光変調器集積レーザー

青木 雅博

日立製作所中央研究所 オプトエレクトロニクス研究部 (〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280)

Optical Modulator-Integrated Lasers

Masahiro AOKI

Optoelectronics Research Department, Central Research Laboratory, HITACHI LTD.,
1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji, Tokyo, 185-8601

(Received July 23, 2001)

Modulator integrated light sources are among the essential components of today's DWDM systems because of their compactness, high-speed operation, low frequency chirp and high cost efficiency. A recent progress in a R&D on modulator integrated light sources is reviewed focussing on the technical issues and approaches.

Key Words: Dense wavelength division multiplexing, Modulator-integrated lasers, Optical fiber, Selective area MOVPE, Multiple quantum well structure

1. はじめに

光集積回路技術はその発案^{1,2)}以来、20年以上に渡り光エレクトロニクスの高性能化、低コスト化を主眼に研究開発が進められてきた。この内、より汎用性が期待できるGaAs, InP系等の化合物半導体を用いた半導体光集積回路は、特に光ファイバ通信の高性能化に向けた地道な研究が長年推し進められてきたが、残念ながら現状ではSi-LSIの大規模集積化に比べるとまだ十分に成熟したとは言えない状況である。しかし、その数少ない実用成功例の一つは半導体レーザー光源と光強度変調器をモノリシック一体化した光変調器集積レーザーであろう。既に毎秒2.5~10ギガビットの光伝送光源として、高密度波長多重通信(DWDM; Dens Wavelength Division Multiplexing)システムにおける高速光送信機の小型化、経済化に大きく貢献している。本稿では、この光変調器集積レーザーの研究・開発に関し、技術的課題および最新技術動向に関連する光伝送技術、光半導体集積技術を交え紹介する。

2. 光変調器集積レーザーの研究背景、経緯

通常の光ファイバの伝送損失が最小となる1.55 μm 波長帯で高速・長距離光伝送を行う場合、ファイバの損失制限の他に、変調に伴う光源のスペクトル広がり(チャープ)とファイバ波長分散による伝送波形の歪みにより伝送距離が大きく制限されることが示された³⁾。この克服に向け、半導体レーザーの直接変調方式に比べチャープを大幅に低減できる外部変調方式が検討されてきた。Fig. 1

は α パラメータと呼ばれるチャープ指数と最大ファイバ伝送距離との関係を変調波形のガウス近似を用いて簡易計算した結果である。通常ファイバの分散値17 ps/km/nmを仮定している。伝送速度にかかわらず直接変調方式($\alpha \approx 2 \sim 8$)に比べ外部変調方式($\alpha \approx -1 \sim 1$)では、伝送距離を大きく拡張できることがわかる。一方、1989年頃からエルビウムをファイバコア部に添加し波長0.98 μm または1.48 μm の高出力光源で光励起するファイバインライン型の光増幅器が爆発的に普及し始めた⁴⁾。これにより、ファイバ損失はもはや伝送距離の制限要因ではなくなり、ファイバ非線形性、光増幅器の雑音特性と共に外部変調方

Fig. 1 Calculated maximum transmission distance as a function of chirp parameter α .

式とそのキーデバイスである光強度変調器の重要性がクローズアップされるに至った。

現状広く実用化されている光強度変調器の構造は大きく分けて光吸収型と光干渉型(マッハツェンダー(MZ; Mach Zehnder)型)に大別できる。一方, 材料の観点からは電気光学係数の大きなニオブ酸リチウム(LiNbO_3)とモノリシック集積に適したInP系, GaAs系の化合物半導体に分類される。長距離ファイバ通信で重要な $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波長帯($1.53\sim 1.62\text{ }\mu\text{m}$)で動作可能な半導体レーザーはInP系半導体で実現するため, 現状では光変調器とレーザー光源とのモノリシック集積化はInP系半導体に限定されている。一方, 本論の対象ではないが, LiNbO_3 やGaAs系のMZ変調器にInP系のレーザー光源をハイブリッド集積により一体化する試みも実用的観点から大変興味深い^{5,6)}。

1986年にKawamura等により吸収型光変調器と分布帰還型レーザーの集積構造が初めて報告された⁷⁾。光変調器, 半導体レーザーは共にInP基板上の単一モード光導波路を基本構造としており構造類似性から両者をモノリシック集積化することは極自然なアプローチであった。この報告を契機に特に吸収型光変調器集積レーザーの研究・開発が活発してきた。

3. 光変調器集積レーザーの技術課題とアプローチ

光変調器集積レーザー実現の課題は3.1レーザー/変調器導波路間の良好な光結合の実現, 3.2素子間クロストークの抑制, 3.3光変調器の性能向上(高速化, 駆動電圧低減, 低チャージング化), 3.4高出力化, そして3.5DWDM対応であろう。以下これらの基本的技術課題とその検討状況について詳述する。

3.1 レーザー/変調器導波路間の良好な光結合

レーザー/変調器を構成するInP系結晶を媒質内の信号波長(約 $0.5\text{ }\mu\text{m}$)よりも十分に小さな作製精度で滑らかに結合させ, レーザー光が効率良く変調器部へ導かれる構造を実現することは第一の課題であった。現状ではFig. 2(a), (b)に示す2種の集積法が広く使われている。いずれも, 基板上に形成した絶縁体マスクを用いて結晶成長領域を人為的に制御する領域選択成長法に基づいた手法である。Fig. 2(a)のバットジョイント(BJ; Butt-Joint)法⁸⁾は, レーザー/変調器に最適な結晶構造を別々の結晶成長で形成する理想的な手法である。提案当初のBJ法は液相成長(LPE; Liquid Phase Epitaxy)法で行われていたため, 絶縁体マスク端で必然的に生じる突起状の異常成長が問題であった。しかし, 有機金属気相成長(MOVPE; Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)法と適切な形状の絶縁体マスクを用いることで, この問題を解決できることが高性能分布反射(DBR)型レーザー⁹⁾やBJ部をレーザー共振器内に含んだスポット拡大導波路集積レーザーの実現により示された¹⁰⁾。さらに, ドライエッチング技術の導入により絶縁体マスク下のアンダーカットをより精密に制御することで導波路結合部の平坦性が向上された。現在これらの技術が光変調器集積レーザーへ展開されるに至っている^{11,12)}。また, MOVPE

Fig. 2 Laser-modulator integration schemes based on (a) butt-joint coupling and (b) in-plane bandgap energy control by selective area growth.

に替わり, 絶縁体マスク近傍の平坦性に優れる有機金属分子線結晶成長法(MOMBE; Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)や化学ビーム結晶成長(CBE; Chemical Beam Epitaxy)を用いた改善例^{13,14)}が報告されている。

Fig. 2(b)に示す基板面内バンドギャップ制御法^{15,16)}は, 選択成長におけるマスク端近傍での成長速度増大を積極的に利用した一括集積技術である。Fig. 2(b)に示すように, 一対の絶縁体マスクを導波路光軸と平行な方向に形成した基板上に量子井戸(QW; Multiple Quantum Well)構造をMOVPE法で選択成長することにより実現される。本手法では, 従来複数回の結晶成長で形成してきた集積構造が1回の結晶成長で実現できるため, 作製法が簡略化する点が最大の長所である。さらに, 素子間の結合部が滑らかなテーパー状になるため, 素子間の光結合効率がほぼ100%である。一方, 集積する全ての要素デバイスを同じ構造のQW導波路で構成する必要があるため一般的にはデバイス個々の最適設計の観点では難が有る。しかし, 特に吸収型光変調器とレーザー光源の集積化の場合には本手法は多いに威力を発揮する。デバイスの動作原理(吸収型変調器; 光吸収とフォトキャリアのQW外への排出, レーザー; QWへのキャリア注入と光放出)が互いに酷似しており, その結果各々に最適なQW構造も似通ったものとなるためである。本手法に拠れば, 光変調器集積レーザーを従来の単体レーザーとほぼ同様のウェハ工程で作製でき, $2.5\sim 10\text{ Gbit/s}$ 用途に広く実用化されている。

3.2 素子間クロストークの抑制

変調器とレーザーが数十 μm 程度の間隔で同一基板上に隣接形成された光変調器集積レーザーでは, 素子間のクロストークを十分に考慮した設計が不可欠である。一般にクロストークの物理要因として, 電気, 光および熱が考えられるが, この内応答速度の遅い熱クロストークの影響は本質的でない場合が殆どである。電気クロストークについては, レーザーは順方向バイアス, 変調器は逆方向バイアスにて動作することから十分な電气的分離が必須である。現状の光集積素子技術では, n型基板を共通接地とし, 高抵抗半導体層による埋め込みヘテロ(BH; Buried Hetero)構造やリッジ構造を導波路に使用する場合が多い。この

場合、素子間は比較的抵抗率の高いp型クラッド層で電気接続される。この結果、電気クロストークを抑制するに十分な数10 k Ω 程度の分離抵抗値を比較的容易に得ることができる。これに対し、光クロストークはチャージング特性に極めて重大な悪影響を与えることが多く、適切な光クロストーク抑制技術が必要とされる¹⁷⁻¹⁹⁾。外部変調方式では一般に電圧印加に伴う変調器材料の屈折率変動により位相チャージングが生じる²⁰⁾。一方、光変調器集積レーザーでは、この位相チャージングに加え高速変調光の極一部が変調器前端面で反射しレーザー部に逆戻りすることによってレーザー部にチャージングが誘発される^{17,18)}。このいわゆる戻り光チャージングは直接変調におけるチャージング量に比べればわずかではあるが、ギガビット級の伝送速度で数百km以上の長距離ファイバ伝送をする場合、受信後の信号品質に無視できない悪影響を及ぼす。Fig. 3は戻り光チャージングによる受信信号波形劣化のシミュレーション例である²¹⁾。伝送速度2.5 Gbit/s、通常分散ファイバを仮定し、変調器前端面反射率(R_f)を変化させた場合のファイバ伝送後の受信波形を計算している。伝送前は R_f に依存せず明瞭なアイ開口が見られるが、特に R_f が0.5 %以上の場合には伝送距離の増大に従い著しい波形劣化が起こっている。この例からも明らかなように、 R_f の低減は変調器集積レーザーの低チャージング動作に必須である。現在では、電子ビーム蒸着法、イオンビームスパッタリング法等の膜

Fig. 3 Calculated transmitted eye diagrams with a signal rate of 2.5 Gbit/s. Calculation is with various amounts of modulator facet reflectivity.

厚制御性の極めて優れた誘電体多層膜技術による低反射膜の形成や導波路を端面近傍の結晶内側で終端させ端面部での光反射を抑制したいわゆる窓構造²²⁾の採用により、実効的な R_f 値とし0.01 %程度以下が得られるようになってきており戻り光チャージングを十分抑制できる技術が確立されてきた。 R_f 値の低減以外にも、レーザー部のダンピングパラメータ(非線形利得飽和係数)を大きく設計することにより、レーザー部の緩和振動に伴うチャージングを低減する手法も提案されている²³⁾。

3.3 光変調器の性能向上；高速化, 低駆動電圧化, 低チャージング化

半導体光変調器で通常使われてきた集中定数 (LE: Lumped Element) 型電極構造における動作速度は基本的に素子容量により決定される。従って、変調器の高速化には、変調器導波路長の短縮や光吸収層を厚膜化するなどして容量低減を図る手法が一般的である。しかし、変調器長の短縮は消光比(オン・オフ比)を低下させる他、活性層厚の増大は活性層領域の電界強度低下を通じて駆動電圧や α パラメータを増大させる。このように、高速動作と低電圧・低チャージング動作は互いにトレード・オフの関係にある。

Fig. 4(a)はこれまでに報告された種々の導波路型光強度変調器について変調帯域と駆動電圧との関係をまとめたものである。図は所定の消光比を得るのに必要な変調器駆動電圧を横軸とし、光強度基準での3 dB変調帯域をプロットしたものである。ここで吸収型変調器に対しては15 dBのDC消光比が得られる電圧を、MZ変調器に対しては位相反転電圧(V_π)をそれぞれ駆動電圧とした。低電圧・高速動作の観点からGHz/Vの単位を持つグラフの傾きが重要な性能指数である。図中、白抜きのプロットは単体光変調器を、塗りつぶしプロットはレーザーをモノリシック集積化した光変調器のデータである。吸収型光変調器の場合、主に光吸収層の層構造を最適化することにより変調帯域50 GHz、駆動電圧3 V以下 (18 GHz/V) 程度が得られるようになっており、全IC化した化合物半導体ドライバによる直接駆動を用いた40 Gbit/s動作が実現されている²⁴⁾。また、極最近レーザーを集積化した素子においても同等の性

Fig. 4 (a) Figure of merit (FOM) of reported optical modulators. (b) The relationship between FOM and chirp parameter α .

能が報告されるに至っている²⁵⁾。

続いて、低チャージング化について議論する。変調器にレーザーを集積したことにより生じる戻り光チャージングを十分に抑制した後は、変調器自体のチャージング特性が議論の中心となる。文献²⁰⁾にも示されているように、MZ型光変調器のチャージングは変調手法に依存し、 $-1 \sim +1$ 程度に人為制御できる。一方、吸収型光変調器ではKraemers-Krönigの関係式で記述される媒質の吸収変化と屈折率変化の比で決定され、動作波長や光吸収層の電界強度に依存する。多重量子井戸構造を有する吸収型光変調器の消光特性とチャージング特性の一例をFig. 5に示す。 α パラメータ(実線)は、変調器動作電圧に大きく依存し、低電圧領域では正值(レッドチャージング)を示すが、動作電圧の増大に従い徐々に減少し、零を経過後、深い電圧領域では負値(ブルーチャージング)に転じる。これは、電界印加に伴う屈折率の変化の符号が変わるためである。実際のデジタル変調では、10 dB程度以上の消光比が確保されるように変調器に印加する電圧信号の範囲を調整するが、多くの場合光のオンレベルではレッドチャージング、光のオフレベルではブルーチャージングに設定される。Fig. 1に示した、通常ファイバの線形分散領域では、適度なブルーチャージングにおいて($\alpha = -1 \sim 0$)伝送距離は最大となる。これまでに、光のオンレベル電圧を深く設定し、デジタル変調時の平均的な α 値を低減することにより伝送距離を拡大した例が報告されている²⁶⁾。しかし、変調信号強度が減少するデメリットから本手法ではオンレベル電圧の調整が極狭い範囲に制限される。本質的な改善としては、Fig. 5の α - V_{mod} 曲線をできる限り左下方向にシフトさせ、低電圧動作時にも α 値を低減する構造が望ましい^{27,28)}。Matsuda等は多重量子井戸の価電子帯構造と α 値との関係に着目し、価電子帯バンドオフセット量を適正化することにより低電圧動作時から負の α 値を有する変調器集積レーザーを実現している²⁸⁾。

Fig. 4(b)はFig. 4(a)と同様、既報の集中定数電極を有する吸収型光変調器について前述の性能指数と α 値が符号反

Fig. 5 Modulator voltage dependence of chirp parameter α and on/off ratio.

転する電圧値との関係をプロットしたものである。報告データはほぼ一直線上に分布しており、光変調器の性能指数と低チャージング化とのトレードオフ関係が良く理解される。

3.4 高出力化

一般に、光変調器集積レーザーの最大光出力は、(a)レーザー光出力特性、(b)レーザー/変調器間光結合特性、(c)変調器透過損失および(d)変調器の高光入力耐性の4点で決定される。最終的な光モジュールの観点からは、(e)ファイバへの光結合特性がこれに加わる。これらの中で、(a)、(b)および(c)はそれぞれInP系歪量子井戸レーザー技術、既述の光導波路結晶結合技術、非球面レンズ結合技術の着実な進展により主要な制約事項ではなくなりつつある。一方、光吸収とフォトキャリアの排出を動作原理とする吸収型光変調器では(c)および(d)は出力特性を決定する重要な要因である。特に(d)の光入力耐性は、最終的に変調器が動作し得る光入力レベルの上限を決定するため、これまでに様々な検討がなされてきた^{26, 29-34)}。変調器の光吸収層では電界印加による光吸収の増加に伴いフォトキャリア(電子・正孔)が大量生成される。これらは、フォトカレント(光電流)としてそれぞれn型、p型半導体層へ有限の時間(キャリアエスケープ時間)で排出される。したがって、定常状態では光吸収量とキャリアエスケープ時間の大小に応じ吸収層とその近傍にフォトキャリアが蓄積(パイルアップ)される。このパイルアップキャリアは、印加電界を打ち消す方向にスクリーニング電界を生じさせるため、光変調器の動作に種々の影響を及ぼす。さらに、量子井戸変調器ではフォトキャリアが数多くのヘテロ障壁を通過するためにさらにキャリア(特に有効質量の大きな正孔)の熱放出過程の影響が加わる。これまでに、キャリアエスケープ時間を低減する手法として、浅い量子井戸の適用^{32,33)}、伸張格子歪を有する障壁層の導入による正孔有効質量の低減³⁴⁾、傾斜型ヘテロ障壁(グレーデッド障壁)の適用²⁶⁾による光入力耐性の向上が検討されている。これらの改善の結果、現状では通常的光送信機の出力レベルである2 mW (+3 dBm)程度のファイバ出力が10 Gbit/s動作で実現可能となっている。しかしながら、吸収型光変調器ではその動作原理が光吸収に依らないMZ型変調器に比べ特に高速化と高出力化のトレードオフがより厳しい状況にあることは否めない事実である。特に40 Gbit/s以上の高速化の場合、容量低減に不可欠となる吸収層体積の低減とこれに伴う光吸収密度の増大が素子設計を困難にすることが予想される。吸収型光変調器の高速性、低電圧駆動性を生かしつつ高出力化を図ることが今後さらなる高性能化に向けた課題である。

3.5 DWDM対応：波長選択、波長可変、波長リフレックス

最後にDWDM対応に関する課題に触れる。DWDM用光変調器集積レーザーに対する技術課題は主にレーザー部の波長特性と光変調器の波長依存性に関するものであり、波長制御性、波長選択・可変構造、波長安定化が議論の中

心である。ここでは技術詳細は本特集号の解説2に譲り、変調器集積化に伴う課題を述べるに留める。固定波長用途の光変調器集積レーザーの波長制御性に関しては、通常のDWDM用レーザーと同様の技術が用いられている。すなわち、レーザー動作温度の微調により、発振波長を波長チャンネル基準であるITUグリッド上に合わせ込む波長調整技術である。この場合、レーザーと光変調器の温度特性が異なるため、光変調器の狭い動作温度範囲に波長可変域が制限されることが、残念ながら光変調器集積レーザーの大きな短所である。光変調器結晶のバンドギャップ波長と信号光波長は温度上昇に伴い共に長波長化するが、バンドギャップ波長の温度係数が信号光波長のそれより6~8倍大きいこと両者の差である離調量が温度によって大きく変化することが本質的理由である。これに対し、吸収型光変調器の離調量依存性を低減する手法¹⁴⁾や、レーザー部を局所加熱する手法³⁵⁾等が報告されているほか、波長可変分布反射(DBR)型レーザーの採用による電氣的波長チューニングが検討されている³⁶⁾。

4. 高性能光変調器集積レーザー

前節で議論した光変調器集積レーザーの技術課題の多くは素子設計、プロセス技術の進展により解決されている。本節では、ここ数年の間に報告されたより高性能な光変調器集積レーザーを紹介する。

4.1 40 Gbit/s変調器集積レーザー

インターネットの爆発的な普及に伴い、単位チャンネル当りの伝送容量を40 Gbit/sに拡大した高速DWDM伝送技術への期待が高まっている。Fig. 6は40 Gbit/sで動作可能な吸収型変調器集積レーザーの報告例である²⁵⁾。高速化設計として変調器長を100 μm に短縮すると共に前述の変調器高出力耐性を考慮した設計を施した結果、数mWの高出力下で41 GHzの広帯域を実現している。また、-1.6 dBmのモジュール出力で明瞭な40 Gbit/sのアイ開口が得られており完成度は高い。今後の実用化動向が注目される。

4.2 進行波(TW)型電極による高速化

前節で議論したように集中定数(LE: Lumped Element)型光変調器での高速性は容量律速である。一方、進行波(TW: Travelling Wave)型電極を有する構造では光導波路近傍に形成された電極がマイクロ波伝送路として取り扱われ、変調器駆動信号は電極上を進行波の形で光信号と並走して伝搬する。ここで、光波の進行速度 v_{opt} と変調器駆動信号の伝搬速度 v_{ele} とをできる限り一致させることで変調器の素子容量に依存しない高速動作を実現することが可能となる。一般に、TW型変調器の導波路材料としては、主に光変調器用途のニオブ酸リチウムや光変調器や光検出器用途のInP系、GaAs系などの化合物半導体が検討されている。この内、化合物半導体を用いた進行波素子に関しては主に電気信号と光信号間の屈折率(比誘電率)の差が大きいため一般には位相整合条件($v_{\text{opt}} = v_{\text{ele}}$)を完全に満たすことは困難である。しかし、電気・光信号間の作用長となる変調器

Fig. 6 The device structure and 40 Gbit/s eyes for an integrated lumped element modulator/laser.²⁵⁾

長が300 μm 程度以下と短い吸収型変調器の場合は比較的位相不整合による高速性の劣化が少ないことが示された³⁷⁾。Fig. 7はこの原理に基づいたTW型光変調器集積レーザーの最初の報告例である³⁸⁾。Fig. 4(a)にプロットしているように、光3 dB変調帯域70 GHz、駆動電圧2.2 Vが得られており、性能指数は32 GHz/Vと従来値を大きく上回った。Fig. 4(b)に示したように変調器の駆動電圧・変調帯域に関する性能指数と低チャージング化のトレードオフを打破する一技術として今後の進展が楽しみである。

4.3 マッハツェンダー(MZ)型光変調器集積レーザー

MZ型光変調器は特にニオブ酸リチウム(LiNbO₃)材料を用いた単体デバイスが広く実用に至っている。これに対しレーザーのモノリシック集積の観点から、InP基板上にInGaAs(P)やInGaAlAs材料の位相変調器をMZ干渉導波路中に配置した構成の半導体MZ変調器の研究がなされている³⁹⁻⁴¹⁾。通常、半導体の電界印加による吸収率変化に比べると遥かに小さい屈折率変化を少しでも増大させるために、井戸層を厚膜化した多周期量子井戸構造を導入し位相変調効率の増大を量る設計がなされているが、Fig. 4(a)に示すように光変調器の性能指数の観点では吸収型に比べると大きく劣っているのが現状である。文献⁴²⁾の例では、レーザー光源の集積化も達成され既に、2.5~10 Gbit/s用のDWDM光源として実用化されている。MZ型光変調器では変調器の駆動条件を制御することによりチャージング量をフレキシブルに可変できること、動作波長に対するトレランスが大きいたことが吸収型光変調器と比べた場合の最大の特長である。半導体MZ光変調器の性能指数を向上する手法として前述のTW型電極を導入した例^{43,44)}が報告さ

Fig. 7 The device structure and high-speed characteristics for an integrated travelling-wave modulator/laser.³⁸⁾

れており、今後の進展が注目される。

4.4 DWDM対応光変調器集積レーザー

波長選択・可変機能を搭載した光変調器集積レーザーはDWDMの高性能化・経済化に不可欠となりつつある。既に、多波長レーザーアレイに合波器、損失補償光増幅器、吸収型光変調器をモノリシック集積化した波長選択型変調器集積レーザー⁴⁵⁾や波長可変DBRレーザーに損失補償光増幅器、吸収型光変調器をモノリシック集積化した波長可変型変調器集積レーザー³⁶⁾が報告されており、50 GHzのITUグリッドを20 ch程度以上カバーするデバイスが実現されている。また、特に数十nmに渡る広範囲波長帯域で動作する素子を一枚の基板上に一括作製する技術が報告されている⁴⁶⁾。一方、ITUグリッドに合わせ込んだレーザー波長を長期的に安定化させる手法として、波長リファレンスとなる誘電体エタロンフィルタをマイクロオプティクス技術を用いて搭載し、波長分別器を光モジュールの内部に作り込んだ波長分別器内蔵型モジュール^{47,48)}が報告されており、実DWDMシステムへの展開が確実に進行している。

5. まとめ

光変調器集積レーザーの研究開発の状況に関し簡単に紹介した。小型化、低チャージング化、高速化、低電力化、波長制御と経済性が両立可能な本デバイスは2.5~10 Gbit/s DWDM伝送用光源として重要な役割を担うにまで技術は進展してきた。40 Gbit/sへの実用展開も近い将来実現するだろう。今後は幹線伝送系のみならず、高速メトロ系等への展開も含め一層発展することを期待したい。

参考文献

- 1) S. E. Miller: Bell Syst. Tech. J. **48** (1969) 2059.
- 2) Y. Suematsu: Technical Digest of IOOC '77, B-1 (1977) 185.
- 3) F. Koyama and Y. Suematsu: IEEE J. Quantum Electron. **QE-21** (1985) 292.
- 4) For example, Special issue on optical amplifier, J. Lightwave Technol. **9** (1991) 145.
- 5) B. Ade, P. Dunn, T. Munks, and P. Sanders: Technical Digest of OECC '98, 14B3-5 (1998) 140.
- 6) R. A. Griffin, R. G. Walker, R. I. Johnstone, R. Harris, N. M. B. Perney, N. D. Whitbread, T. Widdowson, and P. Harper: Technical Digest of OFC '01 (2001) PD-15.
- 7) Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi: Electron. Lett. **22** (1986) 242.
- 8) Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu, and S. Arai: Electron. Lett. **17** (1981) 945.
- 9) Y. Tohmori, F. Kano, M. Oishi, Y. Kondo, M. Nakao, and K. Oe: Electron. Lett. **24** (1988) 1481.
- 10) H. Ohashi, M. Fukuda, Y. Kondo, M. Yamamoto, Y. Kadota, F. Ichikawa, Y. Kawaguchi, K. Kishi, Y. Sakai, M. Yanagisawa, S. Ishibashi, F. Hanawa, T. Hashimoto, Y. Tohmori, K. Yokoyama, Y. Itaya, and H. Toba: Technical Digest of ECOC '97 (1997) 351.
- 11) K. Morito, R. Sahara, K. Sato, Y. Kotaki, and H. Soda: Electron. Lett. **31** (1995) 975.
- 12) H. Takeuchi, K. Tsuzuki, K. Sato, M. Yamamoto, Y. Itaya, A. Sano, M. Yoneyama, and T. Otsuji: IEEE Selected Topics in Quantum Electron. **3** (1997) 336.
- 13) H. Kunzel, S. Ebert, R. Gibis, P. Harde, R. Kaiser, H. Kizuki, and S. Malchow, Indium Phosphide and Related Materials (1998) 571.
- 14) H. Debregeas-Sillard, P. Doussiere, A. Bodere, P. Rael, O. Legouezigou, G. Michaud, F. Gaborit, S. Gauchard, and F. Brillouet: IEEE Photon. Technol. Lett. **11** (1999) 1485.
- 15) T. Kato, T. Sasaki, N. Kida, K. Komatsu, and I. Mito: Technical Digest of ECOC '91 (1991) WeB7-2.
- 16) M. Aoki, H. Sano, M. Suzuki, M. Takahashi, K. Uomi, and A. Takai: Electron. Lett. **27** (1991) 2138.
- 17) 松本 研司, 柏川 秋彦, 末松 安晴: 第29回応用物理学会学術講演会予稿集 (1982) 3a-H-8.
- 18) H. Soda, K. Sato, H. Sudo, S. Takeuchi, and H. Ishikawa: Technical Digest of ECOC '91 (1991) WeB7-2.
- 19) 青木 雅博, 佐野 博久, 魚見 和久, 高井 厚志: 第39回応用物理学会学術講演会予稿集 (1992) 30a-SF-12.
- 20) F. Koyama and K. Iga: J. Lightwave Technol. LT-6 (1988) 87.
- 21) M. Aoki, S. Takashima, Y. Fujiwara, and S. Aoki: IEEE Photon. Technol. Lett. **9** (1997) 380.
- 22) K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai, and Y. Matsushima: IEEE J. Quantum Electron. **20** (1984) 236.
- 23) Y. Kotaki and H. Soda: Technical Digest of ECOC '93 (1993) WeP8.6.
- 24) K. Ishikawa, K. Watanabe, H. Suzuki, R. Takeyari, T. Tanoue, T. Masuda, R. Hayami, K. Washio, H. Chiba, K. Ohnaka, K. Hirata, and T. Harada: Technical Digest of ECOC '00 (2000) paper 2.3.4.
- 25) H. Kawanishi, Y. Yamauchi, N. Mineo, Y. Shibuya, H. Murai, K. Yamada, and H. Wada: Technical Digest of OFC '01 (2001) MJ3.
- 26) K. Morito, R. Sahara, K. Sato, Y. Kotaki, and H. Soda: Electron. Lett. **31** (1995) 976.
- 27) T. Yamanaka, K. Wakita, and K. Yokayama: Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 3114.
- 28) M. Matsuda, K. Morito, K. Yamaji, T. Fujii, and Y. Kotaki: IEEE Photon. Technol. Lett. **10** (1998) 364.
- 29) U. Koren, B. I. Miller, T. L. Koch, G. Eisenstein, R. S. Tucker, I. Bar-Joseph, and D. S. Chemla: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1132.
- 30) M. Fox, D. A. B. Miller, G. Livescu, J. E. Cunningham, J. E. Henry, and W. Y. Jan: J. Quantum Electron. **27** (1991) 2281.
- 31) T. H. Wood, J. Z. Pastalan, C. A. Burrus, Jun., B. C. Johnson, B. I. Miller, J. L. Demiguel, U. Koren, and M. G. Young: Appl. Phys. Lett. **57** (1990) 1081.
- 32) T. H. Wood, T. Y. Chang, J. Z. Pastalan, C. A. Burrus, Jun., N. J. Sauer, and B. C. Johnson: Electron. Lett. **27** (1991) 257.
- 33) K. W. Goossen, L. M. F. Chirovsky, R. A. Morgan, J. E. Cunningham, and W. Y. Jan: Photon. Technol. Lett. **3** (1991) 448.
- 34) R. Sahara, K. Morito, and H. Soda: Electron. Lett. **30** (1994) 698.
- 35) M. Aoki, A. Ohishi, M. Shirai, R. Kaneko, H. Kuwano, and S. Tsuji: Technical Digest of ISLC '00 (2000) TuB2.
- 36) J. E. Johnson, L. J.-P. Ketelsen, J. M. Geary, F. S. Walters, J. M. Freund, M. S. Hybertsen, K. G. Glogovsky, C. W. Lentz, W. A. Asous, P. Parayanthal, T. L. Koch, and R. L. Hartman: Technical Digest of OFC '01 (2001) TuB3.
- 37) K. Kawano, M. Kohtoku, M. Ueki, T. Iyo, S. Kondoh, Y. Noguchi, and Y. Hasumi: Electron. Lett. **33** (1997) 1580.
- 38) Y. Akage, K. Kawano, S. Oku, R. Iga, H. Okamoto, Y. Miyamoto, and H. Takeuchi: Technical Digest of ISLC '00 (2000) PD1.
- 39) J. E. Zucker, K. L. Jones, B. I. Miller, and U. Koren: Photon. Technol. Lett. **2** (1990) 32.
- 40) H. Sano, H. Inoue, S. Tsuji, and K. Ishida: Technical Digest of OFC '92 (1992) ThG4.
- 41) C. Rolland, R. S. Moore, F. Shepherd, and G. Hillier: Electron. Lett. **29** (1993) 471.
- 42) C. Rolland: Technical Digest of OFC '98 (1998) ThH1.
- 43) R. G. Walker: IEEE J. Quantum Electron. **27** (1991) 654.
- 44) L. Moerl, D. Hoffmann, K. Matzen, C. Bornholdt, G. G. Mekonnen, and F. Reier: Technical Digest of OPRM '99 (1999) WeA1-3.
- 45) K. Kudo, K. Yashiki, T. Sasaki, Y. Yokoyama, K. Hamamoto, T. Morimoto, and M. Yamaguchi: Photon. Technol. Lett. **12** (2000) 242.
- 46) Y. Furushima, Y. Sakata, Y. Inomoto, M. Ishizaka, J. Shimizu, K. Komatsu, K. Kudo, K. Yashiki, Y. Yokoyama, M. Yamaguchi, Y. Muroya, T. Sasaki, M. Ushirozawa, T. Kosugi, and H. Tanaka: Technical Digest of ECOC '00 (2000) paper 3.3.4.
- 47) D. M. Adams, C. Gamache, R. Finlay, M. Cyr, K. M. Burt, J. Evans, E. Jamroz, S. Wallace, I. Woods, L. Doran, P. Ayliffe, D. Goodchild, and C. Rogers: Electron. Lett. **37** (2001) 691.
- 48) K. Tatsuno, M. Shirai, H. Furuichi, K. Kuroguchi, N. Baba, H. Kuwano, Y. Iwafuji, and A. Murata: Technical Digest of OFC '01 (2001) TuB5.