

## 高出力 AlGaInAs/InP 広帯域波長可変レーザの開発

## High Power AlGaInAs/InP Widely Wavelength Tunable Laser

岩井 則広<sup>\*1</sup>  
Norihiro Iwai若葉 昌布<sup>\*1</sup>  
Masaki Wakaba清田 和明<sup>\*3</sup>  
Kazuaki Kiyota黒部 立郎<sup>\*1</sup>  
Tatsuro Kurobe小林 剛<sup>\*4</sup>  
Go Kobayashi木本 竜也<sup>\*3</sup>  
Tatsuya Kimoto鍛冶 栄作<sup>\*2</sup>  
Eisaku Kaji小早川 将子<sup>\*1</sup>  
Masako Kobayakawa向原 智一<sup>\*3</sup>  
Toshikazu Mukaihara横内 則之<sup>\*1</sup>  
Noriyuki Yokouchi粕川 秋彦<sup>\*1</sup>  
Akihiko Kasukawa

## 〈概要〉

近年、光通信に用いられる光部品には低消費電力化が求められている。波長の精密制御のために温調部品を用いる信号光源モジュールにおいては、レーザチップの使用温度範囲を従来に比べて上昇させるセミクルド動作は、低消費電力のために有用である。この場合レーザチップは高温で優れた特性を示すことが要求されるため、高温動作に有利な AlGaInAs 系材料を信号光源の活性層に用いることは低消費電力化において有望な技術である。一方、光集積素子 (PIC : Photonic Integrated Circuit) は、次世代の光通信システムにおいて、小型かつ低消費電力を実現するためのキーテクノロジーである。今回我々は、高機能 PIC の実現に向け、1550 nm 帯 AlGaInAs 埋込ヘテロ型 (BH: Buried Hetero) レーザの開発を行い、更に AlGaInAs/InP 系では初めてとなる、12 チャネル DFB (Distributed feedback) レーザアレイと半導体光増幅器 (SOA) を集積した 1550 nm 帯波長可変レーザを作製したので報告する。

## 1. はじめに

近年、光通信に用いられる光部品には低消費電力化が求められている。波長の精密制御のために温調部品を用いる信号光源モジュールにおいては、レーザチップの使用温度範囲を従来に比べて上昇させるセミクルド動作は、低消費電力のために有用である。この場合レーザチップは高温で優れた特性を示すことが要求されるため、高温動作に有利な AlGaInAs 系材料を信号光源の活性層に用いることは低消費電力化において有望な技術となる。一方、PIC は、次世代の光通信システムにおいて、小型かつ低消費電力を実現するためのキーテクノロジーである。これまでに、単体素子においては低消費電力かつ高速変調光源として、AlGaInAs/InP 系の BH レーザが報告されている<sup>1)</sup>。

しかし、集積素子に関しては GaInAsP/InP 系材料の報告は多くあるものの、AlGaInAs/InP 系材料の BH レーザを用いた光集積素子の報告例はない。これは、信頼性に影響を及ぼすと考えられる再成長埋め込み界面のコントロールが困難なためである。

今回我々は、高機能光集積素子の実現に向け、単体の 1550 nm 帯 AlGaInAs 量子井戸 BH レーザの開発を行い、AlGaInAs/InP 系材料で初めて 12 チャネル DFB レーザアレイと半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) を集積した 1550 nm 帯広帯域波長可変レーザを作製したので報告する。

## 2. 1550 nm 帯 AlGaInAs/InP BH レーザ

## 2.1 素子構造及び静特性

AlGaInAs 系材料は GaInAsP 系材料に比較して、伝導帯のバンドオフセットが大きいため、電子のオーバーフローが抑制できることから、高温領域での特性向上が期待される。そこで、光集積素子を作製する前に、まず単体の 1550 nm 帯 AlGaInAs/InP 量子井戸 BH レーザの作製を行い、その特性を評価し効果の確認を行った。今回作製した素子の構造は、活性層が AlGaInAs 圧縮歪み量子井戸層で構成され、メサストライプ (活性層含む) を p 型と n 型の InP 層で埋め込んだ、通常の BH 構造である。結晶成長は全て MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) で行った。また、評価に用いた素子は、共振器長が 300  $\mu\text{m}$  で、両端面は劈開のファブリペロー (FP) レーザである。

今回作製した素子の電流対光出力 (L-I) 特性を図 1 に示す。動作温度は、それぞれ 25、45、65、85 $^{\circ}\text{C}$  である。この結果、しきい値電流は、25 $^{\circ}\text{C}$  で 7.9 mA、85 $^{\circ}\text{C}$  で 20 mA が得られ、25 $^{\circ}\text{C}$  でのしきい値電流密度は、約 1.5  $\text{kA}/\text{cm}^2$  となり、同一設計 (光閉

\*1 研究開発本部 コア技術融合研究所 レーザ・オプティクスチーム

\*2 研究開発本部 先端技術研究所 解析技術センター

\*3 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所 フォトニックデバイス開発部

\*4 ファイナル製品事業部門 半導体デバイス部

じ込め係数など)のGaInAsP/InP系BHレーザと同等の値が得られた。これはすなわち、良好な再成長界面が得られているものと考えられる。

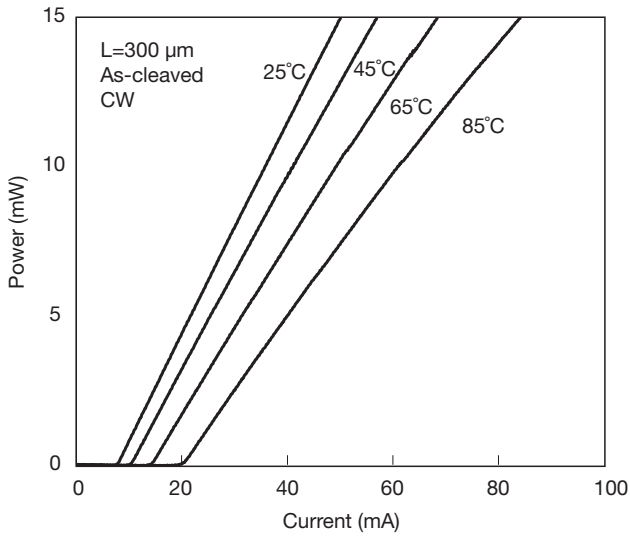


図1 1550 nm帯AlGaInAs/InP BHレーザのL-I特性  
L-I characteristics of the 1550 nm AlGaInAs/InP BH laser.

また、しきい値電流及びスロープ効率の温度依存性を図2、図3にそれぞれ示す。比較のために量子井戸数や光閉じ込め係数などをほぼ同じ設計で作製した、GaInAsP/InP系BHレーザの結果も合わせて示す。この結果、特性温度( $T_0$ )は、AlGaInAs系BHレーザで63 K、GaInAsP系BHレーザで50 Kとなり、AlGaInAs系材料の方が良好な結果が得られた。また、スロープ効率の悪化も25°Cから85°Cの温度範囲で、AlGaInAs系BHレーザで-17%、GaInAsP系BHレーザで-31%となり、AlGaInAs系材料の方が良好な結果であった。これらの結果から、AlGaInAs系材料を用いることによる温度特性の改善を確認することができた。

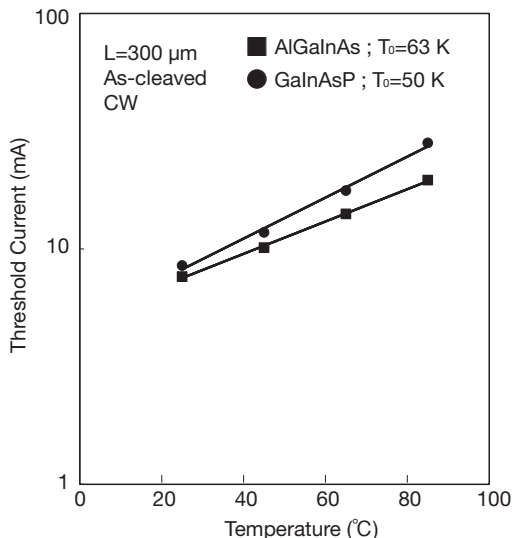


図2 しきい値電流の温度依存性  
Temperature dependence of the threshold current.

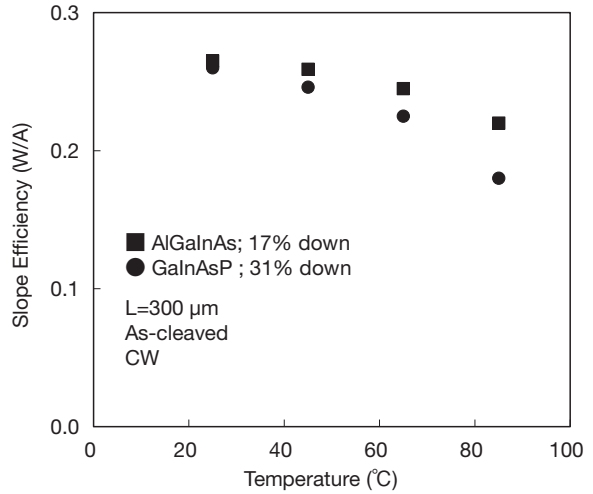


図3 スロープ効率の温度依存性  
Temperature dependence of the slope efficiency.

## 2.2 信頼性試験結果

一般的に、Alを含む材料は、空気中の酸素や水分などにより容易に酸化されやすく、再成長界面のコントロールが難しいとされている。今回のようなBHレーザの場合、AlGaInAs系材料からなる活性層をエッチングによりメサ形状に加工しているため、AlGaInAs活性層の側面が大気中に暴露されることで、その後の埋め込み成長時に発生する再成長界面の不具合による信頼性への影響が懸念される。

今回我々は、メサ埋め込み成長前のメサトリートメントを最適化することで、再成長界面のコントロールを図った。図4に、今回作製したAlGaInAs/InP系BHレーザのAPC (Auto Power Control mode) 試験の結果を示す。試験に用いた素子は、共振器長が300  $\mu\text{m}$ で、両端面は劈開のフエブリペロー (FP) レーザである。試験の条件は、環境温度85°Cで、光出力20 mWである。

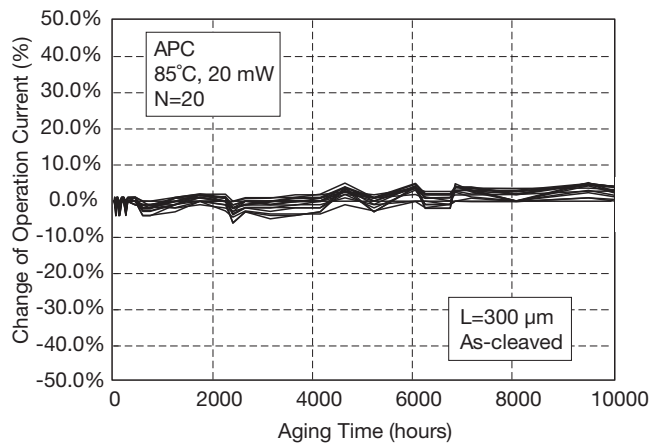


図4 信頼性試験結果  
Result of the reliability test.

この結果、10,000時間経過後も駆動電流の顕著な変化はみられていない。駆動電流の上昇率はおよそ5%以下で、GaInAsP/InP系BHレーザと同等の結果が得られている。また図5に、

2,500時間経過後のサンプルを平面TEM (Transmission Electron Microscope) にて観察を行った結果を示す。今回観察を行った、メサストライプ方向約100 μmの範囲において、活性層内部やメサ側面などに転位は観察されなかった。すなわち、当初懸念された再成長界面の信頼性への影響を抑えることができたものと考えている。

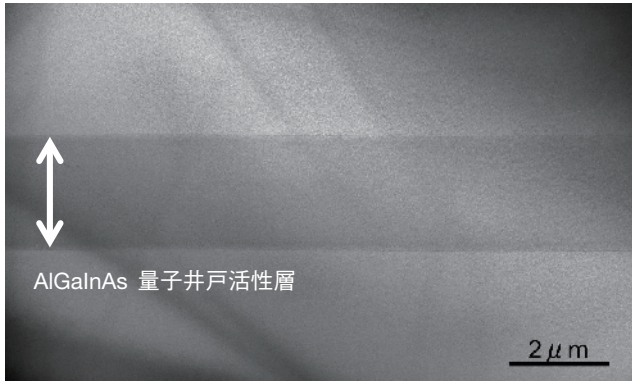


図5 平面TEM写真  
Plan view TEM image.

### 3. 1550 nm 帯 AlGaInAs/InP BH 波長可変レーザ

#### 3.1 低消費電力化に向けた AlGaInAs 系材料を用いるメリット

当社では、GaInAsP/InP系材料を用いた1550 nm帯の広帯域波長可変レーザモジュールを商品化している。キーパーツである波長可変光源は、12チャンネルのDFBレーザアレイ、曲げ導波路、多モード光干渉 (MMI: Multi-Mode Interference) カプラ、及び半導体光増幅器 (SOA) で構成され、熱による波長可変で1チャンネルあたり約4 nm、チャンネルを切り替えることでトータル40 nm以上の波長可変範囲を実現している<sup>2)</sup>。この場合、波長可変に必要な温度の変化範囲は約40℃となる。

このように熱により波長を可変させる構成においては、温調機 (TEC: Thermoelectric Cooler) により、DFBレーザの温度をコントロールしており、レーザモジュールとしての消費電力は、チップの消費電力に加え、TECの消費電力が加味されることになる。図6に、レーザモジュールのトータルの消費電力と環境温度及びレーザチップ温度の関係イメージを示す。外部環境温度が低温の場合には、TECによりチップ温度を上昇させるため、チップの設定動作温度の上昇とともにトータルの消費電力は増加する。一方、外部環境温度が高温の場合には、TECによりチップ温度を低下させるためチップの設定動作温

度の低下とともにトータルの消費電力が増加する。このように外部環境温度によりモジュールトータルの消費電力はトレードオフの関係となるが、実際はチップの自己発熱による温度上昇の影響で、外部環境温度が高くチップの設定動作温度が低い方がモジュールトータルの消費電力は大きくなる。当社の現行製品の例では、チップの設定動作温度は15～55℃の範囲で制御している。これは、GaInAsP系材料ではチップの動作温度の上昇にともないレーザ特性の劣化が大きいためである。すなわち、ここで高温特性に優れたAlGaInAs系材料を用い、チップの設定動作範囲を30～70℃と高温側に設計することで、モジュールトータルの消費電力を低減することが可能である。

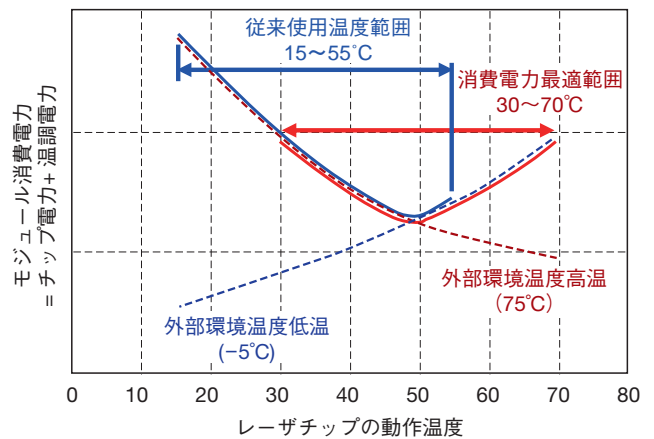


図6 レーザモジュールの消費電力のイメージ  
Power consumption of the laser module.

#### 3.2 1550 nm 帯 AlGaInAs/InP BH 波長可変レーザの構造及び特性

AlGaInAs/InP系BHレーザの光集積素子への応用として、波長可変レーザの作製を行った。今回作製した波長可変レーザ素子の写真を図7に示す。素子構造は、AlGaInAs-MQW (Multiple Quantum Well) BHからなる12チャンネルDFBレーザアレイ、曲り導波路、多モード光干渉 (MMI) カプラ、およびAlGaInAs-MQW BHからなるSOAで構成されている<sup>3),4)</sup>。

素子サイズは500 μm × 3600 μmであり、DFBレーザの長さは1200 μm、SOAの長さは1400 μmである。端面は曲げ導波路と無反射コーティングを施して、端面からの反射を抑制している。また、DFBレーザそれぞれのグレーティングピッチを調整し、温度制御により36 nm以上の広波長域をカバーできるように設計した。

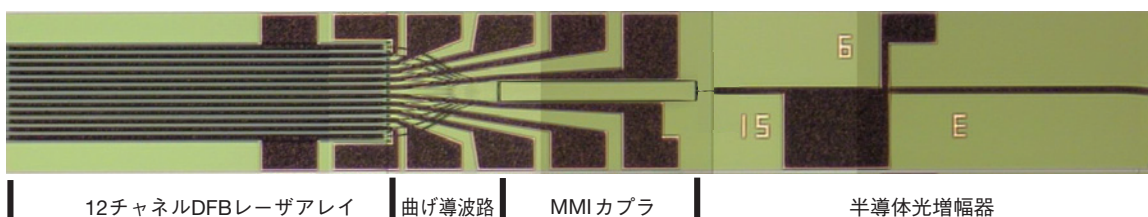


図7 1550 nm 帯 AlGaInAs/InP BH 波長可変レーザ素子の写真  
Photograph of a 1550 nm AlGaInAs/InP wavelength tunable laser.

作製した波長可変レーザは、DFBレーザを定電流で駆動し、SOA電流で光出力を制御している。波長可変のための温度制御は低消費電力化を想定して30～70℃とした。波長可変レーザの電流対光出力特性を図8に示す。ここでは、各温度に対して12チャンネルのDFBレーザの代表的な3素子(短波長、中波長および長波長)の特性を示している。集積素子中の全てのDFBレーザにおいて、30℃で90 mW以上、70℃で50 mW以上の光出力が得られた<sup>5),6)</sup>。

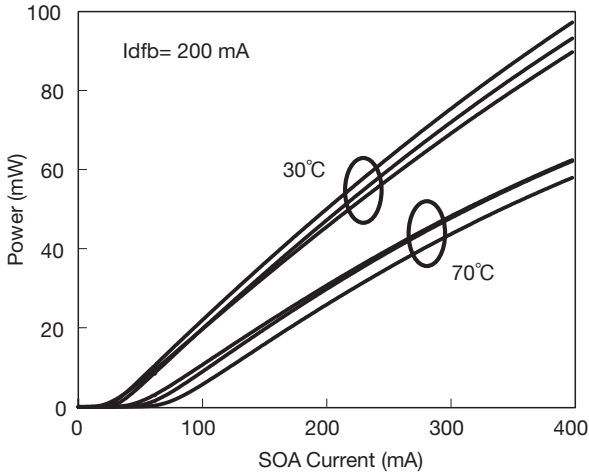


図8 波長可変レーザの電流対光出力(L-I)特性  
L-I characteristics of the wavelength tunable laser.

また、図9に、SOA動作電流の温度依存性の結果を示す。DFB動作電流は200 mA一定で、光出力を40 mW一定となるようにSOA動作電流を制御している。比較のためにGaInAsP系波長可変レーザの結果も合わせて示す。この結果、SOA動作電流は、20～30℃の低温域では両者に差はみられないものの、動作温度30～70℃の範囲においてAlGaInAs系材料の方が低減できていることが確認できた。特に動作温度70℃においては14%ものSOA動作電流低減が確認できた。

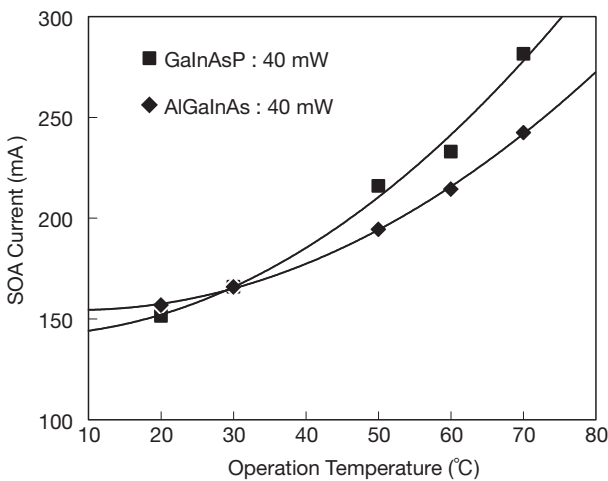


図9 SOA動作電流の温度依存性  
Temperature dependence of the SOA operation current.

図10に、DFB電流200 mA、動作温度70℃における出力飽和特性を示す。比較のために、GaInAsP系波長可変レーザの結果も合わせて示す。この結果、GaInAsP系波長可変レーザでは、飽和電流及び飽和出力がそれぞれ、700 mA、75 mWに対して、AlGaInAs系波長可変レーザでは、750 mAにおいて90 mWと優れた値が得られた<sup>5)</sup>。これは、DFBアレイ集積型の波長可変レーザとしては、これまでの報告で最も高い光出力であるとともに、集積型素子においてもAlGaInAs系材料の高温度・高電流注入における優れた特性を実証することができた。

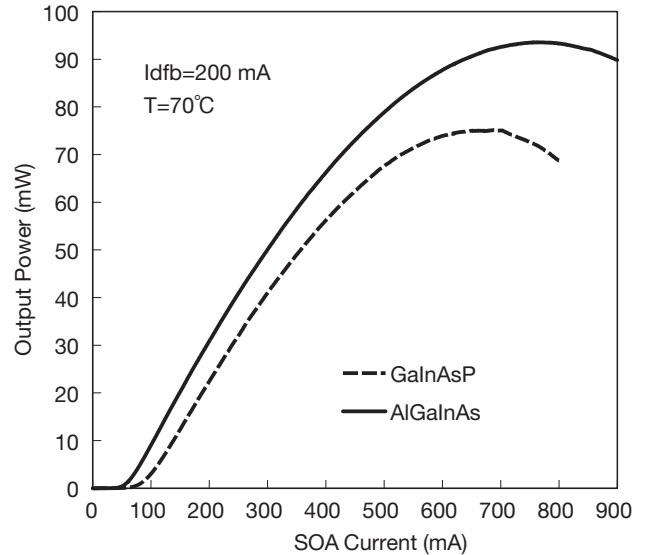


図10 70℃における電流対光出力特性の比較  
Comparison of the L-I characteristics at 70°C.

次に、信号光源として重要な項目となる波長特性について説明する。波長可変レーザの発振スペクトルを図11に示す。サイドモード抑圧比(SMSR: Side mode suppression ratio)は、およそ40 nmの広い波長域で45 dB以上と高い値が得られた。また、代表的な3素子のスペクトル線幅のDFB電流依存性を図12に示す。線幅は、SOA電流を150 mA一定、動作温度は30℃で、自己遅延ヘテロダイン法にて測定を行った。この結果、DFB電流200 mA以上にて全ての波長帯において、300 kHz以下のスペクトル線幅が得られた。これらの値はGaInAsP系波長可変レーザの特性と比較して同等の結果が得られており、AlGaInAs系材料を用いることによる波長特性への悪影響がないことを確認できた。

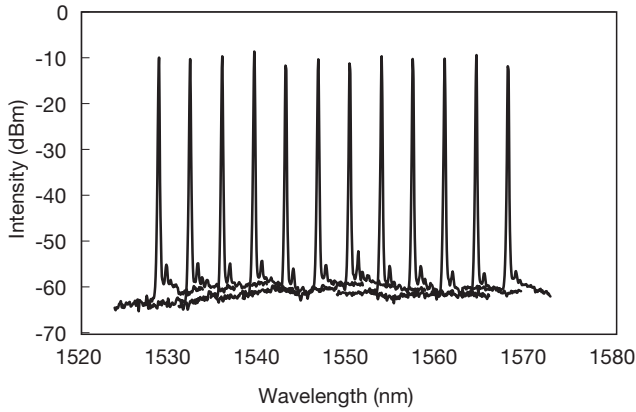


図11 波長可変レーザの発振スペクトル  
Lasing spectrum of the wavelength tunable laser.

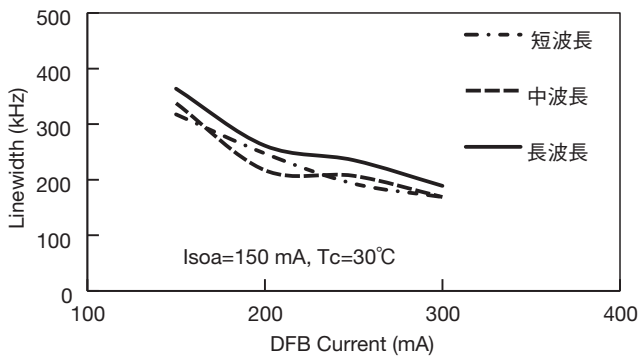


図12 スペクトル線幅のDFB電流依存性  
Characteristics of the spectrum line width.

### 3.3 1550 nm帯AlGaInAs/InP BH波長可変レーザモジュールの特性

より実使用に近い条件での光出力と消費電力低減の効果を確認するために、バタフライ型の簡易モジュールを作製し、今回開発したAlGaInAs/InP BH波長可変レーザの評価を行った。

図13に、今回作製した波長可変レーザモジュールの代表的な3波長（短波長、中波長および長波長）の光出力特性を示す。DFBの動作電流は200 mA一定とし、LD温度を30、50、70°Cでファイバ端光出力の測定を行った。この結果、ファイバ結合出力は全ての波長のSOA電流1000 mAにおいて、30°Cで130 mW、50°Cで100 mW、そして70°Cにおいても80 mW以上の出力が得られた。前項の素子評価での結果と比較して、飽和電流が高いのは、モジュールに組み込むことで、素子の自己発熱の放熱性が改善されているためである。

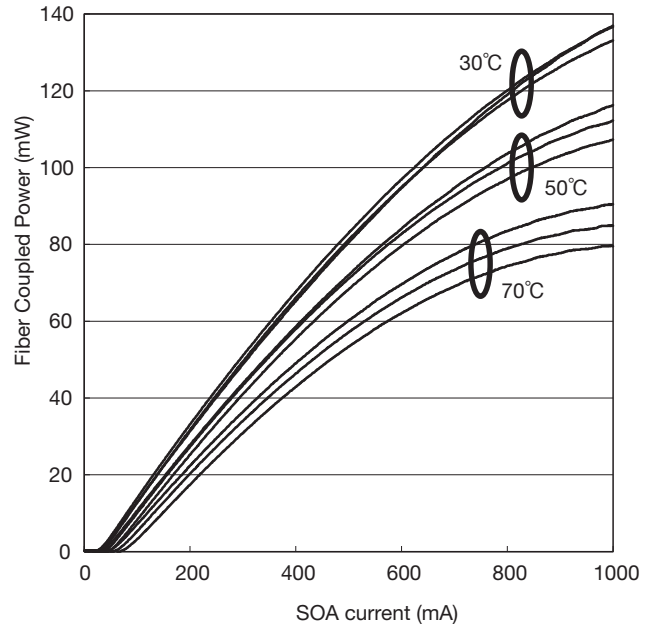


図13 バタフライ型波長可変レーザモジュールの光出力特性  
L-I characteristics of the tunable laser module.

また、図14にTEC消費電力とSOA動作電流のLD動作温度依存性の結果を示す。モジュールの動作条件は、光出力が40 mW、ケース温度が80°Cである。この結果、LD動作温度の上昇とともにモジュールのTEC消費電力が低減していくことがわかる。これはLD動作温度の上昇にともない、一定出力を得るためにSOAの動作電流が上昇し、その自己発熱によりTECの出力が抑制されているためである。また、TEC消費電力はLD動作温度15°Cで3 W、30°C以上では1.7 W以下となり、LDの動作温度を高温側にシフトさせることで、TECの消費電力を約半分と大幅に削減できることがわかった。これらの結果から、AlGaInAs/InP系材料は光集積素子の低消費電力化に有望な技術であると言える。

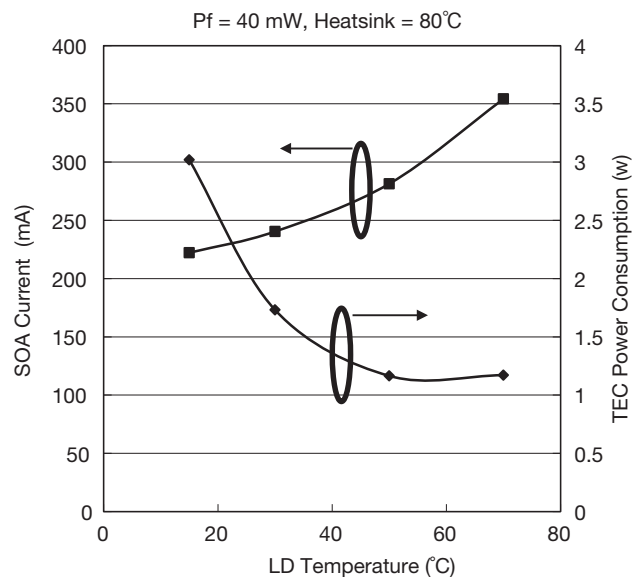


図14 TEC消費電力及びSOA動作電流の動作温度依存性  
Operation temperature dependent of TEC power consumption and SOA current.

#### 4. おわりに

高機能光集積素子の実現のため、1550 nm帯AlGaInAs/InP系材料を用いたBHレーザの開発を行った。まず単体FPレーザにおいて、初期特性及び信頼性の確認を行い、その結果、GaInAsP/InP系材料に比べて温度特性が良好であること、また、信頼性においてはGaInAsP/InP系材料と同等であることを確認した。次に、これらの技術を用いた光集積素子への応用として、AlGaInAs/InP系材料で初めて12チャンネルDFBレーザアレイとSOAを集積した1550 nm帯波長可変レーザを作製した。その結果、12チャンネル全てにおいて、30℃で90 mW以上、70℃で50 mW以上の光出力を得ることができた。更に、光出力飽和特性では、750 mAにおいて90 mWが得られDFBアレイ集積型の波長可変レーザとしては、これまでの報告で最も高い光出力を得ることができた。更に、レーザモジュールを作製し、動作温度を15℃から30℃以上に設定することで、TEC消費電力約50%程度削減できることが確認できた。

以上の結果から、AlGaInAs/InP系材料を用いたBH構造は、GaInAsP系材料を用いたBH構造に比べ、高温度及び高電流注入時の光出力特性に優れていること、また、光集積素子の一例として作製した波長可変レーザ及び波長可変レーザモジュールにおいて、高温度、高出力動作及び消費電力が大幅に削減できることを実証した。すなわち、AlGaInAs/InP系材料は、高機能化光集積素子の実現に有望な技術であることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) T. Yamamoto, K. Takada, M. Matsuda, S. Okumura, S. Akiyama, and M. Ekawa, "1.55-um-Wavelength AlGaInAs Multiple-Quantum-Well Semi-Insulating Buried-Heterostructure Lasers" Conf. Dig., ISLC 2006, pp. 15-16.
- 2) T. Mukaihara, T. Kurobe, T. Kimoto, and A. Kasukawa, Proc., ECOC 2003, We.4.P.81, pp. 718-719, Sept. 2003.
- 3) N. Iwai, M. Wakaba, M. Kobayakawa, K. Kiyota, T. Kurobe, G. Kobayashi, T. Kimoto, S. Tamura, T. Mukaihara, N. Yokouchi, H. Ishii, and A. Kasukawa, "1550 nm AlGaInAs/InP Widely Tunable BH Laser based on Arrayed DFB" Conf. Dig., ISLC 2012, TuA2.
- 4) 若葉昌布, 岩井則広, 小早川将子, 清田和明, 黒部立郎, 小林剛, 木本竜也, 田村修一, 向原智一, 横内則之, 石井宏辰, 粕川秋彦, "1.55um AlGaInAs埋込構造を有するDFBアレイ集積型波長可変光源" 2012年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-4-17.
- 5) M. Wakaba, N. Iwai, K. Kiyota, H. Hasegawa, T. Kurobe, G. Kobayashi, E. Kaji, M. Kobayakawa, T. Kimoto, N. Yokouchi, and A. Kasukawa, "High Power Operation at High Temperature of AlGaInAs/InP Widely Tunable BH Laser" Conf. Dig., OECC 2013, MK2-4.
- 6) 清田和明, 若葉昌布, 岩井則広, 黒部立郎, 小林剛, 鍛冶栄作, 小早川将子, 木本 竜也, 横内則之, "AlGaInAs系BH構造を有するDFBアレイ集積型波長可変レーザ" 2013年電子情報通信学会 総合大会 C-4-1.