

# 「レーザ加工を用いたVariable Stripe Length法によって測定したGaN系青紫色レーザーダイオードの光学利得と内部損失」

Optical Gain and Optical Internal Loss of GaN-Based Laser Diodes Measured by Variable Stripe Length Method with Laser Processing

木村 義則, 伊藤 敦也, 宮地 護, 高橋 宏和

Yoshinori Kimura, Atsuya Ito, Mamoru Miyachi, Hirokazu Takahashi

渡辺 温, 太田 啓之, 竹間 清文

Atsushi Watanabe, Hiroyuki Ota, Kiyofumi Chikuma

**要 旨** GaN系青紫色半導体レーザにおいても,半導体レーザの性能改善の指標となる利得や内部損失などを測定することに対する重要性が増している。そこで,我々は実際に発振するGaN系青紫色半導体レーザ素子の利得や内部損失を直接測定することのできる,Variable Stripe Length (VSL) 法のための新しい手法を提案する。今回提案するこの方法では,高出力のレーザ光を半導体レーザ素子のp側電極金属に照射,加工することで励起長を変えるという方法によってVSL法を実現する。この方法を我々の作製したGaN系青紫色半導体レーザに適用したところ,内部損失の大きさは素子の積層構造に強く影響されていることが明らかになった。

**Summary** We demonstrate a new technique for the variable stripe length (VSL) method by which the optical gain and optical internal loss of GaN-based laser diodes (LDs) can be directly measured. In the technique, the laser processing is utilized for varying the excitation length. The excitation length of GaN-based LD can be varied by processing directly its p-electrode with high power laser irradiation. From the results, it was revealed that the optical internal loss of GaN-based LDs was strongly affected by the layer structure.

**キーワード** : GaN, 青紫色半導体レーザ, VSL法, 利得, 内部損失,

## 1. 序論

現在のGaN系青紫色半導体レーザは,従来からの課題であった寿命改善に加えて,高出力化,低ノイズ化,低消費電力化や出射光ビーム形状の改善といった,光ディスク用光源として

要求される基本特性を満たすための改善にも重点が置かれた開発が行われる段階に入っている。実用的な光ディスク用光源となりうるためには,従来の光ディスク用半導体レーザであるAlGaAs系赤外半導体レーザやAlInGaP系赤色半

導体レーザがそうであったように、Ga<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザにおいても半導体レーザとしての基本性能を実用レベルまで改善することが当然の事ながら要求される。その意味ではGa<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザも、光ディスク用光源として実用段階まで開発が進んできたと言えるだろう。

Ga<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザもこのような開発段階を迎え、半導体レーザとしての発振特性改善のための指標として、利得や内部損失といった素子内部のデバイスパラメータを調べることに對する重要性が増してきた。

半導体レーザの発振特性はこのような光学利得や内部損失などのレーザ素子自身のデバイスパラメータに強く影響される。そのため、このようなデバイスパラメータを調べることは、半導体レーザの発振特性改善のための有用な手がかりとなる。これら半導体レーザのデバイスパラメータを見積もるために広く一般的に行われている手法として、外部微分効率の逆数のレーザ共振器長依存性を用いる方法がある。

Ga<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザにおいても、この方法を用いて測定されたデバイスパラメータが報告されている<sup>(1),(2),(3)</sup>。この方法では、まず異なる共振器長を持つ素子に関してそれぞれのI-L特性を測定し、外部微分効率を求める。こうして求めた外部微分効率の逆数を、それぞれの共振器長に対してプロットし、理論式によるフィッティングを行うことでデバイスパラメータの算出を行う。つまりこの方法では、構造的には共振器長だけが違い、かつ安定した特性を持った素子が多数必要となる。また得られる結果は多数の素子における平均的な値となる。

このように平均的なデバイスパラメータを見積もることができるということは、ある一枚のレーザウエハから作製した素子全体におけるデバイスパラメータの平均値が得られると言う意味において非常に有用であるが、その一方で、ある特性を持った特定の素子のデバイスパラメータを評価することは原理的にできないという難点もある<sup>(4)</sup>。

## 2. Variable Stripe Length(VSL) 法

一方、同様のデバイスパラメータを見積もる別の方法としてVariable stripe length(VSL)法と呼ばれる方法がある<sup>(5),(6),(7),(8),(9),(10)</sup>。

この方法は、活性層をストライプ状に励起しながら、そのストライプ長を変化させつつ出射面から放射される光を測定するという方法である。この放射光はAmplified Spontaneous Emission (ASE)と呼ばれ、レーザ素子のように端面からの光の帰還がかからないような状況下において、素子内部で発光した自然放出光のうち出射面方向に進行する光が素子内部の利得を感じて光学的に増幅されながら出射端面まで到達、放射された光のことを指す。このASEを励起長を変化させながら測定し、得られたASEスペクトラムの励起長依存性を、理論式に従って処理することで利得スペクトラムと内部損失を見積もることができる。このVSL法は活性層を励起する方法の違いによって、さらに大きく二つの種類に分類することができる。

一つはストライプ状に絞ったレーザ光をレーザウエハ表面から照射することによって活性層を励起する光励起型<sup>(5),(6),(7)</sup>のVSL法であり、もう一つはストライプ電極を設けて電流注入によって活性層を励起する電流注入型<sup>(9),(10)</sup>のVSL法である。

光励起型VSL法は外部光によって活性層を直接励起するため、電流注入型VSL法のように電流注入のためのpn接合や電極構造をレーザウエハに作り込むことなく評価が可能である。そのため手軽に評価ができるという利点があるが、反対に評価サンプルの構造と実際の半導体レーザの構造との間には大きな隔たりがあるため、実際の素子構造を直接反映したデバイスパラメータ見積もりができない。

一方、電流注入型VSL法はpn接合やストライプ電極構造を必要とするなど、より実素子に近い形状を持ったサンプルを用いるため、より実素子に近いデバイスパラメータの算出が可能となる。しかしこの場合には、ストライプ方向

に多電極構造を持たせることで実質的に電流注入ストライプ長を変化させられるような、特殊な構造を持ったVSL測定用の素子を特別に作製する必要があるため、被測定サンプル作製に手間がかかると言う難点がある。

今回我々はGaN系青紫色半導体レーザのデバイスパラメータの見積もりを行う上で、後者の電流注入型VSL法に着目した。さらにGaN系半導体の特徴を生かした新しい手法を適用することで、従来のようにVSL測定用の素子を特別に作製することなく、実際に発振する半導体レーザ素子自体の電極ストライプ長を変化させることでデバイスパラメータを見積もることができる方法を提案する<sup>(11)</sup>。

図1に今回我々が行ったレーザ加工を用いた電流注入型VSL法の模式図を示す。この方法の特徴は、実際にレーザ発振する半導体レーザ素子のp電極の一部にハイパワーのレーザ照射を行うことで部分的に電極金属を除去し、漸次電極ストライプ長を変化させるというところにある。GaN系半導体はそのバンドギャップエネルギーが大きいため、今回用いた電極加工用のハイパワーレーザの波長( $\lambda = 532\text{nm}$ )に対して光学的に透明である。そのためGaN系半導体膜に対してレーザ加工による損傷を与えず、半導体膜上に堆積した電極金属だけを効果的に除去することが可能となる。これによ

て実際に発振する半導体レーザ素子自体を追加しながらのVSL測定が可能となる。この方法によれば従来の電流注入型VSL法と違い、被測定用の特別なサンプルを必要としない上、半導体レーザ素子の発振特性とデバイスパラメータの比較を電流注入密度を介して直接行えることになるため、個々の素子に対して今まで以上に精密な解析が行えることが期待される。

### 3. レーザ素子の構造

今回、我々は以下のような2種類の違った積層構造を持つレーザ素子にVSL測定を試みた。

LD(A)はサファイア基板の上に低温成長バッファ層を介して成長した $8\mu\text{m}$ のn-GaNコンタクト層を持ち、以下 $0.8\mu\text{m}$ のn- $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ クラッド層、 $0.2\mu\text{m}$ のn-GaNガイド層、 $300\text{\AA}$ のn- $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.09}\text{N}$ 下地層、MQW活性層、 $200\text{\AA}$ のp- $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 電子バリア層、 $0.2\mu\text{m}$ のp-GaNガイド層、 $0.4\mu\text{m}$ のp- $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ クラッド層、 $0.1\mu\text{m}$ のp-GaNコンタクト層からなる構造を持つ。

一方LD(B)はサファイア基板の上に低温成長バッファ層を介して成長した $6.5\mu\text{m}$ のn-GaNコンタクト層を持ち、以下 $0.4\mu\text{m}$ のn- $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ クラッド層、 $0.1\mu\text{m}$ のn-GaNガイド層、 $300\text{\AA}$ のn- $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.09}\text{N}$ 下地層、MQW活性層、 $200\text{\AA}$ のp- $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 電子バリア層、 $0.1\mu\text{m}$ のp-GaNガイド層、 $0.4\mu\text{m}$ のp- $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ クラッド層、 $0.1$

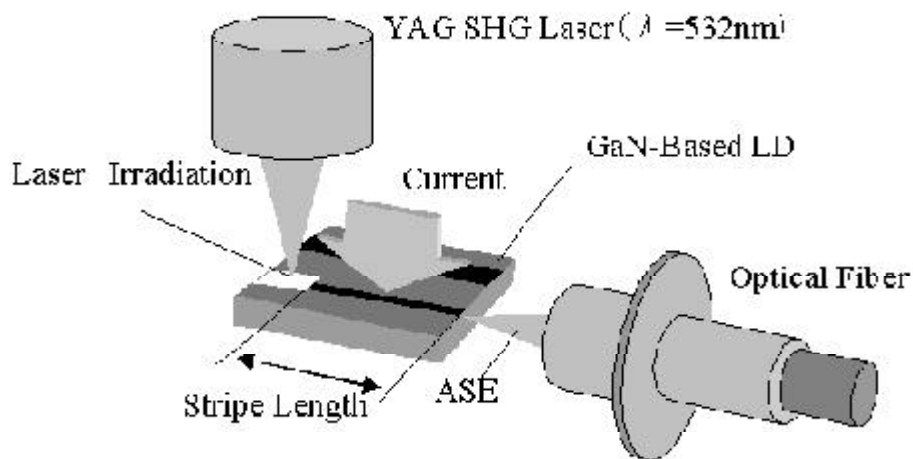


図1 レーザ加工を用いた電流注入型VSL法

$\mu\text{m}$  の p-GaN コンタクト層からなる構造を持つ。活性層は LD(A) ,LD(B) とともに同じであり ,60 の n-In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.09</sub>N barrier 層によって隔てられた 5 ペアの 30 の In<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>N well 層からなる多重量子井戸構造 (MQW) 活性層を持つ。いずれも RIE によってリッジ形状に加工し n-GaN コンタクト層を露出させた。絶縁膜には SiO<sub>2</sub> を用い ,p 電極として Ni/Au を ,n 電極として Ti/Al を堆積したリッジストライプ構造とした。p 電極ストライプ幅は  $w = 5 \mu\text{m}$  , 共振器長は  $L = 1000 \mu\text{m}$  である。

#### 4. VSL 測定の結果

図 2 は LD(A) について VSL 測定を行った結果得られた ASE スペクトラムのストライプ長依存性である。注入電流密度は  $9.2\text{kA}/\text{cm}^2$  とし ,電極金属にレーザ加工を行うことでストライプ長を  $840 \mu\text{m}$  から  $120 \mu\text{m}$  まで 7 点変化させた。また図 2 で得られた結果から ,特に波長 4049 と波長 4200 における ASE 強度の変化をストライプ長に対してプロットしたものが図 3 である。図 3 中にそれぞれフィッティング曲線を示したように ,ある特定波長における ASE 強度のストライプ長依存性の測定結果から ,次式を用いてフィッティングを行うことでその波長におけるネットモード利得  $G$  が求められる。

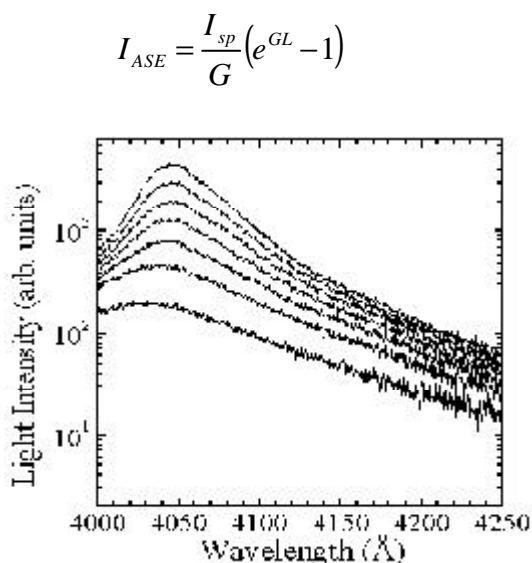


図 2 ASE スペクトラムのストライプ長依存性

ここで  $I_{ASE}$  は ASE 強度 ,  $I_{sp}$  は自然発光強度 ,  $L$  はストライプ長である。またネットモード利得  $G$  は材料ゲイン  $g$  と光学的内部損失  $\alpha_{in}$  と次式のような関係にある。

$$G = \Gamma g - \alpha_{in}$$

ここで  $\Gamma$  は活性層への光閉じ込め係数である。また閉じ込め係数  $\Gamma$  と材料ゲイン  $g$  の積である  $\Gamma g$  はモード利得と呼ばれる。これらの式を用いて図に示した LD(A) に関する実測データをフィッティングすると ,図 3 中にも示したように波長 4049 における利得は  $30.7\text{cm}^{-1}$  ,波長 4200 における利得は  $-7.7\text{cm}^{-1}$  となる。このようにして測定した全ての波長に対して同様の処理を行うことで利得スペクトラムが明らかになる。

図 4 に VSL 測定前の ,レーザ素子としての LD (A) の発光スペクトラムの注入電流密度依存性を示す。またそれに対応した注入電流密度において VSL 測定した結果得られた利得スペクトラムを図 5 に示す。これらはそれぞれ対応した電流注入密度において測定されているため ,半導体レーザとしての発光スペクトラムと VSL 測定による利得スペクトラムを注入電流密度を介して直接比較することができる。

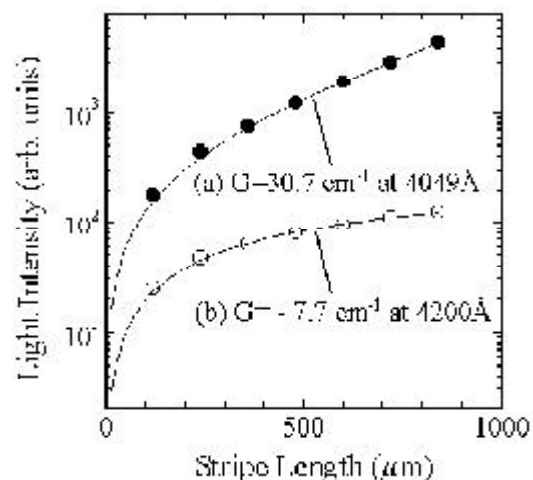


図 3 (a) 波長 4049 と (b) 波長 4200 における ASE 強度のストライプ長依存性とネットモード利得

図4からLD(A)のしきい値は、おおよそ注入電流密度が6.8kA/cm<sup>2</sup>付近であることが判るが、この注入電流密度に対応する図5中の利得スペクトラムから、しきい値における最大ネットモード利得G<sub>max</sub>は~12cm<sup>-1</sup>と見積もられる。半導体レーザにおける発振条件は次式のようなものであるため、しきい値における最大ネットモード利得G<sub>max</sub>(=g<sub>max</sub>-α<sub>in</sub>)は反射損失を示していることがわかる。

$$g_{\max} = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) + \alpha_{\text{in}}$$

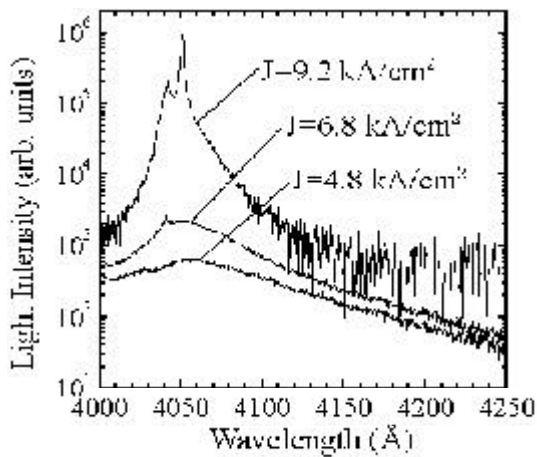


図4 VSL測定前におけるLD(A)の発光スペクトラム

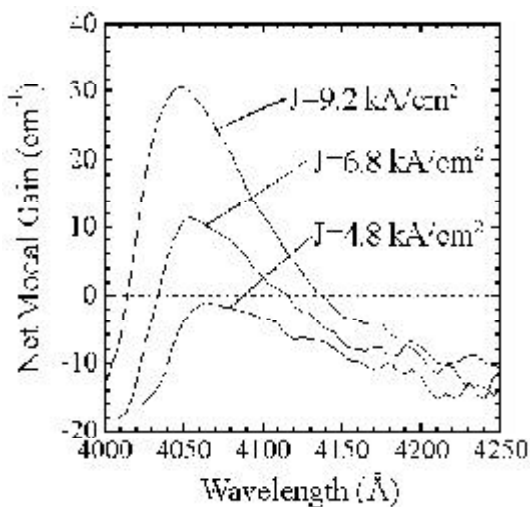


図5 LD(A)のネットモード利得スペクトラムの注入電流密度依存性

ここでRは端面反射率である。これによるとLD(A)の端面反射率はおおよそ30%ということになる。

一般的にGaN系半導体レーザの場合、端面コーティングを施さない状態における理想的な端面反射率は20%程度であると考えられるが、LD(A)についてはやや高い値が得られている。(ただし今回の検討においてはVSL測定前にLD(A)のI-L特性の測定を行わなかったため、しきい値は図5を用いて発振スペクトラムの変化の様子から予想している。そのため、見積もったしきい値には誤差が含まれるものと予想される。このしきい値見積もりの誤差が、算出された反射率の値に影響している可能性がある。他の素子についてI-L特性や遠視野像などの測定から正確なしきい値や端面の形成状態を把握した上で同様の端面反射率の見積もりを行うと、端面の形成状態が良い素子の場合、安定してほぼ20%程度の端面反射率が得られている。)

また図6はLD(A)とLD(B)のネットモード利得スペクトラムを比較した図である。素子の内部損失は、利得スペクトラムにおいて最大利得から長波長側へ十分離れた、利得が消失する波長領域でのネットモード利得の値より求めることができるが<sup>(12)</sup>、図6からそれぞれの素子の内部損

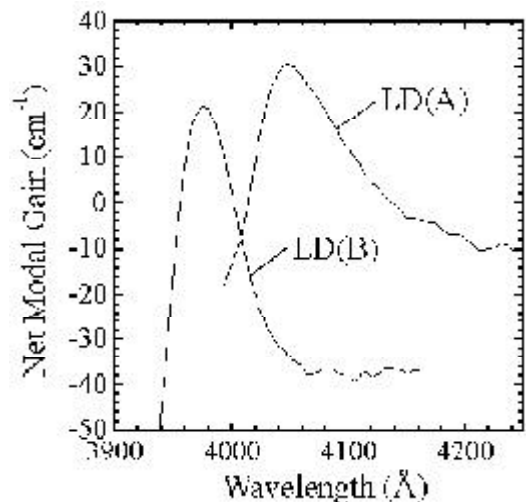


図6 LD(A)とLD(B)のネットモード利得スペクトラムの比較

失  $\alpha_{in}$  を見積もると、LD(A)は  $\alpha_{in} \sim 10\text{cm}^{-1}$ 、LD(B)では  $\alpha_{in} \sim 38\text{cm}^{-1}$  という値になり、両者の内部損失の値に大きな違いがあることが判った。

### 5. 導波路シミュレーションによる VSL 測定結果の考察

この2素子における内部損失の差の発生理由としては、LD(A)とLD(B)における積層構造の違いが考えられる。すなわちLD(B)はLD(A)と比較して薄いn-clad層を持っているため、活性層への光閉じ込めに関してLD(A)より不利な導波路構造となっている。そのことは図7(a)および図7(b)中に実線で示したこの2素子に関する垂直横方向遠視野像の測定結果からも理解できる。

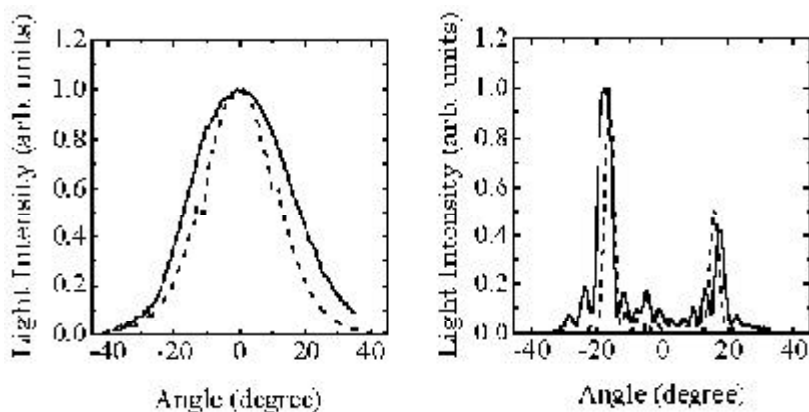
垂直横方向遠視野像において単峰性のパターンを示すLD(A)に対して、LD(B)では強度の非対称性を伴った2つのメインピークが $\pm 20^\circ$ 付近に存在することに特徴づけられる多峰性のパターンを示す。これらの遠視野像の測定結果は、導波路シミュレーションによって、LD(A)では半導体レーザ内部において光が活性層付近に閉じ込められていることを、LD(B)では光がn-GaNコンタクト層へ漏れ出していることを反映した結果であることが確かめられた(図7中点線)。

n-GaNコンタクト層への光の漏れ出しは光閉じ

込め係数  $\Gamma$  の低下を伴うため、結果としてモード利得 ( $g_{max}$ ) の低下をもたらし、しきい値上昇の一要因となる。導波路シミュレーションによって求めた光閉じ込め係数はLD(A)では  $\Gamma = 0.044$ 、LD(B)では  $\Gamma = 0.024$  であるが、単純に光閉じ込めの差だけでもモード利得 ( $g_{max}$ ) はLD(B)はLD(A)の半分程度の値しか得られないことになる。

一方、前節で示した2素子間での内部損失の測定結果の差違の起因については、単純にn-GaNコンタクト層へ光が漏れ出したという理由によってのみ説明することができない。なぜなら光の漏れ出しが原因で素子の内部損失が上昇するためには、n-GaNコンタクト層へ光が漏れ出すことによって初めて吸収損失を感じ取ってしまうような局在的な吸収を持つ領域の存在が必要となるためである。しかしn-GaNコンタクト層自体は基本的に活性層の発光波長に対して透明であるため、n-GaNコンタクト層への光の漏れだしによって素子の内部損失が上昇することは考え難い。そこで次のような局在的な吸収領域の存在を考えてみた。

一般的にサファイア基板上に低温成長バッファ層を用いてエピタキシャル成長したGa<sub>N</sub>系半導体では、基板であるサファイアとGa<sub>N</sub>系半導体結晶の間に存在する大きな格子定数差に起因して、Ga<sub>N</sub>エピタキシャル成長層のサファイ



(a) LD(A)の場合、

(b) LD(B)の場合

図7 接合と垂直方向の遠視野像の実測値(実線)と計算値(点線)

ア基板との界面付近に、高密度の転位層が形成されることが知られている。

高転位密度のGa<sub>N</sub>は活性層の発光波長付近でも光学的吸収を持つが、このような高転位密度領域はレーザ素子n-GaNコンタクト層の底部のサファイア基板との界面部分にも存在している。つまり、このような高転位部分密度部分の存在が、光閉じ込めの劣るLD(B)の内部損失増大に寄与している可能性がある。このような仮説に基づき、n-GaNコンタクト層の底部、サファイア基板との界面付近に吸収損失を設定し、再度導波路シミュレーションを行った。すると、このシミュレーションによって得られた内部損失値にはLD(A)構造とLD(B)構造の間で差が生じ、LD(B)における内部損失がLD(A)における内部損失よりも50cm<sup>-1</sup>程度大きいという結果が得られた。この値自体は実際の測定結果とはやや差があるものの、オーダーとしてはほぼ妥当なものと考えられる。

さらに遠視野像に関しても、従来モデルを用いたLD(B)構造に関するシミュレーションでは、実際のLD(B)の遠視野像測定結果に見られる±20°付近にある2つのメインピーク強度の非対称性が説明できなかったが、n-GaNコンタクト層の底部に吸収損失を設定したモデルを用いることで、実測データを反映するような形で2つのメインピーク強度の非対称性が示される結果となった(図7(b)点線)。

このように構造の違った2つのレーザ素子における内部損失、および遠視野像の差は、n-GaNコンタクト層の底部、サファイア基板との界面付近に適度の吸収損失層を仮定することで定性的に説明できることが明らかになった。

## 6. まとめ

電流注入型のVSL法に、Ga<sub>N</sub>系半導体の特徴を利用したレーザ加工を組み合わせた新たなデバイスパラメータ評価方法を提案し、実際に我々の作製したGa<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザに適用して利得特性の測定を行った。

これによると、光閉じ込めの劣る素子では閉じ込め係数の低下によるモード利得の低下と、吸収損失の上昇が同時に発生していることがわかった。

VSLによる測定結果と遠視野像の測定結果、および導波路シミュレーションによる結果を考え合わせると、素子のモード利得と内部損失はその積層構造に強く影響されていることがわかる。また光閉じ込めの劣る素子の内部損失上昇と、遠視野像における荒れや強度の非対称性は、n-GaNコンタクト層の底部、サファイア基板との界面付近に適度の吸収損失を設定したモデルに関する導波路シミュレーションによって定性的に説明可能であることを示した。

これらの検討から、レーザ加工を併用したVSL法はGa<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザのデバイスパラメータ評価に対して有用であることが示された。

## 7. 謝辞

本研究は、ローム株式会社との「Ga<sub>N</sub>系青紫色半導体レーザ共同開発」によるものである。ご協力いただきました伊藤範和氏、田辺哲弘氏、園部雅之氏をはじめ、ローム株式会社光デバイス研究開発部のみなさまに深く感謝致します。

## 参考文献

- 1 M. Kuramoto, A. Yamaguchi, A. Usui and M. Mizuta: IEICE TRANS. ELECTRON. E83-C, (2000) 552
- 2 K. Domen, R. Soejima, A. Kuramata, K. Horino, S. Kubota and T. Tanahashi: Appl. Phys. Lett. 73, (1998) 2775
- 3 M. Koike, S. Yamasaki, S. Nagai, Y. Tezen, S. Iwayama, A. Kojima, T. Hiramatsu, T. Umezaki, M. Itoh, H. Yamashita, M. Ohashi, A. Kimura, M. Sato and K. Ohguchi: Proc. Int. Workshop on Nitride Semiconductors IPAP Conf. Series 1, (2000) 886

- 4 P. M. Snowton and P. Blood: Appl. Phys. Lett. 70, (1997) 2365
- 5 K. L. Shaklee and R. F. Leheny: Appl. Phys. Lett. 18, (1971) 475
- 6 S. T. Kim, H. Amano and I. Akasaki: Appl. Phys. Lett. 64, (1994) 1535
- 7 G. Frankowsky, F. Steuber, V. Harle, F. Scholz and A. Hangleiter: Appl. Phys. Lett. 68, (1996) 3746
- 8 J. D. Thomson, H. D. Summers, P. J. Hulyer, P. M. Snowton and P. Blood: Appl. Phys. Lett. 75, (1999) 2527
- 9 A. Oster, G. Erbert and H. Wenzel: Electron. Lett. 33, (1997) 864
- 10 E. Herrmann, P. M. Snowton, H. D. Summers, J. D. Thomson and M. Hopkinson: Appl. Phys. Lett. 77, (2000) 163
- 11 Y. Kimura, A. Ito, M. Miyachi, H. Takahashi, A. Watanabe, H. Ota, N. Ito, T. Tanabe, M. Sonobe and K. Chikuma: Jpn.J.Appl.Phys. 40, (2001) L1103
- 12 G. Fuchs, J. Horner, A. Hangleiter, V. Harle, F. Scholz, R. W. Glew and L. Goldstein: Appl. Phys. Lett. 60, (1992) 231

筆者

木村 義則 (きむら よしのり)

- a. 総合研究所 開発統括部
- b. 1993 年
- c. 入社以来, GaN 系青紫色半導体レーザの研究開発に従事

伊藤 敦也 (いとう あつや)

- a. HEC ディスプレイ事業統括部 技術統括部
- b. 1999 年
- c. GaN系青紫色半導体レーザの研究開発を経て, 現在, PDP のプロセス開発に従事

宮地 護 (みやち まもる)

- a. 総合研究所 開発統括部
- b. 1995 年
- c. 入社以来, GaN 系青紫色半導体レーザの研究開発に従事

高橋 宏和 (たかはし ひろかず)

- a. 総合研究所 開発統括部
- b. 1992 年
- c. 入社以来, GaN 系青紫色半導体レーザの研究開発に従事

渡辺 温 (わたなべ あつし)

- a. 総合研究所 開発統括部
- b. 1980 年
- c. 磁気ヘッドの開発を経て GaN 系青紫色半導体レーザの研究開発に従事

太田 啓之 (おおた ひろゆき)

- a. 総合研究所 所長室
- b. 1977 年
- c. 磁気記録技術の研究, 磁気ヘッドの開発を経て GaN 系青紫色半導体レーザの研究開発に従事

竹間 清文 (ちくま きよふみ)

- a. 総合研究所 開発統括部
- b. 1980 年
- c. 光ピックアップの光学系開発, 波長変換素子の研究を経て GaN 系青紫色半導体レーザおよび光通信用 DFB レーザの研究開発に従事