

[光学論文賞受賞記念]

# 解説

## 狭スペクトル線幅半導体レーザー\*

岡 井 誠

(株)日立製作所中央研究所オプトエレクトロニクス研究センター 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1995年2月3日受理)

### Narrow Spectral Linewidth Semiconductor Lasers

Makoto OKAI

Optoelectronics Research Center, Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,  
1-280, Higashi-koigakubo, Kokubunji 185

#### 1. はじめに

コヒーレント光通信は、テラビット/秒級の大容量・長距離伝送が可能なることから、次世代の光通信方式として期待されている。この通信方式では、周波数や位相など、光の波としての性質を利用するため、光源としてスペクトル線幅の狭い半導体レーザーが必要となる。さらに、光計測や光分析などの応用分野にも、狭スペクトル半導体レーザーの与えるインパクトは大きい。

半導体レーザーのスペクトル線幅はガスレーザーに比べて、一般に広いことが知られている。それは、半導体レーザー共振器内部での光の閉込め率が小さいことと、半導体レーザーに特有なスペクトル線幅増大メカニズムに起因する。これらの問題を解決することにより、ここ数年間で従来より2~4桁も狭いスペクトル線幅が多数報告されている。半導体レーザーのスペクトル線幅狭化のトレンドを図1に示す。バルク、MQWおよび歪MQWは活性層構造を示す。スペクトル線幅狭化の研究は、光通信用光源をターゲットに進められたため、同図はすべて1.55 $\mu\text{m}$ で発振する半導体レーザーのデータである。また、DBR(distributed Bragg reflector)と記載したもの以外はすべてDFB(distributed feedback)を基本構造とする。筆者らはDFBレーザーの共振器構造と活性層構造に新しい概念を導入することにより、3.6 kHzのスペクトル線幅を実現した<sup>1,2)</sup>。

本稿では、スペクトル線幅狭化のための課題、スペクトル線幅の測定方法、筆者らの線幅狭化アプローチ、デバイス設計、およびデバイス特性について述べる。

#### 2. スペクトル線幅狭化のための課題

半導体レーザーのスペクトル線幅 $\Delta\nu$ は次式で与えられる。

$$\Delta\nu = \frac{R}{4\pi I}(1 + \alpha^2) \quad (1)$$

ここで $R$ は自然放出率、 $I$ は共振器内の平均フォトン数である。また $\alpha$ はスペクトル線幅増大係数であり、次式で与えられる。

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{\frac{\partial n}{\partial N}}{\frac{\partial g}{\partial N}} \quad (2)$$

ここで $\lambda$ は発振波長、 $N$ はキャリア密度、 $n$ は屈折率、 $g$ は光学利得である。活性層構造の工夫により式(1)における自然放出率の低減とスペクトル線幅増大係数の低減が可能である。また、レーザー共振器構造の工夫により、共振器内の平均フォトン数を増大させることが可能である。

スペクトル線幅発生メカニズムを図2に示す。角周波数 $\omega_0$ で振動している強度 $\sqrt{I(t)}$ の複素波 $\beta(t)$ の位相 $\phi(t)$ が揺らぐことによりスペクトル線幅が発生すると考える。今、自然放出光により $\beta(t)$ が $\Delta\beta$ だけ変化すると、それに伴って位相が $\Delta\phi_1$ だけ変化し、スペク

\* 本稿は平成6年度光学論文賞受賞論文を中心として、まとめたものである。

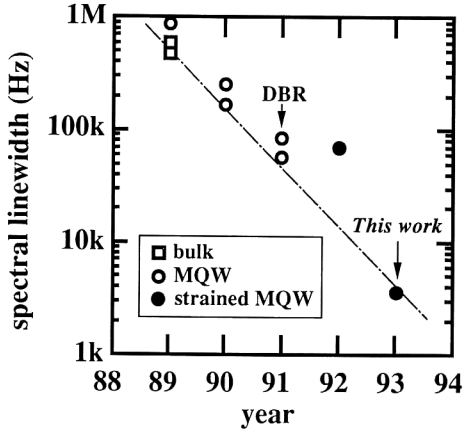


図1 スペクトル線幅狭窄化のトレンド  
DBRと記載したものはすべてDFBレーザー、  
発振波長はすべて1.55 μm. MQW: multiple  
quantum well, DBR: distributed Bragg reflector,  
DFB: distributed feedback.

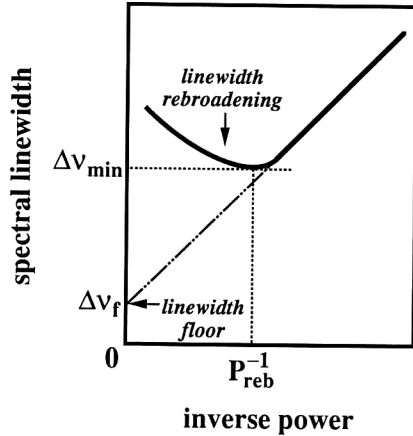


図3 スペクトル線幅の光出力依存性

依存性を示す(図3). すなわち, 光出力が比較的大きい領域において, 光出力が増大するとスペクトル線幅が逆に増大するリブロードニング現象が観測される. また, 光出力を無限大に外挿した場合にもスペクトル線幅がゼロに収束せず残留スペクトル線幅が観測される. このリブロードニング現象と残留スペクトル線幅がスペクトル線幅狭窄化を妨げている要因である.

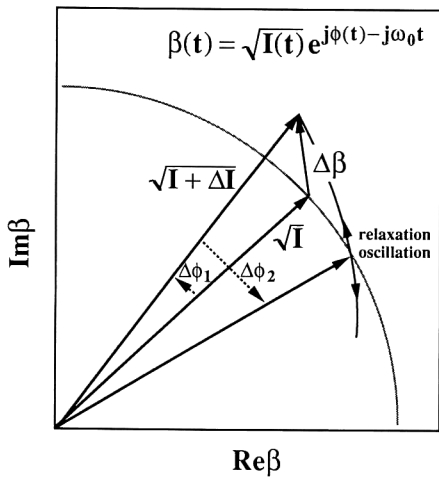


図2 スペクトル線幅発生メカニズム  
複素波  $\beta(t)$  の位相  $\phi(t)$  の揺らぎがスペクトル線幅である.

トル線幅が発生する. この自然放出光の効果は, 式(1)の  $R$  に取り込まれている. さらに  $\sqrt{I + \Delta I}$  が緩和と振動により定常状態  $\sqrt{I}$  に戻る際に, 光学利得が変化する. この光学利得の変化が屈折率の変化をもたらし, 位相を  $\Delta\phi_2$  だけ変化させる. この付加的な効果は式(1)の  $\alpha$  により取り込まれている.

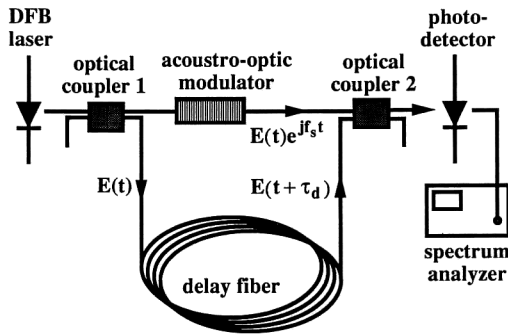
式(1)によれば, スペクトル線幅  $\Delta\nu$  は共振器内の平均フォトン数  $I$  に反比例するため,  $\Delta\nu$  は光出力  $P$  の増加とともに, 単調に狭くなるはずである. とところが実際のデバイスのスペクトル線幅はこれとは異なる光出力

### 3. スペクトル線幅の測定方法

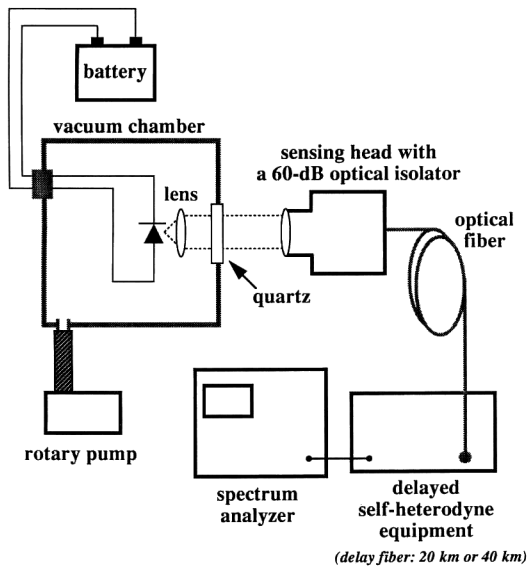
スペクトル線幅の測定には自己遅延ヘテロダイン法<sup>3)</sup>が有効である. この方法では図4(a)に示すように, まず被測定光を2つに分離する. 一方の光は音響光学素子により,  $f_s$  の周波数シフトを受ける. もう一方の光は遅延ファイバーを通り,  $\tau_d$  の遅延時間を受ける. この2つの光を合波してフォトダイオードで受光し, スペクトルアナライザで観測することにより, 中間周波数  $f_s$  のヘテロダインスペクトルを得る. この方法の分解能  $R$  は遅延後の2つの光の無相関性が破れることにより決まり, 大まかには  $1/2\tau_d$  で与えられるが, 次式により正確に求めることができる<sup>3)</sup>.

$$S(f) = \frac{S_0}{f^2 + (\pi S_0)^2} \times [1 - \exp(-2\pi^2 \tau_d S_0) \{ \cos(2\pi f \tau_d) + \frac{2\pi^2 S_0}{f} \sin(2\pi f \tau_d) \}] + \exp(-2\pi^2 \tau_d S_0) \delta(f) \quad (3)$$

ここで  $S(f)$  はヘテロダインスペクトル形状,  $S_0$  [Hz<sup>2</sup>/Hz] はホワイトノイズを表す. また  $\delta(f)$  はデルタ関数で, スペクトルアナライザの分解能により鈍った形状となる. 式(3)によると, 40 km の遅延ファイバーを用いた場合の分解能は1 kHzとなる.



(a)



(b)

図4 スペクトル線幅の測定方法  
(a) 自己遅延ヘテロダイン法の構成, (b) 今回用いた測定系の構成。

特に 100 kHz 以下のスペクトル線幅を測定する場合には、外部からのノイズを極力低く抑える必要がある。図 4 (b) に今回用いた測定系の構成を示す。電流電源にはバッテリーを用いた。また、測定する半導体レーザーを真空チャンバーの中に入れることにより、温度安定化装置を用いることなく線幅の安定な測定を可能にするとともに、電磁界ノイズを遮蔽した。半導体レーザーの光は、石英ガラス窓を通して真空チャンバー外に取り出し、60 dB の光アイソレーターを通して光ファイバーに取り込んだ。通常の測定には 20 km (分解能 2 kHz) の、

より正確な測定には 40 km (分解能 1 kHz) の遅延ファイバーを用いた。

#### 4. スペクトル線幅狭窄化のアプローチ

2 節で示したりブロードニング現象と残留スペクトル線幅の原因として、筆者らは軸方向ホールバーニング<sup>4)</sup>の效果に注目した。軸方向ホールバーニングとは、レーザー共振器の方向で光が不均一に分布する現象であり、この不均一性がリブロードニング現象や残留スペクトル線幅の原因となることが、理論的に指摘されている<sup>5,6)</sup>。筆者らは軸方向ホールバーニングの程度が異なるデバイスを意図的に作製し、軸方向ホールバーニングの小さいデバイスほど、残留スペクトル線幅が小さくなることを明確にした<sup>2)</sup>。

安定な縦単一モード発振が得られる  $\lambda/4$  シフト型 DFB レーザーにおいて特に顕著なこの軸方向ホールバーニングを低減させるために、筆者らは次節で説明する周期変調型 (CPM: corrugation-pitch-modulated) 回折格子を提案し導入した。これにより、図 5 に示すようにリブロードニングを低減させ、残留スペクトル線幅を従来の 1 MHz に比べ、1 桁以上低減させることに成功した。この結果、56 kHz の最小スペクトル線幅を得た<sup>7,8)</sup>。この最小線幅は、依然として残留スペクトル線幅により制限されており、さらに軸方向ホールバーニングを低減させることが重要であると考えた。そこでスペクトル線幅増大係数を小さくすることにより、軸方向ホールバーニングの低減が可能であることを理論的に明確にし<sup>9)</sup>、活性領域に歪多重量子井戸を導入した。その結果、さらに 1 桁以上残留スペクトル線幅を低減させるこ

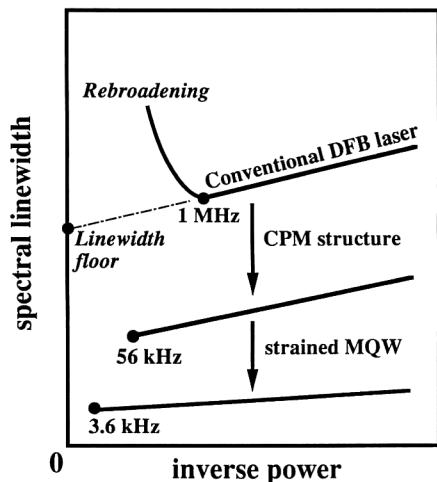


図5 スペクトル線幅狭窄化のアプローチ

とに成功し、最小スペクトル線幅として 3.6 kHz を実現した<sup>1,2)</sup>。

### 5. 周期変調型回折格子の提案と設計

軸方向ホールバーニングを低減させ、軸方向での光強度分布をより平坦化するために図 6 に示す周期変調構造を考えた<sup>2)</sup>。

安定な縦単一モード発振が得られる  $\lambda/4$  シフト型 DFB レーザーでは、図 6 (b) に示すように、レーザー共振器の中央付近で光強度が集中する。最も光が集中するのは、同図 (a) に示す回折格子の位相が反転した ( $\lambda/4$  シフト) 位置である。このように  $\lambda/4$  シフト構造は、安定な縦単一モード発振を得るために必須であるが、強い軸方向ホールバーニングを引き起こし、スペクトル線幅の狭窄化を妨げる。この問題を解決するために、筆者らは同図 (a) に示す周期変調構造 (CPM) を提案した。この構造では、位相調整領域における回折格子の周期を他の部分に比べて長くすることにより、点 A から点 B にかけて徐々に位相が反転した構造となっている。これによ

り、同図 (b) に示すように、光の集中を大幅に緩和することができる。図では位相調整領域長  $L_p$  を共振器長の 30% および 50% にした場合の計算結果を示した。

位相調整領域長  $L_p$  が長いほど光強度の分布は平坦になるが、それに伴い縦単一モードの安定性が劣化する。そこで、スペクトル線幅狭窄化のために位相調整領域長  $L_p$  の最適化を行った。その結果を図 7 に示す。縦軸は主モードと副モードの間の規格化しきい値利得差  $\Delta\alpha_{th}L$  を、横軸はしきい値電流  $I_{th}$  で規格化した駆動電流  $I$  を示す。 $\Delta\alpha_{th}L$  の値が 0.3 以上の場合に、高速変調時においても安定な縦単一モード発振が得られる。 $\lambda/4$  シフト DFB レーザーの場合、しきい値において大きな  $\Delta\alpha_{th}L$  が得られるが、駆動電流の増加とともに、軸方向ホールバーニングのために  $\Delta\alpha_{th}L$  が急激に減少し、縦単一モードの安定性が著しく低下する。これに対し CPM-DFB レーザーでは、位相調整領域長が長くなるほど、軸方向ホールバーニングが低減するため、駆動電流の増加に伴う  $\Delta\alpha_{th}L$  の減少量も小さくなる。特に位相調整領域長が共振器長の 30% の場合、しきい値電流の 6 倍以上まで安定な縦単一モード発振が得られる ( $\Delta\alpha_{th}L > 0.3$ )。

また、スペクトル線幅増大係数  $\alpha$  を 3.5 (多重量子井戸構造を想定) から 2.0 (歪多重量子井戸構造を想定) に低減させることにより微分利得が増大し、さらに軸方向ホールバーニングを緩和することができる<sup>9)</sup>。同図では CPM-DFB ( $L_p/L=0.3$ ) の場合に限り、 $\alpha$  が 2.0 の場合の計算結果も示した。

以上の計算結果を基に、位相調整領域長を共振器長の

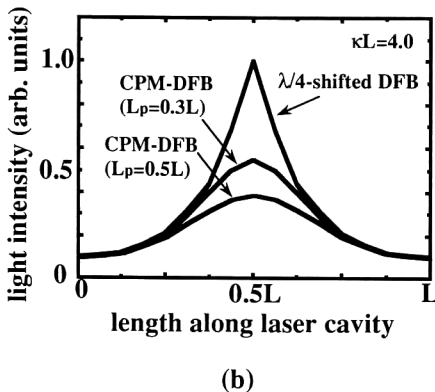
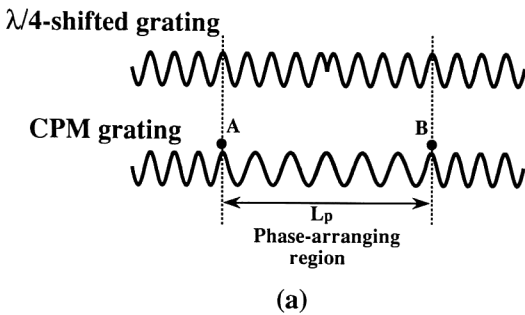


図 6 周期変調型回折格子  
(a) 回折格子の構造, (b) 軸方向光強度分布。  
 $L_p$ : 位相調整領域長,  $L$ : 共振器長,  $\kappa L$ : 規格化結合係数。

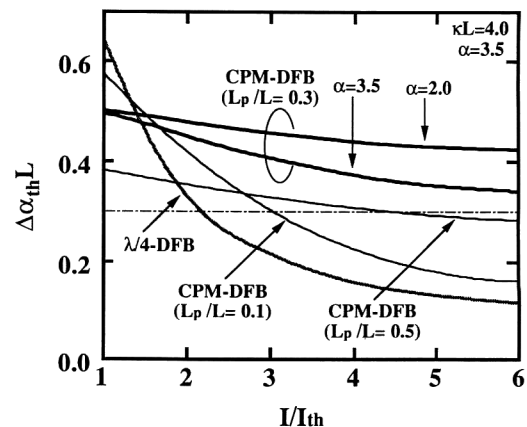


図 7 周期変調型構造における位相調整領域長  $L_p$  の最適化のための計算結果  
 $\Delta\alpha_{th}L$ : 主モードと副モードの間の規格化しきい値利得差,  $I_{th}$ : しきい値電流,  $I$ : 駆動電流。

30%とし、さらにスペクトル線幅増大係数を低減させるために、活性領域に歪多重量子井戸構造を導入した。

### 6. デバイス構造と特性

作製した狭スペクトル線幅半導体レーザーの構造を図8に示す。共振器長を1.2 mmとし、共振器の中央に長さ360  $\mu\text{m}$ の位相調整領域を設けた。位相調整領域の左右で回折格子の位相が反転するように、位相調整領域における回折格子の周期を他の領域における周期より0.08 nmだけ長い241.08 nmとした。この周期変調型回折格子の作製には、筆者らが独自に開発したホトマスク自己干渉法を用いた<sup>2,10)</sup>。この方法では、平均周期としてサブオングストローム以下の精度で回折格子を作製できる。規格化結合係数  $xL$  が3.5~4.0となるように回折格子の深さを設定した。

活性領域には+1.0%の圧縮歪InGaAsP/InGaAs多重量子井戸構造を導入した。圧縮歪量が大きいくほど価電子帯の有効質量が軽くなり、スペクトル線幅増大係数が小さくなるのが理論的に示されている<sup>11)</sup>。ところが、実際のデバイスでは、ある特定の波長に利得ピーク波長を設定する必要があり、圧縮歪の導入によりバンドギャップエネルギーが小さくなった分だけ、井戸層厚を薄くして量子サイズ効果により、バンドギャップエネルギーをもとに戻す必要がある。すなわち、圧縮歪量が大きくなるほど、井戸層膜厚を薄くする必要がある。膜厚が薄くなってくると、エピタキシャル成長過程で発生する井戸層と障壁層との界面組成揺らぎの影響が大きくなり、歪導入の効果が不明瞭となる。以上の理由から、歪量の

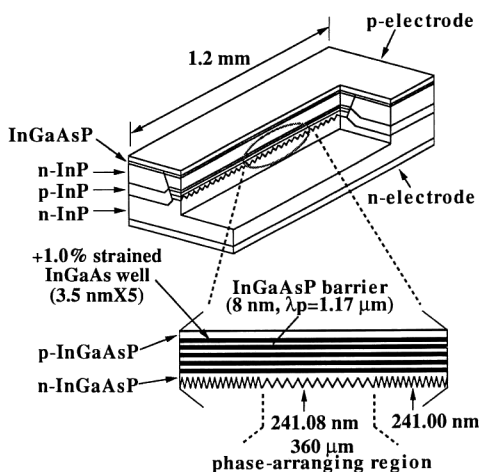


図8 狭スペクトル線幅半導体レーザー構造  
周期変調型回折格子と歪多重量子井戸を導入した。

最適化が必要である。

図9にスペクトル線幅増大係数の圧縮歪量依存性を示す。筆者らの有機金属気相成長装置では、井戸層と障壁層との界面組成揺らぎ1 nm弱であり、圧縮歪量1.0% (井戸層膜厚3.5 nm)のときに最小のスペクトル線幅増大係数が得られた。なお、この測定にはファブリー・ペローレーザーを用い、しきい値以下でのスペクトル形状から利得ピーク波長でのスペクトル線幅増大係数を算出した。作製した狭スペクトル線幅半導体レーザーでは発振波長が利得ピーク波長より10 nm短く(デチューニング:-10 nm)、発振波長でのスペクトル線幅増大係数は1.8と見積られる。

作製した狭スペクトル線幅半導体レーザーの光出力-電流特性を図10に示す。光出力55 mW時に最小スペクトル線幅3.6 kHzを得た。このときのヘテロダインスペクトルを同図内に示した。それ以上の光出力ではス

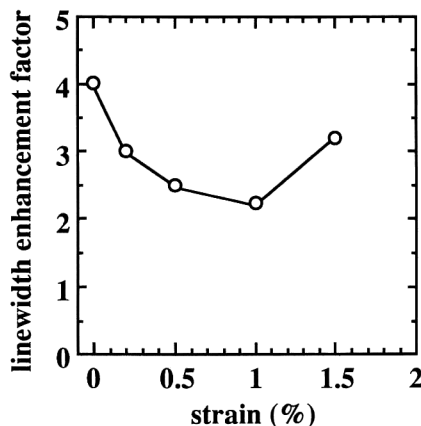


図9 多重量子井戸の歪量に対するスペクトル線幅増大係数の依存性

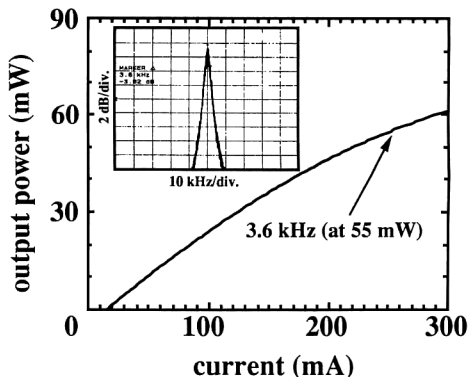


図10 光出力-電流特性とヘテロダインスペクトル

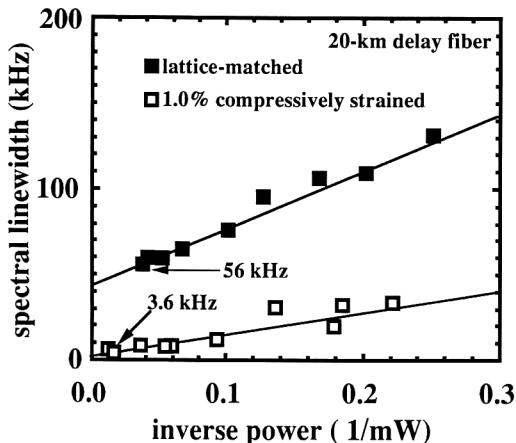


図 11 光出力の逆数に対するスペクトル線幅の依存性

ベクトル線幅がわずかに増加する傾向を示した。このレーザーの最高出力は 67 mW で熱効果により制限されている。

図 11 にスペクトル線幅の光出力依存性を示す。格子整合系の場合に比べ、+1%圧縮歪系では残留スペクトル線幅が 1/20 以下の 2 kHz に低減したために、より狭いスペクトル線幅が得られた。また、スペクトル線幅増大係数の低減効果により、グラフの傾きも 140 kHz · mW に低減した。

## 7. おわりに

半導体レーザーのスペクトル線幅狭窄化を目指し、新しく周期変調構造を提案した。これにより、狭窄化を妨げていた軸方向ホールバーニングを大幅に低減させ、さらに活性領域に歪多重量子井戸構造を導入することにより、最小スペクトル線幅 3.6 kHz を実現した。今後は、本デバイス構造をもとにスペクトル線幅狭窄化の物理限界に挑みたい。

また周期変調構造は、DFB レーザーの本質的な問題である軸方向ホールバーニングを低減できることから、縦単一モードの超安定化、高出力化等への適応が期待できる。

本研究を遂行するにあたり、有益なご議論をいただいた、東京大学の多田邦雄教授、東京工業大学の天津元一教授および TELE Denmark の Dr. B. Tromborg に感謝します。また、本研究の推進に際し、絶えず温かい励ましをいただいた日立中央研究所所長の中村道治博士に感謝します。最後に共同研究者の鈴木 誠氏、谷渡 剛氏および芽根直樹博士に感謝します。

## 文 献

- 1) M. Okai, M. Suzuki and T. Taniwatari: "Strained multi-quantum-well corrugation-pitch-modulated distributed feedback laser with ultranarrow (3.6 kHz) spectral linewidth," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 1696-1697.
- 2) M. Okai, M. Suzuki, T. Taniwatari and N. Chinone: "Corrugation-pitch-modulated distributed feedback lasers with ultranarrow spectral linewidth," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) 2563-2570.
- 3) T. Ohkoshi, K. Kikuchi and A. Nakayama: "Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 630-631.
- 4) H. Soda, Y. Kotaki, H. Sudo, H. Ishikawa, S. Yamakoshi and H. Imai: "Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **23** (1987) 804-814.
- 5) X. Pan, B. Tromborg and H. Olesen: "Linewidth re-broadening in DFB lasers due to weak side modes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 112-114.
- 6) B. Tromborg, H. Olesen and X. Pan: "Theory of linewidth for multielectrode laser diodes with spatially distributed noise sources," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 178-192.
- 7) M. Okai, M. Suzuki, T. Taniwatari and N. Chinone: "Factors limiting the spectral linewidth of CPM-MQW-DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992) 526-528.
- 8) M. Okai: "Spectral characteristics of distributed feedback semiconductor lasers and their improvements by corrugation-pitch-modulated structure," *J. Appl. Phys.*, **75** (1994) 1-29.
- 9) M. Aoki, K. Uomi, T. Tsuchiya, S. Sasaki, M. Okai and N. Chinone: "Quantum size effect on longitudinal spatial hole burning in MQW  $\lambda/4$ -shifted DFB lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1782-1789.
- 10) M. Okai, S. Tsuji, N. Chinone and T. Harada: "Novel method to fabricate corrugation for a  $\lambda/4$ -shifted distributed feedback laser using a grating photomask," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 415-417.
- 11) T. Ohtoshi and N. Chinone: "Linewidth enhancement factor in strained quantum well lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **1** (1989) 117-119.