

638nm帯高出力赤色半導体レーザーの加速信頼性

満山 弘*
門岩 薫**
八木哲哉**

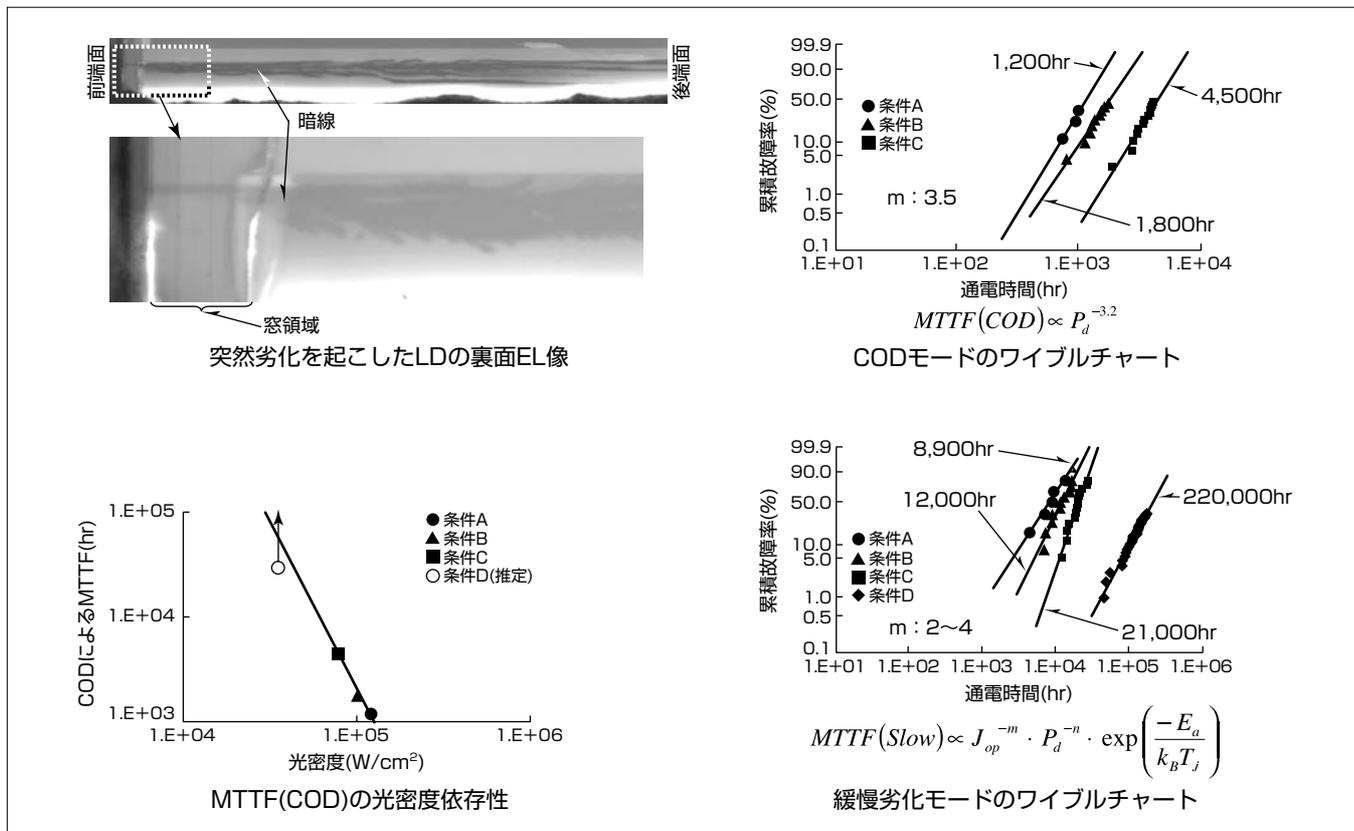
Reliability Study on High Power 638 nm Red Laser Diode

Hiroshi Mitsuyama, Kaoru Kadoiwa, Tetsuya Yagi

要旨

レーザーディスプレイ向け赤色光源として亜鉛の熱拡散による端面窓構造を導入した638nm帯BS (Broad Stripe) - LD (Laser Diode) について加速信頼性試験を行い故障モードと加速信頼性に関して検討を行った。光出力 (Po) とケース温度 (Tc) を変化させた通電試験を実施した結果、通電に伴い突然に光出力がゼロとなる突然劣化と、徐々に光出力が下がる緩慢劣化が見られた。突然劣化の原因を調査するためにEL (Electro-Luminescence) 像を解析した結果、端面での光学的端面瞬時破壊 (Catastrophic Optical Degradation : COD) であることが判明した。このLDのCODモードの加速性については、m (形状パラメータ) 値から磨耗故障モードであることが判明した。各通電条件の

平均故障時間 (Mean Time To Failure : MTTF) と光出力密度 (Pd) 依存性を調べた結果、ほぼ線形の関係が見られ、CODによる素子寿命はPdの3.2乗に反比例することが分かった。この加速係数から、このLDにおけるTc : 40℃, Po : 0.5W · CW (CWContinuous Wave) でのCODによるMTTFを求めると41,000時間であることが明らかになった。一方、緩慢劣化モードでの加速係数を算出してMTTFを推定すると84,000時間となった。このことから、このLDの同条件でのMTTFはCODが支配的で、推定寿命は41,000時間であり、レーザーディスプレイの赤色光源として問題なく使用できることが明確となった。



レーザーディスプレイ用638nm帯高出力赤色半導体レーザーの劣化解析と故障モード特定及び加速性の推定

劣化解析を行い、突然劣化の原因は端面での光学的端面瞬時破壊 (COD) であることが判明した。MTTFと光出力密度 (Pd) 依存性を調べ、CODによる素子寿命はPdの3.2乗に反比例し、Tc : 40℃, Po : 0.5W · CWでのMTTFは41,000時間であった。一方、緩慢劣化モードでの加速係数から推定したMTTFは84,000時間となった。すなわちこのLDのMTTFはCODが支配的であることが明確となった。

1. ま え が き

1962年にはじめて発振した半導体レーザ(Laser Diode : LD)の機器応用は、1980年代に光通信や光ディスクなどで本格的な市場開拓が始まり、光通信、加工機では赤外LDが主に用いられている。最近では目に見えるレーザ光を発する可視光LDの特長を最大限に生かす応用分野として、レーザディスプレイが注目されてきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。ディスプレイ光源用LDとしては、比較的容易に高出力化が可能なBS-LD又はそのアレーが一般的に用いられる⁽³⁾が、その信頼性に関する知見も主に近赤外LDでのものであった。一方、ディスプレイに用いられる可視光BS-LDは数万時間以上の長期間動作が求められ、CW又は周波数：数十～数百Hz程度、デューティ：30%程度のパルスで駆動される場合が多く、今までのLD信頼性に関する知見をそのまま用いることはできない。

本稿では、638nmで発振するディスプレイ用赤色BS-LDに対する系統的かつ長期間の信頼性試験に基づいて得られた信頼性に関する諸知見を述べる。

2. 638nm BS-LDの構造と特性

2.1 638nm BS-LDの構造

この実験で用いた638nm BS-LDの構造を図1に示す。各エピ層は自然超格子の形成を抑制するためにオフ角を持つn型GaAs(ガリウムヒ素)基板の上に、有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVD)で作成されている。LDの温度特性を改善するためには発振キャリア密度を低く保つことが必要であり、そのため活性層への光閉じ込めを強くする必要がある⁽⁴⁾。そこでAlGaInP(アルミニウムガリウムインジウムリン)系では最も屈折率が低くなる⁽⁵⁾ AlInP(アルミニウムインジウムリン)をクラッド層に用いた。活性層は引張歪(ひずみ)を持つGaInP(ガリウムインジウムリン)の量子井戸で構成し、発振波長が638nmとなるように膜厚及び歪量を調整した。光学的端面瞬時破壊(COD)対策として、三菱電機独自の亜鉛熱拡散による量子井戸構造の無秩序化を用いた端面窓構造⁽⁶⁾を採用した。選択的な電流注入のため、エピ成長後にBS領域を除きp-GaAsコンタクト層をエッチングで除去してSiN(窒化シリコン)絶縁膜を形成した。ストライプ幅は40 μ m、LD共振器長は1,500 μ mとし、前後端面には各々AR(Anti-Reflective)、HR(High Reflective) コートを施した。LDチップはAlN(窒化アルミニウム)製サブマウントを介してAuSn(金スズ)はんだを用いてジャンクションダウンで ϕ 5.6mmのTO-CAN(Transistor Outline-CAN)パッケージに組み立てた。

2.2 638nm BS-LDの特性

ケース温度0～40℃におけるこのLDのCWでの光出力-

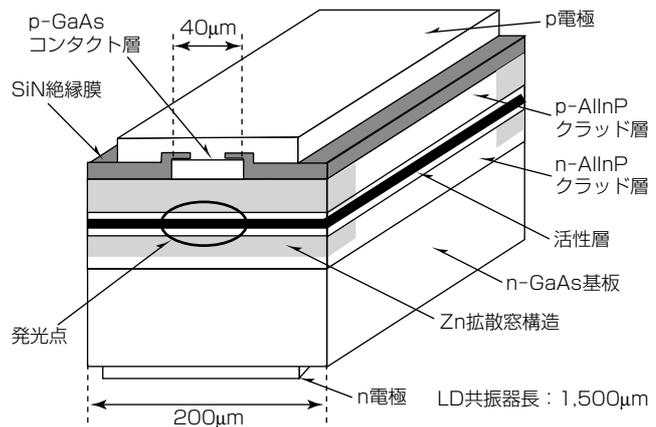


図1. 638nm BS-LDの構造

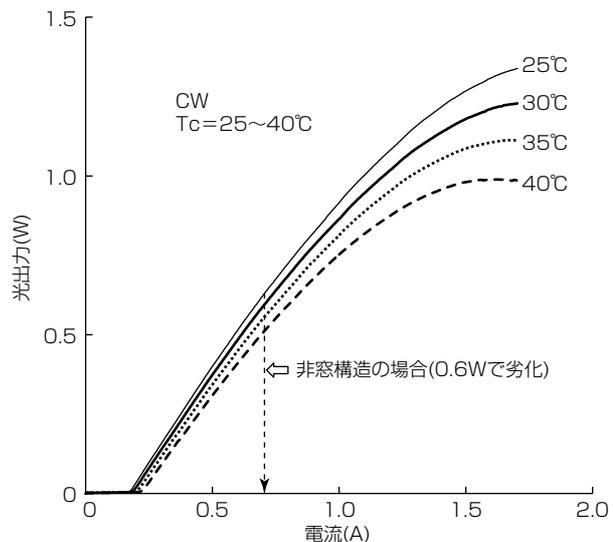


図2. 638nm BS-LDのP-I特性

電流(P-I)特性を図2に示す。図中には窓構造を持たない(非窓構造)同一構造LDの25℃における特性も併せて示した。非窓構造LDでは0.6W強の出力で不可逆的に劣化するのに対し、窓構造LDでは1.0Wを超えても劣化しない。非窓構造の劣化はEL(Electro-Luminescence)像の解析から、端面でのCODであることが分かり、端面窓構造がBS-LDにおける高出力化に非常に有効であることが明確となった。

3. 638nm BS-LDの加速信頼性試験

3.1 加速信頼性試験の条件及び結果

この試験で用いた加速信頼性試験の条件を表1に示す。全ての試験はACC(Auto Current Control)で実施した。変化させたパラメータは、初期光出力(Pi)とケース温度(Tc)である。なお、一般化のためにTcは接合部温度(Tj)に変換して記載した。表中には、光密度(Pd)、動作電流密度(Jop)及びサンプル数(n)も併せて示した。試験結果を図3に示す。最もPiが大きな条件Aでは、光出力(Po)は徐々に減少しており(緩慢劣化)、かつ700時間を過ぎたあたりで突然に劣化しPoがほぼゼロとなっている。Piが1Wを

表 1. 638nm BS-LDの加速信頼性試験条件

条件	P_i (W)	T_j (K)	P_d (W/cm ²)	J_{op} (A/cm ²)	n (個)
A	1.5	309	1.18×10^5	2.67×10^3	8
B	1.3	322	1.02×10^5	2.50×10^3	20
C	1.0	355	7.84×10^4	2.50×10^3	29
D	0.42	327	3.29×10^4	1.03×10^3	95

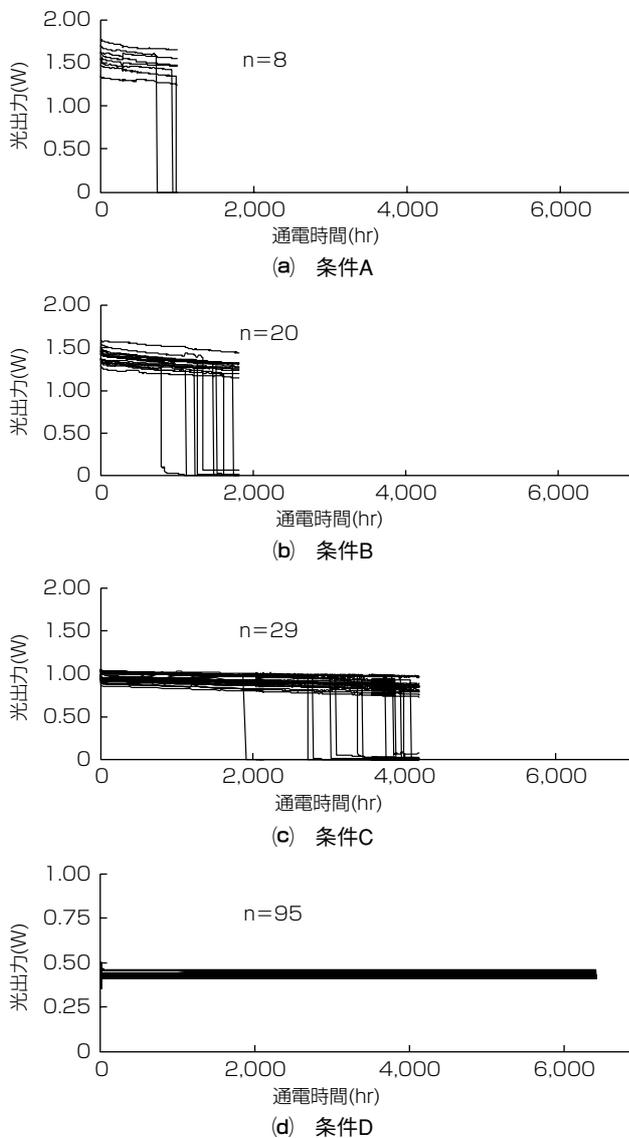


図 3. 638nm BS-LDの加速信頼性試験結果

超える条件B, Cでも似たような経緯を示しているが、突然劣化にいたる時間は P_i が低くなるにつれて長くなり、かつ緩慢劣化の度合いも小さい。最も P_i の低い条件Dでは6,500時間までの間、突然劣化は観測されておらず、また、緩慢劣化も非常に小さい結果が得られた。

3.2 突然劣化の原因

この実験で用いたLDはCOD対策として亜鉛の熱拡散による端面窓構造を形成しており、図2に示す様に、少なくとも初期状態では室温近傍で熱飽和傾向を示すものの、非窓構造LDのようなCOD劣化は観測されていない。よって、まずは条件A~Cで観測された P_o が突然ゼロ近くになる突然劣化の原因を解析することとした。解析は、劣化LDのn

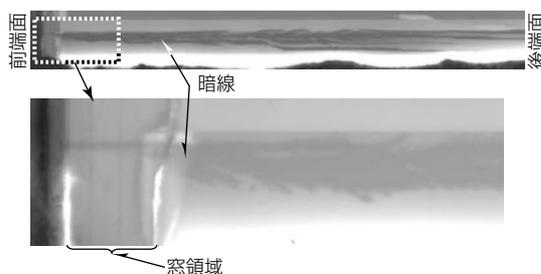


図 4. 突然劣化を起こしたLDの裏面EL像

側電極及びn-GaAs基板を研磨及びエッチングで除去し、n-AlInPクラッド層を通して活性層からのEL光を観察した。劣化LDのn-AlInPクラッド層側から観察した裏面EL像を図4に示す。突然劣化したLDでは複数の暗線(Dark Line Defect : DLD)が観測された。このDLDは後端面に向かうに従って、その幅を増しているように見える。前表面近傍を詳細に観察すると、窓構造部には細い一本のDLDだけが観察されるが、窓構造がなくなった活性領域では急に太くなるとともに、特定の方向に沿ったDLDが多数存在していることが分かる。これは、窓領域は亜鉛の熱拡散によって形成されているため活性層近傍にはpn接合が存在せず、DLDの成長がレーザ光の吸収による温度上昇だけに起因するのに対し、LD内部では注入キャリアによる再結合誘起欠陥運動(Recombination-Enhanced Defect Motion : REDM) ⁽⁷⁾が生じているためと考えられる。

4. 638nm BS-LDの劣化モードの加速性解析

4.1 CODモード

窓構造を導入したLDであっても長時間の通電後にはCOD破壊にいたるモードがあることが判明したため、同LDにおけるCODモードの加速性について考察した。従前の劣化解析の例に倣い、図3に示した通電結果をワイブルチャートに打点したものを図5に示す。各々の条件での平均故障時間(MTTF)も同図中に示した。条件A~Cのワイブルカーブはほぼ同じ傾き(m値)を持っており、この条件では同一の劣化モードと考えられ、m値が3.5であることから磨耗故障モードであることが分かった。CODによるMTTF(MTTF(COD))の P_d 依存性を検討するために、両対数グラフにプロットした結果を図6に示す。条件Dでは6,500時間までCODによる劣化は生じていないが、この時間で1個の劣化が発生し、かつm値も条件A~Cのそれと同じであると仮定した点も併せて打点してある。上向きの矢印は条件DにおけるMTTFは打点した値以上であるということを示している。条件A~Cの3点は同一直線上に乗り、条件Dの点もほぼ同一線上にあるということが分かる。この関係から、CODモードのMTTFは次の式で記述できる。

$$MTTF(COD) \propto P_d^{-3.2} \dots \dots \dots (1)$$

なお、 T_j のMTTF(COD)依存性についてはこの実験で

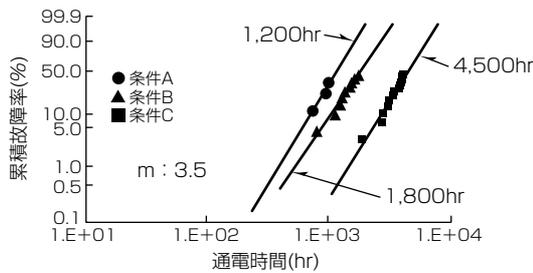


図5. CODモードのワイブルチャート

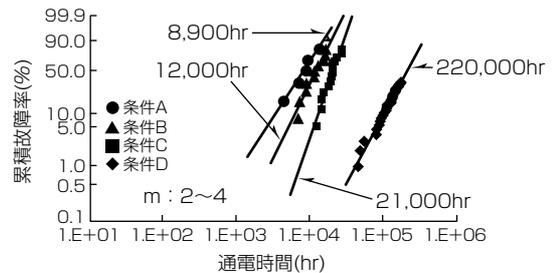


図7. 緩慢劣化モードのワイブルチャート

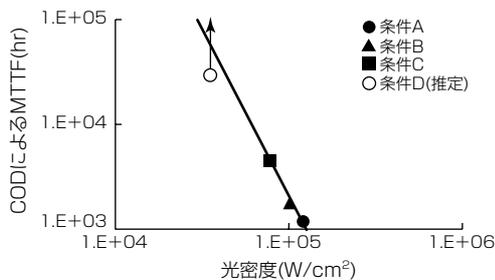


図6. MTTF(COD)の光密度依存性

は明確とはならなかったが、少なくともT_jが310~355Kの範囲で式(1)が有効であると考えられる。この式を用いるとこのLDの0.5W・CW動作におけるCODによるMTTFは41,000時間であった。

4.2 緩慢劣化モード

次に緩慢劣化モードの加速性について議論する。緩慢劣化による寿命をP₀がP_iの1/2に到達した時間と規定し、条件A~Dでの緩慢劣化による寿命を図3に示す結果を外挿することで求めた。これをワイブルチャートに打点した結果とMTTF(MTTF(Slow))を図7に示す。各条件におけるm値は2~4であり、CODモードの場合とは若干振る舞いが異なり、同じ値とはならなかった。この原因は不明であるが、1以上であり磨耗故障モードであることを示している。BS-LDの緩慢劣化によるMTTFは、J_{op}、P_d及びT_jの関数で記述できることが一般に知られている⁽⁸⁾。

$$MTTF(Slow) \propto J_{op}^{-m} \cdot P_d^{-n} \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_j}\right) \dots\dots\dots(2)$$

E_a: 活性エネルギー
k_B: ボルツマン定数

この実験では、CODモードの振る舞いについて重点を置いた条件としているので、先に述べた3つの加速係数を独立に信頼度良く求めることはできない。よって、J_{op}の項をP_dに入れ込むことで加速係数を求めた結果、n: 3.0, E_a: 0.16eVの加速係数が得られた。これに基づき、T_c: 40℃, P₀: 0.5W・CWでのMTTF(Slow)を求めると84,000時間となった。前項と併せて考えるとこのLDの同条件でのMTTFはCODで制限され、その値は41,000時間であることが分かった。

5. むすび

端面窓構造を持つ638nm帯BS-LDについて加速信頼性試験を行った。このLDは初期段階ではCOD劣化は生じないものの、通電に伴いCODによる突然劣化が生じること、またCODによる素子寿命は光出力密度の3.2乗に反比例することが分かった。T_c: 40℃, P₀: 0.5W・CWでの寿命は、緩慢劣化ではなくCODで規定され、41,000時間であることが明確となった。これは、このLDがレーザーディスプレイの赤色光源として問題なく使用できることを示している。

参考文献

- (1) 黒田和男, ほか: 解説 レーザーディスプレイ基礎から応用まで, オプトロニクス社 (2010)
- (2) 山本和久: 総論 スマートレーザーディスプレイ, *Optronics*, **376**, No. 4, 134~138 (2013)
- (3) 八木哲哉: 赤色半導体レーザー高出力化の現状と将来, *レーザー研究*, **41**, No. 4, 225~229 (2013)
- (4) Shimada, N., et al.: 12W CW operation of 640nm-band laser diode array, *Proc. SPIE*, **6876**, 68760L (2008)
- (5) Kaneko, Y., et al.: Refractive Indices measurement of(GaInP)_m/(AlInP)_n quasi-quaternaries and GaInP/AlInP multiple quantum wells, *J. Appl. Phys.*, **76**, No. 3, 1809~1818 (1994)
- (6) Tada, H., et al.: Uniform fabrication of highly reliable, 50-60mW-class, 685nm, window-mirror lasers for optical data storage, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, No. 5A, 2666~2670 (1997)
- (7) Henry, C.H., et al.: Nonradiative capture and recombination by multiphonon emission in GaAs and GaP, *Phys. Rev. B*, **15**, No. 2, 989~1016 (1977)
- (8) Kissel, H., et al.: A comprehensive reliability study of high-power 808nm laser diodes mounted with AuSn and indium, *Proc. SPIE*, **6876**, 687618 (2008)