High Power and High Reliable 915 nm Lasers with Window Structure Fabricated by Impurity Free Vacancy Disordering (IFVD)

Hidehiro Taniguchi Non-member, Hirotatsu Ishii Non-member, Ryuichiro Minato Non-member, Yutaka Ohki Non-member, Takeshi Namegaya Non-member, Akihiko Kasukawa Non-member
(Optical Device Dept. FITEL Photonics Laboratory R & D Division, Furukawa Electric Co., Ltd.)

Keywords : semiconductor lasers, high power, catastrophic optical damage (COD), impurity free vacancy disordering (IFVD)

There are increasing demands for higher output power of 9xx nm laser diode. The output power is limited by sudden failure, which is caused by facet degradation leading to catastrophic optical damage (COD). A window structure with higher bandgap energy contributes to avoid the facet degradation. Quantum well (QW) intermixing is general technique for increasing the bandgap energy of window region. QW intermixing by impurity free vacancy disordering (IFVD) is very attractive because it doesn't give rise to the issue such as increase of free carrier absorption losses and leakage currents due to the electrically active impurities. A previous successful demonstration of IFVD, however, provided maximum output power of less than 10W. In this paper, we report high output power lasers with high performance IFVD window.

Intermixing is usually done by utilizing dielectric film, followed by rapid thermal annealing (RTA). By investigating IFVD process in detail, we found that the degree of intermixing depended on the properties of dielectric film. Two kinds of SiN films deposited on window and gain regions under respective optimum conditions were used. In RTA, the film on window region enhances generation of vacancies on semiconductor surface by Ga out-diffusion, while the film on gain region prevents generation of vacancies. The diffusion of vacancies induces quantum well intermixing, leading to bandgap shift.

For high output power laser, window region having a large bandgap difference (ΔE_g) with respect to gain region is required to protect the facet from high optical power density. Fig.1 shows photoluminescence spectrum peak shifts with respect to the as-grown. The blue shifts observed for the gain region were very small as less than 10meV. It was found experimentally that intermixing in the gain region was suppressed thanks to the newly developed technique. On the other hand, large blue shifts were observed for the window region.

Fig.2 shows the output power characteristics for both lasers with window and without window structures. The maximum output power for a window laser exceeded 25.6W at 30A under pulsed operation, limited by our experimental set up. This is the one of the highest power for 100 μ m-wide single emitter lasers. The laser without window structure suffered sudden failure caused by facet degradation at output power of about 15W.

The life test was performed at ACC condition under 20°C heatsink temperature, as shown in Fig. 3. The operation current of 6A, 7A, 8A and 9A correspond to output power of about 5W, 6W, 7W and 8W respectively. We observed sudden failure for all lasers without window structure at 9A. On the other hand, all lasers with window structure have survived the test. We observed no degradation and no sudden failure for 5800 hours at 9A. It was clear that the window structure fabricated by our IFVD process

Fig. 1. PL energy shift as a function of RTA temperature

Fig. 2. L-I characteristics (pulsed operation)

Fig. 3. Life test result at ACC condition

suppressed facet degradation.

In summary, we have demonstrated high performance SCH-SQW lasers with window utilizing IFVD technique. A very high output power of 25.6W at 30A under pulsed operation was obtained without facet degradation. Moreover, no degradation and no sudden failure were observed for 5800 hours life test at 8W-20°C. We have, thus, realized the highest output power and high reliable lasers with IFVD window structure.

ACKNOWLEDGMENT :

This work was supported by Innovative Technology Development of JST (Japan Science and technology Agency)

IFVD 窓構造による高出力高信頼性 915 nm 半導体レーザー

非会員 谷口 英広* 非会員 石井 宏辰*
 非会員 湊 龍一郎* 非会員 大木 泰*
 非会員 行谷 武* 非会員 粕川 秋彦*

High Power and High Reliable 915 nm Lasers with Window Structure Fabricated by Impurity Free Vacancy Disorder (IFVD)

Hidehiro Taniguchi*, Non-member, Hirotatsu Ishii*, Non-member, Ryuichiro Minato*, Non-member,
 Yutaka Ohki*, Non-member, Takeshi Namegaya*, Non-member, Akihiko Kasukawa*, Non-member

We have demonstrated high performance broad area single emitter lasers with window structure fabricated by newly developed impurity free vacancy disordering (IFVD) technique. Vacancies induce quantum well intermixing, leading to bandgap shift. We have succeeded in obtaining the large bandgap shift in window region and maintaining the original bandgap in gain region simultaneously. We can control the bandgap difference. A very high output power of 25.6W at 30A under pulsed operation was obtained without facet degradation. This is the one of the highest power for 100 μ m wide single emitter lasers. Moreover, no degradation and no sudden failure were observed for 5800 hours life test at 8W-20°C. We have, thus, realized the highest output power and high reliable lasers with window structure fabricated by IFVD.

キーワード：半導体レーザー，高出力，COD (catastrophic optical damage)，IFVD (impurity free vacancy disordering)

Keywords : semiconductor lasers, high power, catastrophic optical damage (COD), impurity free vacancy disordering (IFVD)

1. まえがき

9xx nm レーザダイオードは，EDFA 用励起光源，ファイバーレーザー用励起光源として使用され，コスト低減の観点から，さらなる高出力化が求められている。しかし，高出力化に伴い，COD (Catastrophic Optical Damage) と呼ばれる端面劣化による突然死が問題となっている。この端面劣化は次のように生じると理解されている。端面領域に存在する表面準位が非発光再結合を促し，この再結合エネルギーは熱として消費され端面温度が上がる。温度上昇は，端面部分でのエネルギーギャップを小さくするため，端面部での光吸収が増大し，これがさらに端面温度上昇を誘発する。この一連のサイクルが瞬時に繰り返され，ついに端面溶融を引き起こす。

COD を抑制する効果的な方法の一つとして窓構造がある。窓構造は，端面領域に，より大きなバンドギャップを形成するもので，光吸収を抑えることができ，上記サイク

ルを断ち切ることができる。

量子井戸混晶化は，バンドギャップを大きくする技術の一つである。混晶化の手法には 2 種類あり，第一に不純物を使った混晶化，第二に不純物フリーの混晶化 (IFVD; Impurity Free Vacancy Disordering) である。前者では Si や Zn に代表される不純物がよく使用されるが，フリーキャリア吸収の増加やリーク電流の増加を引き起こすため，窓構造にとって，好ましくない。

そのため，端面劣化を防ぐいろいろな技術の中で^{(1)~(3)}，IFVD⁽⁴⁾⁽⁵⁾は不純物を介さないことを特長として注目されており，大きなバンドギャップ，低いロスを持った高性能な窓を実現できる技術として非常に期待されている。実際，近年 IFVD の適用により，最高光出力 8W のレーザーが報告されている⁽⁶⁾。本論文では，より高い光出力，より高性能な窓をもったレーザーについて報告する。

2. レーザ構造と IFVD

IFVD プロセスをレーザーに適用する場合，窓領域を選択的に混晶化させ，それ以外の領域を混晶化させず保護することが重要である。混晶化は誘電体膜成膜，それに続く RTA (Rapid Thermal Annealing) プロセスによって行われ，混晶化の選択性がレーザー基本特性や窓性能を決める。高出力レー

* 古河電気工業 (株) ファイデルフォニクス研究所
 半導体デバイス開発部
 〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地
 Optical Device Dept. FITEL Photonics Laboratory R & D Division,
 Furukawa Electric Co., Ltd., 6, Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba
 290-8555

Fig. 1. Schematic view of a laser with window structure.

ザでは、端面での光密度が大きいため、窓領域と保護領域でのバンドギャップ差が大きいほど、COD が生じにくい高性能な窓になる。バンドギャップ差の増大のためだけには直接的に RTA 温度を上げることが有効であるが、高温熱処理は保護領域まで混晶化させることになり、レーザ基本特性が劣化してしまう。それではバンドギャップ差が大きいでも高出力化は達成されない。そこで、我々は、高出力化と高信頼性を両立させるために、保護領域でのバンドギャップを維持しつつ、同時に、窓領域のバンドギャップシフトを大きくするための研究を行った。

本研究に使われたレーザ構造を Fig.1 に示す。MOCVD 法 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition) によりエピタキシャル成長で作られた SCH-SQW (Separate Confinement Heterostructure Single Quantum Well) レーザである。材料は、GaAs コンタクト層、AlGaAs クラッド層、InGaAs/AlGaAs 活性層で構成されている。活性層の厚みは 10nm であり、In 組成比は 0.09 である。IFVD プロセスでは、まず、GaAs コンタクト層上の窓領域とゲイン領域に、それぞれ最適化された SiN 薄膜を成膜する。この薄膜の性質は、量子井戸混晶化の度合いに大きく影響を与える。RTA において、窓領域の N リッチな SiN 薄膜は、GaAs コンタクト層表面の Ga 原子を引き抜き、空孔生成を促進させる。一方、ゲイン領域のストイキオメトリな Si₃N₄ 薄膜は空孔生成を抑制させる⁽⁴⁾。主に窓領域で生成された空孔は拡散し、量子井戸の混晶化を促す。混晶化された領域のバンドギャップは広げられ、窓としての機能が付与される。その後、SiN 薄膜は取り除かれ、電極を形成し、レーザが出来上がる。

3. 量子井戸混晶化

Fig. 2 は、910°C-30s の RTA 後に、窓領域とゲイン領域のそれぞれから得られた PL (Photoluminescence) スペクトルである。また、リファレンスとしてエピ成長後に得られたサンプルも示す。窓領域では、混晶化により短波側へ波長シフトしていることがわかる。また、スペクトルの形状はどれもほぼ同じであり、半値幅の増加はない。これは、RTA プロセスがレーザに重大なダメージを与えなかったことを意味する。

Fig. 3 は、RTA 温度に対する PL エネルギーシフトを示すグラフである。PL エネルギーシフトは、RTA 前後での PL スペクトルシフトとして定義した。このシフト量は、混晶

Fig. 2. Typical Photoluminescence spectra of the laser with window structure (after 910°C 30s RTA).

Fig. 3. Photoluminescence energy shift as a function of RTA temperature (30s).

化の度合いに対応する。ゲイン領域で見られるエネルギーシフト ($E_{g_{gain}}$) は 10meV 以下と非常に小さく、ゲイン領域での混晶化は、我々が新しく開発した技術によって抑えられたことがわかる。一方、窓領域においては、140meV もの大きなブルーシフトが得られた。窓領域で見られるエネルギーシフト ($E_{g_{window}}$) は、RTA 温度の増加に伴って大きくなり、ゲイン領域と窓領域のエネルギーシフト差 (ΔE_g) も大きくなる。Fig. 3 に示したデータは、複数の成膜バッチ、エピ成長バッチから構成されている。大きな ΔE_g を確保できること、また RTA 温度に対して系統的に ΔE_g の上昇が得られていることは、再現よく ΔE_g がコントロールされていると結論できる。

Fig. 4 は、RTA 後における量子井戸の断面 TEM 像 (Transmission Electron Microscope) である。写真における白い帯は InGaAs 活性層に対応し、黒い地帯は AlGaAs 光ガイド層に対応する。写真 (a) のゲイン領域では、InGaAs/AlGaAs のはっきりとした境界が見られるが、写真 (b) の窓領域では、対応する境界がぼけている。これは、意図した領域には IFVD によって量子井戸が混晶化され、意図していない領域は混晶化されないということに相当し、選択的な IFVD が確立されたことを意味する。

Fig. 4. Cross-sectional TEM images of QW after RTA.

(a) TEM image for gain region (b) TEM image for window region.

4. レーザ特性

〈4・1〉 光学的特性 レーザチップは、熱膨張を合わせた CuW プレートに An-Sn 半田を使ってジャンクションダウンで接合され、その CuW プレートを Cu ヒートシンク上に組み立てた。Fig. 5 は、窓構造付きと窓構造なしの両方のレーザの駆動電流-光出力特性を示す。ストライプ幅は $100\mu\text{m}$ であり、キャビティー長は、 3.6mm である。窓構造付きレーザにおける ΔE_g は、 65meV である。窓構造なしレーザ（リファレンスレーザ）の端面近傍はアンポンプな領域となっている。

測定条件は、ヒートシンク温度 25°C 、1%サイクルの $10\mu\text{s}$ 幅パルス電流とした。窓構造の有無によらず、試作したレーザの典型的な閾値は 500mA であり、スロープ効率は 0.95W/A であった。つまり、窓構造付きレーザは、IFVD による高温プロセスを経たにもかかわらず、レーザ基本特性における劣化は見られていない。加えて、窓構造なしレーザは、電流約 17A 、光出力約 15W で端面劣化が原因の突然死に至ったのに対して、窓構造付きレーザの最大光出力は、実験設備の測定限界の 30A において、 25.6W にまで達した。これは、 $100\mu\text{m}$ 幅のシングルエミッタレーザにおいては、最高峰の数値であり、我々は実際のレーザ構造に IFVD を適用し、COD 対策として非常に効果的な窓構造の作製に成功した。

Fig. 6 は、窓構造付きレーザにおける、CW（Continuous Wave）駆動条件下での駆動電流-光出力特性を示す。ヒートシンク温度は、 15°C – 60°C の範囲で変化させている。最大光出力は、 15°C 、 18A において、 14.8W にまで達した。閾値温度依存を表す特性温度 T_0 は、 200K であった。

〈4・2〉 信頼性評価 ヒートシンク温度 20°C 、ACC（Automatic Current Control）条件下において、階段上のエージングテストを行った（Fig.7）。この図は、駆動電流を 6A 、 7A 、 8A 、 9A と階段状に上げた場合の、時間に対する光出力

Fig. 5. L-I characteristics (pulsed operation).

Fig. 6. L-I characteristics (CW operation).

の変化率を示す。サンプルは、窓構造付きレーザ 12 個、窓構造なしレーザ 8 個である。窓構造付きレーザにおける ΔE_g は、 60meV である。駆動電流の 6A 、 7A 、 8A 、 9A は、それぞれ、おおよその光出力で 5W 、 6W 、 7W 、 8W に対応する。

窓構造なしレーザにおいては、駆動電流を上げ、より過酷な条件になることにより、 9A の段階で突然死が起こりすべて故障してしまった。一方、窓構造付きレーザは、テスト中すべて生き残り、 9A で 5800 時間を経過したが、漸次劣化や突然死は見られず、高い信頼性を保持している。これは、我々の IFVD によって作製された窓が、エージングにおいても有効に働いていることを示している。

5. 結 論

我々は、IFVD 技術を開発し、同一ウェハ面内で選択的に窓領域とゲイン領域のバンドギャップをコントロールする

Fig. 7. Life test result of the lasers with window and without window structures at ACC condition under 20°C heatsink temperature.

ことに成功した。さらに、この技術を 100 μ m ストライブ幅の SCH-SQW レーザに適用し、その結果、100 μ m 幅のシングルエミッタレーザにおいて最高峰となる、最大光出力 25.6W (30A のパルス条件下) を得た。また、エージングテストにおいては、8W 条件下で 5800 時間の間、漸次劣化や突然死が見られなかった。以上の様に、端面劣化対策として IFVD 技術を用いた窓構造付きレーザの作製に成功し、高出力化と高信頼性化に有効であることを確認した。

謝 辞

本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 (JST) から受託した革新技術開発研究事業によるものである。

(平成 19 年 8 月 27 日受付, 平成 19 年 12 月 17 日再受付)

文 献

- (1) E. Latta, A. Moser, A. Oosenbrug, M. Gasser, and Th. Forster : "Reliability of high-power AlGaAs SQW grinsch lasers", 12th IEEE International Semiconductor Laser Conference, Conference Digest, pp.276-276 (1990)
- (2) J. K. Lee, K. H. Park, D. H. Jang, H. S. Cho, C. S. Park, K. E. Pyun, and J. Jeong : "Improvement of Catastrophic Optical Damage (COD) Level for High-Power 0.98 μ m GaInAs-GaN Laser Diodes Using Impurity Induced Layer Disorder", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.10, pp.1226-1228 (1998)
- (3) K. Hiramoto, M. Sagawa, T. Kikawa, and S. Tsuji : "High-Power and Highly Reliable Operation of Al-Free InGaAs-InGaAsP 0.98- μ m Lasers with a Window Structure Fabricated by Si Ion Implantation", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol.5, pp.817-820 (1999)
- (4) D. G. Deppe, L. J. Guido, N. Holonyak, Jr., K. C. Hsieh, R. D. Burnham, R. L. Thornton, and T. L. Paoli : "Stripe-geometry quantum well heterostructure AlxGa1-xAs-GaAs lasers defined by defect diffusion", Appl. Phys. Lett., Vol.49, pp.510-512 (1986)
- (5) P. L. Gareso, M. Buda, L. Fu, H. H. Tan, and C. Jagadish : "Suppression of thermal atomic interdiffusion in C-doped InGaAs/AlGaAs quantum well laser structures using TiO₂ dielectric layers", Appl. Phys. Lett., Vol.85, pp.5583-5585 (2004)
- (6) Y. Yamada, Y. Yamada, T. Fujimoto, and K. Uchida : "High power and highly reliable 980nm lasers with window structure using Impurity Free Vacancy Disorder", Proc. SPIE, Vol.5738, pp.40-46 (2005)

谷 口 英 広

(非会員) 2001 年東京工業大学大学院修士課程修了。同年、古河電気工業 (株) 入社。半導体デバイス開発部所属。半導体レーザモジュールの設計開発に携わり、現在、9xx-nm レーザのチップ開発に従事。主として、端面保護技術を担当している。

石 井 宏 辰

(非会員) 1992 年北海道大学大学院博士課程修了。1993 年古河電気工業 (株) 入社。半導体研究開発センター所属。化合物半導体材料の結晶成長の研究開発に携わり、現在、半導体レーザの開発に従事。工学博士。応用物理学会会員。

湊 龍 一 郎

(非会員) 2000 年早稲田大学大学院修士課程修了。同年、古河電気工業 (株) 入社。半導体デバイス部所属。主として、化合物半導体材料のエピタキシャル成長を担当している。

大 木 泰

(非会員) 1999 年東京大学大学院修士課程修了。同年、古河電気工業 (株) 入社。半導体デバイス開発部所属。主として、半導体レーザチップの設計開発を担当している。応用物理学会会員。

行 谷 武

(非会員) 1988 年横浜国立大学大学院修士課程修了。同年、古河電気工業 (株) 入社。半導体デバイス開発部所属。主として、半導体レーザチップの設計開発を担当している。

粕 川 秋 彦

(非会員) 1984 年東京工業大学大学院修士課程修了。同年古河電気工業 (株) 入社。長波長半導体レーザの研究開発に従事。1990 年-1991 年米国ベル通信研究所客員研究員。光ファイバ用 980nm, 1480nm 帯ハイパワーレーザ, DFB, 面発光レーザの研究開発に従事。現在、横浜事業所半導体研究開発センター長。1998 年大河内賞。2000 年電子情報通信学会業績賞。2001 年櫻井健二郎氏記念賞。工学博士。電子情報通信学会, 応用物理学会, IEEE 会員。