



## 光集積回路に向けた半導体レーザー技術\*

中野 義昭

東京大学工学部電子工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1992年6月30日受理)

### Semiconductor Laser Technology toward Photonic Integrated Circuit

Yoshiaki NAKANO

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,  
University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

#### 1. はじめに

光の発振器であるレーザーや、光変調器、光偏向器、光増幅器、光検出器などの光エレクトロニクス素子や、電子素子の集積回路と同様に、一つの半導体基板上に一体集積化することができれば、光エレクトロニクス応用機器・装置の高性能化、小型化、低消費電力化、低価格化に資するであろうことは想像に難くない。筆者の所属するグループは、このような半導体モノリシック光集積回路の実現を目指して研究を行っている。

その中で特に筆者がこれまで主に担当してきた課題は、(1)集積化に適した光源の開発およびその高性能化、ならびに、(2)光源集積化の要素技術の確立、と行うことができる。現在、長距離大容量光通信に用いられている分布帰還型 (distributed feedback; DFB) 半導体レーザーは、高いスペクトル純度を有するのみならず、通常の半導体レーザーのように劈開端面を必要としないので、半集積回路向き半導体レーザーの一つと考えられてきた。しかし、いくつかの問題点が存在するため、今のままでは集積化用光源として真に適当とは言えない。

本稿では、上記(1)の課題に対する解答として筆者らがこれまで研究してきたストライプ幅変調構造 DFB レーザーと利得結合構造 DFB レーザーについて解説する。また同時に、(2)に対する一つのアプローチとして

最近検討した、斜交エッチング端面を有する DFB レーザー/光増幅器集積化素子についても紹介する。ただし紙面の都合上、DFB レーザー一般の構造、特長、問題点については割愛した。予備知識として必要な場合は、筆者らの解説記事<sup>1)</sup> その他を参照願いたい。

#### 2. ストライプ幅変調構造 DFB レーザー

DFB レーザーの主要な問題点の一つは、発振モードが内蔵する回折格子のブラッグ波長を挟んで二つ存在することである。この二モード性を解消し、DFB レーザーを完全に単一の縦モードで発振させるための構造 (縦モード制御構造) が、これまでいくつか提案されている。中でも「四分の一波長位相シフト」と呼ばれる構造が最も普及している。本構造では、共振器中央部において回折格子空間位相を 180 度変化させ、ちょうどブラッグ波長上で発振の位相条件が満たされるようにする。

しかし、このような回折格子を作製するのは容易でなく、また空間位相が不連続的に変化する共振器中央部に光電界が集中するため軸方向空間ホールバーニングが強調される問題点がある<sup>2)</sup>。さらに、DFB 共振器はフェブリーペロー共振器に比べ導波路の TE, TM 偏光間の反射損失差が小さく、両方の偏光が発振する問題がしばしば生じるが、上記構造はどちらの偏光にも同等に作用し、TE/TM 弁別性がない。これらの偏光を弁別する別の機構が必要となる。

一方、周期が一樣でない回折格子 (チャープグレーティング) を用いても、縦モード制御の行えることが報

\* 本稿は平成3年度光学論文賞受賞記念講演 (1992年3月29日、日本大学) を骨子として、まとめたものである。

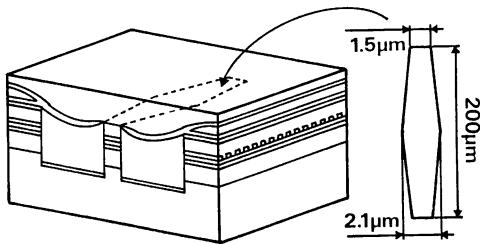


図1 ストライプ幅変調構造を有する GaAs 系 DFB DCPBH レーザー. RIE の異方性エッチング特性により, 2本の溝の断面形状は矩形となる.

告されている<sup>5)</sup>. しかし, これも作製は容易でない. チャーフトグレーティングと同等の効果は, レーザーストライプ導波路の実効屈折率を変調しても得ることができる. 実効屈折率を空間的に変調する方法はいろいろ考えられるが, 導波路の幅を変調してやるのが最も簡便かつ有効であろう. このような縦モード制御構造を, 筆者らは 1984 年に提案した<sup>4)</sup>. そして, このストライプ幅変調構造を, 二重チャネルプレーナ埋め込みヘテロ (double channel planar buried heterostructure; DCPBH) 型の GaAs 系 DFB レーザーに適用した<sup>5,6)</sup>.

素子の概略を図1に示す.  $\text{BCl}_3$  と  $\text{Cl}_2$  の混合ガスをエッチャントに用いた反応性イオンエッチング (reactive ion etching; RIE) により, 二次回折格子 (周期  $0.25 \mu\text{m}$ ) を印刻した. これを埋め込んだ DFB レーザー基板に, 幅がゆるやかに変化するストライプを形成した. 図示の寸法は, 図示の形状に対し単一縦モード選択性が最大になるよう設計されたものである<sup>6)</sup>. 共振器長の半分にあたる  $100 \mu\text{m}$  進む間のストライプ幅の変化は, わずか  $0.6 \mu\text{m}$  であり, 実現するには, いうまでもなく非常に高い加工精度が要求される. ここでは, ストライプパターンの生成に電子線描画装置を, 基板上への転写には RIE をそれぞれ用いることにより, 必要な精度を確保した.

図2に, 試作素子の発光スペクトル特性を示す. 阻止帯中央部のブラッグ波長にごく近接した一定の波長で発振が生じている. 図2(a)は, 観測された閾値近傍スペクトルの一例であるが, 比較のため, 計算で求めたものを図2(b)として並置してある. 理論スペクトルは慣習上横軸が波長でなく周波数で表示されていることに注意されたい. したがって, 横軸を反転して観測スペクトルと比較すると, 理論的予測と実験結果が非常に良い一致を見せることがわかる.

ストライプ幅変調構造では, 四分の一波長シフト構造

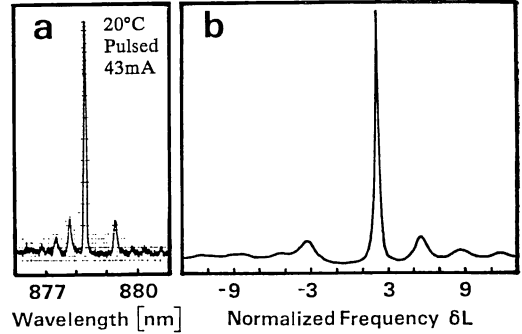


図2 ストライプ幅変調構造 GaAs 系 DFB DCPBH レーザーの閾値近傍発光スペクトル. (a)は観測されたもの, (b)は理論計算の結果である. (計算結果は慣習上, 横軸が規格化周波数表示されているので, 実測スペクトル(a)と比較するには左右を反転する必要がある.)

と異なり位相シフトが徐々に与えられるので電界強度分布が緩やかになり, 軸方向空間ホールバーニング現象が緩和される. また, ストライプ形状をうまく設計すると, 変調時の発振波長変動 (チャーピング) のうち, 上記現象に起因する成分を消去しうることが明らかになっている<sup>7,8)</sup>. 本構造はまた, TE/TM 偏光弁別性も有する<sup>9)</sup>. つまり, 徐々に与えられる位相シフトが TE 偏光と TM 偏光で異なるため, TE 偏光に対して最適化したストライプ形状は TM 偏光に対しては有効に働かず, したがって TE 偏光での発振を助長することが可能である (逆に TM 偏光を選択することも可能).

このように, ストライプ幅変調構造は従来の縦モード単一化構造に比べいくつかの利点を有する. しかしとりわけ, 作製自体がストライプを形成する際のマスクパターンの修正のみで行え, 付加的工程が不要であることが, 光集積回路における DFB レーザーの縦モード制御構造として最適と考える理由である.

### 3. 利得結合構造 DFB レーザー

分離閉じ込めヘテロ構造 (separate confinement heterostructure; SCH) の採用で半導体 DFB レーザーが初めて現実的になって以来<sup>10)</sup>, すべての DFB レーザーがこの形態をとってきた. この場合, 光分布帰還は透明な導波路層の厚みの変化に由来する屈折率の周期的摂動を通じて行われ (屈折率結合), 前記の二モード縮重の問題を生じる. ところで Kogelnik と Shank は, 光分布帰還が利得の周期的変化により行われる, つまり利得結合の場合には, 二モード縮重は生じず, ブラッグ波長

での完全単一モード発振が得られることを指摘していた<sup>11)</sup>。この原理を半導体 DFB レーザーに適用できれば、前章で述べたような縦モード制御のための特別な素子構造が不要となる。

筆者らは、1988 年来この可能性を追求している。まず、SCH 構造における導波路層の Al 組成比を小さくし、これを吸収性にする事で、活性層の利得から導波路層の損失を減じた正味の利得を、軸方向に周期的に変調することを試みた。その結果、確かに単一モード性が改善されること<sup>12)</sup>、さらに重要で興味深いことには、単一モード性が劈開端面反射に影響されにくいことを発見した<sup>13)</sup>。しかし上記の素子構造では、損失を付加するので閾値電流が上昇する、あるいは利得結合以上に強い屈折率結合が寄生し、利得結合の働きを阻害する、などの問題点があった。

そこで 1989 年に、これらの問題点がなく、ほぼ純粋に利得結合を実現することのできる新たな構造を提案した<sup>14)</sup>。図 3 は、その純粋 (屈折率結合を含まないという意味) 利得結合構造の概念図である。活性層自体に周期的凹凸が形成されているため、導波光が活性層から得る利得の大きさも、周期的に変化する。したがって、利得結合が生じる。活性層の凹凸により同時に発生する屈折率結合成分は、その直下に位相の反転した透明な回折格子が存在するため、条件が整えば相殺され得る。また、吸収性の領域を付加する必要がないので、低閾値動作が期待される。この構造の利得および屈折率結合係数を GaAs 系素子を例に計算した結果、活性層の格子溝高さが 85 nm の時屈折率結合が消失し、純粋な利得結合の得られることがわかった。

実素子は、パターン形成基板上の有機金属気相エピタキシャル成長 (organo-metallic vapor phase epitaxy; OMVPE) の特殊な性質を利用して作製する。まず、パターン供給層までを第一段階 OMVPE で成長し、その上に回折格子を RIE を用いて形成する。第二段階

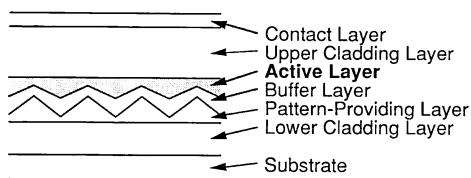


図 3 純粋利得結合 DFB 構造の断面概念図。活性層厚の周期的変化により利得結合が発生する。同時に発生する屈折率変化は、活性層直下の位相の反転した回折格子により打ち消すことができる。

OMVPE で、バッファ層を下地の形状を保存するべく比較的高い速度で成長し、続けて活性層を、上面が平坦化されるように比較的低い速度の条件で成長する。ここでは、活性層自体に格子を形成するものの、直接印刷するわけではないので、発光効率低下の心配は少ない。

上記の作製法を GaAlAs/GaAs ダブルヘテロ構造に適用し、得られたエピタキシャルウェーハを、幅 3~6  $\mu\text{m}$ 、長さ 200  $\mu\text{m}$  のリッジ導波路型素子に加工した。端面は劈開時のままとし、コーティング等は施していないので、反射率は約 30% 程度あるものと見込まれる。

試作素子において、低閾値室温連続発振が達成された<sup>15)</sup>。閾値電流として 17 mA、片端面当りの微量子効率として 42% という良好な値が得られている。活性層に凹凸を形成したことによる悪影響は全く見られていない。図 4 は、同素子の 9 mW 出力時の発振スペクトラムである。45 dB という大きな副モード抑圧比が得られている。劈開端面反射が存在するにもかかわらず、この種の非常に優れた単一モード性がほとんどすべての素子で、しかも縦モード単一化構造の助けを借りずに得られたことは特筆に値する。

最近では、光通信に重要な長波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯用 InGaAsP/InP 素子<sup>16)</sup>や、単一量子井戸<sup>17)</sup>、多重量子井戸素子<sup>18)</sup>も作製し、さらに良好な発振閾値と副モード抑圧比、ならびに高い単一モード歩留りを得ている。

さて、劈開端面を有する通常の屈折率結合 DFB レーザーでは、発振する可能性を持ったモードが、阻止帯をはさむ二つのモードを含めいくつか存在する。どのモードが発振するかは、両端面における回折格子の空間位相によって決る。一方、四分の一波長位相シフトやストライプ幅変調 DFB レーザーにおいても、端面反射による不確定性を除くために、両端面に高品質な反射防止膜が

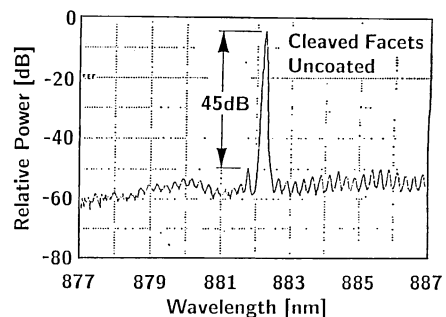


図 4 リッジ導波路利得結合DFBレーザーの9 mW出力時のスペクトル。両端面は劈開面のままであるにもかかわらず、極めて高い単一モード性を示す。

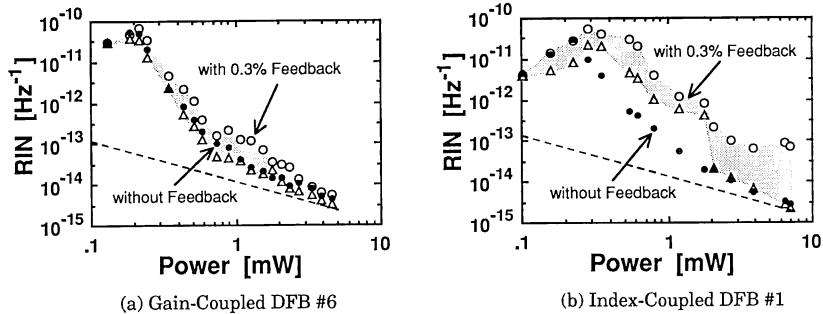


図5 500 MHz で測定された相対強度雑音 (RIN). (a) は利得結合 DFB レーザーの場合, (b) は従来の屈折率結合 DFB レーザーの場合である. 検出器のショット雑音限界を破線で示してある. ●で示したのは, 戻り光のない場合の RIN である. 0.3% の戻り光がある場合は, RIN が戻り光の位相によるようになるが, その最大値と最小値をそれぞれ○と△で示した.

必要となってしまう.

利得結合 DFB レーザーの優れた特長は, 端面反射のような大きな反射があっても, 図4に見たように発振モードが一つに定まり, しかも阻止帯が現れないので発振波長の設定制御性が損なわれないことである<sup>13)</sup>. また, この性質のため, 四分の一波長位相シフト DFB レーザーでは使用することのできない, 高反射-低反射非対称端面コーティング構造が利用でき, したがって一方の端面からの出入取り出し効率を向上することができる<sup>19)</sup>.

また, 通常の屈折率結合 DFB レーザーは外部反射光に対しても非常に敏感で, 使用に当っては大型かつ高価な光アイソレータと組み合わせる必要があった. 光アイソレータは半導体材料で作れないため, このことは DFB レーザーを他の光回路素子とモノリシック集積化する際の妨げともなる. 一方, 利得結合 DFB レーザーには上記の端面反射無依存性があることから, 外部からの反射戻り光に対してもある程度耐性を有するものと期待される.

そこで, 外部反射が利得結合 DFB レーザーに及ぼす影響を, 相対強度雑音 (relative intensity noise; RIN) を尺度に実験的に調べてみた<sup>20)</sup>. 図5は戻り光のない状態と, 0.3% の光を戻した状態における RIN の光出力依存性を, 利得結合 DFB レーザー (a) と通常の屈折率結合 DFB レーザー (b) について測定した結果である. 黒丸で示されているように, 戻り光のない状態での強度雑音特性は利得結合も屈折率結合もほとんど変りはない. 発振後, RIN は光出力の三乗の逆数に比例して単調に減少している. この傾向は, 低雑音単一モードレーザーに共通な性質で, すでに確立されている理論とも合う. 3 mW 以上の出力レベルで  $10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$  以下の

RIN が得られる. したがって, 孤立状態では利得結合 DFB レーザーは, 通常の DFB レーザーと少なくとも同程度の, 良好な低雑音性を有すると結論できる.

一方, 光出力の一部 (0.3%) がレーザーへ戻された状態では, 図5(b)に見られるように, 通常の DFB レーザーの雑音は, 戻り光の位相に応じて 0 から 20 dB の範囲で増加する (白抜き丸が最大値を, 三角が最小値を表している). これとは対照的に, 図5(a)の利得結合 DFB レーザーでは, 雑音は事実上ほとんど増加しない. すなわち, 反射戻り光が存在しても, RIN は出力の増加と共に減少し, 戻り光のない状態とほとんど同じ値を維持することがわかる. 同時に, 戻り光の位相に対する依存性も 10 dB 以内に抑制されている. このように, 外部反射に対する感度が減少することも, 利得結合 DFB レーザーの利点の一つである. 応用によっては光アイソレータの節減も可能であろう.

次に, 半導体利得結合 DFB レーザーがどのような動特性を有するかは, 興味深い問題である. DFB 色素レーザーの研究において, 空間ホールバーニングによるセルフ Q スイッチング効果が光短パルス発生に利用されたことがある<sup>21)</sup>. このセルフ Q スイッチング効果は, 半導体利得結合 DFB レーザーにも存在すると推測される. なぜなら, 共振器 Q 値が活性層におけるキャリア密度に依存しているからである. もしそうならば, 利得結合 DFB レーザーは光短パルス発生光源としても有用となる. また, こうして発生した短パルス光のスペクトラムがどうなるかも, 興味深い点である.

そこで, GaAs 系利得結合 DFB レーザーにおいて, 電気パルス励起利得スイッチング法による光短パルス発生実験を試みた<sup>22)</sup>. 用いた電気パルスは, 幅 130 ps, 尖

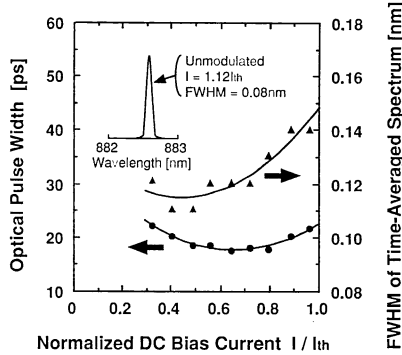


図 6 利得結合 DFB レーザーから発生した光短パルスのパルス幅と、同時に観測した時間平均スペクトル幅、規格化 DC バイアスに対する依存性として示してある。

頭電流値 150 mA, 繰返し周波数 100 MHz である。発生した光パルスは、同期掃引ストリークカメラで観測した。測定したすべての利得結合 DFB レーザーチップから半値全幅 (full width at half maximum; FWHM) 20 ps 以下の光パルスが得られた。最も短いパルス幅は 16 ps である。この値は、他の特性を犠牲にして光子寿命やキャリア寿命を意図的に短縮化するトリックを施した半導体レーザーからのそれに比べるとやや大きい。正常な DFB レーザーから従来得られた値の中では最短である。

利得結合 DFB レーザーの光短パルス発生時の時間平均スペクトラムを観測したところ、単一モード発振を維持していることがわかった。図 6 は、その時の光パルス幅と単一モード時間平均スペクトラム幅の、正規化直流バイアス電流依存性を示したものである。バイアス電流を上げていくと、スペクトル幅は 0.12 nm から 0.11 nm にいったん狭くなり、その後 0.14 nm まで広がっている。用いた分光器の分解能 (0.08 nm) を差し引いて考えると、これらの値は電気励起利得スイッチング法で従来得られた値に比べ相当小さい。

最近さらに、長波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯素子を用いて同様な実験を行った結果、パルス幅とスペクトル幅の積として 0.55 という値を得た<sup>23)</sup>。これは、ほとんどフーリエ変換限界 (0.3~0.44) に近い。このような超低チャープ光パルスは、ソリトン光通信に非常に有用である。

#### 4. DFB レーザー/光増幅器集積化デバイス

半導体レーザーに光増幅器を集積化すると、実効的な外部微分効率を大幅に高めることができるので、小さなレーザー直接変調電流で大きな光強度変調振幅が得ら

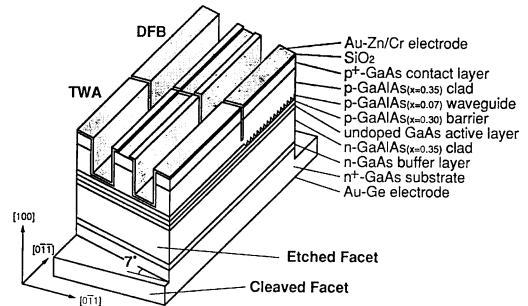


図 7 斜交エッチング端面を有する DFB レーザー/光増幅器集積化デバイスの概念図

れ、高速変調が容易になる。また、光増幅器を外部強度変調器として用いれば、チャージングの抑制された光強度変調信号を得ることができる。そこで、半導体モノリシック集積回路の一例として、DFB レーザー (屈折率結合型) と進行波型光増幅器 (traveling wave optical amplifier; TWA) の集積化を試みた。

図 7 に、GaAs 系材料を用いた試作素子の概念図を示す<sup>24)</sup>。ところで、この種のモノリシック集積化デバイスでは、前章記載のとおり光アイソレータが組み込めないため、端面反射光を介して要素素子同士が結合し相互に干渉することが問題となる<sup>25)</sup>。本素子の特徴は、この光学的クロストークを低減するために、RIE を利用し、出射端面を光導波路に直交する方向に対し 7 度だけ傾けて形成していることである。本方法では、光導波路の方向は全く任意であり、基板に種々の方向のいろいろな素子を集積化しなければならない大規模なモノリシック光集積回路にも適した方法と言える。

作製は、まず GaAs 基板上に OMVPE によって導波路層までを成長した。次に、レーザー部にみに二次回折格子を RIE を用いて印刷した。回折格子上の再成長は、液相エピタキシャル成長により行った。4  $\mu\text{m}$  幅のリッジ導波路を形成した後、7 度斜交端面と、DFB レーザー・TWA 間の電気的分離溝を、やはり RIE を用いて作製した。素子間の分離抵抗は 760  $\Omega$  であった。素子長は DFB レーザー、TWA とともに 300  $\mu\text{m}$  である。

はじめに、斜交エッチング端面の実効的な端面反射率を評価した。TWA 部の利得と自然放光スペクトル上のリップルから算定したところ、0.01% から 0.1% 程度の値となり、劈開端面反射率 (約 30%) と比べると 2 桁以上の改善である。これに簡単な反射防止コーティングを施せば、さらに 1 桁程度の改善が見込まれる。

図 8 に、試作素子の光出力特性を示す。DFB レーザーの閾値電流は、約 20 mA である。端面反射率の小さ

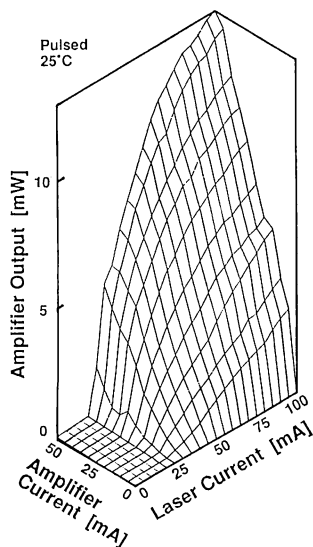


図8 出射端面(光増幅器側)からの光出力をレーザー注入電流と増幅器注入電流の関数として測定した結果

いことを反映して、光出力は TWA 駆動電流に対し単調に増加している<sup>25)</sup>。また、TWA 電流を増加すると、レーザーから見た実効的な外部微効率が增大することがわかる。ただし、高出力領域では TWA 部の利得飽和により線形性が幾分損なわれる。TWA 部の小信号利得の最大値は、50 mA の電流注入で 13 dB であった。この値は、TWA 部の長さを延長するか、発振波長をグレーティングピッチの制御により短縮化することにより、容易に 20 dB 以上まで拡大できる。

DFB レーザー/TWA 集積化のもう一つの利点は、レーザーを常に最適の動作点に保ちつつ、光出力を増幅器電流により調整できることである。本素子の場合、軸方向空間ホールバーニングによる多モード発振を避けるためには、レーザー電流を 35 mA (以下) に保つ必要がある(この時、レーザー側端面からの出力は 1 mW である)。この状態で TWA の電流を 0 から 50 mA まで変化することにより、多モード発振を誘起することなく TWA 側端面からの光出力を 0 から 10 mW まで調整することができた。

次に、DFB レーザー・TWA 間のクロストークを評価した。TWA 駆動電流を変化させても、レーザー電流が一定である限りは、理想的には発振波長は変わらないはずである。ところが実際には、図9に示すように、TWA 電流により発振波長が微妙に影響を受ける。素子 A, B では変化量はたかだか 0.05 nm であるが、C では 0.1 nm の範囲で変動する。このクロストークの原因

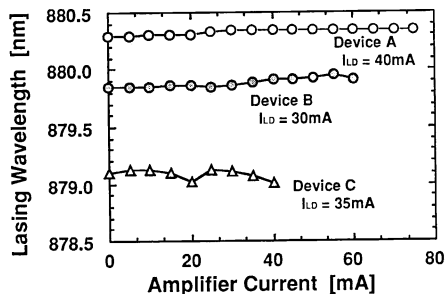


図9 光増幅器への電流注入により引き起こされるレーザーの発振波長変化。レーザーと光増幅器が独立であれば、発振波長は変わらないはずである。

としては、残留する端面反射率による光学的結合の他に、電気的、熱的影響の影響が無視し得ない。今後は、これら光学的結合以外のクロストーク要因を低減する努力が求められる。

## 5. おわりに

以上、筆者が近年携わった研究の一端を紹介した。これらは、冒頭に述べたとおり、半導体モノリシック光集積回路を目標とした光源の研究、開発と総べることができる。ここで論じたストライプ幅変調 DFB レーザーや利得結合 DFB レーザーは、従来の DFB レーザーに比べ光集積回路に適する多くの資質を備えている。今後は、実際に光集積回路に適用し、その有用性を示していきたい。また、光集積化の要素技術として提案した斜交エッチング端面は、DFB レーザー/光増幅器集積化デバイスに応用して良好な結果が得られたので、今後光集積回路におけるさまざまな局面で利用していきたい。これらの成果が、光エレクトロニクス発展の一助となることを期待して、本稿を結ぶ。

本研究全般にわたりご指導、ご援助頂いた本学多田邦雄教授に深くお礼申し上げます。また、3章に関しては神谷教授、羅博士、曹氏、高橋氏、岩岡博士、細松氏、沖氏、井上氏、中島氏、土橋氏に、4章に関しては坂口氏、林氏、陳氏にご協力を頂きました。また、多くの卒業研究生諸氏も本研究に携わりました。以上の共同研究者の方々に深謝致します。

## 文 献

- 1) 中野義昭, 多田邦雄: "GaAs 系分布帰還型半導体レーザーとその縦モード制御", 応用物理, 58 (1989) 1554-1573.
- 2) H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamamoto and H. Imai: "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase adjusted

- DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **23** (1987) 804-814.
- 3) A. Suzuki and K. Tada: "Theory and experiment on distributed feedback lasers with chirped grating," *Proc. SPIE*, **239** (1981) 10-18.
  - 4) K. Tada, Y. Nakano and A. Ushirokawa: "Proposal of a distributed feedback laser with nonuniform stripe width for complete single mode oscillation," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 82-84.
  - 5) Y. Nakano and K. Tada: "Complete single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser with a modulated stripe width structure fabricated using reactive ion etching," *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 387-389.
  - 6) Y. Nakano and K. Tada: "Analysis, design, and fabrication of GaAlAs/GaAs DFB lasers with modulated stripe width structure for complete single longitudinal mode oscillation," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 2017-2033.
  - 7) Y. Nakano, O. Kamatani and K. Tada: "Effects of longitudinal spatial hole burning on the characteristics of phase-shifted DFB lasers—calculation considering longitudinal gain distribution," *11th IEEE International Semiconductor Laser Conference* (IEEE LEOS, New Jersey, 1988) pp.102-103.
  - 8) Y. Nakano, O. Kamatani and K. Tada: "Stable oscillation at high injection level in modulated stripe width distributed feedback laser," *Second Optoelectronics Conference* (Inst. Electron. Inform. Commun. Engineers, Tokyo, 1988) pp.222-223.
  - 9) J. Kinoshita: "Analysis of TE/TM mode selectivity in DFB lasers with a phase shift region," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **1** (1989) 4-5.
  - 10) 例えば, K. Aiki, M. Nakamura, J. Umeda, A. Yariv, A. Katzir and H. W. Yen: "GaAs-GaAlAs distributed feedback diode lasers with separate optical and carrier confinement," *Appl. Phys. Lett.*, **27** (1975) 145-146.
  - 11) H. Kogelnik and C. V. Shank: "Coupled wave theory of distributed feedback lasers," *J. Appl. Phys.*, **43** (1972) 2327-2335.
  - 12) Y. Luo, Y. Nakano and K. Tada: "Fabrication and characteristics of a gain coupled distributed feedback laser diode," *20th International Conference on Solid State Devices and Materials* (Jpn. Soc. Appl. Phys., Tokyo, 1988) pp.327-330.
  - 13) Y. Nakano, Y. Luo and K. Tada: "Facet reflection independent, single longitudinal mode oscillation in a GaAlAs/GaAs distributed feedback laser equipped with a gain-coupling mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 1606-1608.
  - 14) Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu and H. Iwaoka: "Purely gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 1620-1622.
  - 15) Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu and H. Iwaoka: "Fabrication and characteristics of gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers with a corrugated active layer," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1724-1731.
  - 16) T. Inoue, S. Nakajima, Y. Luo, T. Oki, H. Iwaoka, Y. Nakano and K. Tada: "CW operation of an InGaAsP/InP gain-coupled distributed feedback laser with a corrugated active layer," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **3** (1991) 958-960.
  - 17) Y. Luo, H.-L. Cao, M. Dobashi, H. Hosomatsu, Y. Nakano and K. Tada: "GaAlAs/GaAs single quantum well gain-coupled distributed feedback laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **3** (1991) 1052-1054.
  - 18) Y. Luo, H.-L. Cao, M. Dobashi, H. Hosomatsu, Y. Nakano and K. Tada: "Fabrication of GaAlAs/GaAs single quantum well gain-coupled distributed feedback lasers," *Second International Meeting on Advanced Processing and Characterization Technologies* (Am. Inst. Phys., 1991) pp.168-171.
  - 19) Y. Nakano, Y. Uchida and K. Tada: "Highly efficient single longitudinal mode oscillation capability of gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers—advantage of asymmetric facet coating," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (1992) 308-311.
  - 20) Y. Nakano, Y. Deguchi, K. Ikeda, Y. Luo and K. Tada: "Reduction of excess intensity noise induced by external reflection in a gain-coupled distributed feedback semiconductor laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1732-1735.
  - 21) Z. Bor: "Tunable picosecond pulse generation by an N<sub>2</sub> laser pumped self Q-switched distributed feedback dye laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **16** (1980) 517-524.
  - 22) Y. Luo, R. Takahashi, Y. Nakano, K. Tada, T. Kamiya, H. Hosomatsu and H. Iwaoka: "Ultralow chirping short optical pulse (16 ps) generation in gain-coupled distributed feedback semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 37-39.
  - 23) S. Nakajima, T. Inoue, Y. Luo, T. Oki, Y. Nakano, K. Tada, R. Takahashi and T. Kamiya: "Dynamic characteristics of 1.55  $\mu\text{m}$  gain-coupled distributed feedback laser," to be presented at 13th IEEE International Semiconductor Laser Conference, September, 1992.
  - 24) Y. Nakano, Y. Hayashi, N. Chen, Y. Sakaguchi and K. Tada: "Fabrication and characteristics of an integrated DFB laser/amplifier having reactive-ion-etched tilted end facets," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L2430-L2433.
  - 25) J. Hashimoto, Y. Nakano and K. Tada: "Influence of facet reflection on the performance of a DFB laser integrated with an optical amplifier/modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 594-603.