

# 特集 車載レーザレーダ用高出力レーザダイオード\*

## Highly Reliable High Power Diode Laser for Laser Radar Application

渥美 欣也

Kinya ATSUMI

安部 克則

Katsunori ABE

加藤 久弥

Hisaya KATO

道山 勝教

Katsunori MICHİYAMA

In 1997, we have applied laser technology to the world's first practical Adaptive Cruise Control (ACC) system. The ACC system is based on 2-dimensional scanning laser-radar-sensor technology that is supported by highly reliable high power diode laser. Now, we have developed 34W output power Multiple-Quantum-Well (MQW) diode laser. The power of 870nm near IR diode laser is twice as high as conventional one, thus it meets the strong needs for robust detection of the reflective laser beams from the moving vehicle ahead. Furthermore, Au-Sn-Ni a new alloy solder has been employed to sustain high degree of vibration and thermal shock to raise reliability. The acceleration life-tests at high temperature pulsed operation demonstrate the high reliability of developed 34W high power diode laser.

**Key words** : Radar, Sensor, Diode laser, High-power, Reliability, Adaptive Cruise Control

### 1. はじめに

近年、自動車の安全分野における研究開発は性能面でよりインテリジェント化の方向に進んできており、それを支えているのが最先端の電子化技術だといえる。スキャン式レーザレーダを用いたACCシステムは、将来の予防安全をにらんだ装置であり、電子化による自動車技術にイノベーションを興すものの一つとして挙げて間違いない。ところで、レーザレーダは前方のターゲット車両を捕そくし、精度よく100m以上の車間距離を計測する必要がある。従って、遠方までレーザビームを到達させるためには、高出力レーザダイオードの開発が必要となる。

レーザダイオードはレーザレーダセンサの「目」として最も重要なキーコンポーネントである。レーザレーダは車両安全分野で使用されるため、センサ技術者からは、これまで長寿命、高信頼性の高出力レーザダイオードの開発が強く求められてきた。特に、前方の物体をより遠くまで安定して確実に検知したいという要求があり、高出力でしかも安定したレーザビームを出射し、しかも長寿命のレーザダイオードの開発ニーズが近年高まってきた。

ところで、レーザは20世紀最大の発明の一つといわれている。特に小型、高効率であるレーザダイオードは、レーザの中でこれまでに最も数多く生産され、実用に供されてきたデバイスである。その間、高出力化への取り組みが様々な新しい応用分野への展開を支えてきた。このようにレーザダイオードの高出力化は、誕生以来変わらぬ技術トレンドとなっているが、結晶

内での高光密度ゆえの結晶の劣化防止など、常に信頼性の克服との戦いであったといえる。

我々は今回、結晶劣化防止対策などにより信頼性を克服し、従来の2倍の34Wのレーザ出力を可能とするMQW(Multiple-Quantum-Well)レーザダイオードを開発した。その結果として、2003年より高出力型のレーザレーダセンサが市場投入され、現在日本国内および北アメリカ市場にて大変良い結果を得ている。

### 2. スキャン式レーザレーダ用の高出力レーザダイオード

#### 2.1 15Wクラスレーザダイオード

我々は、AlGaAs/GaAsから成る高性能レーザダイオードを車載レーザレーダ用として1985年から開発してきた。そして、1997年より市場にACCシステムとして初めて投入した。Fig. 1にレーザダイオードの模式図を示す。

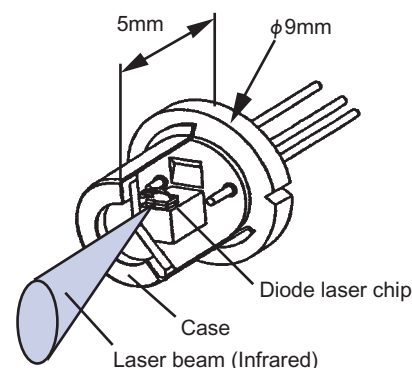


Fig. 1 High power diode laser

\*Translated and reprinted with permission from SAE paper 2004-01-1594 © 2004 SAE International

本レーザダイオードの素子構造の特長は、数十アンペアの電流注入時に他社のものと比較し、最も光出力効率が上がるように活性層のMQW構造をチューニングしている点にある。また、チップは銅のヒートシンク上に実装されワイヤボンドでリードピンと結合されている。

レーザダイオード（特に高出力のもの）は実装時の活性層に与えるダメージに対して極めて敏感である。我々は車載用として高い信頼性を確保するために、低ダメージ実装技術を確認し高温試験など約10倍加速の寿命試験を行ってきた。その試験条件をTable 1、結果をFig. 2に示す。

Table 1 Summary of life-time test conditions

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

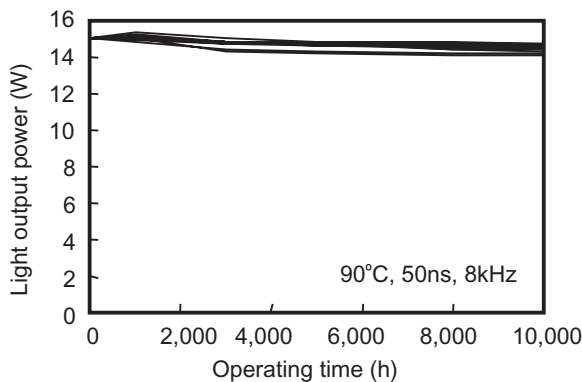


Fig. 2 Life-time test of the diode lasers with low damage die-bonding conditions

1万時間後の寿命試験結果から分かるように、どの素子もほとんど出力変化は見られない。Fig. 3はダイボンディング時に活性層に故意的に0.7Nの圧力を掛けた素子群である。素子の外観検査では違いが全く分からないが、200時間という短時間で素子が劣化していくことが分かる。

活性層が劣化したレーザダイオードをTEM (Transmission Electron Microscopy)で観察した結果をFig. 4に示す。Fig. 4より、コレットで加圧したところをTEMで観察すると多くの転位が存在していることが分かる。このことから活性層へのダメージがいかにレーザダイオードの寿命に大きな影響を与えているか

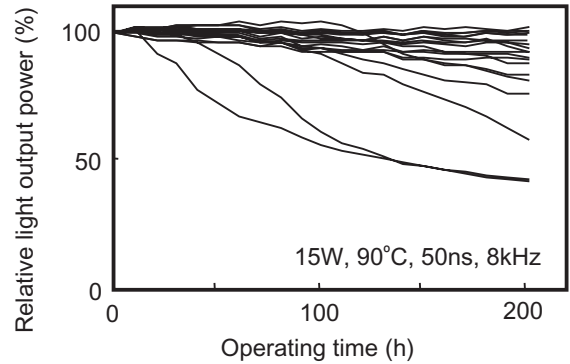


Fig. 3 Life-time test of the diode lasers under the 0.7N pressure die-bonding conditions

が分かる。そこでレーザダイオードの信頼性を上げるためには、レーザダイオードチップにダメージを与えないダイボンディング実装技術を開発することが重要であることが明らかとなった。我々はダイボンディング中にコレットによりチップを加圧しなくても良好な接合強度を得ることのできるAu-Sn-Ni合金はんだを新たに開発した。このはんだはチップと銅のヒートシンクの濡れ性を向上させ、その結果ダメージレスの実装が可能となった。Fig. 5はAu-Sn-Niの相図であり、DSC(Differential Scanning Calorimetry)から得られた結果である。この図から分かるように、Ni添加量が2.5%の時最も融点が下がる。

はんだの融点が低下すると実装温度を下げることで、レーザダイオードチップの内部残留応力を低下させることができる。従って、最適なNi添加量を選択することにより、融点を下げ、しかも濡れ性を向上させることが可能となった。その結果、素子へのダメージは無くなり、車載品質の振動、高温保存、熱衝撃などのスペックをすべて満足できる品質とすることができた。

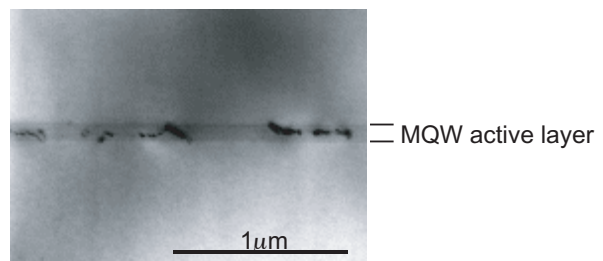


Fig. 4 TEM image of MQW active layer of the degraded diode laser

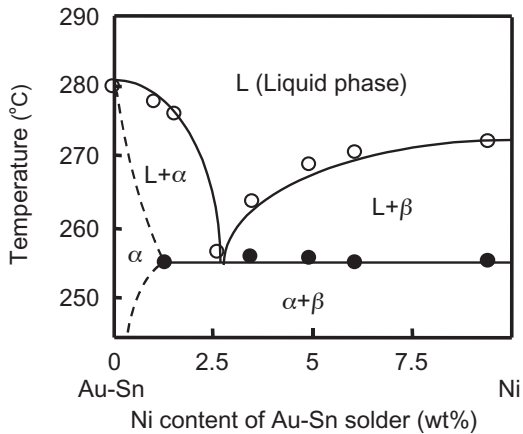


Fig. 5 Phase diagram of Au-Sn-Ni alloy

2.2 34Wクラスレーザーダイオード

2次元スキャンは6面のポリゴンミラーにより行われる。Fig. 6に示すように、ポリゴンミラーの各面は上下にスキャンできるように、それぞれの角度を保持している。

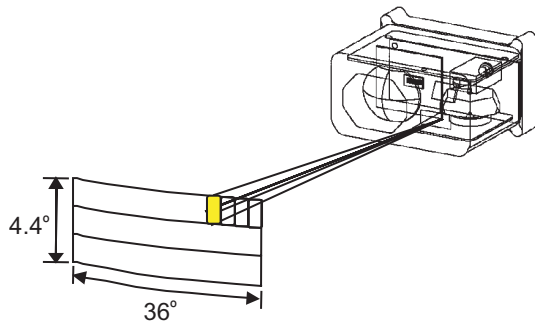


Fig. 6 Schematic diagram of 2-dimensional scanning laser radar

今回、レーザレーダセンサの性能を向上させる目的で、より広角の検知能力を付与することになった。従って、レーザレーダのスキャン角度を±8°から±18°に広げ、さらに発光周期も増加させるため駆動条件として非常に厳しい要求となった。センサから出射されるレーザビームの形状もセンサ技術者により再設計され、検知能力のロバスト性を考慮に入れ、出力を15W（従来の出力）から34Wに改善することとなった。駆動負荷とそのパラメータの関係は以下のとおりである。

$$L \propto I^2 F W \exp(-E_a / k_B T) \quad (1)$$

ここでパラメータは以下のように定義する。

L : 駆動負荷, I : 電流, F : 駆動周波数,  
W : パルス幅, E<sub>a</sub> : 活性化エネルギー,  
K<sub>B</sub> : Boltzmann定数, T : 絶対温度

34Wと従来の15Wのレーザレーダセンサの駆動負荷をTable 2に比較する。負荷は(1)式より計算できる。その結果、今回開発するレーザダイオードは従来の駆動条件に比べ17倍も厳しいことが分かる。

Table 2 Comparison of drive load of conventional and high power type laser-radar-sensor

	Conventional type	34W-class	Load rate
Repetition frequency	1	2.06	2.06
Pulse width	1	1.17	1.17
Light output power	1	2.27	(2.27)
Drive current	1	1.81	3.27
Temperature	1	1.08	2.16
		Total	17.0

2.3 34Wクラスレーザーダイオードの寿命試験

レーザダイオード開発の初期段階では15Wがせいぜいであったが、6年間で2倍以上の高出力化を可能にした。このようになるまでには、新たな劣化モードの克服が必要であった。我々は上述のような厳しい駆動条件での劣化メカニズムを知るために、系統的に劣化モードを調査してきた。最終的には高温にて34Wの高出力で発光させた加速試験にて新たな劣化モードを確認した。Fig. 7に駆動条件と試験結果を示す。この駆動条件は、Table 1の加速試験条件と比較すると21倍も厳しい。この試験結果から、寿命を満足できないものが存在することが分かる。そこで、劣化モードを明らかにするために、レーザダイオードのニアフィールドパターン（近視野像）の変化を観察することにした。

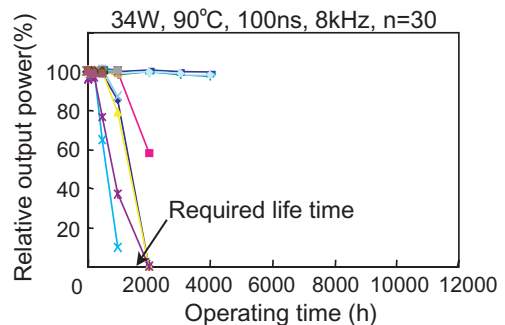


Fig. 7 Results of the acceleration life-time test

## 2.4 劣化素子の分析

### 2.4.1 レーザダイオード劣化の種類

レーザダイオードには二つの劣化モードが存在することが知られている。一つ目はCOD (Catastrophic Optical Damage; 瞬時光学損傷) であり、もう一つはDLD (Dark Line Defect; 暗線欠陥) である。CODは素子の出射端面で光吸収によって結晶が溶融する現象である。一般的な発生メカニズムは出射端面に存在する界面準位により光が吸収されて発熱し、ついには結晶の融点を超えて結晶が溶融するというものであり、光吸収、温度上昇、バンドギャップ縮小、光吸収増加という正帰還によって爆発的に進行する。従ってCODは光出力に強く依存し、光の進行方向に沿って急激に進行するという特徴がある。

また、CODには静的CODと動的CODの2種類がある。静的CODとは、無負荷の状態から素子に徐々に電流を増していったときに発生するCODであり、動的CODとは長時間動作の途中で発生するCODである。CODはCODレベルと呼ばれる臨界出力を超えた時点で発生するが、CODレベルは静的CODの方が動的CODより高く、一般に前者は後者の2~3倍である。この理由は、長時間動作により出射端面が徐々に酸化して(動的)CODが発生しやすくなるためである。

一方DLDは、結晶内に内在していた点欠陥が電流、温度等により徐々に結晶方位に沿って伸展する現象である。従って、DLDは電流と温度に強く依存し、結晶方位に沿ってゆっくりと伸展するという特徴があることが一般に知られている。

Fig. 8(a)に示すように、15Wの出力での従来駆動条件の高温通電試験で発生した故障モードは、NFPの欠けが活性層の中心から徐々に広がるという特徴から、ダイボンディング時のコレットによるダメージを起点としたDLDといえる。一方、34W駆動の高温通電試験で発生した故障モードはFig. 8(b)に示すように、NFPが短時間で端部から欠けてくるという特徴からDLDではないと考えられる。しかし、出射端面にCOD特有の結晶溶融は見られないため、故障モードはDLDでもCODでもない新しい故障モードである可能性もある。そこで、故障モードを特定するために結晶内部の欠陥の様子をEBIC (Electron Beam Induced Current) 法にて可視化することを試みた。

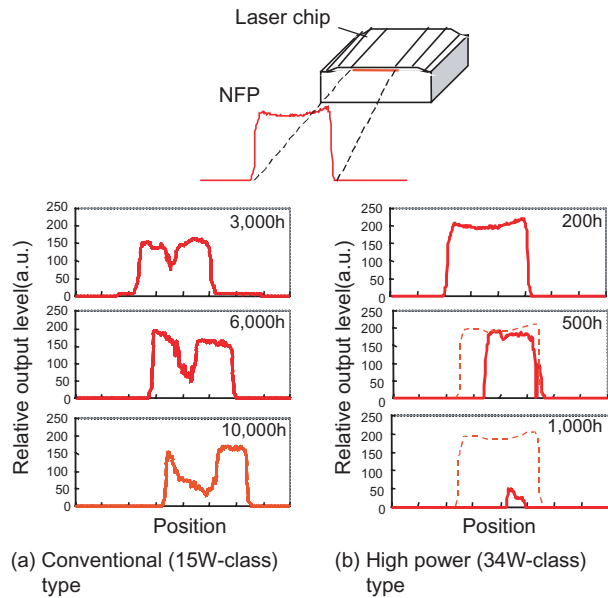


Fig. 8 NFP under the life-time test

### 2.4.2 レーザダイオード内結晶転移の可視化

EBIC像は高出力レーザダイオードの結晶内転移の理解に大いに役立つ方法である。その結果をFig. 9に示す。Fig. 9(a)より、従来駆動(15W駆動)で発生した故障は転位が結晶方位<001>に沿って伸展していることからDLDであることが確認できる。一方、CODは出射端面で発生し、共振器方向<00-1>に転位が伸展する特徴がある。Fig. 9(b)に示すように、34W駆動で発生した故障はDLDと別にCODが発生していることが分かる。端面のSEM像で溶融痕が見られなかったのは、34W級駆動の連続通電試験で発生したCODが動的CODのため静的CODより光出力が小さく、相対的にCODの程度が軽かったためと考えられる。

また、Fig. 8で示したNFPの時間変化から考えると、34W駆動の連続通電試験による故障はCODが初めに発生し、CODを起点としてDLDが誘発された複合故障であると考えられる。こうした複合故障はこれまで報告例がなく、発光幅(活性層の幅)が360 $\mu$ mと広い高出力レーザに特有の現象である。COD自体は瞬時に進行する現象であるが、出射方向に沿って進行するため光出力にあまり影響しない。光出力を低下させたのは活性層を横断するように進行したDLDである。DLDの進行速度は緩やかなため、Fig. 7に示した光出力の低下に数百時間を要したものと考えられる。これがCODの発生と、CODを起点としてDLDが誘発される複合故障の推定メカニズムである。従って、34Wのような高負荷駆動時における信頼性を向上するために



はCOD対策が不可欠である。

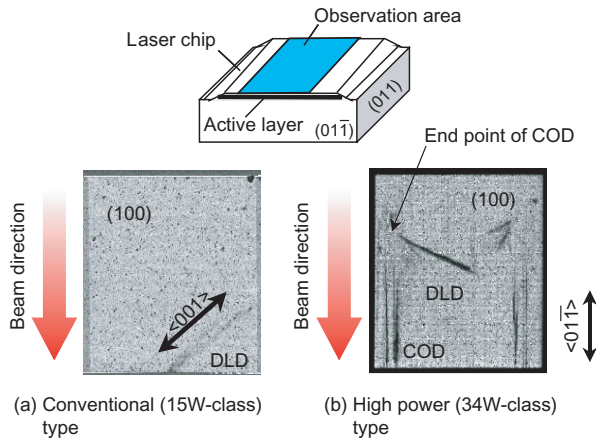


Fig. 9 Results of EBIC analysis

### 2.4.3 CODの抑制

前述のようにCODは界面準位による光吸収、温度上昇、バンドギャップ縮小、光吸収率上昇という正帰還により爆発的に進行するため、CODを抑制するにはこのループを立ち切る必要がある。界面準位による光吸収を抑制する方法としては出射端面での光密度の低減、界面準位密度の低減、端面コート膜質の改善があげられる。我々は、COD抑制として出射端面の光密度の低減と界面準位密度（ここでは活性層の酸化現象）抑制を主に検討することとした。

### 2.4.4 光密度の低減

端面コートの反射率は効率よく光を取り出すために出射面側と反射面側で非対称であり、出射面側で光密度が高くなるためCODは出射端面で発生する。この端面コート膜により、活性層は大気と遮断されている。出射端面における光密度を低減させるには、端面コート膜素材の膜厚と屈折率の見直しが必要である。Fig. 10は式(2)と(3)からレーザダイオード活性層内部の光強度を計算した結果である。

$$P_+(z) = \exp \left\{ \frac{z}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_f R_r} \right) \right\} \quad (2)$$

$$P_-(z) = \exp \left\{ \frac{L-z}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_f R_r} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $R_f$ ： 出射端面での反射率

$R_r$ ： 後端面での反射率

$P_+(z)$ ：  $Z$ 方向のレーザ光の強度

$P_-(z)$ ：  $-Z$ 方向のレーザ光の強度

$L$ ： レーザダイオードのキャビティ長

$Z$ ： キャビティ内の位置

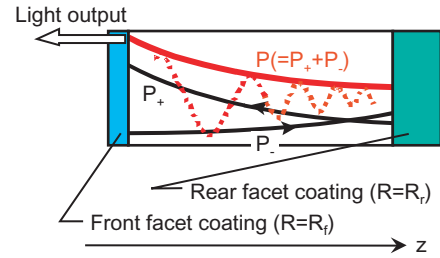


Fig. 10 Principle of facet coating and amplitude of light

Fig. 11は、出射端面でのレーザ光の反射率（すなわち端面コート膜の膜厚）と光密度強度の逆数との関係を上述の式から求め、さらに実験から得た静的CODレベルをその上にプロットしたものである。光密度強度は端面コート膜の膜厚0で規格化している。静的CODレベルは裏面反射率を90%とし、駆動パルス幅200ns時の駆動デューティ0.15%時の値である。Fig. 11から分かるように、反射率が下がると光密度も相対的に下がり、静的CODレベルが上昇することが分かる。

従って、反射率を15%から少し下げるだけで静的CODレベルを10%以上改善することができる。

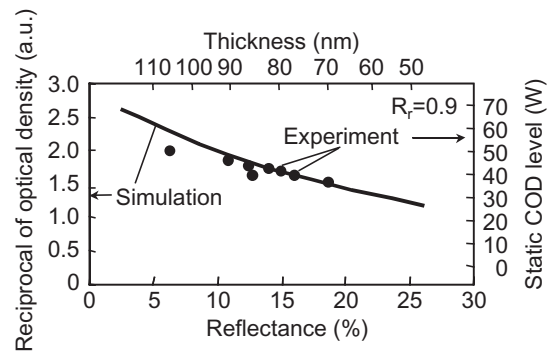


Fig. 11 Static COD level and reflectance at front facet

### 2.4.5 光吸収の低減

出射端面が酸化されると容易に光の吸収がおり、CODが発生する。出射端面の酸化を抑制する最も重要な手立ては、大気中に触れている時間を極力抑制することである。Fig. 12は大気中での暴露時間と静的CODレベルの関係を示したものである。この図からも、暴露時間を抑制すれば10%以上静的CODレベルを向上させることができる。

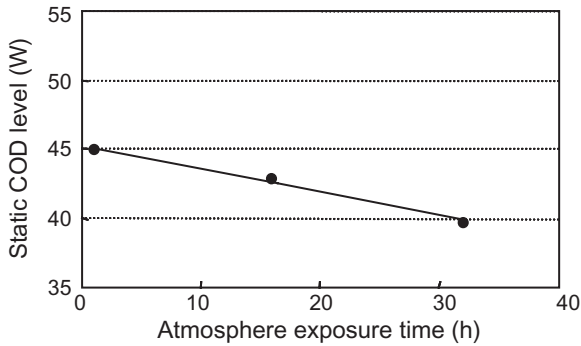


Fig. 12 Static COD level and atmosphere exposure time

### 2.4.6 改善したレーザダイオードの34W駆動での寿命試験結果

我々は、高出力ダイオードレーザの再設計を行い、レーザダイオードの信頼性を確保、保証するために高温連続通電試験を行った。その結果をFig. 13に示す。このときの出射端面の反射率は15%とした。レーザダイオードの駆動条件をTable 3に示す。試験温度は90℃であり、発光パルス幅は35ns、駆動周期は27kHzである。これは、実際のレーザレーダセンサの駆動条件の8倍加速試験である。Fig. 7の結果と比較して大幅な改善が見られた。試験時間は1,500時間であるが、加速係数を加味すると、市場では10,000時間以上素子の故障は発生せず、仕様を十分に満足していることを確認することができた。

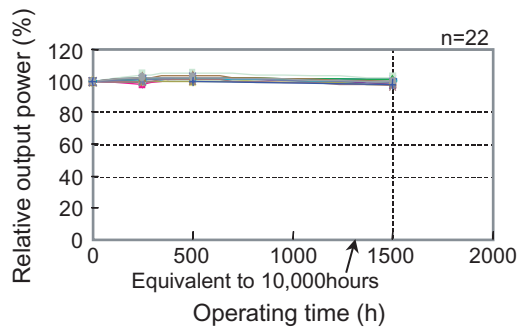


Fig. 13 Results of the life-time test at 34W-operation

Table 3 Summary of life-time test conditions

Light output power	34 W
Temperature	90 °C
Pulse width	35 ns
Repetition frequency	27 kHz

### 3. まとめ

34W駆動の高出力レーザダイオードの複雑な劣化メカニズムを加速寿命試験とEBICによる解析により解明した。レーザダイオードの故障を防ぐために本研究では、二つのアプローチを試みた。一つは出射端面の反射率を再設計したことである。反射率を下げ、最適設計したことにより静的CODレベルを約15%上げることができた。

もう一つは製造工程で出射端面が酸化するのを防止することである。すなわち、大気への暴露時間を短くすることが極めてCODを上昇させるのに効果的であることを実証した。本寿命試験結果は車載用として使用されるのに十分な結果である。

この高出力高信頼レーザダイオードはACCシステム用のレーザレーダセンサに搭載され、2003年に市場に投入された。我々はこのレーザレーダ技術により、将来のクルマ社会の安全分野に大きく貢献できることを期待している。

### 4. 謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々の協力を得たことに御礼申し上げる。特に、レーザダイオードの劣化の解明には、豊橋技術科学大学 米津教授、及び当社基礎研究所 木村研究員と有益なディスカッションを行い、新たな知見を得ることができた。さらに、レーザダイオードの設計、製造プロセスに関しては、当社基礎研究所 松下研究員、IC技術2部 後藤技術員と有益なディスカッションを行い、新しいレーザダイオードのデザインを完成させることができた。

<参考文献>

- 1) N.Furui, H.Miyakoshi, M.Noda, K.Miyauchi, "Development of Scanning Laser Radar for ACC", SAE SP-1332 No.980615 (1998), pp.71-76.
- 2) K.Osugi, K.Miyauchi, N.Furui, H.Miyakoshi, "Development of Scanning Laser Radar for ACC system", JSAE Review 20 (1999), pp.549-554.
- 3) H.Miyakoshi, N.Furui, T.Miyakoshi, M.Noda, K.Osugi, K.Miyauchi, "Development of Adaptive Cruise Control System" TOYATA Technical Review Vol.48 No.2 (1999), pp.88-93.
- 4) Y.Kimura, N.Matsushita, H.Kato, K.Abe, K.Atsumi, "High Power Pulsed Diode Laser for Automotive Scanning Radar Sensor", Proceedings of SPIE Vol.3888 (2000), pp.759-766.
- 5) F.P.Dabkowski, D.R.Pendse, R.J.Barret, A.K.Chin et al., "Reliability of High Power AlGaAs/GaAs QW Laser diodes", SPIE Vol.2886 (1996), pp.36-49.
- 6) F.P.Dabkowski, D.R.Pendse, R.J.Barret, A.K.Chin, "Evaluations of As-Fabricated GaN Based Light Emitting Diodes", SPIE Vol.2886 (1996), pp.59-66.



<著者>



渥美 欣也  
(あつみ きんや)

基礎研究所  
半導体レーザ，センサ関連の研究  
開発に従事後，コーポレート  
R&Dの技術開発戦略立案に従事



安部 克則  
(あべ かつのり)

基礎研究所  
化合物半導体の結晶成長，デバイ  
ス設計，半導体レーザ関連の研究  
開発に従事



加藤 久弥  
(かとう ひさや)

基礎研究所  
半導体レーザ関連の信頼性，プロ  
セス研究開発に従事



道山 勝教  
(みちやま かつのり)

IC技術2部  
光センサ関連の設計開発に従事