波面をあわせて誘電体多層膜(DMF1)により波長合成する。このとき LD1 と LD2 との発振波長間隔が適当になるように LD1 をペルチェ素子により温度制御する。LD3, LD4 についても同様に波長合成する。それぞれの波長多重光を偏向ビームスプリッタ(PBS)により偏波合成し、DMF2 により信号光と励起光とを波長合成する。波長 $1.53\sim1.6\mu\text{m}$ の信号光の入力ポートから出力ポート側への伝送損失は 1.0 dB 以下と非常に小さい。

図 8 にこのモジュールの光出力特性を示す。各レーザーに 700 mA 程度の電流を流すことにより最大出力 240 mW を出力ポート側に挿入している。

3. $0.98\mu\text{m}$ InGaAs/GaAs ひずみ量子井戸レーザー

ひずみ量子井戸レーザーは基板結晶の格子定数とは異なる結晶材料を活性層に用いるため、従来の格子整合系では実現できなかった波長領域でレーザー発振が可能である。またこのレーザーは活性層に圧縮応力を加えることにより価電子帯のバンド構造が変化し、価電子帯の重い正孔の状態密度を小さくできるため、閾値電流の低減、利得スペクトル幅の狭小化、内部損失の低減、微分利得の増大等、優れた特性のレーザーを得ることも可能となる。

ひずみ量子井戸レーザーの研究は 1983 年 Ludowise らの InGaAs/GaAs レーザーの研究に始まるが¹⁰⁾、1984 年には Laidig らにより電流注入法によるパルス発振が実現されている¹¹⁾。その後 1987 年、Fischer らは $1\mu\text{m}$ 付近の波長で室温で連続発振を実現し、閾値電流 17 mA、光出力 25 mW の優れた特性を得ている¹²⁾。

InGaAs/GaAs ひずみ量子井戸レーザーでは $0.9\sim1.15\mu\text{m}$ の波長領域でレーザー発振が可能であるが、このレーザーが本格的に注目されたのは EDFA が出現し、Laming らの色素レーザーを用いた実験で、その励起用光源として $0.98\mu\text{m}$ の波長が優れていることが明らかとなってからである¹³⁾。

1989 年より $0.98\mu\text{m}$ 高出力レーザーの研究が各研究機関で精力的に行われるようになったが、そのほとんどがいわゆる GRIN-SCH (graded-index separate confinement heterostructure) 形ひずみ量子井戸リッジ導波形レーザーである。

図 9 には GRIN-SCH 形ひずみ量子井戸リッジ導波形レーザーの構造図を示す。活性層はひずみ量子井戸でその組成は $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.2$)、厚みが $50\sim60\text{\AA}$ 程度が一般的である。GRIN 層 (graded index waveguide layer) は活性層からクラッド層の間で $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ の y が順次変化する領域で、その厚みは $1,500\sim2,000\text{\AA}$ 程度である。クラッド層の組成は $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y=0.4\sim0.6$) で厚みが $1.0\sim1.5\mu\text{m}$ 程度である。この GRIN-SCH ひずみ量子井戸構造は MOVPE や MBE の結晶成長法で形成される。リッジ導波形構造は電流注入と光とじ込め機能とをもっており、レーザーを横基本モード発振させるために、リッジの幅は $5\mu\text{m}$ 以下が用いられている。 $0.98\mu\text{m}$ 高出力レーザーの共振器長はほとんどの例が $500\sim600\mu\text{m}$ であり、 $1.48\mu\text{m}$ 高出力レーザーより短い。また出射側端面は $5\sim10\%$ 、裏面側の端面は

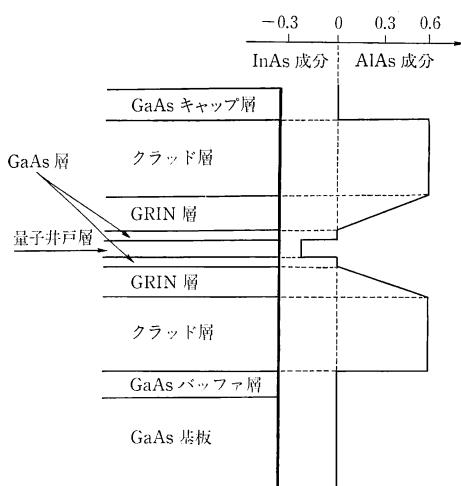


図9 GRIN-SCH形ひずみ量子井戸リッジ導波形の構造図。0.98 μm系レーザーの基本構造である。量子井戸層を挟むGaAs層がないもの、GRIN層のないものもある。

90%程度の反射膜が付けられている。

1989年NTTの上原らは0.98 μm高出力レーザーとしてInGaAs/GaAsひずみ量子井戸に注目し、リッジ導波形レーザーをMOVPE法により作製し、室温CW動作で最大光出力85 mWを得ることに成功し、その後彼らは最大光出力115 mW、外部量子微分効率73%を得ている^{14,15}。

量子井戸層はIn_{0.24}Ga_{0.76}Asの組成で厚みは56 Å、クラッド層はAl_{0.6}Ga_{0.4}Asの組成で厚みは1.2 μmの単一量子井戸層であり、リッジ導波部はストライプ幅3 μm、共振器長が600 μmである。共振器端面は反射膜がコーティングされており、出射側が5%，裏面側が75%となっている。

0.98 μmレーザーの通電試験に関する報告例はまだ少ないが、図10に示すような長期通電結果が報告されている。試験条件は動作温度が50°Cで、光出力は10 mW、20 mW、30 mWの3水準である。あらかじめスクリーニングを施していないため、初期劣化が起こしているサンプルもあるが、半数以上のサンプルは5,000時間を過ぎても安定に動作しており、将来的にはスクリーニング法の確立により長期信頼性が確保されるものと考えられる。

LarssonらはMBE(molecular beam epitaxy)結晶成長で製作したInGaAs/GaAsひずみ量子井戸レーザーで最大光出力240 mWの高出力動作を実現している¹⁶。リッジの幅が6 μmと広く、共振器長は600

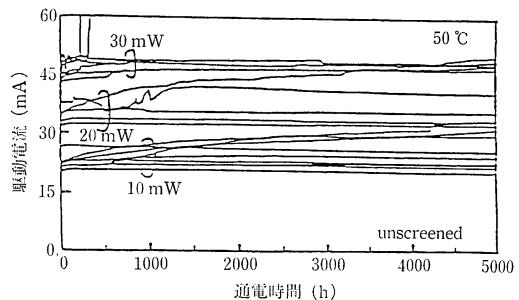


図10 0.98 μmリッジ導波形レーザーの通電試験¹⁵。試験温度は50°C、光出力は30 mW、20 mW、10 mWの3水準。初期劣化がみられるが（スクリーニングしていないため）5,000時間経過しても安定に動作している。

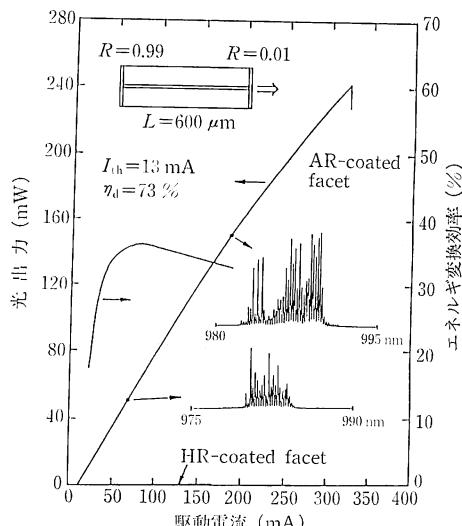


図11 0.98 μmリッジ導波形レーザーの出力特性¹⁶。出射端面は反射率が1%、裏面側反射率は99%、最大光出力240 mWが得られている。COD劣化がみられる。

μm、出射側は1%、裏面側は99%の反射率である。図11にその光出力特性を示す。なお通常、縦シングルモード発振が多いがLarssonらのレーザーは図中に示すように縦マルチモード発振している。またこのレーザーは光出力240 mWでいわゆる光学損傷(COD:catastrophic optical damage)を起こして劣化している。

Fuらは0.98 μmのInGaAsひずみ量子井戸レーザーで160°Cの高温度でもレーザー発振させている¹⁷。リッジの幅3 μmで、共振器長は600 μmで室温で最大光出力は200 mW、外部微分量子効率は60%である。

特性温度 (T_0) が 130~140 と高くそのため 160°C の高温度でもレーザーの微分量子効率の変動は室温のわずか 30% 減であった。

Welch らもリッジ構造のレーザーで横基本モード発振で 210 mW, 縦シングルモードで 160 mW までの高出力動作を実現している¹⁸⁾。また Welch らは 0.91 μm 波長の InGaAs/GaAs ひずみ量子井戸レーザーの高出力化も試みている。これは 2 倍波である 0.455 μm 用の光源として狙っているものであるが、縦マルチモードでは 350 mW を、また縦シングルモードの光では 180 mW を実現している¹⁹⁾。

最近 KDD の宇佐見らは最大光出力 245 mW もの高出力動作を 0.98 μm 波長で実現している²⁰⁾。彼らは MBE 法で単一量子井戸構造のレーザーを作成している。活性層の組成は In_{0.21}Ga_{0.79}As (厚み 55 Å) でその両側を 1,000 Å の GaAs ではさみ、さらにその外側を Al_{0.25}Ga_{0.75}As の組成のクラッド層ではさんで SCH 構造としている。このクラッド層は従来では Al_xGa_{1-x}As の x が 0.4~0.6 に比較すると非常に小さくしているのが特長である。パルス駆動では最大 430 mW の出力を、CW 駆動では 245 mW の光出力を実現している。光出力密度が 20 MW/cm² に達しているにもかかわらず急速劣化が観測されていないのはクラッド層の Al の組成比を $x=0.25$ と低くしたためとみられる。なおこのレーザーの共振器長は 500 μm でリッジ幅が 5 μm 、端面の反射率は 11/96% である。

これまで述べた近赤外の 0.98 μm レーザーは全てリッジ構造による光導波を形成しているが、InGaAsP 系のように埋め込み構造のレーザーの出現が望まれるところである。Beernink らは InGaAsP ひずみ量子井戸レーザーで埋め込み構造レーザーを試みており図 12 に

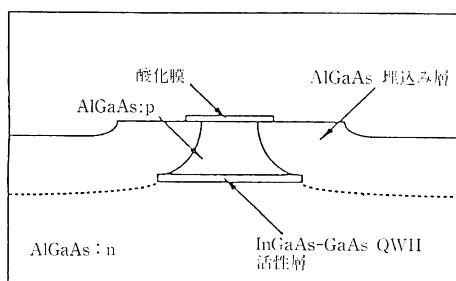


図 12 InGaAs/GaAs 埋込みヘテロ構造型ひずみ量子井戸レーザー²¹⁾。MO-VPE 法により AlGaAs 層を再成長させて活性層を埋め込んでいる。

その構造を示す²¹⁾。これらの結晶成長は全て MO-VPE で行っており、光出力特性は 100 mW 以上の出力まで基本モード発振が確認されている。

4. あとがき

InP 系の 1.48 μm 高出力レーザーに関しては素子の信頼性を中心とした開発動向を述べ、0.98 μm レーザーについては InGaAs/GaAs 系のひずみ量子井戸構造の最近の高出力の進展状況について述べた。

EDFA 励起用として 1.48 μm 高出力レーザーはシステム実験にもかなり使われており実用化の見通しは明るい。今後高出力化だけでなく実用化にむけての信頼度の高い素子開発が重要となっている。0.98 μm レーザーの本格的研究はまだ始まったばかりで、今後は MOVPE や MBE を中心とする結晶成長の基礎研究や応用研究が急速に進展されるものと思われる。

文 献

- 1) S. Oshiba, H. Horikawa, A. Matoba, M. Kawahara and Y. Kawai: "High power output over 200 mW of GaInAsP/InP VIPS-LD," Abstract Tenth IEEE Int. Semicond. Laser Conf. (1986) pp. 148-149.
- 2) S. Oshiba and Y. Tamura: "Recent progress in high-power GaInAsP lasers," J. Lightwave Technol., 8 (1990) 1350-1356.
- 3) S. Oshiba, A. Matoba, M. Kawahara and Y. Kawai: "High-power output over 200 mW of 1.3 μm GaInAsP VIPS laser," IEEE J. Quantum Electron., QE-23 (1987) 738-743.
- 4) 島田寅吾: "Er ドープファイバー光増幅器が光通信システムに与えるインパクト", O plus E, 113 (1989) 75-82.
- 5) S. Oshiba, A. Matoba, H. Horikawa, Y. Kawai and M. Sakuta: "Reliability of 1.3 μm V-grooved inner-stripe laser diodes under high-power operation," Electron. Lett., 22 (1986) 428-429.
- 6) S. Oshiba and Y. Kawai: "High-power aging tests of 1.3 and 1.5 μm VIPS lasers," Electron. Lett., 23 (1987) 843-844.
- 7) 山田光志, 大柴小枝子, 国井達夫, 小川 洋, 野中敏夫, 川井義雄: "1.48 μm 高出力 VIPS-LD の信頼性試験", 信学秋季全大 (1990) C-91.
- 8) 浅野英樹, 瓦谷正彦, 北村光弘, 水戸郁夫: "1.48 μm MQW-DC-PBH LD の 100 mW 高出力信頼性試験", 1990 信学秋季全大 (1990) C-90.
- 9) Y. Tamura, S. Shikii and Y. Kawai: "Semiconductor laser pump module with 240 mW output around 1.47 μm band," Tech. Dig. Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication '89 Kobe (1989) 20B1-22.
- 10) M. J. Ludowise, W. T. Dietze and C. R. Lewis: "Continuous 300-K laser operation of strained superlattices," Appl. Phys. Lett., 42 (1983) 487-489.
- 11) W. D. Laidig, P. J. Caldwell, Y. F. Lin and C. K. Peng: "Strained-layer quantum-well injection laser," Appl. Phys. Lett., 44 (1984) 653-655.

- 12) S.E. Fischer, D. Fekete, G.B. Feak and J.M. Ballantyne: "Ridge waveguide injection laser with a GaInAs strained-layer quantum well ($\lambda = 1 \mu\text{m}$)," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 714-716.
- 13) R.I. Laming, M.C. Farries, P.R. Morkel, L. Reekie and D.N. Payne: "Efficient pump wavelengths of erbium-doped fibre optical amplifier," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 12-14.
- 14) S. Uehara, M. Horiguchi, T. Takeshita, M. Okayasu, M. Yamada, M. Shimizu, O. Kogure and K. Oe: "0.98- μm InGaAs strained quantum well lasers for erbium-doped fiber optical amplifiers," *Tech. Dig. Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication '89*, Kobe (1989) 20 PDB-11.
- 15) S. Uehara: "Pump sources for erbium-doped fiber amplifiers," *Tech. Dig. Optical Amplifiers and Their Applications*, **13** (1990) pp. 206-209.
- 16) A. Larsson, S. Forouhar, J. Cody and R.J. Lang: "A 980 nm pseudomorphic single quantum well laser for pumping erbium-doped optical fiber amplifiers," *Tech. Dig. Optical Amplifiers and Their Applications*, **13** (1990) pp. 210-213.
- 17) R.J. Fu, C.S. Hong, E.Y. Chan, D.J. Booher and L. Figueroa: "High temperature operation of InGaAs strained quantum well lasers," *Abstract 12th IEEE Int. Semicond. Laser Conf.* (1990) pp. 54-55.
- 18) D.F. Welch, W. Plano, J. Major, M. Devito and D. Scifres: "High-power, 980-nm, single-mode laser diodes," *Tech. Dig. Optical Fiber Communication Conf. '91*, San Diego (1991) WB1.
- 19) D.F. Welch, M. Cardinal, B. Streifer and D. Scifres: "High-power single mode InGaAs/AlGaAs laser diodes at 910 nm," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 233-234.
- 20) 宇佐見正士, 宇高勝之, 田中信介, 松島裕一: "MBE 成長 0.98 μm 高出力 InGaAs/AlGaAs 歪量子井戸レーザー," *1991 信学春季全大* (1991) C-145.
- 21) K.J. Beernink, J.J. Alwan, P.K. York and J.J. Coleman: "High power 0.98 μm InGaAs-GaAs strained layer buried heterostructure lasers," *Abstract 12th IEEE Int. Semicond. Laser Conf.* (1990) pp. 56-57.