

# 特集 レーダ用大出力パルス半導体レーザの開発\*

## High-Power Pulsed Laser Diode for an Automotive Laser Radar Sensor

安部 克則  
Katsunori ABE

木村 裕治  
Yuji KIMURA

渥美 欣也  
Kinya ATSUMI

後藤 吉孝  
Yoshitaka GOTOH

The high-power and high-reliability pulsed laser diode has been developed for the automotive scanning laser radar sensor. For this device a separate confinement heterostructure multiple quantum well (SCH-MQW) is designed to attain high output power with low drive current. We have achieved the high output power (22W at 20A) with controlling beam divergence angle by optimizing optical waveguide thickness and optical confinement factor. This paper presents epitaxial growth for the laser structure by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) and low-strain die-bonding technique with Au-Sn/Ni alloy solder.

**Key words** : Radar, Sensor, Laser diode, High-power, High-reliability, Epitaxial growth, Adaptive Cruise Control

### 1. はじめに

近年、カーエレクトロニクスの進歩に伴い、事故を防止する予防安全装置の開発が可能となってきた。特にこれらはアクティブセーフティの考え方から追突防止システム<sup>1)</sup>や車間制御システム<sup>2)</sup>に展開されており、ブレーキ付ACC (Adaptive Cruise Control) システムの開発にまで進んできている<sup>3)</sup>。このようなシステムには瞬時に精度良く前方車両との距離を計測する自動車の“目”が必要であり、これにはスキャン型レーザレーダ<sup>4)</sup>が有力である。レーザレーダはレーザ光を前方に照射し、反射光との時間差によって距離を計測するセンサである。その中で大出力半導体レーザは最も重要な部品となるため、システムに合わせた開発が必要である。

我々は、これまでシステムにおいてキーデバイスとなる大出力半導体レーザの研究にエピタキシャル成長装置の開発から取り組んできた<sup>5)</sup>。ここで、数十Aのバルス大電流で数十W級の出力を得る大出力半導体レーザでは、特性と共に信頼性を確保することが最も重要である。特に車載用として高い信頼性を確保するためには、結晶成長/構造設計/素子作製プロセス/実装/検査等の基盤技術をトータルで開発することが必要である。

今回、高い電流-光変換効率を維持しながらビーム形状をシステムの光学設計に適合させ、かつ高信頼性を得るためにレーザ素子内部で光と電流を独立に閉じ込めることができる分離閉じ込め多重量子井戸構造を検討したので報告する。

### 2. 結晶成長

結晶成長は大出力半導体レーザの特性及び信頼性を支える重要な基盤技術である、また、半導体レーザの高効率化(大出力化)を達成するためには活性層を多重量子井戸(Multiple Quantum Well:MQW)構造と呼ばれる数nm~数十nmの薄膜を多層積層する構造を実現する必要があり、良好な結晶性と共に原子オーダーでの急峻なヘテロ界面が要求される。結晶成長は優れた光学的結晶性及び均一性が得られる有機金属化学気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)を用いた。MQWのような微細構造を実現するためにはMOCVD装置反応管内のガスの流れを制御することが極めて重要である<sup>6)</sup>。

Fig. 1に半導体レーザの構造を示す。MQW構造は量子効果により、しきい値電流の低減、発光効率の向上等の効果があるが、量子効果が現れ、良好な特性を得るためには、一つの井戸層の厚さを20nm程度以下の薄膜で形成し、AlGaAs/GaAsヘテロ界面を急峻に形成することが必要である。

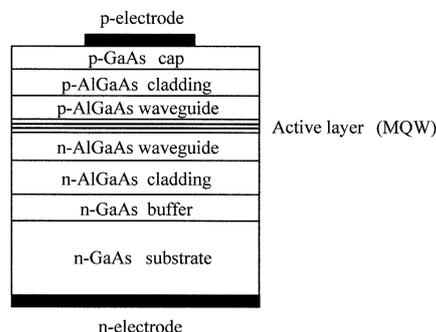


Fig.1 Schematic diagram of the SCH-MQW laser.

\*本内容は、社団法人自動車技術会 学術講演会前刷集 No.116-00 20005540 より一部加筆して転載

そこで、上述した、の微細な量子井戸構造を調べるため、2.5nm ~ 20nmの異なる井戸幅を持つ単一量子井戸 (Single Quantum Well : SQW) を作製し、フォトルミネッセンス (Photoluminescence : PL) により評価した。Fig. 2にSQWのエネルギーバンド図を示す。井戸幅 $L_z$ が20nm程度以下の薄膜になると量子効果が現れ、量子準位が形成される。量子準位は井戸幅が狭くなるにしたがって高い準位となる。SQW構造における電子及び正孔の量子準位 $E_e$ 及び $E_{hh}$ はシュレディンガー方程式を解くことにより、(1)式の固有エネルギー $E$ として求めることができる<sup>7)</sup>。

$$\tan\left(\frac{L_z}{\hbar}\sqrt{\frac{1}{2}m_w E}\right) - \frac{m_b(V-E)}{m_w E} = 0 \quad (1)$$

$L_z$  : 量子井戸の幅

$m_w$  : 井戸層の電子及び正孔の有効質量

$m_b$  : 障壁層の電子及び正孔の有効質量

$V$  : ポテンシャル障壁の高さ (電子: $V_e$ , 正孔: $V_h$ )

$h$  : プランク定数 ( $6.626196 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$\hbar$  :  $h / (2\pi) = 6.582183 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$

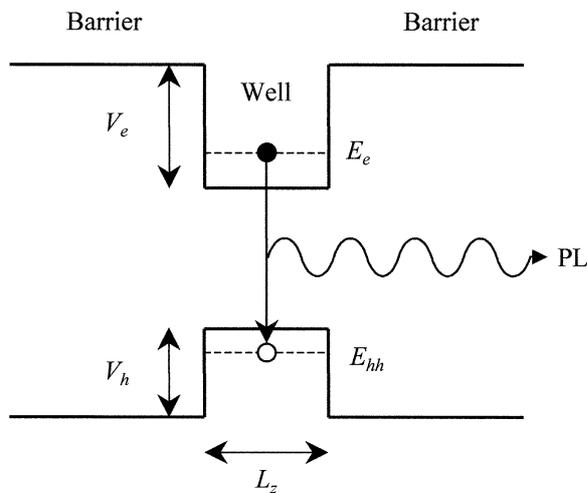


Fig.2 Energy band diagram of a single quantum well.

SQW構造に外部から励起光を照射すると、励起された電子、正孔の量子準位間の再結合によりその量子準位間のエネルギーに対応したPL発光が観測される。Fig. 3に今回作製したSQWのPL測定結果を示す。SQWのそれぞれの井戸幅 (2.5nm ~ 20nm) に対応した発光ピークが現れている。

ここで、観測された発光ピークが量子準位からの発光であるかを検証するために、観測されたPLの発光ピーク波長とSQWの井戸幅に対応する量子準位を(1)式より理論的に計算した値との比較をFig. 4に示す。

測定結果と計算値がよく一致していることからSQWの井戸幅が設計どおりに作製され、それぞれの井戸幅に対応した量子準位が形成されていることがわかる。

また、Fig. 3のPLスペクトルの半値幅から見積もったAlGaAs / GaAsヘテロ界面の変動は± 1原子層 (± 0.28nm) 以下であることから、作製した量子井戸構造のヘテロ界面は1原子層レベルの急峻な界面であると言える。このような急峻な界面はガス切替のバルブとチャンバ間の距離をできるだけ短くし、デッドスペースを極力排除した装置設計により実現されている。

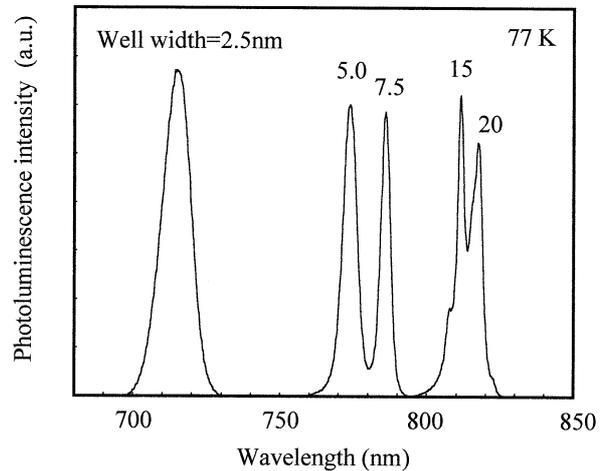


Fig.3 PL spectra at 77K of AlGaAs/GaAs SQWs.

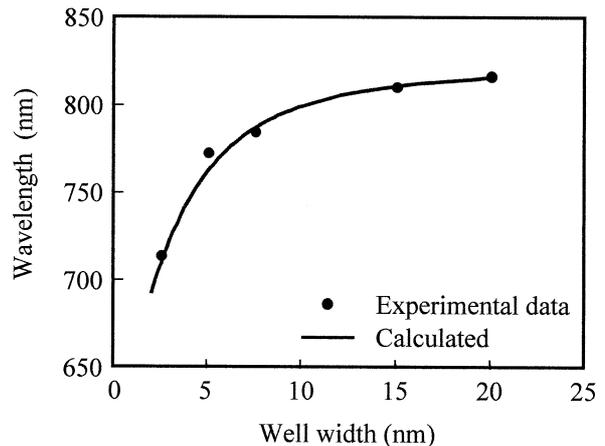


Fig.4 Emission wavelength plotted against the well width of the quantum well.

さらに、実際に作製したレーザ構造についてSIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) により酸素元素を分析した。AlGaAs系材料では結晶成長時に原料中の不純物や反応チャンバ内の残留酸素により、Alが酸化されやすい性質がある。結晶成長中に取り込まれ

た酸素は非発光の再結合中心となり、レーザ特性の発光効率を低下させる原因となるが、測定結果はFig. 5に示すように酸素の信号は測定限界（～10ppm）以下で観測されており良好な結果が得られている。このような不純物としての酸素が非常に少ない高純度結晶は、装置メンテナンス後の十分なベークン及びN<sub>2</sub>ガスパージ等で、チャンバ内をできる限り大気にさらさない装置管理によって達成されている。

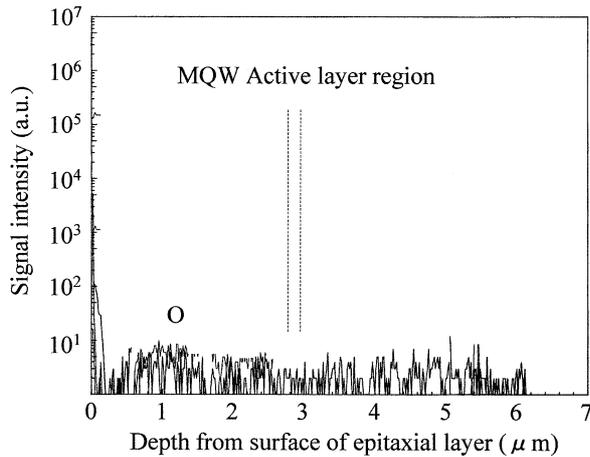


Fig.5 SIMS profile of the SCH-MQW laser.

### 3. 半導体レーザの構造設計

半導体レーザの大出力化には光の閉じ込めとキャリアの閉じ込めをいかに効率よく行うかが重要な鍵となる。また、レーザのビーム形状はシステムのレンズ設計等に大きくかかわってくる重要な特性であるため、適用するシステムに合わせた構造設計が必要である。

そこで、まず光の閉じ込めについて検討する。Fig. 6に光とキャリアを独立に閉じ込めることができるSCH-MQW (Separate Confinement Heterostructure Multiple Quantum Well) 構造のバンド図を示す。

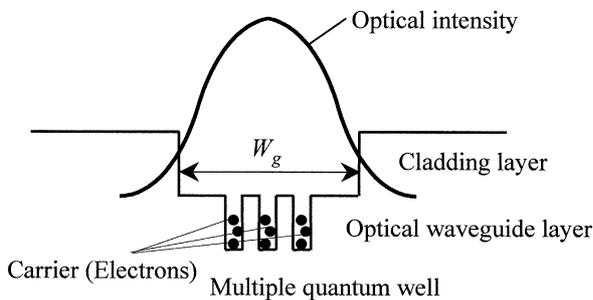


Fig.6 Schematic diagram of the SCH-MQW structure.

キャリアである電子及び正孔はできるだけ狭い領域に閉じ込める必要があり、ポテンシャルエネルギーの

低いMQWの各井戸層内に閉じ込められる。一方、光はクラッド層と光ガイド層との屈折率差により、屈折率の高い光ガイド層内に閉じ込められる。このようにSCH-MQW構造はキャリアの閉じ込め領域よりも広い光ガイド層厚 $W_g$ で決まる領域に光を閉じ込めることで閉じ込め効率を良くする構造である。また、この構造は活性層端面の光密度を低くすることで光学損傷 (Catastrophic Optical Damage : COD) を防止し、信頼性を高める効果もある。

ここで、光の閉じ込め度合いを光閉じ込め係数として表す。Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>Asクラッド層とAl<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As光ガイド層で Fig. 6のSCH-MQW構造を実現した場合に光ガイド層厚 $W_g$ と光閉じ込め係数の関係を計算した結果をFig. 7に示す。これより、 $W_g$ が小さいと光閉じ込め係数が小さく、光が有効に閉じ込められないことがわかる。光が有効に閉じ込められないと、レーザの発振しきい値が増大してしまい、良い特性が得られない。また、光閉じ込め係数は $W_g = 0.6 \mu\text{m}$ 程度で90%以上となり飽和する傾向がある。したがって、 $W_g$ は $0.6 \mu\text{m}$ 以上に設計する必要がある。

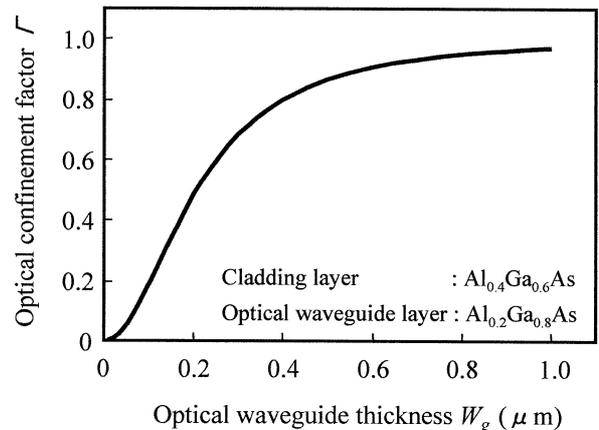


Fig.7 Optical confinement factor versus optical waveguide thickness  $W_g$ .

次に、レーザのビーム形状について検討する。レーザのビーム形状を表す重要な特性としてFFP (Far Field Pattern : 遠視野像)がある。FFPはFig. 8に示すようにレーザの発光端面に対して充分遠方(半導体レーザの場合、10cm程度離ればFFPとなる)における水平方向及び垂直方向の光強度分布であり、光強度が最大値の1/2になる角度幅(半値全角： $\theta_h, \theta_v$ )を一般にビーム広がり角という。

今回、レーザの大出力化とFFPの制御を両立させるため、充分な閉じ込め係数が得られる範囲( $W_g$

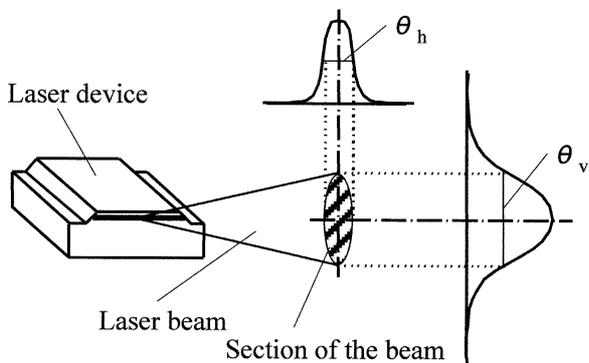


Fig.8 Schematic illustration of laser beam and FFP.

0.6  $\mu\text{m}$ )において光ガイド層厚 $W_g$ を検討した。Fig. 9にビーム広がり角の光ガイド層厚依存性を示す。通常、半導体レーザは電流を狭い領域に閉じ込める必要があるため、活性層厚(MQWトータルの厚さ)は約0.1  $\mu\text{m}$ 程度に設計している。したがって、回折によりレーザビームは垂直方向に大きく広がる。ここで、光ガイド層厚を大きくしていくと垂直方向の光の回折効果が小さくなるため、ビーム広がり角は小さくなる。一方、水平方向のFFPについては発光層幅(~数百 $\mu\text{m}$ )が波長(0.85  $\mu\text{m}$ )に比べ充分大きく、回折が起こらないためガイド層厚を変えてもビーム広がり角は変化しない。

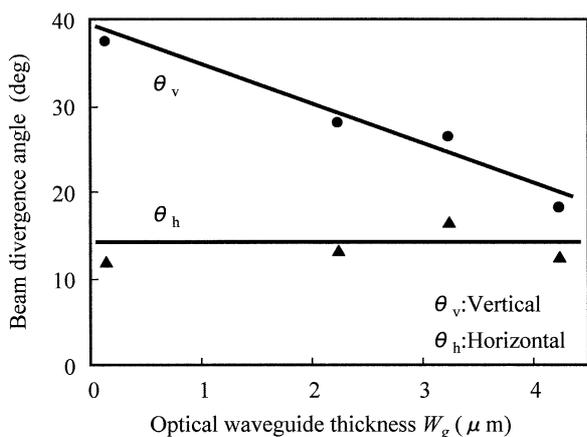


Fig.9 Beam divergence angle as a function of optical waveguide thickness.

ここで、垂直方向のビーム広がり角  $\theta_v$  と水平方向のビーム広がり角  $\theta_h$  の比  $\theta_v / \theta_h$  を楕円比と定義してその変化をFig. 10に示す。これより、光ガイド層厚が大きくなるにしたがって楕円比は小さくなり、円形に近いビーム形状が得られる。このように、光ガイド層厚 $W_g$ を変えることで楕円比を1.3 ~ 3.2の間で制御することができ、システムに適合したビーム形状を

得ることが可能となった。

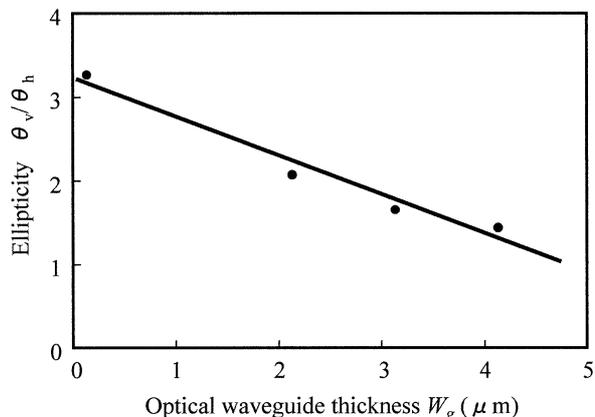


Fig.10 Ellipticity versus optical waveguide thickness.

#### 4. 低ダメージ実装

半導体レーザチップはステムの銅製ヒートシンク上にダイボンドされ、その後ワイヤボンドされる。これらの実装は信頼性上、特に活性層にダメージを与えないことが非常に重要である。Fig. 11はダイボンド時に活性層の中央部をコレットで加圧(0.7N)して実装した場合の高温連続通電試験結果である。このように200時間程度のごく短時間の駆動で出力が低下する。

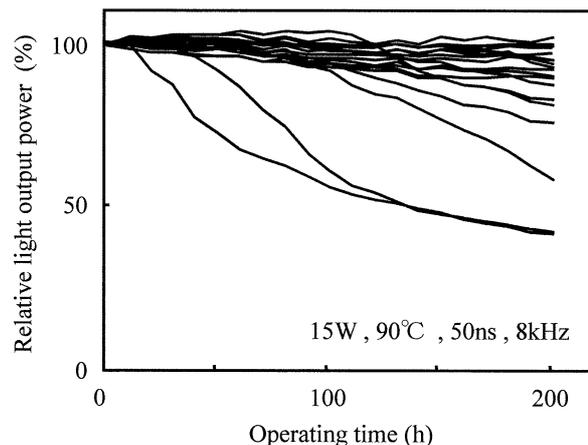


Fig.11 Reliability test of the SCH-MQW laser diodes with 0.7N pressure die-bonding.

出力が低下した素子について、活性層をTEM (Transmission Electron Microscopy) により観察した結果をFig. 12に示す。コレットで加圧した直下のMQW活性層に転位が発生しているのが観察されている。一方、コレットで加圧していない箇所にはこのよ

うな転位は観測されなかった．このことから，コレットの加圧によって応力が発生し活性層にダメージが入り，その状態でレーザー発光させることで電流と光のエネルギーにより転位が増殖していると考えられる．したがって，高い信頼性を確保するためには活性層に応力が発生しないような低ダメージ実装技術を確立しなければならない．

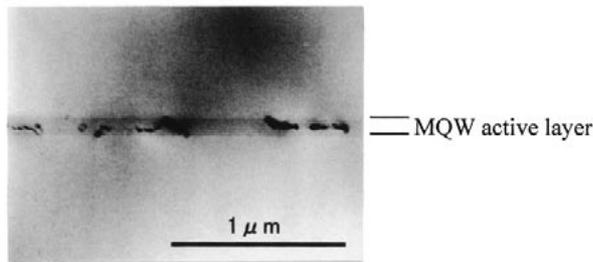


Fig.12 TEM image of the MQW active layer with dislocations formed during the degradation.

そこで，コレットの加圧無しでも十分な接合強度が得られるはんだ材としてAu-Sn / Ni三元共晶はんだを新たに開発した<sup>8)</sup>．これによって，コレットの加圧無しでも半導体レーザーチップのダイボンドが可能になった．また，Fig. 13にAu-Sn / Niの状態図を示すがNi組成2.5%においてははんだの融点が最小の255 となり，Au-Snはんだ単体の融点280 と比べ25 低くすることができる．このような低融点化はダイボンド時の残留応力の低減効果があり，素子の高信頼性に結びつく．

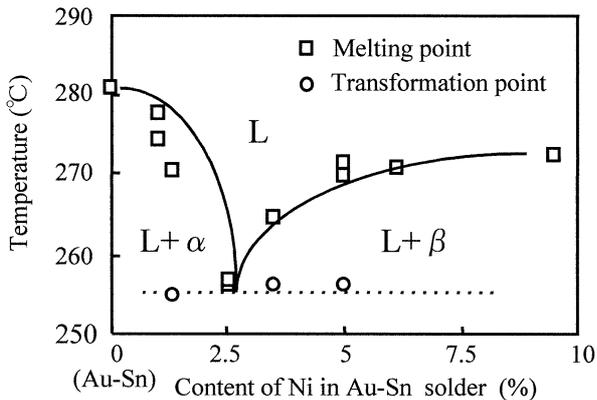


Fig.13 Phase diagram of Au-Sn/Ni alloy solder.

## 5. 信頼性評価

半導体レーザーの信頼性を確保，保証するために高温

Table 1 Condition of the reliability test.

Light output power	15 W
Temperature	90 °C
Pulse width	50 ns
Repetition frequency	8 kHz

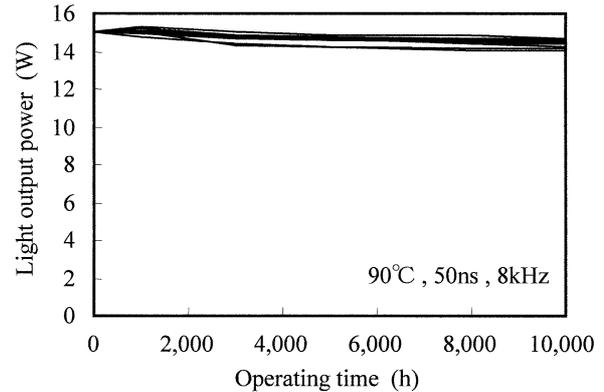


Fig.14 Reliability test of the SCH-MQW laser with low-strain die-bonding.

連続通電試験を行った．レーザーの駆動条件をTable 1に示す．これは実車での使用条件の加速試験である．試験結果をFig. 14に示す．この条件において10,000時間においても素子の故障は発生せず，仕様を十分に満足していることが確認できた．

また，これまでに行ってきた高温連続通電試験の累積のコンポーネントアワー（試験時間×素子数×加速係数）は543万時間に達しており，故障数が0であることから信頼性水準90%での故障率  $p$  を算出すると，  

$$p = -\ln(0.1) / 5,430,000 = 4.24 \times 10^{-7} \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

となる．この値から平均故障寿命（Mean Time To Failure：MTTF）を求めると，

$$\text{MTTF} = 1 / p = 2.36 \times 10^6 \text{ (h)}$$

となる．現在得られているMTTFが236万時間以上という高い信頼性は，前述した低ダメージ実装技術の他に，エピウエハの優れた結晶性，ウエハプロセスの品質管理，検査技術の確立により達成されたものである．

最後にパッケージされた大出力半導体レーザーの外観写真及び模式図をFig. 15，仕様をTable 2にまとめて示す．約0.5mmサイズのレーザーチップが9mmのステムに実装，ワイヤボンディングされている．

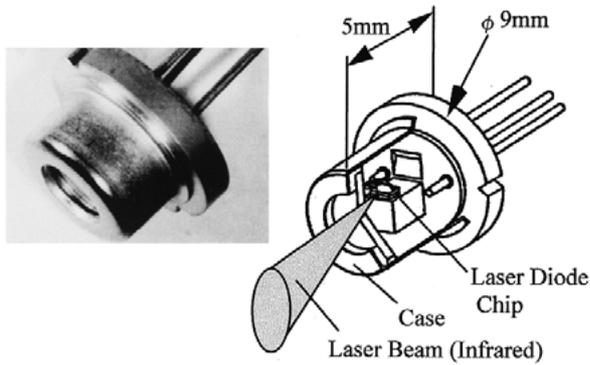


Fig.15 Photograph of the laser diode and schematic illustration.

Table 2 Specifications of laser diode

Items	Specifications
Light output power	15 W
Wavelength	850 nm
Operation temperature	-30 ~ 85 °C
Life time	10,000 h
Package size	φ 9 mm

6. まとめ

- (1) MOCVDによるMQWの結晶成長において、1原子層レベルの界面急峻性と高純度結晶成長技術を確立した。
- (2) 活性層の構造として光と電流を独立に閉じ込めることができるSCH-MQW構造を検討し、光ガイド層厚を最適化することにより、高い電流-光変換効率と光学設計に適合したビーム形状を得ることができた。
- (3) Au-Sn / Ni三元共晶はんだを新規に開発し、低ダメージ実装技術を確立することで高信頼性を実現した。  
以上により、高性能で高信頼性の車載レーザーレーダ用大出力パルス半導体レーザーを開発した。

<参考文献>

- 1) 荒木, 山田, 広島, 伊東, 西岡, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.963 (1996) p.209 .
- 2) 藤田, 菊池, 萩野, 大崎, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.114 (1999) p.13 .
- 3) 飯島, 他, 自動車技術, Vol.53, No.11 (1999) p.98 .
- 4) K. Osugi et al., JSAE Review 20 (1999) p.549 .

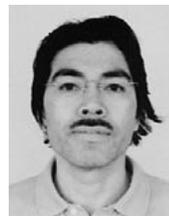
- 5) 渥美, 木村, 安部, 上野, 服部, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.946 (1994) p.217 .
- 6) K.Atsumi et al., MRS Proceedings,242 (1991) p.721 .
- 7) H.Kawai et al., J.Appl.Phys., Vol.56, No.2 (1984) p.15 .
- 8) Y.Kimura, N.Matsushita, H.Kato, K.Abe, K. Atsumi, Proceedings of SPIE Vol.3888 (2000) p.759 .

<著者>



安部 克則  
(あべ かつのり)

基礎研究所  
MOCVD 結晶成長, デバイス設計,  
半導体レーザー関連の研究開発に従事.



木村 裕治  
(きむら ゆうじ)

基礎研究所  
半導体レーザー, レーザパー関連の  
研究開発に従事.



渥美 欣也  
(あつみ きんや)

基礎研究所  
MOCVD 結晶成長, 半導体レーザー  
関連の研究開発に従事.



後藤 吉孝  
(ごとう よしたか)

IC技術2部  
半導体レーザー, 光センサ関連の設  
計に従事.