

# 10 Gbps変調器集積化光源

EA Modulator/DFB Laser Integrated Light Sources for 10 Gbps Transmission Systems

遠山 政樹  
TOHYAMA Masaki

森永 素安  
MORINAGA Motoyasu

古山 英人  
FURUYAMA Hideto

将来のマルチメディア ネットワークの実現に向けて、波長分割多重 (WDM) 技術を用いた T (テラ) bps 級の超大容量光通信システムが市場投入されようとしている。半導体光変調器と半導体レーザのモノリシック集積化光源は小型であり、高速変調時にも波長揺らぎが少ないことから、WDM システム用の長距離・大容量送信器として期待されている。当社では、バットジョイント構造、半絶縁性半導体埋込み構造の集積化プロセス技術を開発することにより、10 Gbps の高速動作に対応する変調器集積化光源を実現した。また、同光源において、光ファイバ長 50 km にわたる良好な長距離伝送特性を得た。

Distributed feedback (DFB) lasers with a monolithically integrated electro-absorption (EA) modulator are the most promising light sources for long-haul, high-speed, wavelength division multiplexing (WDM) optical transmission systems because of their compact size and low chirping characteristics.

We have developed key process technologies for optical device integration such as butt-joint and semi-insulating burying structures. Using these technologies, we have realized EA modulator/DFB laser integrated light sources showing good performance at 10 Gbps through a 50 km-long standard optical fiber.

## 1 まえがき

インターネットの拡大はとどまるところを知らず、幹線部分 (バックボーン) に流れるデータ量 (トラフィック) は爆発的に増え続けている。トラフィック需要の急増に対応するため、幹線光通信網では、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 伝送システムの実用化が進められている。WDM は、波長の異なる複数の光信号を 1 本の光ファイバ上に多重化する技術であり、敷設済みの光ファイバの伝送能力を飛躍的に向上できる (図 1)。1 波長当たりの伝送速度は 2.5 Gbps から 10 Gbps へと移りつつある。更に、数十波長もの光信号を多重化することにより、総伝送容量は Tbps にまで達しようとしている。

ここで、強度変調された光信号が波長チャープ (揺らぎ) を持っているとき、光ファイバ伝送中に信号波形が劣化する。このことが伝送距離を制限しており、変調速度が速いほど伝送可能距離は短くなる。したがって、幹線光通信網の送信器には、高速変調時にも波長チャープが小さい外部変調方式が用いられる。現状の 10 Gbps 送信器では、波長チャープ制御が容易な強誘電体材料 (LiNbO<sub>3</sub>) を用いた干渉計型光変調器が主流である。

一方、WDM システムでは、波長の異なる多数の送信器が必要であり、送信器の小型・低コスト化が望まれている。半導体光変調器は、外部変調方式による低波長チャープ特性を持ちながら、光源となる半導体レーザとモノリシックに集積化することができる。このため、半導体光変調器と半導

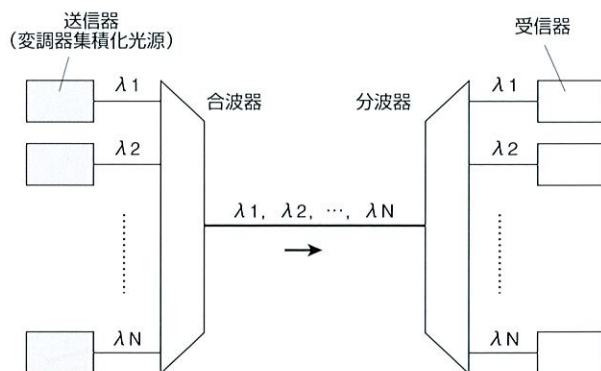


図 1. WDM 伝送システム 波長 ( $\lambda$ ) の異なる複数の光信号を 1 本の光ファイバ上に多重化することにより、伝送能力を高める。

WDM transmission system

体レーザとの集積化光源は、WDM システム用の長距離・大容量送信器として期待されている。

当社では、光半導体素子の集積化プロセス技術として、バットジョイント構造、及び半絶縁性半導体埋込み構造を独自に開発した。これにより、10 Gbps に及ぶ高速動作が可能な変調器集積化光源を実現した。また、同光源を用いて 50 km 伝送実験を実施した結果、受信感度劣化量の小さい良好な長距離伝送特性を得た。

## 2 素子構造

### 2.1 全体構造

変調器集積化光源は、電界吸収型 (EA: Electro-



Absorption)半導体光変調器と分布帰還型(DFB:Distributed FeedBack)半導体レーザとを同一基板上にモノリシックに集積化した構造から成る(図2)。基板にはInP基板を用い、有機金属気相成長(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法により、その上に活性層、光吸収層、クラッド層などを成長して形成した。DFBレーザ部の活性層及びEA変調器部の光吸収層は、連続したストライプ状に形成されており、その周囲がInPクラッド層で囲まれた埋込み型の光導波路となっている。

DFBレーザ部には、活性層上に回折格子が設けてあり、活性層に電流を注入することにより、回折格子周期で決まる波長において単一モードで発振する。一方、EA変調器部では、電圧を加えることにより光吸収層の吸収端波長がシフトする電界吸収効果を利用して、DFBレーザ部から導波した光の強度を変調する。WDMシステムでは、DFBレーザ部での発振波長が異なる複数の変調器集積化光源をそろえ、その出射光を1本の光ファイバ上に多重化して伝送する(図1)。

### 2.2 バットジョイント構造

DFBレーザ部の活性層とEA変調器部の光吸収層は、ともにInGaAsP薄膜結晶を積層した多重量子井戸(MQW: Multiple Quantum Well)構造とした。ここで、活性層と光吸収層とは、それぞれバンドギャップエネルギーの異なるMQW層から形成される。すなわち、同一InP基板上に、場所によって組成の異なるInGaAsP多層膜を成長する必要がある。

当社では、バットジョイント構造を開発することにより、これを実現した。バットジョイント構造は、その名のとおり、異なる層を突き合わせた形で直接接合させた構造である。同構造では、活性層と光吸収層の設計の自由度が高く、それぞれのMQW構造を独立に最適化することができる。

作製方法は、まず活性層をInP基板全面に成長した後、部分的にこれを除去する。更に、活性層を除去した領域にだけ、選択的に光吸収層をMOCVD法により成長させた。接

合部の成長層形状が平滑でないと、散乱による光損失が増大し、DFBレーザ部からEA変調器部へ導波する光の結合効率が低下する。結晶成長条件を最適化することにより、活性層と光吸収層とを滑らかに接合させた結果、90%を超える高い結合効率を得た。

### 2.3 半絶縁性InP埋込み構造

変調器集積化光源を実現するには、素子の横方向の断面構造にも工夫が必要である。DFBレーザ部が順バイアスで動作するのに対し、EA変調器部には逆バイアス電圧を加える。したがって、順・逆バイアス動作がともに可能であると同時に、素子間を電的に分離できる構造が要求される。また、10Gbpsにまで及ぶ高速変調動作を可能とするためには、EA変調器部の容量を0.5pF程度と小さくしなければならない。

当社では、信頼性の高い半導体埋込み構造において、半絶縁性InP層を埋込み層に用いることにより、これを実現した。活性層と光吸収層をメサストライプ形状にエッチング加工した後、Feを添加した半絶縁性InP層によりメサ側面を埋め込んで平坦化した。この結果、DFBレーザ部とEA変調器部との間で20kΩを超える高い分離抵抗を得ると同時に、EA変調器部の容量を0.5pF以下に低減した。

なお、バットジョイント構造と半絶縁性InP埋込み構造は、ここで述べた変調器集積化光源だけでなく、あらゆる光半導体素子の集積化に有効であり、光半導体素子の多機能化を実現するためのキーとなるプロセス技術でもある。

## 3 素子特性

### 3.1 消光特性

開発した変調器集積化光源の諸特性について述べる。DFBレーザ部の回折格子周期を変えることにより、発振波長1.53~1.56μmの範囲にわたって複数の素子を作製した。これは、WDMシステムに適用される波長範囲に一致している。また、DFBレーザ部の発振波長と、EA変調器部の光吸収層

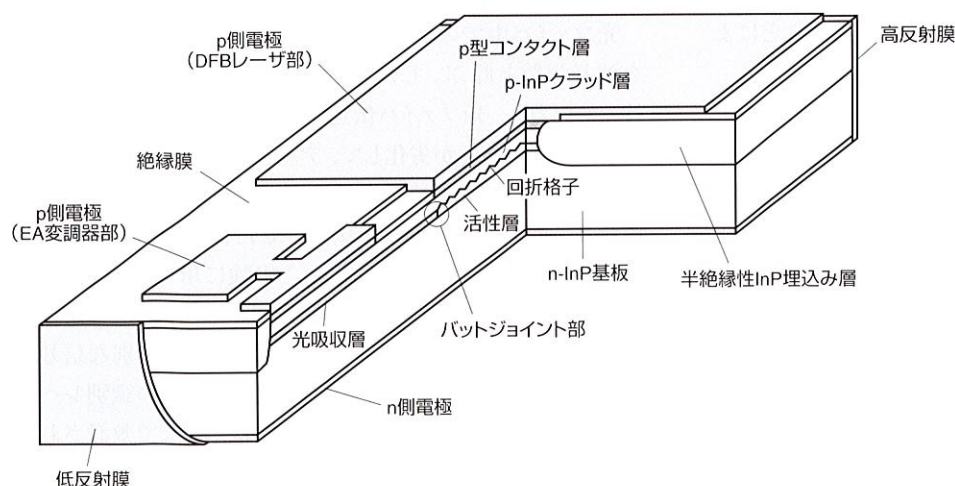


図2. 変調器集積化光源の構造 EA変調器とDFBレーザが同一基板上にモノリシックに集積されている。 Structure of EA modulator/DFB laser integrated light source



のバンドギャップ波長との差は適正量に制御した。発振しきい値電流は約6 mAであり、75 mAバイアス時に7 mW以上の光出力を得た。

一方、変調器集積化光源では、EA変調器部に電圧信号を加えて光の吸収量を変化させることにより、光強度を変調する。高速電気回路に対する負荷を軽減するうえでも、低電圧駆動が求められている。そこで、光吸収層のMQW構造を最適化することにより、動作電圧の低減を図った。

消光比(零バイアス時を基準にしたときの規格化光出力)の印加電圧依存性を図3に示す。EA変調器部に-2 Vの逆バイアス電圧を加えたときの消光比は15 dB以上と高く、低電圧での変調動作が可能であった。また、高い消光比を広い波長範囲にわたって得ることが可能であり<sup>(1)</sup>、WDMシステムへの適用性に優れていることを確認した。

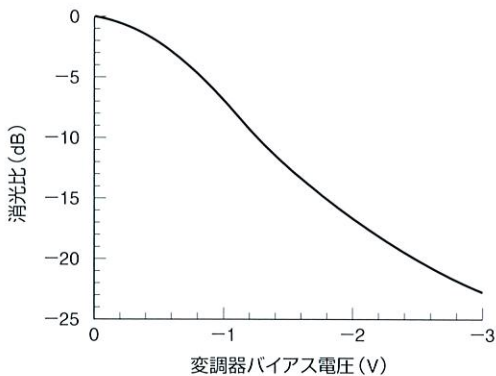


図3. 消光比のバイアス電圧依存性 -2 Vの低電圧で15 dBを超える消光比を得ている。

Extinction ratio of optical output vs. applied bias voltage

### 3.2 高速変調特性

電気から光への応答の周波数依存性を図4に示す。光応答出力が半減する周波数は15 GHzであり、10 Gbpsでの変調動作に十分な変調帯域を得た。これは、半絶縁性InP埋込み構造を開発し、EA変調器部の容量を低減したことによるものである。

更に、10 Gbpsのデータ速度のデジタル信号で光出力を変調した。信号波形は、一定の間隔(10 Gbpsのデータ速度では、100 ps)で“1”レベル、もしくは“0”レベルをランダムに取るデジタル信号を重ね合わせたものであり、アイパターンと呼ばれている。図5(a)の電圧信号(振幅2 V)をEA変調器部に加えたときの光出力信号を図5(b)に示す。光出力波形は電気駆動波形に追随しており、高速にตอบสนองしている。立上がり・立下がり時間は30 ps以下と速い。信号波形を劣化させることなく、10 Gbpsの電気信号を光信号に変換することができた。

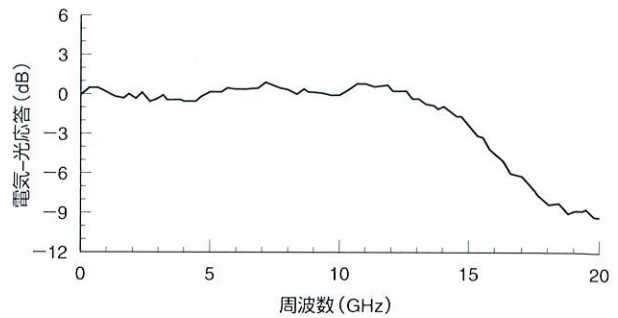


図4. 周波数応答特性 変調帯域は15 GHzに及ぶ。  
Frequency response

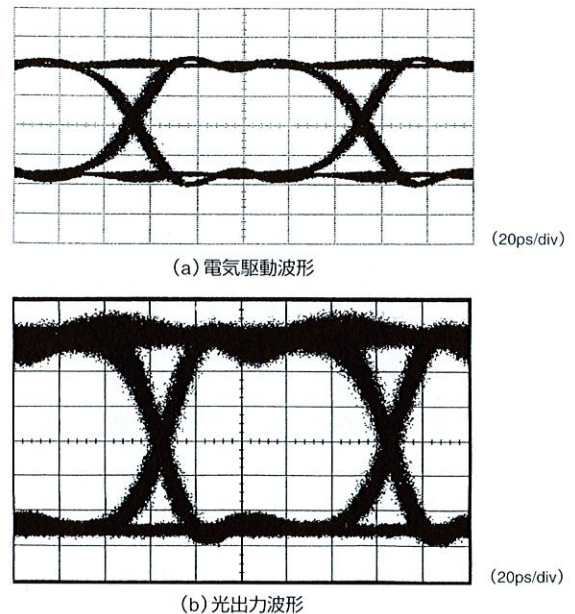


図5. 10 Gbps変調波形 高速変調された電圧信号(a)を、波形を劣化させることなく光信号(b)に変換している。  
10 Gbps eye diagrams

### 3.3 長距離伝送特性

光ファイバ中での光の伝搬速度は波長により異なり、これを波長分散と呼ぶ。したがって、光信号が波長チャープを持っていると、光ファイバ伝送中に信号波形が劣化する。この結果、受信感度が劣化して、データ誤りが生ずる。

そこで、変調器集積化光源からの光信号を直接受信した場合、光ファイバを50 km伝送させた後に受信した場合について、符号誤り率を測定した。実験に用いた受信器は、符号データと10 GHzクロック成分を抽出するだけの簡単な構成から成る。受信器内部で利得制御などの特別な信号処理をしていないため、受信強度に応じて1/10の識別レベルを調整しながら測定した。伝送路には、欧米で敷設されている通常のシングルモードファイバを用いた。

また、10 Gbpsに及ぶ高速変調信号を送信するには、伝送距離に応じて波長チャープ量を制御する必要があり、変調器集積化光源の動作条件の設定も重要である。ここでは、EA変調器部に-0.7 Vのオフセット電圧を加えたうえで、振幅2 Vの電圧信号によりデジタル変調した。

符号誤り率の受信強度依存性を図6に示す。光ファイバ50 km伝送前後での受信感度の変化量は1 dB以下と小さく、デジタル信号の質をほとんど劣化させることなく伝送することが可能であった。これは、高速変調時にも波長チャープが非常に小さいことによるものであり、変調器集積化光源が大容量・長距離送信器として優れていることを示している。

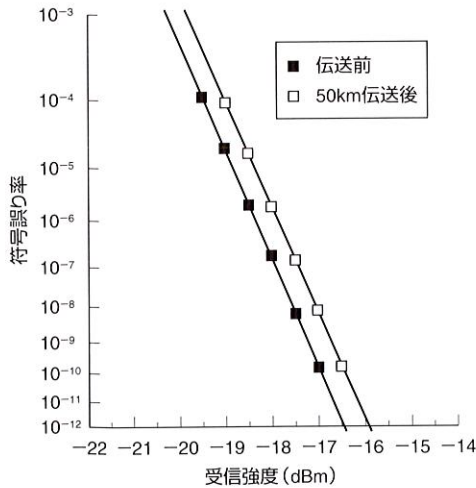


図6. 誤り率の受信強度依存性 光ファイバ50 km伝送前後で、受信感度の劣化量は小さい。  
Bit error rate curves of 10 Gbps transmission before and after 50 km standard fiber

#### 4 あとがき

バットジョイント構造、半絶縁性InP埋込み構造のプロセス技術を開発することにより、EA変調器とDFBレーザのモノリシック集積化光源を実現した。10 Gbpsに及ぶ高速応答と、光ファイバ50 km伝送後にも受信感度劣化量が小さいことを確認し、大容量・長距離送信器としての優れた特性を得た。変調器集積化光源は、幹線光通信網の伝送容量増大を支えるWDMシステム用光源として、今後、ますます市場要求の増大が見込まれる。

また、今回開発した集積化プロセス技術は、光半導体素子の多機能化を実現するうえで普遍の技術である。次世代の大容量光ネットワーク実現に向けて、変調器集積化光源だけでなく超高速スイッチング素子などへの応用も期待される。

#### 文献

- (1) 遠山政樹, 他, “EA変調器のWDM光源への応用に関する検討”, 1996年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 講演論文集1, p.309.



遠山 政樹 TOHYAMA Masaki

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主務。光通信用半導体レーザ、光変調器の研究・開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。  
Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



森永 素安 MORINAGA Motoyasu

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主務。光通信用デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。  
Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



古山 英人 FURUYAMA Hideto

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主務。光通信、光配線の研究・開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。  
Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.