

# 光ファイバアンプ励起用高出力半導体レーザの現状

## Recent Developments in High-Power Semiconductor Lasers for Pumping of Optical Fiber Amplifiers

粕川秋彦\*  
Akihiko Kasukawa

向原智一\*  
Toshikazu Mukaihara

山口武治\*  
Takeharu Yamaguchi

城川潤二郎\*  
Jun'jiro Kikawa

概要 通信容量の増大にこたえるため、波長多重通信 (Wavelength Division Multiplexing) 方式が実現されている。WDM方式を支えるキーコンポーネントとしてEDFAがある。高出力EDFAを実現するためには、励起用の高出力半導体レーザが必要とされる。本稿では、EDFA励起用光源として重要な980 nm, 1480 nm高出力半導体レーザの開発現状について報告する。

### 1. はじめに

インターネットの普及に伴い急激な通信容量の増大が叫ばれている。良く知られているように光ファイバ通信は長距離・大容量伝送を実現でき、現代の情報化社会の通信系のバックボーンを支えている。しかしながら、波長1300 nmに零分散、波長1550 nmに最低損失帯を有する既設の光ファイバを最大限に活用する場合、従来の通信方式 (Time Division Multiplexing; TDM) でビットレートを増大し、増大し続ける通信容量の増大に対応するには限界がある。これに対して、発振波長、波長間隔が制御されたスペクトル純度の高い単一波長の信号光源を多波長用いることにより、等価的にビットレートを増大させる波長多重通信 (Wavelength Division Multiplexing; WDM) 方式が注目されている。このWDMシステムでは、既存技術である2.5 Gbpsの伝送技術をそのまま使用できるため、技術的には完成された技術を用いて、しかも等価的な伝送容量は用いた波長分だけ増大させることが原理的に可能である。WDM方式は、最もコストエフェクティブな方法として広く認知されている。WDM方式を用いたときの伝送容量の増加の様子を図1に示す。近い将来は、10 Gbps/チャンネルの技術を用いることにより、テラビット伝送も十分可能となっている。

一方で、このWDMシステムでは、用いられる光デバイスには波長に関する厳しい仕様が要求される。信号光源である単一モードレーザで見た場合も、チャンネル数を多くするため、100 GHz (0.8 nm) や50 GHz (0.4 nm) の波長間隔あるいは絶対波長の管理 (初期特性のみならず長期安定性も含め) が要求される。波長分別用のフィルターについても、各波長間でのクロストーク (漏話) を充分小さくする必要がある。

更に、WDMシステムに用いられる信号光源には波長に対す

る厳しい要求のみならず、中継距離を増大するため、伝送速度を増大するためあるいはシステム内で用いられる光部品による挿入損失等を補償するため大きな光出力が要求される。高ビットレートや多波長一括増幅のため従来の光/電気、電気/光変換による増幅では限界がある。これに対して、光を光の形で増幅できる光ファイバアンプは高ビットレートや多波長一括増幅に対応でき、しかも大きな光出力が得られるためWDM方式にとって必須部品となっている。後述するように、光ファイバアンプを用いて信号光波長 (1500 nm帯) を増幅し、大きな光出力を得るためには、波長980 nm, 1480 nmで発振する高出力励起用光源 (ポンプレーザ) が必要である。

ここでは、光ファイバアンプについて簡単に紹介した後、光ファイバアンプの中核ユニットである波長980 nm, 1480 nm高出力半導体レーザについて紹介する。

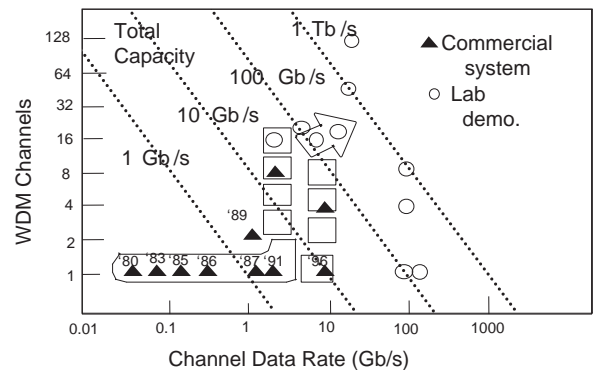


図1 WDMシステムを使った伝送速度の進歩  
Progress of transmission systems speed based on the WDM

\* 横浜研究所 半導体研究開発センター

## 2. 光ファイバアンブ

光を光の形で増幅できる光ファイバアンブはWDMシステム実現のため大きなイノベーションとなったと言っても過言ではない。すなわち、従来の光/電気変換型増幅器では得られない、高速性、コヒーレント性を有する増幅器が光ファイバの特質と融合した結果、光ファイバアンブはWDM方式に不可欠となっている。

稀土類であるエルビウム (Er) イオンをコアの部分にドープした、エルビウムドープファイバは光通信の最低損失波長である1500 nm帯で高利得の光増幅が得られるため特に注目されている<sup>1)</sup>。このエルビウムドープファイバを用いたファイバアンブ (EDFA; Er-Doped Fiber Amplifier) の構成の一例を図2に示す。Erドープファイバ、励起用レーザモジュール、励起光と信号光とをErドープファイバに導入するための光合波器 (WDM)、アンブ内の発振を防止するための光アイソレータ、及び光フィルタの5要素が基本で構成されており、更に入出力レベルをモニタするためのカップラと光検出器が通常含まれる。励起用の光源は、エルビウムドープファイバの吸収波長となる980 nmあるいは1480 nmの高出力レーザが用いられる。波長1480 nmを用いた場合、EDF内部での励起光から信号光へのエネルギー変換効率率は、90%以上のレベルに達しているという報告もある<sup>2)</sup>。また、980 nmで励起した場合、雑音指数が小さくできるという特徴がある。現在では、両者の特徴をいかし、980 nm励起をプリアンプとして、1480 nm励起をブースターアンブとして用いるケースが多い。

前述したように、信号光源には高出力が要求される。このため励起用光源にも高出力が要求されることとなる。

また、最近、波長1300 nm帯用のプラセオジウムファイバアンブ (PDFA; Pr-Doped Fiber Amplifier) についても検討されている。この場合、励起用光源としては、波長1020 nmの半導体レーザが必要となる。

## 3. 材料および結晶成長

波長1480 nmに関しては、光通信用として重要である波長1300-1550 nmで用いられてきたInP基板上的InPに格子整合しGaInAsP四元混晶がこの波長帯をカバーする。一方、波長980 nmは、これまでの格子整合系では実現することができなかつ

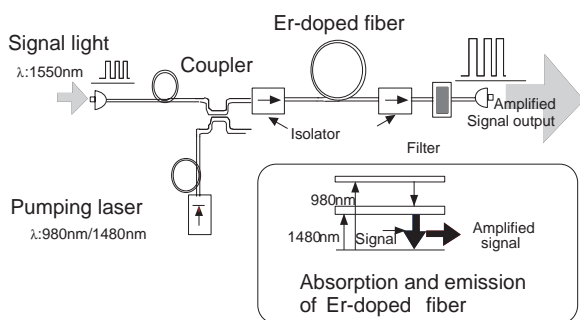


図2 光ファイバアンブの構成  
Configuration of optical fiber amplifier

た空白の波長帯である。しかしながら、これまでの概念にとらわれない新しい概念である歪量子井戸の考え<sup>3),4)</sup>とそれを実現させる結晶成長技術の進歩によりこの波長帯のレーザが実現された。具体的には、GaAs基板上的InGaAs量子薄膜を活性層として用いるものである。このとき、InGaAs量子薄膜はGaAs基板より大きな格子定数を有し、圧縮歪を受ける。このように、歪を有する層を用いた場合でも、薄膜を用いれば、それぞれの結晶は結晶欠陥を生ずることなしにつながる。この条件は、歪量を $\varepsilon$  (%), 膜厚を $L_z$  (nm)とすれば、おおむね $\varepsilon \cdot L_z < 20 \text{ nm} \%$ と表すことができる<sup>5)</sup>。

980 nmレーザを実現した歪量子井戸活性層の概念は、レーザ特性を大きく改善することができるため現在では波長1480 nmレーザにおいても用いられている。

以下に励起用光源の高出力レーザの活性層として用いられている量子井戸、そして現在主流となっている圧縮歪量子井戸について簡単に説明する。

量子井戸構造は、異なる材料からなるドロイ波長以下の薄膜を積層することにより形成される。量子井戸構造をレーザの活性層に用いた場合、量子井戸構造により形成された量子ポテンシャル中の量子化準位に注入キャリアが有効に閉じ込められるため、少ない電流で高い利得が得られる。更に、歪量子井戸では、価電子帯のバンド構造が変化する。特に、圧縮歪では、発光に寄与する正孔の有効質量が軽くなり、更に少ない電流で高い利得が得られる。

これらの量子井戸活性層を含むレーザウエハの作製には、薄膜成長に適した結晶成長技術が用いられる。波長980 nm InGaAs/GaAsレーザでは、有機金属気相成長 (MOCVD) 法や分子線成長 (MBE) 法が用いられており、波長1480 nm GaInAsP/InPレーザでは、有機金属気相成長法が広く用いられている。

## 4. 高出力化のためのアプローチ

高出力化については、レーザの使用形態がレーザモジュールであるため、レーザ単体での高出力化は言うに及ばず単一モード光ファイバとの高結合も重要なポイントとなる。単一モード光ファイバとの高結合を実現させるためには、基本横モードでの発振が不可欠である。このため、レーザ構造は、波長980 nmではリッジ導波路型が、波長1480 nmでは埋め込み型が主流である。

横モード制御されたレーザでは、直流電流で駆動した場合、最大光出力は、熱あるいは無効電流増加による飽和現象と瞬時にレーザ発振を停止してしまう現象により制限される。前者は、主に波長1480 nmレーザで観察され、後者は主に波長980 nmレーザで観察される端面溶融による頓死でありCOD (Catastrophic Optical Damage) と呼ばれる。前者では、I-L特性は何度でも再現するが、後者の場合もはやレーザ発振は起こらない。CODによる端面劣化は文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

まず、レーザ単体で高出力を得るための方法について説明する。CODによるレーザの頓死がない場合、半導体レーザの端面からの光出力 $P_f$ は次式で与えられる。

$$P_f = \eta_i \frac{1}{1 + \frac{1-R_f}{1-R_r} \sqrt{\frac{R_r}{R_f}}} \times \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} (I - I_{th}) \left( \frac{I_{ac}}{I_{ac} + I_L} \right) \Theta(T)$$

ここで、 $\eta_i$ は内部量子効率、 $\alpha_i$ 、 $\alpha_m$ はそれぞれ内部損失、反射鏡損失、 $I$ 、 $I_{th}$ はレーザの駆動電流及び閾値電流、 $I_{ac}$ 、 $I_L$ は駆動電流中、実際レーザ発振に寄与する電流分、及び無効電流分 ( $I = I_{ac} + I_L$ )であり、 $\Theta(T)$ は発熱による光出力の飽和を表す項である。この式より高い光出力を得るためには、

- (1) 高い内部量子効率の実現 (高  $\eta_i$ )
- (2) 非対称端面コーティングの採用 (低  $\alpha_m$ )
- (3) 低内部損失の実現 (低  $\alpha_i$ )
- (4) 活性層以外を流れる漏れ電流の低減 (低  $I_L$ )
- (5) 熱放散性の改善  
が有効な手段として挙げられる。

これらの項目の中には、矛盾する内容も含まれている。例えば、放散性の改善のためには、長いレーザ共振器を用いることが望ましいが、一方では、長共振器レーザの場合、閾値電流 ( $I_{th}$ )の上昇、量子効率の減少等を引き起こす。したがって、トレードオフの関係となるため目的に応じ最適化することが必要となってくる。以下にそれぞれの項目について説明する。

(1) 高い内部量子効率の実現のためには活性層構造及び量子井戸レーザで不可欠な光閉じ込め層の最適化が重要である。活性層構造に関しては、歪量子井戸活性層を用いることが有効である。光閉じ込め層に関しては、後に述べる GRIN-SCH 層の導入が有効である<sup>7)</sup>。

(2) 半導体レーザは、2枚の反射鏡を用いレーザ共振器が構成されている。したがって、光は共振器の前面、後面から放出される。実際の応用では、後端面からの光出力はモニター用としてのみ用いられるためさほど必要とされない。そこで、前端面からの光出力を増大させるために誘電体膜による非対称コーティングが用いられている。一般的には、前端面に数%の低反射膜、後端面には95%程度の高反射膜が用いられている。この場合、前後端面の光出力比は30程度大きくなり、高光出力動作が可能となる。

(3) 低内部損失を実現するためには、量子井戸活性層の導入が有効である。特に、歪量子井戸の導入により、更に内部損

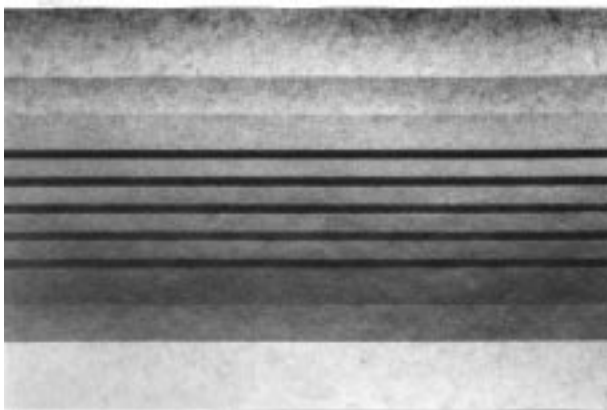


図3 1480 nm レーザの活性層部分の透過型電子顕微鏡写真  
TEM image of the active region of a 1480 nm laser

失を低減することができる。したがって、歪量子井戸活性層を導入した場合、長共振器にした場合にも、閾値電流の上昇や量子効率の低下を抑えることができる。

(4) 無効電流を抑えることにより発熱を抑えることにより、高出力動作が達成できる。具体的には、1480 nm 埋め込み型レーザでは、電流阻止層の最適化で無効電流分を抑制することができる。

(5) 駆動電流、駆動電圧、デバイス抵抗を低減することによりジュール熱による発熱を抑えることができる。また、ダイヤモンドに代表されるような熱伝導率の高いヒートシンク材料を用いることや熱源となる活性層をヒートシンク側にするジャンクションダウンボンディングにより放熱性を高めることができる。

つぎに、単一モード光ファイバと高い結合を得るための方法について説明する。

実際の応用では、レーザモジュールの形で用いられる。したがって、高いファイバ出力を得ることが重要であり、ファイバとの高い結合効率が要求される。単一モード光ファイバと高い結合を得るためには、円形狭出射ビームを実現することが必要である。ここでは、後に述べる GRIN-SCH 構造を例に説明する。GRIN-SCH 構造では GRIN-SCH を構成する GaIn AsP 四元層の組成及び厚さを変化させることにより出射ビーム角を制御することが可能である<sup>8)</sup>。GaInAsP 四元層の組成をワイドギャップ波長材料にし、厚さを薄くすることで狭出射ビームを実現することができる。しかしながら、円形狭出射ビームを実現する方法は、閾値電流を増大させるため、最適化が必要である。

このほか、レーザモジュール内の集光レンズ系を含めた光学系の設計も重要であることを付記しておく。

以下、それぞれの波長のレーザ特性とモジュール特性について述べる。

## 5. 波長 1480 nm

透過型電子顕微鏡写真を図3に示す。量子井戸活性層は、圧縮歪量1%の GaInAsP 歪量子井戸層 (厚さ4 nm) と InP 基板と格子整合した GaInAsP 障壁層 (厚さ10 nm) からなり、量子井戸層の数は5つである。量子井戸活性層上下には組成が階段上に変化する GaInAsP 四元層が積層されている。MOCVD 法の成長条件を最適化することで、原子オーダーで平坦な、急峻なヘテロ界面が実現されている。

階段状に組成変化する GaInAsP からなる GRIN-SCH 構造を歪量子井戸活性層と組み合わせることにより特性改善が達成されている。理論的にも、GRIN-SCH 構造の有効性が示されている<sup>9)</sup>。実際の素子は、横方向の光閉じ込め及び低消費電力動作を目的に、活性層幅を2  $\mu\text{m}$ 程度とした埋め込み (Buried Heterostructure; BH) 構造が採用されている。

図4には、最適化された GRIN-SCH 光閉じ込め層を用いた埋め込みレーザの注入電流対光出力特性を示す。共振器長は熱放散を考慮し1200  $\mu\text{m}$ と通常の光通信用のレーザの300-400  $\mu\text{m}$ に比べると長共振器構造となっている。また、放熱性を高めるため、素子は、熱源となる活性層をヒートシンク側にしボンディングしてある。光取り出し面から高い光出力を得るため共振器の後面には誘電体膜からなる高反射率膜、前面には、低反射

率膜をコーティングしてある。閾値は、1200  $\mu\text{m}$ と長共振器にもかかわらず、25 連続動作で25 mAと低閾値が得られた。最大光出力は360 mWが得られた。これは、波長1480 nmで報告されている最高値である<sup>9)</sup>。また、50 においても300 mW以上の光出力が得られた。この例の場合、1200  $\mu\text{m}$ の長共振器を用いているため、熱による光出力の飽和は抑えられ高出力動作が得られているものの、実使用レベルである100-200 mWを得るための動作電流（消費電力）が高い。そこで一般的には、800  $\mu\text{m}$ 程度の共振器長が用いられている。共振器長を短くしたことで、最大光出力は減少するものの、量子効率が大きくなるため、100-200 mWを得るための駆動電流（消費電力）を低減することができる。

100 mW出力時の出射ビーム特性を図5に示す。活性層に平行方向及び垂直方向の出射ビームの半値全角はそれぞれ20°、25°でほぼ円形に近い値が得られている。単一モードファイバと高結合が期待できる。

光ファイバアンプは基幹回線や海底線で用いられるため、通常の光通信用レーザ同様の高い信頼性が高出力動作条件下で要求される。図6には35°、60°での一定光出力モードの信頼性試験の結果を示す。光出力は、それぞれの動作温度での最高（飽和）光出力の80%であり、35°では180 mW程度、60°で120 mW程度の光出力に対応する。20000時間以上経過後も駆

動電流の顕著な上昇も観察されず安定に動作していることがわかる。いくつかの異なる条件で信頼性試験を行い、活性化エネルギーとして0.62 eVを得た。これより、35°、150 mW程度の光出力（モジュール出力で100 mW相当）でのMTTFとして100万時間が推定され、高い光出力でも高い信頼性が達成されている。

### 6. 波長980 nm

980 nmレーザを用いた光ファイバアンプの雑音特性は、波長1480 nmの場合に比べ小さくできることから期待されている励起光源である。この波長では、上述したようにInGaAs歪量子井戸を活性層に用いる。この波長帯のレーザでは、活性層をサンドイッチするクラッド層の材料にGaAs基板に格子整合するAlGaAs<sup>10)~14)</sup>やInGaP<sup>15)~16)</sup>を用いるレーザが報告されている。後者は、レーザ用の材料としては比較的新しい材料であるが、AlGaAsに比べ、酸化されにくい、あるいは表面再結合速度が遅いため、この波長帯で大きな問題となっているCODの発生を解決できる可能性があるとして期待されている。

1480 nm同様、ファイバとの結合効率を向上させるため、横モード制御型のレーザ構造が一般的である。しかしながら、レーザ構造は1480 nm帯のBH構造と異なり、活性層を加工しないリッジ導波路型レーザが一般的である。この理由としては

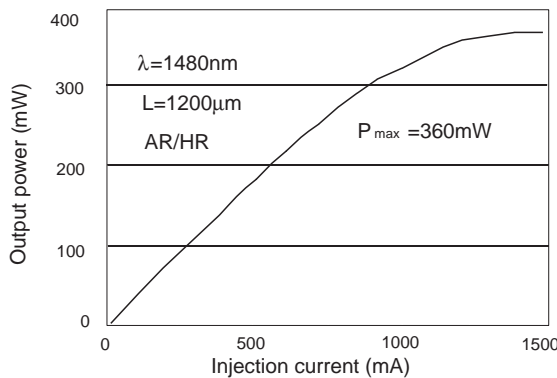


図4 1480 nm レーザの電流対光出力特性  
I-L characteristics of 1480 nm laser

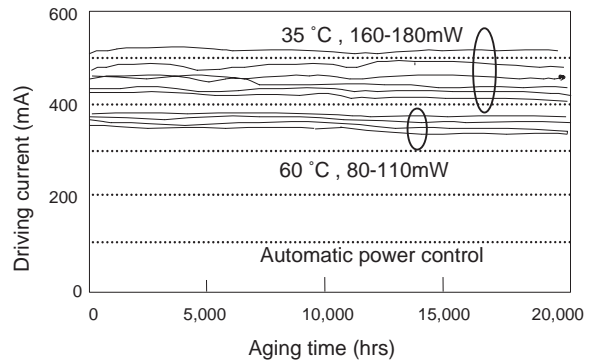


図6 1480 nm レーザの信頼性試験結果  
Reliability test results of 1480 nm laser

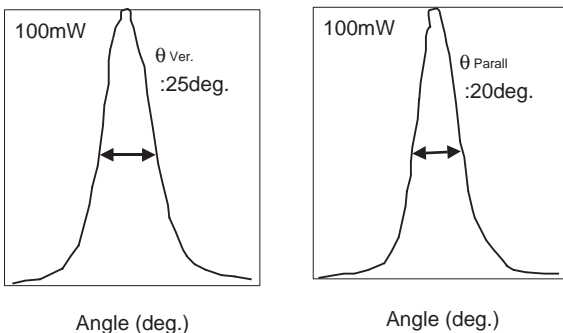


図5 1480 nm レーザの発光ビーム形状  
Output beam pattern of 1480 nm laser

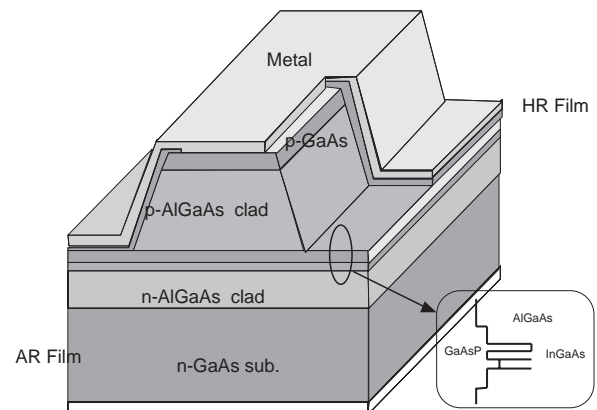


図7 980 nm レーザの構造模式図  
Structure of ridge-waveguide type 980 nm laser

(1) Alを含む材料系であるため、再成長に起因した劣化があること、(2) 端面破壊(COD)防止のため活性層の光密度を低減する必要があり比較的幅の広い活性層で基本横モードが得られることによる。

図7にはAlGaAsをクラッドとするリッジ導波路型レーザ構造を示す。結晶成長はMOCVD法でなされている。このほか、横モードが制御されたレーザ構造として、リッジ埋め込み型レーザや低屈折率電流閉じ込め層を用いた自己整合型レーザも報告されている。幅4  $\mu\text{m}$ 、共振器長800  $\mu\text{m}$ のリッジ導波路型レーザの電流対光出力特性を示す。最大光出力300 mW以上、スロープ効率1 W/A程度と実用上十分な特性が得られるに至っている。また、光出力250 mW時の遠視野像を図8に示す。遠視野像の観察から350 mA程度まで、安定した基本横モード動作が得られていることがわかる。リッジ導波路型を用いているため、出射ビーム形状は波長1480 nmのレーザに比べると楕円形状である。しかしながら、光ファイバへの結合系を工夫することにより80%程度の高い結合効率を得ることが可能である。

現在では100-200 mWといった高出力動作時での信頼性の実証が大きな課題となっている。信頼性確保のためには、主にCODの問題を克服することであり、端面保護がキーとされている。CODには端面での非発光プロセスが大きく関与してい

るとされている。これに対して、レーザ共振器を真空中で形成(へき開)し、in-situで端面パッシベーションを行うという方法もある。また、端面での温度上昇を抑えるため、熱伝導率の高い材料を端面パッシベーションの材料として選び、また、発振光に対して吸収の少ない材料や、成膜方法も検討されている。

図9には、60  $^{\circ}\text{C}$ 、250 mW一定出力での長期信頼性試験結果を示す。5000時間程度まで駆動電流の顕著な上昇は観察されず安定に動作している。

## 7. レーザモジュールおよびアンブ

980 nm、1480 nmレーザモジュールの注入電流対光出力特性を図10、11に示す。980 nmでは200 mW以上<sup>17)</sup>、1480 nmでは300 mW以上の光出力が得られている<sup>18)</sup>。

980 nmでは、パッケージに起因した劣化姿態も報告されている。すなわち、モジュール作製時に使用される有機物がレーザの端面に付着し、CODに至らしめるものである。これは、Package Induced Failure (PIF)と呼ばれている。これに対する対策は、現在では、モジュール中に酸素を導入し、有機物を燃焼させる方法が採られている。

また、波長安定化を目的にファイバグレーティングを内蔵し

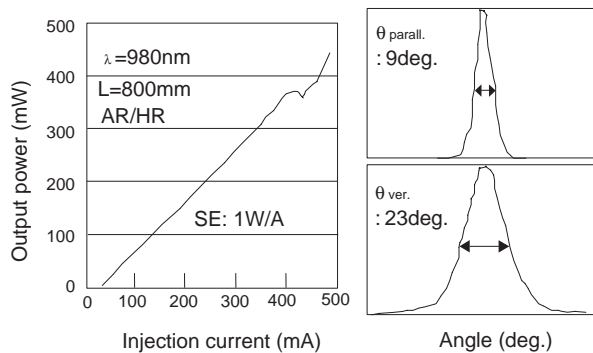


図8 980 nm レーザの電流対光出力特性  
I-L characteristics of 980 nm laser

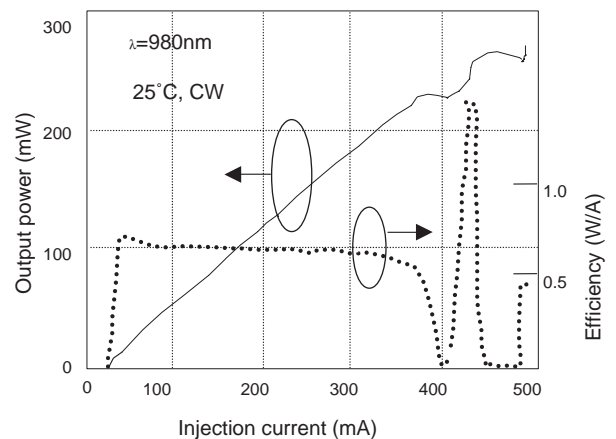


図10 980 nm レーザモジュールの電流対光出力特性  
I-L characteristics of 980 nm laser module

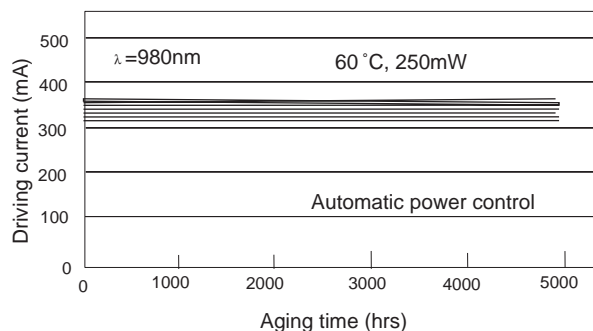


図9 980 nm レーザの信頼性試験結果  
Reliability test results of 980 nm laser

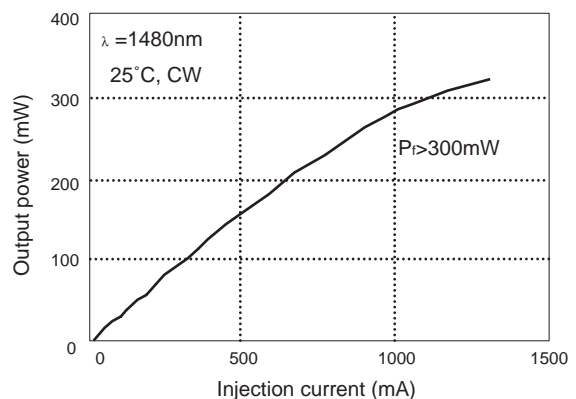


図11 1480 nm レーザモジュールの電流対光出力特性  
I-L characteristics of 1480 nm laser module

## 参考文献

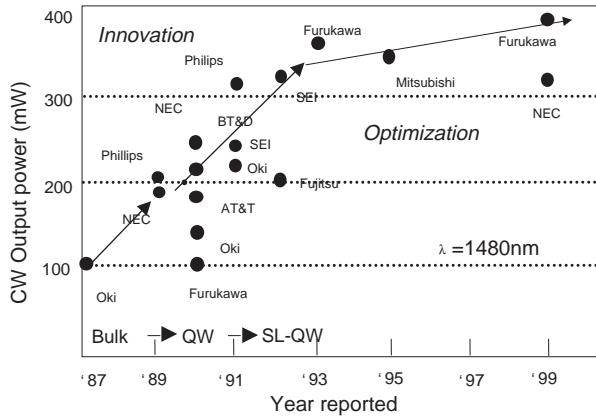


図12 1480 nm レーザの光出力の変遷  
Improvements in light output of 1480 nm laser

た波長安定化1480 nm レーザモジュールも作製<sup>19)</sup>されている。ファイバグレーティングを用いることで、温度・注入電流に対しても安定した波長特性が実現されている。

複数個の1480 nm レーザモジュールを合成（波長・偏波）し使用することにより1 Wを越える光出力を達成している。また、高出力レーザはEDFの励起用光源としてのみならず、ラマン増幅用の励起用光源としても有用である。

### 8. 今後の展開

高出力化の変遷を波長1480 nmを例に図12に示す。高出力化に関するイノベーションは図に示すように、量子井戸活性層の導入、歪量子井戸活性層の導入である。最高光出力は100 mWから390 mWへと大幅な改善が達成された。今後更に高出力を実現するためには、活性層構造あるいは材料系におけるイノベーションが必要である。例えば、現在は一次元の量子化が用いているが量子井戸、量子細線、量子箱による特性改善も期待される。波長1480 nmでの光出力飽和特性は活性層の温度上昇による熱飽和が支配的である。すなわち、レーザの温度特性を向上させることが高出力動作にもつながる。このため、従来の材料より温度特性の優れるAlGaInAs系材料を活性層に用いることにより高出力動作の可能性が有る。

紙面の都合上詳細な記述はできないが、Er/Ybダブルクラッドファイバ用にワットクラスの波長980 nmレーザも検討されている。レーザ構造は、幅100 μm程度のブロードストライプ構造である。ここでの大きなポイントは、放熱技術である。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり日頃より御支援いただく鈴木横浜研究所長、神谷WAチーム長に感謝する。また、ファイテル製品事業部を含めた当社ポンプレーザチーム諸氏に感謝する。

- 1) S.B. Poole et al.: Electron. Lett., 21 (1985) 737.
- 2) 西村: 光ソリトン通信研究会第1回研究会, 1995, p. 57.
- 3) E. Yablonovitch et al.: J. Lightwave Technol., LT-4 (1986) 504.
- 4) A.R. Adams: Electron. Lett., 22 (1986) 249.
- 5) T.J. Andersson et al.: Appl. Phys. Lett., 51 (1987) 752.
- 6) 水戸 他: 応用物理, 64 (1995) 2.
- 7) A. Kasukawa et al.: IEEE Photon. Technol. Lett., 1 (1994) 4.
- 8) A. Kasukawa et al.: OPTOELECTRONICS-Device and Technologies, 9 (1994) 219.
- 9) H. Hirayama et al.: IEEE J. Quantum Electron., 28 (1992) 68.
- 10) D. Fekete et al.: Appl. Phys. Lett., 49 (1986) 1659.
- 11) M. Okayasu et al.: IEEE Photon. Technol. Lett., 2 (1990) 689.
- 12) S. Ishikawa et al.: IEEE J. Quantum Electron., 29 (1993) 1936.
- 13) H. Meier: Technical Digest of 20th European Conference Optical Communications, Firenze, Sep., 1994, p.947.
- 14) J.S. Major et al.: Electron. Lett., 27 (1991) 540.
- 15) M. Sagawa et al.: Technical Digest of 14th IEEE Semiconductor Laser Conf., Maui, Sep., 1994, p. 255.
- 16) M. Ohkubo et al.: IEEE J. Quantum Electron., 30 (1994) 1936.
- 17) Y. Irie et al.: OFC/IOOC'99, Paper WM15 (1999)
- 18) T. Kimura et al.: OAA'99, Paper ThD12 (1999)
- 19) S. Koyanagi et al.: OAA'98, p.35 (1998)