



Title	熱シミュレーションを用いたマルチエミッタ化による赤色半導体レーザーの高性能化に関する研究
Author(s)	蔵本, 恭介
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92955
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

熱シミュレーションを用いたマルチエミッタ化による
赤色半導体レーザーの高性能化に関する研究

蔵 本 恭 介

2022年9月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章： 序論.....	1
1.1 半導体レーザーの歴史.....	1
1.2 レーザーディスプレイ.....	2
1.3 プロジェクターの方式.....	2
1.3.1 レーザー走査方式型レーザープロジェクター.....	3
1.3.2 空間変調素子利用方式型レーザープロジェクター.....	3
1.4 AlGaInP/GaAs 系赤色 LD.....	5
1.4.1 横シングルモード赤色 LD.....	5
1.4.2 横マルチモード赤色 LD.....	9
1.5 LD の信頼性.....	11
1.5.1 半導体結晶への電極・半田材の拡散・マイグレーションによる劣化.....	11
1.5.2 転位・欠陥の増殖による急速劣化.....	11
1.5.3 端面劣化 (COMD ; Catastrophic Optical Mirror Damage).....	12
1.5.4 緩慢劣化 (Slow 劣化).....	14
1.5.5 LD の平均故障時間 (MTTF ; Mean Time To Failure) 予測.....	15
1.6 ディスプレイ用横マルチモード赤色 LD の課題.....	16
1.6.1 高温・高出力時における光出力低下.....	16
1.6.2 COMD.....	17
1.6.3 Slow 劣化.....	17
1.6.4 スペックル雑音.....	18
1.7 熱シミュレーションの光デバイスへの応用.....	19
1.8 本研究の目的.....	19
1.9 本論文の構成.....	20
第2章： 熱シミュレーションによるマルチエミッタ赤色 LD の光出力特性予測.....	22
2.1 はじめに.....	22
2.2 熱シミュレーションの概要と精度の検証.....	23
2.2.1 熱シミュレーションモデルとシミュレーションの概要.....	23
2.2.2 熱シミュレーション精度の検証.....	29
2.2.3 パルス動作時の熱シミュレーション.....	32
2.2.4 パルス動作時の熱シミュレーションの精度検証.....	36
2.3 活性層温度一定時の光出力特性.....	38
2.4 熱シミュレーションによる光出力特性の予測.....	39

2.5	まとめ	41
第3章	赤色 LD の光出力特性の改善	42
3.1	はじめに	42
3.2	光出力飽和の抑制方法	43
3.3	エミッタ幅と光出力特性の関係	45
3.4	エミッタ幅と熱抵抗値, しきい電流値の関係	53
3.5	マルチエミッタ LD の構造設計	55
3.5.1	連続動作 (CW) 品の構造設計	55
3.5.2	パルス動作品の構造設計	57
3.6	マルチエミッタ LD の特性評価結果	58
3.6.1	CW 動作時の光出力特性評価	58
3.6.2	パルス動作時の光出力特性評価	63
3.7	まとめ	66
第4章	赤色 LD の信頼性改善	68
4.1	はじめに	68
4.2	COMD を決定する要因	68
4.2.1	COMD の動作温度依存性	68
4.2.2	前端面と活性層の利得領域との温度差 (ΔT_{fa})	70
4.2.3	前端面および利得領域の温度シミュレーション	71
4.2.4	COMD を発生させる推定要因	77
4.2.5	COMD レベルの改善方法	79
4.3	Slow 劣化を決定する要因	82
4.3.1	長期通電試験前後の光出力特性比較	82
4.3.2	Slow 劣化を発生させる推定要因と改善方法	84
4.4	まとめ	87
第5章	赤色 LD の平均故障時間 (MTTF) 予測	89
5.1	はじめに	89
5.2	COMD の加速要因とその MTTF の予測	89
5.3	Slow 劣化の加速要因とその MTTF の予測	96
5.4	パルス動作の場合の MTTF	99
5.5	複数の赤色 LD からなる光源の MTTF	101
5.5.1	複数の赤色 LD からなる光源の MTTF の考え方	101
5.5.2	COMD による光出力劣化曲線	101
5.5.3	Slow 劣化による光出力劣化曲線	103
5.5.4	赤色光源の MTTF	108

5.6	1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF 予測	109
5.6.1	1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF (CW 動作)	109
5.6.2	1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF (パルス動作)	111
5.7	まとめ	113
第 6 章 :	赤色 LD の低スペckル雑音化	114
6.1	はじめに	114
6.2	評価に用いた LD の構造と光出力特性	114
6.3	スペckル雑音評価系および評価方法	117
6.3.1	評価系	117
6.3.2	遠視野像 (FPP) の平均化	118
6.4	スペckルコントラスト (C_s) 値評価結果	119
6.4.1	C_s 値の光出力依存性	119
6.4.2	各エミッタ仕様における信頼性と C_s 値の関係	123
6.5	まとめ	125
第 7 章 :	結論	127
7.1	本研究の結論	127
7.2	展望	129
参考文献		131
謝辞		139
本論文に関連する主要業績		140

第1章： 序論

1.1 半導体レーザーの歴史

半導体レーザーダイオード（以降、LD : Laser Diode と呼ぶ）は、GaAs 基板上に AlGaAs 系材料を結晶成長した（以降、AlGaAs/GaAs と表記する）構成において、1962 年に初めて低温パルス発振に成功⁽¹⁾し、1969 年にシングルヘテロ構造による連続発振の報告がなされた⁽²⁾。さらに 1970 年には、ダブルヘテロ構造の提案⁽³⁻⁴⁾により室温連続（CW : Continuous Wave）発振を実現、さらに同年に量子井戸構造が提案された⁽⁵⁾。その後、LD の出力安定化には、横モードの安定が必須であることが分かったことにより、横モードを基本モードだけにして安定化（横シングルモード化）させるための構造が多数提案された⁽⁶⁻⁸⁾。

このような検討の結果、1975 年頃より LD を光ディスク装置やレーザープリンター装置の光源として使用することの議論が始まり、1979 年に LD を用いたレーザープリンターが、1982 年には家庭用 CD（Compact Disc）プレーヤーが発売されることになった。これらレーザープリンターや CD に用いられた LD は、AlGaAs/GaAs 系材料を用いて、液相エピタキシャル法（LPE : Liquid Phase Epitaxy）により作製されており、780 nm の近赤外の波長で発振するものであった。

その後、分子線エピタキシャル成長法（MBE : Molecular Beam Epitaxy）や有機金属気相成長法（MOCVD : Metal Organic Chemical Vapor Deposition）といった、原子層レベルでの制御をも可能にするような半導体結晶成長技術が確立されることになる。これによって、10 nm 以下の厚さを持つ量子井戸構造を有する LD の作製が可能になり、LD の特性は大きく改善した。

LD の通信用途への応用については、ファイバに波長分散特性が存在することから、単一縦モードで発振させることが重要な課題であった。この課題に対する取り組みの結果、1973 年にレーザーの共振器内に波長程度の周期を導入した分布帰還型レーザー（DFB-LD : Distributed FeedBack Laser Diode）の光励起での発振が確認され⁽⁹⁾、1975 年には電流注入による DFB-LD の室温連続発振が報告された⁽¹⁰⁾。また、InGaAsP/InP 系 LD の室温連続発振⁽¹¹⁾と、同材料系における DFB-LD の発振⁽¹²⁾により、光通信に適した 1.3~1.6 μm 帯での単一縦モード発振が実証されたことで通信用長波長帯レーザー開発が本格化、現在の応用に繋がっている。

一方、AlGaAs/GaAs 系 780 nm 帯 LD を用いた光ディスクは、音質劣化がないことなどが支持されたことで、AV 機器への LD の応用がさらに進むことになった。1990 年代半ば以降には DVD（Digital Versatile Disc）用として、波長 660 nm の AlGaInP/GaAs 系 LD が採用され、その後 Blu-ray Disc 用として AlGaInN/GaN 系 LD（波長 405 nm）が実用化されるなど、その用途

を拡大してきた。しかしながら、光ディスクの市場は、近年のハードディスクドライブの記録密度向上や、半導体メモリの低価格・大容量化、あるいはブロードバンドの普及によるメディアの不要化などで、急速に縮小している。

1.2 レーザーディスプレイ

前節のような流れの中、LD が持つ高い電力変換効率（WPE : Wall Plug Efficiency）や小さなエタンドュ（Etendue, 光源の面積と立体角の積）などの特長が、ランプや発光ダイオード（LED : Light Emitting Diode）などの既存光源に対し大きく優位となることから、LD をディスプレイ用光源として利用することが議論されてきた⁽¹³⁻¹⁵⁾。

特に 2000 年以降では、AlGaInN/GaN 系材料を用いた青色 LD の高出力・高信頼化によって、青色光源の実用化目処が立ってきたことから、レーザーディスプレイに関する研究開発が活発化していった。2005 年の愛知万博では、2005 インチの巨大ディスプレイ⁽¹⁶⁾が展示され、さらに 2008 年には世界初の民生用レーザーテレビ(TV)⁽¹⁷⁾が販売されて大きな話題となった。このレーザーTV の赤色および青色光源には LD が用いられていた。緑色光源は、半導体レーザー励起の Nd:YVO₄ 固体レーザー光(1064 nm)を、非線形光学結晶を用いた第 2 高調波発生（SHG: : Second Harmonic Generation）によって波長変換したものであった。これらのレーザーディスプレイは、国際的な標準規格である sRGB 規格に対して約 2 倍の色再現範囲が表現可能となっている。さらに、赤色、緑色、青色の 3 色を、それぞれ波長 630 nm, 532 nm, 467 nm とすることで、ITU-R (ITU Radiocommunication Sector, 国際電気通信連合 無線通信部門) の BT.2020 で定められた 4K 映像信号規格を完全に表現することが可能になる。この色再現範囲の広さは、レーザーディスプレイの魅力の一つである。さらに、LD 光源が高効率であることからくる低消費電力化や、エタンドュが小さいことによる映像の超短焦点化やフォーカスフリー化、瞬時点灯・瞬時消灯、機器の小型化、長寿命化など、従来のランプ光源では実現できないような性能を実現することが可能になる⁽¹⁸⁻²⁰⁾。また、このような特長から、立体 TV やレーザー照明などへの展開も期待されている。

1.3 プロジェクターの方式

映画館や展示場、家庭などで使用されるレーザーディスプレイのほとんどは、レーザー光を直接スクリーンに照射するプロジェクターを用いたものである。このようなプロジェクターには大きく分けて、レーザー走査方式と呼ばれるものと、空間変調素子利用方式と呼ばれるものがある。

1.3.1 レーザー走査方式型レーザープロジェクター

レーザー走査方式⁽²¹⁾は、図 1-1 の原理図のように映像を構成する画素毎に RGB のそれぞれの LD を発光あるいは非発光とすることで色を表現する方式である。1 軸もしくは 2 軸の MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）ミラーにて、空間上の所定場所（画素）にレーザー光を投影することによりフルカラー像を得ることができる。

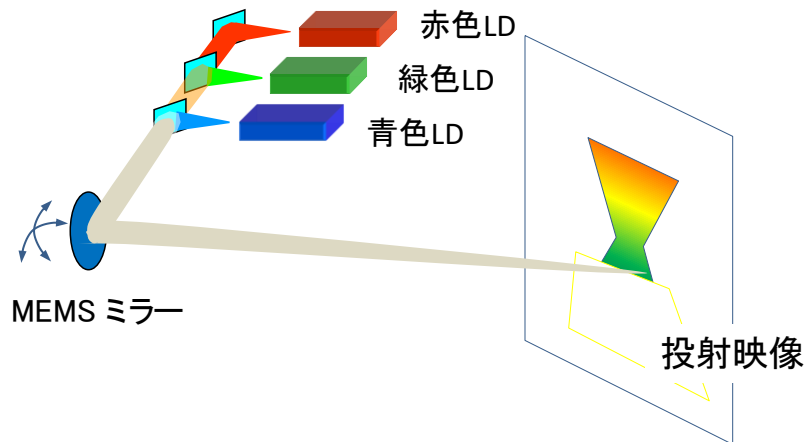


図 1-1 レーザー走査方式の原理図

MEMS ミラーによってレーザー光をスキャンさせながらレーザー光を点滅させるため、LD には数十～百 MHz で高速応答することが求められる。また、高精細の画像を得るためには、微小なスポットにレーザー光を集光する必要があるため、小さな近視野像を持つことが望まれる。そのため、本用途には、LD の結晶層に対し水平・垂直な方向ともに基本モード（シングルモード）で発振し、比較的小さなガウシアン形状の近視野像をもつ横シングルモード LD が使用される。横シングルモード LD については、1.4.1 項に詳細を記載する。

1.3.2 空間変調素子利用方式型レーザープロジェクター

空間光変調素子利用方式⁽²²⁾は、DLP（Digital Light Processing）や反射型液晶（LCOS: Liquid Crystal on Silicon）などの空間光変調素子（SLM: Spatial Light Modulator）に光を投影し、その反射あるいは透過光によって映像を作り出す手法である。図 1-2 に 3 つの SLM で構成されるプロジェクターの原理図を示す。

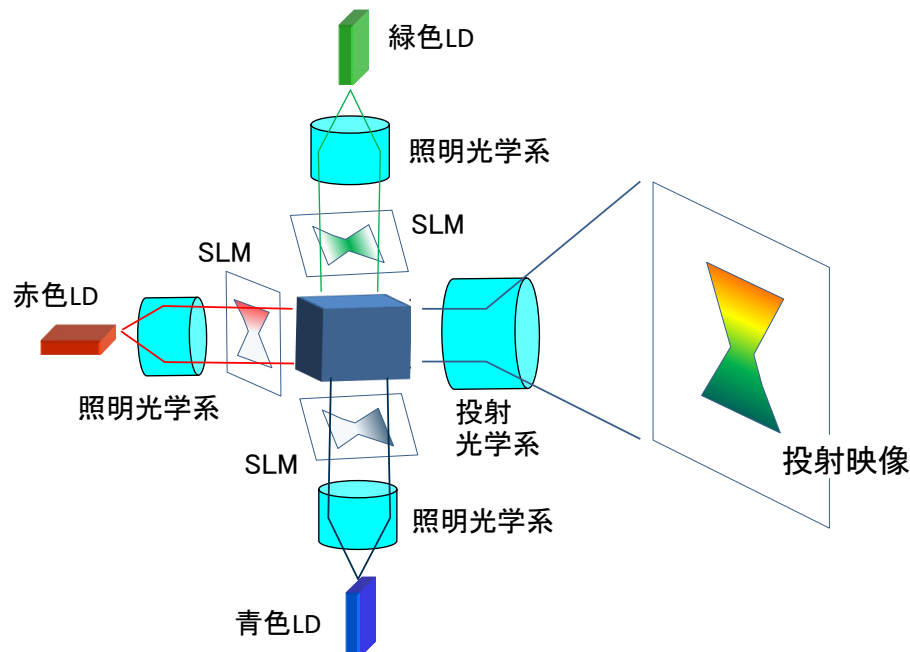


図 1-2 3つの SLM からなる空間変調素子利用方式型プロジェクターの原理図

この方式では、RGB それぞれの LD に対して 1 つの SLM が割り当てられており、各色は常に映像領域全体つまり SLM の全体を連続的に照射している。映像は SLM の反射あるいは透過パターンによって形成される。したがって、光源 LD は CW で駆動されることになる。3 つの SLM デバイスを使用しているため、プロジェクターとしては高価な構成となるが、3 つの LD がつねに点灯となっているため高い輝度を得ることができる。そのため、主に映画館などの大画面・高輝度用途向けに使用される方式である。

これに対し、図 1-3 のように 1 つの SLM のみで構成される空間変調素子利用方式も存在する。この方式では、SLM のパターン変化と LD の点灯・消灯を同期することによって、赤、緑、青の映像パターンを交互にスクリーンに照射する。人間の目はその変化に追従するのに十分な時間分解能がないため、赤、緑、青が重なり合ったフルカラー映像が得られる。この方式は、1 つの SLM で映像を作り出すことが出来るため、比較的安価なホームシアターやレーザーTV 向けプロジェクターで採用されている。赤色の映像を表示している間は緑・青色光源は点灯している必要はないため、光源はデューティ比が約 1/3 のパルスで駆動される。また、LD 光源の場合のパルス周波数は、デジタル放送の主なフレームレート、60 フレーム/秒の 2 倍のフレームレートとなる 120 Hz が一般的である。ただし、赤色 LD の場合は、後述するような問題のため、青、緑色 LD に比べると高い輝度を得ることが難しいことから、点灯時間をより長くする場合があり、主に 30 から 40 %のデューティ比で駆動される。このうち、40 %のデューティ比での動作が、最も光源用 LD の素子温度が高かつ点灯時間も長くなる。この

ことから、赤色 LD においてパルス駆動時の動作を検証する場合は、繰り返し周波数 120 Hz、デューティ比 40 % の条件で検証することが必要である。

3 つの SLM であっても 1 つの SLM であっても、空間変調素子利用方式では、一度に映像全体を照射するため、スキャン方式のようなビーム品質は要求されない。一方で、広範囲を同時に照射することになるために高い光出力が要求される。したがって、横シングルモード LD よりも高い光出力が得られる、横マルチモード LD を使用することが望ましい。横マルチモード LD については、1.4.2 項に詳細を記載する。

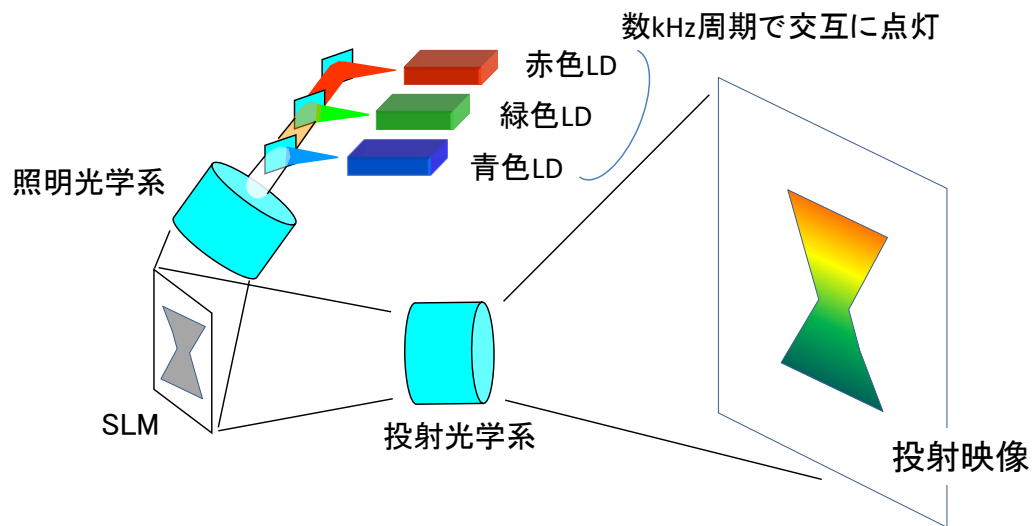


図 1-3 1つの SLM からの空間変調素子利用方式型プロジェクターの原理図

1.4 AlGaInP/GaAs 系赤色 LD

1.4.1 横シングルモード赤色 LD

ディスプレイ用途に使用される横シングルモード赤色 LD には、AlGaInP/GaAs 系の材料が用いられる。この材料は DVD 用の赤色 LD と同じであるが、材料組成が異なることにより発振波長は約 638 nm と DVD 用 LD の 660nm よりも短波長となっている。これは、短波長であるほど比視感度が高く、輝度の面で有利となるためである。しかしながら、発振波長が短波長になるほど、活性層からの電子のオーバーフローが顕著になることで LD の光出力が低下することから^(23,24)、これ以上の短波長化はかえって輝度を落とすことになる。

DVD 用途の場合、レンズを用いてディスク盤面上にレーザー光を集光させる必要があるため、近視野像を小さくできる横シングルモード LD が採用された。最初に実用化された LD の構造は、発光層よりも上の層でエッチングを停止したローメサリッジと呼ばれるリッジ形状を形成した上で、このリッジ横を GaAs 材料で埋め込んだもの（埋め込みリッジ構造）であった⁽²⁵⁻²⁷⁾。しかしながら、この構造は埋め込みに用いた GaAs 材料による光の吸収が特性上不利に働くことから、このローメサリッジ上に埋め込みをせずに、SiO₂ や SiN_x などの絶縁膜で覆うローメサリッジ構造が採用されることになった^(28,29)。

ディスプレイ用の横シングルモード赤色 LD も、このローメサリッジ型構造が採用されることが一般的となっている⁽³⁰⁻³²⁾。その構造例を図 1-4 に示す⁽³¹⁾。基板材料は GaAs であるが、成長条件によって GaInP あるいは AlGaInP のバンドギャップが変化する、いわゆるバンドギャップ異常問題⁽³³⁻³⁶⁾を回避するため、(001)面から{111}A 方向に 10~15° 傾斜させた基板が使用されている。このような基板を使用することで、バンドギャップ異常の原因となる Ga と In による自然超格子の形成を防止することが出来る⁽³⁷⁻³⁹⁾。また、これにより Mg や Zn といった II 族原子のドーピング効率が增大すること^(40,41)や、AlGaInP 層の酸素取り込み量が低減すること^(42,43)も高出力 LD の実現に貢献している。

この基板上に、MOCVD を用いて、p および n 型の AlInP 型クラッド層と、その間に引張歪 GaInP ウェル層と AlGaInP バリア層からなる多重量子井戸（MQW : Multi-Quantum Well）層、および AlGaInP 光閉じ込め層が結晶成長され、最表面には p 電極とのオーミック接合を容易にするために、GaAs コンタクト層が形成されている。この MQW 層を以降、活性層と呼ぶことにする。結晶表面には、活性層よりも上の位置まで掘り込んだ 1.5 μm 幅程度のローメサリッジが形成されており、このローメサリッジによる横方向の屈折率差を利用して光を閉じ込めている。リッジ幅が狭いことで、横基本モード以外のモードの伝搬が許容されないことから、横シングルモード発振が可能となる。結晶上には SiN_x 絶縁膜が被覆されており、リッジトップに電流注入のための開口が設けられている。上下面には電流注入のための電極が形成されている。端面における光吸収が原因となる端面破壊現象（COMD : Catastrophic Optical Mirror Damage）⁽⁴⁴⁾を防止するため、前および後端面に Zn 拡散による端面窓構造が形成されている⁽⁴⁵⁻⁵⁰⁾。これは、Zn 拡散による結晶原子の相互拡散を利用して MQW 構造を崩すことで、Zn 拡散部のバンドギャップを拡大、光吸収を低減することで COMD を防止するものである。

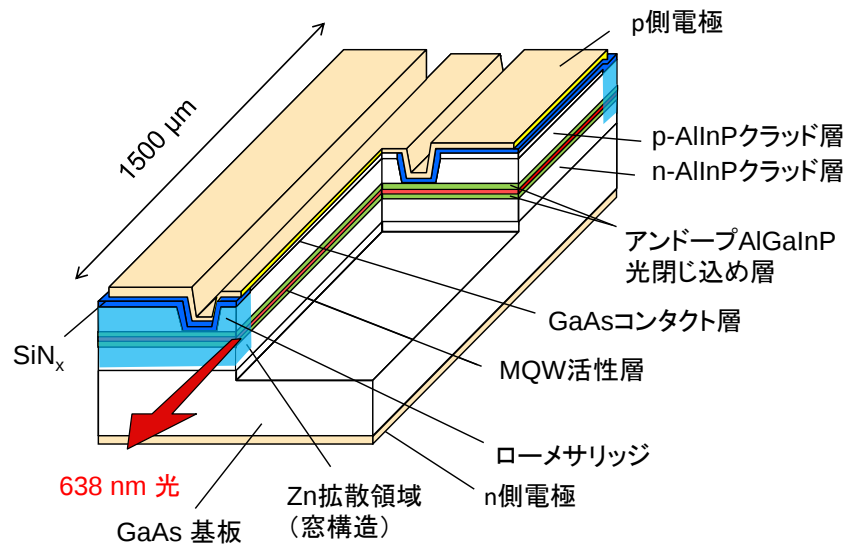


図 1-4 横シングルモード赤色 LD の構造例

LD チップは、図 1-5 のような $\phi 5.6$ mm の TO (Transistor Outline) -CAN パッケージに、絶縁性サブマウントを介して組み立てられるのが一般的である。このパッケージ形状はステムと呼ばれる。動作時の活性層温度の上昇を抑制するためには、基板側ではなく活性層が結晶成長されている表面側をサブマウントに接合する、いわゆるジャンクション・ダウン方式が有利である。



図 1-5 $\phi 5.6$ mm の TO-CAN ステム

図 1-6 に、横シングルモード赤色 LD の光出力特性の温度依存性の例を示す⁽⁵¹⁾。図中に記載した温度は、TO-CAN ステム裏面の中心位置の温度で、ケース温度 (T_c) と呼ばれるものである。いずれのケース温度においても、光出力の急激な変動であるキンクの発生はなく、 T_c が 25 °C から 45 °C の範囲では 200 mW 以上の出力が得られている。一方で、100 mW を越えるような高出力領域においては、光出力の飽和が見られており、さらに T_c が高温になるにつれて、しきい電流値の増大および微分効率の低下が顕著になっている。

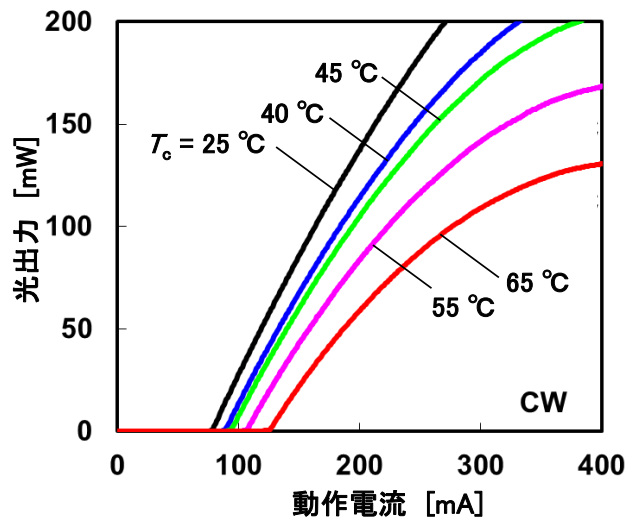


図 1-6 ケース温度に対する横シングルモード LD の光出力特性（文献(51)から引用）

この LD の発振波長は、 $T_c = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、CW 駆動 180 mW 動作時で 641.0 nm となっていた。図 1-7 は、 $T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、CW 駆動 180 mW 出力時の遠視野像（FFP: Far Field Pattern）の例である。活性層面に水平な方向（FFP//）、垂直な方向（FFP $\perp$ ）ともに単峰性のピークで、FFP のピーク強度の $1/e^2$ 強度における全幅（Full Width of $1/e^2$ Maximum, FW $1/e^2$ M）は、水平方向（ $\theta_{//}$ （ $1/e^2$ ））で 16.8° 、垂直方向（ $\theta_{\perp}$ （ $1/e^2$ ））で 41.3° となっており、レーザー走査方式に対応出来るものとなっている。

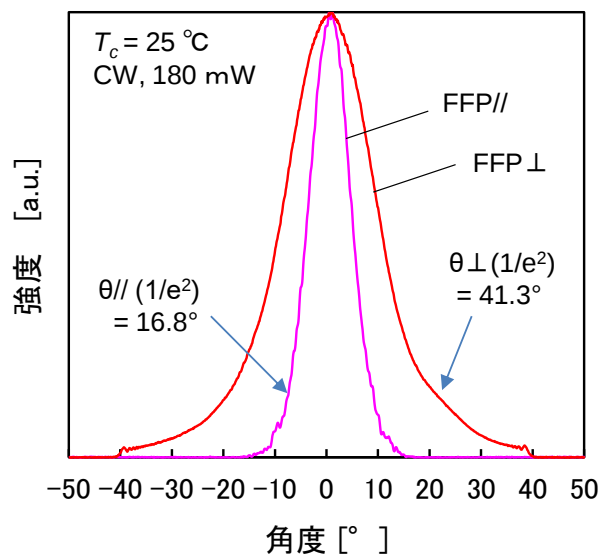


図 1-7 横シングルモード LD の FFP の例 横マルチモード赤色 LD（文献(51)から引用）

1.4.2 横マルチモード赤色 LD

1.3.2 項に示したように、空間変調素子利用方式のプロジェクターにおいては、高いビーム品質である必要はないため、高出力化が容易な横マルチモード LD が用いられる。横マルチモード赤色 LD の一般的な構造を図 1-8 に示す⁽⁵²⁾。基板材料や層構造は 1.4.1 項に示した横シングルモード LD と同様である。LD 表面に形成された SiN_x 膜には $40\ \mu\text{m}$ 幅の開口があり、この部分のみ電流が注入される、LD の結晶表面から発光層である活性層までの距離は $1\ \mu\text{m}$ 程度であるため、この開口幅がほぼ発光領域の幅と等しくなる。したがって、この開口幅をエミッタ幅、活性層のうち電流が注入される部分をエミッタ領域と呼ぶことにする。電流分布による横方向の利得差と、電流注入やレーザー光の吸収による発熱によって生じる屈折率差の両方によって、横方向に光が閉じ込められる。このような構造をもつ LD をブロードエリア型 LD と呼ぶ。この利得および屈折率の段差部は、この場合で約 $40\ \mu\text{m}$ と広いことから、発振時に横高次モードが許容されることになる。エミッタ幅が広い一方で、高い光出力が要求されることから、横シングルモード LD と同様に、COMD を防止するための Zn 拡散端面窓構造が採用されている。

活性層は、1つの引張歪 GaInP 井戸層からなる単一量子井戸 (SQW : Single-Quantum Well) 構造で、その上下にアンドープの AlGaInP 材料からなる光ガイド層を形成、これにより活性層への光閉じ込め量を調整している。さらにその上下には、 n 型あるいは p 型不純物を添加した AlInP 材料からなるクラッド層が形成されている。最表面には、 p 電極とのオーミック接合を容易にするため、 GaAs コンタクト層が形成されている。638 nm 付近で発振するように、 GaInP ウェル層の組成比が調整されている。

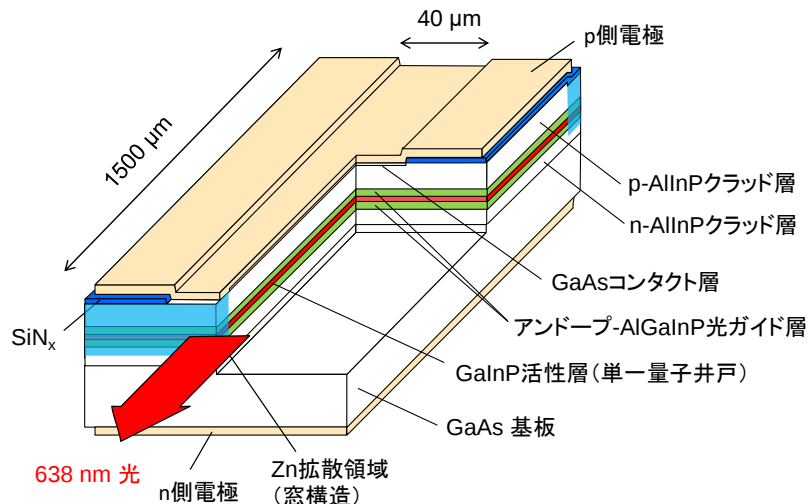


図 1-8 横マルチモード赤色 LD の構造図

この赤色 LD 素子は、図 1-9 のような $\phi 9.0$ mm の TO-CAN システムに、ジャンクション・ダウン方式で組立されている。横マルチモード赤色 LD は高い光出力が要求されるため、このような大型システムを採用することにより熱抵抗を低減している。青および緑色 LD でも、同じシステムを使用する場合が多い。

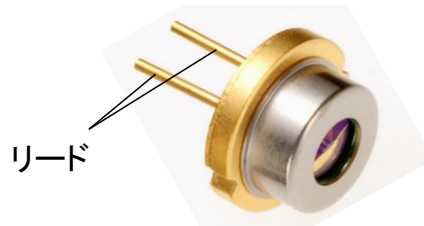


図 1-9 $\phi 9.0$ mm TO-CAN システム

図 1-10 に、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 幅のエミッタを 1 個搭載した横マルチモード赤色 LD（以降、 $40\text{ }\mu\text{m}$ -1 エミッタ LD と呼ぶ）を、CW で動作させたときの光出力特性の温度依存性を示す。図中のケース温度 T_c は図 1-11 に示すシステム裏面におけるリード間中心位置の温度であり、 2.0 A 動作時の T_c が図 1-10 に記載の温度になるように LD を固定する LD ホルダの温度を設定している。光出力は電流を増加させながら積分球を用いて測定した。図 1-6 に示した横シングルモード赤色 LD の光出力特性と比較すると、広いエミッタ幅と、大型システムによる放熱性の改善で、最大光出力が向上していることが分かる。 $T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$ で 2.0 W 以上、 $T_c=55\text{ }^\circ\text{C}$ においても 1.0 W 以上の光出力が得られている。

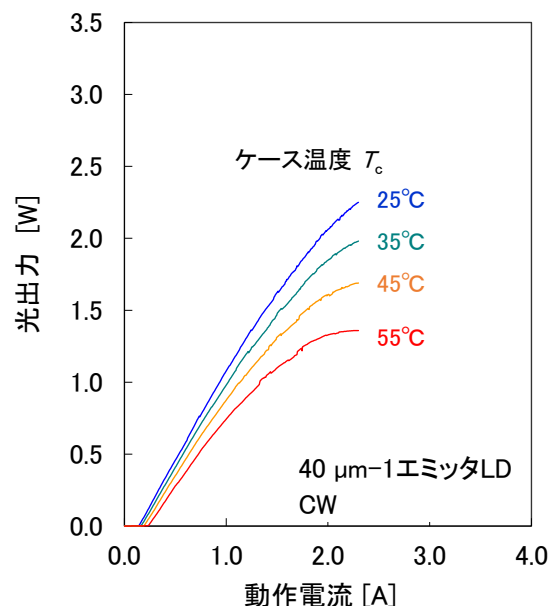


図 1-10 ケース温度 T_c に対する横マルチモード赤色 LD($40\text{ }\mu\text{m}$ -1 エミッタ)の光出力特性

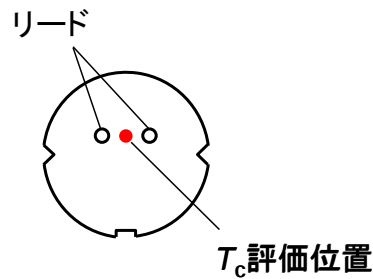


図 1-11 ケース温度 T_c 評価位置（ $\phi 9.0$ mmTO-CAN ステムの裏面図）

1.5 LD の信頼性

LD の劣化原因は、大きく分けて、半導体結晶への電極・半田材の拡散・マイグレーションによるもの、結晶中の転位や欠陥の生成・増殖によるもの、端面における物理的損傷によるもの（COMD）がある。また、結晶中の転位や欠陥に起因する劣化には、比較的速い転位・欠陥の増殖により急速劣化を引き起こすものと、比較的遅い欠陥の増殖により緩やかな光出力低下（Slow 劣化）を引き起こすものがある。

1.5.1 半導体結晶への電極・半田材の拡散・マイグレーションによる劣化

半導体結晶への電極・半田材の拡散・マイグレーションに起因する劣化には、電極材料である Au が半導体結晶中に拡散するもの⁽⁵³⁻⁵⁵⁾や、ジャンクション・ダウン組立の際に、半田材料が電極を貫通してマイグレーションするもの⁽⁵⁶⁾、半田からのウィスカ成長によるもの⁽⁵⁶⁾がある。いずれも InP 基板および GaAs 基板を用いた LD の双方で発生するが、近年では、Au 拡散を防止するための Cr や Pt 層の挿入、ピンホールや段切れの無い電極の形成、ウィスカが発生しにくい Au-20wt%Sn 半田の採用などによって、このような劣化の発生はほとんど無くなっている。

1.5.2 転位・欠陥の増殖による急速劣化

結晶中の転位や欠陥の生成・増殖による急速劣化の例としては、AlGaAs/GaAs 系 LD における暗線欠陥（DL；Dark Line Defect）がある。この欠陥は、貫通転位などの欠陥や、ワイヤボンド時の瞬時応力、ダイボンド、電極・絶縁膜形成による局部応力が起点となり発生する。増

殖のエネルギーは、電流注入や光吸収で発生したキャリアが非発光再結合する際の熱エネルギーであると考えられている⁽⁵⁷⁾。このような劣化は、突然劣化の原因として良く知られているが、低転位密度基板の採用や、低欠陥結晶成長の確立、レーザー作製や組立時の応力発生を抑える方策、過負荷状態でのスクリーニング試験による選別によって、実際の使用時に問題となることは少なくなっている。InGaAsP/InP 系 LD では、欠陥増殖の進行速度が遅いため、これに起因する突然劣化の発生はほとんどないことが知られている。

1.5.3 端面劣化 (COMD ; Catastrophic Optical Mirror Damage)

COMD の原因は、共振器端面に多数存在する表面準位に起因するバンド曲がりによって、光の吸収領域が形成されるためであるとされている⁽⁵⁸⁾。発生メカニズムは、表面準位を介した非発光再結合やバンド曲がりによる光吸収、非発光再結合や光吸収による端面での温度上昇、温度上昇によるバンドギャップの縮小、バンドギャップの縮小によるさらなる光吸収の増加、というプロセスが正のフィードバックを引き起こすことである。最終的には、端面温度が結晶を溶解するまでになり、端面の不可逆的破壊を引き起こす。COMD 劣化は AlGaAs/GaAs 系および AlGaInP/GaAs 系 LD では大きな問題になるが、InGaAsP/InP 系 LD では発生しにくいことが知られている。その理由としては表面再結合速度や酸化速度が AlGaAs 系に比べ数桁小さいことや^(59,60)、熱伝導率が高いために端面温度の上昇が抑制されることが挙げられている。

COMD を防止するため、AlGaAs/GaAs 系や AlGaInP/GaAs 系 LD の共振器端面には、絶縁膜による端面コーティングが施されており、これが界面準位形成の一因となるダングリングボンドの一部を終端させていると考えられる。より高い COMD 耐性を得るためには、端面コーティングに加えて、端面近傍に LD 内部よりバンドギャップの大きな領域を設ける端面窓構造を形成することが非常に有効であり、種々の端面窓構造をもつ近赤外 LD⁽⁴⁵⁻⁴⁷⁾および赤色 LD⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾が開発されてきた。

端面窓構造を作製する方法として現在一般的になっているものは、量子井戸構造を有する活性層を、不純物拡散やイオン注入などにより無秩序化する手法である。図 1-12 に AlGaAs/GaAs 系 LD に Si イオン注入を用いた端面窓構造の効果を示す⁽⁵⁰⁾。端面窓構造を有しない LD では 300 mW 程度の光出力で COMD が発生するのに対し、端面窓構造を有する LD では、光出力が熱飽和するまで COMD は発生していない。

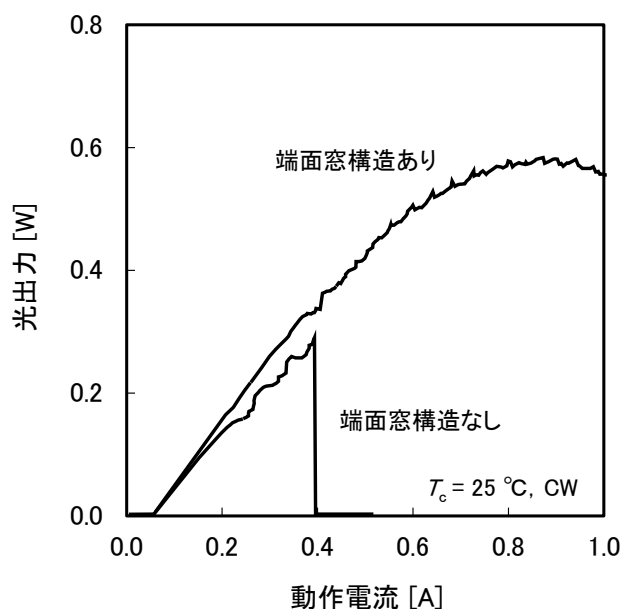


図 1-12 AlGaAs/GaAs 系 LD における端面窓構造の効果（文献(50)より引用）

AlGaInP 材料からなる赤色 LD は，AlGaAs 材料からなる近赤外 LD よりも COMD が発生し易くなっていることが知られている。一つの理由として，AlInGaP 材料の熱伝導率が，AlGaAs 材料の 1/3 から 1/4 程度と非常に小さいことが挙げられる。そこで，AlGaInP/GaAs 系赤色 LD の開発では，当初より Zn の拡散を利用した端面窓構造が採用されてきた⁽⁶¹⁾。

このような端面窓構造の採用により，赤色 LD の平均故障時間（MTTF：Mean Time to Failure）は大きく改善することになったが，COMD を完全に防止することは出来ないことが分かっている。Zn 拡散窓構造をもつ 40 μm -1 エミッタ赤色 LD を，動作電流 1.5A の固定値で通電し，COMD レベルの経時変化を測定した結果を図 1-13 に示す。通電は LD を保持するホルダの温度を 0 °C にして実施した。ここで COMD レベルとは，LD の光出力を徐々に増加させたときに COMD が発生するときの光出力である。COMD レベルは動作中に徐々に低下していく。この原因としては，コーティング膜構成原子と結晶間のボンド切断，コーティング膜からの水分の侵入や，残留酸素などによる共振器端面の酸化などが挙げられる。この COMD レベルが通電時の光出力にまで低下することで，COMD が発生すると考えられる。

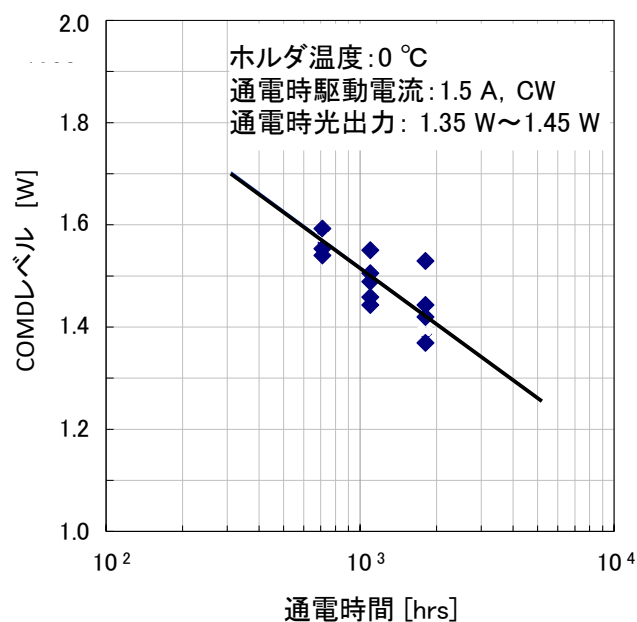


図 1-13 COMD レベルの経時変化

1.5.4 緩慢劣化 (Slow 劣化)

光出力が緩やかに低下する Slow 劣化は、InGaAsP/InP, AlGaAs/GaAs, AlGaInP/GaAs 系 LD において普遍的にみられる劣化現象であり⁽⁶²⁻⁶⁴⁾、点欠陥やループ転位、不純物等に起因する深い準位などによる非発光再結合が原因であるとする報告が多数ある^(65,66)。この劣化は、しばしば素子寿命を制限する要因となる。また、その劣化速度の温度依存性はアレニウス則に従うことが知られており^(67,68)、AlGaAs/GaAs 系 LD における Slow 劣化の活性化エネルギーは、0.5 から 1.0 eV 程度であることがこれまでに報告されている⁽⁶⁹⁻⁷³⁾。

光通信用 LD や光ディスク用 LD は、長期間使用後においても同じ光出力が必要とされる。そのため、Slow 劣化による光出力低下を動作電流の増加で補う APC (Automatic Power Control) 駆動で使用される。一方、ディスプレイ用途の LD の場合は、光出力低下に対する人の目の感度が比較的鈍感であることもあり、LD の動作電流を常に一定とする、いわゆる ACC (Automatic Current Control) 駆動で使用されることがほとんどである。APC および ACC 駆動したときの Slow 劣化の様子をそれぞれ図 1-14(a)および(b)に示す。APC 駆動の場合、Slow 劣化が進むにつれて低下した光出力を補填するために動作電流が大きくなっていく。そして、動作電流が大きくなることによりさらに Slow 劣化が加速されるため、図 1-14(a)のように動作電

流が加速的に増加していく。一方、ACC 駆動の場合は動作電流が一定であるため、光出力の低下量は図 1-14(b)のように一定となる、あるいは飽和する場合が多い。

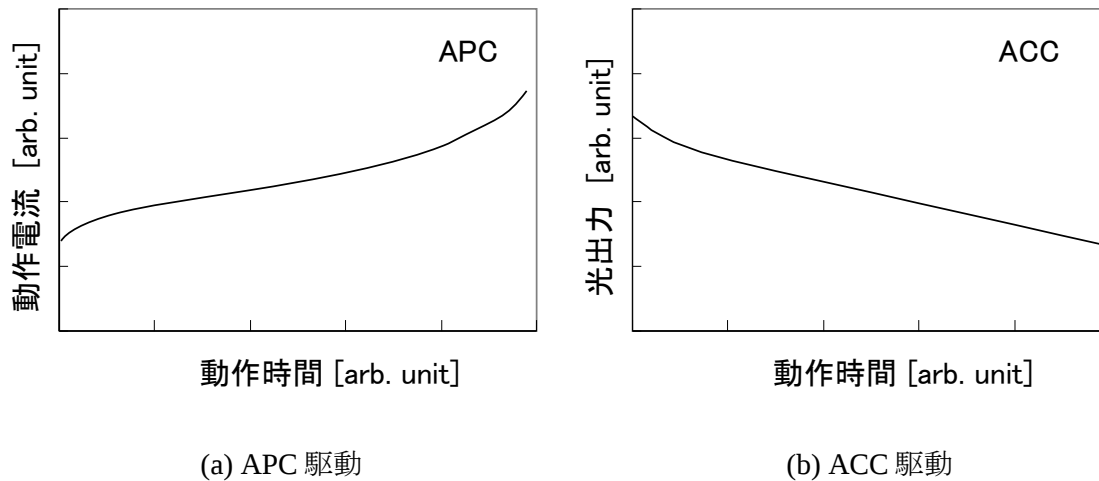


図 1-14 APC 駆動時の動作電流の経時変化と ACC 駆動時の光出力の経時変化

1.5.5 LD の平均故障時間（MTTF ; Mean Time To Failure）予測

1.5.1 項および 1.5.2 項に示したような急速劣化については、劣化原因が究明されたことや製造技術が向上したことによって、近年においては、LD の MTTF を律速することはほとんどなくなってきた。そのため、LD の MTTF を推定するためには、COMD 起因の MTTF（以降 MTTF(COMD)と呼ぶ）や、Slow 劣化起因の MTTF（以降 MTTF(Slow)と呼ぶ）を知ることが出来ればよい。

MTTF(COMD)を推定するためには、LD を長時間動作させることで、COMD が発生した時間を確認すればよいが、通信用 LD では約 100,000 時間程度、ディスプレイ用 LD では 20,000 時間程度の MTTF が必要とされることから、実際の使用条件で寿命を迎えるまで通電試験を実施することは現実的ではない。そこで、MTTF 予測には実際の使用条件よりも過酷な条件で通電を実施する、いわゆる加速試験が用いられる。この場合の加速因子としては、雰囲気（温度、湿度）、電流、光出力が良く用いられるが、その加速係数が分かっている必要がある。

AlGaInP/GaAs 系赤色 LD の場合、COMD 起因の MTTF(COMD)と端面における光密度 P_d の間には式 (1-1)の関係があることが知られている⁽⁷⁴⁾。この式によると、光出力を 2 倍にした場合の MTTF(COMD)は約 1/9.2 となり、光出力に対し大きな加速性があることから、光出力を大きくする加速試験によって短時間での MTTF の予測が可能になる。

$$MTTF(COMD) \propto P_d^{-3.2} \quad \text{式 (1-1)}$$

Slow 劣化の場合は、劣化速度がアレニウス則に従うことが知られている^(67,68)。そのため、動作温度を高くした加速試験を実施し、その時の MTTF と温度加速係数から実際の使用温度における MTTF(Slow)を推定することが一般的である。ただし、赤色 LD の場合は、ACC 駆動で通電試験を実施するため、Slow 劣化の劣化率はある程度の時間が経過すると一定になる。よって、加速試験を実施しなくとも、Slow 劣化の劣化率が一定になる 3,000 時間程度まで通電試験を実施し、その劣化率から MTTF(Slow)を予測することが可能である。

1.6 ディスプレイ用横マルチモード赤色 LD の課題

1.6.1 高温・高出力時における光出力低下

ディスプレイ光源用 LD に対する要求の 1 つに、高い光出力がある。仮に動作時の光出力を 1 W とすると、シネマ用プロジェクターとして必要な 20,000 lm 以上の輝度を得るために必要な赤色 LD の数量は 100 個以上にもなる。そのため、赤色 LD 1 個あたりの光出力を大きくすることが出来れば、赤色 LD の使用個数が少なくなり、光源の体積低減や低コスト化が可能になる。加えて、光源の面積が小さくなることにより、集光レンズなどの光学素子を小型化することが可能になり、ディスプレイ装置そのもののサイズやコスト低減に大きく寄与することになる。

しかしながら、AlGaInP/GaAs 系材料からなる赤色 LD は、AlGaInN/GaN 系材料からなる青・緑色 LD や、AlGaAs/GaAs 系材料からなる赤外 LD と比べても、高温領域における光出力の低下が顕著である。比較的熱抵抗の大きい GaAs 基板での温度勾配を避けるため、赤色 LD の活性層に近い表面側をサブマウントに接合する、いわゆるジャンクション・ダウン方式で組立するなどの工夫がされているものの、図 1-10 に示したように、しきい電流値には大きな温度依存性があり、高温・高出力領域における光出力の飽和傾向も強い。このような現象は、活性層内の電子が p 型クラッド層側にオーバーフローすることによるものと考えられている⁽⁷⁵⁻⁷⁷⁾。これについては、p 型クラッド層の材料を、わずかにバンドギャップが小さい材料にした場合⁽⁷⁸⁾や発振波長が短い場合⁽²⁴⁾に、温度特性が大きく劣化することからも妥当である。

この電子オーバーフローを抑制するため、赤色 LD のクラッド層には、GaAs 基板に整合する AlGaInP 系材料の中で、最もバンドギャップが大きい材料である AlInP が用いられている⁽⁵²⁾。それに関わらず、十分な温度特性を得ることができないため、ディスプレイ装置のコストが増大、RGB-LD 光源普及の大きな妨げになっている。

1.6.2 COMD

DVD に用いられる従来の赤色 LD に要求される MTTF は、CW 動作相当で 2,000 時間前後である。一方、一般的なディスプレイ装置に要求される MTTF は 20,000 時間以上であることから、その光源である赤色 LD に対しても、20,000 時間以上の MTTF が要求される。

文献(74)では、図 1-10 の光出力特性を持つ 40 μm -1 エミッタ LD を、1.3 W で動作させた場合の MTTF(COMD)が 1,800 時間であることが示されている。したがって、この赤色 LD の MTTF(COMD)が 20,000 時間以上となる最大の光出力を式 (1-1)の関係を用いて求めると、0.61 W ($= \sqrt[3.2]{1800/20000} [\text{hr}] \times 1.30 [\text{W}]$) と推定される。また、エミッタ幅を 75 μm に拡大した場合は 1.14 W ($= \sqrt[3.2]{1800/20000} [\text{hr}] \times 75/40 [\mu\text{m}] \times 1.30 [\text{W}]$) が光出力の上限になる。

1.3.2 項のように、デューティ比 40 % のパルスで 20,000 時間動作させた場合、赤色 LD の総点灯時間は、8,000 ($=20,000 \times 0.4$) 時間となる。したがって、この場合は CW 動作下で 8,000 時間の MTTF が必要となる。このパルス動作が可能となる最大の光出力は、40 μm -1 エミッタ LD で 0.81 W ($= \sqrt[3.2]{1800/8000} [\text{hr}] \times 1.3 [\text{W}]$)、75 μm -1 エミッタ LD で 1.52 W ($= \sqrt[3.2]{1800/8000} [\text{hr}] \times 75/40 [\mu\text{m}] \times 1.30 [\text{W}]$) と見積もられる。

いずれの場合も、MTTF(COMD)の制約によって決まる最大動作光出力は十分とは言えず、COMD 耐性の向上によって、最大動作光出力を向上させることが強く望まれる。図 1-13 のような COMD レベルの挙動を鑑みると、高出力動作を実現するためには、初期の COMD レベルを向上させる、あるいは動作中の COMD レベルの低下速度を抑制することが必要で、これらの挙動を決定する要因を明らかにすることが非常に重要である。

1.6.3 Slow 劣化

特にコンシューマー市場向けのディスプレイ用赤色 LD においては、冷却装置のコストを抑えるために、45 $^{\circ}\text{C}$ あるいは 55 $^{\circ}\text{C}$ といった高温下で動作させることがほとんどである。赤色 LD を高温で動作させる場合、温度上昇に伴う光出力低下および発振波長の長波長化による視感度の低下を補填するために動作電流を大きくする必要があり、これがさらに活性層温度を高くして、Slow 劣化を加速することになる。かつて、赤色 LD の MTTF は COMD で制約されることがほとんどであったが、窓構造の改善が進んだ結果、Slow 劣化が MTTF の制約条件になる場合も多くなってきている。このような背景から、高輝度で、かつ使用中の輝度の低下が小さい光源を実現するためには、MTTF(Slow)を大きくすることも重要である。

1.5.4 項に示したように、AlGaAs/GaAs 系 LD の Slow 劣化については、その原因が推定されており^(65,66,79-82)、活性化エネルギーについても多数の報告がある⁽⁶⁹⁻⁷³⁾。一方で、638 nm 近傍で

発振する赤色 LD における Slow 劣化の原因，加速要因，およびその加速性については，著者の知る限り報告されているものはない。これらについては，材料系の違いや結晶品質の違いで異なる可能性があるため，Slow 劣化の改善や MTTF(Slow)予測のためにも，これらを明らかにすることは重要である。

1.6.4 スペックル雑音

1.2節で示したように，ディスプレイ用としての赤色 LD 光源は，多くの優れた特長を持っている。一方で，誘導放出光であるレーザー光がもつ高い可干渉性のために，投影面の微小な凹凸で反射したレーザー光が干渉し，スペックル雑音と呼ばれる斑点模様が観測されることが実用上問題となっている^(83,84)。このパターンは，非常に目障りなギラツキとして認識されるため，ディスプレイへの応用において，このスペックル雑音の低減は非常に重要な課題となっている。スペックル雑音を評価する指標としては，光強度 I の標準偏差 σ をその平均値 $\langle I \rangle$ で割るスペックルコントラスト (C_s) 値が定義されている⁽⁸⁵⁾。

$$C_s = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad \text{式 (1-2)}$$

C_s の値は 0~1 の間の値を取り， C_s が大きいほど光強度の揺らぎが大きいことになる。この C_s 値を低減する方法としては，スクリーンを振動させる方法，偏光の異なるレーザー光を重ね合わせる方法⁽⁸⁶⁾，移動拡散板を透過させる方法^(84,87-88)，赤色 LD の発振波長幅を拡大⁽⁸⁹⁻⁹¹⁾あるいは波長の異なる複数の光源を用いる方法⁽⁹²⁾，角度多重⁽⁹³⁾などが提案されている。特に発振波長幅を広げる方法としては，駆動電流に高周波を重ねることが提案されている⁽⁷⁴⁾。ディスプレイ装置としては， C_s 値で 0.05 以下，好ましくは 0.03 以下が良いとされるが，これを実現するためには，これらの方法を単独あるいは組み合わせて適用する必要がある，コスト上昇の大きな要因となっている。

青色 LD で用いられる AlGaInN 材料系の場合，活性層に用いられる GaInN 材料の In の組成不均一が大きいことや自然放出光係数が大きいことにより，スペクトル半値幅は 2 nm 程度に広がっている⁽⁹⁴⁾。一方で，赤色 LD の場合はスペクトル幅が 1 nm 程度と狭いことなどからスペックル雑音が大きい傾向となっており，3 色まとめてスペックル対策を実施する場合の足かせになる場合が多い。したがって，赤色 LD の構造の工夫などによって，赤色 LD 単体でスペックル雑音を低減できれば，先に示した方法よりも圧倒的に低コストの対策となる。またその方法は，同じ横マルチモード LD である，青および緑色 LD に応用できる可能性も高い。0.05 以下，望ましくは 0.03 以下とされる C_s 値を，LD 単体で実現できなかったとしても，他の対策で必要となる改善量を抑えることにより，構造の簡易化や低コスト化に繋がると考えられる。

1.7 熱シミュレーションの光デバイスへの応用

LED(Light Emitting Diode)やLDといった光デバイスやそのパッケージの温度を実測することは非常に難しいことから、これらの温度を推定するために熱シミュレーションを利用することは非常に有意義である。熱シミュレーションを、LEDやLDの活性層温度を推定するために用いた例は、これまでいくつかの報告がある。LEDのチップサイズを大きくすることで熱抵抗が小さくなることを確認したもの⁽⁹⁵⁾や、LDやLEDのパッケージや半田の熱抵抗を下げることを検討したもの⁽⁹⁶⁻¹⁰¹⁾などは、発光領域の温度を下げることで、デバイスの特性を改善することを目的としたものである。さらに、青色LDチップを5個横方向につなげた青色LDバーにおいて、エミッタ間の温度差が小さくなるようにエミッタ位置を調整した例⁽¹⁰²⁾もある。これらの例は、主に複数のデバイス構造の熱抵抗を求め、熱抵抗の相対比較を実施したものである。

1.8 本研究の目的

本研究の目的は、1.6節で述べた高温・高出力時の光出力低下や、COMDおよびSlow劣化による光出力の経時劣化、映像品質を落とすスペckル雑音といった問題を改善し、高輝度・高効率・高信頼・低スペckル雑音特性をもつ赤色LD光源を実現することである。

高出力化が実現できれば、ディスプレイ装置の高輝度化が可能となる。また、同じ輝度であれば、使用されるLDの個数低減によって、省スペース化や集光レンズなどの光学素子の小型化が可能になる。さらに、高効率化によって消費電力が小さくなれば、冷却装置も小型・簡易化される。加えて、スペckル雑音が小さい光源であれば、これまで光源外部で行ってきた低スペckル対策も簡易化が可能である。これらは、すべてディスプレイ装置の低コスト化を推し進め、レーザーディスプレイの普及に繋がるものである。

共同研究者である西田氏の博士学位論文では、1つのLDチップに複数のエミッタを搭載するマルチエミッタ構造とすることで光出力が改善することが示されている。また、熱シミュレーションを用いることで、光出力の予測が可能であることも示されている⁽⁵¹⁾。光出力を高い精度で予測するためには、LDの活性層温度を高い精度で求めることが必要である。そこで本研究では、LDの活性層温度を高精度に求めるための熱シミュレーションモデルを構築し、その精度を検証する。そして、これを用いることによりマルチエミッタLDの光出力最大化の検討を実施する。さらに、活性層温度を元に、COMDおよびSlow劣化の劣化要因と温度加速係数を明らかにし、LDの寿命予測手法を確立するとともに寿命改善の提案を行う。そして、こ

のマルチエミッタ構造が、光出力、素子寿命、スペックル雑音の全てにおいて、従来の構造よりも優れていることを明らかにする。

現状の 75 μm -1 エミッタ LD の場合、ディスプレイ用として必要な 20,000 時間での光出力低下量が 50 %以下との条件を満たす光出力は、CW 動作で約 1.0 W 程度、パルス動作で約 1.5 W 程度である。本研究では、最終的に CW 動作で 2.0 W 以上、パルス動作で 3.5 W 以上の出力が可能な赤色 LD を得ることを目指す。

また、西田氏の博士学位論文では、LD の駆動方法を変更することによりスペックル雑音を低減する手法が提案されているが⁽⁵¹⁾。本研究では、マルチエミッタ LD そのものが、低スペックル雑音を実現可能な構造であることを示すと共に、LD の縦および横モード競合が、スペックル雑音の低減に寄与する可能性があることを示す。

1.9 本論文の構成

本論文は、全 7 章で構成される。

第 1 章では、LD の歴史と、LD がレーザーディスプレイに応用されるに至った経緯、LD を光源とすることによって得られる利点を述べる。次に、レーザーディスプレイの主な 2 つのタイプと、それぞれに使用される赤色 LD の種類を説明する。そのうち、赤色 LD の劣化要因について述べ、最後に本研究で取り扱う横マルチモード赤色 LD が持つ種々の課題と本研究の目的を示す。

第 2 章では、本研究にて様々な議論に用いることになる、熱シミュレーションについて説明する。最初に熱シミュレーションのモデルを構築し、CW 動作とパルス動作の双方の場合についてシミュレーションの概要を示した後に、精度検証を行う。さらに、1 エミッタ LD の光出力特性の実測結果と、熱シミュレーションを用いることで、任意の構造のマルチエミッタ LD の光出力特性を予測する方法について説明する。

第 3 章では、赤色 LD の光出力特性改善方法を検討する。その 1 つの方法として、光出力低下の原因である電子オーバーフローを抑制可能な層構造を提案する。また、エミッタの温度を低減することで光出力を増大できる、マルチエミッタ構造を提案した。構造は、2 章で示した光出力予測手法を用いて、LD を作製することなく、簡便かつ正確に最適化したその後、実際にマルチエミッタ LD を作製して、光出力や電力変換効率が改善していることを実証する。

第 4 章では、赤色 LD の寿命を制限する要因である、COMD および Slow 劣化の原因推定と劣化の抑制方法について議論する。最初に、端面と活性層利得領域の温度差が COMD による寿命を決定することを明らかにし、それを元に MTTF を改善する具体的手法を提案する。ま

た，熱シミュレーションにより Slow 劣化前後の特性変化の様子を正確に把握することで，赤色 LD における Slow 劣化の原因を推定する。

第 5 章では，COMD および Slow 劣化速度を決定する要因を抽出し，その加速係数を明らかにする。これにより，通電試験を実施することなく MTTF を推定する方法を示す。この方法を用いて，第 3 章で設計したマルチエミッタ LD の MTTF を推定し，20,000 時間動作後の光出力低下が 50 % 以下となる最大の動作可能光出力を算出する。

第 6 章では，1 エミッタおよびマルチエミッタ LD のスペックル雑音を評価し，LD 単体でのスペックル雑音低減の可能性について議論する。まず，スペックル雑音の光出力依存性を評価し，その振る舞いの原因を推定する。さらに，本研究に用いたマルチエミッタ LD から出射されるビームが重なり合うことによるスペックル雑音低減効果についても議論する。

第 7 章では，第 1 章から第 6 章における研究成果を総括し，本研究の結論を述べる。

第2章：熱シミュレーションによるマルチエミッタ赤色 LD の光出力特性予測

2.1 はじめに

1.6.1 項で説明したように、赤色 LD はその材料特性に起因して、緑色 LD や青色 LD に比べて温度上昇に伴う光出力の低下が顕著であり、高出力化の大きな阻害要因となっている。また、光出力特性を改善できたとしても、高い光出力での動作は、レーザー光の出射面となる前端面付近における光吸収量の増大により COMD の劣化速度を加速すると共に、動作電流値増大による活性層温度上昇が Slow 劣化速度を加速することから⁽¹⁰³⁾、素子寿命の制約により高出力動作が不可能となる。したがって、赤色 LD の素子設計では、光出力を最大化することのみならず、赤色 LD の信頼性を考慮する必要がある。

もちろん、光出力に影響を与えない方法で COMD や Slow 劣化を抑制することが望ましいが、材料物性の制約などがあるため、これは容易なことではない。また、赤色 LD 構造の変更でこれらを実現する場合は、光出力と素子寿命の間でトレードオフが発生するケースが多いことに注意が必要である。例えば、COMD の発生原因は、1.5.3 項に示したように前端面での光吸収に起因する前端面の温度上昇であると考えられるので、COMD への耐性を上げるためには、エミッタ幅を大きくすることで前端面温度を下げるのが有効である。しかしながら、エミッタ幅を大きくすると、エミッタ全体を透明化するために、より多くのキャリア数が必要になる、つまり、しきい電流値が上昇する。そうすると、活性層温度が上昇することで光出力が低下し、さらには Slow 劣化の加速にも繋がる。このようなトレードオフ関係の存在により、赤色 LD の素子設計は非常に複雑なものとなる。

赤色 LD の素子設計は、大きく 2 つに分けることが出来る。1 つは活性層、ガイド層、クラッド層などの層構造設計である。各層の組成や層厚、キャリア濃度を適切なものとする事で、キャリアを効率良く活性層に注入および閉じ込めすることで、注入されたキャリアを効率良く光に変換することが必要である。また、光吸収を出来るだけ小さくすることも重要である。これらを設計する方法としては、LASTIP (LASer Technology Integrated Program) のようなソフトウェアを用いて、2 次元構造でのポアソン方程式、波動方程式、レート方程式を連立させて解き、LD の諸特性を予測する方法などがある。

もう 1 つは、エミッタ構造の設計である。エミッタ幅などの形状や、共振器長、前・後端面反射率を適当なものとして、レーザー光を効率良く外部に取り出したり、無効電流を抑えるような構造とすることが必要である。また、LD の信頼性を向上させるための窓構造の設置なども重要である。

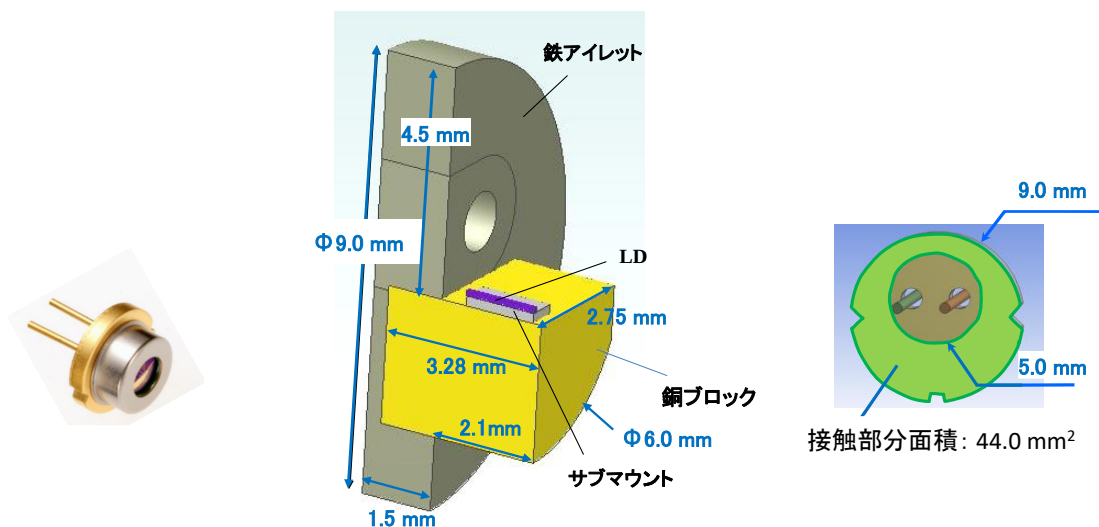
本研究では、活性層温度を低減するために、複数のエミッタを 1 チップに配置するマルチエミッタ LD を検討する。この場合、光損失などを増やすことなく、活性層温度を下げるができる構造の探求が必要である。また、MTTF(COMD)や MTTF(Slow)を考える上では、それぞれ前端面温度と LD の利得領域における活性層温度を知ることが必須であると考えられる。本研究では、この前端面温度や活性層温度を求める方法として、熱シミュレーションを用いることにした。熱シミュレーションによって、LD ホルダから活性層までの熱抵抗値を求めることができれば、任意の動作点における活性層温度を求めることが可能になる。本章では、CW およびパルス動作時の抵抗値を求める方法を示し、これによって求めた熱抵抗値の精度が十分なものかどうかを検討する。さらに、得られた熱抵抗値を用いて、マルチエミッタ LD の光出力特性を予測する方法を確立する。

2.2 熱シミュレーションの概要と精度の検証

2.2.1 熱シミュレーションモデルとシミュレーションの概要

LD の発振時におけるエミッタ領域の活性層温度を見積もるためには、発生する発熱量に対する活性層温度の上昇量、つまり熱抵抗値を求める必要がある。これを求めるために、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) による熱シミュレーションを用いることにした。熱シミュレータは ANSYS Inc.社の ANSYS を用いた。本研究で扱うディスプレイ用赤色 LD では、従来使用されてきた $\phi 5.6$ mm の TO-CAN ステムではなく、比較的大口径となる $\phi 9.0$ mm の TO-CAN ステムを使用している。これにより、ステムそのもの熱抵抗や、ステムから外部の LD ホルダへ放熱する際の接触部となるステム裏面部の接触熱抵抗を低減することが可能である。このステムは、青・緑色 LD にも用いられる標準のパッケージとなっている。図 2-1 に、 $\phi 9.0$ mm の TO-CAN パッケージの外形写真と、熱シミュレーションに用いた構造、パッケージ裏面の接触部の形状を示す。この TO-CAN ステムは、熱抵抗値を出来るだけ下げるために、鉄アイレットの内部まで銅ブロックが埋め込まれた形状となっている。

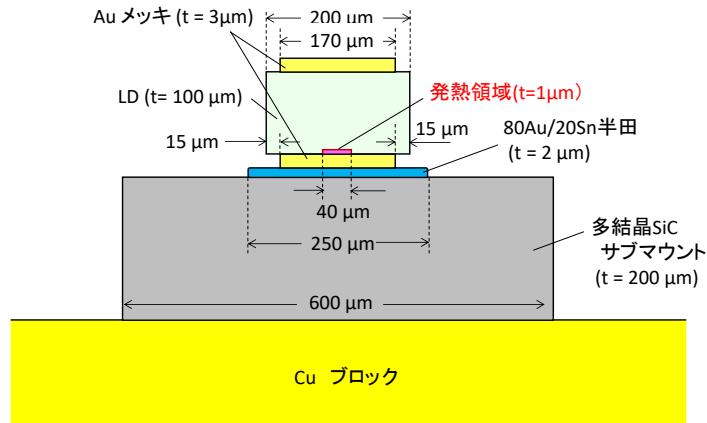
熱シミュレーションでは、LD チップ、サブマウント、TO-CAN ステムの構造を 3D でモデル化し、図 2-1(b)のような 1/2 対称モデルとした。 $\phi 9.0$ mm TO-CAN ステムには、気密を維持するためのガラス付キャップが取り付けられているが、このガラス付キャップを通して大気に放熱される伝導および輻射熱量は、ステム裏面を通して LD ホルダに排熱される熱量に比べると極めて小さいため、モデルからは除外した。ステム裏面と LD ホルダが接触する部分は図 2-1(c)に示すとおりである。



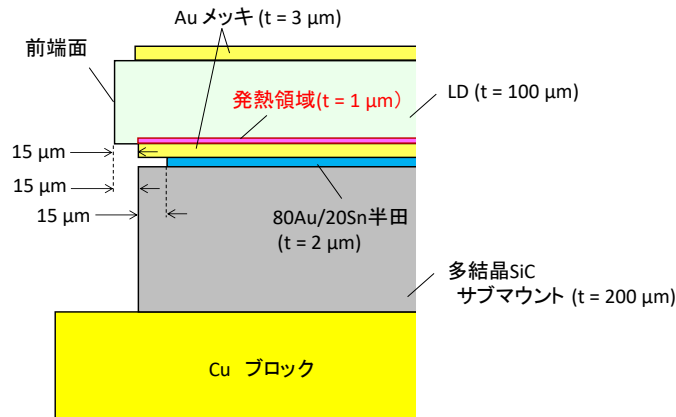
(a) $\phi 9.0\text{mm}$ TO-CAN (b) 熱シミュレーションに用いた構造図 (c) 裏面の接触部形状

図 2-1 赤色 LD の外形と熱シミュレーションに用いた構造，裏面の接触部形状

次に，エミッタ幅 $40\text{ }\mu\text{m}$ の 1 エミッタ構造を持つ LD の前端面近傍を，前面および側面から見た形状を図 2-2(a)および(b)に示す。赤色 LD の基板材料である GaAs の熱伝導率は $55\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 程度であり，青・緑色 LD の基板材料である GaN の熱伝導率 $130\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ に比べるとかなり小さい。そこで，赤色 LD をサブマウントに接合する場合は，GaAs 基板側ではなく，赤色 LD の活性層が結晶成長されている側をサブマウントに接合する，いわゆるジャンクション・ダウン方式で組立している。これにより，活性層で発生した熱は，約 $100\text{ }\mu\text{m}$ の厚さの基板を経ることなく TO-CAN ステム側に排熱される。前端面がサブマウント端よりも $15\text{ }\mu\text{m}$ 前に突き出しているのは，組立位置のばらつきによって前端面がサブマウント端よりも後ろになることで，出射光がサブマウントにより散乱されることを防止するためである。



(a) 前端面近傍を全面から見た LD, サブマウント, ブロックの構造



(b) 前端面近傍を側面から見た LD, サブマウント, ブロックの構造

図 2-2 熱シミュレーションに用いた構造 (40 μm- 1 エミッタ LD)

発熱領域は基板最表面から 1 μm の領域とした。この根拠を以下に示す。赤色 LD 内部で発生する熱は、活性層で発生するものと、活性層以外にて発生するものに分かれる。活性層で発生する熱には、キャリアそのものの消失であるオージェ再結合^(104,105)によるもの、欠陥準位を介した非発光再結合によるもの、およびバンド端間吸収や価電子帯間吸収⁽¹⁰⁶⁾などの光吸収によってエネルギーを得たキャリアに起因するものがある。活性層以外で発生する主な発熱は、不純物吸収やフリーキャリア吸収、結晶の電気抵抗によるジュール熱などがある。特にジュール熱は、p 型クラッド層の抵抗が n 型クラッド層よりも 10 倍程度大きいことから、主に p 型クラッド層にて発生すると考えてよい。これらのことから、赤色 LD における発熱は、ほぼ活性層と p 型クラッド層にて発生すると仮定した。ここで、活性層と p 型クラッド層を合わせた層厚は約 1 μm であること、結晶表面から活性層までの距離が約 1 μm であることから、発熱領域を結晶表面から 1 μm の

領域とした。また、実際の赤色 LD では、前端面温度の上昇を抑えるため、前端面から 15 μm の領域には電流を注入しない構造となっているため、この電流非注入領域を発熱領域から除外した。

ここで、赤色 LD への注入電流密度は共振器方向で一定と考えてよい。一方で、前端面反射率が後端面反射率よりも小さいことから、光密度は後端面側に比べて前端面側の方が大きくなっている。これにより、価電子帯間吸収などの光吸収に起因する発熱量が前端面側で大きくなるため、活性層温度は前端面側が若干高くなるような分布を持つと考えられる。その分布の平均値は、共振器中央部の活性層温度に近いと予想される。そこで、LD の活性層温度が場所によらず一定で、その値 T_j が共振器の中央部の温度であると仮定した上で、熱シミュレーション精度検証を 2.2.2 項の通り実施した。その結果、この仮定の下であっても、実測と熱シミュレーションの光出力値が非常に良く整合することが分かった。このことから、本研究では LD の活性層温度 T_j を上記のように定義することにした。

実際に赤色 LD の光出力特性を測定する際には、図 2-3 に示すように、LD パッケージを LD ホルダに搭載し、LD ホルダの温度をコントロールしている。そこで、熱シミュレーションでは、LD ホルダ温度 T_h を基準として、活性層と LD ホルダ間の熱抵抗値 θ_{jh} を求めることにした。この θ_{jh} は、図 2-3 のとおり、活性層と図 1-11 に示すケース温度 T_c 測定位置との間の熱抵抗値 θ_{jc} と、 T_c 測定位置とホルダ温度 T_h 測定位置との間の熱抵抗値 θ_{ch} の和になっている。

活性層温度 T_j は、この θ_{jh} と図 2-2 で示す発熱領域で発生する発熱量 W_{ne} 、および LD ホルダ温度 T_h を用いて式 (2-1) で表すことができる。

$$T_j = W_{ne} \cdot \theta_{jh} + T_h \quad \text{式 (2-1)}$$

W_{ne} は、赤色 LD 内部で発生する電力から外部に流出する電力、すなわち光出力を除いた電力である。LD 内部で発生する電力は、動作電流 I_{op} と動作電圧 V_{op} の積なので、前端面および後端面からの光出力の和 P_{ofr} を用いて、 W_{ne} は式 (2-2) で表される。

$$W_{ne} = I_{op} \cdot V_{op} - P_{ofr} \quad \text{式 (2-2)}$$

ここで、ケース温度 T_c の測定位置とホルダ温度 T_h の測定位置間の熱抵抗値 θ_{ch} は、図 2-3 に示すように、ステムとホルダ間の接触熱抵抗値 θ_{cont} 、ステムの接触部分と T_c 測定位置間の熱抵抗値、およびホルダの接触部分と T_h 測定位置間の熱抵抗値から成っている。このうち、 θ_{cont} は接触部に使用する熱伝導剤の種類や接触状態によって変化することから、実験的に求める必要がある。 θ_{ch} の実測値は、無効電力量 W_{ne} を与えたときの T_c および T_h を実測することで求めることが出来る。熱シミュレーションによって求めた θ_{ch} が、この θ_{ch} の実測値と一致するときの θ_{cont} 設定値が、実測によって求められる θ_{cont} 値である。本研究においては、この接触部分に熱伝導率 17 W/(m $\cdot$ K) の熱伝導シートを使用することにするが、このときの θ_{ch} の実測値は 1.20 K/W であった。熱シミュレーションの結果から、ステムの接触部分と T_c 測定位置間の熱抵抗値は 0.05 K/W,

ホルダの接触部分と T_h 測定位置間の熱抵抗値はほぼゼロとなることから、接触熱抵抗 θ_{cont} は 1.15 K/W と推定される。本論文で使用する熱シミュレーションモデルにおいては、この接触熱抵抗値を用いることにする。

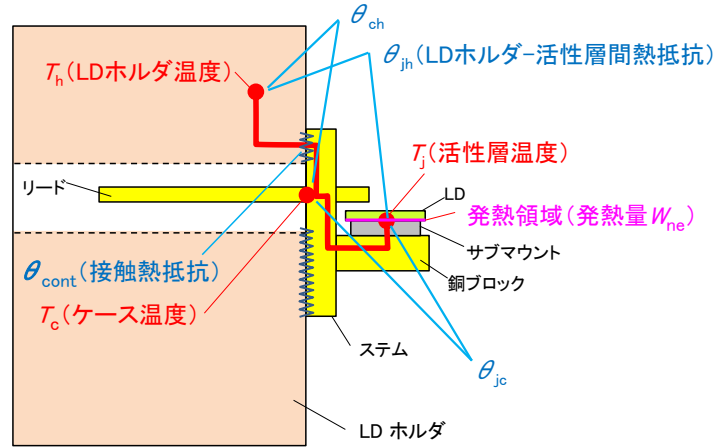


図 2-3 各部位の温度と熱抵抗の関係

ここで、LD ケース温度 T_c とホルダ温度 T_h との温度差は、両位置間の熱抵抗 θ_{ch} と無効電力 W_{ne} の積で表されることから、式 (2-3) の関係が成り立つ。

$$T_c = W_{\text{ne}} \cdot \theta_{\text{ch}} + T_h \quad \text{式 (2-3)}$$

先に示した通り、 θ_{ch} は 1.20 K/W と見積もられるので、ケース温度 T_c とホルダ温度 T_h の関係は図 2-4 のようになる。このように、ホルダ温度 T_h が一定であっても、LD の動作電流が異なれば発熱量が変化することから、ケース温度 T_c は動作電流によって変化する。

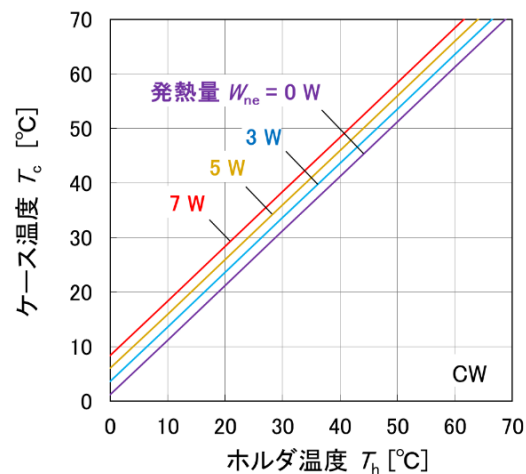


図 2-4 ホルダ温度 T_c とケース温度 T_h の関係

本研究では、ケース温度を基準にして光出力特性などを評価する場合があるが、この場合のケース温度 T_c は動作電流 3.0 A 時のケース温度を表すことにする。例えば $T_c = 45^\circ\text{C}$ の場合、ケース温度が 45°C になるように、ホルダ温度 T_h を 45°C よりも下げた設定で測定を実施する。

熱シミュレーションに用いた、各部位の材料と熱伝導率およびサイズの一覧を表 2-1 に示す。図 2-5 に、熱シミュレーションの形状モデル、材料割り当て、メッシュ分割形状、シミュレーション結果の状態を示す。

表 2-1 熱シミュレーションに用いた各部位の材料・熱伝導率・サイズ一覧

材料No.	部材名	材料名	熱伝導率 [W/(m·K)]	サイズ W×D×H [mm]
1	LDチップ	GaAs	55	0.4×1.5×0.1
2	サブマウント	多結晶SiC	300	0.8×1.5×0.2
3	Auメッキ	Au	315	0.364×1.485×0.003
4	AuSn半田	Au:80wt%, Sn:20wt%	57	0.364×1.470×0.004
5	銅ブロック	Cu	400	
6	鉄アイレット	Fe	75	

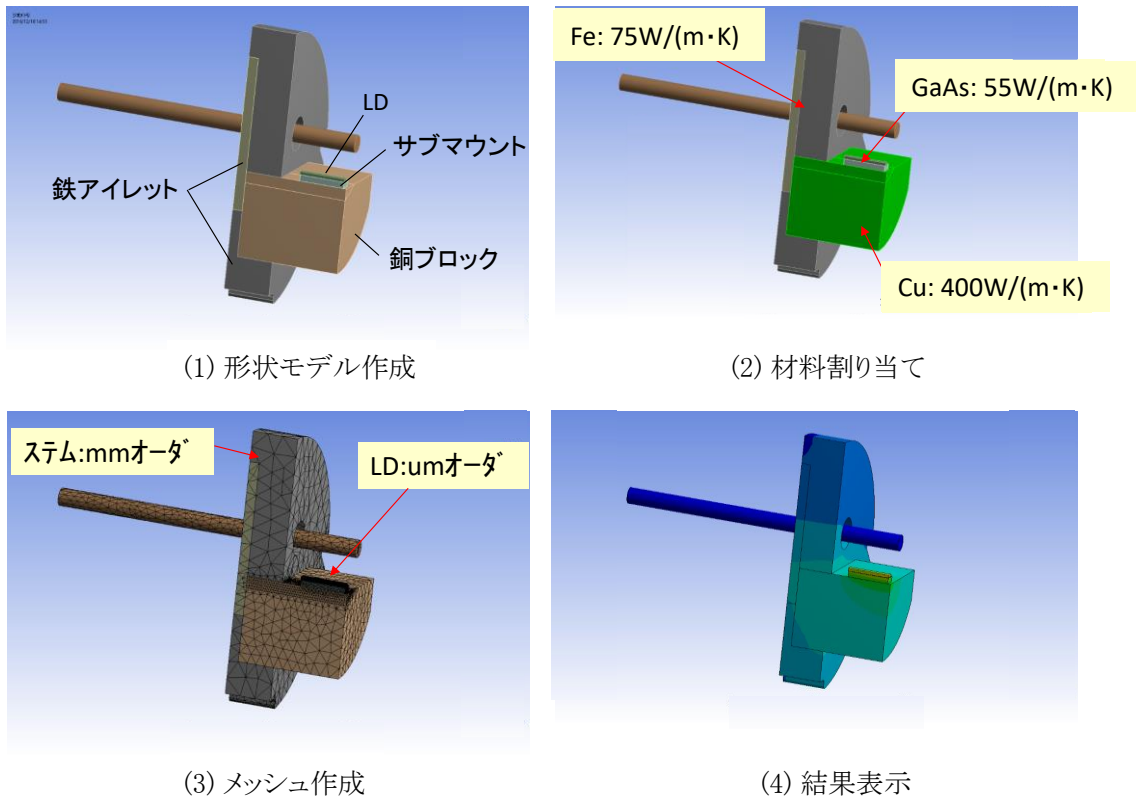


図 2-5 ANSYS による熱シミュレーションのプロセス

発熱領域の厚さを $1\ \mu\text{m}$ としたことから、発熱領域近傍のメッシュサイズは厚さ $1\ \mu\text{m}$ 、縦・横 $10\ \mu\text{m}$ の 6 面体のメッシュとし、最初にメッシュを形成した。その他の部材は、4 面体のメッシュを用い発熱体から離れるにつれメッシュサイズを大きくした。同一部材内においてもメッシュサイズを変化させることで節点数を抑制し、シミュレーション精度とシミュレーション時間の両立を図っている。鉄アイレット部分の最大のメッシュサイズは $500\ \mu\text{m}$ とした。最後に、形状が細かく、かつ温度変化が大きくなる LD の前端面近傍のメッシュは、 $1\ \mu\text{m}$ 、縦・横 $10\ \mu\text{m}$ よりもさらに細かくし、シミュレーション精度の向上を図った。

40 μm -1 エミッタ LD を、 $\phi 5.6\ \text{mm}$ および $\phi 9.0\ \text{mm}$ のステムに搭載したデバイスの熱シミュレーションの結果を図 2-6 に示す。活性層における発熱量を $1\ \text{W}$ 、LD ホルダ温度为 $0\ ^\circ\text{C}$ としたときの各点の温度を求めることで、LD ホルダからその各点までの熱抵抗値を求めている。

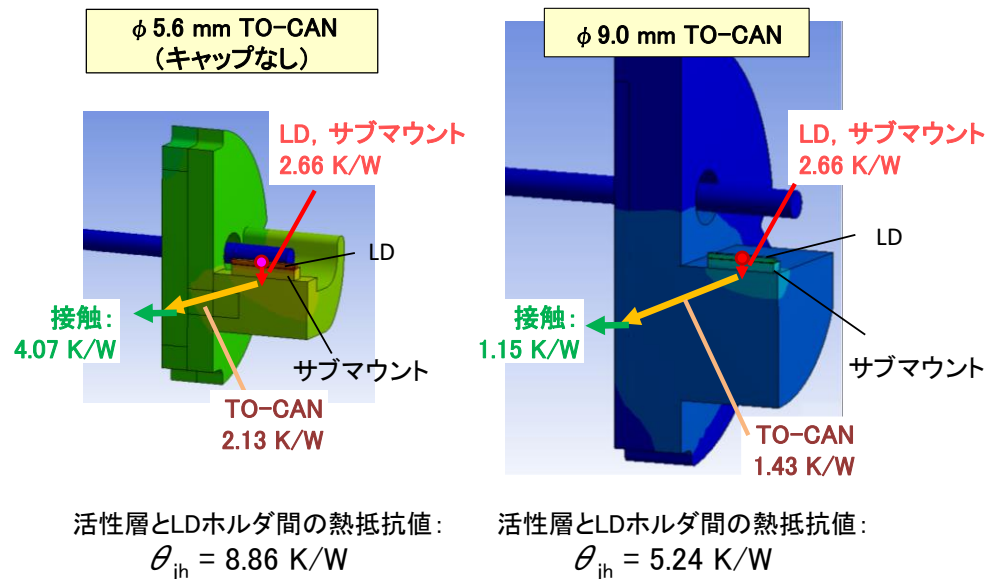
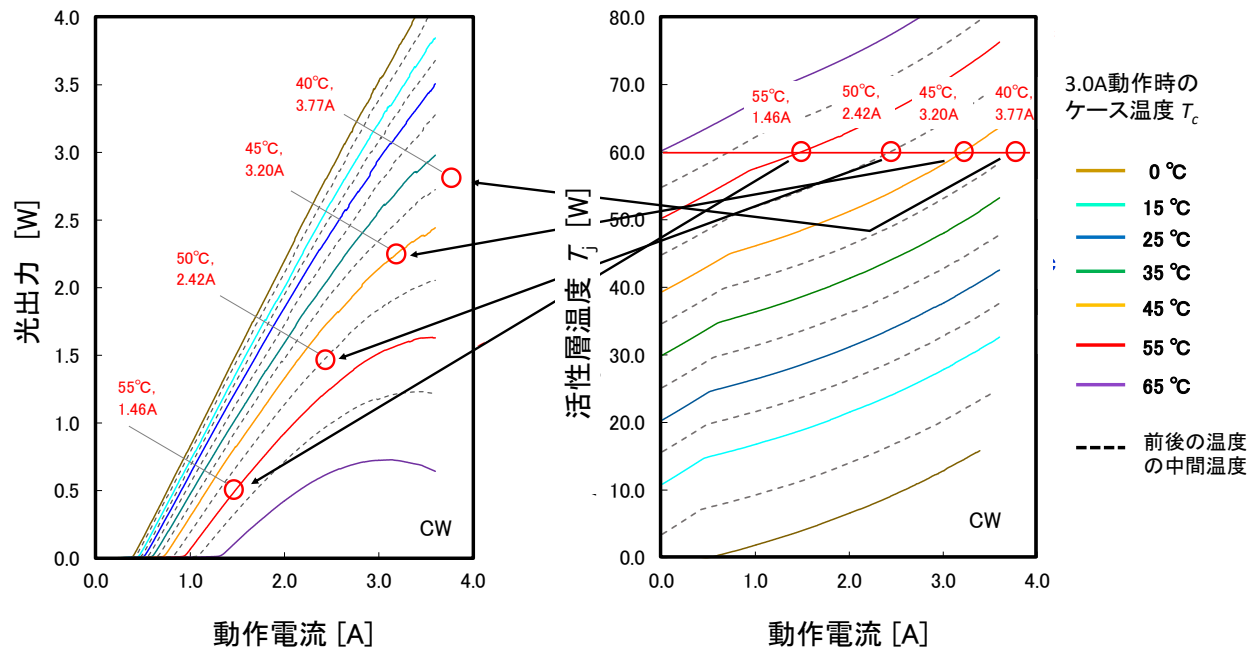


図 2-6 ANSYS による熱シミュレーション結果の例

2.2.2 熱シミュレーション精度の検証

次に、活性層温度の求積例を示す。高温・高出力まで出力が可能な構造として、 $75\ \mu\text{m}$ 幅のエミッタを 2 つ持ち、それぞれの中心間隔が $195\ \mu\text{m}$ である LD 構造（以降 $75\ \mu\text{m}$ -2 エミッタ LD と呼ぶ）を選んだ。図 2-7(a)は、ケース温度 T_c を変化させたときの LD の光出力特性の実測結果である。図 2-7(b)に示す活性層温度 T_j は、このときの LD ホルダ温度 T_h を用いて式 (2-1) に従って計算した。図 2-7(a)中には T_j が $60\ ^\circ\text{C}$ になるときの動作点を赤丸でプロットしてい

る。活性層温度が 60 °C になるときの LD ホルダ温度と動作電流には複数の組み合わせが存在する（図 2-7(a)では 4 点）。



(a) 光出力特性の実測結果

(b) 活性層温度 T_j のシミュレーション結果

図 2-7 光出力特性の実測結果と活性層温度 T_j のシミュレーション結果の例
(75 μm-2 エミッタ LD)

この 4 点，すなわち活性層温度が 60 °C となる動作電流値と光出力の組み合わせを図 2-8 のグラフに灰色の点でプロットした。実際には，活性層温度が 60 °C となる点は図 2-7(a)上に無数にあるが，確認の結果，これらの点はすべて同一線上にあることが分かった。したがって，この代表的な 4 点を直線で結ぶことで，活性層温度が 60 °C で一定の場合の光出力特性が得られる。図 2-8 は，活性層温度が 10 °C から 80 °C の場合について，活性層温度一定時の光出力特性を熱シミュレーションの結果を用いて求めたものである。

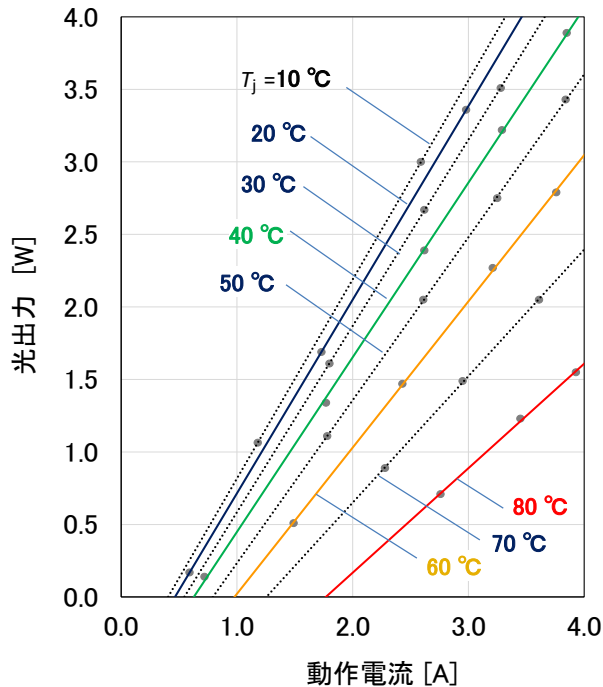
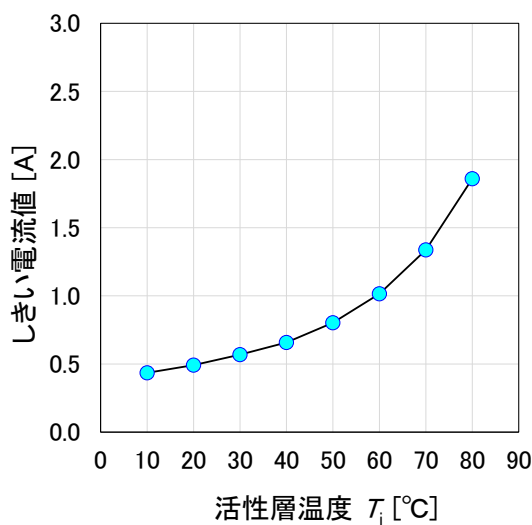


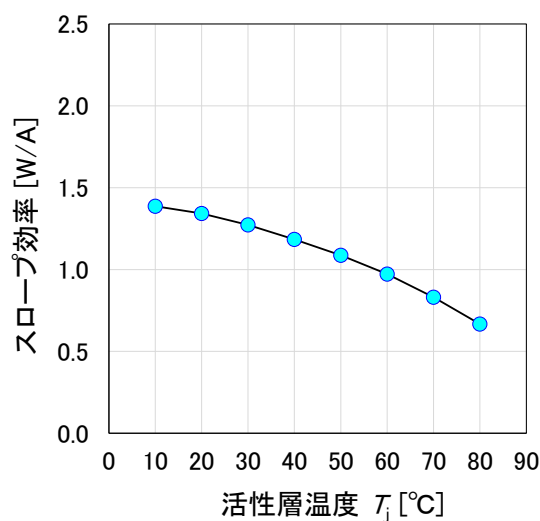
図 2-8 活性層温度 T_j 一定時の光出力特性 (75 μm -2 エミッタ LD)

図 2-8 のグラフでは、先に示した 4 点と同様に、活性層温度が同じになる代表的な数個の点を図 2-7 から求めてプロットしている。これらの代表点が全て直線上にあることから、いずれの活性層温度においても、活性層温度が一定であればスロープ効率は一定であることが示されている。ここで、活性層温度が固定された場合を考えると、ウェル層内における電子のフェルミ分布は固定されるため、注入電流量が変化したとしてもオーバーフローする電子の割合は変化しないはずである。このことから、図 2-8 の結果、すなわち活性層温度が一定であればスロープ効率が変化しないことは物理的に妥当な結果であると言える。これは、熱シミュレーションで得られた熱抵抗値が真値に近く、活性層温度が正確に求められていることの証左となる。

次に、図 2-8 から得られるしきい電流値とスロープ効率の温度依存性を、図 2-9(a)および(b)に示す。活性層温度 T_j に対するしきい電流値とスロープ効率の変化は、いずれもなだらかな変化となっており、物理的にも妥当なものである。このことから、熱シミュレーションで得られた熱抵抗値の精度が高いことが示唆されている。



(a) しきい電流値の T_j 依存性



(b) スロープ効率の T_j 依存性

図 2-9 活性層温度 T_j としきい電流値，スロープ効率の関係

逆に，熱シミュレーションを用いた本方法を用いれば，熱の影響を最小限にするような極短パルスの測定などを実施しなくとも，図 2-8 に示すような活性層温度一定の光出力特性を容易に求めることが可能になる。これは，本方法の大きな利点であるといえる。

2.2.3 パルス動作時の熱シミュレーション

1.3.2 項に示したように，3 つの SLM 素子を用いるディスプレイに使用される光源用 LD は 120Hz 前後のパルスで駆動される。ここで，LD の誘導放出は極めて速い現象であるため，パルス動作の場合も，その瞬時光出力は，その瞬間の活性層温度と電流値で決まるはずである。したがって，パルス動作時の光出力を予測するためには，熱の過渡応答シミュレーションによって，活性層温度の時間変化を求めればよいことになる。

図 2-10 は，75 μm -2 エミッタ赤色 LD をパルス駆動したときに，活性層で発生する発熱量を表したものである。発熱量を 1 W と仮定，繰り返し周波数を 120 Hz，デューティ比を 40 % とした。これは，1.3.2 項の示したように，ディスプレイ用光源として良く用いられるパルス条件である。 $\phi 9.0 \text{ mm}$ TO-CAN ステムに組み立てられた赤色 LD の 3dB 帯域は大体数百 MHz であることから，電流パルスの立ち上がり時間は 10 ns と仮定した。誘導放出や非発光再結合，光吸収による熱が発生するまでの時間はこれよりも十分小さいため，発熱量の時間変化は電流

パルス波形と相似になる。また、瞬時発熱量は CW 動作時と同じく式 (2-1) および式 (2-2) で求めることが出来る。

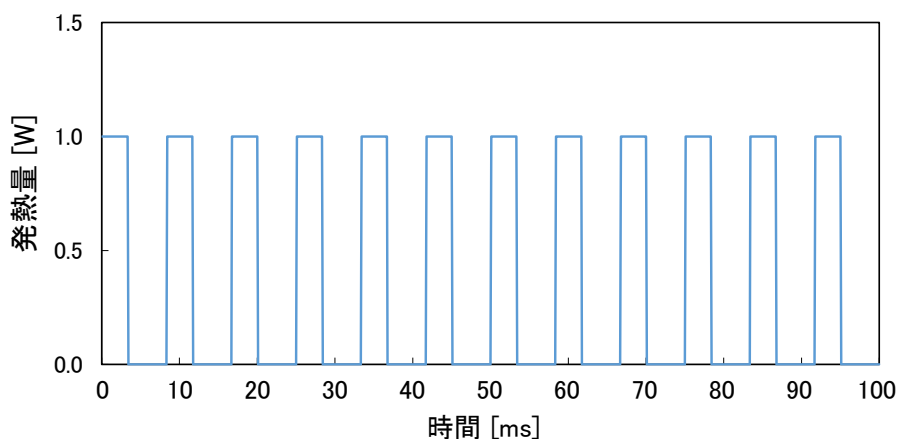


図 2-10 発熱量の時間変化

このような発熱があった場合の活性層温度 T_j を、熱シミュレーションによって求めた例を図 2-11 に示す。LD ホルダの温度 T_h は 0°C とした。活性層温度は、パルスの立ち上がりから少し遅れて上昇していること、活性層温度は定常状態に達する前に低下していくことが分かる。これは、発生した熱は活性層周辺に広がるが、熱容量および熱抵抗の存在のため、ステム全体やステム外部の領域に到達するには熱時定数程度の時間がかかるためである。活性層から離れた場所には熱が到達しないために、熱抵抗による熱勾配の発生、すなわち温度上昇は小さいことになる。

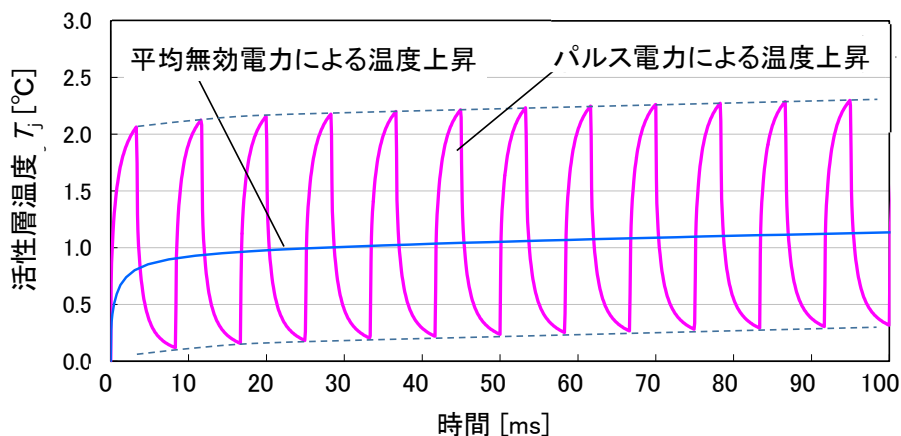


図 2-11 パルス動作の場合の活性層温度 T_j のシミュレーション結果 (100 ms まで)

図 2-12 は、図 2-11 の横軸を 3 秒まで延ばしたものである。パルスに追従した速い活性層温度変化とともに、ピーク、ボトムおよび平均温度が緩やかに増加している。これは、時間が経つにつれて、活性層で発生した熱がステム全体やステム外部にまで広がっていくことで、その経路にある熱抵抗によって温度勾配が発生するためである。また、図 2-12 中の青色の実線で示す平均温度は、活性層における平均発熱量である 0.4 W ($=1 \text{ W} \times 0.4$) のステップ状発熱を活性層に与えたときの過渡応答に一致する。同様に、時間が十分経った時の平均温度は、 0.4 W の発熱を与えたときの定常状態における活性層温度と一致する。このような振る舞いは、ステム全体で決まる熱時定数に応じて、活性層温度が上昇していくことを表している。この例では、定常状態の熱抵抗値、つまり 1 W 印加時の活性層温度上昇量が 4.03 K であるので、平均温度は最終的に $0.4 \text{ W} \times 4.03 \text{ K/W} = 1.61 \text{ }^{\circ}\text{C}$ まで上昇することになる。

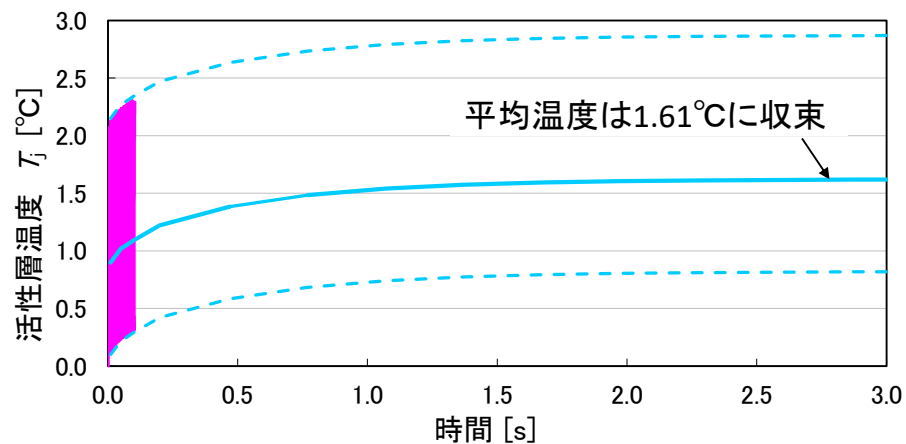


図 2-12 パルス動作の場合の活性層温度 T_j のシミュレーション結果 (3 sec まで)

図 2-13 は、再度パルス電流による活性層の温度変動の時間軸を拡大したものである。図中の青色の実線は活性層の平均温度である。パルス電流印加直後では、活性層温度が低くなっていることから、光出力は大きくなると考えられる。また、時間が経つにつれて活性層温度が高くなるために光出力は低下することになるはずである。図 2-14 に示すパルス波形測定例では、パルス印加直後に光出力のオーバーシュートが発生しており、このような温度変化が見て取れる。

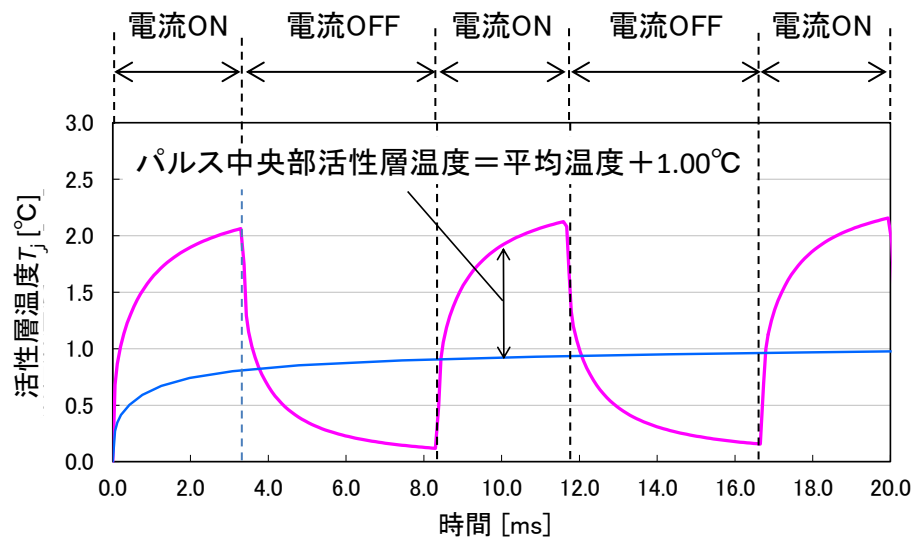


図 2-13 パルス動作時の活性層温度 T_j のシミュレーション結果 (20ms まで)

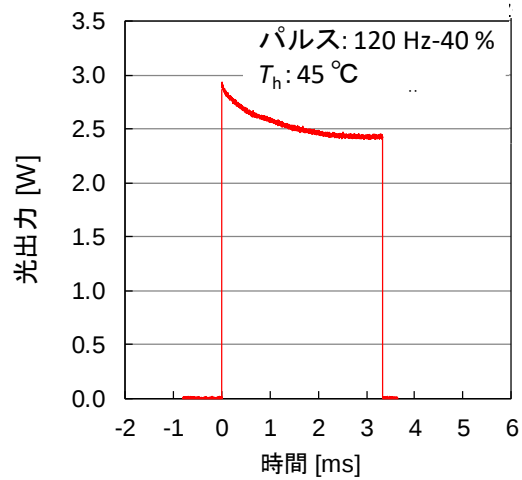


図 2-14 パルス動作時の光波形の例 (パルス中央部光出力 2.5 W)

本来、パルス動作時の光出力は、パルス ON 時間内における光出力の平均値とするべきであるが、本研究ではパルス動作時の光出力をパルス中央時間における瞬時光出力と定義することにする。これは、図 2-7(a)に示すような動作電流値と光出力との関係を、比較的高速の電流スweepで求めるために、光強度の積分値を測定できるカロリメーターではなく、比較的高速で応答する PD (Photodiode) をディテクタとして用いたためである (ただし、動作電流値と光出力との関係が定常状態の場合と同じになる程度まで、電流のスweep速度を遅くしてい

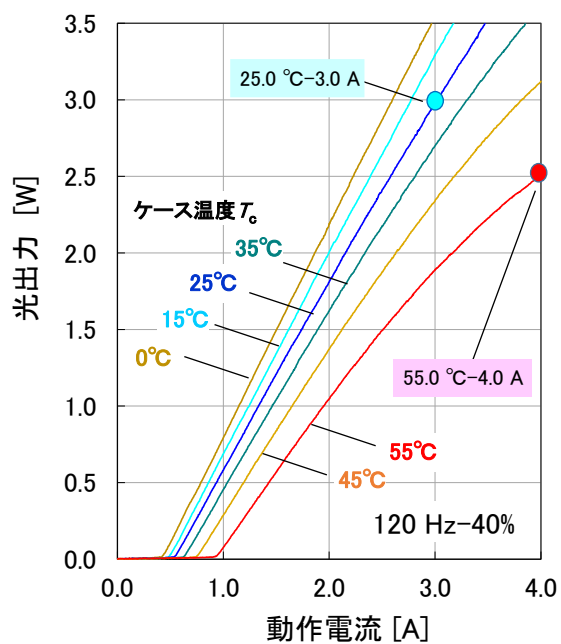
る)。ここで、図 2-13 から、パルス中央位置の活性層温度は、実際のパルス内の活性層温度の平均値に比べ大きいため、本研究で定義される光出力は、実際のパルス内平均光出力よりも若干小さくなると考えられる。つまり、本研究で定義した光出力の方が、実際の光出力よりもやや小さくなるため、議論の上での問題はない。

図 2-13 の結果から、パルス中央時間における活性層温度の瞬時値は、青色の実線で示される平均温度よりも $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高くなることが分かる。従って、パルス動作で定常状態となったときのパルス中央時間における活性層温度は、定常状態における活性層の平均温度である $1.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ と、活性層温度の瞬時値である $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ の和、つまり $2.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ となる。 1 W のピーク発熱量に対し $2.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度上昇となるので、熱抵抗値は 2.61 K/W になる。以上のような方法で、パルス動作時の活性層温度を推定することが可能である。

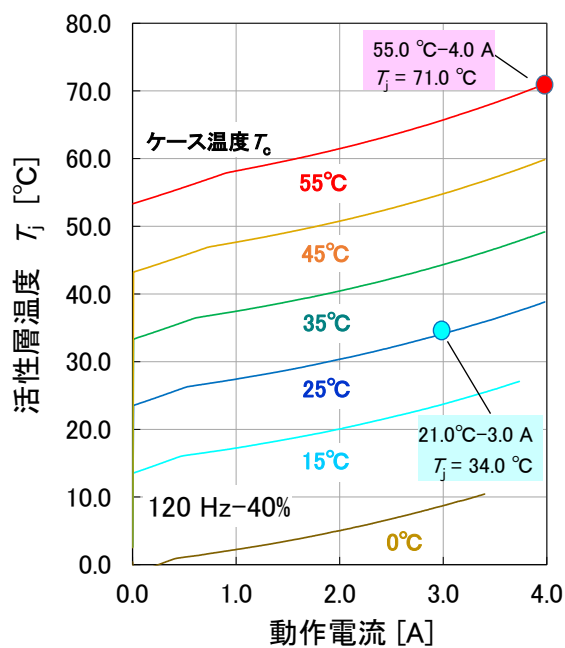
2.2.4 パルス動作時の熱シミュレーションの精度検証

次に、熱シミュレーションによって求めたパルス動作時の活性層温度の妥当性について検討を行った。図 2-15 は、 $75\text{ }\mu\text{m}$ -2 エミッタ LD を繰り返し周波数 120 Hz 、デューティ比 40% のパルスで駆動したときの光出力特性の実測結果と、熱シミュレーションにより推定した活性層温度である。活性層温度は 2.2.3 項の方法によって求めている。光出力値は、パルス中央時間の瞬時光出力である。また、図 2-16 は、同じ LD を CW 駆動したときの光出力特性の実測結果と、熱シミュレーションにより推定した活性層温度である。

図 2-15(a)より、ケース温度 $T_c = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、パルス 4.0 A 動作時の光出力の測定値は 2.5 W である(赤丸)。この動作点の活性層温度 T_j は、図 2-15(b)の熱シミュレーション結果の赤丸の位置、すなわち $71.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ と推定される。次に、図 2-16(a)に示す CW 動作の場合に、 4.0 A 動作時の光出力が 2.5 W になるのは、図中の赤丸の動作点、すなわち $T_c = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時である。この時の活性層温度 T_j を CW 動作における熱シミュレーションによって求めると、図 2-16(b)の赤丸で示すように $71.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ となる。すなわち、パルス動作および CW 動作の場合の双方で、活性層温度-動作電流-光出力の 3 者の関係が一致していることになる。また、青丸で示す動作点をはじめ、あらゆる動作点において同様の結果が得られていることを確認した。これは、光出力が動作電流と活性層温度で一意に決まるという物理的には当然の結果であり、パルス、CW 動作の場合の双方で活性層温度が正確に求められているという証拠となるものである。2.2.3 項で示したように、CW 動作とパルス動作の場合では熱が広がる領域が異なるために、異なる部位の熱抵抗値を求めているが、いずれにおいても、熱シミュレーションによって正確な熱抵抗値が求められていると言える。

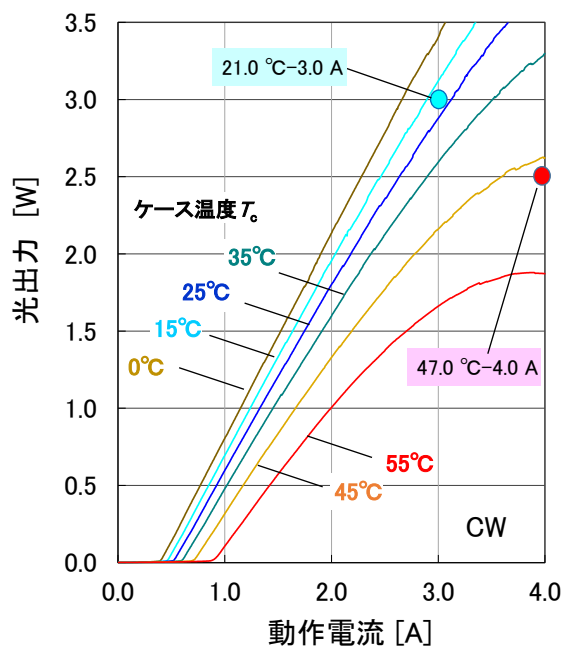


(a) 光出力特性 (実測)

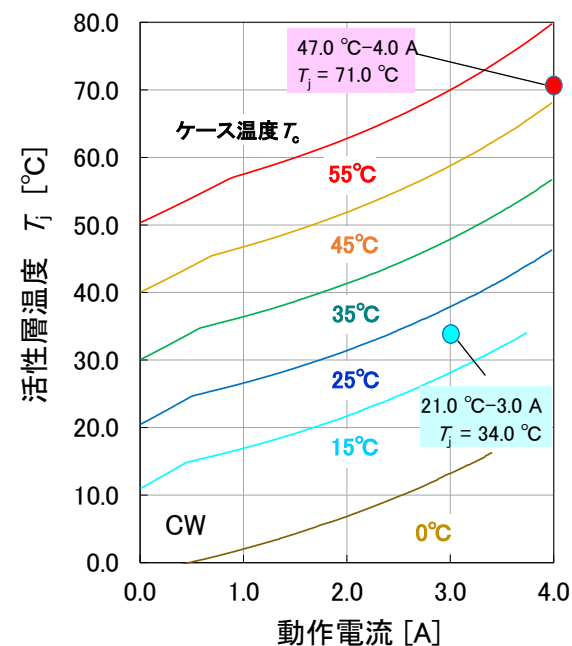


(b) 活性層温度 (熱シミュレーション)

図 2-15 パルス動作時の光出力特性と活性層温度 T_j の求積結果 (75 μm -2 エミッタ LD)



(a) 光出力特性 (実測)



(b) 活性層温度 (熱シミュレーション)

図 2-16 CW 動作時の光出力特性と活性層温度 T_j の求積結果 (75 μm -2 エミッタ LD)

2.3 活性層温度一定時の光出力特性

前節までの議論から、熱シミュレーションを用いることで、赤色 LD 動作時の活性層温度を正確に求めることが出来ることが分かった。ここで、エミッタ幅や、LD の層構造、不純物濃度、共振器長、前・後端面反射率などが固定されれば、LD の光出力は活性層温度と電流値で一意に決まる。したがって、活性層温度、電流値、光出力の関係があらかじめ分かっているならば、パッケージ構造を変更した場合や、あるエミッタ構造を 1 つの LD チップに複数個配置した場合の光出力特性を推定することが可能になるはずである。ここで、活性層温度、電流値、光出力の関係は、図 2-8 のような活性層温度一定時の光出力特性そのものである。したがって、2.2.2 項に示した方法を用いることで、光出力特性の推定が可能になると考えられる。

このような活性層温度一定時の光出力特性を求める方法として、低デューティー比、短パルス駆動によって、活性層温度の上昇を抑制しつつ光出力を実験的に測定する方法がある。この方法が可能かどうかを以下で検討する。図 2-17 は、ホルダ温度 $T_h = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時に、 $70\text{ }\mu\text{m}$ -1 エミッタ LD に対し立ち上がり時間 0、ピーク電流値 2.0 A のパルスを印加したときの活性層温度をシミュレーションした結果である。この結果から、 T_j の上昇を活性層温度の誤差許容値である $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下にするには、100 ns 以下のパルス幅を持つパルスを印加する必要があることが分かる。しかし、数 A レベルの電流を印加出来る電源で、このような短幅かつ矩形に近いパルスを得ることは容易ではない。また、このようなパルス幅を持つパルスにおいて、光出力を測定するための平坦領域を得るためには、大体 10 ns 以下のパルス立ち上がり時間が必要となるが、このような場合、緩和振動による光出力変動が大きくなると予想される。

以上のことから、実験的手法によって活性層温度を求めることは容易ではないと考えられることから、熱シミュレーションを用いる方法は、活性層温度一定時の光出力特性を得る方法として非常に有用と考えられる。

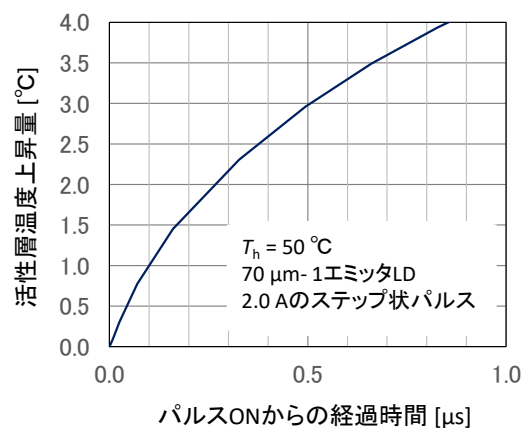


図 2-17 2.0A ステップ状パルス印加時の活性層温度上昇量（過渡応答）

2.4 熱シミュレーションによる光出力特性の予測

次に、図 2-8 のような活性層温度一定時の光出力特性を用いて、エミッタ構造やパッケージ構造を変更したときの光出力特性を推定する方法について説明する。ある特定の構造を持つ LD の光出力 P_o は、動作電流 I_{op} と活性層温度 T_j が決まれば一意に決まるものであり、図 2-8 はこの関係を表すものである。この関係を、関数を表す f を用いて式 (2-4) のように表すことにする。

$$P_o = f(I_{op}, T_j) \quad \text{式 (2-4)}$$

ここで、活性層温度 T_j は式 (2-1) で、発熱量 W_{ne} は式 (2-2) で表されることから、式 (2-4) は式 (2-5) のように表現される。ここで、 β は全光出力に対する前端面光出力の割合であり、前端面反射率を R_f 、後端面反射率を R_r としたときに式 (2-6) で表すことができる。

$$P_o = f(I_{op}, \theta_{jh} \cdot (I_{op} \cdot V_{op} - P_o / \beta) + T_h) \quad \text{式 (2-5)}$$

$$\beta = \frac{1}{\left(1 + \frac{1-R_r}{1-R_f} \sqrt{\frac{R_f}{R_r}}\right)} \quad \text{式 (2-6)}$$

式 (2-4) および式 (2-5) から分かるように、 P_o は I_{op} と T_j によって決まるが、その活性層温度を決定する発熱量 W_{ne} は P_o によって変化する。よって、式 (2-5) を、発熱量や光出力に対し矛盾しないよう自己無撞着に解く必要がある。実際には、

- ①ある I_{op} に対し適当な P_o を仮定
- ②その P_o を用いて式 (2-2) より W_{ne} を求める
- ③その W_{ne} と θ_{jh} を用いて式 (2-1) より T_j を求める
- ④その T_j と I_{op} から P_o を求める

のプロセスで②の P_o と④の P_o が一致するまで②から④を繰り返す、いわゆるニュートン法によって P_o を求めることになる。

図 2-18 は、LD ホルダ温度 T_h を変化させたときの 70 μm -1 エミッタ LD の光出力の実測結果である。図 2-19 は、これを元に 2.2.2 項に示した方法によって T_j 一定の光出力特性を算出したものである。図 2-19 の関係と、熱シミュレーションによって得られた 70 μm -2 エミッタ LD の熱抵抗値から光出力特性を予測することが出来る。図 2-20 に、この予測結果と光出力の実測結果の比較を示す。図中の温度は LD ホルダ温度 T_h である。この予測結果は、1 エミッタ LD とは構造や

熱抵抗値が大きく異なる2エミッタLDの光出力特性を、1エミッタLDの実測値から予測したものであるが、熱シミュレーション値と実測値の差異は、LDホルダ温度で最大1~2℃程度、光出力値で最大4%程度と、光出力値予測としては十分な精度となっている。別の構造における光出力予測結果については、3.6.1項や3.6.2項でも議論する。

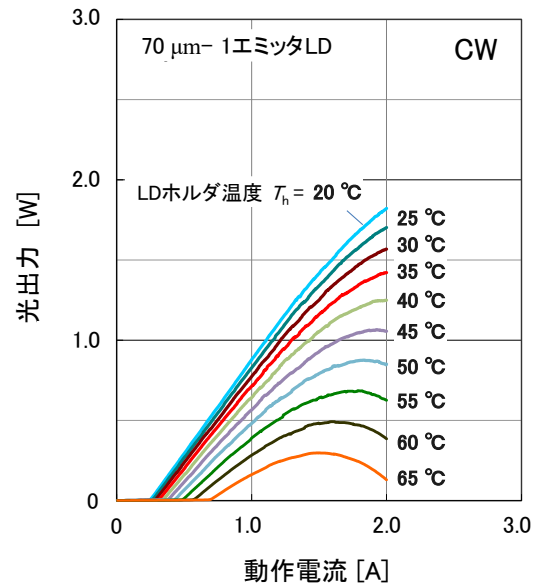


図 2-18 光出力特性実測結果（70 μm- 1 エミッタ LD）

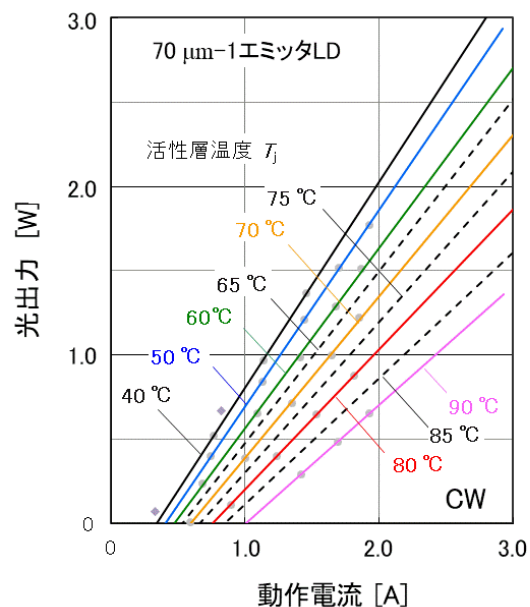


図 2-19 活性層温度 T_j が一定の場合の光出力特性（70 μm- 1 エミッタ LD）

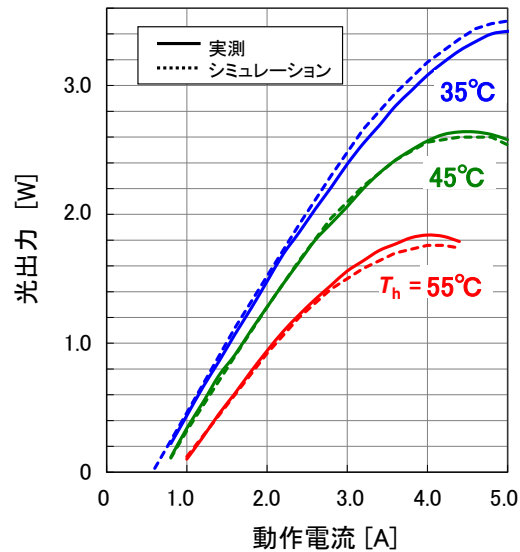


図 2-20 熱シミュレーションと実測の光出力特性比較 (70 μm -2 エミッタ LD)

2.5 まとめ

本章では、赤色 LD の前端面温度や活性層温度を推定するための熱シミュレーションモデルを検討し、CW 動作とパルス動作の双方の場合について熱シミュレーションの手法を確立した。この熱シミュレーションを用いて、活性層温度が一定の場合の光出力曲線を求めた結果、すべての活性層温度において、スロープ効率が一定になることが示された。これは、熱シミュレーションによって活性層温度が正確に求められていることを示唆している。また、熱シミュレーションによってパルス動作時の活性層温度を求めた結果、CW 動作とパルス動作の双方で、動作電流、活性層温度、光出力の関係が一致した。これにより、パルス動作の場合も、正確な熱シミュレーションが実現できていることが示された。

以上の検討によって、システムに搭載された赤色 LD の活性層とその近傍の温度を、高い精度で求めることができるようになったといえる。これにより、赤色 LD に関する様々な物理現象を、温度の観点から正確に議論出来ることが期待される。

加えて、1 エミッタ LD の光出力特性を元に、マルチエミッタ LD の光出力特性を予測する方法を検討した結果、熱シミュレーションによってマルチエミッタ LD の光出力特性を高い精度で予測可能であることが実証された。

第3章：赤色 LD の光出力特性の改善

3.1 はじめに

1.6.1 項に示したように、赤色 LD の高出力化を阻害する要因として、しきい電流値の温度依存性が大きいことと、高出力領域における熱飽和が顕著であることが挙げられる。この原因が電子オーバーフローであることは、以前から知られており⁽⁷⁵⁾、発振波長を短波長化すると光出力特性が大幅に劣化する⁽²⁴⁾ことなどからも明らかである。GaAs 基板に整合する AlGaInP/GaAs 系材料の中で最大のバンドギャップを持つ AlInP 3 元材料の高品質・高ドープ結晶成長技術が開発され、p 型クラッド層に採用されることになった^(52,78)。また、しきい電流値低減のため、活性層の結晶品質向上や活性層構造の最適化なども進められてきた。一方で、光源に対する要求もより高くなってきており、一段の光出力特性の改善が望まれている。現状では、AlInP のバンドギャップなどの材料物性の限界が特性を制約する状況となっており、特性改善に残された余地はそれほど大きくないと考えられるが、本章では、さらに電子オーバーフローを抑制する方法について議論する。

ここで、赤色 LD の光出力特性の温度依存性が大きいことは、逆にエミッタ領域の活性層温度を下げることによって光出力特性を大きく改善出来るということでもある。活性層温度を下げる 1 つの方法としては、図 3-1(a)のように、エミッタ幅を大きくすることで放熱経路の幅を広げ、エミッタ領域の活性層温度を下げる可能性がある。しかしながら、この場合、熱抵抗は小さくなるものの、しきい電流値が増大することで発熱量が増大することに注意が必要である。ここで、図 3-1(b)に示すように、エミッタの全幅を変えずに 2 つに分割した構造、つまり 75 μm -2 エミッタ LD に変更すれば、エミッタ全幅を抑えつつ放熱経路の幅を広げることができるため、温度上昇が抑制できると考えられる。

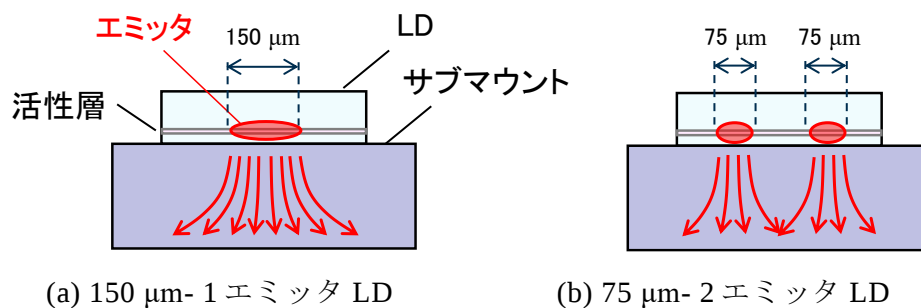


図 3-1 エミッタ数増大による熱抵抗低減

そこで本研究では、1 チップに複数のエミッタを配置したマルチエミッタ構造を採用することで、動作時の活性層温度低減を検討する。同様の構造として LD バーと呼ばれる構造も存在するが、エミッタ間隔が $300\text{ }\mu\text{m}$ 以上と比較的広く、1 チップに1つのエミッタをもつ赤色 LD を多数個並べたとの考え方に近いものである。一方、本研究にて取り扱うマルチエミッタ LD は、 $\phi 9.0\text{ mm}$ ステムなどの比較的小さなパッケージに収めるため、幅 $400\text{ }\mu\text{m}$ 程度のチップに $200\text{ }\mu\text{m}$ 以下の間隔で複数個のエミッタを搭載したものである。エミッタ間隔が小さいため、LD バーに比べてエミッタ間の熱干渉が大きいと、エミッタ数、エミッタ幅、エミッタ間隔が光出力や特性に与える影響が非常に大きくなる。

本章では、このマルチエミッタ LD の最適なエミッタ数、エミッタ幅、エミッタ間隔を、光出力および信頼性の観点から決定する。さらに、設計した赤色 LD を実際に作製し、その光出力改善効果を評価する。赤色 LD の構造設計には、第 2 章で導出した熱シミュレーションおよび光出力特性シミュレーションを用い、これによって開発の効率化が可能であることを示す。

3.2 光出力飽和の抑制方法

電子オーバーフローを抑制する方法として、図 3-2 に示すように、発振時のウエル層内キャリア密度、すなわちしきい値キャリア密度を下げることで擬フェルミレベルを下げる方法がある。擬フェルミレベルを下げることにより、p 型クラッド層の伝導帯障壁を乗り越えるようなエネルギーをもつ電子の密度が小さくなり、電子オーバーフロー量が低減する。

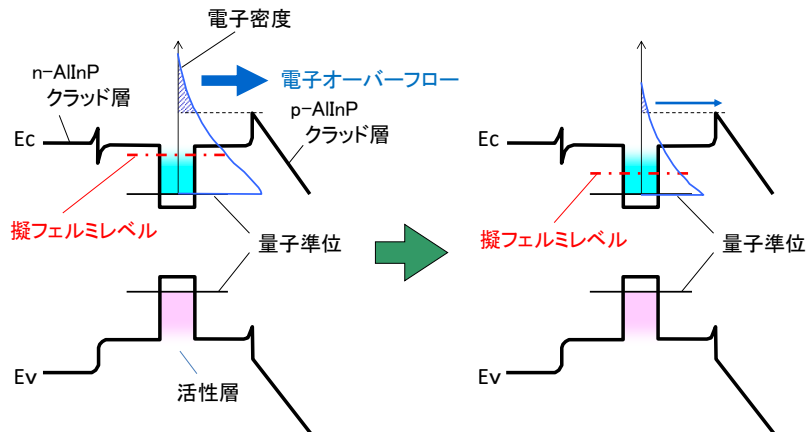


図 3-2 ウエル内キャリア密度低減による電子オーバーフロー抑制

しきい値キャリア密度を低減する方法としては、ウエル層への光閉じ込め係数 (Γ) を増大する方法がある。これについて、図 3-3 を用いて説明する。図中の黒色の曲線は、ウエル層におけ

るキャリア密度とモード利得 ($\Gamma \cdot g$) の関係を模式的に表したものである。 g はウエル層の媒質利得である。活性層内のキャリア密度が増加するとモード利得が増加するが、このモード利得が全光損失、つまり内部損失とミラー損失の和に一致するキャリア密度 (しきい値キャリア密度、図中 n_{th}) で発振する。ここで、ウエル層への光閉じ込め係数を Γ から Γ' に増大させると、モード利得は図中の赤色の曲線のように増大するため、しきい値キャリア密度は n_{th}' に減少する。その結果、電子の擬フェルミ準位が低下し、電子オーバーフローの抑制が期待できる。ただし、光閉じ込め係数を大きくすると、価電子帯間吸収など、ウエル層で発生する光損失が大きくなる。また、エミッタ領域横の領域、つまり電流密度が小さいために光損失が発生している領域への光閉じ込め量も増大することになる。これらは、しきい値キャリア密度を高くする原因となるため、光閉じ込め係数には最適値が存在することになる。

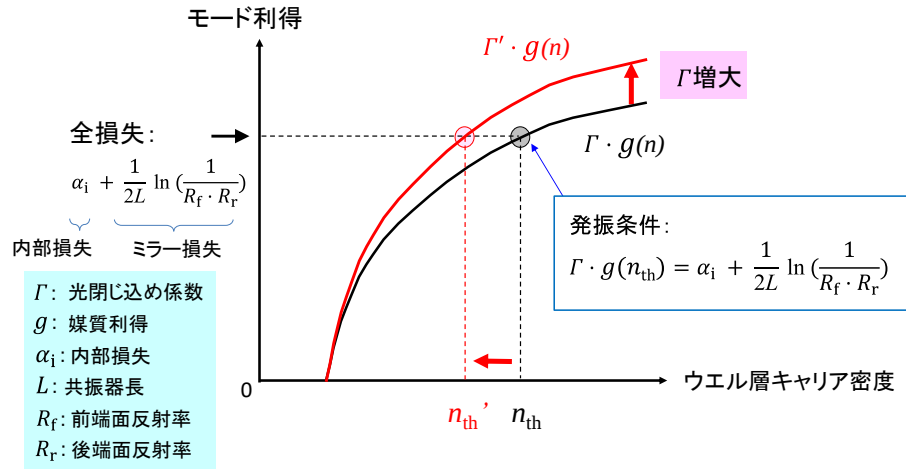


図 3-3 光閉じ込め量増大よりしきい値キャリア密度の低減

本研究で扱う赤色 LD は、エミッタ幅が $40 \mu\text{m}$ 以上のブロードエリア構造を持つため、エミッタ領域への水平方向の光閉じ込め量はほぼ 1 となっている。そこで、 Γ を大きくするためには、LD の結晶層に垂直な方向の光閉じ込め量を大きくすることが必要である。垂直方向の光閉じ込め量を大きくする方法としては、ウエル層の上下に形成している光ガイド層の材料組成や層厚を調整することで、LD の結晶層に垂直な方向の近視野像 (Near Field Pattern, NFP) をウエル層付近に集中させる方法と、ウエル層厚そのものを大きくする方法がある。

ここで、本研究の対象とした赤色 LD のウエル層構造は、引張り歪をもつ約 10nm の GaInP 材料の単一量子井戸となっている。ウエル厚を大きくした場合は、量子準位位置が低エネルギー側にシフトすることによって発振波長が長波長化するので、これを補填するために、ウエル層を AlGaInP 四元混晶にすることでバンドギャップを大きくするか、引張り歪量を大きくする必要がある。しかしながら、前者は、Al 材料の存在が COMD レベルを低下させる可能性が高く^(59,60),

後者は臨界膜厚を超えることによる結晶性悪化を引き起こすため、適用は非常に困難である。一方、ウェル層厚を小さくすれば、歪量を小さくしても短波長化できることから、このような量子井戸層を複数個配置することも考えられる。しかし、ウェル厚を小さくした場合、ライトホールの有効質量がヘビーホールの有効質量よりも小さいことによって、元々ヘビーホールよりも低い位置にあったライトホールの量子準位が、ヘビーホールの量子準位に近づくこととなる。すると、両者のバンドミキシングがより顕著となることでライトホールの状態密度が増大し、しきい値電流が増大することになる。これらのことを考慮した結果、本研究では光ガイド層を変更することでNFPを調整し、光閉じ込め係数 Γ を大きくすることにした。

図 3-4 は、 $40\text{ }\mu\text{m}$ -1 エミッタ LD の Γ が 3.83 % および 4.01 % になるように作製、 $\phi 5.6\text{ mm}$ パッケージに搭載し CW 駆動したときの光出力特性の実測結果である。光出力特性の温度依存性の実測結果である。 Γ の増大量はわずかであるが、しきい電流値と最大光出力が大きく改善している。特に高温動作時の改善効果が大きくなった理由としては、利得飽和が顕著な領域（図 3-3 の傾きが大きい領域）でモード利得が増大することで、しきい値キャリア密度が大きく低減したこと、およびしきい値低減による発熱量低下の効果が、温度依存性の大きな領域で顕著になったことが挙げられる。

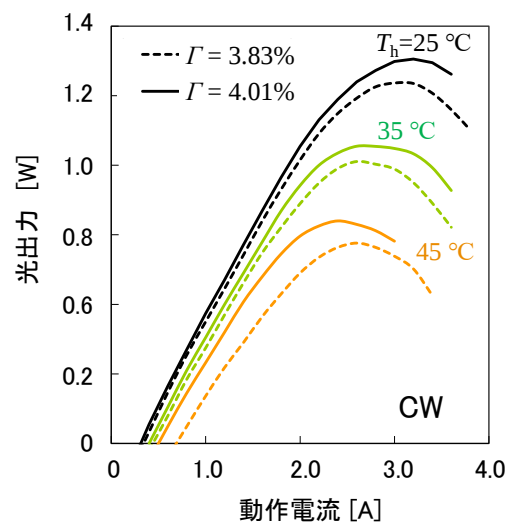


図 3-4 異なる Γ を持つ LD の光出力特性測定結果

3.3 エミッタ幅と光出力特性の関係

図 3-5 は、様々なエミッタ幅を持つ LD の光出力の実測結果から、2.2.2 項に示した熱シミュレーションを用いた方法によって求めた活性層温度 T_j と光出力特性の関係である。さらに、この結果から得られたスロープ効率の活性層温度依存性を図 3-6 に示す。いずれの温度においてもスロ

ーブ効率はエミッタ幅が 40 μm から 70 μm に広がるにつれて大きくなり、70 μm を越えたあたりから若干低下する傾向が見られた。

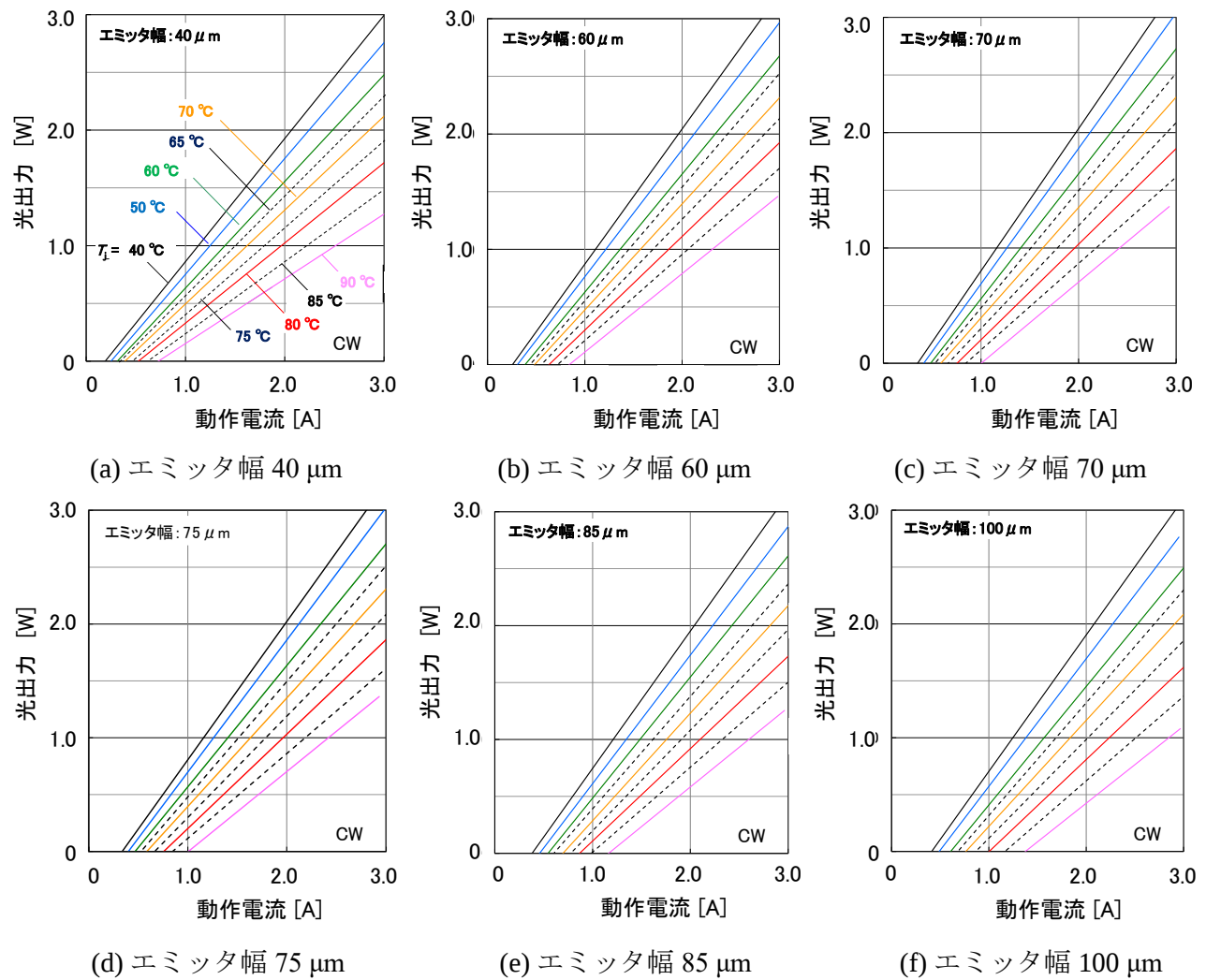


図 3-5 活性層温度 T_j が一定の場合の光出力特性 (エミッタ幅 40, 60, 70, 75, 85, 100 μm)

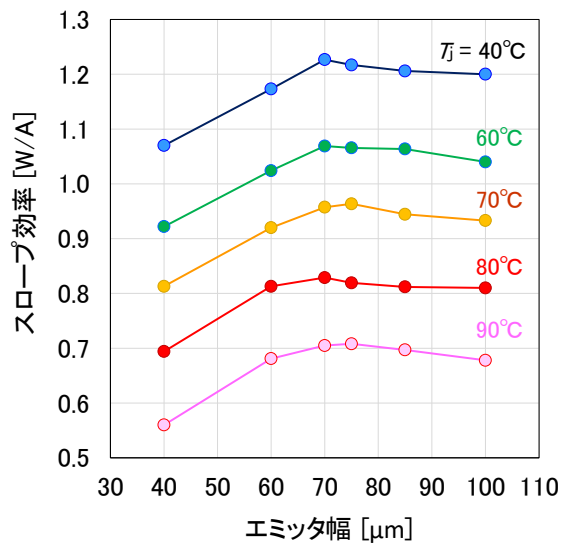


図 3-6 スロープ効率のエミッタ幅依存性

このスロープ効率のエミッタ幅依存性は、光損失がエミッタ幅によって変化することが原因と考えられる。このことを確認するために、各エミッタ幅においてモード次数が 0, 3, 6 次の場合の NFP のシミュレーションを実施した。まず最初に、屈折率を求めるため、活性層位置横方向の温度分布を熱シミュレーションによって求めた。 $\phi 9.0 \text{ mm}$ ステムに搭載した $60 \text{ } \mu\text{m}$ -1 エミッタ LD を $T_c = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$, 2.0 W で駆動した時の温度分布を図 3-7 中の赤線を示す。

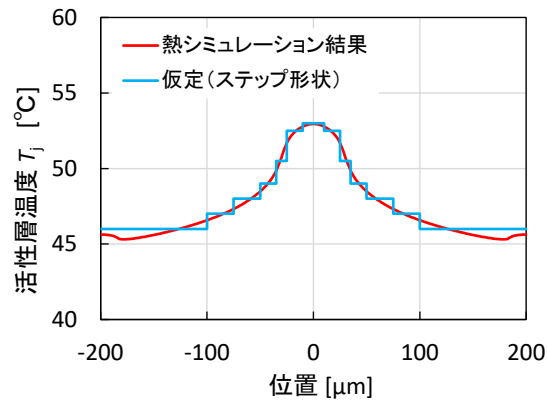


図 3-7 活性層位置横方向の熱分布と NFP シミュレーションで使した熱分布
($60 \text{ } \mu\text{m}$ -1 エミッタ LD)

これを元に、図 3-7 中の青線に示すようなステップ状の温度分布を仮定した。図 3-8 は、LD を構成する各材料の屈折率とその温度依存性⁽¹⁰⁷⁾から、各温度領域における実効屈折率を求めた結果である。このステップ形状の実効屈折率分布が横方向の光分布を決定するという、いわゆる等価屈折率近似⁽¹⁰⁸⁾の下で、転送行列法によって横方向の NFP を求めた。

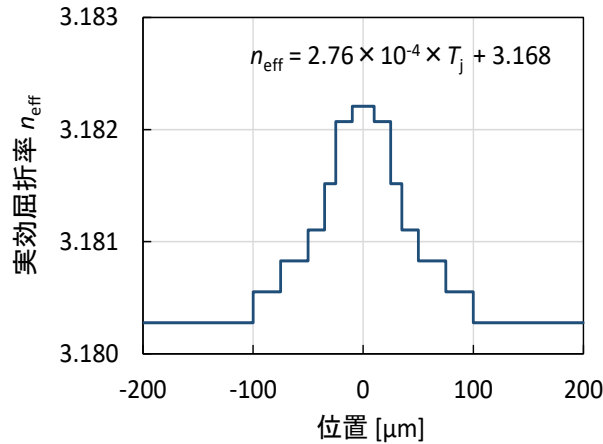


図 3-8 NFP シミュレーションで使した屈折率分布 (60 μm- 1 エミッタ LD)

エミッタ幅が 40 および 60 μm の場合におけるシミュレーション例を図 3-9 に示す。図の横軸は、エミッタの中心位置を 0 位置としており、縦軸は各次数モードの NFP の最大値で規格化している。ここで、光損失は活性層の電流密度が小さい領域、つまりエミッタ横の領域で発生するが、本検討では図 3-10 に示すように、活性層のうちエミッタ領域内、つまり絶縁膜開口部の下にある領域を光利得領域、それ以外の領域を光損失領域と仮定した。

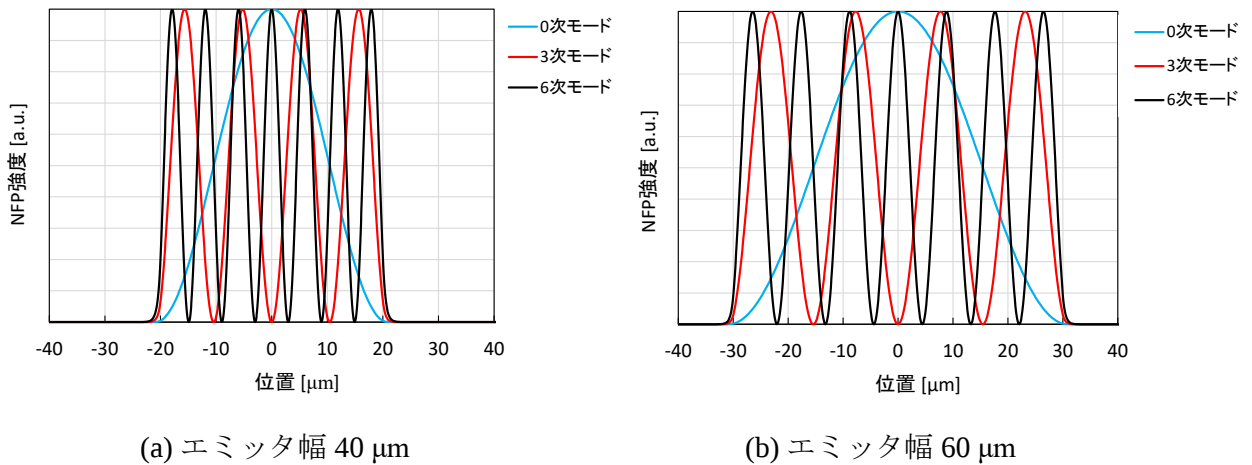


図 3-9 横モードの NFP のシミュレーション例

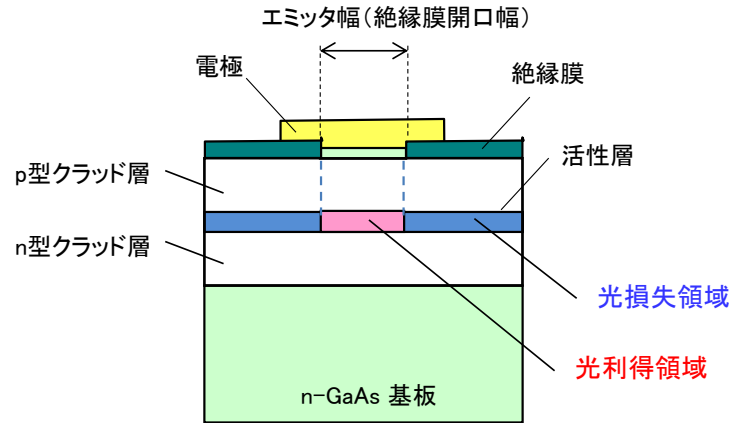


図 3-10 光利得領域と光損失領域 の定義

図 3-11 に、この光損失領域にある光の割合を計算した結果を示す。全ての横モード次数でエミッタ幅が狭くなるほど光損失領域の光閉じ込め量が大きくなる。このことから、エミッタ幅が狭い場合にスロープ効率が小さくなるのは、光損失領域の光閉じ込め量が大きくなることによる光損失が原因であることが分かる。また、図 3-11 の結果では、エミッタ幅が $60\ \mu\text{m}$ から $40\ \mu\text{m}$ へと狭くなるにつれて急激に光損失が大きくなっているが、これは図 3-6 において、エミッタ幅が $60\ \mu\text{m}$ から $40\ \mu\text{m}$ になるにつれて、スロープ効率の低下が顕著となっていることに合致している。

また、図 3-6 のように、エミッタ幅が $70\ \mu\text{m}$ 以上の場合には、エミッタ幅が広いほどスロープ効率が下がる傾向となっている。これは、エミッタ幅が広いほど、横高次モードのカットオフ条件が緩くなることで、高い次数の横モード、すなわち図 3-11 に示される光損失の大きいモードの割合が相対的に大きくなることが原因と考えられる。

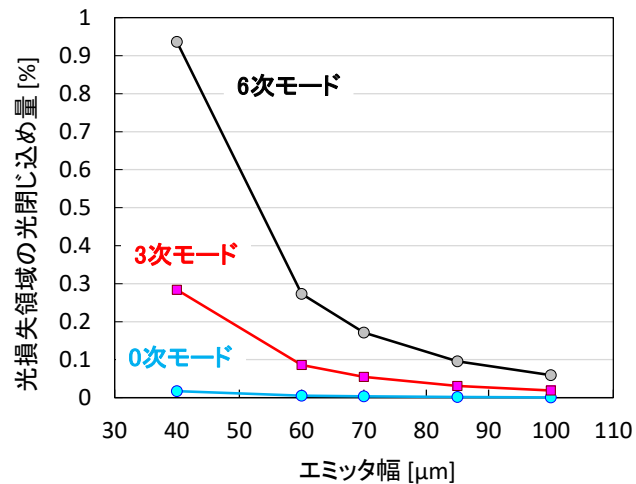


図 3-11 光損失領域への光閉じ込め量

図 3-12 に、85 μm - 1 エミッタ LD の FFP 測定結果を示す。FFP はレーザー光出射位置を中心軸として、LD の活性層面に対し平行および垂直方向に回転するアームの先端位置に PD を取り付けることで測定した。図 3-11 のとおり、光損失が最小となる横モードは 0 次モードであるため、本来であればしきい利得の低い 0 次モードのみで発振するはずである。しかしながら、LD の活性層面に垂直な方向の FFP 形状 (FFP $\perp$) は単峰性形状であるものの、水平方向の FFP 形状 (FFP $\parallel$) は単峰性となっておらず、横高次モードに起因する多数のリップルが存在している。

図 3-13 は、対物レンズを用いて前端面における光強度を測定することで、活性層面に水平な方向の NFP (NFP $\parallel$) を測定した結果である。NFP $\parallel$ も 0 次モードの場合のガウシアン形状とはならず、高次モードが含まれていることが分かる。図 3-14 は、各高次モードの光電界を表 3-1 に示す強度比で、お互いの位相差 0 にて足し合わせた時の NFP $\parallel$ のシミュレーション結果と、図 3-13 に示した NFP $\parallel$ の実測結果を比較したものである。各モードの強度比と位相の組み合わせは無限にあり、それぞれの強度と位相により NFP $\parallel$ 形状が変化するため、シミュレーション結果を実測結果に完全に合わせることは不可能であるが、高次モード起因の NFP のリップル位置はある程度再現されていることから、横モードに多数の高次モードが含まれていることが分かる。

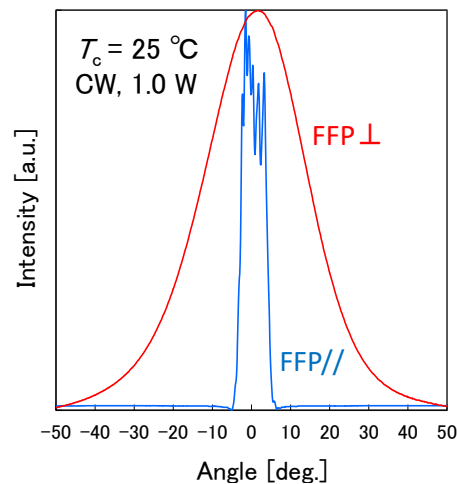


図 3-12 FFP $\perp$ ，FFP $\parallel$ 測定結果 (85 μm - 1 エミッタ LD)

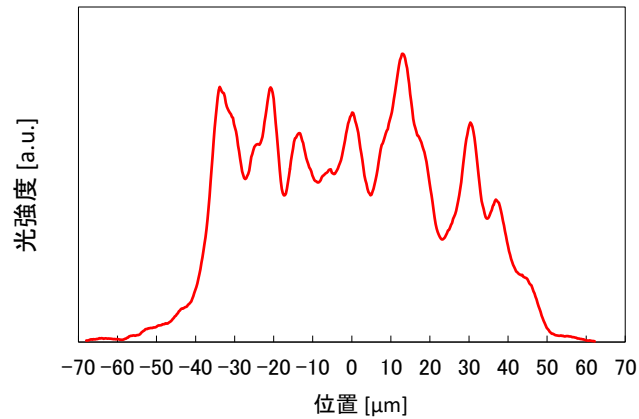


図 3-13 NFP//測定結果 (85 μm -1 エミッタ LD)

表 3-1 NFP//シミュレーションでの各高次モード比

横モード	相対光電界強度
0次	50
1次	3
2次	1
4次	6
10次	2
16次	6

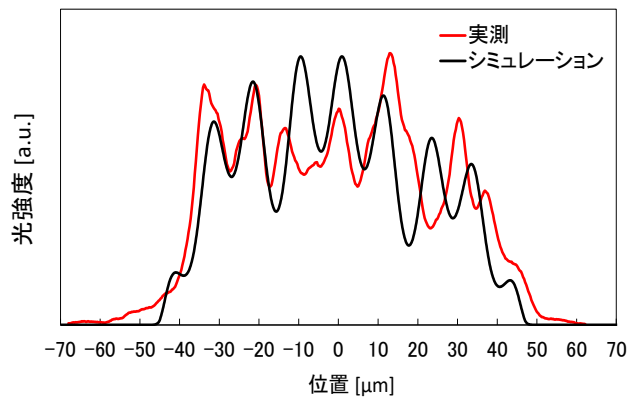


図 3-14 NFP//実測結果とシミュレーション結果の比較

次に、発振モードに横高次モードが含まれる原因について検討する。図 3-15(1a)は、0 次モードの光分布を表した模式図である。0 次モードのみで発振した場合、光強度が大きいエミッタ中央部で誘導放出が顕著となる。その結果、ウェル内のキャリア濃度が低下する、いわゆる空間的

ホールバーニングによって、エミッタ中央部のキャリア密度が低下する（図 3-15(1b)）。すると図 3-15(1c)のように、光強度が強いエミッタ中央位置の光利得が小さくなるため、0 次モードに対するモード利得が小さくなる。その結果、0 次モードのみの発振は、エミッタ横領域での光損失が小さいものの、モード利得が小さくなることから、最も発振しやすい状態ではなくなると考えられる。このようなモード利得の低下は、光密度が他よりも高い領域が存在することが原因であることから、この問題が最小化するのは図 3-15(2a)のように、矩形の NFP を持つ場合であると考えられる。この場合のキャリア密度分布は図 3-15(2b)のように、元々の台形上の分布から、図 3-15(2a)のような矩形形状を差し引いたような形となる。また、利得分布は図 3-15(2c)のように、光強度が大きいところのみで利得が低下する問題を最小化することができる。図 3-9 に示したように、横高次モード次数が高いほど NFP//パターンのリップルのピーク間隔が小さくなるため、高次モードを多く含むほど、NFP//が矩形に近づいていく。以上のことから、ブロードエリア型 LD では、モード利得が最大となる矩形の NFP//形状に近い状態、つまり高次モードが足しあわされた状態で発振するものと考えられる。

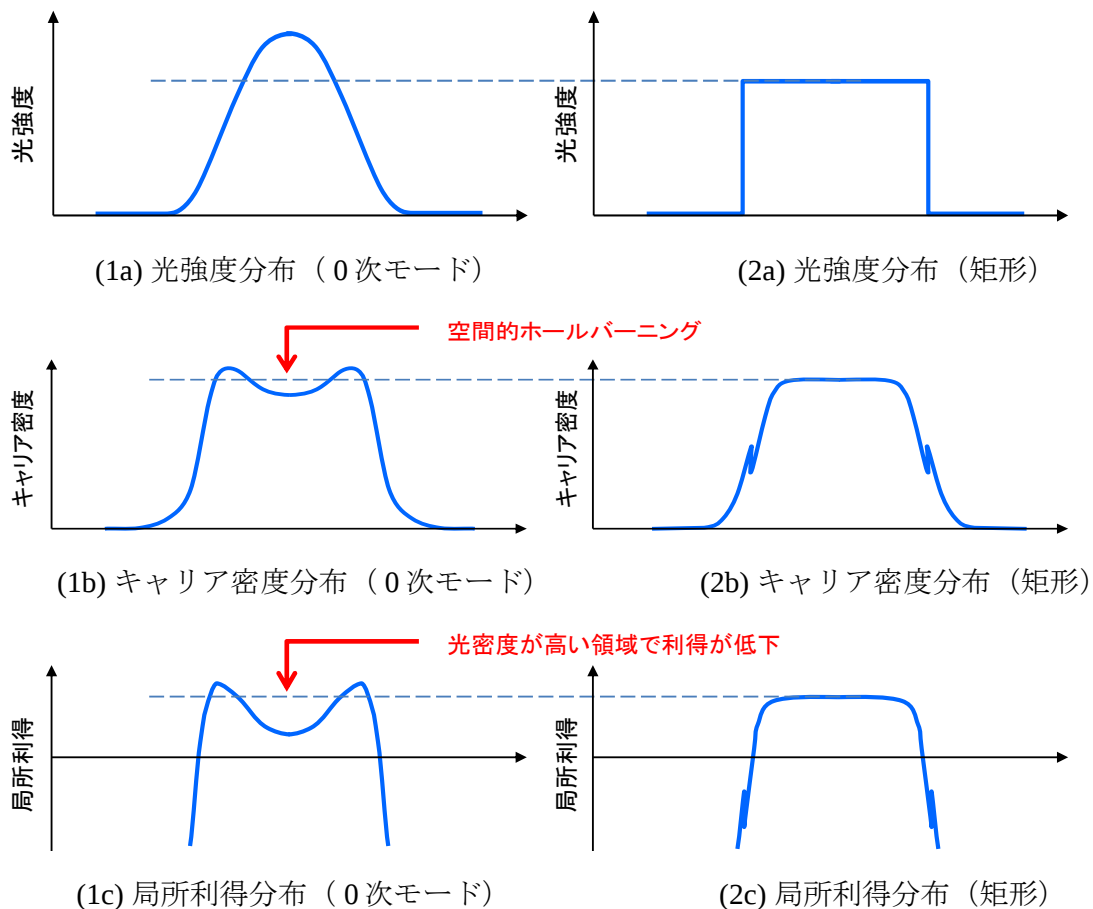


図 3-15 横モード形状とキャリア密度分布・局所利得分布の関係

3.4 エミッタ幅と熱抵抗値, しきい電流値の関係

次に, マルチエミッタ化による熱抵抗低減効果を確認するため, 1チップにエミッタ数が 1, 2, および3個搭載されたマルチエミッタ LD について, エミッタ幅と熱抵抗値の関係を求めた。例として, エミッタ幅が $60\ \mu\text{m}$ の場合の 1, 2, および3エミッタ LD の構造の模式図を, それぞれ図 3-16(a), (b), (c)に示す。LD チップの幅はいずれも $400\ \mu\text{m}$ とした。2および3エミッタ LD では, ディスプレイ装置の光学系への結合を考慮し, エミッタの全領域が $270\ \mu\text{m}$ の幅内に入るような構造とした。熱シミュレーションに用いた形状モデルは, 赤色 LD チップ, 半田, サブマウント, $\phi 9.0\ \text{mm}$ TO-CAN を含めたもので, 表 2-1 のパラメータを用いて実施した。 $60\ \mu\text{m}$ -2エミッタ LD の場合の, 前端面側から見た LD 素子近傍の構造を図 3-17 に示す。前端面近傍を横から見た構造は図 2-2(b)と同じである。活性層面と水平方向の NFP 形状は図 3-13 の通り均一ではないことから, 光吸収による発熱は均一な分布とはならない。しかしながら, 電流密度がエミッタ内ではほぼ一定であることから, 非発光再結合やジュール熱による発熱はエミッタ内ではほぼ均一と考えられること, および横方向への熱の拡散があることから, エミッタ内では発熱密度は一定と仮定することにした。

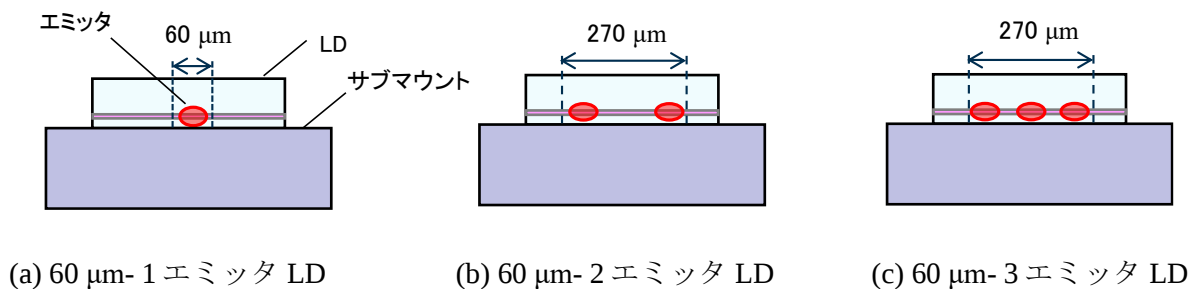


図 3-16 1, 2, 3 エミッタ LD の構造模式図

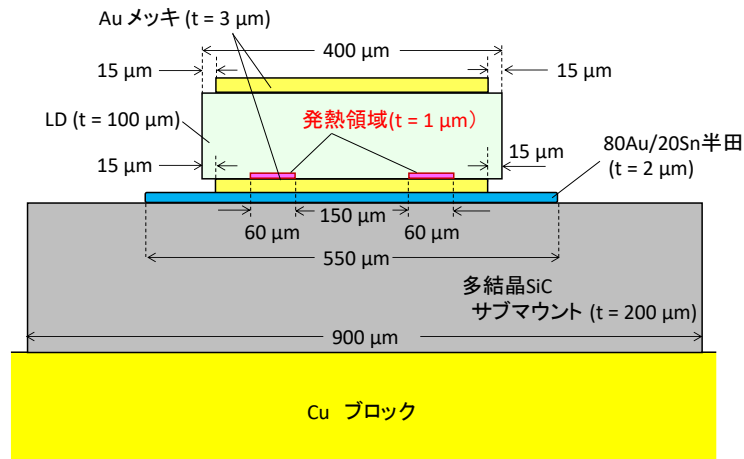


図 3-17 前端面側から見た LD，サブマウント，ブロックの構造（60 μm - 2 エミッタ LD）

図 3-18 に，ステム底面の T_c 測定位置（図 2-3）と活性層間の熱抵抗値を，熱シミュレーションによって求めた結果を示す。図 3-18 より，エミッタ全幅を同じとした場合，2 および 3 エミッタ LD では，1 エミッタ LD に対して熱抵抗値を大きく低減できる。これは，エミッタ領域を広げることによって，エミッタで発生した熱がサブマウントを伝達する際の熱流の幅が大きくなるため，特に活性層近傍の温度勾配が小さくなることによるものである。一方で，2 エミッタから 3 エミッタにすることによる熱抵抗値の低減効果は比較的小さい。特に，エミッタ全幅が大きくなり，270 μm 幅内においてエミッタ領域が占める割合が高くなるにつれて，双方の熱抵抗値は漸近していく。

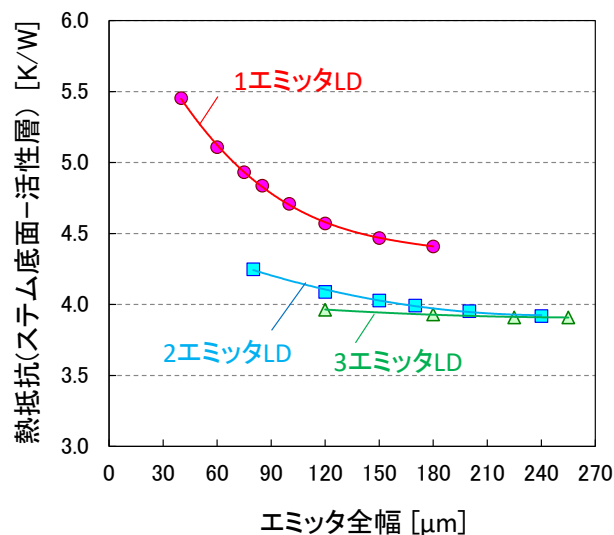


図 3-18 エミッタ数，エミッタ幅と熱抵抗値の関係

次に、エミッタ幅としきい電流値の関係について議論する。ケース温度 $T_c = 25^\circ\text{C}$ における 1 エミッタ LD のしきい電流値は、図 3-19 のように、エミッタ幅にほぼ比例する。これは、しきい値キャリア密度がエミッタ幅によらずほぼ一定であることを意味する。図 3-3 のとおり、しきい値キャリア密度は、活性層への光閉じ込め量と光損失で決まるため、この両者を用いてこの理由を説明する。

図 3-11 から、エミッタ幅が $40\ \mu\text{m}$ 以上の場合では、LD の活性層に平行な方向の光閉じ込め量は 100 % に近くなると考えられる。また、LD の活性層に垂直な方向の光閉じ込め量は、層構造に依存するものの、エミッタ幅の影響はほとんど無い。したがって、活性層への光閉じ込め係数はエミッタ幅に対しほぼ同じとなる。また、これにより、活性層のみならず他の層への光閉じ込め係数も変化しないため、光損失もほぼ同じとなる、その結果、しきい値キャリア密度はエミッタ幅にあまり依存しないことになる。実際には、図 3-19 のように、エミッタ幅が $60\ \mu\text{m}$ よりも小さい場合では、光損失が若干増大することによって、しきい値がわずかに高くなっている。

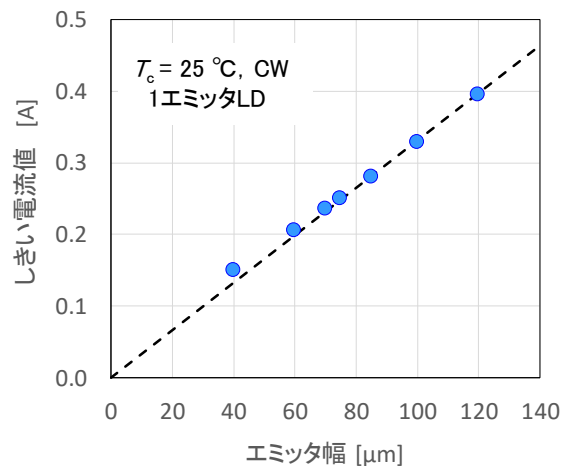


図 3-19 エミッタ幅としきい電流値の関係（実測結果）

3.5 マルチエミッタ LD の構造設計

3.5.1 連続動作（CW）品の構造設計

本研究では、CW 動作における赤色 LD の光出力目標値を $2.0\ \text{W}$ 以上とした。この場合、MTTF(COMD)が 20,000 時間以上となるのに必要なエミッタ全幅は、 $40\ \mu\text{m}$ -1 エミッタ LD を、CW 駆動 $1.3\ \text{W}$ で動作させた場合の MTTF(COMD)が 1,800 時間であることと式 (1-1) より、 $131\ \mu\text{m}$ 以上 ($= \sqrt[3.2]{20000/1800} [\text{hr}] \times 2.0/1.3 [\text{W}] \times 40 [\mu\text{m}]$) と見積もられる。この結果に信頼

性に対する裕度を加え、赤色 LD のエミッタ全幅を 150 μm 以上にすることにした。そこで、1 エミッタ LD でエミッタ幅を 150 μm にする場合と、マルチエミッタ LD でエミッタ全幅を 150 μm の場合の光出力について検討した。

図 3-18 より、150 μm -1 エミッタ LD の熱抵抗値は、2 あるいは 3 エミッタ LD の熱抵抗値よりも大きい。さらに、3.3 節に示したように、エミッタ幅を 75 μm よりも大きくしていくと、光損失が増大していく。つまり、150 μm -1 エミッタ LD の熱抵抗と光損失は、共に 75 μm -2 エミッタ LD よりも劣ることになる。加えて、3.4 節で議論したように、エミッタ全幅が同じであれば、しきい電流値はほぼ同じになるため、150 μm -1 エミッタ LD の光出力特性が 75 μm -2 エミッタ LD に勝ることはない。

75 μm -1 エミッタ LD の光出力特性から、2.4 節の方法を用いて求めた 75 μm -2 エミッタ LD の光出力特性の予測結果を図 3-20 に示す。 $T_c = 45^\circ\text{C}$ における 2.0 W 出力時の動作電流は 2.75 A と予想される。また、75 μm -1 エミッタ LD の特性から、動作電圧は 2.35V となると考えられる。前端面反射率を 12 %、後端面反射率を 90 % としたとき、全光出力に対する前端面光出力の割合 β は、式 (2-6) により 0.960 となるので、活性層における発熱量は、約 4.38 W ($= 2.35 [\text{V}] \times 2.75 [\text{A}] - 2.0 [\text{W}] / 0.960$) となる。ここで、50 μm -3 エミッタ LD と 75 μm -2 エミッタ LD の熱抵抗差は、図 3-18 より 0.075 K/W なので、この熱抵抗差による $T_c = 45^\circ\text{C}$ 、2.0 W 出力時の両構造における活性層温度差は約 0.33 $^\circ\text{C}$ になる。一方、図 3-6 より、エミッタ幅が 50 μm の場合のスロープ効率は、75 μm の場合に比べ 10 % 前後小さい。ここで、75 μm -2 エミッタ LD の $T_c = 45^\circ\text{C}$ における 2.0 W 出力時の活性層温度は 62.7 $^\circ\text{C}$ であるが、図 3-5(d) より、この活性層温度においてスロープ効率を 10% 向上させるためには、6.2 $^\circ\text{C}$ の温度低減が必要となる。したがって、熱抵抗差により 0.33 $^\circ\text{C}$ の活性層温度上昇となるものの、6.2 $^\circ\text{C}$ の温度低減に相当するスロープ効率差を持つ 75 μm -2 エミッタ LD が、CW 動作により適した構造であると言える。

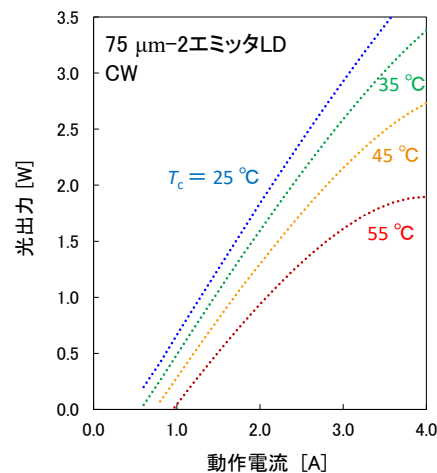


図 3-20 75 μm -2 エミッタ LD の光出力特性シミュレーション結果 (CW)

3.5.2 パルス動作品の構造設計

次に、3.5 W のパルス動作の場合の最適構造について議論する。1.3.2 項で示したように、空間変調素子利用方式型レーザープロジェクターで一般的に用いられるパルス条件は、繰り返し周波数 120Hz、デューティ比 40 % である。この場合、20,000 時間の動作は CW で 8,000 時間相当になる。したがって、この MTTF を実現するのに必要なエミッタ幅は、40 μm - 1 エミッタ LD を、CW 駆動 1.3 W で動作させた場合の MTTF(COMD)が 1,800 時間であることと式 (1-1)より、171 μm 以上 ($\sqrt[3.2]{8000/1800} [\text{hr}] \times 3.5/1.3 [\text{W}] \times 40 [\mu\text{m}]$) と見積もられる。この結果に信頼性に対する裕度を加えると、赤色 LD のエミッタ全幅は 180 μm 以上が必要と考えられる。これを 3 エミッタ LD で実現する場合、1つのエミッタ幅は 60 μm 以上となり、図 3-6 の結果から比較的スロープ効率の高い領域となる。また、1つのエミッタが COMD で故障したときの光出力低下量が小さいことや、後の 6 章で議論するように、ビームの重ね合わせによるスペックル低減効果が期待されることから、パルス動作品は 3 エミッタで検討することにした。

40, 60, および 75 μm - 3 エミッタ LD のパルス動作時の光出力特性シミュレーション結果を図 3-21 に示す。55 $^{\circ}\text{C}$ の光出力特性は、40 μm - 3 エミッタ構造が最も良好であるが、エミッタ全幅が 120 μm と小さいことから、前述のように十分な素子寿命を確保することができない。

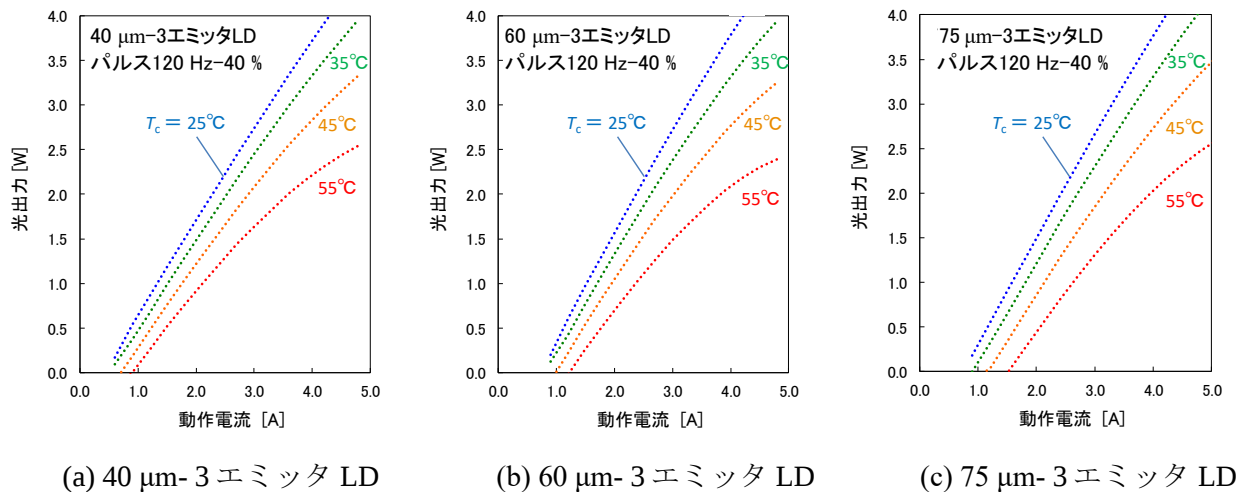


図 3-21 40, 60, 75 μm - 3 エミッタ LD の光出力特性シミュレーション結果 (パルス)

図 3-22 は、図 3-21 に示した 60 μm - 3 エミッタ LD と 75 μm - 3 エミッタ LD のパルス動作時の光出力特性シミュレーション結果を比較したものである。この図より、75 μm - 3 エミッタ LD の方が低出力側の動作電流が大きくなるものの、高出力側の光出力飽和が小さくなる事が分かる。両者の優劣比較には、後の 5.6 節に示すような、MTTF の要求を満たすことが出来る最大の光出

力の議論が必要となる。特に 55 °C のような高温側では活性層温度が高くなることによる Slow 劣化が問題になるため、最大光出力は 2.2 W 程度以下になる。このことから、低光出力側における動作電流がより小さくなる 60 μm - 3 エミッタ構造を採用することにした。

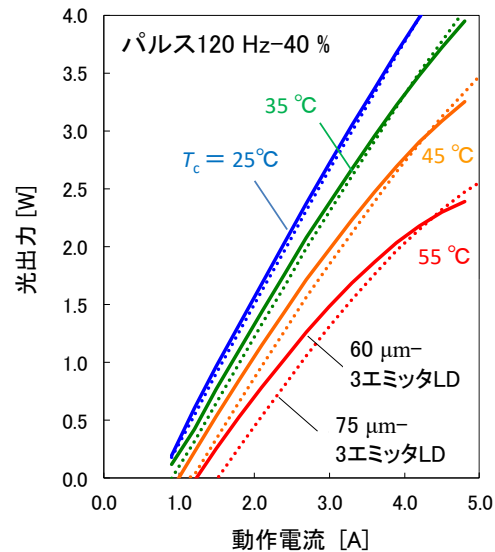
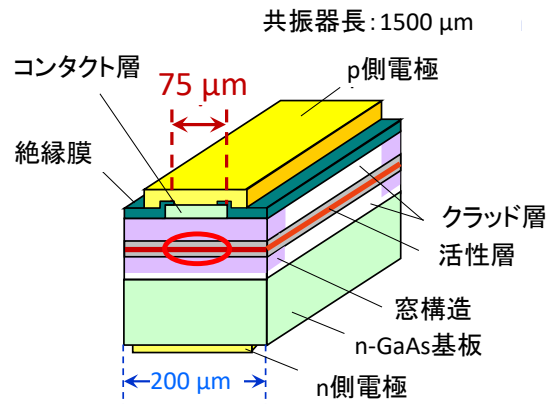


図 3-22 60 μm および 75 μm - 3 エミッタ LD の光出力特性シミュレーション結果（パルス）

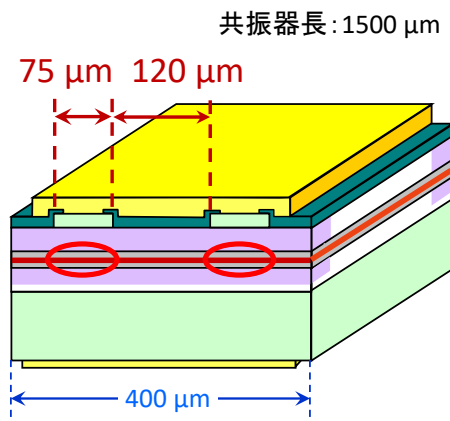
3.6 マルチエミッタ LD の特性評価結果

3.6.1 CW 動作時の光出力特性評価

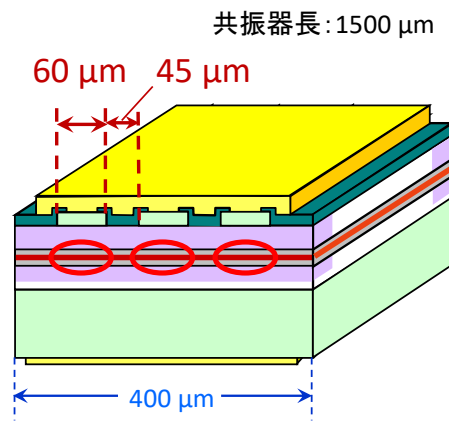
以上の議論を元に、75 μm - 2 エミッタ LD と 60 μm - 3 エミッタ LD を実際に作製し、CW 動作時の光出力特性を比較することにした。LD の構造は、1.4.1 項で示した構造に、3.2 項で説明した Γ の増大を適用したものとした^(109,110)。また、前端面に Zn 拡散による窓構造を採用することで、バンドギャップの拡大を図っている⁽¹¹¹⁾。比較のため、同時に作製した 75 μm - 1 エミッタ LD の特性も評価した。図 3-23 に各構造の模式図を示す。



(a) 75 μm -1 エミッタ LD



(b) 75 μm -2 エミッタ LD



(c) 60 μm -3 エミッタ LD

図 3-23 作製した LD の構造図

図 3-24 に、光出力特性のケース温度依存性の測定結果を示す。2 および 3 エミッタ LD の評価結果のグラフには、2.4 節で示した光出力シミュレーションによって得られた光出力特性を黒色の点線で示している。このシミュレーション結果は、60 および 75 μm -1 エミッタ LD の光出力測定結果から、図 3-5 に示す活性層温度と光出力の関係からシミュレーションしたものである。これらのシミュレーション結果は実測結果によく一致している。

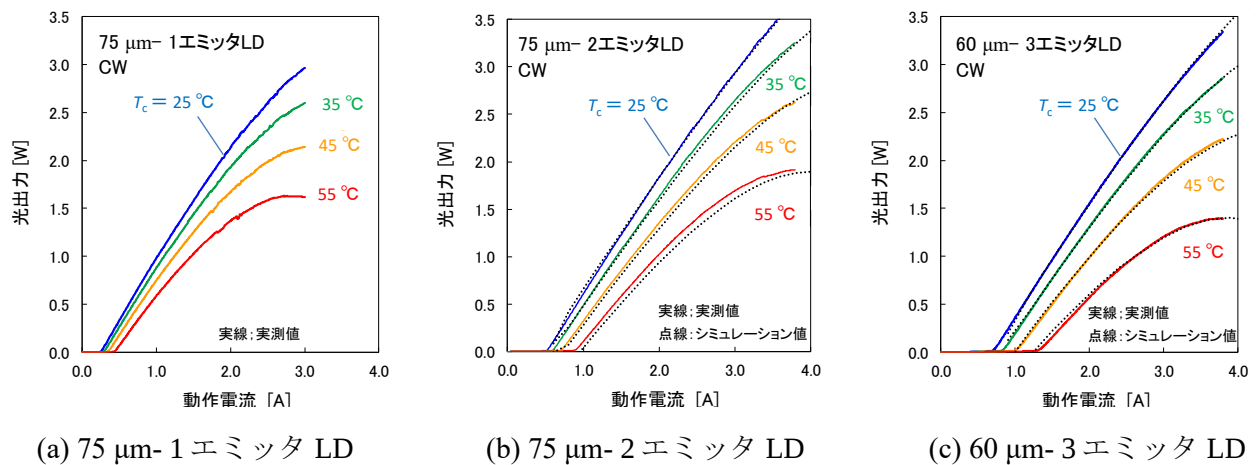


図 3-24 1, 2, 3 エミッタ LD の光出力特性 (CW)

図 3-24 のように、1 エミッタ LD では、いずれの T_c においても動作電流 3.0 A 前後で光出力が飽和していくのに対し、マルチエミッタ LD の場合は光出力の熱飽和が緩和され、最大光出力が大きくなっている。図 3-25 は活性層温度 T_j のシミュレーション結果であるが、同じ電流値で比較した場合の活性層温度は、熱抵抗低減の効果により 1 エミッタ LD よりもマルチエミッタ LD の方が低くなっている。2 エミッタ LD と 3 エミッタ LD の活性層温度はほぼ同じとなっているが、光出力は図 3-26 のように 2 エミッタ LD の方が大きくなっている。これは、3 エミッタ LD のエミッタ全幅は 180 μm と 2 エミッタ LD の 150 μm よりも大きいことで、しきい電流値が大きくなっているためである。

エミッタ全幅を広くすると、前端面光密度が低減し MTTF(COMD)の改善が期待できるが、以上で示したように、しきい電流値増大による光出力の低下が避けられない。つまり、光出力特性と MTTF(COMD)の間にはトレードオフの関係があり、赤色 LD の設計を難しいものになっている。

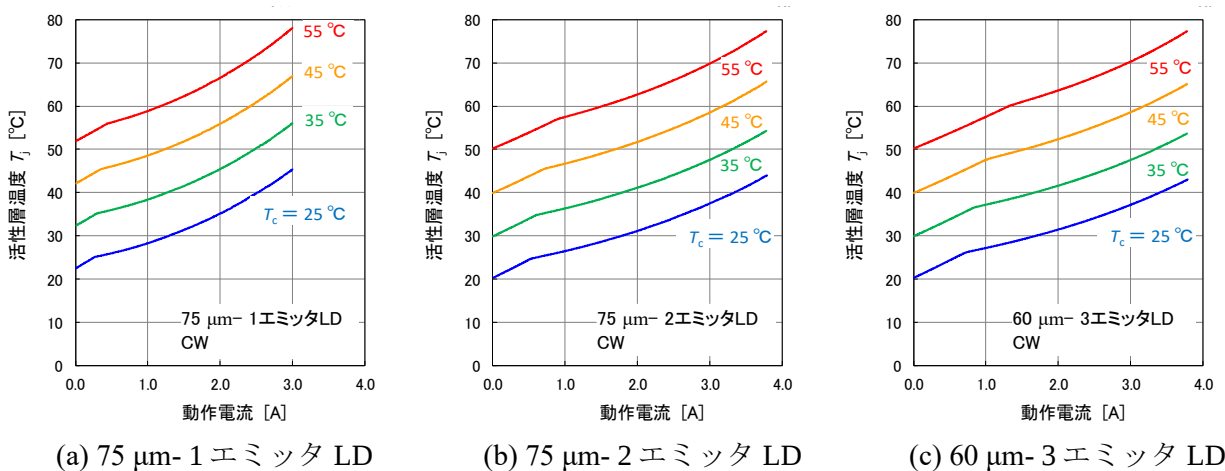


図 3-25 1, 2, 3 エミッタ LD の活性層温度シミュレーション結果 (CW)

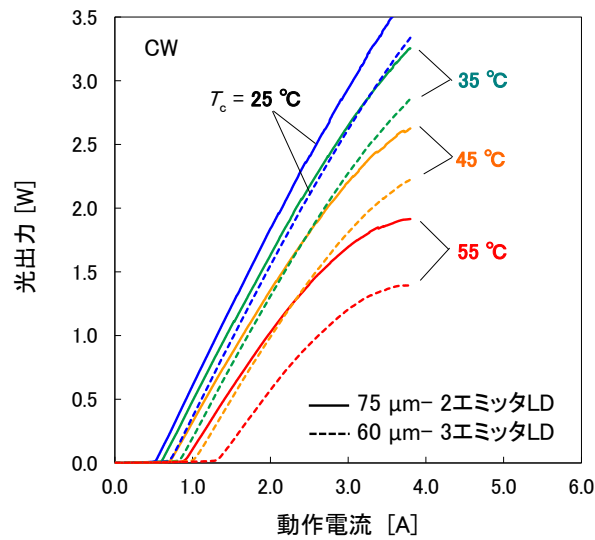
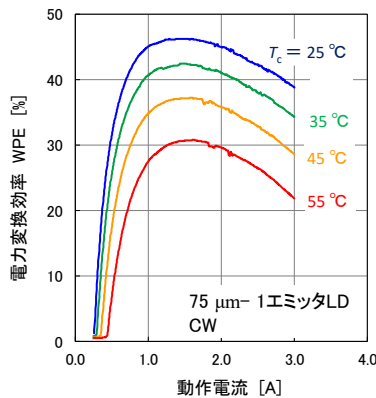
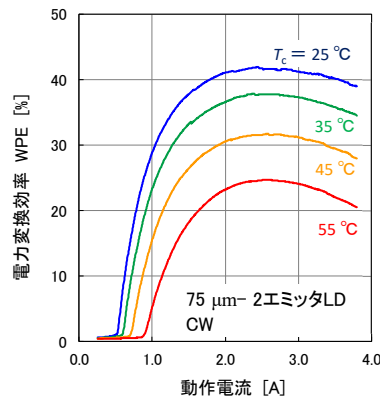


図 3-26 2, 3 エミッタ LD の CW 動作時における光出力特性の比較

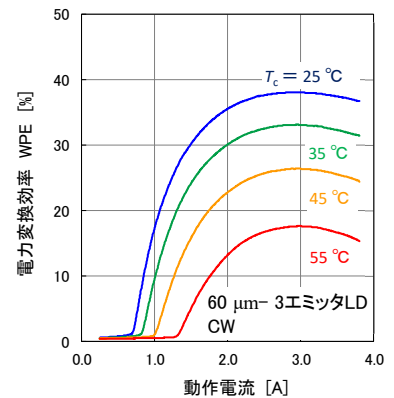
図 3-27 は、入力電力に対する光出力の割合である電力変換効率（WPE, Wall Plug Efficiency）を、光出力特性から求めたものである。動作電流 2.0 A 以下の領域では、1 エミッタ LD の WPE に比べて、マルチエミッタ LD の WPE は低い傾向となっている。主な理由は、エミッタ全幅の増大によって、しきい電流値が増大したことである。一方、2 エミッタ LD では電流に対する WPE の低下量が小さいため、高電流時の WPE は 1 エミッタ LD と同等以上となっている。これは、図 3-25 に示されたように、マルチエミッタ化による熱抵抗低減で、活性層温度が大幅に低下したことに起因する。



(a) 75 μm- 1 エミッタ LD



(b) 75 μm- 2 エミッタ LD



(c) 60 μm- 3 エミッタ LD

図 3-27 1, 2, 3 エミッタ LD の電力変換効率 WPE (CW)

図 3-28 は 75 μ m- 1 エミッタ LD と 75 μ m- 2 エミッタ LD を CW 駆動した時の、光出力と WPE の関係を比較した結果である。1 エミッタ LD では、高温・高出力時の光出力の飽和傾向が強い
ため、WPE の急激な減少が見られるが、2 エミッタ LD では光出力飽和が抑制されているため、
WPE は 1 エミッタ LD よりも優位となっている。このように、マルチエミッタ LD では、適度な
エミッタ幅とすることで高温・高出力領域における WPE を改善することが可能になる。

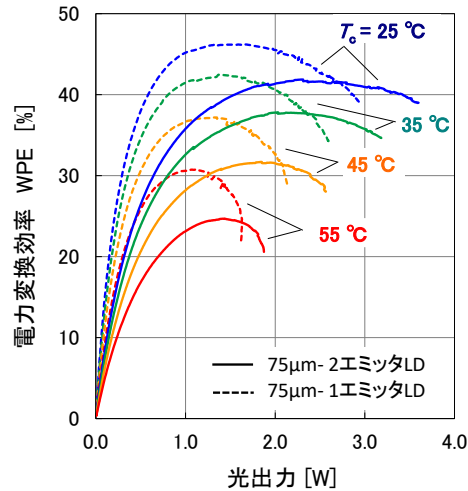


図 3-28 1, 2 エミッタ LD の CW 動作時における WPE の比較

図 3-29 に、75 μ m- 2 エミッタ LD に対し T_c を 25 $^{\circ}$ C、光出力 2.25 W で動作させたときの波
長スペクトルおよび FFP の測定結果を示す。発振波長は約 638 nm、FFP のピーク強度に対し
て強度が $1/e^2$ になる角度の全幅は、水平方向 ($\theta_{//}(1/e^2)$) で 9.7 $^{\circ}$ 、垂直方向 ($\theta_{\perp}(1/e^2)$) で
62.5 $^{\circ}$ であった

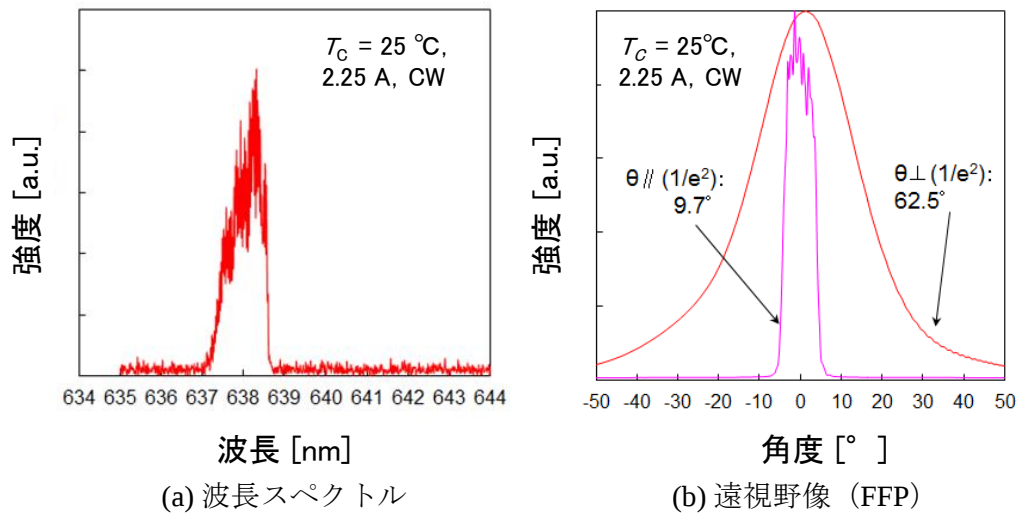
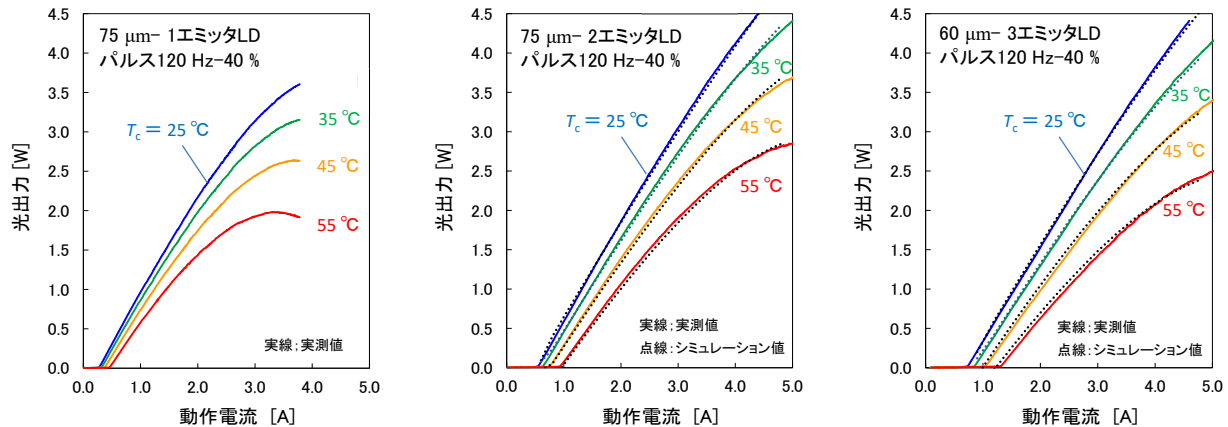


図 3-29 75 μ m- 2 エミッタ LD の波長スペクトルと FFP 測定結果

マルチエミッタ LD の信頼性改善効果の詳細については 5.6 節で議論するが、その概要は以下になる。1.6.2 項の見積もりでは、75 μm -1 エミッタ LD で、MTTF(COMD)が 20,000 時間以上となるのは、1.14 W 以下で駆動した場合に限られる。一方、1.6.2 項に示したように、この 2 および 3 エミッタ LD のエミッタ全幅は、2.0 W の CW 動作で MTTF(COMD)が 20,000 時間以上になると考えられる条件である 130 μm 以上となっていることから、Slow 劣化で制約されない限りは、2.0 W 動作で 20,000 時間以上の MTTF を持つと考えられる。前端面の光密度はエミッタ全幅に反比例するため、式 (1-1) に示した光密度と MTTF(COMD)の関係から、75 μm -2 エミッタ LD の MTTF(COMD)は、75 μm -1 エミッタ LD の MTTF(COMD)の約 9.2 倍 $(=(150/75)^{3.2})$ になっていると推定される。

3.6.2 パルス動作時の光出力特性評価

次に、これらの LD を繰り返し周波数 120 Hz、デューティー比 40% のパルスで駆動したときの光出力特性のケース温度 T_c 依存性の測定結果を図 3-30 に示す。2 および 3 エミッタ LD の評価結果には、シミュレーションによって得られた光出力特性を黒色の点線で示している。パルス動作時の光出力特性シミュレーションも、CW 動作時と同様、実測結果とよく一致している。1 エミッタ LD では、いずれの T_c においても動作電流 3.5 A 前後で光出力が飽和していくのに対し、2 あるいは 3 エミッタ LD の場合は、光出力の熱飽和が抑制され、高い最大光出力を得ることが可能となる。



(a) 75 μm -1 エミッタ LD

(b) 75 μm -2 エミッタ LD

(c) 60 μm -3 エミッタ LD

図 3-30 1, 2, 3 エミッタ LD の光出力特性 (パルス 120 Hz - 40 %)

図 3-31 のように、同じ電流値で比較した場合の活性層温度のシミュレーション結果は、CW 動作時と同様に 1 エミッタ LD よりも 2 および 3 エミッタ LD 方が低い。3 エミッタ LD の光出力特性が、2 エミッタ LD に対し劣ることも CW 動作時と同様であるが、パルス動作の場合は、CW 動作の場合よりも発熱量が小さいため、図 3-32 のように両者の光出力差は小さくなる。

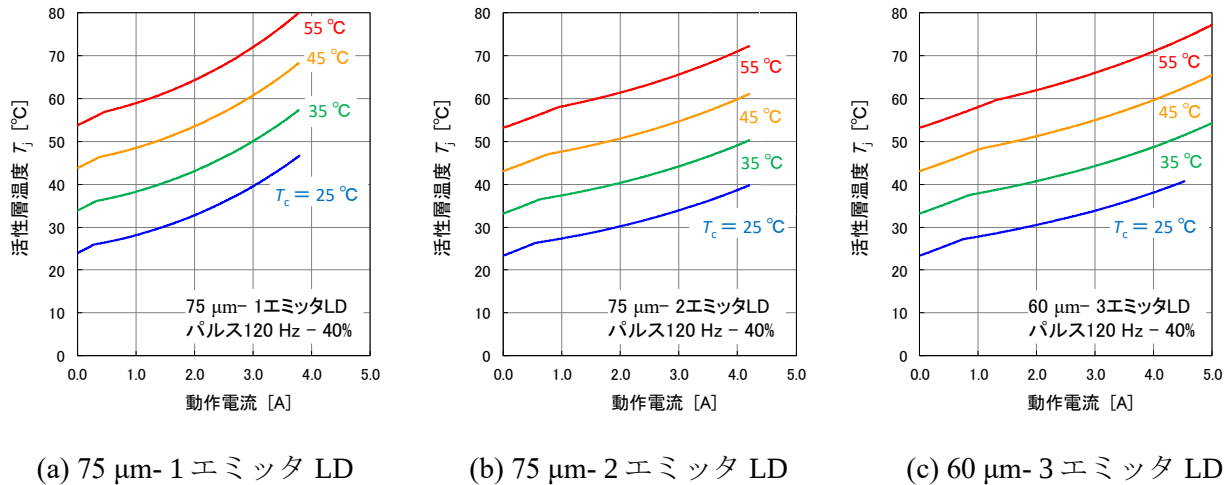


図 3-31 1, 2, 3 エミッタ LD の活性層温度シミュレーション結果（パルス 120 Hz - 40 %）

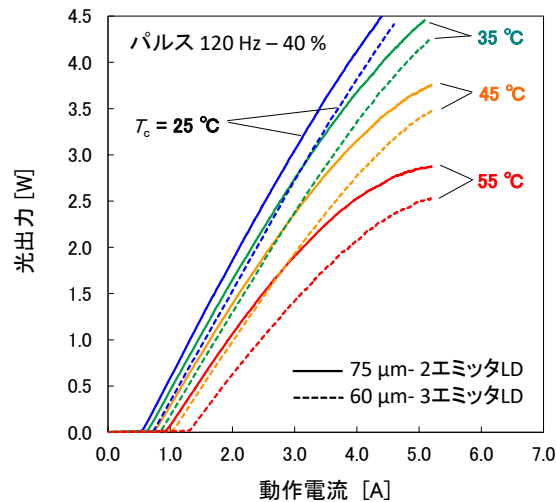


図 3-32 2, 3 エミッタ LD のパルス動作時の光出力特性の比較

図 3-33 は電力変換効率 WPE を光出力特性から求めた結果である。CW 動作時と同様に、動作電流 2.5 A ~ 3.5 A 以下の領域では、マルチエミッタ LD の方が低い傾向になる。主な理由は、エミッタ全幅の増大によって、しきい電流値が増大したことである。

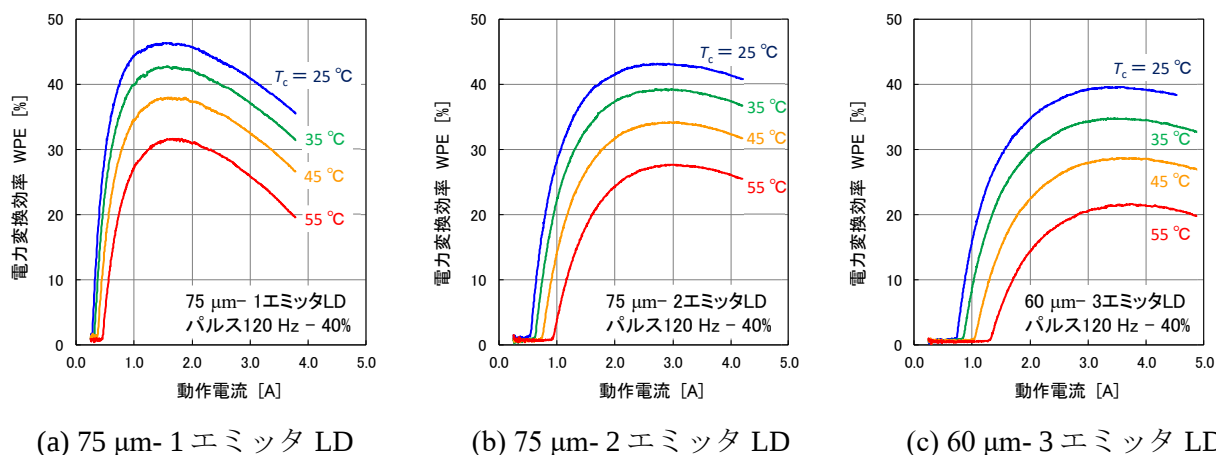


図 3-33 1, 2, 3 エミッタ LD の電力変換効率 WPE (パルス 120 Hz - 40 %)

図 3-34 は 75 μm - 1 エミッタ LD と 60 μm - 3 エミッタ LD をパルス駆動した時の、光出力と WPE の関係を比較した結果である。3 エミッタ LD の WPE は、高光出力時においてもその低下量が小さく、高温・高出力時には 1 エミッタ LD と同等以上になっている。例えば $T_c=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合、3.1 W 以上の光出力では 1 エミッタ LD よりも 3 エミッタ LD の方が WPE は優位になる。 T_c が 45 $^{\circ}\text{C}$ 、55 $^{\circ}\text{C}$ の場合も、それぞれ 2.6 W、2.0 W 以上で 3 エミッタ LD の方が優位となっている。このように、60 μm - 3 エミッタ LD は、エミッタ幅が広いことによって MTTF(COMD)の改善が見込まれるとともに、特に高温・高出力領域における WPE が 75 μm - 1 エミッタ LD よりも大きくなっており、パルス動作用赤色 LD 光源として有望であると考えられる。信頼性を含めた詳細比較は 5.6 節で議論する。

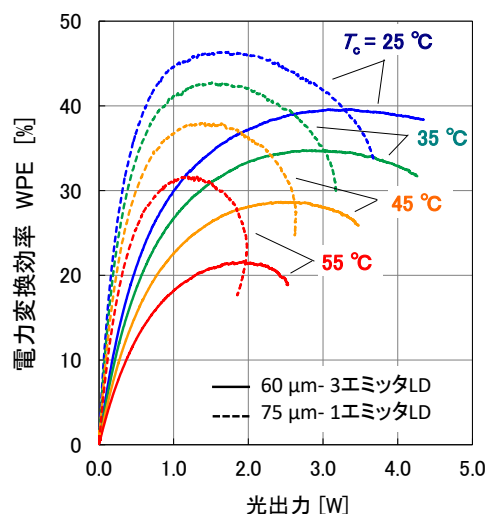


図 3-34 1, 3 エミッタ LD のパルス動作時における WPE の比較

図 3-24 および図 3-30 のとおり、熱シミュレーションを用いた赤色 LD の光出力の予測結果と実測結果は、構造や駆動方法に関わらず非常によく一致していることが分かった。この結果は、2 章で議論した熱シミュレーションの精度が非常に高いこと、および光出力が活性層温度と電流値だけで決まっていることを証明するものである。光出力が活性層温度と電流値だけで決まっていることは、活性層温度のシミュレーション結果から求められる図 2-8 の関係からも明らかである。

ここで、AlGaInN/GaN 系材料や InGaAsP/InP 系材料など、赤色 LD とは材料系が異なる LD の場合を考える。LD では、材料系によらず、外部量子効率としきい電流値により光出力が決まる。外部量子効率は、フリーキャリア吸収・価電子帯間吸収などの光吸収と端面反射率との関係、および電子オーバーフローや電流リーク、オージェ再結合電流に影響される内部量子効率で決まる。また、しきい電流値は、光吸収と端面反射率で決まる光損失、媒質利得、および光閉じ込め量に依存する。これらの物性量は、いずれも活性層温度が決まれば一意に決まる、あるいは温度依存性がないことから、活性層温度により光出力が一意に決まることになる。

本研究で提案した光出力の予測手法は、LD に電流を印加したときの活性層温度を求め、その電流値と活性層温度を光出力に変換するものである。したがって、赤色 LD とは異なる材料系の LD の場合も、活性層温度を求めた上で本手法を適用することで、赤色 LD の場合と同様に光出力が予測できるものと考えられる。

3.7 まとめ

本章では、赤色 LD の光出力改善について議論した。最初に、赤色 LD の光出力を制限する要因である電子オーバーフローを抑制するには、活性層への光閉じ込め係数 (Γ) を増大することで、しきい値キャリア密度を下げることを有効であることを示した。熱抵抗を下げるという課題に対しては、マルチエミッタ化によって熱抵抗が低減可能であることを示した。

さらに、スロープ効率のエミッタ幅依存性を評価することで、エミッタ幅が $75\ \mu\text{m}$ の場合にスロープ効率が最大となることを明らかにした。エミッタ幅が $75\ \mu\text{m}$ よりも狭い場合は、エミッタ横にある光損失領域への光浸み出しの増加によりスロープ効率が低下すること、エミッタ幅が $75\ \mu\text{m}$ よりも広い場合は、光損失領域への光浸み出し量が大い横高次モードの割合が増加することでスロープ効率が低下することを確認した。また、ブロードエリア型 LD の横モードに、損失が大い横高次モードが多数含まれる理由を検討した結果、空間的ホールバーニングによってモード利得が低下することを回避するというメカニズムによるものであるとの結論を得た。

次に、 $2.0\ \text{W}$ の CW 駆動において 20,000 時間以上の動作が可能となると考えられるエミッタ全幅 $150\ \mu\text{m}$ 以上の条件で、最適なマルチエミッタ LD の構造を設計した。その結果、 $75\ \mu\text{m}$ -2

エミッタ構造が最適構造であるとの結論を得た。さらに、熱シミュレーションによる光出力特性予測を用いて、エミッタ全幅がより広く、かつ十分なパルス光出力特性が得られる 60 μm - 3 エミッタ構造を提案し、両 LD を試作した。

これらの LD を、 $T_c = 45\text{ }^\circ\text{C}$ 、CW 駆動で評価した結果、1 エミッタ LD の場合は 2.0 W 以上で光出力の飽和と WPE の低下が見られる一方で、75 μm - 2 エミッタ LD の場合は、エミッタ全幅を 75 μm から 150 μm に拡大しているにも関わらず、2.5 W 以上が出力可能で、かつ WPE の低下も小さいことが分かった。

パルス動作の場合も CW 動作と同様に、75 μm - 2 エミッタ LD 構造にすることによって光出力特性が大きく改善することを確認した。さらに、60 μm - 3 エミッタ LD では、エミッタ全幅を 180 μm まで拡大しているにも関わらず、 $T_c = 45\text{ }^\circ\text{C}$ における WPE は 2.6 W 以上の領域で 75 μm - 1 エミッタ LD よりも優位となった。 $T_c = 55\text{ }^\circ\text{C}$ の場合も 2.0 W 以上で 3 エミッタ LD が優位となった。このことから、本研究で作製したマルチエミッタ LD は、従来の 1 エミッタ LD に比べて、高温・高出力・高信頼性動作が可能で、レーザーディスプレイの光源として非常に有望と考えられる。

さらに本研究では、光出力の実測結果と熱シミュレーションを用いて、活性層温度と光出力の関係を求める方法と、それを用いて LD の光出力を予測する方法を提案した。そして、この方法を用いて予測したマルチエミッタ LD の光出力特性と、実際に試作したマルチエミッタ LD の特性評価結果を比較し、CW 動作、パルス動作のいずれにおいても光出力の予測精度が非常に高いことを実証、本方法がマルチエミッタ LD の設計手法として非常に有用であることを示した。

本方法では、活性層温度さえ分かれば光出力予測が可能であるため、1 エミッタ LD、マルチエミッタ LD を問わず、パッケージや放熱方法などを変更した場合の光出力特性も予測出来る。さらに、AlGaInP/GaAs 系 LD のみならず、他の材料系の LD にも容易に適用可能である。

第4章：赤色 LD の信頼性改善

4.1 はじめに

第3章では、マルチエミッタ構造の採用によって赤色 LD の光出力特性を大きく改善することが可能であることを示した。一方、ディスプレイ装置用の光源では、使用している間にある一定の光出力を維持することが求められるものの、実際には動作時の光出力が大きくなるほど、COMD によって端面が融解破壊するまでの時間が短くなる。また、動作電流が大きいほど、活性層温度が上昇して Slow 劣化が加速することになる。これらのことから、高出力動作を実現するには素子寿命の改善も必須である。

1.6.2 項で述べたように、赤色 LD の MTTF(COMD)は、前端面の光密度に依存することが実験的に示されていた。一方で、COMD は端面温度の上昇を起点とする現象であることから、本来は端面温度との関係について議論されるべきである。そこで本章では、第2章に示した熱シミュレーションを用いることで前端面温度を推定し、COMD との関係を議論する。また、得られた結論を元に、その改善方法についても検討する。

Slow 劣化については、ウエル層に AlGaAs を用いた AlGaAs/GaAs 系 LD において、その原因がウエル層における非発光再結合であるとの報告が複数あり^(65,66)、欠陥の種類や発生機構なども議論されている⁽⁷⁹⁻⁸²⁾。本章では、ウエル層に GaInP を用いた赤色 LD の場合について、その劣化原因と改善方法について検討する。

4.2 COMD を決定する要因

4.2.1 COMD の動作温度依存性

図 4-1 は、60 μm -2 エミッタ LD に、パルス幅 500 μs 、パルスサイクル 6 ms のパルス電流を印加させながら光出力を測定した結果である。光出力を増加させていくと、ある光出力で COMD が発生し光出力が大きく低下する。この COMD が発生した光出力を COMD レベルと呼ぶことにする。パルス駆動にしたのは、光出力の熱飽和を避けるためである。このパルス条件で測定した COMD レベルは、CW 駆動の場合と差がないことを確認している。

図 4-2 は、60 μm -2 エミッタ LD における、COMD レベルの動作温度依存性を評価した結果である。パルス駆動であっても、LD ホルダ温度が 30 $^{\circ}\text{C}$ を超えると、光出力の飽和のために

COMD レベルが測定できなかったものの、 -20°C から 30°C の間では COMD レベルの差はほとんどないことが分かった。これは前端面温度そのものが、劣化の要因になっていないことを示唆している。

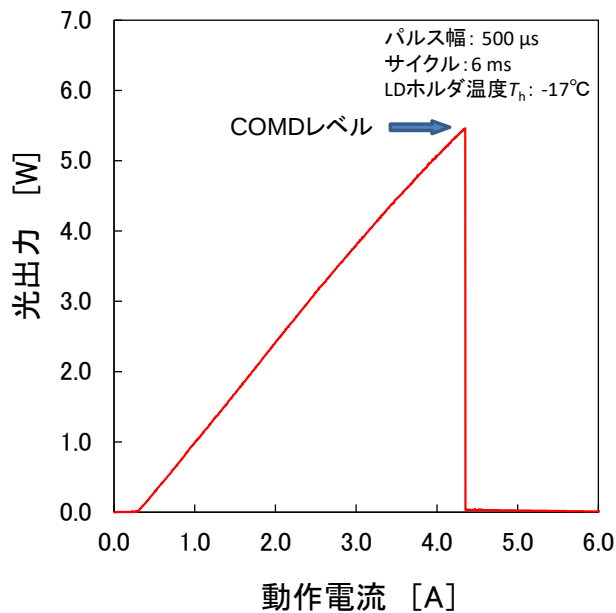


図 4-1 COMD レベルの測定例

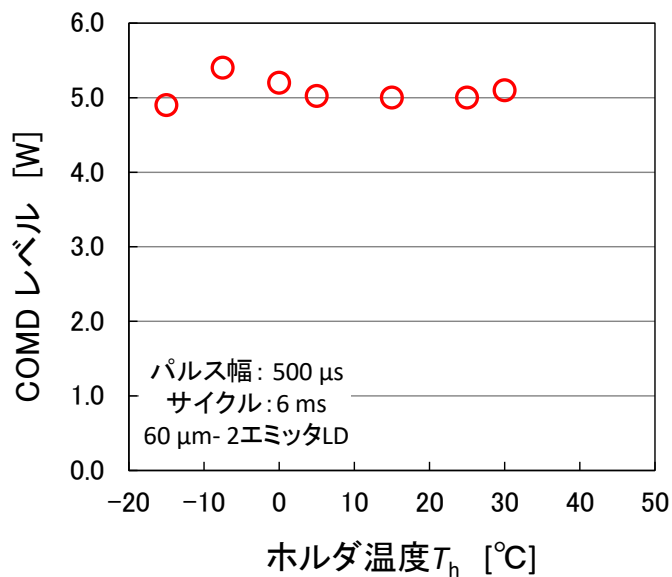


図 4-2 COMD レベルの LD ホルダ温度依存性

4.2.2 前端面と活性層の利得領域との温度差 (ΔT_{fa})

図 4-3(a)は、LD に電流を注入する前の共振器内の伝導帯バンドの最低エネルギー E_c および価電子帯バンドの最大エネルギー E_v を表した模式図である。LD の端面付近では、界面準位の影響によるバンド曲がりが発生していると考えられている。LD を発振させると、端面付近では、界面準位を介した非発光再結合やバンド曲がり起因する光吸収によって熱が発生する。また、わずかな熱放射を除けば片側が完全断熱となることから、端面付近の温度が他の部分よりも高くなる。その結果、図 4-3(b)に示すように、その発熱によって前端面付近のバンドギャップがさらに縮小することになる。このことが、さらなる光吸収を発生する、という正のフィードバックを引き起こし、端面破壊に至る。通常、LD は前端面の光出力を大きくするために、前端面側の端面反射率を後端面側よりも小さくしていることから、前端面側の光密度が後端面側よりも大きくなる。そのため、COMD は前端面側でのみ発生することがほとんどである。

以上のメカニズムを考慮すると、COMD は端面における光吸収量が、あるしきい値を超えた時に発生すると考えられる。前端面における光吸収量は、前端面における活性層のバンドギャップ波長と、発振波長を決定する利得領域のバンドギャップ波長の差に依存するはずである。この前端面のバンドギャップ波長は前端面温度に依存し、発振波長は前端面以外の利得領域の活性層温度に依存すると考えられる。以上のことから、この2つの位置の温度差がある一定の値になった直後に、正のフィードバックに陥り COMD が発生すると考えられる。ここで、活性層温度は、次項に示すように端面近傍の 100 μm 前後の領域を除けばほぼ一定となることから、この正のフィードバックに陥る前の定常状態における前端面温度と共振器中央部の活性層温度との差を ΔT_{fa} と定義することにする。以降では、COMD 発生直前における ΔT_{fa} と COMD レベルの関係を議論する。

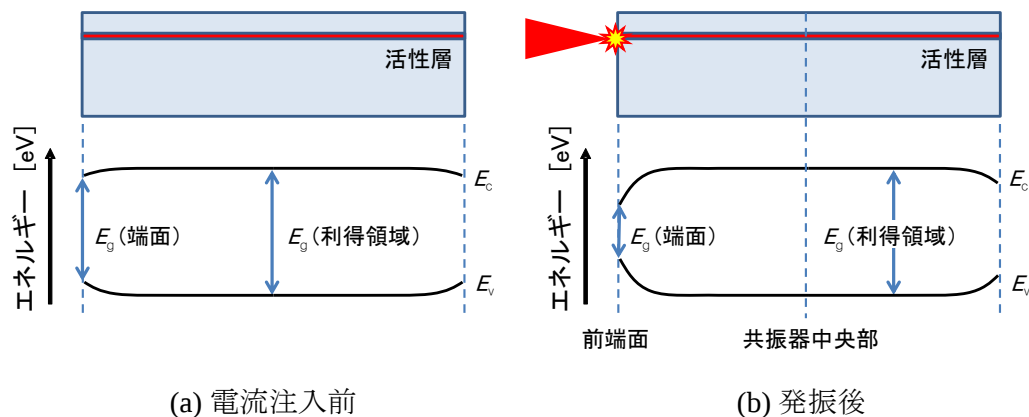


図 4-3 バンドギャップ模式図と COMD の発生原理

4.2.3 前端面および利得領域の温度シミュレーション

本研究では、前端面温度と共振器中央部の活性層温度との差 ΔT_{fa} を、熱シミュレーションを用いて推定することにする。そこで、熱シミュレーションに必要となる、光吸収起因の発熱が発生する領域と、その発熱量について議論する。

本研究で用いた赤色 LD の前端面および後端面には、1.5.3 項で説明したような 15 μm 長の Zn 拡散による端面窓構造が形成されている。この窓構造領域を除く領域の活性層には電流が注入されているため大きな光吸収は存在しない。一方、窓構造領域ではバンドギャップが拡大しているものの、電流を注入していないことから、依然としてバンド間吸収は残っていると考えられる。また、窓構造領域に拡散された Zn を介した光吸収も発生していると考えられる。

これらの光吸収によって励起されたキャリアは、図 4-3(b)に示すような端面付近におけるバンド曲がりの影響により、ほとんど拡散することなく界面準位や Zn のエネルギー準位を介して非発光再結合し、そのエネルギーが熱に変換されると考えられる。そこで、吸収領域における発熱量は、吸収された光のエネルギーに等しいとした。

この光吸収量の分布により前端面近傍の温度分布が決まることになるが、この温度分布が逆に光吸収量に影響を与えることになる。しかしながら、窓構造領域における温度とバンドギャップ、すなわち光吸収量の関係もはっきりしないことから、窓構造領域における光吸収量の分布を推定することは容易ではない。ここで、端面部分は片側が断熱となるため、端面近傍で発生した熱による温度上昇は、前端面位置で最大になり、端面から離れるに従い小さくなる。また、光吸収は窓構造領域となる端面から 15 μm の領域内で発生することになる。これらを考慮し、熱シミュレーションにおいては、発熱領域となる 15 μm 長の窓構造領域のうち端面から 2 μm までの領域を光の吸収領域と仮定した。

前端面近傍を横から見た構造を図 4-4 に示す。前端面側から見た構造は図 3-17 と同様である。端面発熱領域の紙面に垂直な方向の長さは、光が存在する領域であるエミッタ領域の幅と同一とした。これ以外の構造は図 2-1 と同じとし、表 2-1 のパラメータを用いて熱シミュレーションを実施した。前端面反射率は、本研究で用いるすべての赤色 LD で採用している 12 %とした。

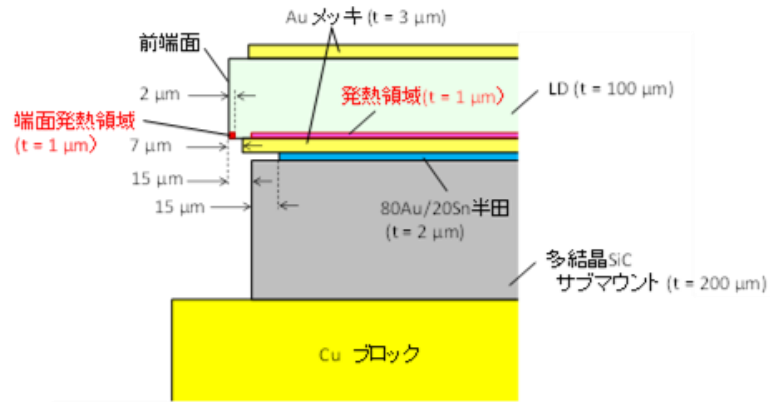


図 4-4 前端面近傍を横から見た LD，サブマウント，ブロックの構造

次に、この仮定の元で、前端面光出力とこの吸収領域での発熱量の関係を求めることにする。異なる窓領域長を持つ LD の光出力を測定することにより、窓構造領域の単位長辺りの吸収係数を求めたところ、 150 cm^{-1} が得られた。先に仮定した 2 μm 長の吸収領域は、他の窓構造領域よりも温度が高くバンドギャップが小さいことから、より吸収係数が大きいと推定されるが、本研究ではこの 150 cm^{-1} を吸収係数の最低値と考えて、この 2 μm 長の吸収領域における吸収係数とした。吸収領域長を $L (= 2 \text{ μm})$ ，吸収係数を $\alpha (= 150 \text{ cm}^{-1})$ ，前端面反射率を $R_f (= 12\%)$ としたとき、前進波、後進波と光出力の関係は図 4-5(a) のようになる。また、各位置における光強度は、共振器内の前進波の光強度 P を用いて図 4-5(b) のように表すことができる。

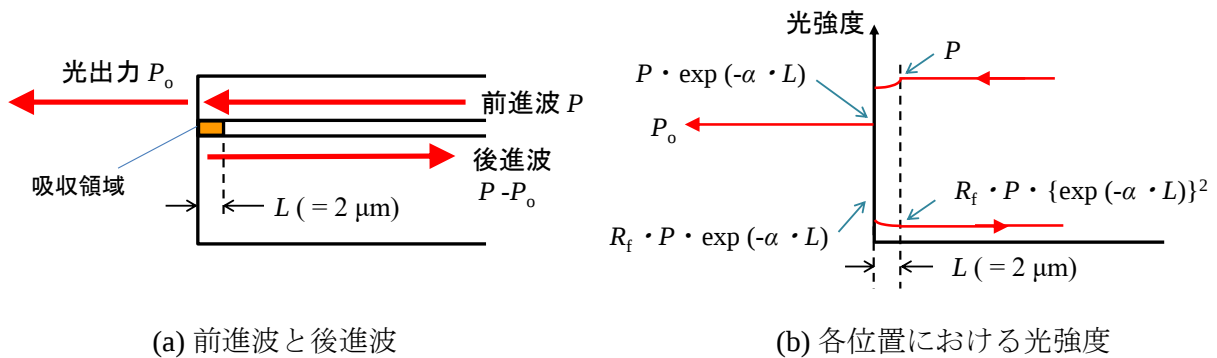


図 4-5 前端面近傍に光吸収がある場合の共振器内光強度 P と前端面光出力 P_o の関係

前端面位置における前進波の光強度は、光強度 P の光が吸収係数 α を持つ吸収領域で吸収されることにより $P \cdot \exp(-\alpha \cdot L)$ となる。このうち、 $1-R_f$ の割合の光が前端面から出射されるので、前端面光強度 P_o は式 (4-1) で表すことができる。

$$P_o = (1 - R_f) \cdot P \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \quad \text{式 (4-1)}$$

吸収領域における前進波の光吸収量 $A_f(P_o)$ は、図 4-5 のように P と吸収領域透過後の光強度 $P \cdot \exp(-\alpha \cdot L)$ との差になるので、式 (4-1) を用いて式 (4-2) で表される。

$$\begin{aligned} A_f(P_o) &= P \cdot \{1 - \exp(-\alpha \cdot L)\} \\ &= \frac{1}{1-R_f} \cdot P_o \cdot \frac{1-\exp(-\alpha \cdot L)}{\exp(-\alpha \cdot L)} \end{aligned} \quad \text{式 (4-2)}$$

次に、前進波が前端面で反射したものが後進波となるので、前端面における後進波の光強度は、前端面における前進波の光強度 $P \cdot \exp(-\alpha \cdot L)$ と反射率 R_f を用いて $R_f \cdot P \cdot \exp(-\alpha \cdot L)$ となる。この後進波が吸収領域を透過した後の光強度は、 $R_f \cdot P \cdot \{\exp(-\alpha \cdot L)\}^2$ と表すことができる。後進波の吸収領域における光吸収量 $A_b(P_o)$ は、図 4-5 のように吸収領域透過前後の光強度の差となるので、式 (4-1) を用いて式 (4-3) で表すことができる。

$$\begin{aligned} A_b(P_o) &= R_f \cdot P \cdot \{1 - \exp(-\alpha \cdot L)\} \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \\ &= \frac{R_f}{1-R_f} \cdot P_o \cdot \{1 - \exp(-\alpha \cdot L)\} \end{aligned} \quad \text{式 (4-3)}$$

式 (4-2)、式 (4-3) より、吸収領域における全光吸収量 $A_{\text{tot}}(P_o)$ は、

$$\begin{aligned} A_{\text{tot}}(P_o) &= A_f(P_o) + A_b(P_o) \\ &= \frac{1}{1-R_f} \cdot P_o \cdot \{1 - \exp(-\alpha \cdot L)\} \cdot \left(R_f + \frac{1}{\exp(-\alpha \cdot L)}\right) \end{aligned} \quad \text{式 (4-4)}$$

となることから、吸収係数を 150 cm^{-1} と仮定したときの光吸収領域における発熱量は、光出力 P_o の 0.0385 倍になる。

先の吸収領域長を $2 \text{ }\mu\text{m}$ とするとの仮定と、この結果を用いて、 $60 \text{ }\mu\text{m}$ -1 エミッタ LD を、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 2.0 W で CW 駆動させた場合の熱シミュレーション結果を図 4-6 に示す。このときの発熱量は式(4-4)より 0.77 W である。図中の温度は、各共振器位置におけるエミッタ中心位置の温度である。前端面における光吸収による発熱のみを仮定した場合と、活性層で発生する発熱のみを仮定した場合、およびその両方の発熱が存在する場合を示している。前端面側から $15 \text{ }\mu\text{m}$ までの位置は、電流が注入されない構造となっているため、この部分の発熱はないと仮定した。

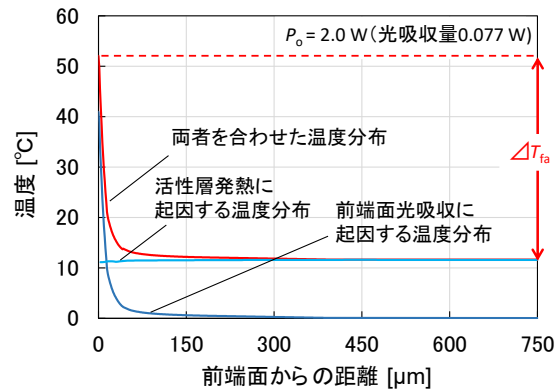


図 4-6 活性層領域の温度シミュレーション結果
(発熱領域長 2 μm , 吸収係数 150 cm^{-1} を仮定)

活性層利得領域における温度は、端面から 40 μm 前後の領域を除くとほぼ一定となるため、LD の共振器方向の中心位置、つまり前端面からの距離が 750 μm となる位置の温度と定義する。この例では、前端面温度が 52.1 $^{\circ}\text{C}$ 、活性層利得領域の温度が 11.6 $^{\circ}\text{C}$ であるので、 ΔT_{fa} は 40.5 $^{\circ}\text{C}$ になる。一方、活性層発熱に起因する温度分布をみると、前端面と前端面からの距離 750 μm の位置で 0.44 $^{\circ}\text{C}$ の差が発生している。この温度差 0.44 $^{\circ}\text{C}$ は、 ΔT_{fa} の 40.5 $^{\circ}\text{C}$ に対して十分小さいことから、 ΔT_{fa} は活性層における発熱量に影響されず、前端面における発熱のみで決まると言ってよい。また、この ΔT_{fa} は端面発熱領域で吸収された光のエネルギー、すなわち前端面発熱領域における発熱量に比例する。このことから、 ΔT_{fa} は光吸収量 $A_{\text{tot}}(P_0)$ とこの比例係数 θ_{fh} を用いて式 (4-6) で表すことが出来る。

$$\Delta T_{\text{fa}} = A_{\text{tot}}(P_0) \cdot \theta_{\text{fh}} \quad \text{式 (4-6)}$$

この比例係数 θ_{fh} は発熱量に対する温度上昇量、すなわち熱抵抗を表す量である。また、前端面で発生した熱は、LD ホルダから排熱されることから、 θ_{fh} は前端面の発熱領域から LD ホルダ間の実効的な熱抵抗値となる。 θ_{fh} の大きさは、前端面から LD ホルダに向かう熱の経路と、その経路存在する材料の熱伝導率によって決まることになる。

先に示したように、端面近傍の吸収領域長は、端面から 15 μm 以内と考えられるものの、実際の吸収領域長が仮定値とした 2 μm であるかどうかは不明である。また、実際の吸収係数が仮定から大きく異なっている可能性もある。このため、吸収領域長や吸収係数が実際とは異なっている場合の影響について議論することが必須である。図 4-7(a)は、吸収領域長を 1 μm から 15 μm に変化させたときの ΔT_{fa} を、エミッタ幅が 40, 75, 100, 120 μm の 1 エミッタ LD の場合について求めたものである。光吸収領域における吸収係数は、すべて図 4-6 で使用した値である 150 cm^{-1} とした。図 4-7(b)は、吸収領域長が異なる場合の ΔT_{fa} の変化を、エミッタ幅

75 μm の時の $\angle T_{\text{fa}}$ を 1 としたときの相対値として表したものである。 $\angle T_{\text{fa}}$ の相対値は、エミッタ幅 40 μm の場合で最大 8.0 % の差となるものの、吸収領域長によらずほぼ同じ関係になることが分かる。このことから、吸収領域長を 2 μm とした仮定の下であっても、エミッタ幅の異なる LD 間における $\angle T_{\text{fa}}$ を相対値で議論することは可能である。

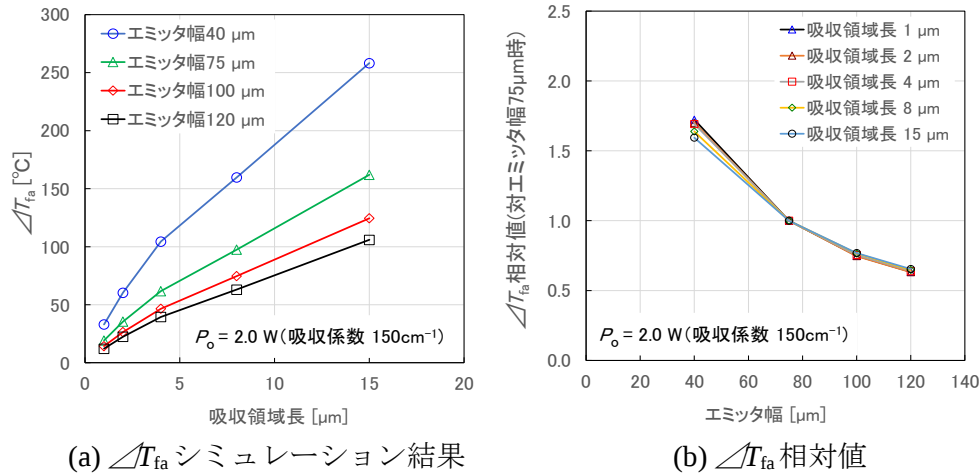


図 4-7 吸収領域長と $\angle T_{\text{fa}}$ の関係 (エミッタ幅依存性)

図 4-8(a)および(b)は、エミッタ数が異なる LD の場合で、図 4-7 と同様の熱シミュレーションを実施した結果である。図 4-8(b)の結果から、吸収領域長がいかなる場合でも、エミッタ数が異なる LD 間における $\angle T_{\text{fa}}$ の相対値は同じになることが分かった。

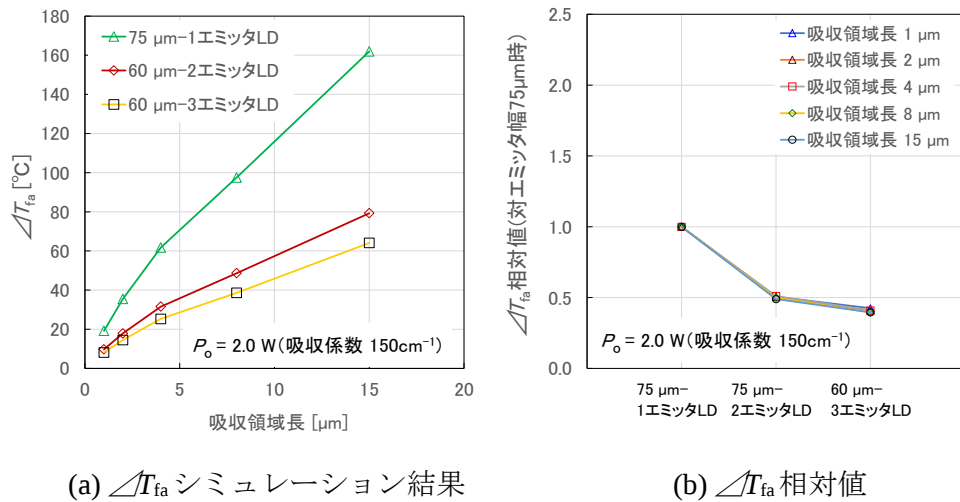


図 4-8 吸収領域長と $\angle T_{\text{fa}}$ の関係 (エミッタ数依存性)

次に吸収係数が実際と異なった場合の影響について議論する。図 4-9(a)は、吸収係数を 150 cm^{-1} から 3500 cm^{-1} まで変化させたときの $\angle T_{\text{fa}}$ をエミッタ幅が 40, 75, 100, 120 μm の 1 エミ

ッタ LD の場合について求めたものである。図 4-9(b)は、吸収領域長が異なる場合の $\angle T_{fa}$ の変化を、エミッタ幅 75 μm の時の $\angle T_{fa}$ を 1 としたときの相対値として表したものである。 $\angle T_{fa}$ の相対値は、吸収係数に依らず同じとなることから、吸収係数を 150 cm^{-1} とした仮定の下であっても、エミッタ幅の異なる LD 間における $\angle T_{fa}$ を相対値で議論することは可能である。 $\angle T_{fa}$ の相対値が変化しないのは、端面発熱量と端面温度の関係が式 (4-3) のような熱方程式で表されると共に、両者の比例係数である熱抵抗値は、エミッタ幅によって一意に決まるためである。

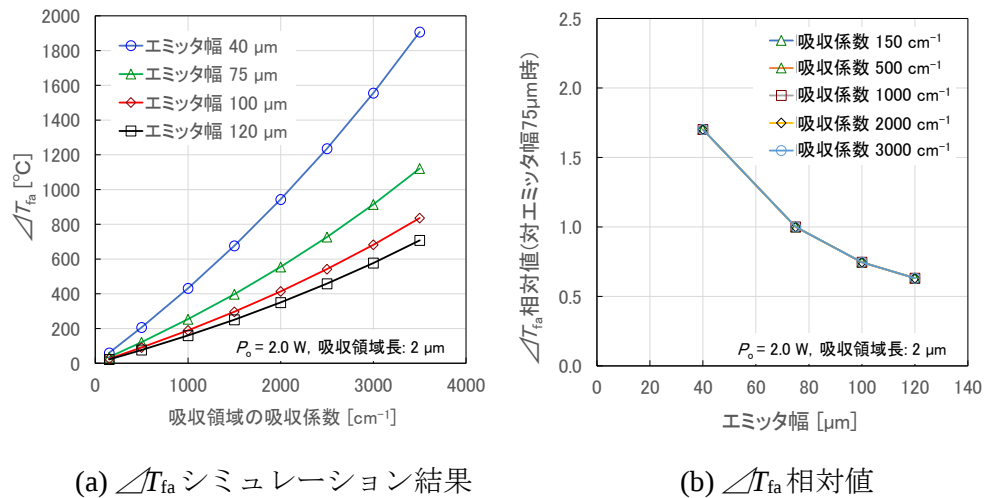


図 4-9 吸収係数と $\angle T_{fa}$ の関係（エミッタ幅依存性）

図 4-10(a)および(b)は、エミッタ数が異なる LD の場合で、図 4-9 と同様の熱シミュレーションを実施した結果である。図 4-10(b)の結果から、吸収係数がいかなる場合でも、エミッタ数が異なる LD 間における $\angle T_{fa}$ の相対値は同じになる。

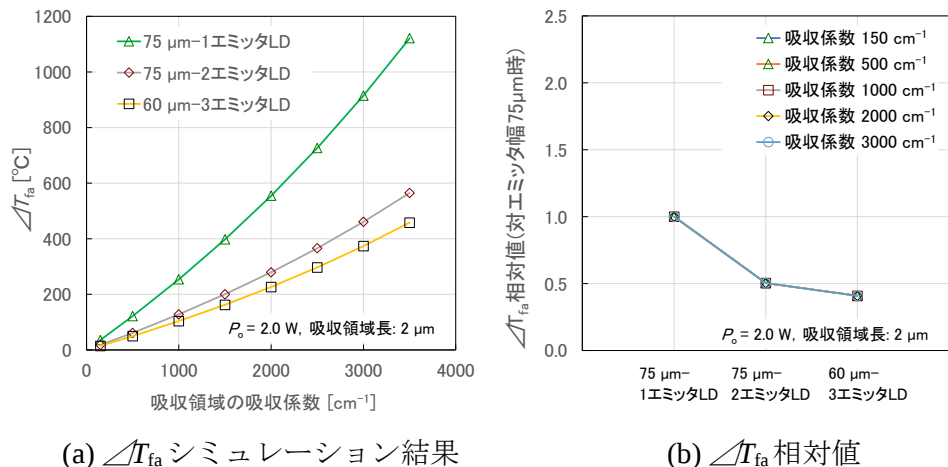


図 4-10 吸収係数と $\angle T_{fa}$ の関係（エミッタ数依存性）

以上のことを踏まえ、本研究では吸収領域長を $2\text{ }\mu\text{m}$ 、吸収係数を 150cm^{-1} と仮定して $\angle T_{\text{fa}}$ の絶対値を算出するが、これを用いた議論は $\angle T_{\text{fa}}$ の比で行うことにする。

4.2.4 COMD を発生させる推定要因

エミッタ幅が異なる 1 エミッタ LD の COMD レベル測定結果を図 4-11 に示す。高光出力領域での光出力飽和を抑制するため、LD ホルダ温度を $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで下げ、低デューティ比のパルス駆動によって COMD レベルを測定した。図 4-2 のとおり、COMD レベルの動作温度依存性はほとんど無いことが分かっている。

次に、吸収領域長を $2\text{ }\mu\text{m}$ 、吸収係数を 150cm^{-1} と仮定した上で、4.2.3 節で示した方法によって様々なエミッタ幅を持つ LD における $\angle T_{\text{fa}}$ を求めたときに、この $\angle T_{\text{fa}}$ が $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ になる時の光強度を繋げたものを図中に実線で示した。この実線は、実際の COMD レベルとほぼ一致しており、いずれのエミッタ幅においても、 $\angle T_{\text{fa}}$ が同じ値になった時に COMD に至る正のフィードバックが始まること示唆される。4.2.3 項で議論したように、吸収領域長や吸収係数が実際と異なった場合は、 $\angle T_{\text{fa}}$ の絶対値は異なるものの、 $\angle T_{\text{fa}}$ の相対比はエミッタ幅に依存しないことから、この仮説は同じく成り立つことになる。この事実は、4.2.2 項に示した、「光吸収量が $\angle T_{\text{fa}}$ に依存すると考えられることから、 $\angle T_{\text{fa}}$ がある一定の値になった場合に COMD が発生する」との仮説を裏付けるもので、物理的には妥当な結果であり、 $\angle T_{\text{fa}}$ の比がある程度高い精度で求められていることを示唆するものであると考えられる。ここで、光出力を同じにして LD のホルダ温度を変化させた場合は、前端面と活性層利得領域の両方の温度が同じだけ変化するため、 $\angle T_{\text{fa}}$ は変化しない。図 4-2 にある COMD レベルに動作温度依存性がないという結果は、これにより容易に説明が可能となる。

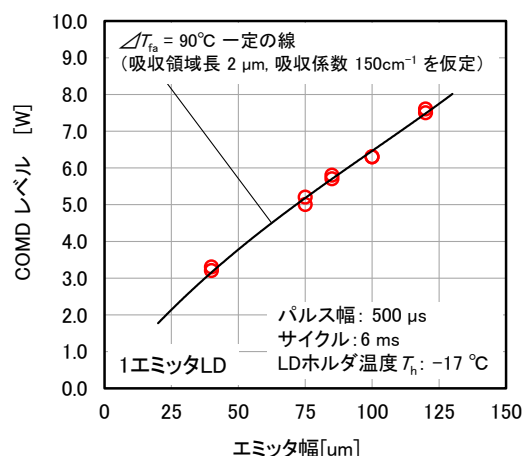


図 4-11 1 エミッタ LD のエミッタ幅と COMD レベルの関係

次に，マルチエミッタ LD において，2.0 W 出力時の前端面温度を熱シミュレーションによって求めた結果を図 4-12 に示す。端面温度は吸収領域長や吸収係数によって変化するため，同じ仮定値を用いたときの相対値を示している。エミッタ全幅を大きくすれば前端面温度は低減するが，エミッタ全幅が同じ場合で比較すると，エミッタ数を増やしたとしても前端面温度を下げることは出来ないことが分かった。これは，図 3-18 のように活性層と LD ホルダ間の熱抵抗値がマルチエミッタ化によって大きく低減するのとは大きく異なっている。

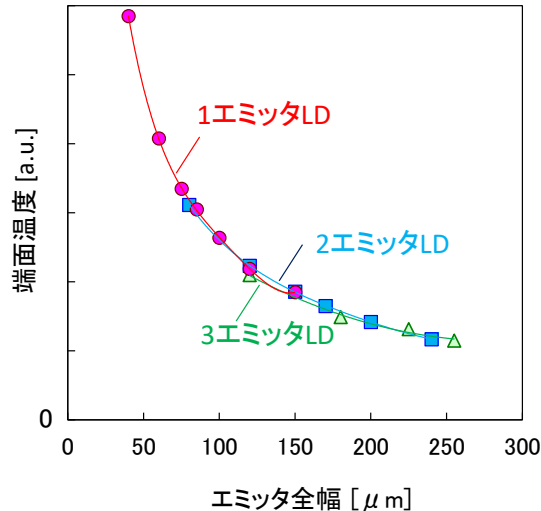


図 4-12 エミッタ幅，エミッタ数と 2.0 W 出力時の前端面温度との関係

この理由を 2 エミッタ LD の場合で説明する。図 4-13(a)に示すように，マルチエミッタ LD の前端面以外の活性層部で発生した熱は，矢印で模式的に示すように熱伝導率の大きい金メッキやサブマウント内で横方向に広がりながら伝達する。2 つのエミッタが離れていることで，熱の干渉が小さくなり温度上昇量は小さくなる。一方，前端面部の活性層で発生した熱は，図 4-13(b)に示すように前端面部直下に放熱体が存在しないことから，図中の矢印で模式的に示すように，横方向にはあまり広がらず，比較的熱伝導率の小さい LD 材料(AlInP)を伝達する。熱が横方向にあまり広がらないことから，マルチエミッタ化による熱干渉の緩和効果は小さくなる。したがって，エミッタ全幅が同じであれば，1 エミッタ LD と 2 エミッタ LD の前端面温度はほぼ同じになる。これは，エミッタ全幅が同じならば，マルチエミッタ構造にしたとしても COMD レベルの改善は出来ないことを意味している。一方で，第3章で議論したように，マルチエミッタ LD の場合はエミッタ全幅を大きくした場合でも，熱抵抗低減効果により高い光出力を得ることが可能である。したがって，エミッタ全幅を大きくすることにより，光出力を落とすことなく COMD レベルを改善することが可能になる。

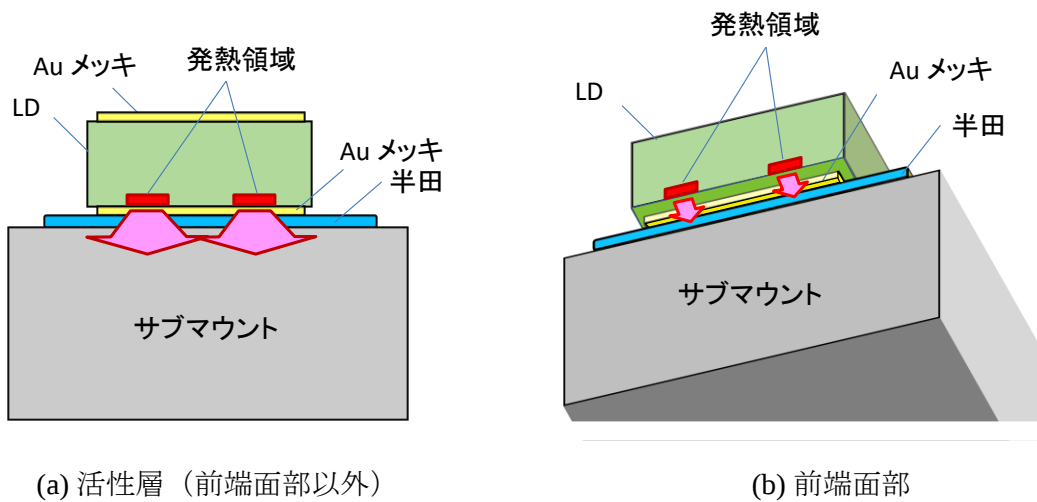


図 4-13 前端面部以外と前端面部の発熱領域と熱伝達経路

4.2.5 COMD レベルの改善方法

前節の議論から、COMD レベルの向上には、 $\angle T_{fa}$ を小さくすることが有効であることが分かった。前端面部に端面窓構造を形成し、前端面近傍の光吸収量を低減することはこれにあたる。他には、前端面と LD ホルダ間の熱抵抗値を、活性層利得領域と LD ホルダ間の熱抵抗値に対して相対的に小さくすることも有効である。

これを実現するための 1 つの方法を、図 4-14 の前端面付近の構造図を用いて説明する。通常、LD の上下面に形成される金メッキは、へき開時に引きちぎられることが無いように、へき開面から離れた位置に形成される。このメッキ端位置と前端面間の距離を L_1 とする。また、サブマウント作製時のダイシング工程において半田が邪魔にならないよう、サブマウント端と半田端間には一定の距離がとられる。同図にあるように、この組立後の LD 端面と半田端の間の距離を L_2 とする。この L_1 および L_2 を小さくすれば、前端面で発生した熱が熱伝導率の大きな金メッキや AuSn 半田を通して排熱されることになり、前端面と LD ホルダ間の熱抵抗値が小さくなると考えられる。

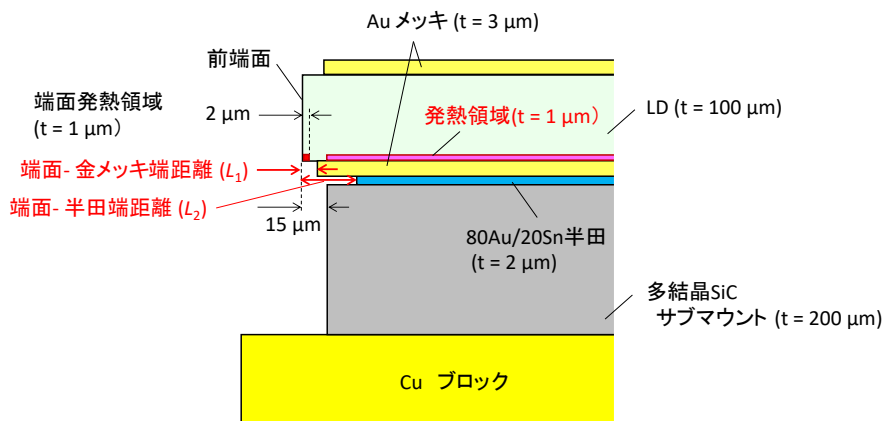
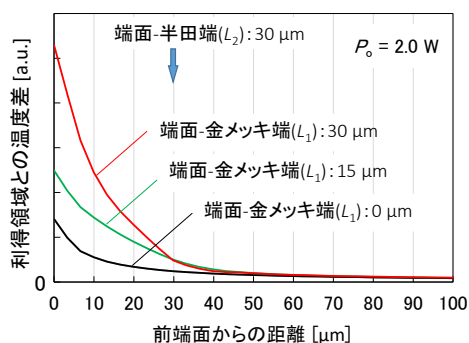
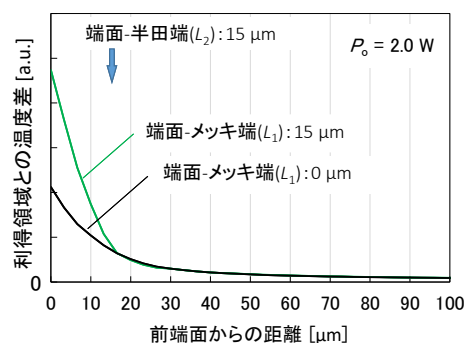


図 4-14 前端面温度低減方法の検討モデル

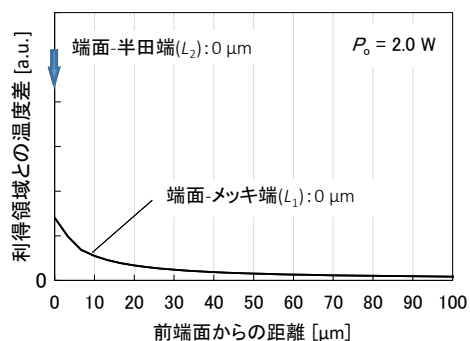
図 4-15(a)は、60 μm -1 エミッタ LD において、 L_2 を 30 μm に固定したまま L_1 を 0, 15, 30 μm としたときの前端面近傍における利得領域との温度差を求めた結果である。図 4-15(b), (c)は、それぞれ L_2 を 15 μm および 0 μm に固定したときの結果である。光出力は 2.0 W と仮定した。



(a) 前端面-半田端距離 (L_2) = 30 μm の場合



(b) 前端面-半田端距離 (L_2) = 15 μm の場合



(c) 前端面-半田端距離 (L_2) = 0 μm の場合

図 4-15 端面温度の熱シミュレーション結果

次に、 ΔT_{fa} をまとめた結果を図 4-16 に示す。この結果から、特に熱伝導率の大きい金メッキの端部を前端面に近づけることで ΔT_{fa} が小さくなることが分かる。例えば、サブマウント端と半田端との距離が 15 μm の場合、前端面と金メッキ端距離を 15 μm から 0 μm にすることで、 ΔT_{fa} は 1/2.23 倍に低減する。4.2.4 項の議論から、温度上昇量が 1/2.23 倍になるということは、COMD 発生時の前端面の発熱量は 2.23 倍まで許容されることになる。この場合、COMD が発生する光出力は 2.23 倍になると予想され、非常に大きな COMD レベルの改善が期待できることになる。一方で、金メッキを前端面まで伸ばす場合、へき開位置に金メッキが存在することになることから、金メッキが分離しにくいといった問題が発生する。また、金メッキ端を前端面から離す場合においても、これが前端面に近い程、高いへき開分離位置精度が要求されることになることには注意が必要である。

本方法は、式(4-6)における θ_{fh} 、すなわち前端面と LD ホルダ間の熱抵抗を低減することによって ΔT_{fa} を低減するものである。したがって、端面窓構造が異なることにより吸収領域における発熱量が変わったとしても、 ΔT_{fa} が低減する方向となるため、COMD を改善するのに有効な方法となる。また、材料系が異なる LD の場合も、同様に COMD レベルの改善が期待される。いずれの場合も、 ΔT_{fa} 値を熱シミュレーションによって求めることにより、COMD レベルの改善量を見積もることも可能であると考えられる。

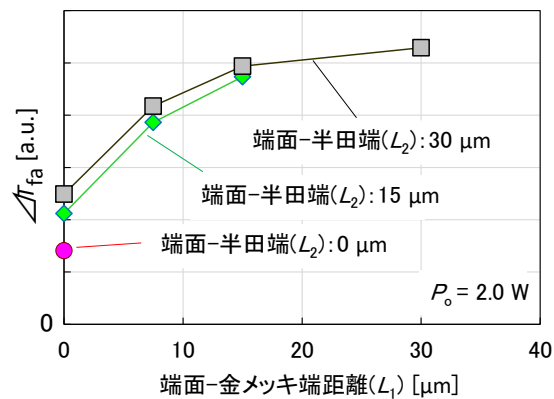


図 4-16 構造を変化させたときの ΔT_{fa} の熱シミュレーション結果まとめ

4.3 Slow 劣化を決定する要因

4.3.1 長期通電試験前後の光出力特性比較

Slow 劣化の原因を推定するためには，劣化前後でしきい電流値やスロープ効率がどのように変化するかを知ることが必要である。そこで，11 個の 75 μm -2 エミッタ LD を用いて，長期通電前と長期通電後つまり Slow 劣化後の光出力特性を比較することにした。通電後の LD は，図 4-17 に示す ACC 通電試験を 2300 時間実施したものを使用した。通電条件は，LD ホルダ温度 43 $^{\circ}\text{C}$ ，動作電流 4.0 A の CW 駆動で，通電開始時の平均光出力は約 2.5 W であった。通電後の平均光出力は約 1.9 W で，約 24 % の光出力低下率であった。

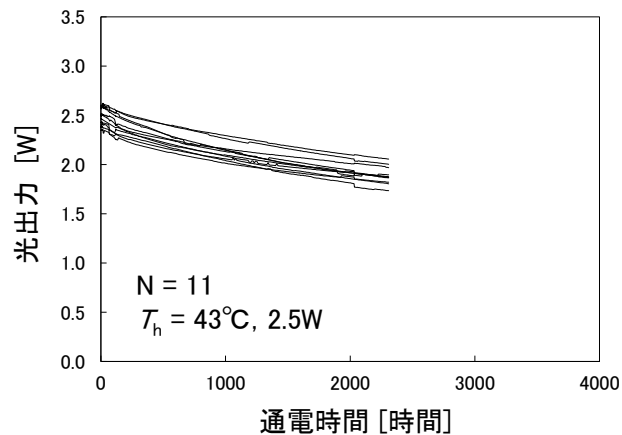


図 4-17 CW 駆動長期 ACC 通電試験結果 (75 μm -2 エミッタ LD)

図 4-18 に通電前および通電後の光出力特性の温度依存性の実測結果を示す。図中実線は通電前の光出力特性で，点線が通電後の光出力特性であり，特に高温側において光出力の低下が顕著になっている。図中には，ホルダ温度 55 $^{\circ}\text{C}$ におけるしきい値近傍のスロープ効率を表す実線を，通電前後の場合について記入している。このスロープ効率は通電前後で変化しているが，これが劣化による素子特性の変化であるのか，しきい電流値が大きくなったことによる発熱量増大によって生じたものなのかを切り分けることは難しい。そこで本研究では，これを切り分けるために，2.2.2 項で議論した活性層温度一定下における光出力特性を求め，活性層温度が同じとなる条件でスロープ効率を比較することにした。

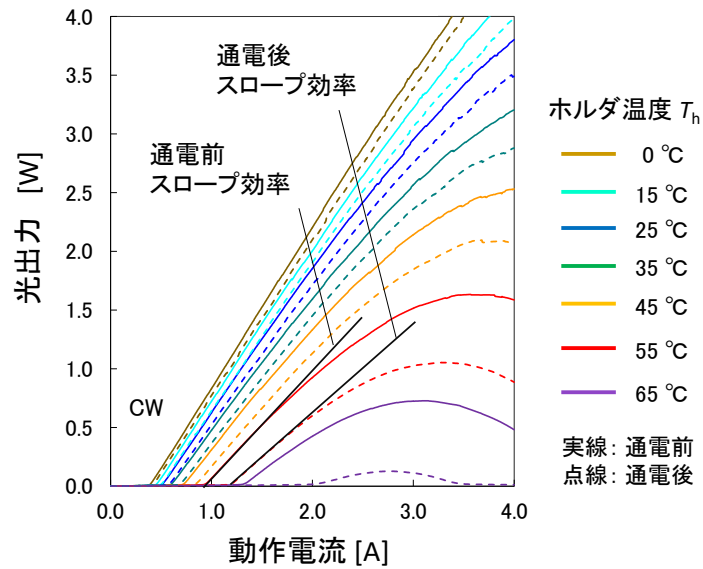


図 4-18 通電前後における光出力特性の温度依存性の比較結果

図 4-19(a)に通電前の、図 4-19(b)に通電後の活性層温度 T_j 一定下の光出力特性を求めた結果を示す。通電後においても図 2-8 と同様に、活性層温度一定下のスロープ効率は全電流量域において一定となっている。これより、通電後においても、電子オーバーフロー量を決定する要因が活性層温度のみであることが分かる。

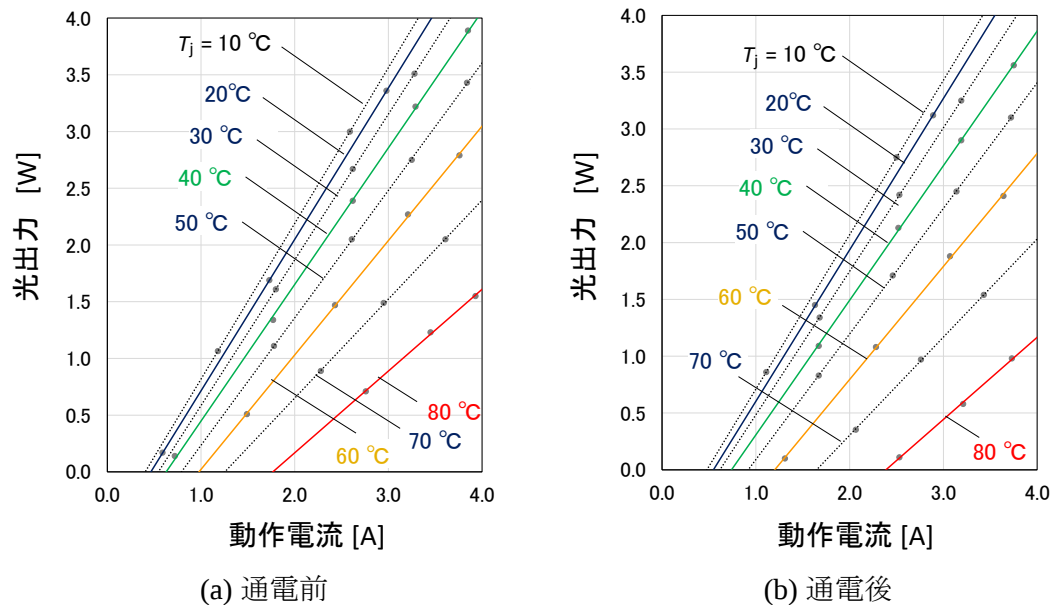
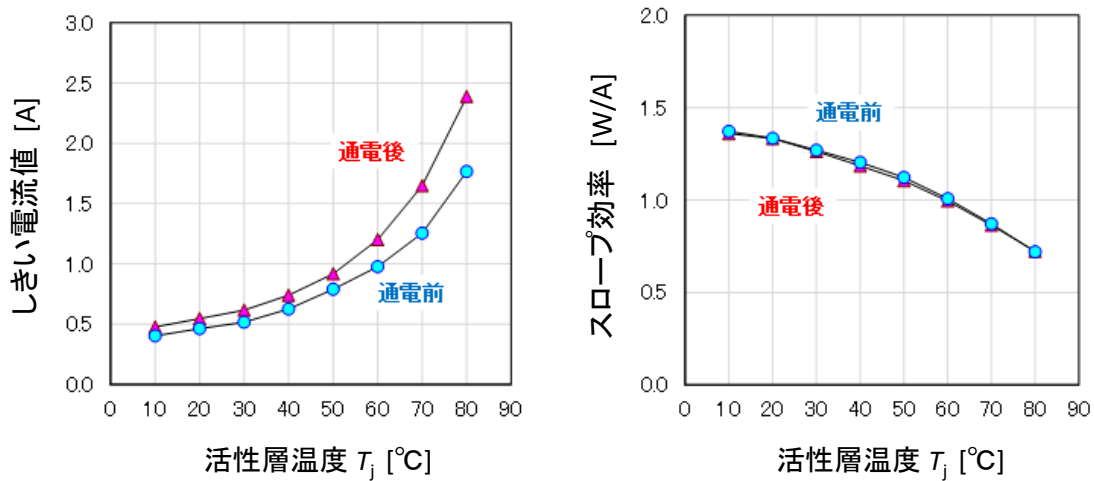


図 4-19 通電前および通電後の活性層温度 T_j 一定時の光出力特性の温度依存性

図 4-20(a)および(b)は、しきい電流値とスロープ効率の活性層温度依存性を図 4-19 から求めた結果である。通電前後を比較すると、通電後にしきい電流値は上昇するものの、スロープ効率はほとんど変化していない。図 4-18 で見られた通電後におけるスロープ効率の低下は、しきい値の上昇により光出力が低下することで活性層温度が上昇し、電子オーバーフローが増大したためであると考えられる。

通電前、通電後ともしきい電流値は加速度的に上昇し、スロープ効率は加速度的に減少している。これは、しきい電流値増大や、これに起因するスロープ効率の低下による光出力低下によって発熱量が増大し、それがさらに活性層温度を上昇させることで電子オーバーフローが顕著になるためであると考えられる。



(a) しきい電流値の活性層温度依存性

(b) スロープ効率の活性層温度依存性

図 4-20 通電前後におけるしきい電流値およびスロープ効率の活性層温度依存性

4.3.2 Slow 劣化を発生させる推定要因と改善方法

前項の議論から、 T_j が一定の条件下では Slow 劣化によってしきい電流値が増大するものの、スロープ効率は変化しないことが分かった。この結果を元に、Slow 劣化の原因を検討する。しきい電流値としきい値キャリア密度の関係は、式 (4-7) に示すキャリア濃度に関するレート方程式から求めることができる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau_n} - \Gamma g(n)S \quad \text{式 (4-7)}$$

ここで、 n はウエル内キャリア密度、 J は電流密度、 q は素電荷量、 d はウエル層厚、 τ_n はキャリア寿命、 Γ はウエル層への光閉じ込め係数、 $g(n)$ は単位時間あたりのウエル層における光利得係数で n の関数となる。 S は光子密度である。キャリア寿命 τ_n は式 (4-8) で表すことができる。

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad \text{式 (4-8)}$$

τ_s は自然放出によるキャリア寿命、 τ_{nr} は非発光再結合によるキャリア寿命である。定常状態では式 (4-7) の左項は 0 であることから、定常状態におけるキャリア密度 n は式 (4-9) で表される。

$$n = \tau_n \left(\frac{J}{qd} - \Gamma g(n) S \right) \quad \text{式 (4-9)}$$

さらに、発振しきい値においては、光子密度が 0 であることから、式 (4-9) において $S=0$ としたときの電流密度がしきい電流密度 J_{th} となる。また、この時のウエル層内キャリア密度が、しきい値キャリア密度 n_{th} である。よって、式 (4-9) から式 (4-10) の関係が導かれる。

$$J_{th} = \frac{qd}{\tau_n} \cdot n_{th} \quad \text{式 (4-10)}$$

n_{th} は、モード利得が全光損失に一致するときのウエル層内キャリア密度である。このことと式 (4-10) から、通電後にしきい電流値、すなわちしきい電流密度が大きくなる原因としては、①全光損失が大きくなることで n_{th} が上昇する、② n_{th} に対するモード利得が小さくなり n_{th} が上昇する、③ J_{th} とは別となる、電流リークや電子オーバーフロー、オーグエ再結合など n_{th} の増大に寄与しない電流の増加、④ウエル層内のキャリア寿命 τ_n が小さくなることによって J_{th} が上昇する、の 4 つが考えられる。

最初に、①の全光損失が大きくなり n_{th} が上昇している可能性について議論する。LD の発振条件は、モード利得、つまり単位長あたりのウエル層における利得係数を $g'(n)$ としたときの $\Gamma g'(n)$ が全光損失と釣り合うことである。これは、内部損失を α_i 、ミラー損失を α_m としたときに、式 (4-11) で表すことができる。しきい値キャリア密度 n_{th} が変化するのは α_i 、 α_m が変化した場合であることが分かる。 α_m は共振器長 L_c 、前端面反射率 R_f 、後端面反射率 R_r 、により式 (4-12) で表される。

$$\Gamma g'(n_{th}) = \alpha_i + \alpha_m \quad \text{式 (4-11)}$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2L_c} \ln \left(\frac{1}{R_f R_r} \right) \quad \text{式 (4-12)}$$

4.3.1 項では、”通電後はしきい電流値のみが上昇し、同じ T_j におけるスロープ効率は変化しない”，という結果を得た。ここで、スロープ効率 SE は、式(4-13)のとおり外部量子効率 η_d に比例する。 η_i は内部量子効率である。

$$SE \propto \eta_d = \eta_i \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad \text{式 (4-13)}$$

図 4-20(b)のとおり、通電後においても、あらゆる活性層温度において SE は変化しない。したがって、 α_i や α_m が通電後に変化しているとする、全ての活性層温度に対し SE が一定になるよう η_i も通電後に変化しているはずである。しかしながら、 η_i , α_i , および α_m は、独立に変化する量であり、このようなことが起こる可能性は極めて低い。また、 α_m は式(4-12)のように共振器長 L_c と R_f , R_r のみで決定されるが、共振器長 L_c が通電中に大きく変化することや、端面コーティング材料が通電中に変質するなど、前端面反射率や後端面反射率が大きく変化することも考えにくい。

次に、②のモード利得 $\Gamma g'(n_{th})$ が小さくなり n_{th} が増大している可能性について議論する。ここで、通電によって LD 内部の材料組成などが変化することは考えにくいことから、活性層付近の屈折率は変化せず、光閉じ込め係数 Γ は変化しないと考えられる。一方、媒質利得 $g'(n)$ は、バンド構造の変化によって変化すると考えられるが、バンド構造が変化すれば、状態密度の変化に起因する擬フェルミ準位の変動によって、電子オーバーフロー量やオージェ再結合量の変化で η_i が変化はせずである。また、エミッタ横の損失領域で発生するバンド端光吸収量係数が変化することで α_i も変化するはずである。しかし、実際にはスロープ効率 SE の変化は見られていないことから、通電前後で $\Gamma g'(n)$ が変化している可能性は低い。

③の電流リークや電子オーバーフロー、オージェ再結合に起因する無効電流は、内部量子効率 η_i を低下させるため、 SE が変化するはずである。したがって、これが原因である可能性が低い。

これらのことから、通電中におけるしきい電流の上昇は、④のウエル層内のキャリア寿命 τ_n が小さくなることに起因すると考えられる。式(4-8)に示すように、しきい電流値上昇の原因と考えられるウエル内キャリア寿命 τ_n の増加は、発光再結合レートの増大 $1/\tau_s$, あるいは非発光再結合レート $1/\tau_{nr}$ の増大によるものである。ここで、発光再結合レートの増大、すなわち発光効率の増大が通電中に発生するとは考えにくい。よって、ウエル層における非発光再結合レートの増大が、しきい電流値増大の根本的な原因であると考えられる。

この非発光再結合レートの増大がスロープ効率に与える影響について議論する。通電中のしきい電流値の増大は、非発光再結合によるウエル層内のキャリア密度の低下を補填するためのものである。これまでの議論のように光損失量は通電中に変化しないため、発振に必要なしきい値キャリア密度は変化しない。したがって、しきい値キャリア密度に依存するオージェ再結

合による無効電流量や価電子帯間吸収による光吸収量は変化しないはずである。また、誘導放出によるキャリア寿命は ps オーダーであり、非発光再結合による ns オーダーのキャリア寿命よりも大幅に短い。したがって、非発光再結合レートが増大しても、内部量子効率の変化はほとんどなく、スロープ効率に与える影響も小さいはずである。このことが、通電後のスロープ効率の変化がほとんどない理由と考えられる。

ここで、ループ転位の増殖などの局所的な結晶欠陥は、周期的となっている結晶構造の乱れを意味しており、必ず光損失を伴うものである。通電前後で光損失の増大がないことは、このような光吸収を伴う局所的な結晶欠陥が、Slow 劣化の原因でないことを示すものである。また、局所的な結晶欠陥が、ウエル層全体のしきい値キャリア密度を低下させることも考えにくい。したがって、赤色 LD における Slow 劣化点の原因は、ループ転位などの局所的な転位ではなく、ウエル層全体に存在する点欠陥や不純物等に起因する深い準位などであると考えられる。点欠陥などは結晶成長条件の最適化により低減できる可能性がある。また、赤色 LD では p 型クラッド層からの不純物が濃度拡散を起こしやすいため、不純物濃度やその添加位置を工夫することで不純物拡散を抑えることも、Slow 劣化低減に効果的と考えられる。

4.4 まとめ

本章では、MTTF を制約する COMD と Slow 劣化の 2 つの劣化モードに対し、その劣化原因の究明と改善方法の検討を行った。

最初に、前端面と活性層利得領域との温度差である ΔT_{fa} が COMD に関係すると考え、熱シミュレーションを用いて ΔT_{fa} を推定することを検討した。この ΔT_{fa} は端面近傍に存在する吸収領域の長さ、および吸収係数に依存するものの、これらの実際の値を推定することは非常に困難である。そこで、構造間における ΔT_{fa} の相対関係が、吸収領域長や吸収係数にほとんど影響されないことを示すことで、 ΔT_{fa} の比を議論することが可能であることを明らかにした。その結果、エミッタ幅が異なる場合においても、COMD が発生する光出力における ΔT_{fa} はすべて同じであることが判明した。このことから、赤色 LD における COMD は、 ΔT_{fa} がある臨界値を超えた場合に、端面温度上昇とバンドギャップ縮小との正フィードバックが始まり発生するものと考えられる。この結果を元に、COMD レベルの改善方法を議論した結果、金メッキによる放熱を利用することで ΔT_{fa} が低減され、COMD 耐性を大幅に向上出来る可能性があることを示した。

次に、Slow 劣化の前後において、活性層温度一定時の光出力特性を比較することで、Slow 劣化による光出力低下はしきい電流値の増大の結果であり、スロープ効率の変化はほとんどないことを明らかにした。また、この変化はウエル層における非発光再結合レートの増大でしか

起こりえないことを見出し、GaInP ウェル層をもつ AlGaInP/GaAs 系 LD における Slow 劣化の原因が、他の材料系の場合と同様に、非発光再結合中心の増大、それもループ転位などの局所的な転位ではなく、ウェル層全体に存在する点欠陥あるいは不純物等に起因する深い準位などに起因している可能性が高いことを示した。

第5章：赤色 LD の平均故障時間 (MTTF) 予測

5.1 はじめに

これまで検討してきた、横マルチモード赤色 LD は、100 lm 前後の明るさを持つ手のひらサイズの小型プロジェクターから、数千 lm 前後の卓上、業務用プロジェクター、さらには 20,000 から 50,000 lm クラスのシネマ用プロジェクターにまで使用されるものである。これらのプロジェクターでは、少なくとも数年間メンテナンスフリーであることが要求されるため、光源の MTTF としては 20,000 時間以上であることが 1 つの目安となっている。したがって、どのような使用条件（光出力、温度、駆動方式）下で、どの程度の MTTF を持つかを知ることが必須である。

一方で、20,000 時間は約 2.3 年に相当することから、加速寿命試験によって、できるだけ短い試験時間で MTTF を予測することも重要である。さらに、出来るだけ少ない試験数によって、多岐にわたる使用条件下における MTTF を予測することも必要になる。本章では、COMD および Slow 劣化モードのそれぞれについて、劣化を加速するパラメータとその加速係数を調査する。また、それらと熱シミュレーションを組み合わせることで、LD 素子の作製や通電試験の実施をすることなく MTTF を予測する方法を確立する。

5.2 COMD の加速要因とその MTTF の予測

あるエミッタ構造 A を持つ赤色 LD (LD1) と、これとは異なるエミッタ構造 B を持つ赤色 LD (LD2) があり、両者の前端面の窓の構造は同じであるとする。4.2.4 項で得られた結果から、LD1 の COMD 発生時における前端面と活性層の利得領域との温度差 ΔT_{fa} が T_0 であったとすると、LD2 で COMD が発生するのは ΔT_{fa} が同じく T_0 になるときの光出力である。

次に、これらの LD の COMD 起因の平均故障時間 (MTTF(COMD)) について議論する。LD1 が光出力 P_1 で $\Delta T_{fa} = T_1$ に、LD2 ではその 2 倍の光出力 $2P_1$ で $\Delta T_{fa} = T_1$ になると仮定する。LD1 を出力 P_1 で、LD2 を出力 $2P_1$ で通電した場合、 ΔT_{fa} はともに T_1 で、かつ窓構造が同じであることから、通電開始直後における前端面の劣化速度は同じになる。したがって、この端面の劣化による前端面近傍の光の吸収係数変化量は、LD1 と LD2 で同じとなる。この場合、LD2 の光出力が LD1 の光出力の 2 倍となるため、LD2 の光吸収量の増分は LD1 の 2 倍となるが、 ΔT_{fa} の光吸収量依存性は 1/2 であるので、 ΔT_{fa} の増分は、LD1 と LD2 で同じとなる。このよ

うに、通電のどの時点においても LD1 と LD2 の $\angle T_{fa}$ は同じになることから、 $\angle T_{fa}$ が COMD の発生する値に到達する時間、すなわち MTTF(COMD)は同じになるはずである。

以上のことから、通電開始時の $\angle T_{fa}$ が同じ場合は構造によらず MTTF(COMD)は同じになる、言い換えると MTTF(COMD)は、通電開始時の $\angle T_{fa}$ の関数になる。ここで、LD のエミッタ構造を固定した場合は、 $\angle T_{fa}$ は光出力に比例するため、MTTF(COMD)を議論する際には $\angle T_{fa}$ の代わりに光出力で議論しても問題ない。40 μm -1 エミッタ LD における光出力と MTTF(COMD) との関係は、文献(74)で明らかにされている。この文献では、表 5-1 の試験条件で定電流駆動（ACC 駆動）での通電試験を実施し、COMD 故障が発生する時間をワイブルチャートにプロットした結果（図 5-1）から MTTF(COMD)の光密度依存性（図 5-2）を求めている。図 5-1 中の m は、ワイブル分布における確率密度の形状を表す形状パラメータで、 m 値は約 3.5 であった。この場合の確率密度の形状は MTTF 値近傍で急激に増大するようなものであり、COMD は摩耗故障モードであると言える。

表 5-1 通電試験条件一覧（文献(74)より引用）

条件 (Condition)	光出力 [W]	活性層 温度[K]	光密度 [W/cm ²]	電流密度 [kA/cm ²]	数量 [pcs]
A	1.5	310	1.18×10^5	2.67	8
B	1.3	316	1.02×10^5	2.50	20
C	1.0	329	7.84×10^4	2.50	29

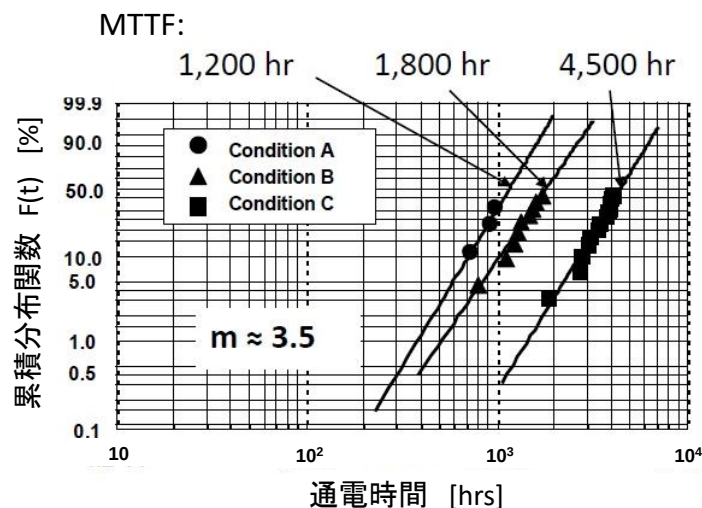


図 5-1 COMD のワイブルチャートプロット（文献(74)より引用）

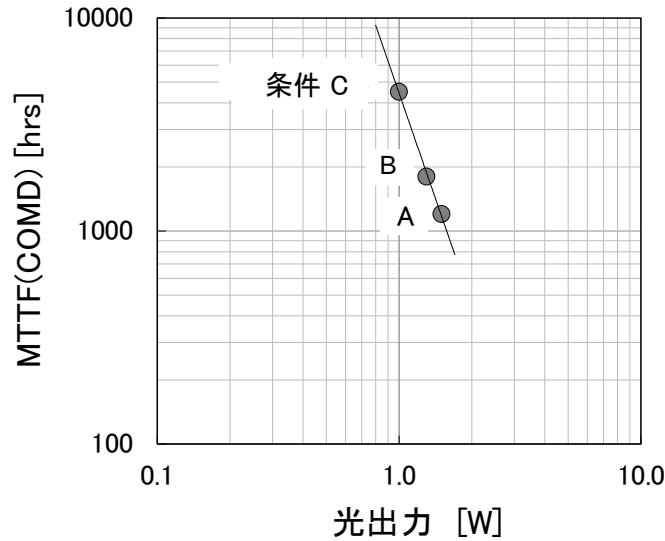


図 5-2 光出力と MTTF(COMD)の関係 (文献(74)より引用)

図 5-2 から、条件 A, B, C それぞれの MTTF(COMD)は、図中の直線で示すように光出力のべき乗測に従っていると考えられる。この直線は、 C_1 を定数、光出力を P_1 として式 (5-1) で記述できる。

$$MTTF(COMD) = C_1 \cdot P_1^{-3.2} \quad \text{式 (5-1)}$$

図 4-6 を用いて議論したように、同一素子、つまり前端面における光吸収係数が同じ場合、 $\angle T_{fa}$ は光出力 P_1 に比例する。このことと、式 (5-1) の関係を用いれば、 $\angle T_{fa}$ から MTTF(COMD)を求めることが可能になるはずである。

ここで、40 μm -1 エミッタ LD の場合の $\angle T_{fa}$ 値を $\angle T_{fa1}$ とすると、 $\angle T_{fa1}$ は光出力 P_1 に対する光吸収量の比 γ 、および前端面と LD ホルダ間の熱抵抗値 θ_{fh1} を用いて、式 (4-4) と同様に、

$$\Delta T_{fa1} = \gamma \cdot P_1 \cdot \theta_{fh1} \quad \text{式 (5-2)}$$

で表すことができる。ここで、式 (4-4) のとおり、前端面近傍の構造と反射率が決まれば γ は定数となる。この 40 μm -1 エミッタ LD と同じ条件で作製された窓構造を持ち、エミッタ構造だけが異なる LD の場合は、吸収領域の吸収係数 α は同じになることから、光出力 P_2 に対する光吸収量の比は先の構造と同じく γ となる。前端面と LD ホルダ間の熱抵抗値は、エミッタ構造が異なることから θ_{fh1} とは異なる値 θ_{fh2} となるので、光出力 P_2 のときの $\angle T_{fa}$ 値である $\angle T_{fa2}$ は式 (5-2) と同様に式 (5-3) で表される。

$$\Delta T_{\text{fa2}} = \gamma \cdot P_2 \cdot \theta_{\text{fh2}} \quad \text{式 (5-3)}$$

先の議論のとおり、 $\angle T_{\text{fa1}}$ が $\angle T_{\text{fa2}}$ と一致するとき、つまり、

$$\gamma \cdot P_1 \cdot \theta_{\text{fh1}} = \gamma \cdot P_2 \cdot \theta_{\text{fh2}} \quad \text{式 (5-4)}$$

の場合に MTTF(COMD)が一致すること、および式 (5-1)から式 (5-5) の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} \text{MTTF}(\text{COMD}) &= C_1 \cdot P_1^{-3.2} = C_1 \cdot \left(\frac{\theta_{\text{fh2}}}{\theta_{\text{fh1}}} \right)^{-3.2} \cdot P_2^{-3.2} \\ &= C_2 \cdot P_2^{-3.2} \end{aligned} \quad \text{式 (5-5)}$$

つまり、エミッタ構造や窓構造などが異なる場合においても MTTF(COMD)は光出力の-3.2 乗に比例する。また、定数 C_1 と C_2 の関係は式 (5-5) より

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{\theta_{\text{fh2}}}{\theta_{\text{fh1}}} \right)^{-3.2} \quad \text{式 (5-6)}$$

となることが分かる。光出力が同じ ($P_1 = P_2$) 場合の $\angle T_{\text{fa1}}$ と $\angle T_{\text{fa2}}$ の比は、式 (4-6) より θ_{fh1} と θ_{fh2} の比に一致するので、式 (5-6) は、

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{\Delta T_{\text{fa2}}}{\Delta T_{\text{fa1}}} \right)^{-3.2} \quad \text{式 (5-7)}$$

となる。つまり、MTTF(COMD)は、光出力が同じ場合の $(\angle T_{\text{fa2}} / \angle T_{\text{fa1}})$ の-3.2 乗に比例してことになる。以上のとおり、2 つの LD が同じ条件で作製された窓構造を持つならば、いかなるエミッタ構造であっても、式 (5-7) の関係から MTTF(COMD)を推定することが可能となる。4.2.3 項で議論したように、 $\angle T_{\text{fa}}$ の真値を求めることは不可能であるが、式 (5-7)にあるような、異なる構造間の $\angle T_{\text{fa}}$ の比は熱シミュレーションによって求めることができる。

他の材料系の LD の場合も、COMD の発生原理は赤色 LD の場合と同じであることから、COMD レベルは $\angle T_{\text{fa}}$ に相関すると考えられる。また、 $\angle T_{\text{fa}}$ は式 (4-6) のとおり光出力に比例する。したがって、式 (5-1) のような MTTF(COMD)と光出力の関係式を実験により求めることが出来れば、光出力 P_0 と $\angle T_{\text{fa}}$ の比例関係を用いることで、この関係式を MTTF(COMD)と $\angle T_{\text{fa}}$

の関係式に変換することが出来る。そして、この関係式を用いることで、他の材料系の LD においても MTTF(COMD)の予測が可能になることが期待される。

次に、実際のマルチエミッタ LD の通電試験結果から、式(5-1)の係数を求め、MTTF(COMD)の求式を確定することにする。本研究で用いた 1 エミッタおよびマルチエミッタ LD は、表 5-1 の通電試験に用いた赤色 LD に対して Zn 拡散条件を変更して窓構造を強化している。つまり、式 (5-2) 内にある、光出力に対する前端面光吸収量の比 γ が異なるものである。この場合、窓構造領域の Zn 量に多少の差はあるものの、材料が同じであることから、界面の状態変化の温度依存性などを意味する COMD レベル低下速度の活性化エネルギーは変化しないと予想される。したがって、この場合も、MTTF(COMD)は、式 (5-1) で示すような光出力の-3.2 乗則に従うと仮定した。

図 5-3 は、75 μm -2 エミッタ LD に対し、ケース温度を 20 $^{\circ}\text{C}$ まで低下させることで、高光出力下での ACC 通電を実施した結果である。図中の $N(\text{LD})$ は通電を実施した LD 数である。動作電流は CW で 3.5 A、初期の光出力は 3.55 W とした。LD 数は 12 個で、2 エミッタ構造であるので総エミッタ数は 24 である。3,000 時間前後で光出力が 1/2 程度に低下するものがあるが、これは COMD によって 2 つあるエミッタのうちの 1 つが COMD によって故障したためである。光出力が 0 近傍まで低下しているのは、2 つのエミッタが劣化したためである。劣化した LD の前端面の EL (Electro-Luminescence) パターン観察を実施した結果、すべての素子において、前端面のエミッタ領域に発光しない部分が認められたことから、すべての素子の劣化が COMD によるものであるといえる。

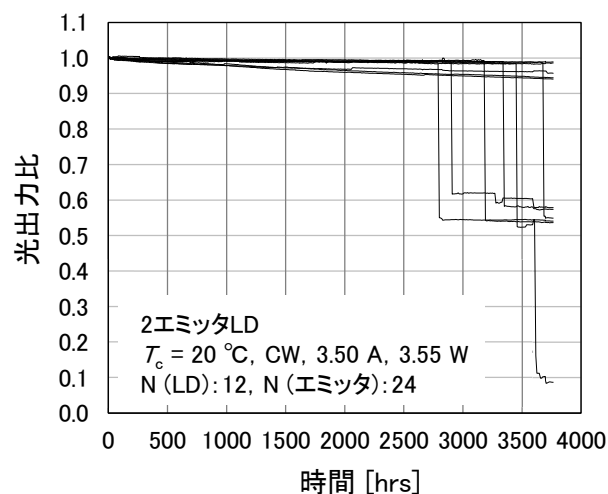


図 5-3 75 μm -2 エミッタ LD の CW 駆動長期 ACC 通電試験結果

図 5-4 は、60 μm -3 エミッタ LD の ACC 通電結果である⁽⁵¹⁾。動作電流は CW で 3.56 A、初期の光出力は 3.5 W であった。LD 数は 21、総エミッタ数は 63 であった。3 エミッタ構造であ

るため、1つのエミッタが COMD によって劣化した場合の光出力低下量は約 1/3 となっている。これについても、全ての劣化が COMD によるものであった。

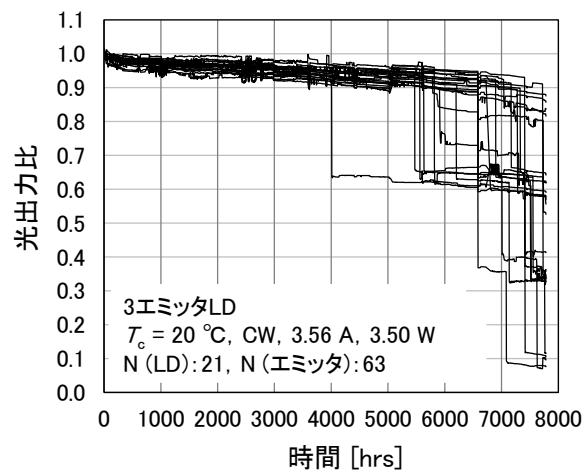


図 5-4 60 μm - 3 エミッタ LD の CW 駆動長期 ACC 通電試験結果 (文献(51)より引用)

図 5-5 は、図 5-3 および図 5-4 の通電試験において、各エミッタの故障時間をワイブルチャートにプロットした結果である。いずれの場合も、故障時間のプロットが直線に乗っていることから、この COMD による劣化時間がワイブル分布に従うことが分かる。ワイブル分布の形状パラメータ m 値はいずれも 7.08 であることから、COMD は摩耗モードであることが分かる⁽¹¹²⁾。 m 値が図 5-1 の場合の約 3.5 とは異なる理由としては、窓構造作成時の Zn の拡散時間の最適化などにより、窓構造のばらつきが小さくなっていることにより、COMD の劣化時間の分散が小さくなっていることが考えられる。図 5-5 に示す 2 エミッタ LD と 3 エミッタ LD は、同じ条件で作製した窓構造を持つことから、同じ m 値になったと考えられる。

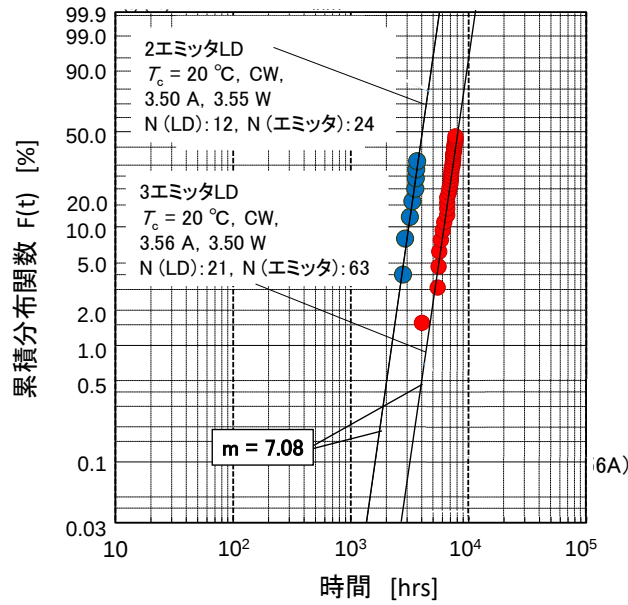


図 5-5 2 エミッタ LD と 3 エミッタ LD の COMD 劣化時間のワイブルプロット

図 5-5 から求めた 75 μm - 2 エミッタ LD の 3.55 W 出力時の MTTF(COMD)は、3,990 時間であった。この結果と式 (5-1) より、75 μm - 2 エミッタ LD の MTTF(COMD)の予測値は式 (5-8) のようになる。

$$\begin{aligned} \text{MTTF}(\text{COMD}, 75\mu\text{m} \times 2) &= 3,990 \times (P_0/3.55)^{-3.2} \\ &= 2.30 \times 10^5 \times P_0^{-3.2} \end{aligned} \quad \text{式 (5-8)}$$

本方法による MTTF(COMD)の予測精度を確認するために、75 μm - 2 エミッタ LD の MTTF(COMD)から 60 μm - 3 エミッタ LD の MTTF(COMD)を予測し、図 5-4 の実通電で得られた MTTF(COMD)と比較することにする。両 LD の窓構造は同じ条件で作製しているので、式 (5-5) により MTTF の予測が可能である。2.0 W 出力時の $\angle T_{\text{fa}}$ を、4.2.3 項に示したように吸収領域長を 2 μm 、吸収係数を 150 cm^{-1} と仮定して求めた結果、75 μm - 2 エミッタ LD の場合で 17.9 $^{\circ}\text{C}$ 、60 μm - 3 エミッタ LD の場合で 14.5 $^{\circ}\text{C}$ となった。両者の比はこの仮定値に依存しないことから、60 μm - 3 エミッタ LD の場合の MTTF(COMD)の予測式は式 (5-9) のようになる。

$$\begin{aligned} \text{MTTF}(\text{COMD}, 60\mu\text{m} \times 3) &= 230,000 \times (14.5/17.9)^{-3.2} \times P_0^{-3.2} \\ &= 4.51 \times 10^4 \times P_0^{-3.2} \end{aligned} \quad \text{式 (5-9)}$$

この予測式から、3.5 W 出力時の MTTF(COMD)を求めた結果は約 8,200 時間であった。一方、図 5-4 に示す長期通電試験の結果から得られた MTTF(COMD)は約 8,000 時間であった。両者がよく一致していることから、 $\angle T_{fa}$ を用いた信頼性予測の精度が高いことが分かる。75 μ m- 1 エミッタ LD の場合は、2.0 W 出力時の $\angle T_{fa}$ が同仮定では 36.0 $^{\circ}$ Cになるので、MTTF(COMD)の予測式は式 (5-10) のようになる。

$$\begin{aligned} \text{MTTF}(\text{COMD}, 75 \mu\text{m} \times 1) &= 230,000 \times (36.0/17.9)^{-3.2} \times P_0^{-3.2} \\ &= 2.46 \times 10^4 \times P_0^{-3.2} \end{aligned} \quad \text{式 (5-10)}$$

5.3 Slow 劣化の加速要因とその MTTF の予測

次に、Slow 劣化速度の通電条件依存性を調査するため、3.6.1 項に示した 75 μ m- 2 エミッタ LD を異なる条件下で通電した。その一例を図 5-6 に示す。試験はすべて CW の ACC 駆動で行った。図 5-6(a) の通電試験条件は $T_c = 20^{\circ}\text{C}$ 、 $P_0 = 3.55 \text{ W}$ で、図 5-6(b) は $T_c = 45^{\circ}\text{C}$ 、 $P_0 = 2.2 \text{ W}$ 、図 5-6 (c)は $T_c = 47^{\circ}\text{C}$ 、 $P_0 = 2.5 \text{ W}$ である。図 5-6(a)でみられる突然の光出力低下は COMD によるものであり、光出力が徐々に低下するモードが Slow 劣化モードである。この Slow 劣化による光出力の低下率は、 T_c が高いほど大きいことが分かる。

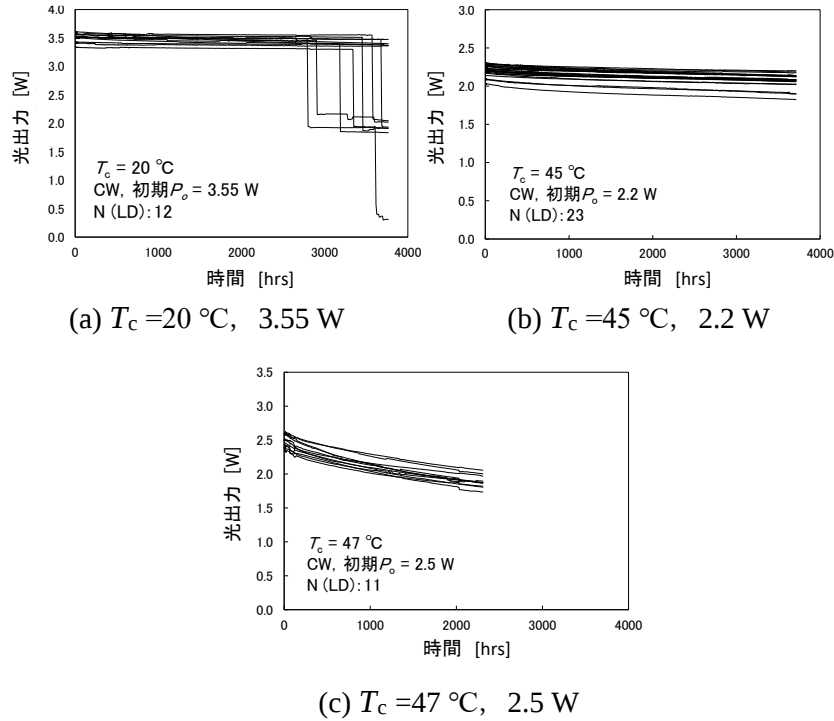


図 5-6 75 μ m- 2 エミッタ LD の CW 駆動長期 ACC 通電結果の例

これらの長期通電試験は、2,000 から 4,000 時間程度までの試験結果となっている。Slow 劣化の劣化速度は通電初期で比較的早い、ある時間を経過すると劣化速度が飽和してほぼ一定になることが分かった。そこで、この劣化速度が一定となる領域から外挿線を引くことで、長時間経過後の光出力を予想することにした。一般的なディスプレイにおいては、明るさが初期の 1/2 以下になった場合を故障と判定とすることが多い。そこで、本研究では、赤色 LD の光出力が 1/2 になった時間を各赤色 LD の MTTF と定義し、この各 MTTF のワイブルプロット図から、平均故障時間 (MTTF(Slow)) を求めた。

図 5-7 は、6 つの異なる通電条件における 75 μm - 2 エミッタ LD の MTTF(Slow) と、活性層温度 T_j との関係プロットした結果である。6 つの通電条件は、図 5-6 に示した 3 つの通電条件に別の 3 つの条件を加えたものであり、図 5-7 中の括弧内にケース温度、電流値、光出力の順で記載している。通電はすべて CW 駆動で実施した。図中の横軸は T_j を絶対温度として $1000 / T_j$ 値をとり、縦軸は Log スケールとした。ホルダ温度は図 5-7 中の各ケース温度になるように設定しており、 T_j はこのホルダ温度から式 (2-1) を用いて求めたものである。

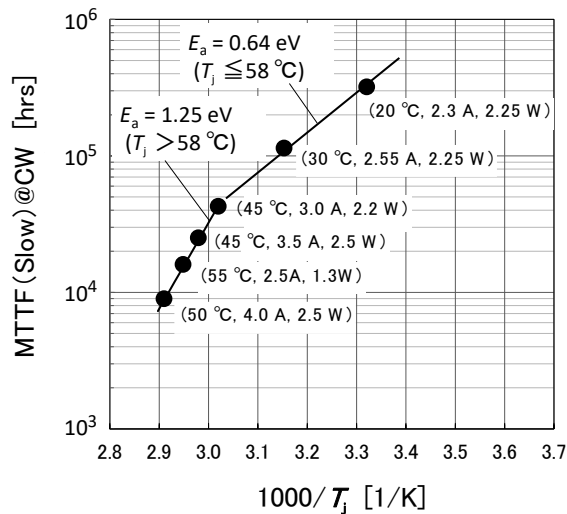


図 5-7 活性層温度と CW 動作時の MTTF(Slow) の関係 (2 エミッタ LD)

MTTF(Slow) 値は、 T_j が 58 °C 以上の領域と 58 °C より小さい領域において、それぞれ直線で近似することができる、つまりアレニウス則に従っていることが分かった。このときの活性化エネルギーは、 $T_j \geq 58$ °C の領域で 1.25 eV、 $T_j \leq 58$ °C の領域で 0.64 eV であり、高温領域の方が大きい値となっている。

これらの 6 つの通電試験における電流値や光出力は様々となっており、特に光出力は 2 倍近くの差がある条件もある。それにも関わらず MTTF(Slow) がグラフ上で直線に乗っていることから、少なくとも本研究にて検討した動作条件範囲内では、MTTF(Slow) は動作電流や光出力

にはほとんど依存せず、主に動作電流や光出力が変化することによる活性層温度の変化で MTTF(Slow)が決まっていると言える。

次に、60 μm - 3 エミッタ LD についても同様に 2 条件の通電試験を実施し、MTTF(Slow)を確認した。この結果を図 5-7 上にプロットしたものを図 5-8 に示す。これより MTTF(Slow)は、LD 構造には大きく依存せず、活性層温度によって決まると考えられる。図 5-7 より、CW 動作時の MTTF(Slow)が 20,000 時間を越える条件は $T_j \leq 63.8^\circ\text{C}$ ，デューティ比 40 % のパルス動作時に MTTF(Slow)が 20,000 時間（CW で 8,000 時間）を越える条件は、 $T_j \leq 71.2^\circ\text{C}$ となる。

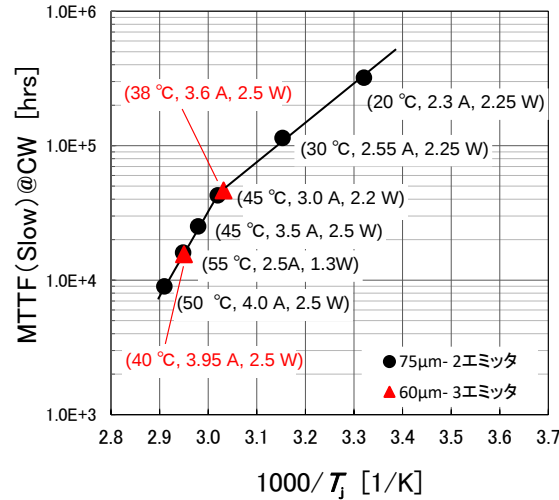


図 5-8 活性層温度と CW 動作時の MTTF(Slow)の関係（2 および 3 エミッタ LD）

ここで、MTTF(Slow)の活性層温度依存性がアレニウス則に従うのは、非発光再結合レートの変化がアレニウス則に従っていることによると考えられる。AlGaAs/GaAs 系 LD における Slow 劣化の活性化エネルギーは、0.5 から 1.0 eV 程度であることがこれまでに報告されている⁽⁶⁹⁻⁷³⁾。また、本研究で議論したものと同一 GaInP ウェル層をもつ AlGaInP/GaAs 系 LD においても、その活性化エネルギーは 0.8 eV と報告されている⁽¹⁰³⁾。これに対し、本研究で得られた活性化エネルギーは、 $T_j \leq 58^\circ\text{C}$ では 0.64 eV とこれらの報告に近いものの、 $T_j \geq 58^\circ\text{C}$ では 1.25 eV とかなり大きい値となっている。これについては、先の文献で議論されている LD が、近赤外領域で発振する AlGaAs/GaAs 系である、あるいは AlGaInP/GaAs 系 LD であっても発振波長が 670 nm と比較的溫度特性が良好なものであるのに対し、本研究では発振波長 638 nm と光出力の溫度依存性が大きいものを対象としていることが理由と考えられる。Slow 劣化によって光出力が低下すると、発熱量が増加して活性層溫度を上昇させるが、光出力の活性層溫度依存性が大きい場合は、この活性層溫度の上昇がさらなる光出力低下を生じさせることになる。このことが、活性層溫度に対して加速度的に光出力を低下させ、活性化エネルギー値を見かけ上増加させていると考えられる。また、本研究で実施した通電試験時の光出力が数 W レベルと

大きいことも、光出力の低下に伴う発熱量，つまり活性層温度の変化を大きくし，Slow 劣化を加速していると考えられる。

5.4 パルス動作の場合の MTTF

図 5-9(a) は，60 μm -3 エミッタ LD を， $T_c = 45^\circ\text{C}$ ，繰り返し周波数 120 Hz，デューティ比 40 %，3.6 A のパルスで駆動したときの駆動電流波形である。この駆動電流波形は，ほぼ矩形となっているにも関わらず，図 5-9(b)に示す光波形の実測結果では，パルス立ち上がり時にオーバーシュートが見られている。この原因は以下のように考えられる。図 5-9(c) は，図 5-9(a) に示すパルス電流を印加したときの活性層温度を，熱シミュレーションによって求めたものである。2.2.3 項にも示したように，活性層温度は，熱容量があるために印加電流に対して遅れて上昇することになる。その結果，パルス立ち上がり部は活性層温度が低くなり，光波形に図 5-9(b)のようなオーバーシュートが発生することになる。

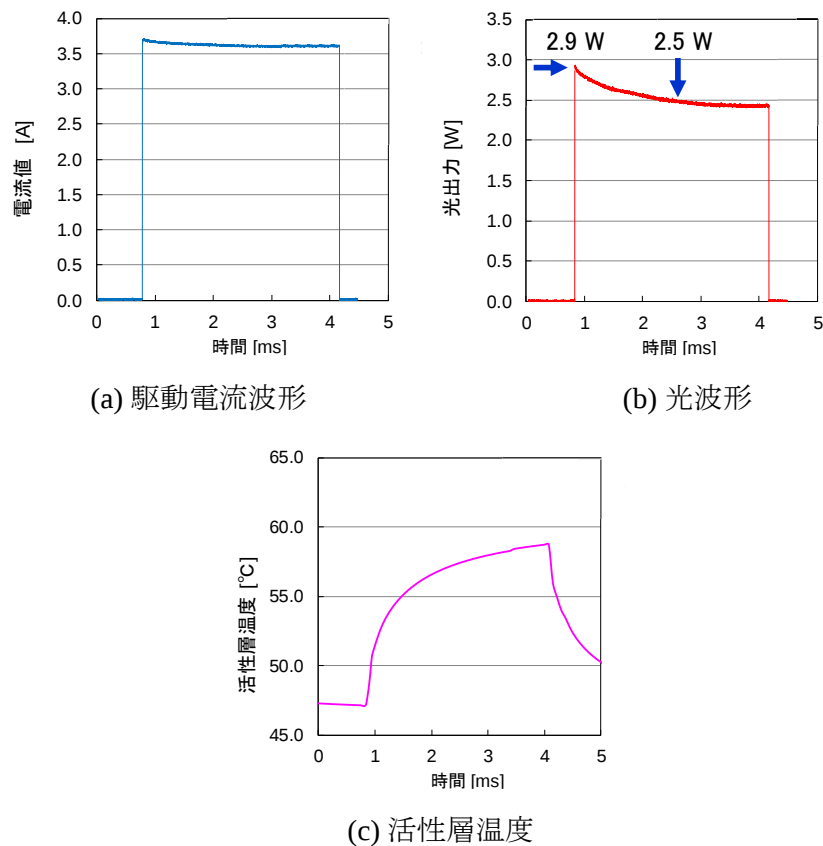


図 5-9 パルス駆動時の駆動電流波形と 60 μm -3 エミッタ LD の光波形，活性層温度
($T_c = 45^\circ\text{C}$ ，繰り返し周波数 120 Hz，デューティ比 40 %，3.6 A)

2.2.3 項に示した通り，本研究では，パルス駆動時の光出力をパルス中央時間における瞬時光出力と定義しており，図 5-9(b) の場合のパルス光出力は 2.5 W となる。この場合の，パルスが ON となっているときの平均光出力は約 2.5 W である。よって，1.6.2 項に示すような COMD レベルの低下速度は，2.5 W の CW 駆動時の低下速度とほぼ同じになると考えられる。一方で，パルス駆動中には図 5-9(b) のように，瞬時的に 2.9 W の光出力が周期的に出力されている。そのため，実際の使用において COMD が発生するのは，COMD レベルが 2.9 W まで下がったときであると考えられる。つまり，COMD レベルの低下速度は，ほぼ 2.5 W 出力時の場合に等しいものの，COMD が発生する時間は 2.5 W の一定出力時の場合よりも早くなることに注意が必要である。このオーバーシュート部分は，実際の光源の輝度向上には大きく寄与しない。したがって，平均光出力と信頼性を両立する方法としては，図 5-10 のように，駆動電流波形の立ち上がり部分を徐々に立ち上げる形状にすることで，光波形のオーバーシュートを抑制することが有効である。このような電流波形の実現は，ローパスフィルタの挿入などで容易に実現可能である。

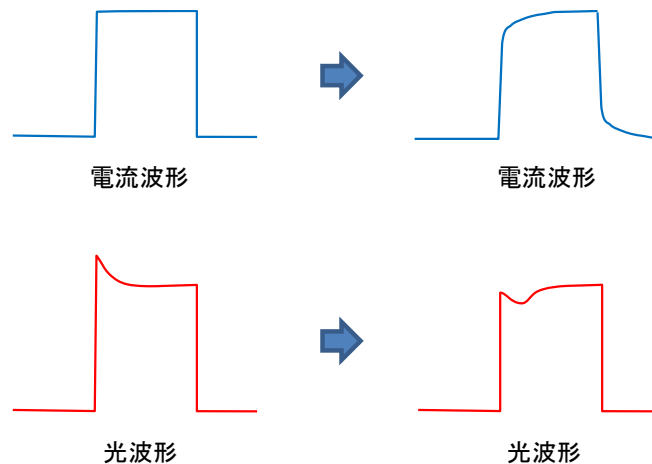


図 5-10 電流波形調整による光波形のオーバーシュート抑制

ここで，パルス動作の場合，実際に光が出力している時間は，パルスが ON となっている時間となるので，CW 動作時の平均故障時間を $MTTF(COMD, CW)$ ，パルス動作時の平均故障時間を $MTTF(COMD, Pulse)$ ，パルスデューティ比を D_r とすると，

$$MTTF(COMD, Pulse) = MTTF(COMD, CW) / D_r \quad \text{式 (5-11)}$$

の関係となる。したがって，光波形のオーバーシュートを抑制した場合の $MTTF(COMD, Pulse)$ は，最大瞬時光出力値における $MTTF(COMD, CW)$ を 5.2 節の方法で求め，式 (5-11) の関係を用いることで得ることができる。同様に，パルス動作時の Slow 劣化起因の

平均故障時間 $MTTF(Slow, Pulse)$ は、CW 動作時の Slow 劣化起因の平均故障時間 $MTTF(Slow, CW)$ を 5.3 節の方法で求め、式 (5-12) を用いることで推定可能である。

$$MTTF(Slow, Pulse) = MTTF(Slow, CW) / D_r \quad \text{式 (5-12)}$$

5.5 複数の赤色 LD からなる光源の MTTF

5.5.1 複数の赤色 LD からなる光源の MTTF の考え方

一般的に、ディスプレイ光源用 LD の故障時間は、光出力が初期光出力の 50 % になる時間と定義されることが多い。ここで、ディスプレイの光源に 1 個の赤色 LD のみを使用される場合は、赤色光源の寿命は素子単体の寿命を意味する。赤色 LD 素子単体では、Slow 劣化によって徐々に光出力が低下していくが、これにより光出力が初期光出力の 50 % になった時間が故障時間となる。ただし、光出力が初期値の 50 % になる前に COMD による突然劣化が発生した場合は、その時点で光出力がほぼ 0 になるため、その COMD 発生時間が故障時間となる。つまり、光源の平均故障時間は、COMD が発生する時間と Slow 劣化により光出力が 50 % 以下になる時間のどちらか短い方になる。

一方、数千から数万ルーメンの輝度をもつディスプレイ装置では、数十個の赤色 LD が使用される。この場合は、Slow 劣化によって全てのエミッタの光出力が徐々に低下していく中で、一部のエミッタは COMD によって出力が 0 となるといった場合が考えられる。そのため、このように複数の LD からなる光源を長時間動作させた時の光出力期待値は、COMD が発生していない残存エミッタの割合とこれら残存エミッタの光出力平均値との積となる。そして、この光源の故障時間は、この光出力期待値が初期光出力の 50 % になる時間となる。そこで、次項以降では、COMD が発生していないエミッタの割合と、この残存エミッタからの光出力期待値について議論し、光源の平均故障時間 ($MTTF(Source)$) を求めることにする。

5.5.2 COMD による光出力劣化曲線

あるエミッタに COMD が発生した場合、そのエミッタからの出力は 0 になる。そのため、光源に多数のエミッタが存在する場合の COMD 起因の光出力低下率は、COMD の累積故障率に一致する。そこで、この累積故障率を実際の通電試験結果から求めることで、COMD 起因の光出力低下率を推定することにする。

ここで、COMD の故障時間分布は、図 5-5 のようにワイブル分布となり、その形状パラメータ m が 7.08 となることが分かっている。図 4-2 のように COMD レベルの動作温度依存性はほとんどないことから、MTTF(COMD)の温度依存性もないと考えられる。通電時間と光出力の関係、つまり光出力低下曲線は $(1 - (\text{累積故障率}))$ で表され、図 5-11 のようになる。図 5-5 のように、MTTF(COMD)値によって形状パラメータ m の値は変わらないため、時間を MTTF(COMD)によって規格化すれば、光出力低下曲線は同じ形状となる。MTTF(COMD)値は、5.2 節で議論した方法で求めることができる。形状パラメータ m が 7.08 の時のワイブル分布の確率密度は図 5-12 のようになる。平均故障時間における累積故障率は、ワイブル分布の非対称性のため 50%とはならず、この場合 46.6 %となる。従って、MTTF(COMD)における光出力比は図 5-11 に示すとおり 53.4 %になる。

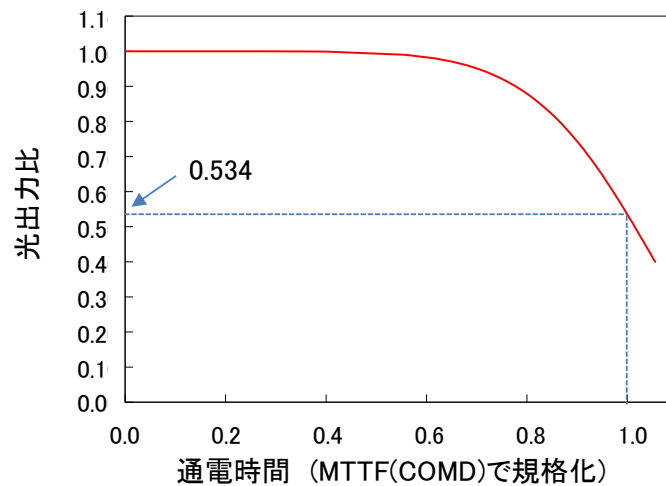


図 5-11 正規化された COMD 起因の光出力低下曲線

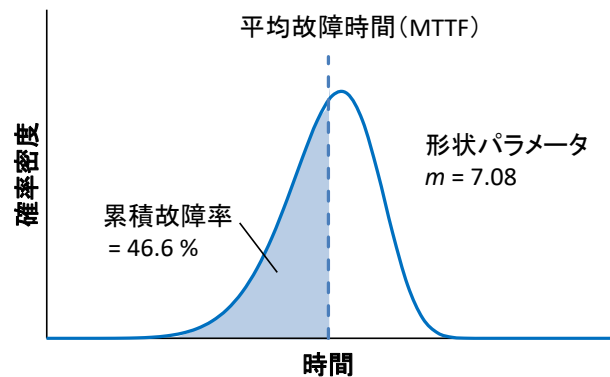


図 5-12 $m = 7.08$ の時のワイブル分布の確率密度と平均故障時間、累積故障率の関係

5.5.3 Slow 劣化による光出力劣化曲線

COMD が発生していないエミッタからの光出力の平均値は、Slow 劣化による光出力低下曲線を実際の通電試験から求めることで得ることができる。75 μm - 2 エミッタ LD の通電試験例を図 5-13 に示す。駆動条件は CW, ACC 条件下で、動作電流は 2.5 A, 初期の光出力は 1.3 W であった。 T_c は 55 $^{\circ}\text{C}$ で活性層温度 T_j は 66.4 $^{\circ}\text{C}$ となる。縦軸は初期の光出力で規格化した光出力としている。

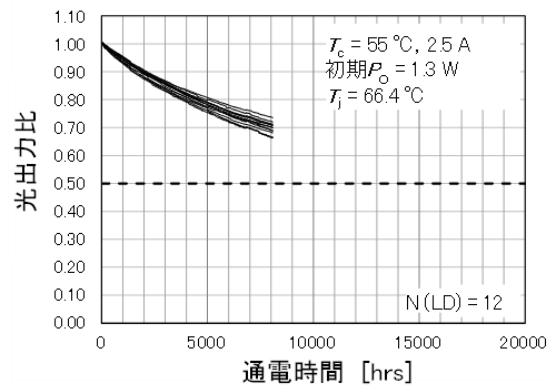


図 5-13 75 μm - 2 エミッタ LD の CW 駆動長期 ACC 通電試験結果

図 5-13 における 8,000 時間以降の光出力は、劣化速度が飽和した後の直線外挿線により推定でき、光出力比が 0.5 になる時間がそれぞれの赤色 LD の故障時間となる。図 5-14 は、この故障時間をワイブルチャート上にプロットしたもので、MTTF(Slow)は 16,800 時間であった。 m 値は 8.59 であった。

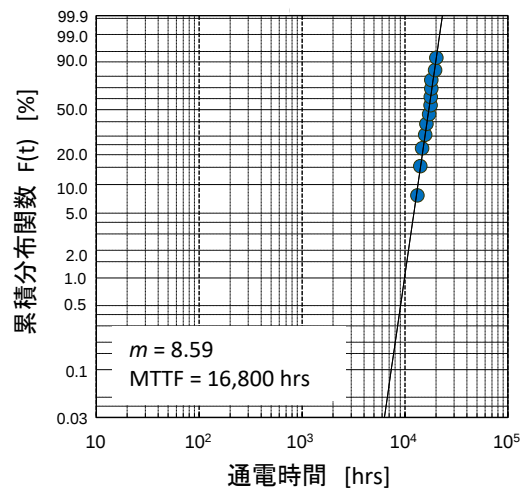


図 5-14 75 μm - 2 エミッタ LD の Slow 劣化故障時間のワイブルプロット

多数の赤色 LD がある場合の光出力の低下曲線は、図 5-15 のように、各素子の光出力低下曲線を平均した曲線を意味する。ただし、この平均光出力の外挿線から求めた MTTF 値が、実際の MTTF 値、つまり、図 5-14 のように各素子の故障時間を元にして求められる MTTF 値に一致するかどうかは議論が必要である。そこで、図 5-15 のように、各素子の光出力低下曲線を線形関数でフィッティングし、これをもとに、平均光出力の外挿線から求めた MTTF 値と、各素子の外挿線から求めた MTTF 値が一致するかどうかを検討した。

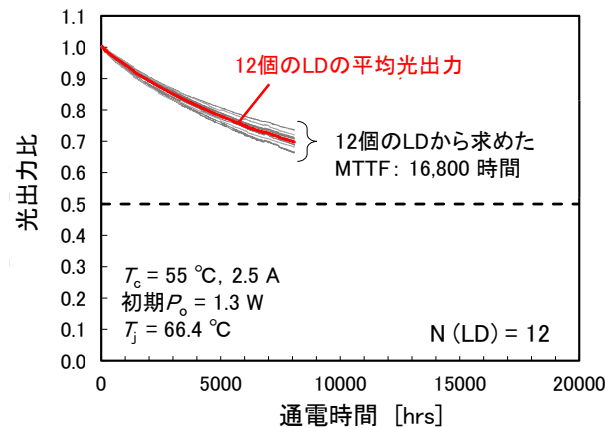


図 5-15 各 LD の平均光出力

図 5-16 はある素子の光出力低下曲線（黒実線）と、そのフィッティング直線（赤点線）である。そのフィッティング直線の傾き a と切片 b によって故障時間 (L_t) が決定される。

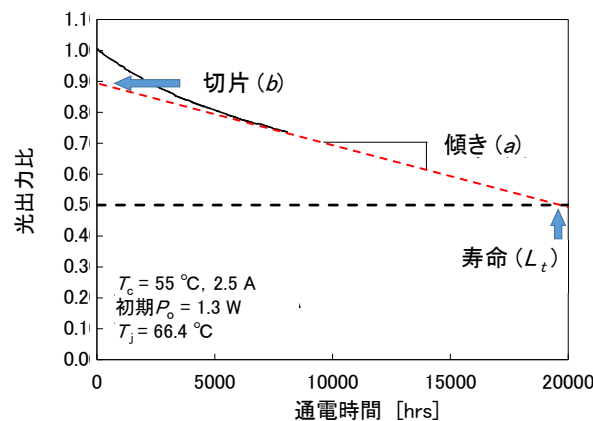


図 5-16 各 LD の光出力低下曲線

図 5-13 にある、12 個の赤色 LD の光出力低下曲線それぞれについて、パラメータ a および b と、 L_t との関係をそれぞれ図 5-17(a)と図 5-17(b)に示す。

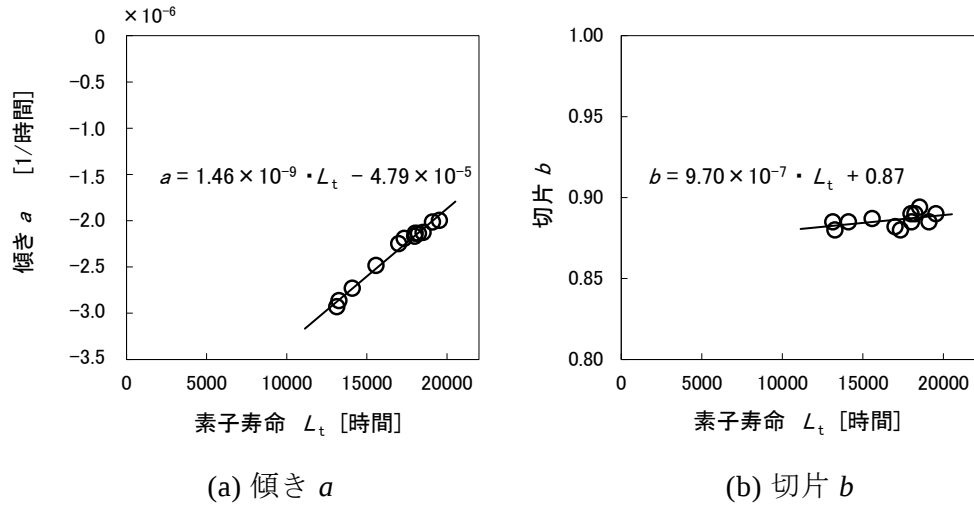


図 5-17 勾配 a 、切片 b と故障時間の関係

つまり、傾き a は故障時間 L_t に対し線形に変化し、切片 b もまた同じである。これにより、 a および b は、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 を定数として式 (5-13) および式 (5-14) で表すことができる。

$$a = \alpha_1 \cdot L_t + \alpha_2 \quad \text{式 (5-13)}$$

$$b = \beta_1 \cdot L_t + \beta_2 \quad \text{式 (5-14)}$$

これより、故障時間が L_t である素子の光出力低下曲線のフィッティング直線は、時間を t とすると式 (5-15) で表すことができる。各時間における、複数の素子のフィッティング直線の平均値、つまり式 (5-15) の和の平均値は、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 が定数であることから式 (5-16) のようになる。ここで、記号の上部線は平均値を意味する。

$$\begin{aligned} P(t, L_t) &= a \cdot t + b \\ &= (\alpha_1 \cdot L_t + \alpha_2) \cdot t + (\beta_1 \cdot L_t + \beta_2) \cdot t \end{aligned} \quad \text{式 (5-15)}$$

$$\begin{aligned} \overline{\sum P(t, L_t)} &= \overline{\sum (\alpha_1 \cdot L_t + \alpha_2) \cdot t} + \overline{\sum (\beta_1 \cdot L_t + \beta_2)} \\ &= (\alpha_1 \cdot \overline{\sum L_t} + \alpha_2) \cdot t + (\beta_1 \cdot \overline{\sum L_t} + \beta_2) \end{aligned} \quad \text{式 (5-16)}$$

L_t の平均値が $MTTF$ となるので、式 (5-16) から式 (5-17) が得られる。

$$\overline{\sum P(t, L_t)} = (\alpha_1 \cdot MTTF + \alpha_2) \cdot t + (\beta_1 \cdot MTTF + \beta_2) \quad \text{式 (5-17)}$$

式 (5-17) の右辺は、式 (5-15) の右辺の L_t が $MTTF$ に置き換わったものなので、 $P(t, MTTF)$ となる。よって、式 (5-17) は、

$$\overline{\sum P(t, L_t)} = P(t, MTTF) \quad \text{式 (5-18)}$$

となる。

式 (5-18) の左辺は平均故障時間が $MTTF$ である赤色 LD 群の平均光出力の時間依存性、つまり光出力低下曲線である。また、式 (5-18) の右辺は、故障時間が $MTTF$ である 1 つの素子の光出力低下曲線である。つまり、複数の LD からなる光源の光出力低下曲線は、構成される素子の劣化曲線の平均値に等しく、その故障時間は、構成される素子の故障時間の平均値に等しいことになる。これはあくまで、光出力低下曲線が時間に対し直線的に低下するために、光出力値と $MTTF$ に線形の相関関係が生まれることに起因するものである。

次に、通電条件が異なる場合、つまり $MTTF(\text{Slow})$ 値の違いによって、この光出力低下曲線の形状が異なるかどうかを確認した。図 5-18 に通電試験結果を示す。各図に試験条件を記載している。縦軸は初期光出力値で規格化している。 $N(\text{LD})$ は通電を実施した LD 数である。

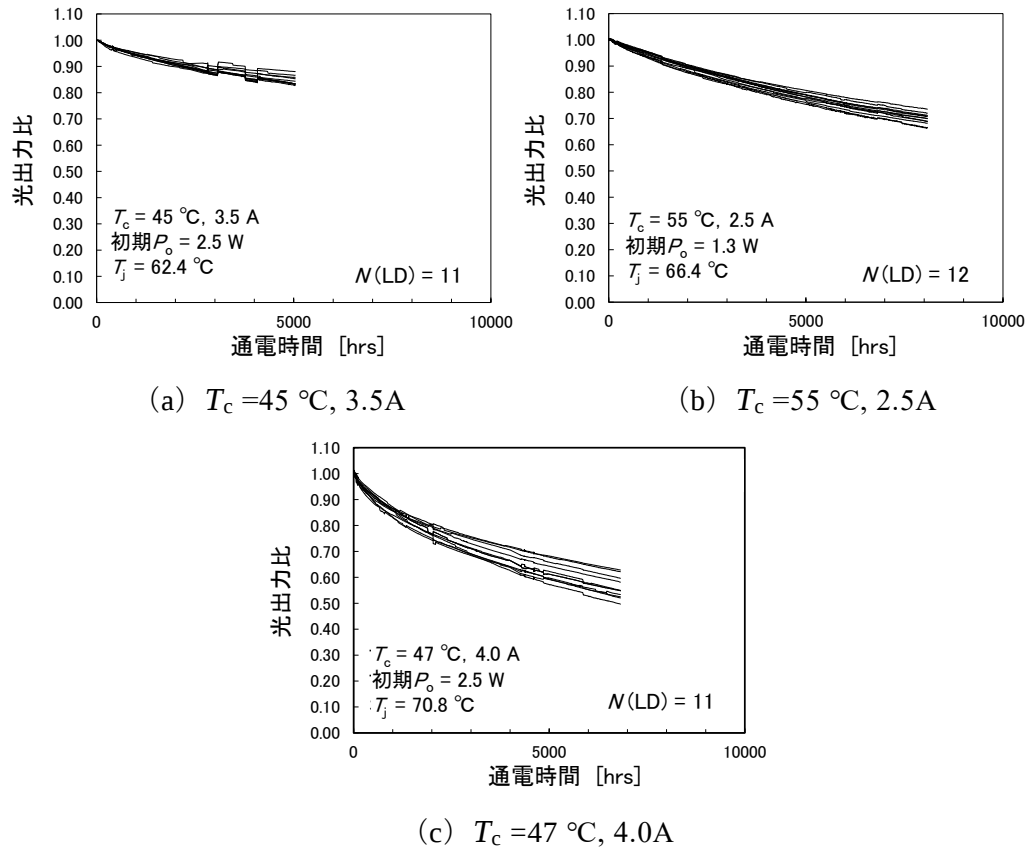


図 5-18 3つの異なる条件における CW 駆動長期 ACC 通電試験結果

各素子の光出力低下曲線の平均値を各条件に対し求めた結果を図 5-19 に示す。横軸は各 MTTF(Slow)値で規格化している。光出力低下曲線の形状は、通電条件によって若干異なるが、本研究では、ディスプレイに必要とされる 20,000 時間前後の MTTF 予測を重要視するため、MTTF(Slow)がこれに近い 16,800 時間であった通電試験の結果（図 5-19(b)）を、MTTF(Slow)の予測曲線とすることにした。直線外装部分を含めた光出力低下曲線を図 5-20 に示す。図 5-14 のように、Slow 劣化の形状パラメータ m は 8.59 となる。この時の確率密度の形状は図 5-12 と若干異なるため、MTTF(Slow)における累積故障率は 45.8 %になる。したがって、MTTF(Slow)における光出力は図 5-20 に示すとおり 54.2 %となる。

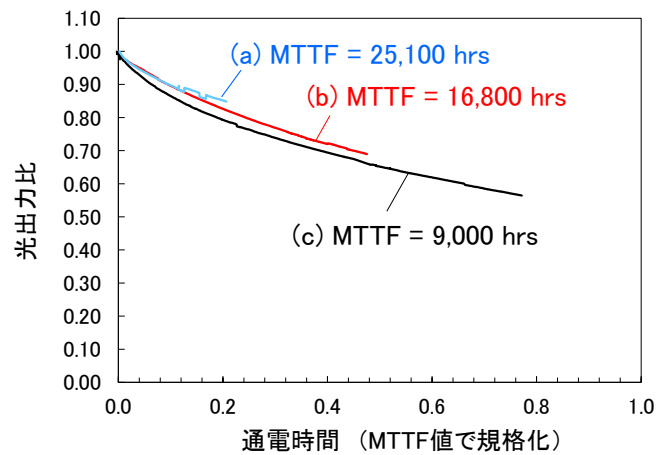


図 5-19 通電条件が異なる場合の光出力低下曲線比較

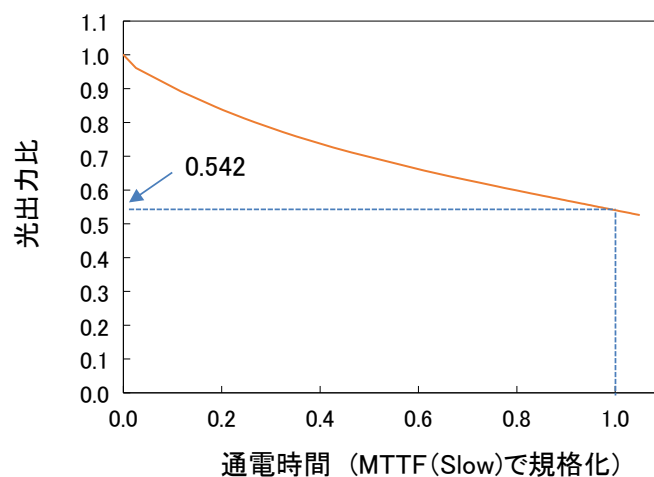


図 5-20 正規化された Slow 劣化起因の光出力低下曲線

5.5.4 赤色光源の MTTF

図 5-21 は、MTTF(COMD)と MTTF(Slow)が共に 20,000 時間である場合の光出力劣化曲線を、5.5.2 項および 5.5.3 項の結果を用いてシミュレーションした結果である。いずれの曲線も、赤色 LD が複数個ある場合の結果となっている。ここで、COMD のみを考慮した時の光出力相対値が 20,000 時間において 0.5 以上となっているのは、COMD 故障時間の分布がワイブル分布となっており、その中央値と平均値が異なるためである。これに対し、MTTF(Slow)値が 20,000 時間をもつ赤色 LD 群の光出力相対値の平均値は、式 (5-18) のとおり、MTTF(Slow)値にて劣化するとなる単体 LD の光出力低下曲線、すなわち、図 5-21 の青の実線となる。

実際の光源においては、COMD による光出力低下と Slow 劣化による光出力低下が同時に起こるため、最終的な光出力はこれら 2 つの劣化曲線の積となる。これを図 5-21 中に黒の実線で示す。多数の赤色 LD からなる光源の MTTF (MTTF(Source)) は、16,000 時間前後となっている。これに対し、単体の赤色 LD の故障時間は、COMD が発生した時点あるいは Slow 劣化による光出力低下量が 50 %を超えた時点となるため、20,000 時間となる。このように、特に MTTF(COMD)と MTTF(Slow)値が同等になる場合、LD 単体の故障時間と光源の MTTF(Source) は大きく異なることになる。

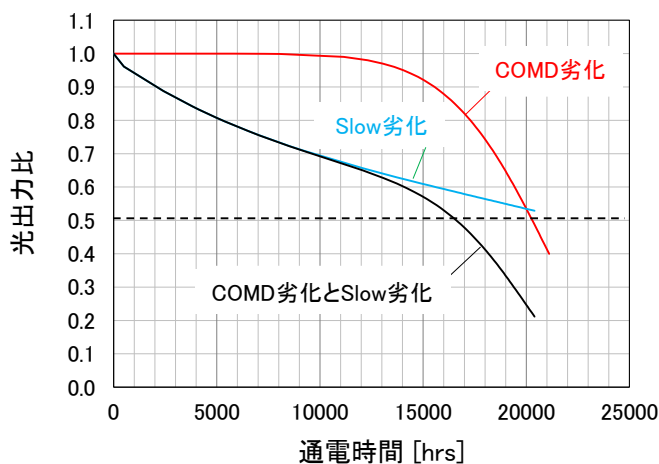


図 5-21 MTTF(Slow)と MTTF(COMD)の両方を考慮した MTTF

5.6 1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF 予測

5.6.1 1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF (CW 動作)

次に、75 μm -2 エミッタ LD と 60 μm -3 エミッタ LD を、CW 動作させた場合の MTTF(Source) を推定した。CW 駆動は、3つの SLM を用いる映画館などの大画面・高輝度用途向けに使用される場合の駆動方式である。MTTF(COMD)の関係は、75 μm -2 エミッタ LD の場合は式 (5-8) を、60 μm -3 エミッタ LD の場合は式 (5-9) を用いて求めた。MTTF(Slow)は、熱シミュレーションで求めた活性層温度から、図 5-7 の関係を用いて求めた。

図 5-22(a)は、75 μm -2 エミッタ LD の場合に、MTTF(COMD)が 20,000 時間以上となる最大の光出力（使用可能最大光出力）を赤実線で、MTTF(Slow)のみを考慮した場合の使用可能最大光出力を青実線で示したものである。また、図 5-21 のように、両者を考慮した光源としての MTTF(Source)を黒のプロットで示した。図 5-22(a)のように、MTTF(COMD)と MTTF(Slow)の差が大きい場合は、MTTF(Source)はいずれか小さい方に一致することになる。両者の差が近い場合は、MTTF(Source)が双方の MTTF 対して小さくなることから、使用可能最大光出力はより小さくなる。また、MTTF(COMD)に温度依存性がない一方で、MTTF(Slow)が高温側で大きく低下することから、高温において使用可能最大光出力が大きく低下することが分かる。図 5-22 (b)に示す 60 μm -3 エミッタ LD の場合も同様である。

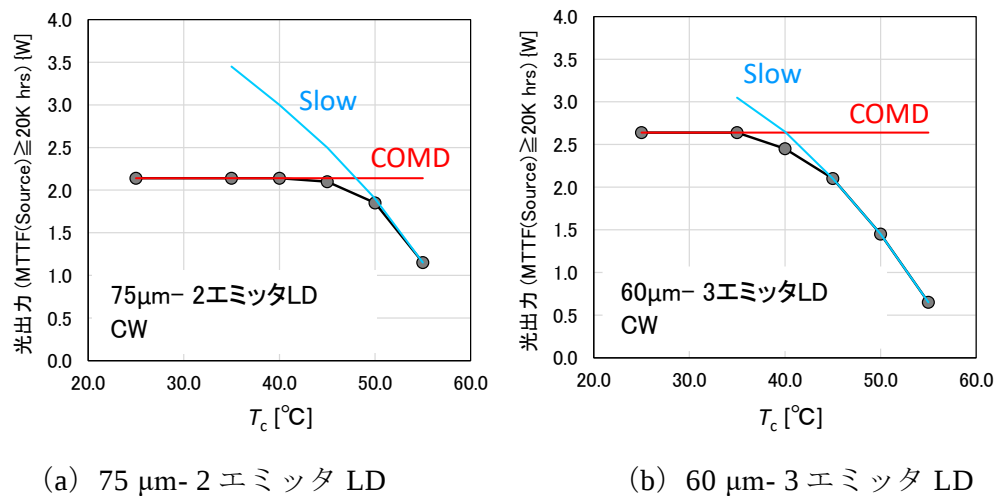


図 5-22 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力の比較 (CW 動作時)

表 5-2 および図 5-23 は、75 μm -1 エミッタ LD、75 μm -2 エミッタ LD、および 60 μm -3 エミッタ LD の CW 動作時の使用可能最大光出力の比較結果である。75 μm -1 エミッタ LD の光

出力と MTTF(COMD)の関係は式 (5-10) を用いて、MTTF(Slow)は、熱シミュレーションで求めた活性層温度から図 5-8 の関係を用いて求めた。

表 5-2 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力 (CW 動作時)

使用可能光出力[W]	T_c [°C]					
	25	35	40	45	50	55
75 μ m- 1 エミッタ LD	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.86
75 μ m- 2 エミッタ LD	2.14	2.14	2.14	2.10	1.85	1.15
60 μ m- 3 エミッタ LD	2.64	2.64	2.45	2.10	1.45	0.65

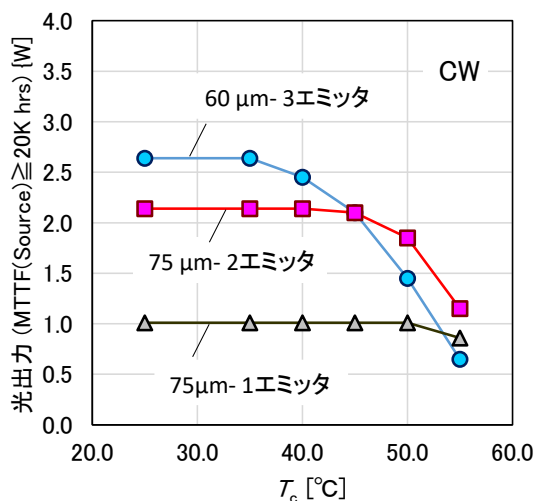


図 5-23 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力の比較 (CW 動作時)

CW, 25°Cにおける使用可能最大光出力は、75 μ m- 1 エミッタ LD の 1.01 W に対し、75 μ m- 2 エミッタ LD で 2.14 W、60 μ m- 3 エミッタ LD で 2.64 W となった。また、45°Cにおける使用可能最大光出力は、それぞれ 1.01、2.10、2.10 W であった。マルチエミッタ LD では、エミッタ全幅が大きいことにより MTTF(COMD)が大きくなるため、使用可能最大光出力が 1 エミッタ LD に対して大きく改善している。

75 μ m- 2 エミッタ LD のエミッタ全幅は 150 μ m であり、60 μ m- 3 エミッタ LD の 180 μ m に比べて小さいことから、COMD で律速される低温側の使用可能最大光出力は 60 μ m- 3 エミッタ LD よりも劣る。一方で、活性層温度が相対的に低くなるため、Slow 劣化が律速となる高温側の使用可能最大光出力では優位となる。映画館などで使用される大型のプロジェクターは、高い信頼性が要求される一方で、比較的高価であることが許容される製品となるため、光源を

25℃前後に冷却して使用する場合が多い。したがって、この場合は、低温での動作可能光出力が大きな 60 μm -3 エミッタ LD を用いることが好ましい。一方、ホームシアター向けプロジェクターの光源など、安価な装置であることが要求される場合には、高温で高出力動作が可能な 75 μm -2 エミッタ LD を用いることが好ましい。

5.6.2 1, 2, 3 エミッタ LD の MTTF (パルス動作)

次に、75 μm -2 エミッタ LD と 60 μm -3 エミッタ LD を、繰り返し周波数 120 Hz、デューティ比 40 % でパルス動作させた場合の MTTF(Source) を推定した。パルス駆動は、1 つの SLM を用いるホームシアターやレーザーTV 向けに使用される場合の駆動方式である。5.4 節のとおり、パルス動作の場合は、光波形のオーバーシュートが MTTF(COMD) を短くする場合がある。そこで、本研究においては、図 5-10 のように、パルス電流波形の立ち上がりを緩やかにすることで、この光波形のオーバーシュートを抑制した場合について検討する。

パルスのデューティ比が 40 % であるため、20,000 時間動作時の総点灯時間は 8,000 時間となる。よって、CW 動作時の MTTF(COMD) および MTTF(Slow) が 8,000 時間以上となる光出力を 5.6.1 節で述べた方法を用いて求めた。図 5-24(a) は、75 μm -2 エミッタ LD の場合に、パルス動作時の MTTF(COMD) が 20,000 時間以上となる最大の光出力（使用可能最大光出力）を赤実線で、MTTF(Slow) のみを考慮した場合の使用可能最大光出力を青実線で示したものである。また、MTTF(Source) を黒のプロットで示した。図 5-24(b) は、60 μm -3 エミッタ LD の場合である。

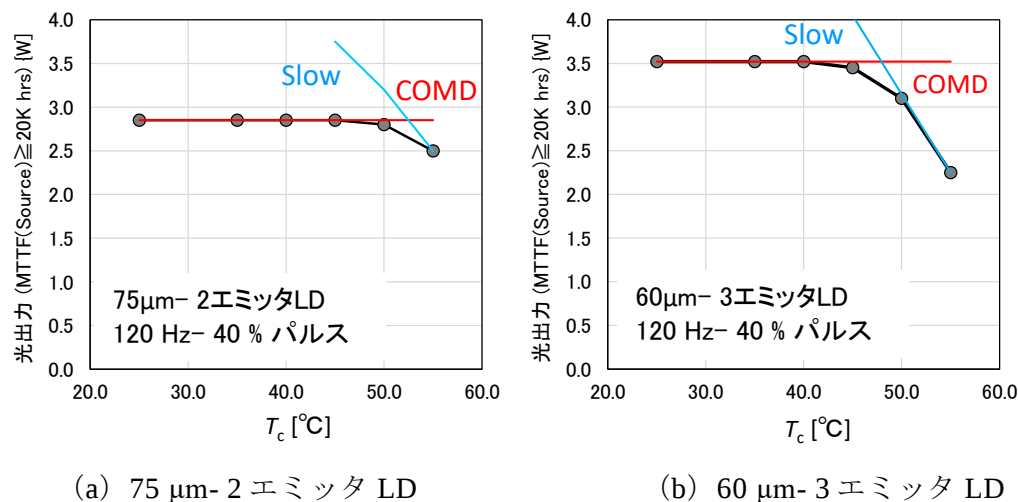


図 5-24 MTTF $\geq 20,000$ 時間となる使用可能最大光出力の比較（パルス動作時）

表 5-3 および図 5-25 は、75 μm - 1 エミッタ LD , 75 μm - 2 エミッタ LD, および 60 μm - 3 エミッタ LD のデューティ比 40 % のパルス動作時の使用可能最大光出力の比較結果である。 $T_c = 25^\circ\text{C}$ での使用可能最大光出力は、75 μm - 1 エミッタ LD の 1.34 W に対し、75 μm - 2 エミッタ LD で 2.85 W, 60 μm - 3 エミッタ LD で 3.52 W となった。また、45 $^\circ\text{C}$ における 2 および 3 エミッタ LD の使用可能最大光出力も、それぞれ 1.34, 2.85, 3.45 W となっており、3 エミッタ LD では 40 $^\circ\text{C}$ 以下であれば 3.5W の動作が可能となる。パルス動作の場合も CW 動作の場合と同様に、2 および 3 エミッタ化によって使用可能最大光出力が大きく改善している。

表 5-3 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力（パルス動作時）

使用可能出力 [W]	T_c [$^\circ\text{C}$]					
	25	35	40	45	50	55
75 μm - 1 エミッタ LD	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
75 μm - 2 エミッタ LD	2.85	2.85	2.85	2.85	2.80	2.50
60 μm - 3 エミッタ LD	3.52	3.52	3.52	3.45	3.10	2.25

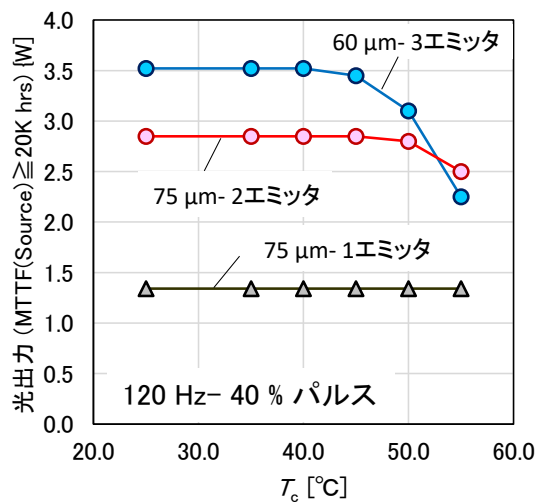


図 5-25 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力の比較（パルス動作時）

5.7 まとめ

本章では、COMD および Slow 劣化のそれぞれについて、劣化を加速する要因とその加速係数を調査し、MTTF 予測の方法について検討した。

通電中における COMD レベルの低下過程を検討した結果、通電開始時における $\angle T_{fa}$ が同じであれば、エミッタ幅によらず MTTF(COMD)は同じになるとの結論を得た。この結果と、通電試験結果より得られている、MTTF(COMD)が光出力の-3.2 乗に比例する、という関係を組み合わせることで、任意のエミッタ構造において MTTF(COMD)を求める方法を提案した。そして、本方法を用いて予測した MTTF(COMD) 値と、実際の通電結果から求めた MTTF(COMD)が良く一致していることを確認し、高い精度で MTTF(COMD)を予測可能であることを立証した。また、パルス動作の場合の MTTF(COMD)について検討した結果、パルス動作時に発生する光出力のオーバーシュートによって MTTF(COMD)が小さくなること、駆動電流波形のオーバーシュートを抑制することで、光出力をほとんど落とすことなく MTTF(COMD)を大きく延ばすことが可能であることを示した。

さらに、実際の通電試験によって、Slow 劣化速度がアレニウス則に従っていること、その活性化エネルギーが $T_j \geq 58^\circ\text{C}$ の領域で 1.25 eV、 $T_j \leq 58^\circ\text{C}$ の領域で 0.64 eV になることを確認した。さらに、この関係がエミッタ構造に依存しないことも示した。これらの知見から、熱シミュレーションによって活性層温度を求めるだけで、任意のエミッタ構造、駆動条件における MTTF(Slow)値を予測することが可能になった。

また、1 個の LD からなる光源と、多数個の LD からなる光源では、その故障時間が異なる場合があることを明らかにし、多数の LD からなる光源の MTTF 値を推定する方法を確立した。この方法を用いて、第 3 章で作製したマルチエミッタ LD に対し、20,000 時間以上の MTTF が得られる最大の動作可能光出力を求めた結果、マルチエミッタ化によって、大幅な動作可能光出力の改善が可能であることが明らかになった。75 μm - 2 エミッタ LD では、 $T_c \leq 45^\circ\text{C}$ において、1.8 節で目標とした 2.0 W の CW 動作で 20,000 時間以上の MTTF を実現できると予想される。また、60 μm - 3 エミッタ LD では、 $T_c \leq 40^\circ\text{C}$ 、3.5 W のパルス動作で 20,000 時間以上の MTTF を達成できる見込みである。

本章で検討した信頼性予測手法は、長期の信頼性試験の実施はもとより、LD 素子を実際に作製することなしに COMD および Slow 劣化起因の MTTF を推定することが出来るものであり、赤色 LD 開発の効率化に大きく貢献するものである。

第6章：赤色 LD の低スペックル雑音化

6.1 はじめに

1.6.4 項に示したように、LD を用いた光源では、スペックル雑音の低減が重要な課題となっており、これを低減するための多くの方法が提案されている⁽⁸⁶⁻⁹⁵⁾。その 1 つの方法として、多数の LD を使用することがある⁽⁸⁶⁾。複数の LD から出射されるレーザー光の位相は、LD の温度揺らぎなどで独立に変化するため、発振波長がほぼ同じであったとしても、お互いの位相関係は常に同じにはならない。その結果、スペックルパターンが変動、これが人の目の応答速度よりも速く、平均化されて見えることでスペックル雑音が低減する。本研究で取り扱ったマルチエミッタ LD においても、同じ原理でスペックル雑音が低減される可能性がある。一方、本研究における 2 エミッタ LD のエミッタ中心間隔は約 200 μm - 3 エミッタ LD の場合は約 100 μm と非常に近接しており、これほどエミッタが近接した場合のスペックル雑音の振る舞いについては、著者の知る限りこれまで報告されていない。そこで本章では、マルチエミッタ LD におけるスペックル雑音の挙動について調査を行うことにする。また、エミッタ幅の異なる 1 エミッタ LD を用いて、スペックル雑音のエミッタ幅依存性や光出力依存性を評価する。これらの評価によって、スペックル雑音に影響を与える要因を明らかにし、LD 単体でスペックルコントラスト値 (C_s 値) を必要とされる 0.05 以下にすることが可能かどうかについて議論する。

6.2 評価に用いた LD の構造と光出力特性

図 6-1 に、スペックルの評価に用いた LD の構造を示す。1 エミッタ LD は、40, 60, 85 μm の 3 種のエミッタ幅を持つ LD を評価した。2 および 3 エミッタ LD は、3.5 節で最適化した 75 μm -2 エミッタ LD および 60 μm -3 エミッタ LD を用いた。いずれの LD も、層構造などは同じで、エミッタ構造のみが異なるものである。エミッタ構造の概要は表 6-1 にまとめた。

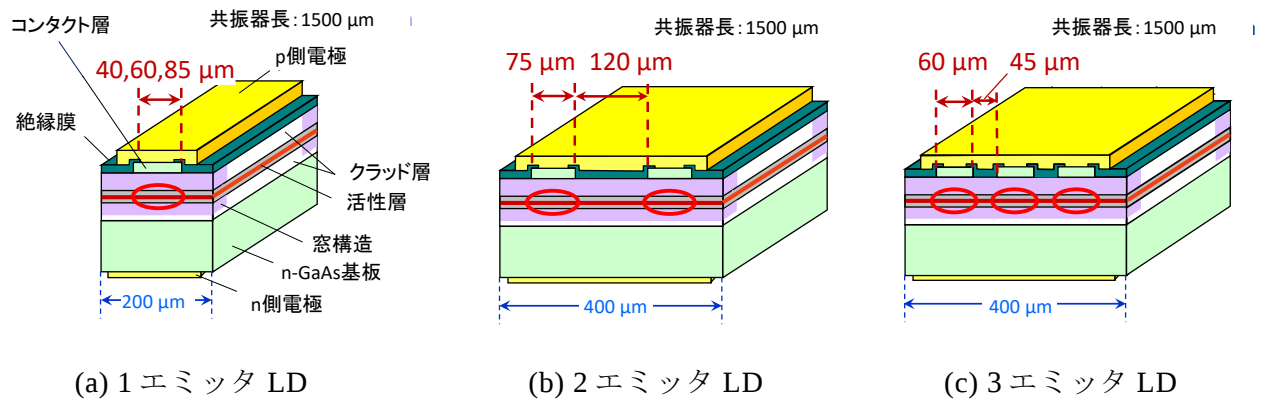


図 6-1 評価に用いた 1, 2, 3 エミッタ LD の構造

表 6-1 評価に用いた LD の構造一覧

サンプル No.	エミッタ数	各エミッタの幅 [μm]	エミッタ全幅 (幅の和) [μm]
1	1	40	40
2	1	60	60
3	1	85	85
4	2	75	150
5	3	60	180

次に、表 6-1 に示した LD の 25 °C における光出力特性を図 6-2 に示す。これら特性は CW 動作時のものであり、1.0～2.0 W 出力時の発振波長は約 638 nm 程度であった。3.6 節に示したように 1 エミッタ LD では光出力が熱飽和する傾向が強いが、2 および 3 エミッタ LD では熱飽和が小さく直線性の高い光出力曲線が得られている。

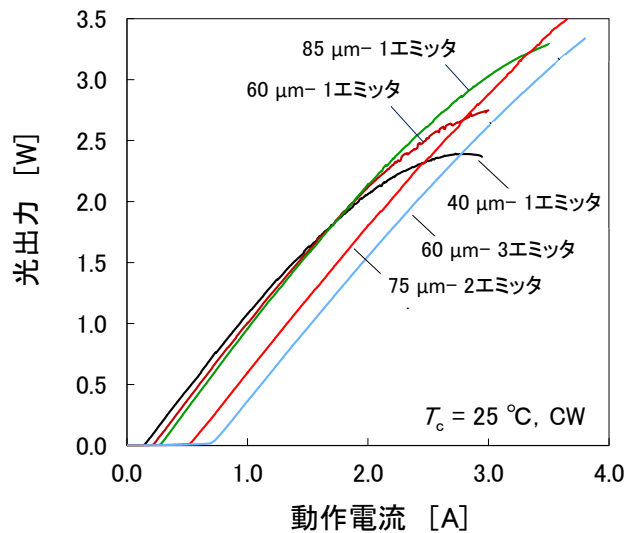


図 6-2 評価に用いた LD の光出力特性測定結果

次に、60 μm -1 エミッタ LD、75 μm -2 エミッタ LD、および 60 μm -3 エミッタ LD の FFP パターンの例を、それぞれ図 6-3(a), (b), (c)に示す。 T_c は 25 $^{\circ}\text{C}$ 、CW 駆動で光出力は 1 W 前後である。 $1/e^2$ 強度の全幅は、LD の設置面に平行な方向で 7° から 10° 前後、LD の設置面に垂直な方向では約 60° となっており、エミッタ構造によらずほぼ同じであった。

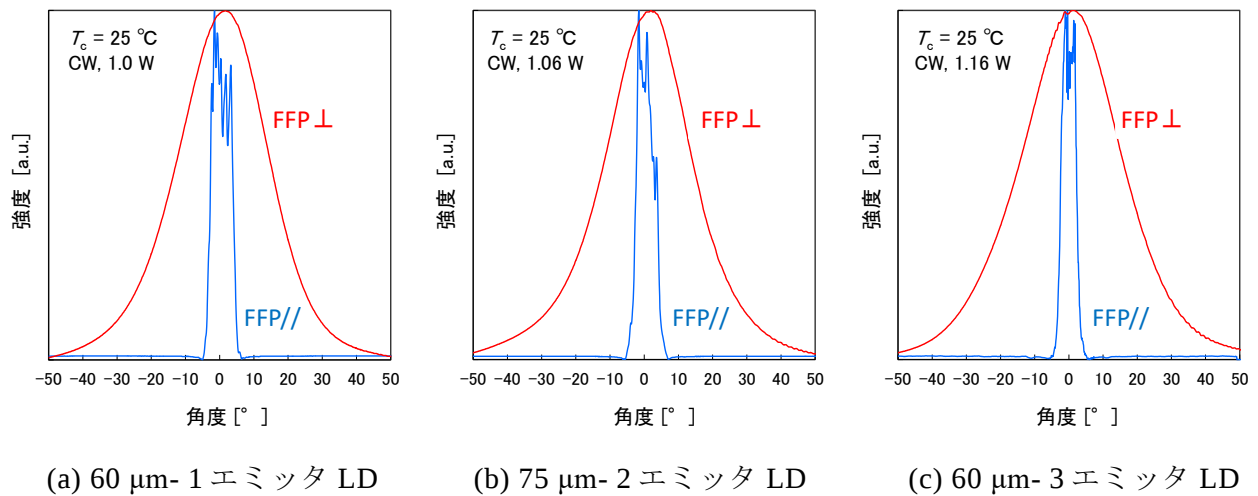


図 6-3 評価に用いた LD の FFP 測定例

6.3 スペックル雑音評価系および評価方法

6.3.1 評価系

スペックル雑音の程度を評価する指標として、式 (1-2) のスペックルコントラスト値 (C_s 値) を用いることにした。測定に用いた評価系を図 6-4 に示す。 $\phi 9.0$ mm の TO-CAN に搭載された赤色 LD は、 T_c が 25°C になるように温度制御した LD ホルダに取り付けた。今回評価した LD は、いずれも垂直方向の $1/e^2$ 位置の広がり角全幅が約 60° と大きいため、シリンドリカルレンズを LD の前に挿入することで垂直方向のビームの発散を抑えた。また、後に示すように、マルチエミッタ LD の場合、それぞれの FFP 形状の違いによる重ね合わせの不均一が発生することから、これを緩和する目的で 10° の円形拡散角 (拡散板に垂直方向の光を 10° の角度で放射) をもつ拡散板を挿入した。 C_s 値の測定には、オキサイド社製のスペックルコントラスト測定装置である OXIDE 社の SM01VS09 (国際標準規格準拠) を用いた。装置内に搭載されているピンホールの径は 0.8 mm とした。本装置では、平均的な光強度の空間分布が自動測定され、これを元に、測定されたパターンのオフセットを修正することができる。そのため、スクリーンに照射されたパターンに強度分布がある場合においても、正確な C_s 値を測定することができるようになっている。拡散板とスクリーンの距離は約 1.5 m、スクリーンとスペックルコントラスト測定装置間の距離は約 1.6 m とした。

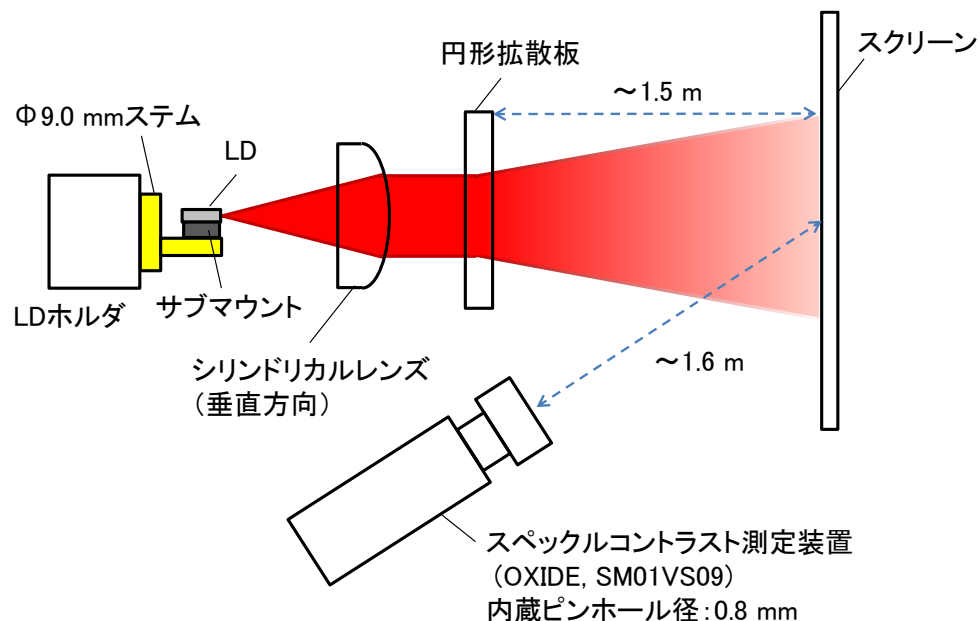


図 6-4 C_s 値測定系

6.3.2 遠視野像（FFP）の平均化

例えば2エミッタ LD 場合を考えると、スクリーンに照射されるパターンは、図 6-5 に示すように 2 つのエミッタから出射されるビーム（FFP1、FFP2）の重ね合わせになっている。ここで、今回の研究に使用した LD は全て横マルチモード LD であるため、横モードは多数の高次モードが存在し、水平方向の FFP には図 6-3 のように多数のリップルが存在した複雑な形状となっている。ここで、2 つのエミッタでは、わずかな形状や温度などの違いなどによって横高次モードの重ね合わせ強度・位相が異なっているため、FFP1 と FFP2 のリップル形状は異なっているものと推測される。

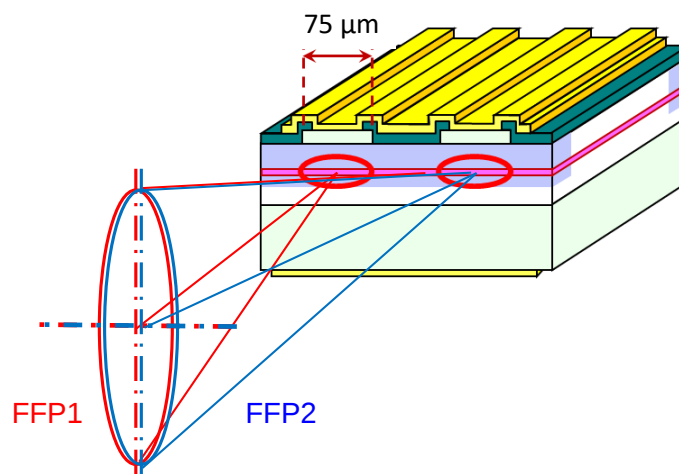


図 6-5 2エミッタ LD の場合の FFP の重ね合わせの模式図

図 6-6(a) は、それぞれのエミッタから出射される水平方向の FFP の重ね合わせの様子を示した模式図である。ここで、2 つの異なるスペックルパターンが重なる場合は、空間的な平均化によりスペックル雑音が低減すると考えられるが、ある空間位置におけるこのスペックル雑音低減効果は、それぞれの強度が同じであるときに最大化するはずである。したがって、図 6-6(a) の矢印で示した位置のように 2 つの FFP の強度が異なる場合は、スペックル雑音の低減効果は小さくなるため、像全体の C_s 値は大きくなると考えられる。実際のディスプレイにおいては、レーザー光の強度が均一化されてスクリーンに照射されるため、このような問題は回避される。そこで、今回の評価では、図 6-4 のようにスクリーン投射前に 10° の拡散角をもつ円形拡散板を配置することで水平方向の FFP 形状を平均化し、このような問題を緩和することにした。図 6-6(b) に示すように、各 FFP を平均化することで FFP のリップルを低減し、それぞれの空間位置における強度差を小さくすることができると考えられる。

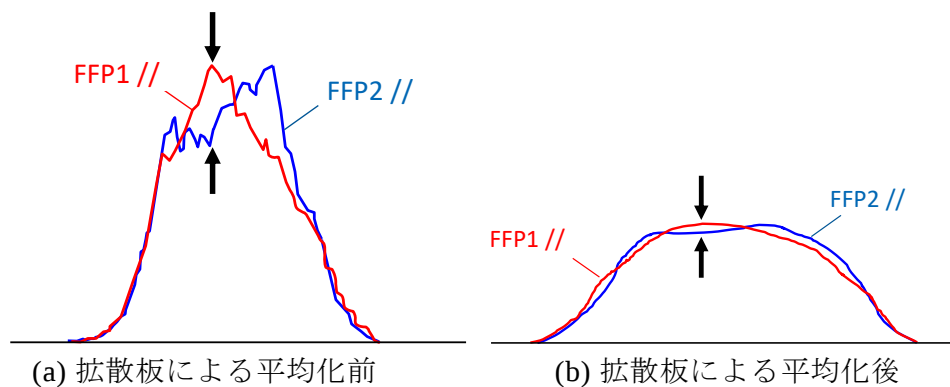


図 6-6 FFP//の重ね合わせ形状と平均化

6.4 スペックルコントラスト (C_s) 値評価結果

6.4.1 C_s 値の光出力依存性

図 6-7 に各評価素子の C_s 値の光出力依存性を示す。1 エミッタ LD では、エミッタ幅 40 μm と 60 μm 場合の C_s 値は同等であるが、85 μm の場合の C_s 値はそれよりも低いことが分かった。また、エミッタ数が増えるほど C_s 値が小さくなった。いずれの LD でも、出力の増大と共に C_s が増大する領域 (Region A) と、光出力増大と共に C_s 値が減少する領域 (Region B) に分かれている。

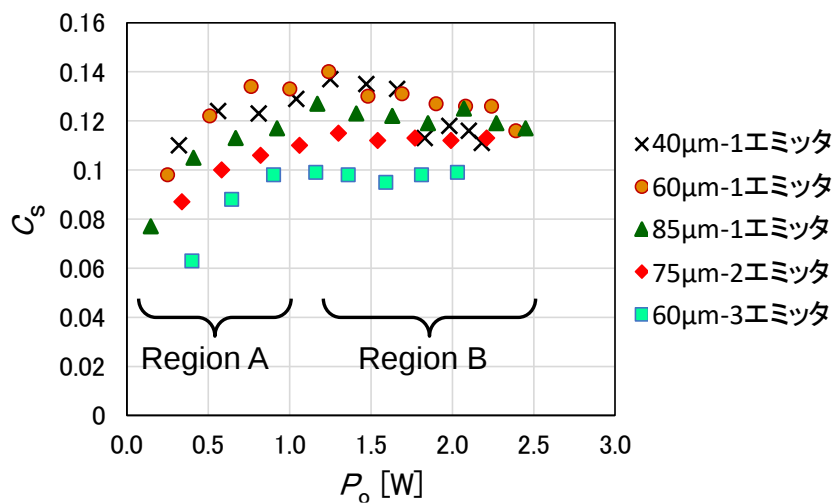


図 6-7 C_s 値と光出力 P_o の関係

Region B において光出力が大きいほど C_s 値が小さくなるのは、波長スペクトル幅が広くなるためであると考えられるため、 C_s 値と波長スペクトル幅の関係を調査することにした。

図 6-8 に 60 μm - 1 エミッタ LD の波長スペクトルの例を示す。本研究では、図 6-8 の波長スペクトルをスムージングして得られたエンベロープの強度がピーク強度の 20 % 以上となる領域の幅を波長スペクトル幅と定義した。この定義の元で波長スペクトルが 2 つに分離しているようなものはなかった。測定に用いた 5 種の LD の波長スペクトル幅の光出力依存性を図 6-9 に示す。

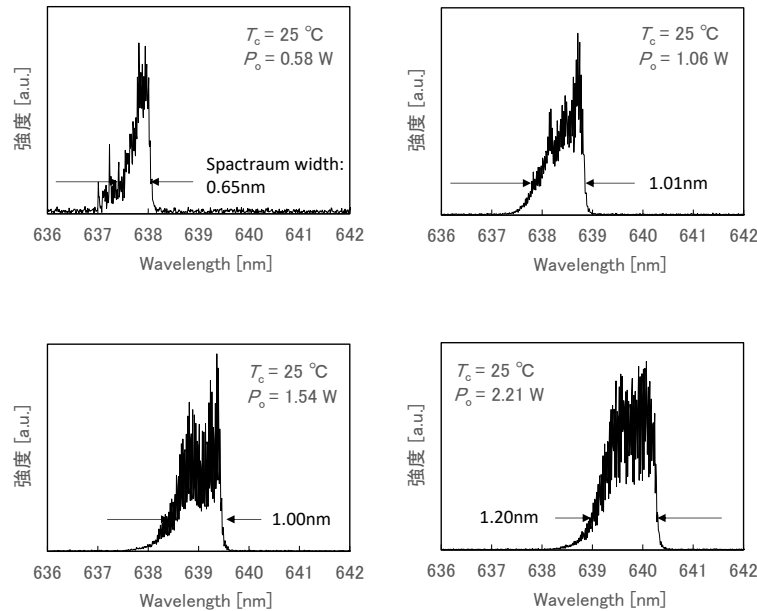


図 6-8 波長スペクトルの例と波長スペクトル幅の定義

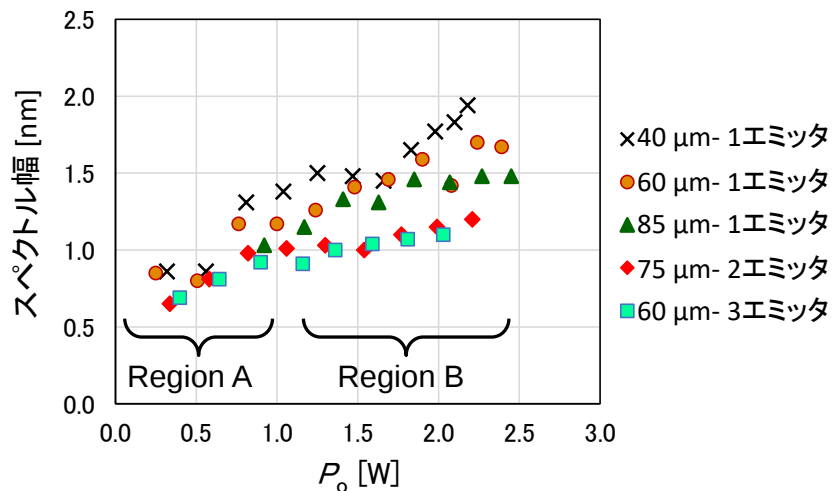


図 6-9 波長スペクトル幅の光出力依存性

波長スペクトル幅は、光出力が大きいほど広がる傾向となっている。図 6-10 に C_s 値 (Log スケール) と波長スペクトル幅との関係を示す。Region B の領域となる光出力 1.15 W 以上の領域のみをプロットした。

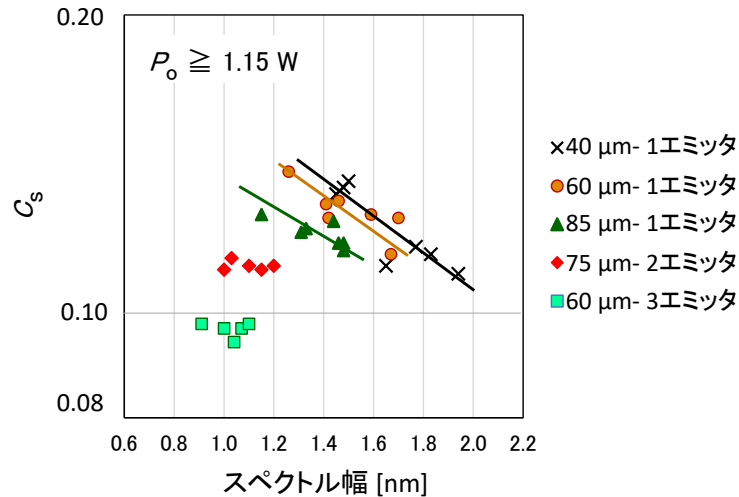


図 6-10 波長スペクトル幅と C_s 値の関係

2 エミッタ LD および 3 エミッタ LD の場合は、波長スペクトル幅の変化が小さいことから、はっきりしないが、1 エミッタ LD では波長スペクトル幅が大きいほど C_s 値が小さくなる。波長スペクトル幅に対する C_s 値の低下比はほぼ一定となっており、例えば 60 μm -1 エミッタ LD において、波長スペクトル幅が 0.5 nm 大きくなった時の C_s 値の減少率は約 20 % である。これは、Murata らが測定した C_s 値の波長スペクトル幅依存性⁽¹¹³⁾にほぼ一致する。以上のことから、Region B における C_s 値の光出力依存性は、波長スペクトル幅が広がることによる可干渉性の低下に起因しているものと考えられる。

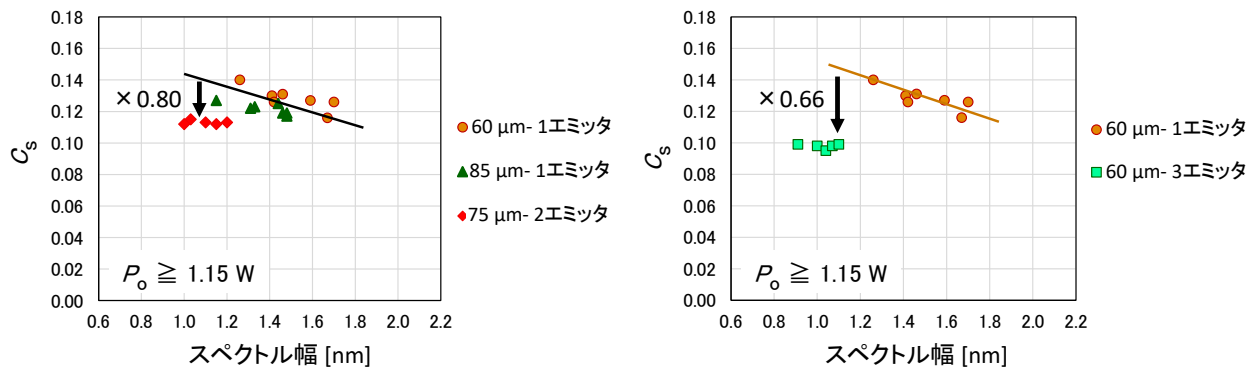
一方、しきい電流値に近い Region A では、逆に光出力が大きいほど C_s 値が大きくなっている。しかしながら、図 6-9 からは、低出力になるほど波長スペクトル幅が広がるような振る舞いは見られないことから、 C_s 値の増減には別の理由があると考えられる。この理由としては、しきい電流値付近で発生しやすい縦モード間の競合によって時間的に波長スペクトルが変化した結果、干渉状態すなわちスペックル形状が時間的に変化し、それが時間平均化されることにより C_s 値が小さくなっているものと考えられる。

エミッタ幅が異なる 1 エミッタ LD 間で比較すると、図 6-10 のように波長スペクトル幅が同じであっても、エミッタ幅が広いほど C_s 値が小さいとの結果となった。これは、エミッタ幅が広いほど、許容される横高次モードの数が多くなることから、横高次モード間の競合がより複雑になったことに起因している可能性がある。ここで、エミッタ領域における水平方向の屈折率は、エミッタ中心部の温度が最も高いことに起因する山状の分布となっている。一方、

次数の異なる高次モードは、図 3-9 のようにそれぞれ異なる NFP 形状を持つことから、屈折率の分布形状の影響でそれぞれ異なる実効屈折率を持つことになる。その結果、各横モードはわずかに異なる発振波長を持つ。エミッタ幅が広いほど多くの高次モードが存在するため、モード間の競合による発振波長分布の時間変動が顕著になり、スペックルパターンが時間的に平均化されると考えられる。加えて、横高次モード間の競合によって FFP の形状が時間変化することも、 C_s 値低減に寄与していると考えられる。

C_s 値のエミッタ数依存性に関しては、図 6-7 のようにエミッタ数が多いほど C_s 値が小さくなっている。これは、それぞれのビームで生成されるスペックルパターンが空間的に平均化されることによるものであると考えられる。光源の数を N とすると、スペックルコントラストは $\sqrt{1/N}$ になることが知られているが⁽⁸⁶⁾、マルチエミッタ LD の場合も同程度の効果が得られるかどうかを検討した。

図 6-11(a) は、60 μm - 1 エミッタ LD と 75 μm - 2 エミッタ LD の C_s 値を比較したものである。なお、 C_s 測定は図 6-7 における Region B となる $P_o \geq 1.15\text{W}$ の条件下で行った。6.4.1 項にて議論したとおり、 C_s 値は波長スペクトル幅によって変化するため、横軸を波長スペクトル幅とした。1 エミッタ LD と、2 エミッタ LD の C_s 値を同じエミッタ幅 (75 μm) で比較するため、60 μm - 1 エミッタ LD と 85 μm - 1 エミッタ LD の C_s 値を用いて、75 μm - 1 エミッタ LD の C_s 値を予測した。この予測線を黒の実線で示す。同じスペクトル幅で 1 エミッタ LD の C_s 予測値と 2 エミッタ LD の C_s 値を比較した結果、2 エミッタ LD の C_s 値は 1 エミッタ LD の約 0.8 倍であった。図 6-11(b) は、同様に 60 μm - 1 エミッタ LD と、60 μm - 3 エミッタ LD の C_s 値を比較したものである。3 エミッタ LD の C_s 値は、1 エミッタ LD の約 0.66 倍であった。



(a) 1 エミッタと 2 エミッタ LD の C_s 値

(b) 1 エミッタと 3 エミッタ LD の C_s 値

図 6-11 エミッタ数と C_s 値の関係

2 エミッタ LD の C_s 値は、理論上は 1 エミッタ LD の C_s 値の $1/\sqrt{2}$ ($=0.71$ 倍) になると考えられるが、実際には 0.80 倍との結果であった。また、3 エミッタ LD の C_s 値は、1 エミッタ LD

の C_s 値の $1/\sqrt{3}$ ($= 0.58$) 倍にはならず 0.66 倍となった。このように、2 および 3 エミッタ LD のいずれにおいても、 C_s 値の低減効果は理論値比で 0.85 程度となり、若干小さくなっていた。この理由としては、6.3.2 項で議論した FFP の平均化が十分でないことや、複数エミッタが 1 チップに近接して搭載されているために、お互いのレーザー光の位相関係に、わずかな相関関係が残っていることなどが考えられる。

6.4.2 各エミッタ仕様における信頼性と C_s 値の関係

次に、信頼性と C_s 値の観点から各エミッタ仕様間の優劣を議論する。5.2 節に示したように MTTF(COMD)は前端面と活性層の利得領域との温度差 ΔT_{fa} に依存するため、 C_s 値と ΔT_{fa} の関係を調べることで C_s 値と MTTF(COMD)の関係が明らかになる。

ΔT_{fa} を求めるための熱シミュレーションモデルおよびその方法は、4.2.3 項で示したものと同一である。この ΔT_{fa} と、 C_s 実測値の関係を図 6-12 に示す。図中では、それぞれの LD において、光出力が 2.0 W となる位置を丸印にて記入している。これらを比較した結果、マルチエミッタ LD では、どの 1 エミッタ LD よりも C_s 値が小さく、かつ ΔT_{fa} も小さくなっている。つまり、マルチエミッタ LD は MTTF(COMD)が長く、かつスペckル雑音も小さいというメリットを有している。特に、3 エミッタ LD は、2 エミッタ LD と比べても、長寿命かつ低スペckル雑音での動作が期待される。

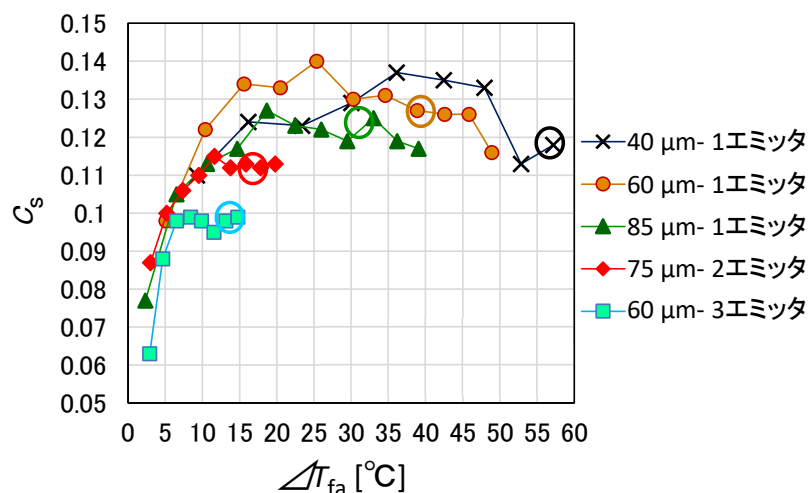


図 6-12 ΔT_{fa} と C_s 値の関係 (丸印は $P_o = 2.0\text{ W}$ の場合)

Slow 劣化については、共振器中央部の活性層温度を求めることで優劣を比較した。 $T_c = 0\text{ °C}$ とした時の活性層温度 T_j と C_s 値の関係を図 6-13 に示す。図中では、それぞれのサンプル

において、光出力が 2.0 W となる位置を丸印にて記入している。2.0 W 出力時の比較から分かるように、2 エミッタ LD は、いずれの 1 エミッタ LD よりも C_s 値が小さく、かつ活性層温度も小さい。つまり、2 エミッタ LD は、MTTF(Slow)が大きく、かつスペckル雑音が小さいというメリットを有している。3 エミッタ LD は、2 エミッタ LD に比べて C_s 値が小さいものの、活性層温度は高いために MTTF(Slow)が劣ることになる。

以上のことから、高い光出力や低いスペckル雑音が要求される場合は、 ΔT_{fa} や C_s 値で優位な 3 エミッタ LD を使用することが望ましい。高温で使用したい場合は、 C_s 値が 3 エミッタ LD よりも劣るものの、活性層温度が低く MTTF(Slow)が大きい 2 エミッタ LD を使用する方が有利となる。

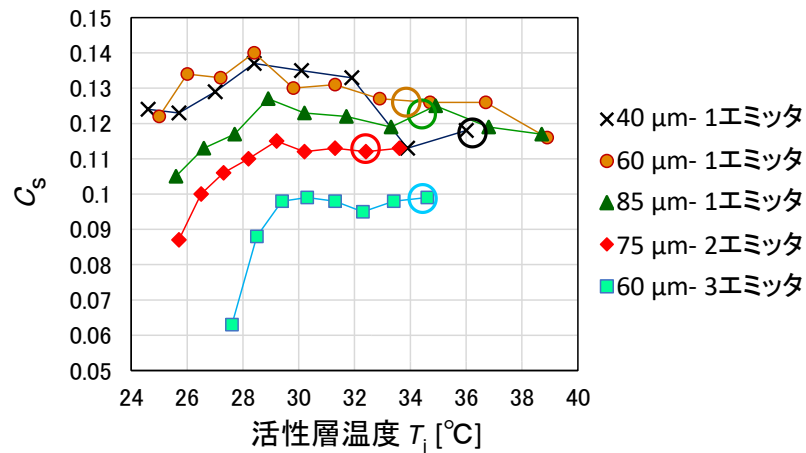


図 6-13 活性層温度と C_s 値の関係（丸印は $P_o = 2.0$ W の場合）

表 5-2 に示した、MTTF(Source)が 20,000 時間以上となる使用可能最大光出力と、その時の C_s 値を表 6-2 に示す。75 μm- 1 エミッタ LD の C_s 値は、60 および 85 μm- 1 エミッタ LD からの推定値である。75 μm- 1 エミッタ LD に対し、75 μm- 2 エミッタ LD では 12 % の C_s 値低減、60 μm- 3 エミッタ LD では 23 % の C_s 値減となる。この C_s 値低減量は決して大きなものではないことから、単独の手法では目標の C_s 値を達成出来ないが、複数個の LD を使用した多波長化など、他の C_s 値低減策と組み合わせることで、より C_s 値の小さい高品質の映像を実現するための手助けとなることが期待できる。

表 6-2 MTTF $\geq$ 20,000 時間となる使用可能最大光出力 (CW 動作) と C_s 値

$T_c=25^\circ\text{C}$	20,000 時間使用 可能光出力 [W]	C_s 値	C_s 相対値 (対 75 μm -1 エミッタ LD)
75 μm - 1 エミッタ LD	1.01	0.128	1.00
75 μm - 2 エミッタ LD	2.14	0.113	0.88
60 μm - 3 エミッタ LD	2.64	0.098	0.77

6.5 まとめ

エミッタ幅 40, 60 および 85 μm の 1 エミッタ LD, 75 μm - 2 エミッタ LD, 60 μm - 3 エミッタ LD の C_s 値を評価した。いずれの LD でも、しきい電流値近傍では縦モード競合による可干渉性の低下によるものと考えられる C_s 値の低下が見られた。また、高出力領域では、波長スペクトル幅増大に起因する C_s 値の低下を確認した。

エミッタ幅が大きくなるほど C_s 値が小さくなることも明らかになった。エミッタ幅が大きいほど、より高次の横モードが含まれるため、高次モード間のモード競合が波長や FFP の揺らぎを発生させた結果、 C_s 値が低減した可能性がある。第 3 章の検討によって、光損失の観点からはエミッタ幅 75 μm 前後が優位であることが分かったが、スペックル雑音の観点からも、ある程度幅の広いエミッタが優位であると言える。

さらに、本研究におけるマルチエミッタ LD のように、完全に独立ではなく、1 チップに作りこまれた複数のエミッタからのレーザー光の重ね合わせの場合においても、エミッタ数が多いほど C_s 値の低減効果が大きくなることを確認した。ただし、その低減量は理論値比で 0.85 前後と若干小さいものであり、FFP の平均化が十分でないといった測定上の問題点や、エミッタが近接していることによるエミッタ間の位相相関などが原因として考えられる。

続いて、MTTF を決定する要因である $\angle T_{fa}$ および活性層温度の観点から C_s 値を評価した結果、2 および 3 エミッタ LD は、1 エミッタに比べて長寿命と低スペックル雑音との両立が可能であることが明らかになった。

特に、縦モード間および横モード間の競合を促進することでスペックル雑音が低減する可能性があるとの知見は、これまで困難と考えられてきた光源側でのスペックル雑音低減方法を検討する上で有意義なものである。また、本研究で検討した 75 μm - 2 エミッタ LD, および 60 μm - 3 エミッタ LD の使用可能最大光出力における C_s 値は、75 μm - 1 エミッタ LD に対しそれぞれ 12 % および 23 % 低減することが分かった。60 μm - 3 エミッタ LD 単体の CW 駆動 2.0

W 出力時の C_s 値は 0.1 となっている。したがって 4 個の LD を使用することで C_s はその $\sqrt{1/4}$ となり、目標とする 0.05 を実現することができる。このように、マルチエミッタ LD は、光出力特性や MTTF を改善するだけでなく、もう 1 つの問題であるスペckル雑音に対しても、大きくはなものの確実に利点のある構造であると言える。

第7章：結論

7.1 本研究の結論

本研究は、高温・高出力時の光出力低下や、COMD および Slow 劣化による光出力の経時劣化、映像品質を落とすスペckル雑音といった問題を改善し、高輝度・高効率・高信頼・低スペckル雑音特性をもつ赤色 LD 光源を実現することを目的としたものである。

第 1 章では、LD の歴史に加え、LD がレーザーディスプレイに応用されるに至った経緯、LD を光源とすることによって得られる利点について説明した。また、レーザーディスプレイの形態により、赤色 LD が CW あるいはパルスで動作することが要求されることを説明した。その後、赤色 LD の研究開発の歴史について述べ、さらなる高出力・高効率化、長寿命化、低スペckル化が求められていることを説明した。

第 2 章では、本論文において赤色 LD の高出力・高効率化、長寿命化を検討するために必須となる、熱シミュレーションについて検討し、赤色 LD の光出力や Slow 劣化速度を決定する要因である活性層温度を求める方法を確立した。この方法により、CW およびパルス動作の双方で、活性層温度を正確に求めることが出来ることを実証した。さらに、この熱シミュレーションを用いることで、1 エミッタ LD の光出力特性の実測結果から、任意の構造のマルチエミッタ LD の光出力特性を予測する方法を確立した。

第 3 章では赤色 LD の光出力特性の改善について検討した。まず最初に、活性層への光閉じ込め係数を増大することにより、赤色 LD の光出力特性を改善可能であることを実証した。次に、エミッタ幅 75 μm の場合にスロープ効率が最大となることと、この原因が横高次モードの損失に関連することを示した。また、光損失が大きくしきい値利得が高いはずの横高次モードが発振モードに含まれる理由を検討した結果、空間的ホールバーニングによってモード利得が低下することを回避するというメカニズムによるものであるとの結論を得た。さらに、エミッタ幅の最適値の把握と熱抵抗値のシミュレーション結果、および第 2 章で確立した光出力予測法を用いることで、マルチエミッタ LD の最適構造を検討し、CW 動作では 75 μm - 2 エミッタ LD が、パルス動作では 60 μm - 3 エミッタ LD が有望な構造であることを確認した。これらの LD を試作・評価した結果、特に高温・高出力動作時において、従来の 1 エミッタ LD を大きく上回る光出力と電力変換効率が得られることを実証した。

第4章では、赤色 LD の信頼性改善について検討した。COMD が、前端面と活性層利得領域との温度差 (ΔT_{fa}) があるしきい値を超えることで発生すること、およびこのしきい値がエミッタ構造に依存しないことを立証した。 ΔT_{fa} を小さくするという観点から COMD レベルの改善方法を検討した結果、前端面の放熱を改善することで COMD レベルを大きく改善出来る可能性があることを示した。また、GaInP ウエル層をもつ AlGaInP/GaAs 系 LD における Slow 劣化の原因が、他の材料系の場合と同様、非発光再結合中心の増大、それもループ転位などの局所的な転位ではなく、ウエル層全体に存在する点欠陥あるいは不純物等に起因する深い準位などに起因している可能性が高いことを示した。

第5章では、赤色 LD の信頼性予測方法について検討した。通電試験結果より得られていた、“MTTF(COMD)は光出力の-3.2 乗に比例する”との関係と、第4章での検討で得られた、“構造によらず ΔT_{fa} が COMD レベルを決定する”という事実を組み合わせることで、任意の構造における MTTF(COMD)を予測する方法を確立した。また、赤色 LD における Slow 劣化速度がアレニウス則に従うこと、およびその活性化エネルギーを明らかにすることで、任意の構造における MTTF(Slow)値を予測可能にした。これら2つの劣化モードの MTTF 予測方法を確立したことで、LD 単体および、多数の LD からなる光源の MTTF 値の推定が可能になった。特に多数の LD からなる光源の MTTF 値については、COD と Slow 劣化が同時並行で発生することに注意が必要で、本研究ではこの場合の MTTF の求積方法を確立した。

また、パルス動作の場合の MTTF の推定方法を確立するとともに、駆動電流波形のオーバーシュートを抑制することで、光出力をほとんど落とすことなく MTTF(COMD)を大きく延ばすことが可能であることを示した。

これらにより、20,000 時間以上の動作が可能な CW 光出力は、従来の 75 μm -1 エミッタの赤色 LD の 1.0 W に対し、75 μm -2 エミッタ構造で 2.1 W となることを示した。また、パルス動作の場合は、60 μm -3 エミッタ構造で 3.5 W が可能であることを示した。

第6章では、赤色 LD のスペックルノイズ低減方法について検討した。エミッタ幅およびエミッタ数の異なる赤色 LD のスペックルコントラスト値を評価することで、 C_s 値に電流値依存性およびエミッタ幅依存性があり、これがそれぞれ縦モードおよび横モード間の競合に起因する可能性があることを示した。さらに、本研究で取り扱ったような、エミッタ間隔が 200 μm 程度と非常に狭いマルチエミッタ構造においても、ビームの重ね合わせ効果による C_s 値の低減効果が得られることを実証した。また、前端面温度や活性層温度の議論によって、マルチエミッタ LD が長寿命と低スペックル雑音を両立できる構造であることを示した。

本研究では、熱シミュレーションを用いて赤色 LD の活性層温度を推定することにより、エミッタ構造の異なる LD の光出力特性を予測した。これにより、マルチエミッタ構造が高出力動作を実現可能な構造であることを示した。また、この構造における横モードの振る舞いについても考察した。さらに、前端面と利得領域の活性層との温度差が COD 劣化寿命を、活性層温度が Slow 劣化寿命を決定していることを明らかにすることで、寿命の推定を可能にするとともに、寿命を改善する方法を提案した。

これらの検討結果を元に、赤色 LD 素子の最適構造を設計し、実際に素子を作製した結果、CW 動作で従来の約 2 倍、パルス動作で従来の 3 倍の動作が可能であることと、低スペckル動作が可能であることを実証した。このような高出力、高信頼、低スペckル雑音の赤色 LD は、光源や周辺部品のコストを大きく低減するものであり、レーザーディスプレイの普及をさらに推し進める原動力となるものである。

7.2 展望

本研究で検討した熱シミュレーション手法によって、活性層や前端面の温度を高い精度で推定可能であること、LD の光出力の予測が可能であること、素子劣化原因の解析や平均故障時間の推定が可能であることを実証した。

活性層温度に対して前端面温度を相対的に下げることで MTTF(COMD)を低減するという手法や、活性層と前端面温度の差から MTTF(COMD)を予測可能であることを示したことは、今後の素子寿命の改善に繋がっていくものと考えられる。さらに、赤色 LD における Slow 劣化の原因が非発光再結合中心の増大であること、および、それが点欠陥や不純物等に起因する深い準位などに起因する可能性が高いことを明らかにしたことで、活性層の成長条件改善による点欠陥の低減や、p 型ドーパントの活性層への拡散防止により Slow 劣化を抑制できる可能性を示した。これまで困難と考えられてきた光源側でのスペckル雑音対策についても、縦モード間および横モード間の競合という新たなスペckル雑音低減のメカニズムを明らかにしたことで、新しい改善方法の創生が期待される。

本研究で示した光出力予測の方法は、LD 素子を実際に作製することなく光出力特性を予測可能なものであり、信頼性予測手法は、長期の信頼性試験を実施することなく平均故障時間を推定可能なものである。したがって、これら手法は、LD 開発の負荷低減や期間短縮に大きく貢献するものと期待される。また、これらは、LD の材料や発振波長に限定されず、他の材料・波長帯の LD にも応用が可能であるため、今後の様々な LD の開発効率化の観点から、大きな意義を持つものである。

参考文献

- (1) R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, “Coherent Light Emission From GaAs Junctions”, Phys. Rev. Lett., 9(9), 366 (1962).
- (2) M. Panish, I. Hayashi, and S. Sumski, “A technique for the preparation of low-threshold room-temperature GaAs laser diode structures”, IEEE J. Quantum Electron., 5(4), 210 (1969).
- (3) M.B. Panish, I. Hayashi, and S. Sumski, “Double-Heterostructure Injection Lasers with Room-Temperature Thresholds as Low as 2300 A/cm²”, Appl. Phys. Lett., 16(8), 326 (1970).
- (4) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, “Junction lasers which operate continuously at room temperature”, Appl. Phys. Lett., 17(3), 109 (1970).
- (5) L. Esaki, and R. Tsu, “Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors”, IBM J. Res. Develop., 14(1), 61 (1970).
- (6) T. Tsukada, “GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs buried - heterostructure injection lasers”, J. Appl. Phys., 45(11), 4899 (1974).
- (7) H. Namizaki, H. Kan, M. Ishii, and A. Ito, “Transverse - junction - stripe - geometry double - heterostructure lasers with very low threshold current” , J. Appl. Phys., 45(6), 2785 (1974).
- (8) M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, N. Chinone, R. Ito, and H. Nakashima, “Single-transverse-mode low-noise (GaAl) As lasers with channeled substrate planar structure”, Proc. Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication, pp. 83 (1977).
- (9) M. Nakamura, A. Yariv, H. W. Yen, S. Somekh, and H. L. Garvin, “Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback”, Appl. Phys. Lett., 22(10), 515 (1973).
- (10) M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, and A. Yariv, “CW operation of distributed - feedback GaAs - GaAlAs diode lasers at temperatures up to 300 K” , Appl. Phys. Lett., 27(7), 403 (1975).
- (11) J. J. Hsieh, J. A. Rossi, and J. P. Donnelly, “Room-temperature cw operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1 μm”, Appl. Phys. Lett., 28(12), 709 (1976).
- (12) A. Doi, T. Fukuzawa, M. Nakamura, R. Ito, and K. Aiki, “InGaAsP/InP distributed - feedback injection lasers fabricated by one-step liquid phase epitaxy” , Appl. Phys. Lett., 35(6), 441 (1979).
- (13) 山本和久, “第 1 章 総説”, 解説レーザーディスプレイ, 黒田和男, 山本和久, 栗村直(編), 1-18, オプトロニクス社, 東京, (2010).
- (14) 年吉洋, “第 4 章 4 節 MEMS 光スキャナの例” , 134-139, 解説レーザー照明・ディスプレイ 究極の照明・ディスプレイを目指して, 黒田和男, 山本和久 (編) , オプトロニクス社, 東京, (2013).
- (15) 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, 225 (2013).

- (16) Jeff Hecht, "Short history of laser development", Opt. Eng., 49(9), 091002 (2010).
- (17) H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and J. Someya, "65-inch, Super Slim, Laser TV with Newly Developed Laser Light Source", SID 08 DIGEST, 854 (2008).
- (18) K. Yamamoto, "The Smart Laser Display", 18th Int. Display Workshops (IDW'11), PRJ3-1 (2011).
- (19) M. Kuwata, H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and J. Someya, "A 65 - in. slim (255 - mm depth) laser TV with wide - angle projection optical system" , J. Soc. Inf. Disp., 17, 875 (2009).
- (20) 山本和久, "レーザによる映像表示技術とその応用", 電気学会誌, 131, 164 (2011).
- (21) M. Niesten, T. Masood, J. Miller, and J. Tauscher, "Scanning laser beam displays based on a 2D MEMS", Proc.SPIE, 7723, 77230U (2010).
- (22) 歸山敏之, "プロジェクタ技術の最新動向", 日本画像学会誌, 40(4), 366 (2001).
- (23) H. D. Summers, and P. Blood, "Room temperature operation of ultrashort wavelength (619 nm) AlGaInP/GaInP tensile strained quantum well lasers", Electronics Lett., 29(11), 1007 (1993).
- (24) T. Nishida, N. Shimada, T. Ogawa, M. Miyashita, and T. Yagi, "Short Wavelength Limitation in High Power AlGaInP Laser Diodes", Procs. SPIE, 7918, 791811 (2011).
- (25) M. Ishikawa, Y. Ohba, Y. Watanabe, H. Nagasaki, H. Sugawara, M. Yamamoto, and G. Hatakoshi, "InGaAlP Transverse Mode Stabilized Visible Laser Diodes Fabricated by MOCVD Selective Growth", Ex. Abst. 18th SSDM, 153, (1986).
- (26) R. Hiroyama, H. Hamada, M. Shono, S. Honda, K. Yodoshi, and T. Yamaguchi, "630 nm-Band AlGaInP strained MQW laser diodes with an MQB grown on misoriented substrates", Proc. 13th IEEE Int. Semicon. Laser Conf., G2 (1992).
- (27) D. P. Bour, K. J. Beernink, D. W. Treat, R. S. Geels, and D. F. Welch, "AlGaInP single quantum well laser diodes", Proc. SPIE, 2115, 269 (1994).
- (28) S. A. Wood, P. M. Snowton, C. H. Molloy, P. Blood, D. J. Somerford, and C. C. Button, "Direct Monitoring of Thermally Activated Leakage Current in AlGaInP Laser Diodes", Appl. Phys. Lett., 74(17), 2540 (1999).
- (29) M. Kato, M. Miyashita, A. Shima, K. Ono, T. Yagi, and Y. Kokubo, "Low-operating-current, high-power, 660 nm laser diodes for DVD-RAM", Proc. 5th Optoelectron. Comm. Conf., 534 (2000).
- (30) B. Lu, J. S. Osinski, E. Vail, B. Pezeshki, B. Schmitt, and R. J. Lang, "High power 635 nm low-divergence ridge waveguide singlemode lasers", Electronics Lett, 34(3), 272, (1998).

- (31) M. Yukawa, N. Shimada, K. Shibata, K. Ono, and T. Yagi, “638nm single lateral mode laser diode for Micro-Projector application”, IEEE 21st Int. Semicon. Laser Conf., 73 (2008).
- (32) D. Feise, G. Blume, Chr. Kaspari, K. Paschke, and G. Erbert, “Variation of refractive index step of 635nm ridge waveguide lasers for optimized index guiding”, Procs. SPIE, 7918, 791812 (2011).
- (33) A. Gomyo, K. Kobayashi, and S. Kawata, I. Hino, T. Suzuki, and T. Yuasa, “Studies of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ layers grown by metalorganic vapor phase epitaxy; Effects of V/III ratio and growth temperature”, J. Cryst. Growth, 77(1-3), 367 (1986).
- (34) A. Gomyo, T. Suzuki, K. Kobayashi, S. Kawata, and I. Hino, “Evidence for the existence of an ordered state in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ grown by metalorganic vapor phase epitaxy and its relation to band - gap energy” , Appl. Phys. Lett., 50(11), 673 (1987).
- (35) M. Kondow, H. Kakibayashi, and S. Minagawa, “Ordered structure in OMVPE-grown $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ”, J. Cryst. Growth, 88(2), 291 (1988).
- (36) M. Kondow and S. Minagawa, Y. Inoue, T. Nishino, and Y. Hamakawa “Anomalous temperature dependence of the ordered $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ photoluminescence spectrum”, Appl. Phys. Lett., 54(18), 1760 (1989).
- (37) A. Gomyo, S. Kawata, T. Suzuki, S. Iijima, and I. Hino, “Large (6°) Off-Angle Effects on Sublattice Ordering and Band-Gap Energy in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ Grown on (001) GaAs Substrates”, J. Appl. Phys., 28(10A), L1728 (1989).
- (38) S. Minagawa, and M. Kondow, “Dependence of photoluminescence peak energy of MOVPE-grown AlGaInP on substrate orientation”, Electron. Lett., 25(12), 758 (1989).
- (39) H. Hamada, M. Shono, S. Honda, R. Hiroshima, K. Yodoshi, and T. Yamaguchi, “ AlGaInP visible laser diodes grown on misoriented substrates”, IEEE J. Quantum Electron., 27(6), 1483 (1991).
- (40) S. Minagawa, and M. Kondow, “Zinc-doping of (511) A layers of $(\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ grown by atmospheric metalorganic vapor phase epitaxy”, Electron. Lett, 25(6), 413 (1989) .
- (41) M. Kondo, C. Anayama, T. Tanahashi, and S. Yamazaki, “Crystal orientation dependence of impurity dopant incorporation in MOVPE-grown III–V materials”, J. Cryst. Growth, 124(1-4), 449 (1992) .
- (42) K. Sugiura, K. Domen, M. Sugawara, C. Anayama, M. Kondo, T. Tanahashi, and K. Nakajima, “Analysis of recombination centers in $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ quaternary alloys”, J. Appl. Phys., 70(9), 4946 (1991).
- (43) M. Suzuki, K. Itaya, Y. Nishikawa, H. Sugawara, and M. Okajima, “Reduction of residual oxygen incorporation and deep levels by substrate misorientation in InGaAlP alloys”, J. Cryst. Growth, 133, 303 (1993).

- (44) A. Moser, E. E. Latta, and D. J. Webb, "Thermodynamics approach to catastrophic optical mirror damage of AlGaAs single quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 55(12), 1152 (1989).
- (45) H. Yonezu, M. Ueno, T. Kamejima, and I. Hayashi, "An AlGaAs window structure laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, 15(8), 775 (1979).
- (46) K. Isshiki, T. Kamizato, A. Takami, A. Shima, S. Karakida, H. Matsubara, and W. Susaki, "High-power 780 nm window diffusion stripe laser diodes fabricated by an open-tube two-step diffusion technique", *IEEE J. Quantum Electron.*, 26(5), 837 (1990).
- (47) A. Shima, H. Tada, T. Motoda, M. Tsugami, T. Utakoji, and H. Higuchi, "Reliability Study on 50-100-mW CW Operation of 680-nm Visible Laser Diodes with a Window-Mirror Structure", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 3(2), 443 (1997).
- (48) G. Hatakoshi, K. Itaya, M. Ishikawa, M. Okajima, and Y. Uematsu, "Short-wavelength InGaAlP visible laser diodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, 27(6), 1476 (1991).
- (49) K. Sasaki, M. Matsumoto, M. Kondo, T. Ishizumi, T. Takeoka, S. Yamamoto, and T. Hijikata, "Highly Reliable 150 mW CW Operation of Single-Stripe AlGaAs Lasers with Window Grown on Facets", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30(5B), L904 (1991).
- (50) T. Yagi, Y. Tashiro, Y. Ohkura, S. Abe, H. Nishiguchi, and Y. Mitsui, "Thermal Rollover around 460mW Observation in Single-Lateral Mode 780nm Laser Diodes with Window-Mirror Structure", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42(4S), 2316 (2003).
- (51) 西田 武弘, "プロジェクト光源用赤色半導体レーザの高出力化とスペックル雑音低減化に関する研究", 大阪大学大学院工学研究科 博士学位論文 (2020).
- (52) N. Shimada, K. Shibata, Y. Hanamaki, T. Hamaguchi, and T. Yagi, "12 W CW operation of 640 nm-band laser diode array", *Proc. SPIE*, 6876, 68760L (2008).
- (53) 米津宏雄, "走査型電子顕微鏡による半導体レーザーの評価", *応用物理*, 46, 196 (1997).
- (54) S. Yamakoshi, O. Hasegawa, H. Hamaguchi, M. Abe, and T. Yamaoka, "Degradation of high-radiance $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ LED's", *Appl. Phys. Lett.*, 31(9), 627 (1977).
- (55) A. K. Chin, C. L. Zipfel, B. H. Chin, and M. A. DiGiuseppe, "Degradation of $1.3\mu\text{m}$ InP/InGaAsP light emitting diodes with misfit dislocations", *Appl. Phys. Lett.*, 42(12), 1031 (1983).
- (56) K. Mizuishi, "Some aspects of bonding-solder deterioration observed in long-lived semiconductor lasers: Solder migration and whisker growth", *J. Appl. Phys.*, 55(2), 289 (1984).
- (57) D. V. Lang, and C. H. Henry, "Nonradiative recombination at deep levels in GaAs and GaP by lattice-relaxation multiphonon emission", *Phys. Rev. Lett.*, 35(22), 1525 (1975).
- (58) 米津宏雄, "第 4.6 節 劣化現象と寿命", "光通信素子工学", 281-298 工学図書, 東京 (1984).

- (59) H. C. Casey, Jr., and E. Buehler, "Evidence for low surface recombination velocity on n-type InP", *Appl. Phys. Lett.*, 30(5), 247 (1977).
- (60) M. Morimoto, H. Imai, K. Hori, M. Takusagawa, and M. Fukuda, "Facet degradation of InGaAsP/InP double-heterostructure lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 37(12), 1082 (1980).
- (61) Y. Ueno, H. Fujii, K. Kobayashi, K. Endo, A. Gomyo, K. Hara, S. Kawata, T. Yuasa, and T. Suzuki, "Novel Window-Structure AlGaInP Visible-Light Laser Diodes with Non-Absorbing Facets Fabricated by Utilizing GaInP Natural Superlattice Disordering", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 29(9), L1666 (1990).
- (62) Y. Sin, N. Presser, B. Foran, N. Ives, and C. Moss, "Catastrophic Facet and Bulk Degradation in High Power Multi-mode InGaAs Strained Quantum Well Single Emitters", *Proc. SPIE*, 7198, 719818 (2009).
- (63) L. Bao, J. Bai, K. Price, M. Devito, M. Grimshaw, W. Dong, X. Guan, S. Zhang, H. Zhou, K. Bruce, D. Dawson, M. Kanskar, R. Martinsen, and J. Haden., "Reliability of High Power/Brightness Diode Lasers Emitting from 790 nm to 980 nm", *Proc. SPIE*, 8605, 86050N (2013).
- (64) M. Levy, N. Rappaport, G. Klumel, M. Shamay, R. Tessler, D. Yanson, S. Cohen, Y. Don, and Y. Kami, "High power single emitters for fiber laser pumping across 8xx nm-9xx nm wavelength bands", *Proc. SPIE*, 8241, 82410A (2012).
- (65) D. Newman and S. Ritchie, "Gradual degradation of GaAs double-heterostructure lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, 9(2) 2, 300 (1973).
- (66) R. L. Hartman and R. W. Dixon "Reliability of DH GaAs lasers at elevated temperatures", *Appl. Phys. Lett.*, 26(5), 239 (1975).
- (67) K. Mizuishi, N. Chinone, H. Sato, and R. Ito, "Acceleration of the gradual degradation in (GaAl)As double-heterostructure lasers as an exponent of the value of the driving current", *J. Appl. Phys.*, 50(11), 6668 (1979).
- (68) Y. L. Khait, J. Salzman, and R. Baserman, "Kinetic model for gradual degradation in semiconductor lasers and light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 53(22), 2135, (1988).
- (69) H. Kressel, M. Ettenberg, and I. Ladany, "Accelerated step-temperature aging of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterojunction laser diodes", *Appl. Phys. Lett.* 32(5), 305 (1978).
- (70) K. Fujiwara, T. Fujiwara, K. Hori, and M. Takusagawa, "Aging characteristics of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ double heterostructure lasers bonded with gold eutectic alloy solder", *Appl. Phys. Lett.* 34(10), 668 (1979).
- (71) H. Ishikawa, T. Fujiwara, K. Fujiwara, M. Morimoto, and M. Takusagawa, "Accelerated aging test of GaAlAs DH lasers", *J. Appl. Phys.*, 50(4), 2518 (1979).

- (72) M. Ettenberg, and H. Kressel, "The reliability of (AlGa)As CW laser diodes", IEEE J. Quantum Electron., 16(2), 186 (1980).
- (73) H. Imai, K. Hori, and M. Takusagawa, and K. Wakita, "Activation energy of degradation in GaAlAs double heterostructure laser diodes.", J. Appl. Phys., 52(5), 3167 (1981).
- (74) H. Mitsuyama, T. Motoda, T. Nishida, K. Kadoiwa, and T. Yagi, "Reliability Study on High-Power 638 nm Broad Stripe Laser Diode", Opt. Rev., 21(1), 43 (2014).
- (75) D. P. Bour, D. W. Treat, R. D. Brigans, R. S. Geels, and D. F. Welch, "OMVPE Growth of Materials for Red Laser Diodes", MRS Online Proceedings Library, 326, 45 (1993)
- (76) B. Sumpf, M. Zorn, R. Staske, J. Fricke, P. Ressel, A. Ginolas, K. Paschke, G. Erbert, M. Weyers and G. Traenkle, "3-W broad area lasers and 12-W bars with conversion efficiencies up to 40% at 650 nm", IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron., 13(5), 1188 (2007).
- (77) I. Charamisinau, G. Happawana, G. Evans, J. Kirk, D. Bour, A. Rosen and R. His, "High-Power Semiconductor Red Laser Arrays for Use in Photodynamic Therapy", IEEE J. of selected topics in quantum electron., 11(4), 881 (2005).
- (78) H. Murata, Y. Terui, M. Saitoh, Y. Satoh, and R. Terasaki, "Low threshold current density of 620 nm band MQW-SCH AlGaInP semiconductor lasers with Mg doped AlInP cladding layer", Electron. Lett., 27(17), 1569 (1991).
- (79) J. Salzman, Y. L. Khait, and R. Baserman, "Material evolution and gradual degradation in semiconductor lasers and light emitting diodes", Electron. Lett., 25(3), 244 (1989).
- (80) K. Kondo, O. Ueda, S. Isozumi, S. Yamakoshi, K. Akita, and T. Kotani, "Positive feedback model of defect formation in gradually degraded GaAlAs light emitting devices", IEEE Trans. Electron. Devices, 30(4), 321 (1983).
- (81) H. Imai, K. Isozumi, and M. Takusagawa, "Deep level associated with the slow degradation of GaAlAs DH laser diodes", Appl. Phys. Lett., 33(4), 330 (1978).
- (82) J.W. Tamm, A. Baerwolff, A. Jaegger, T. Elsaesser, J. Bollmann, W.T. Masselink, A. Gerhardt, and J. Donecker, "Deep level spectroscopy of high-power laser diode arrays", J. Appl. Phys, 84(3), 1325 (1998).
- (83) J. W. Goodman, "Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications", Roberts and Company Publishers, Greenwood Village, (2007).
- (84) S. Kubota and J.W. Goodman, "Very efficient speckle contrast reduction realized by moving diffuser device", Appl. Opt., 49(23), 4385 (2010).
- (85) 菊池啓記, "レーザープロジェクター用光変調素子", 光学, 35 (6), 301(2006).
- (86) J. W. Goodman, "Statistical Properties of Laser Speckle patterns." Laser Speckle and Related Phenomena, J. C. Dainty ed., Springer-Verlag, Berlin, 9 (1975).

- (87) S. Lowenthal, and D. Joyeux, “Speckle Removal by a Slowly Moving Diffuser Associated with a Motionless Diffuser”, *J. Opt. Soc. Am.*, 61 (7), 847 (1971).
- (88) 久保田重夫, “スペックル測定とその低減デバイス”, *光学*, 39 (3), 149 (2010).
- (89) M. Elbaum, M. Greenebaum, and M. King, “A wavelength diversity technique for reduction of speckle size”, *Opt. Communications*, 5(3), 171 (1972).
- (90) N. George, and A. Jain, “Speckle Reduction Using Multiple Tones of Illumination”, *Appl. Opt.*, 12(6), 1202 (1973).
- (91) N. George, and A. Jain, “Space and wavelength dependence of speckle intensity”, *Appl. Phys.*, 4(3), 201 (1974).
- (92) D. V. Kuksenkov, R. V. Roussev, S. Li, W. A. Wood, and C. M. Lynn, “Multiple-wavelength synthetic green laser source for speckle reduction.”, *Proc. SPIE*, 7917, 79170B (2011).
- (93) M. N. Akram, Z. Tong, G. Ouyang, X. Chen, and V. Kartashov, “Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror”, *Appl. Opt.* 49 (17), 3297 (2010).
- (94) T. Kozaki, H. Matsumura, Y. Sugimoto, S. Nagahama, and T. Mukai, “High-Power and Wide Wavelength Range GaN-Based Laser Diodes.”, *Proc. SPIE*, 6133, 613306 (2006).
- (95) L. Yang, J. Hu, L. Kim, and M. W. Shin, “Thermal analysis of GaN-based light emitting diodes with different chip sizes.”, *IEEE Trans. Device Mat. Reliability*, 8(3), 571 (2008).
- (96) M. Leers, K. Boucke, M. Götz, A. Meyer, M. Kelemen, N. Lehmann, and F. M. di Sopra, “Thermal resistance in dependence of diode laser packages”, *Proc. SPIE*, 6876, 687609 (2011).
- (97) Y. Zhang, J. Wang, C. Peng, X. Li, L. Xiong, and X. Liu, “A New Package Structure for High Power Single Emitter Semiconductor Lasers”, *IEEE 11th Int. Conf. Electron. Packaging Tech. & High Density Packaging*, 1346 (2010).
- (98) L. Yang, S. Y. Y. Leung, Y., C. K. Y. Wong, C. A. Yuan, Z. Guoqi, and S. Fenglian, “Thermal simulation of flexible LED package enhanced with copper pillars”, *J. Semicon.*, 36(6), 064011 (2015).
- (99) J. H. Choi, and M. W. Shin, “Thermal analysis of the open type of laser diode”, *17th Int. Workshop Thermal Invest. of ICs and Systems*, 1, (2011).
- (100) X. Zhang, B. Bo, Z., Qiao, Y. Xu, and X. Gao, “Analysis of thermal characteristics based on a new type diode laser packaging structure”, *Opt. Eng.*, 56(8), 085105 (2017).
- (101) W. Hui, and W. Dehong, “Thermal Analysis of the Semiconductor Lasers Welding”, *Micronanoelectronic Technology*, 7, 428 (2008).

- (102) J-J. Hu, S-M. Zhang, D-Y. Li, F. Zhang, M-X. Feng, P-Y. Wen, J-P. Liu, L-Q. Zhang, and H. Yang, “Thermal analysis of GaN-based laser diode mini-array”, *Chin. Phys. B*, 27 (9), 094208 (2018).
- (103) K. Endo, K. Kobayashi, H. Fujii, and Y. Ueno, “Accelerated aging for AlGaInP visible laser diodes”, *Appl. Phys. Lett.* 64 (2), 146 (1994).
- (104) 末松安晴編, “半導体レーザと光集積回路”, オーム社 東京 (1984).
- (105) J. S. Blakemore, “Semiconductor Statistics.”, Courier Corporation N. Chemsford (1962).
- (106) M. Asada, A. Adams, K. Stubkjaer, Y. Suematsu, Y. Itaya, S. Arai, “The temperature dependence of the threshold current of GaInAsP/InP DH lasers.”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 17 (5), 611 (1981).
- (107) 岡本勝就, “光導波の基礎”, コロナ社 東京 (1992).
- (108) M.A. Afromowita, “Refractive index of $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ” *Solid State Commun.*, 15 (1), 59 (1974).
- (109) K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, K. Mori, and T. Yagi, “High-power operation of AlGaInP red laser diode for display applications”, *Proc. SPIE*, 9348, 934817 (2015).
- (110) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, T. Nishida, and T. Yagi, “Lifetime Evaluation of 638 nm Dual Stripe Broad Area Laser Diode for Display Application”, *Proc. IDW’ 17*, 1165 (2017).
- (111) N. Shimada, M. Yukawa, K. Shibata, K. Ono, T. Yagi, and A. Shima, “640-nm laser diode for small laser display”, *Proc. SPIE*, 7198, 719806 (2009).
- (112) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, T. Nishida, and T. Yagi, “Recent progress of 638-nm high-power broad area laser diodes in Mitsubishi Electric”, *Proc. SPIE*, 10514, 1051404 (2018).

謝辞

本研究論文をまとめるにあたり、終始懇切なるご指導、ご助言を賜りました大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 近藤正彦 教授に心より感謝申し上げます。大阪大学 レーザー科学研究所 山本和久 教授におかれましては、本論文に対する貴重なご指導とご助言と頂きましたこと、およびスペックル雑音測定に関して、測定機材をご提供戴きましたことに心より御礼申し上げます。また、有益なご助言を頂きました、大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 梶井博武 准教授に心より感謝いたします。

本研究論文に関して貴重なご教示を頂きました、小島一信 教授、森勇介 教授、片山光浩 教授、尾崎雅則 教授、片山竜二 教授、森伸也 教授、廣瀬哲也 教授に深く感謝いたします。また、スペックル雑音測定および投稿論文へのご指導を頂きました、大阪大学産業科学研究所 高森晃 特任教授に深く感謝いたします。

赤色半導体レーザーの特性改善に関して、レーザーの作製、各種測定・評価・解析、討論の機会を与えて頂いた三菱電機株式会社 高周波光デバイス製作所ならびにメルコセミコンダクタエンジニアリング株式会社 北伊丹事業所の皆様に感謝申し上げます。

学位取得の機会を与えて頂いた三菱電機株式会社 高周波光デバイス製作所 竹見政義 所長、赤色 LD の設計について深い議論を交わした、三菱電機株式会社 半導体・デバイス事業本部 西田武弘 グループリーダー、同社 高周波光デバイス製作所 森 健三 専任、宮下宗治 専任、阿部真司 専任、楠政論 専任、藤田巧真 主任、株式会社あかし 島田尚往 博士(元・同製作所 専任)、同社 情報総合研究所 柳澤 隆行 主席技師長、品質面の議論を頂きました同社 高周波光デバイス製作所 満山弘専任、特に各種実験についてのご助言、結果に対する解釈について議論頂きました日亜化学工業株式会社 八木哲哉 博士(元・同製作所 主席技師長)、に深く感謝いたします。

最後に、本研究論文を執筆にあたり、理解および協力いただいた家族に深く感謝いたします。

本論文に関連する主要業績

主要論文

- (1) 蔵本恭介, 藤田拓真, “赤色半導体レーザーの最新技術動向”, レーザー研究, **49**(8), 451 (2021).
- (2) K. Kuramoto, T. Fujita, T. Nishida, T. Yagi, A. Takamori, K. Yamamoto, and M. Kondow, “Speckle contrast evaluation of multi-emitter broad area 638-nm red laser diodes”, Opt. Rev., **28**(4), 501 (2021).
- (3) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, T. Nishida, and T. Yagi, “Slow degradation of a multiemitter 638-nm high-power broad-area laser diode during long-term aging”, Opt. Eng., **59**(10), 106101 (2020).
- (4) T. Nishida, K. Kuramoto, Y. Iwai, T. Fujita, and T. Yagi, “Multi-Emitter 638-nm High-Power Broad Area Laser Diodes for Display Application”, Opt. Eng., **58**(8), 086113 (2019).
- (5) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, M. Kusunoki, T. Nishida, and T. Yagi, “Highly Reliable Operation under High Case Temperature in 638-nm BA-LD”, Opt. Rev., **26**(1), 201 (2019).
- (6) T. Nishida, K. Kuramoto, S. Abe, M. Kusunoki, M. Miyashita, and T. Yagi, “High-Power and Highly Reliable 638-nm Band BA-LD for CW Operation”, Opt. Rev., **25**, 160 (2018).
- (7) T. Yagi, K. Kuramoto, K. Kadoiwa, R. Wakamatsu, and M. Miyashita, “Reliability study on high power 638-nm triple emitter broad area laser diode”, Proc. SPIE, **9733**, 973305 (2016).
- (8) T. Yagi, H. Mitsuyama, T. Nishida, K. Kadoiwa, and K. Kuramoto, “Reliability Study on High-Power 638 nm Broad Stripe Laser Diode”, Proc. SPIE, **8965**, 896502 (2014).

主要国際学会発表

- (1) T. Nishida, K. Kuramoto, T. Fujita, M. Kusunoki, and T. Yagi, “Reliability Improvement in 638 nm Broad Area Laser Diode”, Proc. Laser Display and Lighting Conference, LEDIA-LDC-JS-1 (2019).
- (2) T. Nishida, K. Kuramoto, Y. Iwai, T. Fujita, and T. Yagi, “Multi-Emitter 638-nm High-Power Broad Area Laser Diodes for Display Application”, Proc. SPIE, **50939**, 50939 (2019).

- (3) T. Yagi, K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, and T. Nishida, “High-Power 638-nm AlInGaP Broad Area Laser Diode and Its Reliability”, Conference digest of 26th IEEE Int. Semicon. Laser Conf., 9 (2018).
- (4) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, M. Kusunoki, T. Nishida, and T. Yagi, “Highly-Reliable Operation under High Case Temperature in 638-nm BA-LD”, Proc. Laser Display and Lighting Conf., LDC7-5 (2018).
- (5) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, T. Nishida, and T. Yagi, “Recent Progress of 638-nm High-Power Broad Area Laser Diodes in Mitsubishi Electric”, Proc. SPIE, **10514**, 1051404 (2018)
- (6) K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, T. Nishida, and T. Yagi, “Lifetime Evaluation of 638 nm Dual Stripe Broad Area Laser Diode for Display Application.”, Proc. Int. Display Workshop, **24**, 3 (2017).
- (7) T. Nishida, K. Kuramoto, S. Abe, M. Kusunoki, M. Miyashita, and T. Yagi, “High-Power and Highly-Reliable 638 nm Band BA-LD for CW Operation” , Proc. Laser Display and Lighting Conference, LDC4-2 (2017).
- (8) K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, K. Mori, and T. Yagi, “High-power operation of AlGaInP red laser diode for display applications”, High-Power Diode Laser Technology and Applications.”, Int. Society for Optics and Photonics, **9348**, 96480H (2015).
- (9) K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, K. Mori, T. Yagi, “High Power AlGaInP Red Laser Diode for Display Applications”, Proc. Int. Display Workshop, 1064 (2014).
- (10) K. Kuramoto, T. Nishida, S. Abe, M. Miyashita, K. Mori, T. Yanagisawa, and T. Yagi, “High Power AlGaInP Laser Diode”, Proc. Laser Display Conf., 24 (2014).