

回折光学素子を集積した半導体レーザー

栖原 敏明・上向井正裕

Semiconductor Lasers with Integrated Diffractive Optical Elements

Toshiaki SUHARA and Masahiro UEMUKAI

Diffractive optical elements, i.e., holographic grating elements, in optical waveguides can perform various passive functions such as optical feedback, beam coupling, wavefront conversion, and wavelength dispersion. Integration of such elements in semiconductor lasers enables implementations of various novel integrated semiconductor lasers, such as a master laser power amplifier, a high-power extended-cavity tunable laser, and a high-power broad area laser, that can emit a highly-coherent collimated output beam. The authors' work in this area is reviewed.

Key words: semiconductor lasers, diffractive optical elements, grating couplers, distributed Bragg reflectors, quantum well

光導波路内に形成した周期構造（グレーティング）による回折光学素子は、導波光に対して、集光、結像、結合、波長選択、波長分散、位相整合、各種波面変換など多くの受動光学機能を果たすことができ¹⁾、集積化により各種の具体的应用をもつ光集積回路を実現できる²⁾。一方、グレーティングは分布帰還型（DFB）レーザーや分布ブラッグ反射型（DBR）レーザーなどの半導体レーザーの要素として古くから利用されてきた³⁾が、回折光学素子の概念を導入することにより、さらに多くの高機能・高性能な半導体レーザーを実現できる。

回折光学素子は、狭いストライプ型のレーザーでは構造と作製過程の単純化に利用でき、高出力化に有利な広面積型レーザーではモード制御とフィラメンテーション抑制などに利用できる。また出力ビーム整形や収差補正、波長可変など活用できる。筆者らはこのような回折光学素子を集積した各種の半導体レーザーを提案・実現してきた⁴⁾。これらの集積半導体レーザーは光通信・情報処理・計測のための光源や、非線形光学デバイスやファイバーレーザーの励起光源など、多くの将来の応用がある。本稿ではこのような集積半導体レーザーに関する筆者らの最近の研究を紹介したい。

1. 増幅器・結合器集積化高出力レーザー

DBR レーザー発振器（MO）、テーパ型パワー増幅器（PA）および平行ビーム出射型グレーティング結合器（GC）を集積したモノリシック MOPA レーザー^{5,6)}を図1に示す。MOからの出力光がPAで増幅され、GCから平行ビームとして外部に出射される。GCの適当な設計により、出力ビームを任意の波面に整形でき、またPA内で生じる波面歪みを補正する機能を付加できる。

MOとして、リッジ型活性チャネルと表面グレーティングからなるDBRレーザー⁷⁾を採用した。単一横モード発振のための狭いチャネルと、発散導波光を高効率で反射するための曲線状のDBRグレーティングを用いた。表面グレーティングとこのような構造をとることで集積レーザーを再成長なしの一度のエピタキシャル成長で作製できる。PAは不均一な利得飽和と温度・屈折率分布を考慮に入れたビーム伝搬法による理論シミュレーション⁸⁾を行い、高出力と低収差の出力波面が得られるよう設計した^{5,6)}。PA出力光波面はおもに熱レンズ効果で歪みを生じ、MOチャネル端からMO内側に移動した仮想発散点（VDP）からの二次元球面波に近いものとなる。この移動を見込んで曲線GCを設計すれば、高いPA注入電流領域でも波面収差が無視できる良好な平行ビーム出力が得られる。

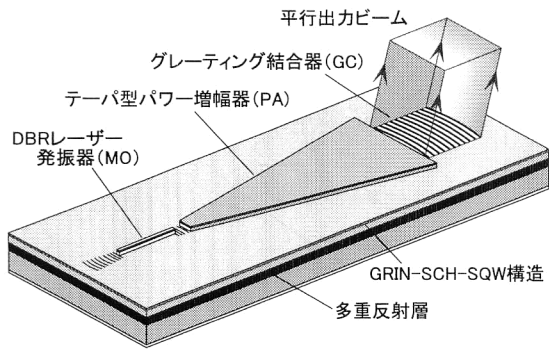


図1 増幅器・結合器集積化高出力レーザー。

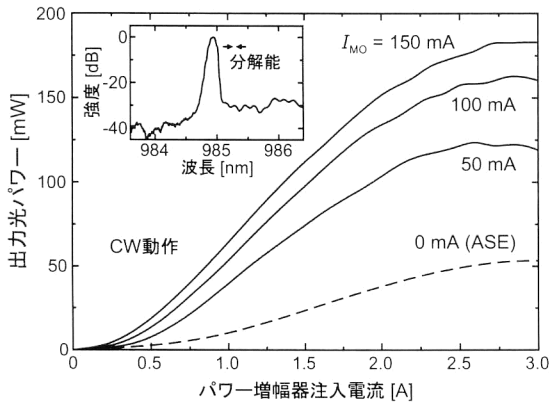


図2 出力光パワーの増幅器注入電流依存性と発振スペクトル。

InGaAs 分布屈折率分離閉じ込め単一量子井戸 (GRIN-SCH-SQW) 構造を用い、長さ $600 \mu\text{m}$ の MO、長さ/出力端幅 $2/0.6 \text{ mm}$ の PA と、開口 $0.4 \times 0.4 \text{ mm}^2$ の VDP 移動 ($50 \mu\text{m}$) 補償 GC からなるデバイスを作製した。MO と PA の p 型電極を蒸着後、電極をマスクとして反応性イオンエッチング (RIE) によりリッジ構造を形成した。曲線走査 EB 描画と 2 段階 RIE により、曲線 DBR と GC を作製した。

CW 駆動で測定した L - I 特性と発振スペクトルを図 2 に示す。波長 985 nm で 183 mW の平行出力ビームが得られた。図 3 に出力ビーム広がり角の PA 注入電流依存性を示す。VDP 移動補償 GC の使用により高注入電流領域でも広がり角は回折限界の 2 倍程度に抑制できた。

2. 高出力可変波長集積レーザー

グレーティング結合器 (GC) を集積したテーパ型増幅器 (TA) と外部ハーフミラー (HM) からなる可変波長集積レーザーを図 4 に示す⁹⁾。直接平行ビームを出力するとともに、GC の波長分散を利用して発振波長を可変できる。GC からの出射角は波長に依存するため、HM に対するデバイス角度を変えることで発振波長をチューニングでき

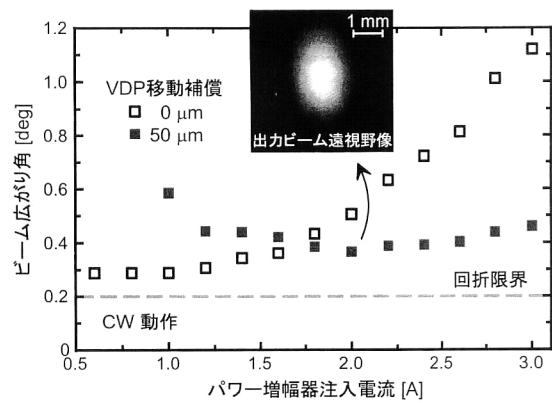


図3 出力ビーム広がり角の増幅器注入電流依存性。

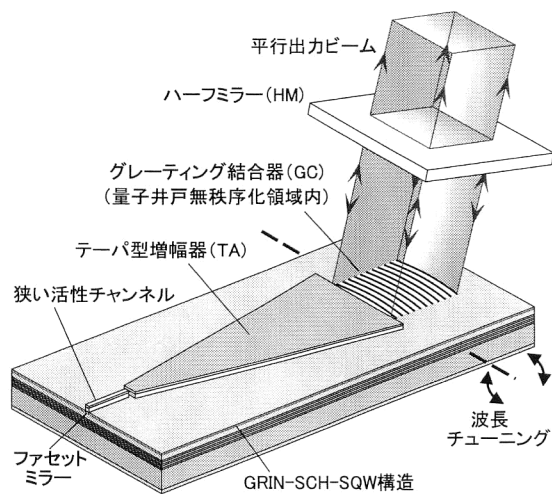


図4 高出力可変波長集積レーザー。

る。GC-HM-GC の波長フィルター特性は入力結合効率の波長依存性で決まり、波長帯域幅は約 0.3 nm となる。この鋭い波長選択性により、正確な発振波長制御が期待できる。レンズレスでコンパクトかつ高出力の可変波長レーザーの実現が期待できる。

前章の PA と同じ TA に単一横モード発振のための狭いリッジ構造のチャンネル増幅器を付加し、VDP 移動補償平行ビーム出射型 GC と組み合わせたデバイスを作製した。GC 領域の量子井戸を厚さの異なる SiO_2 キャップ堆積と高速熱処理により選択的に無秩序化し受動導路損失を低減する (3 cm^{-1} 程度まで)¹⁰⁾ ことで、GC の高効率化とビーム平行度の向上をはかった。図 5 に CW 動作での発振特性を示す。閾値は約 1.5 A で、最大 105 mW の出力光パワーが得られた。発振波長は 1004 nm 近傍で、線幅は約 0.08 nm である。同図右下に平行出力ビームの遠視野像を示す。広がり角は回折限界値 0.13° に近い $0.16^\circ \times 0.18^\circ$ が得られた。デバイスを 4.5° 回転させることにより、 21.1 nm の広い波長チューニングが実現できた。全波長可変範

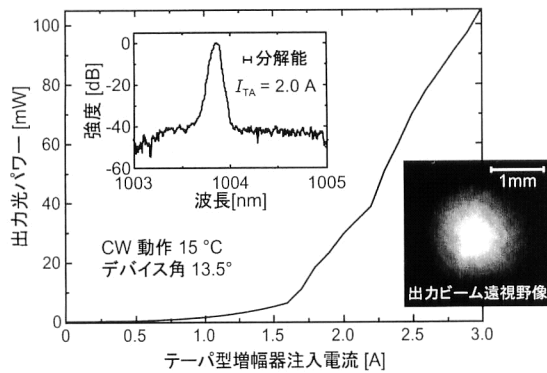


図5 発振特性と平行出力ビーム遠視野像。

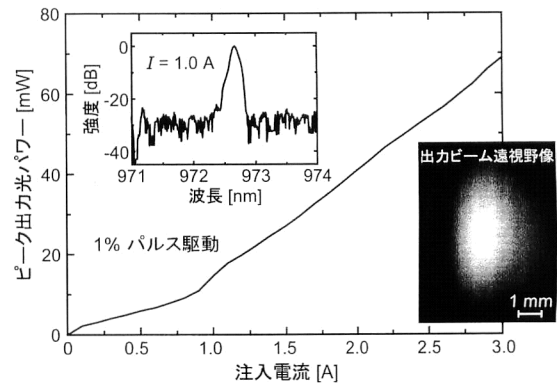


図7 発振特性と出力ビーム遠視野像。

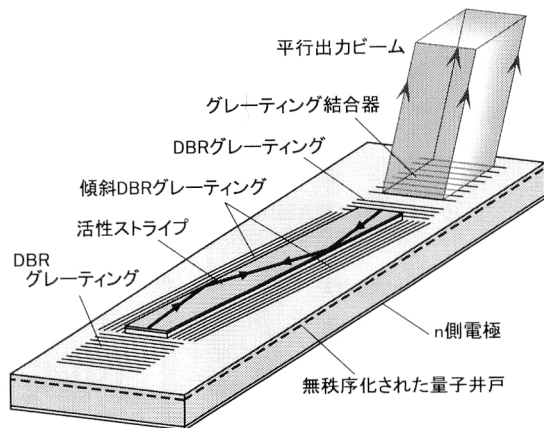


図6 結合器集積化傾斜グレーティング広面積DBRレーザー。

囲にわたって高注入電流時でもほぼ円形の光強度分布をもつ平行ビームが得られた。

3. 結合器集積化傾斜グレーティング広面積DBRレーザー

高出力で回折限界平行ビームを出力する広面積半導体レーザーのひとつとして、図6のように広面積ストライプ状活性領域の両側に傾斜グレーティングを設け、帰還用DBRグレーティングと出力用グレーティング結合器を集積したレーザーを提案した¹¹⁾。光波が図中に示す折れ線状光路で往復伝搬してレーザー発振が得られる。傾斜DBRでの分布反射により光線幅が広がることでフィラメンテーション発生を抑制でき、幅広い開口にわたって様な光強度分布が得られ、狭いスペクトルで回折限界に近い平行ビームを出射する高出力レーザーを実現できる。

グレーティング領域の量子井戸を選択的に無秩序化した後、無秩序化抑制領域に幅 120 μm 、長さ 600 μm 、傾斜角 22° のリッジ構造を形成した。無秩序化領域に共振器用 1 次傾斜 DBR (周期 404 nm) と 3 次 DBR (444 nm)、およ

び 1 次 GC (321 nm) を作製し、電極を形成した。パルス駆動で測定した L - I 特性と発振スペクトルを図7に示す。ピークパワー 69 mW、サイドモード抑圧比 23 dB の単縦モード発振が得られ、傾斜グレーティングを用いることの有効性を確認した。同図右下に出力ビーム遠視野像を示す。ビーム広がり角は回折限界の約 1.5 倍であった。

回折光学素子を集積した半導体レーザーに関する筆者らの最近の研究を概観した。本文で述べた以外に、非安定共振器レーザー、垂直発散放射型レーザー、マルチスポット集光レーザーなどの半導体レーザーも実現されている¹²⁾。今後、性能改善と応用開拓のため研究を続けてゆきたい。

文 献

- 1) 栖原敏明, 西原 浩: 光学, **19** (1990) 813-821.
- 2) T. Suhara and H. Nishihara: IEEE J. Quantum Electron., **QE-22** (1986) 845-867.
- 3) 栖原敏明: 半導体レーザーの基礎 (共立出版, 1998).
- 4) T. Suhara, *et al.*: Proc. SPIE, **4995** (2003) pp. 10-21.
- 5) M. Uemukai, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **10** (1998) 1097-1099.
- 6) M. Uemukai, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **39**, Pt1 (2000) 1503-1507.
- 7) M. Uemukai, *et al.*: Electron. Lett., **33** (1997) 1464-1465.
- 8) R. J. Lang, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **29** (1993) 2044-2051.
- 9) M. Uemukai, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **12** (2000) 1607-1609.
- 10) N. Shimada, *et al.*: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **7** (2001) 350-354.
- 11) M. Uemukai, *et al.*: Int. Semicon. Laser Conf., MC5 (2002) pp. 27-28.
- 12) A. Larsson, *et al.*: Proc. SPIE, **3626** (1999) 190-201.

(2003年3月3日受理)