

信号光源用半導体レーザー

山口 昌 幸

インターネットの爆発的な普及に伴う通信量の増大を背景に、波長多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 伝送による光ファイバー通信システムの大容量化が進展している。現在、実用化されているシステムは、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯 (C 帯) を用いた、チャンネル当たり 2.5 Gb/s の 32~40 チャンネルのシステムである。さらなる大容量化のためには、より高密度な多重化技術や波長域の拡大が不可欠であり、チャンネル間隔を従来の 100 GHz から 50 GHz へと狭くする検討や、 $1.58 \mu\text{m}$ 帯 (L 帯) など新たな波長帯の実用化が進められている。また、チャンネル当たり 10 Gb/s への高速化も必須となっている。WDM システムの超大容量化の流れの中にあって、信号光源に要求されることは、 10 Gb/s の高速変調が可能であることはいうまでもなく、拡大しつつある波長域に対応して所望の波長の光源を低コストに提供できること、長期間にわたり波長安定動作が可能であることである。本稿では、主として WDM システムで広く使用されている電界吸収型 (EA: electro absorption) 変調器集積型レーザーについて、広波長域かつ低コスト化への取り組みの現状と、波長信頼性および波長安定化への取り組みについて紹介する。また、最後に次世代の信号光源として期待される波長選択光源の研究開発状況について紹介する。

1. 低コスト化を実現する異波長光源の一括作製技術

EA 変調器集積型レーザー¹⁻³⁾ は駆動電圧が低く、CW 光源+外部変調器という構成に比べてモジュール構成が格段に小型であることから、WDM システムで広く使われている。図 1 に EA 変調器集積型レーザーの構造図を示

す。レーザー領域と変調領域はそれぞれ多重量子井戸 (MQW: multiple quantum well) 構造からなる活性層と吸収層を有している。変調器の吸収層は、通常、発振波長に対し透明であるが、吸収層に電界を印加すると吸収端が長波側へシフトすることで光吸収が生じる (量子閉じ込めシュタルク効果)。この効果を利用して、変調器に電圧信号を印加しレーザー光に対し強度変調を行う。そのため吸収層の波長組成はレーザーの発振波長よりもわずかに短波側に設定される。通常、 2 V 振幅の電圧信号で 10 dB 以上の消光比の変調が可能である。変調帯域は、変調器部の構造を最適化することで、 10 Gb/s までの高速変調が可能である⁴⁾。

これら集積型レーザーを WDM に対応して低コストで作製する技術として、ウェハー上に波長の異なるデバイスを一括して作り込む技術を開発した (図 2)⁵⁻⁷⁾。従来 WDM の広い波長域をカバーするために多数のレーザー用ウェハーが必要であったが、この技術によりウェハー枚数を大幅に削減できるようになった。異波長光源の一括作製は、レーザーキャビティ内に形成される回折格子の周期を精密に制御する電子ビーム (EB: electron beam) 露光技術と、半導体の波長組成をウェハー面内で自由に制御できる選択結晶成長技術により実現された。たとえばレーザーの発振波長 λ は回折格子の周期 Λ と実効屈折率 n_{eff} の積の 2 倍 ($=2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$) で与えられる。発振波長を WDM のチャンネル間隔 100 GHz (約 0.8 nm) ステップで変化させようとする、 Λ を約 0.12 nm ステップで変化させる必要があり、数 nm 程度の最小描画ステップを有する従来の EB 露光装置では対応不可能であった。そこで、平均回折格子周期を 0.01 nm 以下の精度で制御することが可能な重み付け EB 露光法⁸⁾ やフィールドサイズ変調 EB 露光法⁹⁾ を新たに開発した。これによりウェハー内に任意の波

日本電気(株)光・超高周波デバイス研究所 (〒305-8501 つくば市御幸が丘 34)
E-mail: yamaguch@optd.cl.nec.co.jp

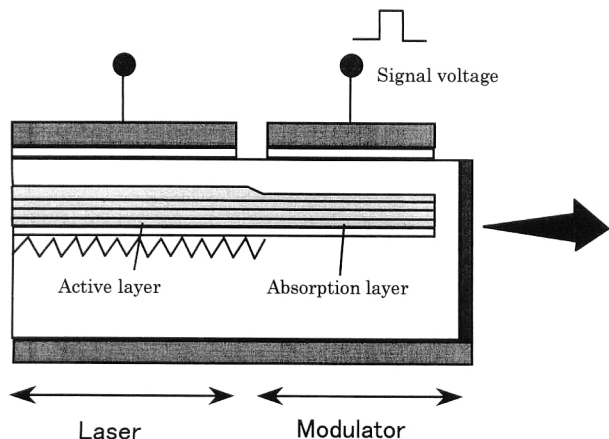


図1 変調器集積型レーザーの構造。

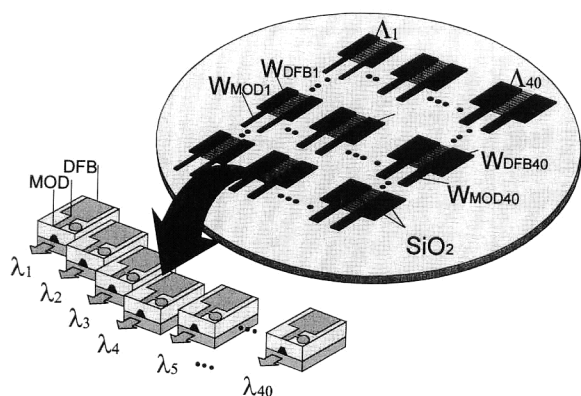


図2 異波長変調器集積光源の一括作製。

長のレーザー光源を自由に作製することが可能になった。さらに、ウェハ内一括作製したレーザー光源において均一な特性を実現するには、発振波長に対応して、レーザー一部および変調器部の半導体組成を適切に制御する必要がある。これを可能にしたのが選択MOVPE (metal organic vapor phase epitaxy) 結晶成長技術^{10,11)}である。InP ウェハ上に一対のストライプ状 SiO₂ マスクを形成し、このマスク間隙に MOVPE 法により結晶成長する。結晶成長された MQW 構造のバンドギャップ波長は、マスク幅に応じて 200 nm 以上の広い範囲で制御できる。

これらの技術を用いて、C 帯から L 帯にわたる 70 nm の波長域をカバーする 40 チャンルのデバイスを一括作製したときの発振スペクトルを図3に示す。ほぼ等間隔に並び、サブモード抑圧比が 35 dB 以上の安定な単一スペクトル動作が得られている。図4に代表的な光出力特性を示す。変調器電圧がゼロの状態でも光出力 15 mW 以上、-2 V 印加のとき 15 dB 以上の消光比が得られている。各デバイスは低チャープ動作にも優れ、2.5 Gb/s 動作においてノーマルファイバーで 600 km 以上、また 10 Gb/s 動作

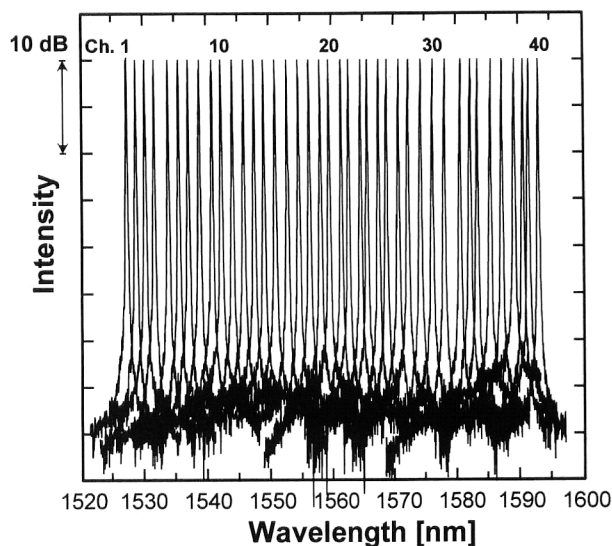


図3 40チャンネル異波長光源。

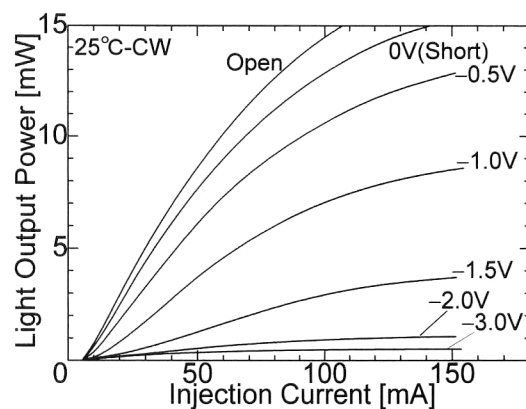


図4 変調器集積光源の光集積特性。

においては 50 km 以上のデータ伝送を可能とする能力を有している⁴⁾。

2. 波長信頼性と波長安定化

WDM 光源には 10 年～20 年といった長期の波長安定動作が要求される。チャンネル間隔 100 GHz の WDM システムで許容される波長変動はわずか 0.1 nm (約 12 GHz) である。半導体レーザーが劣化した場合の波長変動は、チップ温度および光出力が一定の条件で動作させた場合、動作電流の上昇に伴う活性層近傍の温度上昇が主原因であることが判明している。したがって、波長変動は動作電流の上昇率にほぼ比例する。強制加速劣化試験では、動作電流が約 24% 上昇した時点で波長変動が 0.1 nm に達した。すなわち、WDM 用光源の素子寿命は、動作電流が 24% 上昇した時点と定義される¹²⁾。この基準は、従来のレーザーの故障基準 (動作電流上昇率 50%) に比べ厳しいものではあるが、現在進めている変調器集積型レーザーの長期信

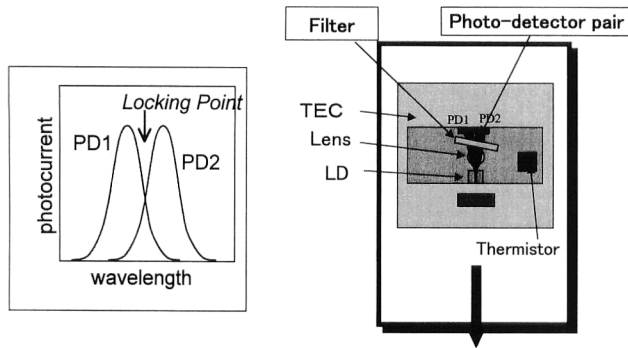


図5 波長ロッカー内蔵レーザーモジュール。

頼性試験からは、 $25^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ の動作条件で素子寿命は25年以上と推定されており、実用上まったく問題がない。

チャンネル間隔が50 GHzといったより高密度なWDMシステムでは、光源の温調や光出力制御だけでは波長安定性は十分とはいえない。そこで、光源の波長をアクティブ制御するための波長ロッカーを内蔵した光源モジュールの開発が行われている。図5は波長ロッカー内蔵モジュールの一例である¹³⁾。半導体レーザーの後方からの光出力を、多層膜フィルターあるいはエタロンフィルターを透過させた後に2つのフォトダイオード (PD: Photo diode) で受ける。2つのPDは透過スペクトルの異なる光を受けるため、モニターカレントの比を一定に保つようにレーザーを制御することで、波長の安定化を図ることができる。

3. 波長選択光源

波長選択光源¹⁴⁻¹⁶⁾は発振波長を自由に選択できる光源であり、研究開発が盛んになりつつある。WDMシステムのチャンネル故障に対するバックアップ用光源といった現在直面している問題への対応や、任意波長の光 add/drop、光クロスコネクタ用光源など将来のフォトニックネットワークを構成する重要なデバイスとして期待されている。

図6に現在開発中の波長選択光源の構造図を示す¹⁴⁾。波長の異なる8チャンネルの分布帰還型 (DFB: distributed feedback) レーザーアレイとマルチモード干渉 (MMI: multi mode interference) 型光合波器、半導体増幅器 (SOA: semiconductor optical amplifier)、光変調器 (MOD: modulator) を1チップに集積したものである。発振波長の設定は所望の波長に最も近いレーザーを発振させ、 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度の温度調整で波長を微調整する。図7に $\pm 10^{\circ}\text{C}$ の温度調整によりカバーできる各チャンネルの波長範囲の実験結果を示す。温度一定の状態では各チャンネルの波長は約2 nm間隔で設定されており、温度調整とチャネ

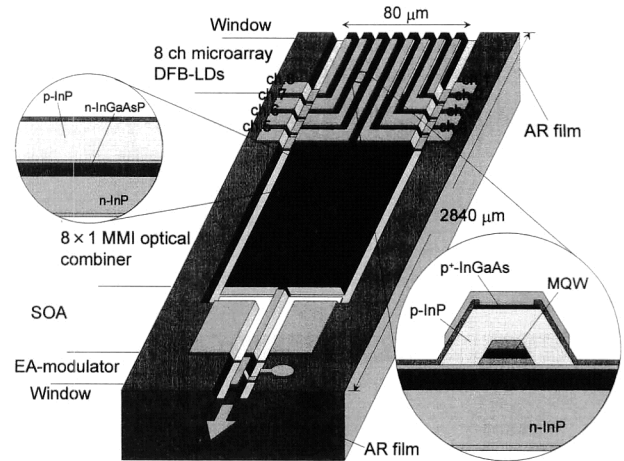


図6 波長選択光源。

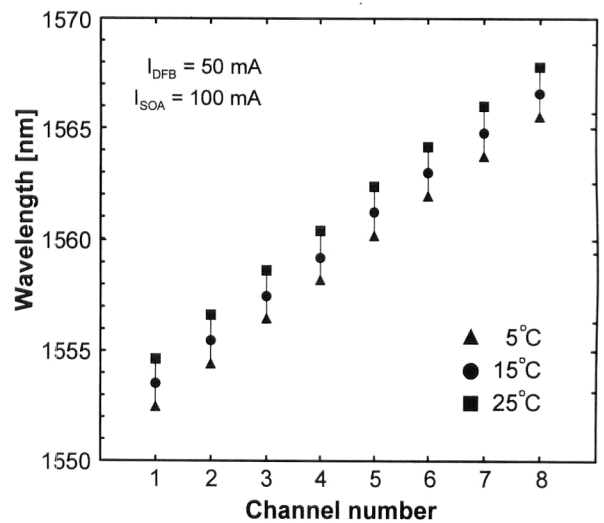


図7 波長選択光源の発振波長。

ル切り替えにより15 nmの幅の全波長域をカバーできている。この素子の特長は、これまで開発されてきた多電極型の波長可変分布反射型 (DBR: distributed Bragg reflector) レーザーと異なり、個々のレーザーが波長安定性に優れるDFBレーザーであること、SOAを集積化したことで高出力動作が可能なこと、さらに変調器が集積された点などである。変調器からの光出力は約8 mWが得られており、2.5 Gb/sの良好な変調動作などが初期の試作ながら得られている。

現在のWDMシステムは、とりあえず従来からある光源を使い、基本的に光源自体の波長安定性が保証される範囲内でシステムを構築しているにすぎない。その意味では、ここで紹介した異波長光源の一括作製技術は、WDM光源を低コストで提供するという、現状のWDMシステムを構築するうえで最低限の要求に応えるものである。

WDMの超大容量化を含めた、魅力的なフォトニックネットワークの実現のためには、本稿でも紹介した波長のロッカー内蔵モジュールや波長選択光源など、より機能的なデバイスの開発、さらにはそれらのデバイスを今後開拓されていくであろう新たな波長帯(たとえば1.48 μm 帯:S帯)へ展開していくことが重要な課題といえる。

文 献

- 1) H. Soda, M. Furutsu, K. Sato, N. Okazaki, S. Yamazaki, H. Nishimoto and H. Ishikawa: "High-power and high-speed semi-insulating BH structure monolithic electroabsorption modulator/DFB laser light sources," *IEE Electron. Lett.*, **26** (1990) 9-10.
- 2) T. Kato, T. Sasaki, K. Komatsu and I. Mito: "DFB-LD/modulator integrated light source by bandgap energy controlled selective MOVPE," *IEE Electron. Lett.*, **28** (1992) 153-154.
- 3) M. Aoki, M. Suzuki, M. Takahashi, H. Sano, T. Ido, T. Kawano and A. Takai: "High-speed (10 Gbit/s) and low-drive-voltage (1 V peak to peak) InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption-modulator integrated DFB laser with semi-insulating buried heterostructure," *IEE Electron. Lett.*, **28** (1992) 1157-1158.
- 4) Y. Furushima, K. Kudo, Y. Muroya, Y. Sakata, Y. Inomoto, K. Fukuchi, M. Ishizaka and M. Yamaguchi: "1560- to 1610-nm EA-modulator integrated DFB-LDs for extended-band 2.5-Gb/s/ch and 10-Gb/s/ch WDM systems," *Proc. OFC '99*, WH2 (1999) pp. 131-133.
- 5) K. Kudo, M. Ishizaka, T. Sasaki, H. Yamazaki and M. Yamaguchi: "1.52-1.59 μm range different-wavelength modulator-integrated DFB-LDs fabricated on a single wafer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10** (1998) 929-931.
- 6) K. Kudo, Y. Muroya, T. Nakazaki, Y. Inomoto, M. Ishizaka and M. Yamaguchi: "Different-wavelength modulator-integrated DFB-LDs for 1.58 μm band WDM systems," *IEE Electron. Lett.*, **34** (1998) 1-2.
- 7) M. Yamaguchi, K. Kudo, H. Yamazaki, M. Ishizaka and T. Sasaki: "Wide-wavelength-range modulator-integrated DFB laser diodes fabricated on a single wafer," *IEICE Trans. Electron.*, **E81-C** (1998) 1219-1223.
- 8) Y. Muroya, T. Nakamura, H. Yamada and T. Torikai: "Precise wavelength control for DFB laser diodes by novel corrugation delineation method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9** (1997) 288-290.
- 9) H. Yamazaki, K. Kudo, T. Sasaki, K. Hayashi, H. Ohyi, and M. Yamaguchi: "Different wavelength DFB-LD fabrication fully covered the EDFA gain bandwidth within the same wafer," *Proc. OECC '96*, PD2-1 (1996) pp. 16-17.
- 10) T. Sasaki, M. Kitamura and I. Mito: "Selective metalorganic vapor phase epitaxial growth of InGaAsP/InP layer with bandgap energy control in InGaAs/InGaAsP multiple-quantum well structure," *J. Cryst. Growth*, **132** (1993) 435-443.
- 11) K. Kudo, T. Sasaki and M. Yamaguchi: "Migration-controlled narrow-stripe selective MOVPE for high-quality InGaAsP/InGaAsP MQWs," *J. Cryst. Growth*, **170** (1997) 634-638.
- 12) J. Shimizu, Y. Sakata, M. Ishizaka, K. Komatsu, M. Muroya and H. Hosono: "2.5 Gbps modulator integrated DFB-LD module for WDM application," *NEC Tech. J.*, **52** (1999) 131-134.
- 13) P. Villeneuve, M. Cyr and H. B. Kim: "High-stability wavelength-controlled DFB laser sources for dense WDM application," *Proc. OFC '98*, FB5 (1998) pp. 381-382.
- 14) K. Kudo and M. Yamaguchi: "Microarray selective epitaxy (MASE) for extremely small WDM-PICs," *Proc. IEICE General Conf.*, SC-3-5 (1999) pp. 408-409.
- 15) Y. Kotaki, M. Bouda, M. Matsuda, K. Morito, S. Hara, T. Takeuchi and T. Fujii: "1.55 μm wavelength selectable laser," *60th JSAP Autumn Meeting, Ext. Abstr.* 3, 3a-ZE-45 (1999) p. 981.
- 16) J. Hong, H. Kim, F. Shepherd, C. Rogers, B. Baulcomb and S. Clements: "Matrix-grating strongly gain-coupled (MG-SGC) DFB lasers with 34-nm continuous wavelength tuning range," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, (1999) 515-517.

(1999年11月4日受理)