

通信用半導体レーザー研究の変遷と将来展望

吉國 裕三^{†a)}

Evolution of the Semiconductor Lasers for the Optical Communications; History and Prospects

Yuzo YOSHIKUNI^{†a)}

あらまし 光通信システムはこの 40 年ほどの期間に急速な進歩を遂げた分野であり、通信用半導体レーザーはその中核部品としてシステムの進化を支えてきた。本論文では、この期間の半導体レーザー開発の歴史を振り返り、今後の技術開発の方向を展望する。

キーワード 半導体レーザー, 光通信, 光半導体, 光集積

1. ま え が き

光通信技術は、実用化されてから 40 年足らずであるが、この期間に最も進歩が著しい技術分野の一つである。光通信技術とコンピュータを中心とした情報処理技術が車の両輪となり、情報技術の革新を通じて社会の急変をもたらした。光通信技術は伝送容量と伝送距離の双方で飛躍的な性能向上を遂げた。光通信システムの性能は、①単位時間当りの伝送容量 [bit/s]、② 3R 中継間隔 [km] の二つのパラメータで表され、二つのパラメータの積、伝送容量 × 中継間隔 [bit/s·km] が総合的な性能指標として用いられている。

図 1 に、この性能指標の年代による進歩を示した。図中、 \square は実験室レベルでの記録、 \circ が実用システムで実現された性能を表す。実験システムの性能は、当初の ~1 Mbit/s·km から、10 年ごとにほぼ 3 けた増の急速な進歩を示し、現在では 10 Pbit/s·km を超えるまでに成長している。実用システムの性能は、実験システムから約 1 けた落ちで、同様な向上を示している。この性能向上 (10 年で 3 けた増) は、集積回路の急速な進歩を象徴するムーアの法則 (10 年で 2 けた増) をも凌ぐものであり、この期間の光通信の進歩がいかに急速であったかを表している。このように光

通信システムの性能は、全体として見れば直線的な進歩を示しているが、進歩を支える技術はほぼ 5 年ごとに世代交代している。当初、0.8 μm マルチモードファイバ (MMF) で実現した光通信は、1980 年代には 1.3 μm (SMF) に伝送媒体を変える。更に動的単一モードレーザを用いた 1.5 μm 帯の長距離大容量伝送の開発に進む。その後、実験室レベルでのコヒーレント伝送検討を挟み、1990 年代の光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いた超長距離システム、更に高密度波長多重 (DWDM) を用いた超容量化へと進化している。各々の世代の伝送性能は、初期の急速な発展の後に頭打ちとなるが、急速な進歩は次世代の技術に引き継がれ、長期にわたって急激な進歩が持続してきた。

図中に、各時代に対応して開発された半導体レーザを示した。これらのレーザは、各々の時代のシステムの要請に応じて開発されたものであるが、大部分のレーザはその後も複数の世代にわたり通信の高度化に寄与し現在でも通信分野で活躍している。以下では、これらのレーザの開発について時代を追って解説する。

2. 1970 年代の通信用半導体レーザー研究

1970 年代は、半導体レーザ、光ファイバの双方にとって進歩の著しい時期であった。半導体レーザはヘテロ接合の導入によって大幅な発振しきい値低減が可能となり、GaAs 系レーザで 1970 年に室温連続動作 [1], [2] を実現した。

初期のレーザは寿命が短く実用に耐えられるもので

[†] 北里大学理学部物理学科, 相模原市

Department of Physics, School of Science, Kitasato University, 1-15-1 Kitasato, Sagami-hara-shi, 228-8555 Japan

a) E-mail: yosikuni@kitasato-u.ac.jp

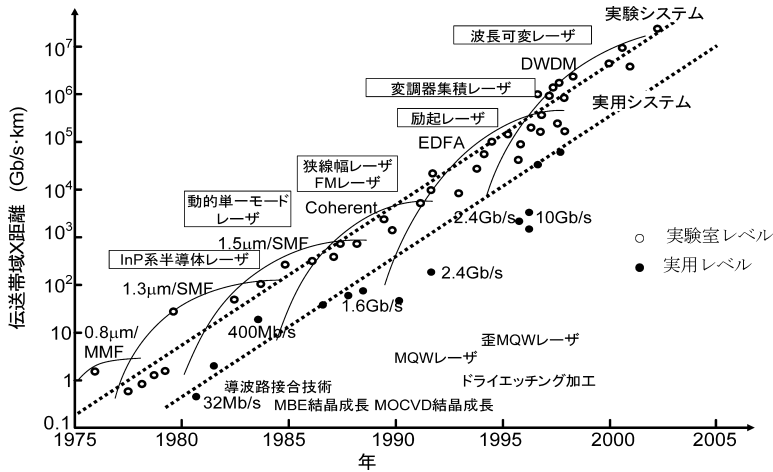


図1 光通信システムの進歩と半導体レーザ

Fig. 1 Evolution of optical communications systems and semiconductor lasers.

はなかったが、結晶成長条件の最適化、応力ひずみの除去、パッシベーション技術の開発など、様々な技術開発によって急速に実用レベルの寿命が達成された。

一方、光ファイバは開発当初は 0.8 μm が最低損失波長であり、GaAs レーザの発振波長とほぼ一致していた。この幸運な偶然が早期の光通信立上げに大きく貢献したが、その後、最低損失波長は長波長へと急速にシフトしていった。ファイバの損失は短波長側ではレイリー散乱、長波長側では水素を含んだ不純物の吸収で決まっている。初期のファイバは、多量の不純物を含んでいたため長波長側の損失が大きく最低損失波長は短波にあったが、製造技術向上により不純物濃度の大幅な低下によって 1.3 μm 更には 1.5 μm へとシフトした。このため、1970 年代後半の半導体レーザ開発の課題は長波長にシフトする最低損失波長を追いかけることであった。

図2はIII-V族半導体のバンドギャップ波長を格子定数に対してプロットしたものである。GaAs系レーザは、GaAs結晶上にAlAsとの混晶GaAlAsを成長しヘテロ接合を構成したものである。図に示すようにAlAsはGaAsに比べバンドギャップは大幅に大きい、格子定数はほぼ一致しており任意組成のGaAlAsをGaAsとの格子整合をほぼ保ったまま、成長することができ、大きなエネルギー差をもったヘテロ接合を構成できる。このため、GaAs系レーザは3元混晶だけで構成可能であり、これが初期にGaAs系レーザが開発された要因の一つとなったが、長波長側の限界はGaAsで決められ0.8 μm付近であった。ファイバが

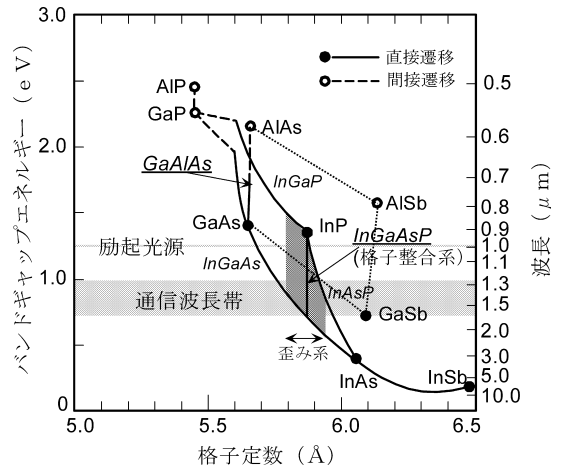


図2 III-V族半導体の格子定数とバンドギャップ

Fig.2 Bandgap energy v.s. lattice constant in III-V semiconductors.

低損失となる近赤外で発振する可能性がある材料としては、図中に示したように InP [3] 及び GaSb [4] をベースにした材料が考えられた。米国ではベル研究所を中心に従来と同じ GaAs 基板を用いて、In や Sb などの元素を加えることによって長波長レーザの開発が進められたが顕著な進展は得られなかった。一方、日本では新しい基板材料 InP が注目され、この材料系を用いた長波長レーザの開発が NTT, KDD, 東工大で進められた。InP 系では GaAs 系とは異なり、4 元混晶を用い III 族, V 族の比率を精密に制御して目的波長での発光と格子整合とを同時に満足させる必要があ

る．このため InP 系でのレーザ開発は成長条件を微妙に変えて結晶を作製し、発光波長の測定と X 線による格子定数の測定を繰り返す地道な努力が必要であった．このような努力によって、InP 系を中心に 4 元系結晶の育成技術が確立され、完全な格子整合がとれたヘテロ構造を成長できるようになり高性能なレーザが作製可能となった．

GaAs 系のレーザは開発当初は横多モード型であったが、キンクの除去やしきい値の低減のため、その後の開発では大部分が狭ストライプの単一横モード型に移行した．InP 系レーザでは、発振しきい値が高めだったこともあり、当初から狭ストライプの単一横モード型レーザで開発が進められた．当時は、素子作成に液相成長法が用いられていたため、液相成長の性質を生かして PCW [5]、VSB [6]、DC-PBH [7] 等の新しい構造が提案・作製された．これらの技術開発によって、1980 年代はじめには安定な単一横モード発振が得られるようになり、電流のブロッキングを強化することによって高出力化が可能となった．なお、これらの横モード制御は液相成長の特質を巧妙に利用したものであり、その後の気相成長への転換、及び MQW 活性層への転換によって再び BH 構造 [8] が主流になっていった．

このようにして開発された長波長レーザであるが通信用として用いられるためには信頼性の確認が不可欠であった．InP 系材料の信頼性は 1970 年代末から検討が進み GaAs 系と比較して、転位が活性層内に侵入することによる突然死が少なく、また端面劣化も起こりにくいなど信頼性に関しては InP 系材料が優れていることが明らかになった．残る劣化要因としては導波路の埋込界面の劣化が主なものであり、各種の劣化モードについて検討が進められ、ハードスクリーニング法の確立により埋込型長波長レーザの信頼性確保の手法が達成された [9]．

3. 動的単一モードレーザの開発

InP 系半導体レーザ開発により 1.3 μm 帯伝送の実用化は急速に進み、1980 年代初頭に光通信の性能に多大な進歩をもたらした．1.3 μm 帯への移行では、ファイバの損失が下がっただけでなく、この波長帯がファイバの零分散波長であったため波長分散による送信波形の変形が大幅に減少した．このことはファイバのシングルモードへの移行と相まって通信速度の大幅な向上を可能とした．一方、当時既に光ファイバの最低損

失波長は開発レベルでは 1.55 μm 付近に移っており、1.55 μm 帯への対応が強く求められていた．しかし、1.55 μm 帯への移行では、再度ファイバ分散が大きい波長での伝送に戻るため、零分散波長である 1.3 μm 帯への移行で大幅な高速化が進んだ通信系では、分散への対応が不可欠であった．当時用いられていたファブリペロー型レーザは、静的動作では比較的単一の縦モードで発振をするが、高速な変調を掛けた場合にはキャリア密度変調に伴い多数の縦モードで発振する傾向があった．特に 1980 年代はじめに開発された 1 Gbit/s を超える高速伝送では、多モード発振によって 10 nm に達するスペクトル幅を示していた．

高速通信でのファイバ分散の影響は早くから指摘されてきた [10]．零分散波長である 1.3 μm 帯への移行によって通信速度は急激に上昇し、国内では 1980 年代初頭に 400 Mbit/s 光伝送システムが研究段階から実用化へ移行していた．そして、研究段階では、ビットレート向上、中継間隔拡大の両面から次世代システムの検討が進められた．高速化に関しては、次世代システムとして 4 倍の容量を実現する 1.6 Gbit/s 光伝送システムが検討された．このシステムは、当初は零分散波長の 1.3 μm 帯を前提としたものであったが、Gbit/s 超の伝送では許容される分散は極めて小さくなる．このため、敷設されたファイバの零分散波長のばらつきと光源の半導体レーザの波長のばらつき及び劣化による波長変化を考慮すると 1.3 μm 帯であっても単一縦モードが要求されることが明らかとなってきた．一方、中継距離に関しては、当初の陸上システムを想定した 25 km 程度のスパンから、海底システムを想定した 50 km 超のロングスパンの要求が強まり、これに対応するため最低損失波長 1.55 μm 帯への移行が不可避となっていた．1.3 μm 帯で既に実用化されていた 400 Mbit/s 伝送であっても 1.55 μm 帯での伝送を前提とすると、単一縦モードへの転換が不可避であった．

このような状況は諸外国でも同様であり、世界的にも変調時にも単一縦モード発振を維持する動的単一モードレーザの開発が活発になり、図 3 にまとめたように様々な手法で単一モード化が検討された．当時、検討された主な手法は、(1) 分布帰還型 (DFB) レーザ [11]、(2) 分布反射型 (DBR) レーザ [12]、(3) 複合共振器レーザ [13]、(4) 外部回折格子レーザ [14]、(5) 注入同期型レーザ [15]、(6) 短共振器レーザ [16] 等であった．欧米では、半導体レーザチップには手をつけず、(3)、

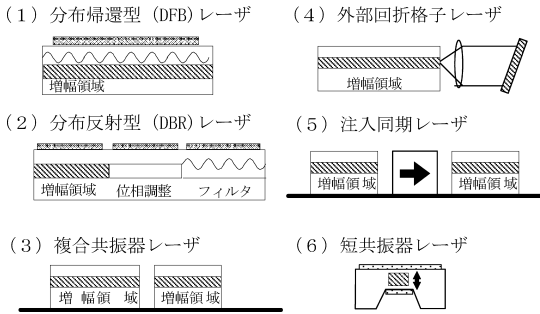


図 3 いろいろな動的単一モードレーザ

Fig. 3 Structure of dynamic single mode lasers.

(4), (5) のアプローチでの検討が盛んに行われたが、素子作製技術で先行していた国内では、(1), (2) のモノリシック型レーザの開発が進められた。国内の研究は急速に進み、1981 年から 1982 年にかけて、当時の KDD [17] 及び電電公社 [18] から分布帰還 (DFB) 型で、東工大 [19] から分布反射 (DBR) 型で室温連続発振が報告され、開発の中心はモノリシック型に移った。DFB・DBR レーザは、半導体レーザ内部に回折格子を形成し発振モードを選択するものであり、DFB では活性領域全体に回折格子を形成、DBR では活性層に隣接したパッシブな導波路だけに回折格子を形成している。

DFB 型は、レーザ全体の導波構造が均一であるためモードの安定度に優れていたが、活性層直上に回折格子を形成するため、信頼性に関する懸念があった。しかし、InP 系の特性もあり早期に信頼性が確認されると [20]、単一モード化の最も有力な手段として開発が進められた。一方、DBR レーザは活性領域に回折格子がないため信頼性に関する懸念は少ないが、活性層への電流注入によって縦モード間隔が変化し、これによってモードとびが起きる可能性がある。このため、単純な伝送用光源としては DFB 型が安定しており、DBR 型は回折格子領域に任意の電流を注入できるメリットを生かして波長可変光源への展開が主流となっていた。短共振器レーザは優れた単一モード性を示すが、出力の面で幹線用光源として用いることは難しく、LAN 等短距離用光源として発展していった。

DFB・DBR レーザの開発とほぼ同時期に、複合共振器型の Cleaved Coupled Cavity (C^3) Laser が検討された。このレーザは、共振器長がわずかに異なる FP レーザを数ミクロンの間隔で結合させ、二つの FP レーザの縦モード波長が一致する条件で、発振モード

を選択する。このレーザは単一モードレーザとしてだけでなく、広帯域での波長可変が可能である等、様々な機能が注目されたが、伝送用としてはモード安定性の点から採用されることはなかった。このレーザの波長可変は、小さな屈折率変化をパーニア効果と呼ばれるメカニズムで拡大し、大きな波長変化を得る方法であった。このパーニア効果は、後に DBR 型レーザの波長可変に応用され、後述する SG-DBR, SSG-DBR といった広帯域可変レーザの基本原理として発展していった。

4. チャーピング抑制と変調器集積光源の開発

動的単一モードレーザの開発によって、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯での $1.6\ \text{Gbit/s}$ 伝送、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯での $400\ \text{Mbit/s}$ 長距離伝送など通信システムの大幅な大容量化・長距離化が可能となった。しかし光通信システムの開発は、動的単一モードレーザの開発によって加速度的に進み、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯での $1.6\ \text{Gbit/s}$ 伝送が検討され、ファイバの波長分散が再度問題となった。動的単一モードレーザは、マルチ Gbit/s の高速変調時でも単一モード発振を保っていることが確認されていたが、変調に伴うキャリア密度の微細な変化によってチャーピングと呼ばれる微小な波長変化が生じる。当初はこの波長変動は大きな問題とはならなかったが、伝送速度の急激な上昇で $1.5\ \mu\text{m}$ 帯 SMF 伝送システムではこの微小な波長変動が通信を制限する主要な要因となりチャーピング抑制が重要課題となった。

図 4 の図中に、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザを $2\ \text{Gbit/s}$ の RZ 信号で変調したときのスペクトル変化を示した。高速変調時に観測される発振スペクトルは、高分解能のスペクトロメータで観測すると、図中に示した発振スペクトルのように複数のピークをもった一見、多モードのような波形が得られる。変調条件により多数のピークが観測されるため、戻り光による外部モードの可能性も検討されたが、緩和振動に伴うキャリア密度変調で説明可能なことが分かった [21]。スペクトルで観測される複数のピークは、キャリア密度の時間変化での極大・極小に対応しており、時間的に観るとこのキャリア密度に対応する発振周波数が長期的にわたって持続するためである。直接変調によるチャーピングは変調条件により大きく変化する。図 4 は横軸にレーザのバイアス電流、縦軸に発振スペクトル幅をとったものであり、スペクトル幅がバイアスに強く依

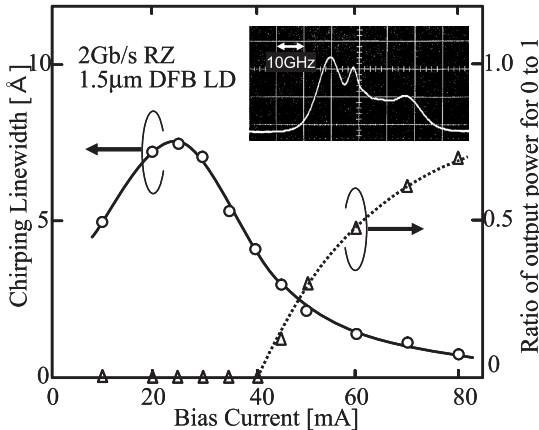


図4 変調時のDFBレーザーのスペクトル広がり
Fig. 4 Lasing spectrum broadening in a DFB laser under direct modulation.

存することを示している。低バイアスでは、0 レベルでの電流が発振しきい値以下となるためキャリア密度変動が大きく、チャーピングによる線幅は7 Å程度まで広がっている。一方、高バイアスでは線幅は狭くなるが、図中に示した0 レベルでのパワー(Δ)が増大しOn/Off比の劣化で受光感が劣化する。したがって変調バイアスは、線幅が狭くON/OFF比も十分確保できる、しきい値付近に設定することが重要である。当時はレーザーの温度制御は一般的ではなく、温度によるレーザー特性の変化をバイアス電流で補償していたため、バイアスの精密な制御は困難であった。現在では、温度制御でレーザー特性を安定させしきい値付近でバイアスを制御することによって低チャープな直接変調を得ている。チャーピングは変調に伴うキャリア密度変動による屈折率変化で起こるものであり、線幅増大係数に比例して増大する。このため、量子井戸活性層更にひずみ量子井戸活性層の導入によって線幅増大係数が低減され、より高速な直接変調が可能となっている。

上述のチャーピングは半導体レーザー一般に共通な現象であるが、DFBレーザーを高出力動作させたときにだけ現れるチャーピング現象も観測された[22]。DFBレーザーでは共振器内部の光強度分布が大きく、高出力動作ではこれを反映してキャリア密度分布ができる。この分布に伴う屈折率分布が局所的なブラッグ波長を変化させるためモード波長が変化しチャーピングが生じる。当初のDFBレーザーは端面反射の影響を少なくするため結合定数を高めに設定していたが、共振器内の光強度分布を減らしチャーピングを抑えるため、結

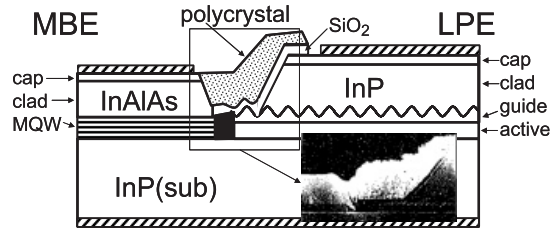


図5 MQW吸収型変調器集積DFBレーザー
Fig. 5 MQW modulator integrated DFB lasers.

合定数を低めに抑え端面の影響は無反射コーティングで抑制する方向に変化した。一方、この現象は共振器内のキャリア密度分布を制御すれば、発振周波数の制御が可能となる可能性を示唆している。後述する電極分割型DFBはこのキャリア密度分布を利用し発振周波数を制御するものである。

チャーピング抑制の研究は電極分割型DFBレーザーによる光周波数制御やひずみ量子井戸構造の導入等によるチャーピング抑制技術へと発展するが、より本質的な解決法として外部変調器をチップ内に集積化したDFBレーザーが検討された。InP系レーザーと集積可能な変調器として、MBE法によって成長したInGaAs/InAlAs系MQWを用いた電解吸収型(EA)変調器が開発された。半導体量子井戸の吸収端が加えた電界により長波長シフトする量子閉込めシュタルク効果を利用し、小型・低電圧で動作する特徴を有している。光通信用に用いられているDFBレーザーは単一モード発振を実現するため内部に回折格子が形成されているが、これによって共振器の構成に反射鏡が不要となり集積に適するという特徴も有している。これを用いて1986年にDFBレーザーとEA変調器を集積化した素子が開発された[23]。図5はEA変調器集積DFBレーザーの素子構造を示している。素子内部でDFBレーザーとEA変調器が直列に接続され、CW発振するDFBレーザー光をEA変調器で変調することでチャーピング抑制を実現した。当時は、液相成長でレーザーを、MBE法でMQW変調器を作製したため複雑な構造となっているが、90年ごろからはレーザー活性層の成長もMOVPE等の気相成長に替わりどちらもInGaAsP系MQW構造となったため、シンプルな構造でより高性能な素子が作成されるようになった。変調器部分のバンドギャップ波長はレーザー部分より数十nm短波長側に設定されているためレーザーの発振光に対してほぼ透明であり、レーザー光は変調器を低損失で

通過し素子端面から出力される。一方、変調端子に電圧を印加すると前述のように吸収端が変化しレーザ光を吸収するため素子からの光出力は大幅に低下する。したがって、変調器部分に信号に応じた変調電圧を加えることによって変調を受けた光信号が得られる。素子の大きさは通常の半導体レーザとほぼ同じであり、通常のレーザと同一のパッケージに封入することが可能である。電極等の寄生容量の抑制や高周波実装技術によって 40 Gbit/s で動作する素子が作成されている [24]。

EA 変調器は電界印加による光吸収係数変化を利用して光の強度を変調するものであるが、電界印加に伴って屈折率も微小に変化するため、同時に光の位相変調が掛かりチャージングを引き起こす。このチャージングは、レーザの直接変調に比べるとかなり小さいが、ニオブ酸リチウム (LN) 等を用いた変調器がゼロチャープを実現可能なことと比べると大きな欠点であった。このため従来は比較的低速な 2.5 Gbit/s システムを中心に用いられてきたが、量子井戸構造の最適化によってゼロチャープに近い動作が実現されており、より高速なシステムへの導入が可能となった。

5. コヒーレント通信光源

1980 年代後半には光のヘテロダイン・ホモダイン検波を用いるコヒーレント伝送方式が精力的に検討され、これに伴って半導体レーザの狭線幅化、及び直接周波数変調の検討が主要な検討課題となった。コヒーレント通信は電波系の伝送同様、ヘテロダイン・ホモダイン技術を受信系に用いることで大幅な感度向上を成し遂げるものであり、光のビートにより高純度の信号を得るため狭線幅なレーザ光源が要求され、更に位相あるいは光周波数に情報を乗せるため光信号の強度だけでなく位相・周波数等を変調する技術が求められた。

狭線幅化に関しては、当初、外部鏡型半導体レーザが用いられていたが、実際の通信機の過酷な設置条件に耐え得るモノリシック型レーザの開発が要請された。当初は通常の DFB レーザの共振器長を長くし光子寿命を長くしてコヒーレンスを上げる試みがなされたが、高光出力では線幅低下が飽和し狭線幅は得られなかった。線幅低減には、共振器長延長と同時に閉込め係数及び回折格子の結合定数の低減を同時に進める必要があった。この点では気相成長法の導入は重要であり、量子井戸構造を用い導波路構造とキャリア閉込め構造を最適化しながら長共振器化を進め線幅の低減が進め

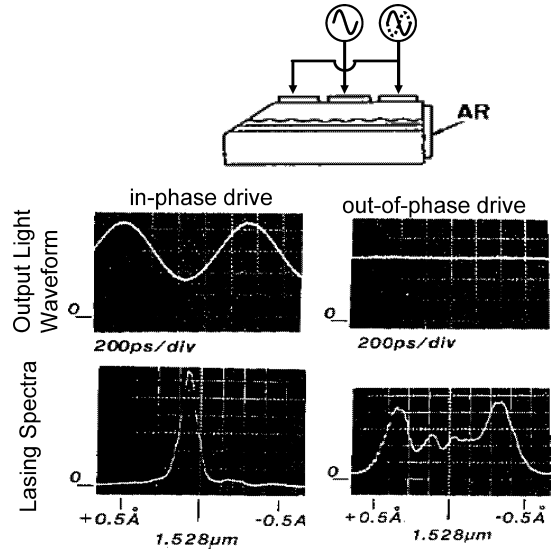


図 6 多電極 DFB 型 FM レーザの変調特性
Fig. 6 Frequency and amplitude modulation in a multi-electrode DFB laser.

られた。また、半導体レーザの線幅については通信に影響を与えない低周波雑音が大きいことも指摘されており、これを除くと 3.6 kHz という極めて狭い線幅が実現されている [25]。

光の周波数や位相情報を用いるコヒーレント伝送では、光の強度と位相を独立に制御することが重要となる。半導体レーザの直接変調では、キャリア密度変化による複素屈折率変化によって、光強度と光位相が同時に変化するが、個別に制御することはできない。前述のように DFB レーザでは、共振器内部にキャリア密度分布が生じると屈折率変化で発振モードが影響され、発振周波数の変化が起こる。この現象を利用し、注入電極を共振器方向に分割してキャリア密度分布を人為的に作り出すことによって光周波数の制御が可能となった [26]。図 6 はこのような電極分割型 DFB レーザの変調特性を示したものである。共振器の中心付近と両端とを位相及び振幅が異なる正弦波で変調し、チャージングを抑制した振幅変調 (左)、及び振幅変動を抑制した周波数変調 (右) を得ている。このレーザでは、周波数変調をもらすキャリア密度変化が共振器内で起きるためキャリア寿命による変調周波数制限が大幅に緩和され、高速変調が可能となる。このレーザは周波数・位相変調用に用いられコヒーレント通信の光源として活躍した [27]。

コヒーレント通信は、次項で述べる光増幅器の登場

によって実用化されることはなかったが、半導体レーザーの性能に厳しい条件を課することによってレーザーの進歩に多大な貢献をした。狭線幅レーザーの技術は映像伝送用の AM-FM 一括変換に生かされており現在の光加入者システムでも活躍している。FM 変調レーザーの技術は波長可変レーザー開発に引継がれ、DWDM 用として用いられ始めている。また、ペルチェ素子を用いた温度制御による波長安定化が検討されたのもこの時期であり、現在の DWDM システムを支える基本技術の一つになっている。

6. 光ファイバ増幅器と半導体レーザー

1980 年代末に開発された光ファイバ増幅器 (EDFA) は急速に実用化され光通信システムを変貌させた。光ファイバ増幅器を中継器として用いることで光通信システムの構成は大幅に簡素化される。EDFA を動作させるためには、ファイバ中にドーブされた希土類を励起し反転分布状態とする励起光源が不可欠である。高信頼で安価な EDFA を実現するには、この励起光源も半導体レーザーで実現することが不可欠であった。当初、励起波長としては $1.48 \mu\text{m}$ が要求され、InGaAsP/InP 系のレーザーが開発が進められた。この付近の波長は、従来用いられてきた液晶成長法では結晶成長が困難な波長領域であったが、当時、半導体レーザー作成に関しては、液相成長から MOVPE 等の気相成長への移行が起こっており、気相成長法を用いることで高出力な励起レーザーが作成された。気相成長法の導入は同時に超薄膜成長を用いた多重量子井戸 (MQW) 構造の形成をも可能とし、MQW 構造による高出力化によって、EDFA の実用化に大きく貢献した。

当初、 $1.48 \mu\text{m}$ 励起で実用化された EDFA であったが、希土類イオンの励起状態の検討から、励起波長を $0.98 \mu\text{m}$ にした方がより強い反転分布が得られ低雑音の増幅器となることが明らかになり、 $0.98 \mu\text{m}$ 帯半導体レーザーの開発が強く要請されるようになった。この波長は、図 2 で分かるように、GaAs 系にとっては波長が長すぎ、InP 系レーザーにとっては波長が短すぎるため、開発は困難が予想された。しかし、前述のようにこのころの通信用レーザーは液相成長から気相成長の移行の時期であり、量子井戸構造の詳しい検討がなされていた。非常に薄い量子井戸構造では、格子整合がとれていなくても結晶層がひずんだ状態で単結晶となる。このような格子整合がとれていない活性層を用い

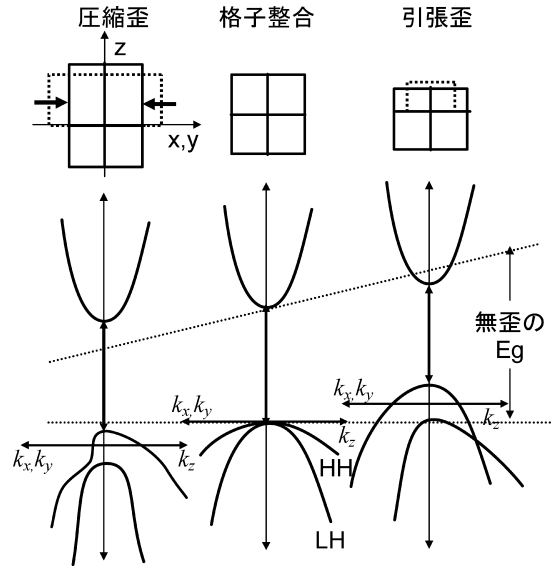


図 7 ひずみによる結晶構造及びバンド構造の変化
Fig. 7 Strain induced change in the lattice structure and the band structure of crystals.

るひずみ量子井戸レーザーが開発された時期であった。これによって組成の自由度が広がり、従来は不可能とされていた波長での発振が得られる可能性が指摘された。InGaAs/GaAs 系のひずみ量子井戸系については先駆的な研究が行われており [28]、これに基づいて励起光源の可能性が検討され、 $0.98 \mu\text{m}$ 帯での発振が実現し励起光源として十分な特性を有することが確認された [29]。当初は、端面の急速劣化等信頼性に問題を抱えていたが様々な端面処理技術開発によって実用レベルの寿命が達成された。

一方、当初懸念された活性層のひずみに伴う劣化はほとんど観測されず、むしろひずみ導入による著しい特性改善が確認された。図 7 は、ひずみ量子井戸の結晶とバンド構造を示したものである。圧縮ひずみでは基板結晶より格子定数が大きい結晶を成長し、界面方向には結晶格子は圧縮され逆に界面に垂直な方向に伸びる。引張ひずみではこの逆の結晶構造になる。バンド構造はこのひずみの影響を受け、特に対称性が低い価電子帯では k ベクトル方向によってエネルギーレベルが異なることになる。このために、価電子帯は分裂し原点付近での状態密度が低下する。これによって、発振しきい値の低減、線幅増大係数の低下が実現できる。高性能な $0.98 \mu\text{m}$ 帯レーザーの実現はこの事実を再認識させ、波長帯ではひずみを必要としない InP 系の

通信用レーザにもひずみが導入される契機となった。ひずみ導入の効果は著しく、現在では通信用レーザはひずみ量子井戸構造が主流となっている。

EDFA を用いるシステムでは中継器で波形整形処理を行わず線形増幅だけで数百 km の伝送を行うため、分散の累積による波形劣化が起こりやすい。半導体レーザを直接変調する送信機は波長変動を伴うため、EDFA を用いるシステムではレーザは CW 発振とし外部変調器で符号化を行う構成が多く用いられるようになった。外部変調器を用いた光送信機は直接変調を用いた場合と比較して大幅なコスト増となるが、光増幅器を用いるシステムでは中継器には光送信機は存在せず、送信器は送信側に一つ必要なだけであり、高価な送信器を用いてもシステム全体としてコスト増は少ない。このため光増幅器を用いるシステムでは、光源の DFB レーザを一定光強度で発振させ、ニオブ酸リチウム (LN) 等で構成される外部変調器で符号化する送信機を構成することが多くなり、幹線系については直接変調に関する検討は下火となった。

一方、ほぼ同時期には光の加入者系への導入を目指した低価格システムの開発も進められていた。このシステムはコストの制約が強く、レーザには無温調で高速変調可能、高出力など多数の要求が課せられ厳しい開発が進められた。当初、これらの条件をすべて満足することは困難であったが、上述のように通信用光源にひずみ量子井戸構造が用いられ始めた時期であり、ひずみの最適化によって急速な特性改善が進んだ。これによって、低価格で高性能な光源の開発が進み光加入者システムの実現に貢献した。

7. 波長可変光源

波長可変レーザの研究は長い歴史をもち、通信用としては DBR 型で 1983 年に報告されている [30]。コヒーレント通信の検討が進められた時期には活発な検討が行われたが、その後の光増幅器を用いた TDM 主体のシステムの時代には検討は下火となる。その後、多数の波長を用いる DWDM システムが開発され波長数が数十チャンネルになると再度重要な検討課題に浮上した。WDM システムでは波長ごとに異なるバックアップ光源を準備する必要があり、波長数増に伴いバックアップ光源及びその管理コストが大きな負担となってきており、波長可変光源には強い開発要請がある。波長可変光源はバックアップ用として重要なだけでなく、素子のコストダウン及び信頼性の向上が進め

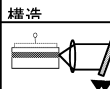
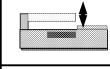

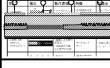

タイプ	構造	動作原理	特徴	問題点
(1)外部回折格子型レーザ		・マイクロマシンによる光フィルタ	・広域波長可変 (~100nm)	・モードホップ ・波長安定度
(2)マイクロマシン面発光レーザ		・マイクロマシンによる共振器長	・モードホップ フリー	・波長安定度
(3)温度同調 DFB-LD、		・温度による屈折率変化	・モードホップ フリー	・波長可変速度 (> 1s)
(4)広帯域波長可変 DBR レーザ		・電流注入 ・波長変化増倍	・高速波長可変	・モードホップ ・波長制御
(5)温度同調外部フィルタ型レーザ		・温度同調形エタロンフィルタ	・機械的安定性	・波長可変速度 (> 1s)

図 8 DWDM 用波長可変レーザ

Fig. 8 Tunable lasers for DWDM optical communications.

ば、将来的には DFB レーザを置き換えることも期待されている。

DWDM 用波長可変光源は、図 8 に示すような様々な構成で開発が行われている。波長可変光源は、回折格子の回転など機械的な変化を利用する (1) 外部回折格子型、(2) 面発光型 [31] と、温度や電流による屈折率変化を利用する (3) DFB アレー [32] (4) SG-DBR [33] 及び SSG-DBR レーザ [34]、(5) 外部フィルタ型、とに大別できる。機械的な共振器の変形を用いる (1) は古くから用いられてきた構成であるが、マイクロマシン技術や面発光構造 (2) の導入で飛躍的な小型化・高信頼化が進み、通信用で用いられる可能性が出てきている。機械的移動による波長変化は屈折率変化と比べ大きく、単純な構成で広範囲の波長可変が得られる特徴があるが、今のところコスト・信頼性の両面から屈折率変化型が実用化では先行している。

屈折率変化型では、(3) は DFB レーザの温度による波長変化、(4) は DBR レーザの電流による波長変化を利用するモノリシック型である。(5) は外部共振器型であるが、温度によるエタロンフィルタの波長変化を利用することで機械的な移動を抑え高い安定度を得ている。DWDM で要求される波長可変幅はコヒーレント伝送で要求された可変幅に比べかなり大きく、温度・電流による 1% 程度の屈折率変化で得られる波長変化では十分でない。このため、屈折率変化を利用するレーザでは、屈折率変化を増倍する何らかの機構が必要となる。(3) は波長が異なる DFB レーザをアレー化し、発振させるレーザを切り換えることで波長可変範囲を拡大しており、(4) (5) では前述の C^3 レー

ずで見出されたバーニア効果を利用し屈折率変化を拡大している。

波長可変レーザーの実用上の問題点は、周波数の長期安定性を保証することである。現在、通信で実用化されている波長可変光源は(3)と(5)のいずれも温度変化を利用するものが主流である。このような温度による波長可変光源では、温度変化のため数秒程度の波長切換時間が必要である。このため高速な波長切換はできないが、波長安定度の点では有利である。温度制御型では、急激な波長変化が起こらないため、瞬時に波長ずれやモードとびが起こる可能性がなく、発振波長については高い信頼性が期待でき、現時点では実用化で先行している。

一方、電流制御型の波長可変レーザーは電氣的制御だけを用いるため、ナノ秒オーダーの高速な波長切換が可能である。(4)の光源では、実験室レベルでこのような高速波長スイッチ動作が確認されており[35]、将来のダイナミックなWDMネットワーク用の光源として有用であることが期待されている。波長安定性については、縦モード変化を抑制し発振波長を安定化する制御回路が作製されているが[36]、実用化を進める上では制御回路を含めた信頼性を保障する手段を確立することが必要である。

8. 素子作製技術・基盤技術

最後に、通信用半導体レーザーの進歩を支えた作製技術及び基盤技術について簡単にまとめておく。初期の半導体レーザー結晶は液相成長によって作製された。液相成長は、高純度な結晶を容易に作製可能な手法であるが、薄い活性層の成長は数秒で終わってしまうため活性層厚の精密な制御は不可能であった。GaAs系では、80年前後からMBE法を用いた気相成長法が用いられ、これによって超薄膜成長を用いたMQW構造がレーザーに導入された。しかし、InP系では気相成長の導入はMOVPE法が確立される1990年前後まで遅れ、MQW構造の導入はGaAs系に比べ約10年遅れた。しかし、MQW構造の導入は量子効果による特性改善だけでなく光とキャリアの閉込めを独立に最適化できる点でも重要であり、コヒーレント用光源、変調器集積光源を中心に急速なMQW化が進んだ。MQWによるレーザー特性改善はひずみMQW導入後は特に著しく、温度特性・変調特性等を急速に改善した。

プロセス技術に関しては1990年代のドライエッチング技術確立が大きく、これによって半導体で曲り導

波路を安定に作製することが可能となり、各種の集積化光源の実現に結び付いた。露光技術は、当初はコンタクト露光が主流であったが、1980年代中ごろから縮小投影や電子ビーム露光も用いられるようになり、波長より微細なパターンを安定的に形成できるようになった。これによってSSGのような特殊な回折格子やフォトニック結晶のような微細な構造が作製可能となった。このほかにも、半導体レーザーの発展につれて端面反射率制御など多数の基盤技術が確立された。半導体レーザーのこの40年間の急速な進歩は、作製技術・基盤技術の進歩と一体となって進んだものである。

9. む す び

以上、およそ40年にわたる通信用半導体レーザー開発の歴史を駆け足で振り返ってきた。冒頭で述べたように光通信システムは約5年ごとに技術の世代交代があり、半導体レーザーもそれに対応して新しいターゲットに向かい開発が進められてきた。現在、実用レベルでDWDMに対応する波長可変化や集積化が進み、研究レベルでは位相変調や多値変調などかつてのコヒーレントに近い技術が導入され光通信の限界に挑戦している。

光通信は送信器の中で発振器が占める比重が極めて大きいことが特徴である。電波領域では、発振器からの信号は数段の増幅器や周波数変換を経て変調器によって符号化され、最終段の増幅器から放射される。一方、光通信では発振器であるレーザーが光に関しては送信機のすべての機能を果たし、符号化された信号が発振器から直接出力される。これは半導体レーザーが類まれな優秀性を有する素子であることを示すが、前述のような複雑な変調方式が導入されることを考慮すると、レーザー単体ですべての機能を実現することは困難になってきている。当面は、外部変調器などの光部品の組合せで構成するが、DWDMの急速な進展によりシステム中の送信機数は急増し、コストダウンに対する要求は厳しくなっている。この点から、光集積技術によるコスト低減はいずれ不可欠となると考えられる。現在は、電界吸収型変調器を集積化したレーザーが実用化されているが、様々な変調方式への対応を考えると位相変調器等の集積化も必要となってくる。一方、幹線系を離れると、レーザー単体の高性能化・低コスト化を進めより小規模な通信システムの光化を推進することが重要である。

前述のように、半導体レーザーの急速な進歩は結晶成長法やプロセス技術の進歩と密接に関連してなされて

きたものである。今後の半導体レーザーの発展も、量子ドット・フォトニック結晶などの新しい基盤技術開発とともに進んでいくものと期待される。

文 献

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, E.L. Portnoi, and M.K. Trukan, "AlAs-GaAs heterojunction injection lasers with a low room temperature threshold," *Fiz. Tekh. Poluprov.*, vol.3, p.1328, 1969 (*Sov. Phys. Semicond.*, vol.3, p.1107, March 1970).
- [2] I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. Foy, and A. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol.17, no.3, p.109, 1970.
- [3] K. Oe and K. Sugiyama, "GaInAsP/InP double-heterostructure lasers prepared by a new LPE apparatus," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.15, pp.740-741, 1976.
- [4] K. Sugiyama and H. Saito, "GaAsSb-AlGaAsSb double hetero-junction lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.11, pp.1057-1058, 1972.
- [5] K. Endo, T. Suzuki, I. Sakuma, N. Wagou, and K. Wakita, "Life test of 1.3 μm wavelength InGaAsP/InP PCW lasers," *National Convention Record of Japan. Society of Applied Physics*, 17P-Q-11, p.164, 1980.
- [6] H. Ishikawa, H. Imai, T. Takanashi, Y. Nishitani, M. Takusagawa, and K. Takahei, "V-grooved substrate buried heterostructure InGaAsP/InP laser," *Electron. Lett.*, vol.17, no.13, pp.465-467, 1981.
- [7] I. Mito, M. Kitayama, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, Y. Odagiri, H. Nishimoto, M. Yamaguchi, and K. Kobayashi, "InGaAsP-W-C-planar-buried-heterostructure laser diode (DC-PBHLD) with effective current confinement," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-1, no.1, pp.195-202, 1983.
- [8] J.J. Hseieh and C.C. Shen, "Room-temperature CW operation of buried-stripe double-hetero-structure GaInAsP/InP diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.30, no.8, pp.429-431, 1977.
- [9] M. Fukuda, *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs*, Artech House, Boston, 1991.
- [10] Y. Suematsu, S. Arai, and K. Kishino, "Dynamic single-mode semiconductor laser with a distributed reflector," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-1, no.1, pp.161-176, 1983.
- [11] M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, A. Katzir, A. Yariv, and H.W. Yen, "GaAs GaAlAs double-heterostructure injection lasers with distributed feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.QE-11, no.7, pp.436-439, 1975.
- [12] F.K. Reinhart, R.A. Rogan, and C.V. Shank, "GaAs-AlGaAs injection lasers with distributed Bragg reflectors," *Appl. Phys. Lett.*, vol.27, no.1, pp.45-48, 1975.
- [13] W.T. Tsang, N.A. Olsson, and R.A. Logan, "High-speed direct single-frequency modulation with large tuning rate and frequency excursion in cleaved-coupled-cavity semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.42, pp.650-652, 1983.
- [14] M.W. Fleming and A. Mooradian, "Spectral characteristics of external cavity control semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.QE-17, no.1, pp.44-59, 1981.
- [15] G. Arnold, K. Petermann, P. Russer, and F.J. Berlec, "Modulation behaviour of double heterostructure injection lasers with coherent light injection," *AEU*, vol.34, no.4, pp.129-136, 1978.
- [16] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.18, no.12, pp.2329-2330, 1979.
- [17] K. Utaka, S. Akiba, S. Sakai, and Y. Matsushima, "Room-temperature CW operation of distributed-feedback buried-heterostructure InGaAsP/InP lasers emitting at 1.57 μm ," *Electron. Lett.*, vol.17, no.25, pp.961-963, 1981.
- [18] T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and T. Ikegami, "CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5 μm wavelength region," *Electron. Lett.*, vol.18, no.1, pp.27-28, 1982.
- [19] Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu, and S. Arai, "GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed built-in distributed-Bragg-reflection waveguide," *Electron. Lett.*, vol.17, no.25, pp.945-947, 1981.
- [20] Y. Nakano, G. Motosugi, Y. Yoshikuni, and T. Ikegami, "Aging characteristics of InGaAsP/InP DFB lasers," *Electron. Lett.*, vol.19, no.12, pp.347-348, 1983.
- [21] Y. Yoshikuni, T. Matsuoka, N. Yamanaka, and G. Motosugi, "Fine structure in the broadened line of distributed feedback lasers under high-speed direct modulations," *Appl. Phys. Lett.*, vol.45, pp.820-822, 1984.
- [22] H. Soda, H. Ishikawa, and H. Imai, "Design of DFB lasers for high-power single-mode operation," *Electron. Lett.*, vol.22, no.20, pp.1047-1049, Sept. 1986.
- [23] Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Itaya, Y. Yoshikuni, and H. Asahi, "Monolithic integration of InGaAsP/InP DFB lasers and InGaAs/InAlAs MQW optical modulators," *Electron. Lett.*, vol.22, no.5, pp.242-243, 1986.
- [24] H. Takeuchi, K. Tsuzuki, K. Sato, M. Yamamoto, Y. Itaya, A. Sano, M. Yoneyama, and T. Otsuji, "NRZ operation at 40 Gb/s of a compact module containing an MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.9, no.5, pp.572-574, 1999.
- [25] 岡井 誠, "半導体レーザーの発振スペクトル制御—狭

- 線幅化と波長可変,” 応用物理, vol.63, no.1, pp.2-13, 1994.
- [26] Y. Yoshikuni and G. Motosugi, “Multielectrode distributed feedback lasers for pure frequency modulation and chirping suppressed amplitude modulation,” *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-5, pp.516-522, 1987.
- [27] K. Iwashita, N. Takachio, Y. Nakano, and N. Tsuzuki, “Optical CPFSK 2 Gbit/s 202 km transmission experiment using a narrow-linewidth multi-electrode DFB-LD,” *Electron. Lett.*, vol.23, no.19, pp.1022-1023, 1987.
- [28] S.E. Fischer, D. Fekete, G.B. Feak, and J.M. Ballantyne, “Ridge waveguide injection laser with a GaInAs strained-layer quantum well,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.50, p.714, 1987.
- [29] S. Uehara, M. Horiguchi, T. Takeshita, M. Okayasu, M. Yamada, M. Shimizu, O. Kogure, and K. Oe, “0.98-pm InGaAs strained quantum well lasers for erbium-doped fiber optical amplifier,” *Tech. Dig. Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC'89)*, 20PDB-11, Kobe, Japan, 1989.
- [30] Y. Tohmori, Y. Suematsu, H. Tsushima, and S. Arai, “Wavelength tuning of GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed built-in distributed Bragg reflector,” *Electron. Lett.*, vol.19, no.17, pp.656-657, Aug. 1983.
- [31] M.S. Wu, E.C. Vail, G.S. Li, W. Yuen, and C.J. Chang-Hasnain, “Widely and continuously tunable micromachined resonant cavity detector with wavelength tracking,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.8, no.1, pp.98-100, 1996.
- [32] C.E. Zah, M.R. Amersfoort, B.N. Pathak, F.J. Favire, Jr., P.S.D. Lin, N.C. Andreadakis, A.W. Rajhel, R. Bhat, C. Caneau, M.A. Koza, and J. Gamelin, “Multiwavelength DFB laser arrays with integrated combiner and optical amplifier for WDM optical networks,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.3, no.2, pp.584-597, 1997.
- [33] V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L.A. Coldren, “Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.29, no.6, pp.1824-1834, 1993.
- [34] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, “Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.29, no.6, pp.1817-1823, 1993.
- [35] Y. Sakai, Y. Yoshikuni, Y. Tachikawa, H. Ishii, S. Suzuki, and H. Tsuchiya, “FDM optical switching of 16 channels at 5 Gbit/s data rate using an SSG DBR laser and arrayed-waveguide grating,” *Electron. Lett.*, vol.30, no.16, pp.1300-1302, 1994.
- [36] H. Ishii, F. Kano, and Y. Yoshikuni, “Wavelength stabilization of a superstructure-grating DBR laser

for WDM networks,” *IOOC/ECOC '97*, MO3B-4, Edinburgh, UK, 1997.

(平成 21 年 1 月 8 日受付, 3 月 27 日再受付)



吉國 裕三 (正員:フェロー)

昭 52 東大・工卒 . 昭 57 同大大学院工学系研究科博士課程了 . 同年 4 月より日本電信電話公社武蔵野電子通信研究所入社 . 以来, 光通信用半導体レーザーの高性能化の研究, 半導体光集積素子の研究開発に従事 . 東京大学先端科学技術研究センター客員助教授, NTT 光エレクトロニクス研究所特別研究員, NTT フォトニクス研究所先端光デバイス研究部長等を経て, 平 18 年 10 月より北里大学理学部物理学教授, 現在に至る . 1984 年 9 月 ECOC Best Paper 賞, 1986 年 2 月本会篠原記念学術奨励賞, 2001 年 6 月 H13 全国発明表彰協会の会長賞, 2005 年 9 月本会エレクトロニクスソサイエティ賞受賞 . 日本応用物理学会, 米国電気電子学会, 米国光学会各会員 .