

ブロードエリア型半導体レーザーの横モード特性

滝口 由朗・朝妻 庸紀・平田 照二

Lateral Mode Characteristics of Broad-Area Laser Diodes

Yoshiro TAKIGUCHI, Tsunenori ASATSUMA and Shoji HIRATA

Dependence of NFP on a waveguide structure was investigated experimentally in a broad-area laser diode (BA-LD). Index guided BA-LD starts lasing at both stripe edges and shows a well defined and top-hat shape NFP in contrast to a gain guided BA-LD. We propose an experimentally obtained three-region model which explains the NFP characteristics.

Key words: high power, semiconductor lasers, chaos

近年、固体レーザーの励起光源やレーザーディスプレイ等の照明用光源として、高効率・高出力なブロードエリア型半導体レーザー (BA-LD) が注目されている。一般に、光通信や光ディスク記録等で用いられる狭ストライプ半導体レーザー (NS-LD) は、単一横モード動作を行うために導波路幅が約 $2\ \mu\text{m}$ と狭く、高光密度に起因して高出力化が難しい。これに対し、BA-LD では導波路幅を $50\sim$ 数百 μm と拡大し、端面の光密度を下げることで高出力を実現している。構造的には導波路幅が広がった“だけ”であるが、その動作特性は大きく異なる。BA-LD 単体でカオス系となり、空間幅数 \sim 数十 μm 、時間幅数十 ps の時空間光パルスを発生する¹⁻³⁾。この現象はフィラメンテーションとよばれており、自己収束 (self-focusing)、空間的ホールバーニング (spatial hole-burning)、回折の3つの複合効果が原因とされている²⁻⁴⁾。近視野像 (NFP) は時間や温度、駆動電流値に依存してさまざまなパターン変化やカオス的な振る舞いを示す。同時に、遠視野像 (FFP) も双峰性やブロード化を示す。光出力のゆらぎ成分は横モードや縦モードのスペクトル構造を反映した多数の周波数成分によって構成され、これにもカオス的な振る舞いが観測される。また、活性層内の発振状態が不均一であるため、レーザーの最大の特徴であるコヒーレン

スも導波路の横位置に依存して変化する⁵⁾。

以上のような、多様な特性や、時空間カオス現象を示す BA-LD は、学術的な観点からみた場合大変魅力的な研究対象であると同時に、実際の応用の観点からみた場合、多モード的 NFP・FFP は M^2 の劣化を生じさせ、固体レーザーの励起効率や、光ファイバーへの結合効率の低下をもたらす。一方、不安定な NFP は、ディスプレイ・照明応用でのちらつきや均一性低下の原因となる。さらに、近年 NFP の不均一性と光学的損傷 (COD) の関連も指摘されており、高出力化の面からも NFP の均一化は重要である⁶⁾。

以上のような課題を改善し、性能のさらなる向上や応用を広げるためにも、BA-LD に対する基礎的な研究は重要である。近年、筆者らはディスプレイ応用を目的として、均一性の高い NFP を有する BA-LD の開発を行ってきた⁷⁾。本稿では、デバイス構造に依存した横モード特性や、その制御の可能性について説明する。

1. BA-LD の導波構造に対する NFP 特性

1.1 NFP のバイアス率依存性

AlGaInP/GaInP による発振波長 $642\ \text{nm}$ の BA-LD と AlGaAs/GaAs による $808\ \text{nm}$ の BA-LD を、図 1 に示す

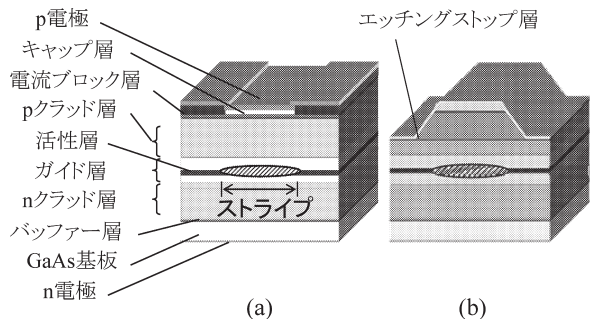


図1 BA-LDのデバイス構造。(a) 利得導波型、(b) 屈折率導波型。

利得導波型と屈折率導波型構造で作製し NFP を測定した (808 nm BA-LD は埋め込みリッジ構造による屈折率導波とした)^{7,8)}。808 nm は TE モード、642 nm の BA-LD は歪み活性層 (引張り歪み) のため TM モードで発振する。808 nm と 642 nm の BA-LD のストライプ幅は、それぞれ、100, 60 μm である。図2に、閾電流値 (I_{th}) で規格化した注入電流 (バイアス率: I/I_{th}) に対する 808 nm の BA-LD の NFP を示す。測定はヒートシンク温度 25°C とし CW 駆動下で行った。図2 (a) は利得導波型 BA-LD、(b) は屈折率導波型 BA-LD である。図1 (a) の利得導波型では、注入電流によるキャリア分布を反映し、ストライプの中央部からレーザー発振を開始する。発振直後の NFP の幅はストライプ幅よりも狭く、電流値を増加させるとストライプ端にもキャリアが行き渡りやすくなるため、ピーク数 (NFP における極大値の数) とともに NFP の幅が増加する。バイアス率が低い場合は対称な

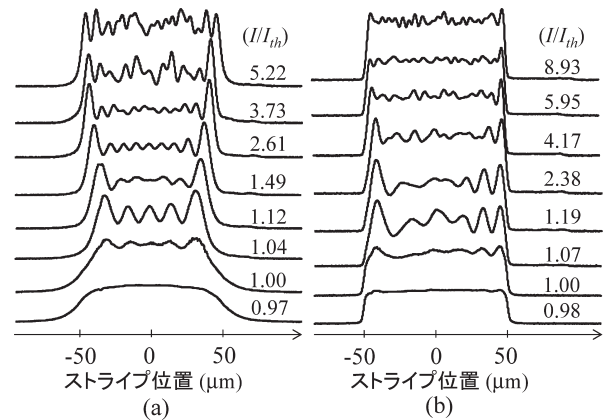


図2 電流に対する NFP 変化 (808 nm BA-LD, ヒートシンク温度 25°C, CW 駆動)。(a) 利得導波型、(b) 屈折率導波型。

NFP で横モードが発展し、高バイアス領域ではその対象性が崩れる。それに対し、図1 (b) の屈折率導波型は、ストライプ端からレーザー発振を開始する。NFP の幅はストライプ幅とほぼ等しく、利得導波型と異なりバイアス率に対してほぼ固定値をとる。以上のバイアス率に対する NFP の変化の詳細を、図3 (a), (b) ヘコンタープロットした。図3 (a), (b) は、それぞれ図2 (a), (b) に対応し、縦軸がバイアス率、横軸はストライプ位置、グレースケールが規格化強度に対応する。図3 (a) において、バイアス率が約 2.7 までは対称な NFP を示し、NFP 幅とともにピーク数が連続的に増加していく。この区間では、NFP はエルミートガウシアンモードの線形重ね合わせで記述できる⁸⁻¹⁰⁾。同図では、バイアス率 1.0 のとき、4 次モード成分が最も強く、バイアス率の増加とともにエネルギー

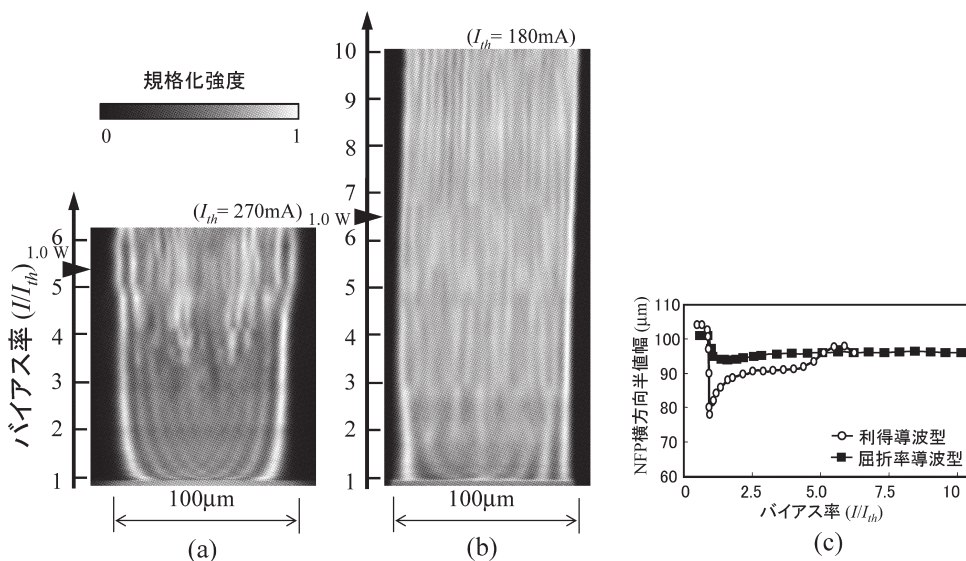


図3 電流に対する NFP 変化 (図2に対応)。図中三角印は 1.0 W 出力相当のバイアス率を表す。(a) 利得導波型、(b) 屈折率導波型、(c) バイアス率に対する NFP 幅。

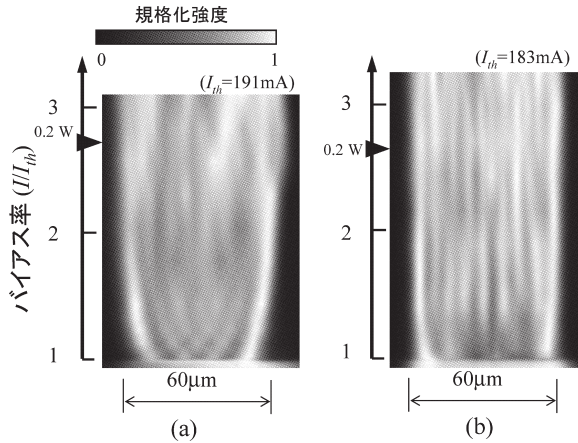


図4 電流に対するNFP変化 (642 nm BA-LD, ヒートシンク温度 20°C, CW 駆動). 図中三角印は 0.2 W 出力相当のバイアス率を表す. (a) 利得導波型, (b) 屈折率導波型.

ギー分布が高次数側へシフトする. バイアス率 2.4 のとき, 11 次モード成分が支配的であった. バイアス率が 2.7~4.5 の区間では NFP の幅は一定値となる. しかし, バイアス率の増加につれて NFP の対称性・均一性が徐々に低下し, フィラメント発振の傾向を示すようになる. バイアス率が 4.5 以上になると, NFP の幅が再び変化ようになる. 一方, 図 3 (b) に示す屈折率導波型 BA-LD の場合, バイアス率 1.0~3.0 の区間のストライプ中央部に注目すると, 利得導波型に似たモード発展を示すことがわかる. バイアス率 3.0 以上ではトップハット形状の NFP が得られている. バイアス率 7.0 以上になるとフィラメントサイズ (ピーク間隔) が小さくなっており, 横モードの状態が変化していると考えられる. 図 3 (c) は, バイアス率に対する NFP の幅 (半値全幅) を表している. 上述したように, 屈折率導波型が発振開始直後から一定で

あるのに対し, 利得導波型はバイアス率に依存性があり, バイアス率の増加につれて増大する区間, 一定値をとる区間, 不安定に増減する区間で特徴づけられる. 図 4 に, 発振波長 642 nm の BA-LD の NFP 特性を示す. 図の見方は図 3 と同様であり, (a) は利得導波型, (b) は屈折率導波型である. 808 nm の場合と同様に, 利得導波型において, バイアス率に依存した NFP 幅の変化 (増加区間, 一定区間, 不安定区間), 閾値直後の対称性のあるモード発展とその崩壊がみられる. 図 4 (b) の屈折率導波型では, 閾値直後のストライプ中央部におけるモード発展が不明確であるが, バイアス率の増加に対してフィラメントの位置が安定であり, また, トップハット形状の NFP が得られることから, 定性的に 808 nm の結果と一致していると考えられる.

1.2 NFP の温度依存性

次に, バイアス率と温度 (ヒートシンク温度) に対するピーク数を図 5 に示す. 図 5 において, (a) は 808 nm の利得導波型, (b) は同屈折率導波型の結果である (図 2, 図 3 とは異なる BA-LD を使用). 両者を比較すると, まず (a) の利得導波型に関し, 同図中 “I” で示す区間では, バイアス率の増加につれてピーク数が増加し, ある値 (12 個) で飽和する. 測定に使用した素子が異なるためバイアス率が一致していないが, この “I” 区間は図 3 (a) におけるバイアス率 1.0~2.7 の区間に定性的に対応する (複数の素子で確認). この区間では連続的に高次エルミートガウシアンモードが発生していくため, NFP 幅の単調増加とモード次数に比例したピーク数の増加を示すと考えられる. バイアス率が 2 を超えると (図中 “II” の区間), 空間モードの対称性が崩壊し, いくつかのフィラメントが接近もしくは結合することによりピーク数が数個減

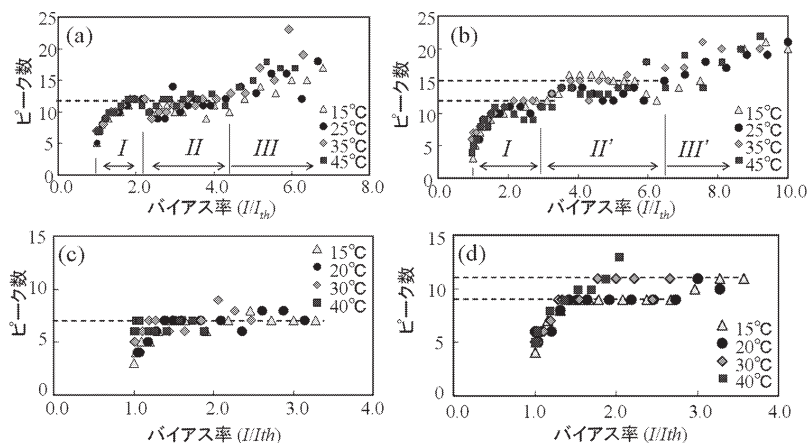


図5 バイアス率に対するNFPのピーク数変化. (a) 808 nmの利得導波型, (b) 同屈折率導波型, (c) 642 nmの利得導波型, (d) 同屈折率導波型 BA-LD. CW 駆動条件で測定.

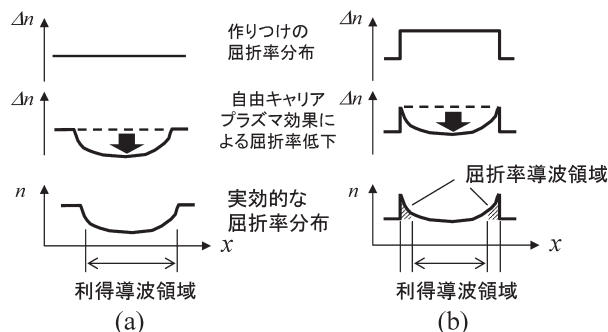


図6 3領域モデル。(a)と(b)は、それぞれ、利得導波型と屈折率導波型 BA-LD の屈折率分布の要因と分布を表している。上段は構造依存の作り付けの屈折率、中段は自由キャリアプラズマ効果による屈折率低下、下段は、上・中段をあわせた屈折率分布を表す。

少する。その後、ピーク数はバイアス率とともに増加するが、“I”と同じピーク数で飽和する。バイアス率が4.5以上(図中“III”)になると、新しいフィラメントがストライプ端部に形成されることによりNFP幅が増加し、また、ピーク数が不規則に増加し始める。この“III”の領域は、“I”、“II”の区間と異なり、強い温度依存性を示す。一方、図5(b)の屈折率導波型の場合、バイアス率3までの“I”区間は利得導波型と同様なピーク数増加と飽和(12個)を示す。しかし、利得導波型と異なり、“II”の区間でピーク数はステップ状に増加し、1段階高いピーク数(15個)で飽和する。バイアス率6.5以上の“III”区間では、NFP幅に変化はないが、利得導波型と同様に素子温度に依存し、不規則なピーク数増加を示す。次に、図5(c)、(d)に642 nmのBA-LDの場合について示す(それぞれ、図4と同一素子で測定)。図5(c)の利得導波型において、808 nmの場合と異なり、“II”、“III”の区間が明確ではない。しかしながら、“I”、“II”区間の特徴であるピーク数の増加・飽和(7個)がみられている。同図(d)の屈折率導波型の場合も、“III”区間の識別が不明瞭であるが、808 nmにおける“I”、“II”区間の特徴に類似したステップ状のピーク数の増加・飽和(9, 11個)がみられている。以上のように、異なる材料において同じ性質を示すことから、上記の横モード特性は導波構造固有の現象であると考えられる。

2. 3領域モデル

2.1 3領域モデル

導波構造に依存した前述の横モード特性を説明する実験的なモデルとして、3領域モデルを提唱している⁸⁾。3領域モデルの概念図を図6に示す。図6(a)は利得導波型BA-LDを表している。最上段は構造による作り付けの屈

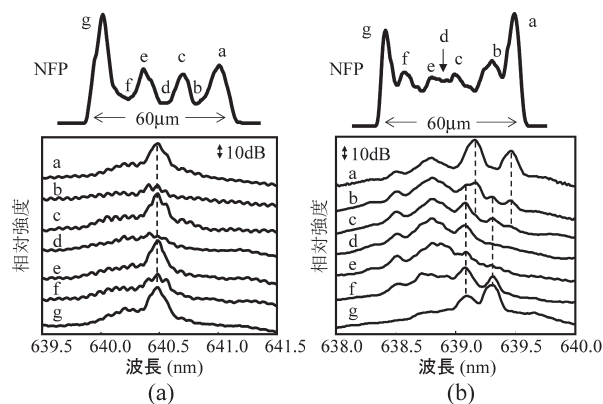


図7 642 nmの屈折率導波型 BA-LD の発振波長分布(ヒートシンク温度20°C, バイアス率1.1で測定)。(a) CW駆動、(b)パルス駆動。パルス駆動下において、ストライプの両端、中央部でそれぞれ独立した主波長分布を示す。

折率を表しており、利得導波型であるため平坦である。同中段は、キャリア注入による自由キャリアプラズマ効果を表している。閾値では電流分布を反映して中央部のキャリア密度が最も高くなるため、自由キャリアプラズマ効果により中央部の屈折率が低下する。直列抵抗やキャリア再結合による発熱を無視した場合、最終的に、下段に示すような中央部が凹形状の実効屈折率分布となる。同図(b)の屈折率導波型の場合、上段に示すように構造起因の実効屈折率差が存在し、その値は 10^{-3} のオーダーである¹¹⁾。最終的に、中央部の凹形状領域(利得導波領域)を両端の凸形状領域(屈折率導波領域)が挟むような3つの導波領域によって形成され、プラズマ効果や作り付けの屈折率差の大きさに依存して、これら3領域間の相互作用の強さが変化すると考えられる。一方、CW駆動では熱による屈折率上昇を考慮する必要がある。自由キャリアプラズマ効果による屈折率低下は 10^{-3} 程度、熱による屈折率上昇は 10^{-4} といわれている¹²⁾。そのため、CW駆動条件下では熱の効果によって中央の凹部が平坦化し、3領域間の相互作用が強くなると考えられる。

2.2 光スペクトルのストライプ位置依存性

3領域モデルを検証するために、光スペクトルのストライプ位置依存性を調べた。図7にその結果を示す。図7(a)は、642 nmの屈折率導波型BA-LDをCW駆動したときのNFP(上段)と光スペクトルである(図4で使用したものは別の素子)。すべての位置において、同じ主波長で発振していることがわかる。これに対し、同図(b)は同じ素子をパルス駆動(パルス幅 $2\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数10 kHz)したものである。このデバイス構造の場合、パルス幅 $5\mu\text{s}$ 程度から熱の影響が現れる(NFPが変化する)ため、このパルス条件は熱の影響を無視できる。同図

(b)において、ストライプ両端部のスペクトル a と g を比較すると、明らかに異なるスペクトル形状・主波長で発振しており、互いに異なる発振状態にあると考えられる。ここで、a の隣接領域である b のスペクトルをみると、g の主波長成分 (639.3 nm) を含んでいることがわかる。このことは、両端部 a, g が互いに光場の重なりをもつが、その相互作用が弱いことを示している。一方、b~e は等しいスペクトル形状・主波長 (638.8 nm) で発振しているため、この領域は同じ発振状態であると考えられる。以上から、パルス駆動下の屈折率導波型 BA-LD において、ストライプ方向に関して a, b~f, g の 3 つの領域があることがわかった。そして、互いに光場の重なりをもち相互作用するが、その結合は弱いことがわかった。この結果は、3 領域モデルによる仮説と一致しており、このモデルの妥当性を裏づける結果であると考えられる。また、図 7 (a) の CW 駆動下においてスペクトル形状が一致している理由は、熱によって屈折率分布が平坦化し、3 領域それぞれのモード幅の拡大とそれによる相互作用の強化が起こり、各領域のスペクトルが同期するものと考えられる。

2.3 テーパーストライプ屈折率導波型 BA-LD

上記の 3 領域モデルによれば、屈折率導波型 BA-LD の導波路は中央部が利得導波領域、両端部は屈折率導波領域であり、中央部の横モードの振る舞いは利得導波型 BA-LD に類似すると考えられる。図 3 (a), (b) を比較すると、低バイアス率の区間 (モード発展区間) では、(b) の中央部分と (a) が類似し、また、両端部のピークのみが異なる (ピーク位置が変化しない) 挙動を示している。バイアス率 3 以降の区間では、キャリア分布の均一化によって利得導波領域が広がって屈折率導波領域と強く結合することにより、ストライプ全体にわたる屈折率導波路を形成すると考えられる。その結果、同図 (a) の利得導波型と異なり、ピーク位置が安定、かつ、均一な NFP を示すと考えられる。ここで、屈折率導波領域の作用が弱い場合、利得導波型の性質が強くなると予想される。そこで、この仮説を検証するために、前・後端面部のリッジ構造をテーパー形状とした発振波長 642 nm の屈折率導波型 BA-LD を作製した。テーパー形状とすることによって、ストライプ両端の損失が大きくなり、屈折率導波領域の影響が小さくなる。作製したデバイスの形状は、共振器長 700 μm 、ストライプ幅は共振器中央部が 60 μm 、端面部は 50 μm 、テーパー部の角度は 2.9° とした。デバイス作製時のへき開マージンとして、端面部から 10 μm は幅 50 μm の直線形状としている。図 8 に、異なるバイアス率に対する NFP の測定結果を示す。図 8 (a) は比較用のストレート

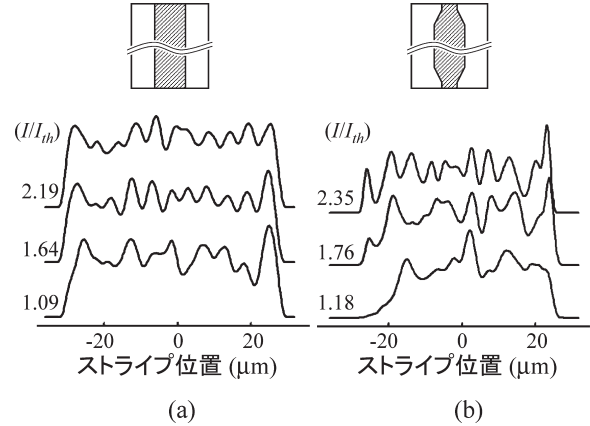


図 8 642 nm の屈折率導波型 BA-LD の NFP. (a) ストレートストライプ, (b) テーパーストライプ (共振器中央のストレート部の幅 60 μm , テーパー部の角度 2.9°, 出射端の幅 50 μm . 出射端において 10 μm のストレート部をもつ). 上段はそれぞれのストライプ構造の模式図.

形状のデバイスである。バイアス率に対してピーク位置は安定であり、トップハット形状の NFP を得られていることがわかる。図 8 (b) に示すテーパー型では、テーパー形状によってストライプ両端部の損失が大きいため、バイアス率が低い場合は両端部が発振していない。また、バイアス率に依存してピーク位置が変化していることがわかる。バイアス率が高くなると、NFP の均一性が低下し、利得導波型 BA-LD と同様の強いフィラメント化を示す。この結果から、NFP の形成に関し、ストライプ両端部の屈折率導波領域が支配的な影響をもち、3 領域モデルで現象を説明できることが確認された。

AlGaAs 系 808 nm と AlGaInP 系 642 nm の BA-LD において、バイアス率と素子温度に対する NFP の導波型構造依存性について調べ、利得導波型と屈折率導波型における NFP の特性には定性的に差があることを示した。屈折率導波型 BA-LD は、NFP 幅が一定であり、トップハット形状 NFP が得られるなど、利得導波型よりもすぐれた特徴を示す。また、横モード特性に対し、BA-LD の導波路の特徴を両端の屈折率導波領域と中央部の利得導波領域に分けた、3 領域モデルを提案した。パルス駆動での光スペクトル分布や、テーパーストライプを有する屈折率導波型 BA-LD の NFP を調べることによって、その妥当性を検証した。3 領域モデルによると、各領域の損失や作り付けの屈折率差を変えることにより、NFP の均一性や形状を制御できる可能性が示唆される。

文 献

- 1) H. Adachihara, O. Hess, E. Abraham, P. Ru and J. V. Moloney: "Spatiotemporal chaos in broad-area semiconductor lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, **10** (1993) 658-665.
- 2) I. Fischer, O. Hess, W. Elsässer and E. Göbel: "Complex spatio-temporal dynamics in the near-field of a broad-area semiconductor laser," *Europhys. Lett.*, **35** (1996) 579-584.
- 3) J. Kaiser, I. Fischer, W. Elsässer, E. Gehrig and O. Hess: "Mode-locking in broad-area semiconductor lasers enhanced by picosecond-pulse injection," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10** (2004) 968-973.
- 4) E. Gehrig and O. Hess: *Spatio-Temporal Dynamics and Quantum Fluctuations in Semiconductor Lasers* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003).
- 5) A. Larsson, J. Salzman, M. Mittelstein and A. Yariv: "Lateral coherence properties of broad-area semiconductor quantum well lasers," *J. Appl. Phys.*, **60** (1986) 66-68.
- 6) M. B. Sanayeh, P. Brick, W. Schmid, B. Mayer, M. Miller, M. Reufer, K. Streubel, J. W. Tomm and G. Bacher: "Temperature-power dependence of catastrophic optical damage in AlGaInP laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 041115.
- 7) 滝口由朗, 長沼 香, 佐藤典文, 今西大介, 伊藤 哲, 平田照二: "4.8 W 高信頼赤色 644 nm 半導体レーザーレイ", 第 54 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, **3** (2007) 1215.
- 8) T. Asatsuma, Y. Takiguchi, S. Frederico, A. Furukawa and S. Hirata: "Successive phase change and stability of near-field patterns for broad-area laser diodes," *Proc. SPIE*, **6104** (2006) 61040C.
- 9) H. Yonezu, I. Sakuma, K. Kobayashi, T. Kamejima, M. Ueno and Y. Nannichi: "A GaAs-Al_xGa_{1-x}As double heterostructure planar stripe laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **12** (1973) 1585-1592.
- 10) C. J. Chang-Hasnain, E. Kapon and R. Bhat: "Spatial mode structure of broad-area semiconductor quantum-well lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 205-207.
- 11) D. Imanishi, Y. Sato, K. Naganuma, S. Ito and S. Hirata: "Highly reliable 7 W operation of 644 nm wavelength laser diode arrays with top-hat near field pattern," *Int. Semicond. Laser Conf. Digest* (2004) pp. 49-50.
- 12) F. Bechmann, P. Loosen and R. Poprawe (eds.): *High Power Diode Lasers Technology and Applications* (Springer Science+Business Media, LLC, 2007).

(2007 年 10 月 15 日受理)