

光通信用長波長帯面発光半導体レーザー

魚 見 和 久

「面発光半導体レーザーのグランドファーザー」と数年前から称されている東工大の伊賀先生の研究室で面発光半導体レーザーが発振して19年¹⁾、現在の面発光半導体レーザーの基本形である短共振器型面発光半導体レーザーが発振して16年²⁾を迎える。当時、筆者は、広島大学の山西先生の研究室に所属し、2次元分布帰還型半導体レーザーの研究を行っていたが、東京での研究会から帰広された山西先生が「魚見君、すごいことになった。伊賀先生の研究室で100 mA 台の面発光半導体レーザーが発振した」と興奮気味に話しておられたのが鮮明な記憶に残っている。この黎明期の面発光半導体レーザーの先駆的研究は東京工業大学グループの独壇場であり、その要素技術の研究は、光ファイバー通信に適合した長波長帯 InGaAsP/InP 系を軸に開始され、その後、GaAs/GaAlAs 系の研究も並行して行われた。この当時の半導体レーザーの研究をふり返ると、横モード制御の研究が一段落し、量子井戸 (QW) レーザーの黎明期 (イリノイ大学の Holonyak 教授のグループから LO フォノンを介した発振である等が報告されていた)、長波長帯 DFB/DBR レーザーの研究の活発化、長波長帯半導体レーザーの温度依存性がなぜ悪いのかの活発な議論 (Asada & Adams による価電子帯間吸収の提案含め) が行われており、半導体レーザー研究の躍動期であったと思われる。

初の面発光半導体レーザー発振から10年後の1989年のCLEO会議において、AT&Tベル研とBellcoreの連合のJack Jewell (現 PicoLight), Axel Scherer (現 Caltec), Yong Lee (現 KAIST), Jim Harbison (Bellcore) の4氏を軸とするグループから、1 mA 台のレーザー発振が報

告された³⁾。これは、微細加工技術、GaAs/GaAlAs 半導体反射鏡技術もさることながら、神様が与えたような光学利得が画期的に大きい980 nm 帯歪 InGaAs 系 QW 活性層に負うところも大きい。その後、面発光半導体レーザーの研究開発は全世界的に活発化し、半導体レーザーに関連する国際会議においてひとつの確固たる society を形成している。その研究論文では90%以上が、980 nm 帯、850 nm 帯、および赤色～青色の面発光半導体レーザーであり、光通信用長波長帯 (1.2～1.6 μm) 面発光半導体レーザーの発表件数の割合は数%である。これは本文で詳述するように、長波長帯面発光半導体レーザーは、他の波長帯の面発光半導体レーザーに比べて、レーザー発振を得にくいことになっている。しかし、長波長帯面発光半導体レーザーは、光ファイバー通信、特にアクセス系通信網の光源、またデータリンク、超並列大容量光インターコネクト用光源として、下記観点から実用化が待望視されている⁴⁻⁶⁾。今後、長波長帯面発光半導体レーザーの発表件数の割合は急増していくと思われる。

- 1) 共振器のモノリシック形成による低コスト化、かつ、ウェハーレベルでの検査対応
- 2) 小さな活性層体積による低しきい電流動作
- 3) 狭出射角円形ビームでの光ファイバーへの高結合効率による低コスト実装
- 4) 短共振器構造による縦単一モード発振
- 5) へき開が不要でレーザー構造ができることによる1次元/2次元レーザーアレイ化

本論文では、以上の背景の下、光通信用長波長帯面発光半導体レーザーの課題、研究の歴史、現在得られている特性、研究動向について解説する。

(株)日立製作所中央研究所 (〒185-8601 国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

1. 長波長帯面発光半導体レーザーの課題

垂直共振器型面発光半導体レーザーのレーザー発振条件 g_{th} , しきい電流密度 J_{th} は次式で表すことができる^{7,8)}.

$$\xi_m N_w L_w g_{th} = \ln(1/R_f R_r) / 2 + \Sigma \xi_m N_i L_i \alpha_i + (L_c - \Sigma N_i L_i) \alpha_c \quad (1)$$

$$\xi_m = 1 + \sin 2\pi\sigma / 2\pi\sigma, \quad \sigma = \Sigma n_i L_i / \lambda \quad (2)$$

$$J_{th} = e N_w L_w (B N_{th}^2 + C N_{th}^3) \quad (3)$$

ここで, Σ は井戸層, 障壁層での総計, ξ_m は利得整合効果パラメーター⁹⁾, N_w は量子井戸数, L_w は量子井戸層膜厚, R_f, R_r は両方のミラーの反射率, α_i, α_c は井戸/障壁層, クラッド層の吸収損失, L_c は共振器長, λ は発振波長, B は発光再結合定数, C はオージェ再結合定数, N_{th} は発振キャリア密度である. なお, 式(1)の右辺の第1項はミラー損失, 第2項は活性層損失, 第3項はクラッド層損失である.

式(1)~(3)から, 面発光半導体レーザーの高性能化, すなわちしきい電流の低減のためには, 光吸収損失, 非発光再結合過程の低減, 活性層の高利得化, ミラーの反射率の増大が重要となる. しかし, 長波長帯面発光半導体レーザーでは, 850/980 nm 帯の面発光半導体レーザーに比べて下記の問題がある.

1.1 価電子帯間吸収, オージェ再結合過程の存在

長波長帯半導体レーザーでは, その材料特有の価電子帯間吸収による活性層中の光吸収損失の増大とオージェ再結合による非発光再結合により, しきい利得が上昇するとともに無効電流のため, 発振しきい電流は増大する. これは, 面発光半導体レーザーに限らず, 通常の端面発光型半導体レーザーでも同じ状況であり, 他の波長帯に比べて低しきい電流化は困難である^{10,11)}. これを反映して, 大きなしきい利得を補うために活性層での光学利得を増大することが必須であり, 量子井戸数を5以上(望ましくは7~12)に設計する必要がある^{7,8)}. この量子井戸数の値は980 nm 帯の面発光半導体レーザーで用いられている井戸数1~3に比べて, きわめて多いことがわかる.

1.2 悪い温度特性

活性層材料自体の温度特性が悪く, 特性温度 T_0 は典型的に60 Kであり, 980 nm 帯半導体レーザーの150 Kに比べて極端に悪い. このために, 85°Cのしきい電流は25°Cに比べて約3倍に増大する. この小さい T_0 は, 現在では, その主要因は活性層からのSCH層, クラッド層への電子の漏れ出しであると考えられている. 長波長帯面発光半導体レーザーでは, 端面光型半導体レーザーに比べると, しきい利得が高めになるので, この影響は顕著となる.

表1 長波長帯面発光半導体レーザーの研究の歴史.

年	マイルストーン	筆頭著者(機関)	文献
1979	初の面発光レーザー発振	Soda(東工大)	1)
1981	埋め込み型電流狭窄構造	Okuda(東工大)	12)
1982	短共振器面発光LD	Motegi(東工大)	2)
1984	リング電極構造	Uchiyama(東工大)	13)
1985	半導体DBRミラー面発光LD	Iga(東工大)	15)
1986	誘電体DBRミラー面発光LD	Kinoshita(東工大)	16)
1988	CW発振@77K	Kawasaki(東工大)	17)
1990	1.5 μm 帯室温パルス発振	Kasukawa(古河)	18)
1991	1.3 μm 帯室温パルス発振	Wada(UCSB)	19)
1993	室温(14°C)CW発振	Baba(東工大)	20)
1993	QW活性層での発振	Uomi(Bellcore)	7), 8)
1994	低しきい発振(<10 mA)	Dudley(UCSB)	21)
1995	1.5 μm 帯室温CW発振	Babic(UCSB)	22)
1996	1.3 μm 帯室温CW発振	Uchiyama(古河)	23)
1996	サブmA発振(1.5 μm, 0.8 mA)	Margalit(UCSB)	24)
1996	共振器長 adjust-wafer-fusion	Ohiso(NTT)	28)
1996	1.3 μm 帯高温CW発振(36°C)	Uchiyama(古河)	23)
1996	1.5 μm 帯高温CW発振(64°C)	Margalit(UCSB)	25)
1997	2.5 Gbit/s-60 km 伝送実験	Zhang(UCSB)	26)
1997	サブmA発振(1.3 μm, 0.8 mA)	Qian(Cornel U.)	29)
1997	GaNAs面発光発振	Larson(日立)	37)
1997	InGaAs-Q-Dot発振	Huffaker(Texas U.)	40)
1998	信頼性試験(4000 h)	Margalit(UCSB)	27)

1.3 高反射率ミラーの実現

面発光半導体レーザーの大きな特徴であるミラーのモノリシック集積を生かすためには, 少なくとも半導体基板側のミラーを半導体多層ミラーで形成することが望ましい. しかし, 従来の長波長帯材料であるInGaAsP/InP積層ミラーはその屈折率差が小さく, 99.5%以上の反射率を得るためには約40周期形成する必要がある, その際の総膜厚は8~10 μmときわめて厚くなる. 長時間結晶成長の膜厚制御での安定性, ストップバンド幅が100 nm以下という制御性の問題もさることながら, ミラー中の光損失(散乱, および回折損失)の増大, ミラーでの素子抵抗の増大の点で, 問題がある. したがって, SiO₂/Siなどの誘電体ミラーを適用した etched-well 構造が主流であった.

2. ここまで来た長波長帯面発光半導体レーザーの特性

表1にまとめたマイルストーンのごとく, 1979年の初発振以来, 長波長帯面発光半導体レーザーの研究は着実に進歩を遂げてきた. 図1, 図2に, 長波長帯面発光半導体レーザーの最高発振温度, 低しきい電流発振に関する発表の代表的例をまとめた. 本章では, これまでの長波長帯面発光半導体レーザーの研究の歴史をまとめる.

2.1 黎明期(1979~1989年)

この期間は, 東工大グループのパイオニア研究の独壇場であった. 1979年の初発振は, 波長1.3 μm 帯のInGaAsP

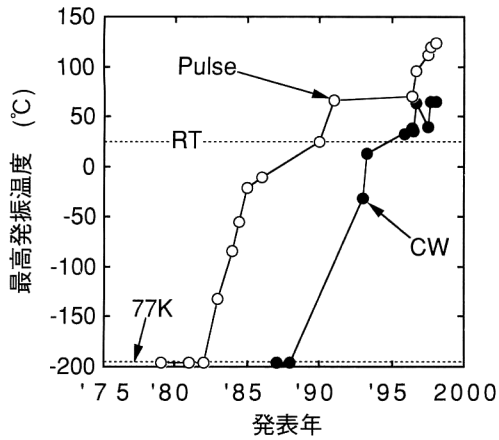


図1 長波長帯面発光半導体レーザーの最高発振温度のトレンド。

活性層, InP 基板を含んだ共振器構成 (共振器長: 約 90 μm) により, 77 K においてパルス電流 700 mA で達成された¹⁾。さらに, 基板での光吸収の影響を避けるために, 基板を除去した数 μm の短共振器構造により, 77 K での閾電流は 160 mA まで低減された²⁾。その後, 東工大グループは, ミラー反射率の増大および活性層領域への電流閉じ込めの観点で, 1) 埋め込み/ポリイミド狭窄¹²⁾, 2) リング電極構造¹³⁾, 3) Au/SiO₂ ミラー¹⁴⁾, 4) 半導体 DBR ミラー¹⁵⁾, 5) 誘電体ミラー¹⁶⁾, など, 現在の面発光レーザーの基本となっている要素技術を確立していった。当時の活性層はバルク型で, 基本構造は InP 基板を部分的に除去した etched-well 構造であり, 77 K でのしきい電流は 5 mA まで改善されたが¹⁷⁾, 最高発振温度は -10°C であった。

2.2 室温連続発振へ (1990~1995 年)

初めての長波長帯面発光半導体レーザーの室温発振は, 古河の粕川らにより, 1.5 μm 帯においてパルス駆動において 1990 年に報告された¹⁸⁾。30 周期の InGaAsP/InP DBR ミラー ($R=98\%$) と 3 周期の Si/SiO₂ ミラーで, 厚さ 1.2 μm の活性層を挟んだ構造である。この室温発振は, GaAs 系での室温発振 (1983 年) に後れること 7 年であり, 長波長帯材料での面発光半導体レーザーの技術バリアーの高さがこれでもわかる。

1991 年, 当時 UCSB に滞在していた和田 (沖電気) らにより, SiN/Si ミラー (8 周期) を用いて反射率を 99% まで高めた 1.3 μm 帯の etched-well 構造により, 室温パルスしきい電流が 50 mA まで低減され, かつ室温以上のパルス発振 (64°C) に初めて成功した¹⁹⁾。

精力的な研究を続けていた東工大グループは etched-well 構造に関する技術を集約し, かつ放熱特性を考慮した MgO/Si ミラーをヒートシンク側に用いた 1.3 μm 帯 CPBH 構造により, ほぼ室温に近い 14°C において 22 mA

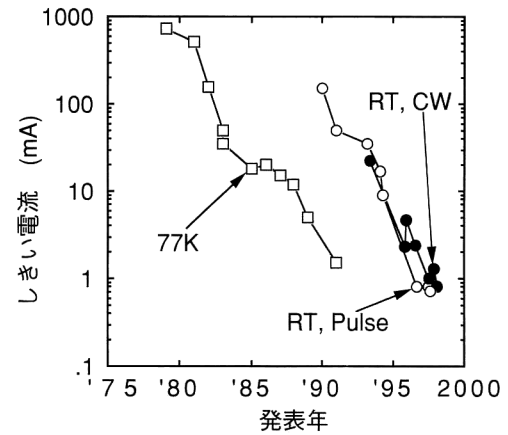


図2 長波長帯面発光半導体レーザーの低しきい電流発振のトレンド。

での連続発振に, 1993 年に成功した²⁰⁾。

長波長帯面発光半導体レーザーでの QW 活性層での初の発振は, 1993 年に, 当時 Bellcore に滞在していた魚見 (日立) らから, 1.5 μm 帯において報告された^{7,8)}。式 (1) ~ (3) を用いた計算モデルにより最適化された 12 層の MQW 構造を用い, SiO₂/Si ミラー (5 周期, 反射率 99%) で共振器を形成した etched-well 構造で, 17 mA の室温パルス発振が得られた。

1990 年頃から長波長帯面発光半導体レーザーの研究を精力的に始めた UCSB の J. Bowers 教授のグループは, wafer-fusion 技術を用いて, 高反射率 (>99.5%) が得られる GaAs/AlAs ミラーを InGaAsP 系活性層材料にボンディングすることにより, 1.3 μm 帯において 9 mA のしきい電流を 1994 年に報告した²¹⁾。このとき, 共振器波長と利得ピーク波長が (温度換算で) 約 100°C 不整合を生じているにもかかわらずこの低しきい電流が得られたことは特筆すべきであり, この wafer-fusion 技術 (すなわち, 高反射ミラーの有効性) による高温低しきい発振の可能性が示唆された。

長波長帯面発光半導体レーザーの初の室温連続発振は, UCSB のグループにより, 1995 年に GaAs/AlGaAs ミラーを 1.5 μm 帯 InGaAsP バルク活性層の両サイドに形成した double-fusion 構造を用いて達成された²²⁾。室温連続動作でのしきい電流は 2.3 mA で, 33°C までの連続発振が得られた。さらに, 1.3 μm 帯での室温連続発振は, 古河の内山らにより, etched-well 構造において MQW 層数の最適化と Al₂O₃/Si ミラーにより 1996 年に達成された²³⁾。室温連続動作でのしきい電流は 2.4 mA であり, 36°C までの連続発振が得られた。

2.3 低しきい電流・高温動作に向けて (1996 年~)

長波長帯面発光半導体レーザーの室温動作において初め

て1 mAを切るしきい電流は、UCSBのグループから、double-fused-GaAs/AlAsミラーとAlAs酸化膜電流狭窄構造により、1996年に1.55 μm 帯において報告された²⁴⁾。電流狭窄直径が2 μm という微細構造において室温でのしきい電流は0.75 mA(連続発振では0.8 mA)であり、径が大きい構造において64°Cでの連続発振、95°Cでのパルス発振、また室温での連続動作時での光出力として0.5 mWと大きな値が得られた²⁵⁾。このサブミリアンペア発振は、InGaAs系に遅れること6年であり、やはり長波長帯材料での面発光半導体レーザーの技術バリエーションが高いことがわかる。UCSBのグループは、1997年に、この1.55 μm 帯double-fusedミラー/AlAs酸化膜構造の面発光半導体レーザーを用いて、2.5 Gb/s変調を行い、3 dBの伝送ペナルティーながらフローのない60 kmシングルモードファイバー伝送に成功した²⁶⁾。さらに、このレーザーを用いて15°Cでの2 mA通電状態で4000時間素子特性が劣化しないこと、および124°Cでのパルス発振を1998年に報告した²⁷⁾。

Wafer-fusion技術においての共振器条件を精密に制御するアイデアがNTTの大磯などにより提案され、1.55 μm 帯fusedミラー構造の面発光半導体レーザーにおいてその有効性が実証された²⁸⁾。1.3 μm 帯では、wafer-fusion技術の先駆者であるCornell大のY. Lo教授のグループから、AlGaInAs系MQW(9周期)活性層とGaAs/AlGaAs-fusedミラーを用いた構造により、室温でのしきい値として0.8 mA(連続発振では1.0 mA)が報告された^{29,30)}。また、454 A/cm²という低しきい電流密度動作、40°Cでの連続発振、112°Cでのパルス発振が得られている。

3. 長波長帯面発光半導体レーザーに求められるブレイクスルー技術、研究動向

前章で議論したように、長波長帯面発光半導体レーザーは、他の波長帯(850/980 nm帯)の面発光半導体レーザーに比べて、レーザー発振を得にくく、室温発振、サブミリアンペア発振ともに、850/980 nm帯での発振に比べて6~7年後れをとっている。これは、長波長帯材料自体が、価電子帯間吸収、オージェ再結合過程の存在、活性層の温度特性の悪さ、高反射率ミラーの実現の困難さに直面しているからである。現時点で最高の性能が得られているwafer-fusion技術による長波長帯面発光半導体レーザーでは、面発光レーザーの特長であるフルウェル基板プロセスが可能になるか否かは“open discussion”である。このwafer-fusion技術の展開も含め、今後、長波長帯面発光半導体レーザーの実用化のためには、特に下記課題を打破

するブレイクスルー技術が必要であると思われる。

- 1) 高温動作化：現状のCW最高発振温度は64°Cであり²⁴⁾、ペルチェ素子フリーの-40°C~+85°C動作を保証するためには、100°C程度での発振を容易に実現する必要がある。
- 2) 高出力化：連続動作での最高出力は0.5 mW(室温)であり²⁵⁾、short-link対応においても高温動作時の高出力化が望まれる。
- 3) 長期信頼性の確認：15°Cでの信頼度評価が1998年に初めて報告されたが²⁷⁾、高温動作時の高信頼動作化が重要である。
- 4) 偏波面制御：適用システムによるが、克服すべき点である。

これらの課題のうち、特に、長波長帯面発光半導体レーザーがまずは乗り越えなくてはならない1), 2)の観点についての活性層の高利得化・高温特化、高反射率ミラーに関する現在の研究動向について述べる。

まず、活性層自体の高利得化に対しては、通常の端面発光型半導体レーザーにおいて特性温度 T_0 向上のアプローチが精力的に研究されている(下記で面発光と断わらない限り端面発光型での発振である)。高歪み系InAsP系活性層は1992年にその有効性が報告された³¹⁾。さらに、伝導帯での電子リークを抑えるための伝導帯不連続が大きい材料として、まずAlGaInAs系は1994年に実証され³²⁾、1998年にInAsP/AlGaInAs系において127 Kの T_0 が報告されるに至った³³⁾。一方、本格的な活性層材料のアプローチとして、GaNとGaAsの混晶であるGaNAsにInを加えGaAs基板に格子整合するGaInNAsが提案され³⁴⁾、CW発振での126 Kの T_0 ³⁵⁾、1.3 μm の発振³⁶⁾とともに、GaAs/AlAs高反射ミラーを結晶成長で形成できる特長を生かし、室温と高温でのしきい電流の差が20%と温度特性にすぐれた面発光レーザーの発振が1997年に報告された³⁷⁾。Nをホスト元素に使い長波長化を生じさせるとともに伝導帯不連続を確保する材料として、InP基板上的InNPAs材料による光ポンプでの発振が得られた(1997年)³⁸⁾。また、1997年のLEOS会議において、GaAsSb系を面発光レーザーの活性層として用いること³⁹⁾、高圧縮歪みを導入し長波長化を図るInAs/GaAs量子ドット面発光レーザーでの0.5 mAの発振(波長は1.15 μm)が報告されている⁴⁰⁾。また、InGaAs基板を用いて、大きな伝導帯不連続を確保する提案では⁴¹⁾、140 Kの T_0 が報告された⁴²⁾。

次に、高反射率ミラーの実現に対しては、基板側のミラーはInGaAsP/InP、上部ミラーを結晶成長によるGaAs/AlAsで形成する研究が行われ始めた⁴³⁾。また、InP基板に

格子整合する Sb 系材料の AlPSb/GaPSb 半導体ミラーをガスソース MBE により 20 周期形成することにより, 99% の反射率が実現されている⁴⁴⁾.

長波長帯面発光半導体レーザーの研究の課題, 歴史, 現在の研究動向についてまとめた. 面発光半導体レーザーは 850 nm 帯において少量生産が始まったところである. 本文中で述べたように, レーザー発振のマイルストーンで 6~7 年の後れをとってきた長波長帯面発光半導体レーザーが, 実用化までにやはり数年かかるか, あるいは CLEO/p-rim 国際会議が日本に帰ってくる 2001 年頃には達成されているのか否かは, 今後の革新的ブレイクスルー技術にかかっている.

文 献

- 1) H. Soda, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 2329.
- 2) Y. Motegi, *et al.*: Electron. Lett., **18** (1982) 461.
- 3) J. L. Jewell, *et al.*: Electron. Lett., **25** (1989) 1123.
- 4) K. Iga, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **24** (1988) 1845.
- 5) 伊賀健一, ほか: 電子情報通信学会誌, **80** (1997) 687.
- 6) 小山二三夫, ほか: 応用物理, **66** (1997) 115.
- 7) K. Uomi, *et al.*: *Int. Conf. on SSDM*, paper D-6-1 (1993).
- 8) K. Uomi, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 317.
- 9) R. S. Geels, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **27** (1991) 1359.
- 10) 魚見和久: O plus E, No. 170 (1994) 111.
- 11) 魚見和久: Optronics, No. 1 (1995) 73.
- 12) H. Okuda, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L536.
- 13) S. Uchiyama, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **20** (1984) 1117.
- 14) S. Uchiyama, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **22** (1986) 1117.
- 15) A. Chailertvanitkul, *et al.*: Electron. Lett., **21** (1985) 303.
- 16) S. Kinoshita, *et al.*: *Trans. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineerings Japan*, J69-C (1986) p. 412.
- 17) H. Kawasaki, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) 1548.
- 18) A. Kasukawa, *et al.*: *48th Device Research Conference*, paper VB-II (1990).
- 19) H. Wada, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **3** (1991) 977.
- 20) T. Baba, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 913.
- 21) J. J. Dudley, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **64** (1994) 1463.
- 22) D. I. Babic, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **7** (1995) 1225.
- 23) S. Uchiyama, *et al.*: *CLEO/p-rim '96*, paper CMC1 (1996).
- 24) N. M. Margalit, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 1675.
- 25) N. M. Margalit, *et al.*: IEEE JST in Quantum Electron., **3** (1997) 359.
- 26) S. Z. Zhang, *et al.*: *OFC '97*, paper TuD2 (1997).
- 27) N. M. Margalit, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 285.
- 28) Y. Ohiso, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 1483.
- 29) Y. Qian, *et al.*: Electron. Lett., **33** (1997) 1052.
- 30) Z. Zhu, *et al.*: IEEE JST in Quantum Electron., **3** (1997) 927.
- 31) Y. Imajo, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **61** (1992) 2506.
- 32) C. E. Zah, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **30** (1994) 511.
- 33) T. Anan, *et al.*: *SPIE Photonics West*, paper 3284-2 (1998).
- 34) M. Kondow, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 1273.
- 35) M. Kondow, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 2244.
- 36) M. Kondow, *et al.*: *IEEE/LEOS Annual Meeting*, paper ThE3 (1997).
- 37) M. C. Larson, *et al.*: *IEEE/LEOS Annual Meeting*, paper PD1-3 (1997).
- 38) W. G. Bin, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **9** (1997) 1072.
- 39) T. Anan, *et al.*: *IEEE/LEOS Annual Meeting*, paper PD1-4 (1997).
- 40) D. L. Huffaker, *et al.*: *IEEE/LEOS Annual Meeting*, paper ThA1 (1997).
- 41) H. Ishikawa, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 712.
- 42) K. Otsubo, *et al.*: Electron. Lett., **33** (1997) 1795.
- 43) H. Gerbretsadik, *et al.*: *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials '98* (1998) p. 60.
- 44) T. Anan, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 2138.

(1998 年 5 月 28 日受理)