

## レーザーリフトオフ法を用いた青 / 赤二波長集積レーザーの作製

Fabrication of Blue/Red Two-Wavelength Laser Diodes using Laser Lift-Off Technique

宮地 護, 木村 義則, 三村 泰弘, 尾上 篤

Mamoru Miyachi, Yoshinori Kimura, Yasuhiro Mimura, Atsushi Onoe

**要旨** 我々は、次世代高密度ディスク用の405nm帯のレーザー光とDVD用の650nm帯のレーザー光を発振する二波長集積レーザーを初めて実現した。2つのレーザーの発振閾値は405nm帯, 650nm帯でそれぞれ82mA, 48mAであり, 集積プロセスによる閾値上昇は見られていない。集積方法は量産性に優れるウェハボンディングによる手法を用いており, 2つの発光点間隔は約3 $\mu$ mと非常に近接した状態を実現することができた。このような発光点間隔が近接した二波長集積レーザーの実現により, Blu-ray/DVDコンパチブルピックアップのさらなる小型軽量化が期待できる。

**Summary** An integrated two-wavelength laser diode (TWLD) which emits 405-nm-band and 650-nm-band laser beams from a single chip has been realized for the first time. The TWLD was fabricated by transferring a GaN-based laser diode (LD) onto an AlGaInP-based LD using a laser lift-off technique. Threshold currents in laser operations were 82 mA and 48 mA for the wavelengths of 405 nm and 652 nm, respectively. The GaN-based LD maintained its intrinsic property throughout the transfer onto the AlGaInP-based LD. The distance between two emission spots was approximately 3  $\mu$ m. Such a close spot distance allows the optical components of the pickup to be substantially simplified.

**キーワード** : GaN系半導体レーザー, AlGaInP系半導体レーザー, 二波長集積レーザー, ウェハボンディング, レーザリフトオフ

**KeyWords** : GaN-based laser diode, AlGaInP-based laser diode, two-wavelength laser diode, wafer-level integration, laser lift-off

### 1. まえがき

DVDを超える高密度記録が可能な光ディスクを実現するためには, さらに短波長のレーザー光が必要不可欠となる。GaN系半導体はそのための材料として注目され, 多くの研究機関で精力的に研究開発が行われてきた。GaN系半導体レーザーの連続発振がはじめて報告されたのは

1995年であり, 1999年には寿命が1万時間を突破, 2001年には商品化された。このGaN系半導体レーザーの開発成功を受け, 波長405nmの光を用いた高密度光ディスクが提案され, 直径12cmのCDサイズに片面一層で20GBを超える記録密度が実証されている<sup>(1),(2)</sup>。現在, この光ディスクはBlu-ray Discとして規格化され,

次期光ディスクシステムとして精力的に開発が進められている。

このような高密度記録システムは、それ自体で十分に魅力的なものではあるものの、現在、DVD-R、DVD-RWやDVD-RAMを含めたDVDファミリーは広く一般に普及しており、これらとのコンパチビリティを持たせることは光ディスク装置として必須となってくると考えられる。しかしながら、DVD-videoのピット深さやDVD-Rの有機色素材料、DVD-RW、-RAMの相変化媒体の感度などを考慮すると、波長405nmの光を用いて現行のDVDファミリーを読み書きすることは難しい。そこで405nm帯レーザに加えて650nm帯レーザを搭載することが必要となる。これには、個別にパッケージされた2つのレーザをピックアップに搭載し、プリズムなどで光路調整することで実現することができるが、将来的にシステムを軽薄短小化するために、1チップから両波長のレーザ光が出射されるような二波長集積レーザの実現が望まれている。現在商品化されているDVD/CDコンパチ用の650nm/780nm二波長集積レーザの場合、どちらの波長の半導体レーザもGaAs基板上への成膜が可能であるため、同一基板上にモノリシックに形成するという手法がとられている<sup>(3),(4)</sup>。しかし、405nm帯レーザを実現するGaN系半導体と650nm帯レーザを実現するAlGaInP系半導体は、その物性が大きく異なるために同一基板上への成膜が非常に難しい。別々の基板上にそれぞれの半導体レーザを作製し、チップ化した後に同一サブマウント上にハイブリッド実装する方法<sup>(5)</sup>は、405nm帯レーザと650nm帯レーザの集積にも応用可能ではあるが、正確な発光点間隔位置合わせが難しい上に、量産性も乏しい。

これまでに我々はサファイア基板上に形成したGa<sub>2</sub>N系半導体レーザをレーザリフトオフ(LL0)法を用いてGaAs基板上に貼り替えた半導体レーザを開発した<sup>(6)</sup>。LL0法はサファイア基板からGa<sub>2</sub>N系半導体薄膜を剥離する有用な手法であり、GaAs基板の他にもCu<sup>(7)</sup>やSi基板上<sup>(8)</sup>へ

の貼り替えが報告されている。

最近、我々はこのLL0法を用いることで、発光点間隔が非常に近接した青/赤二波長集積レーザを量産性に優れたプロセスで作製することに成功した<sup>(9)</sup>。

今回の報告では、まず青/赤二波長集積レーザの作製プロセスにおいてキープロセスであるLL0法について述べ、次いで二波長集積レーザの作製プロセス、作製した二波長集積レーザの特性、さらに二波長集積レーザ用の端面高反射コーティングについて述べる。

## 2. レーザリフトオフ法

GaN系半導体はN<sub>2</sub>平衡分圧が非常に大きく、バルク基板の作製が非常に困難である。そこでヘテロエピタキシャル用基板としてさまざまな材料が検討されてきたが、サファイアはAlN、Ga<sub>2</sub>Nなどの低温バッファ層を形成することで、その上に比較的結晶性の良いGa<sub>2</sub>N系半導体が作製可能になることから、エピタキシャル成長用基板として広く用いられてきた。しかし、主に用いられているサファイアc面基板には明確な劈開面がないために、劈開によるGa<sub>2</sub>N系半導体レーザの共振器端面形成が困難となっている。これは放射ビーム品質の低下、歩留まりの低下を引き起こしてしまう。また、サファイア基板は導電性がないために、p、n両電極共にエピタキシャル膜側に形成し、エピタキシャル膜中を横方向に電流注入しなければならない。これはチップサイズの増大、直列抵抗の増加を引き起こしてしまう。

そこで我々はこれらの問題を解決するために、サファイア基板上に形成したGa<sub>2</sub>N系薄膜を劈開性かつ導電性の基板に、LL0法により貼り替えてレーザチップを作製する技術に関して検討を行った。LL0法とは、高出力のレーザ光を照射することにより物質内部を部分的に加熱分解し、この部分を境に分離する手法である。具体的な作製プロセスを図1に示す。まず、Ga<sub>2</sub>N系のレーザ構造薄膜をサファイア(0001)面基板

上に有機金属化学気相成長(MOCVD)法を用いてエピタキシャル成長する。具体的なレーザ構造, 成膜方法に関しては文献[10]に詳細に記述してある。次に図1に示すように2つの基板を融着するための金属としてGaN薄膜側にAuを, GaAs基板側にSnを形成する(a)。この面を密着させた状態で300℃に加熱し, AuSn合金化することにより2つの基板の貼り付けを行う(b)。次にNd-YAGレーザの第4高調波(波長266nm)をサファイア基板裏面側から照射する。この光に対してサファイアは透明であるので, 照射された光はサファイア基板を透過してGaN層で有

効に吸収される。サファイア基板との界面近傍のGaN層には多くの結晶欠陥が存在するために, ここで吸収された光はほとんど全てが熱に変換され, GaNはGaとN<sub>2</sub>に熱分解される(c)。これを40℃程度に加熱するとGaは溶融状態になり, サファイア基板の除去を行うことができる(d)。2つの基板の貼り合わせ工程(b)において, (0001)GaNの劈開面である(1-100)面と(001)GaAsの劈開面である(110)面が一致するように貼り合わせると, (d)の素子は容易に劈開することができる(e)。作製したレーザチップの断面を図2に示す。図のようにGaAs基板側

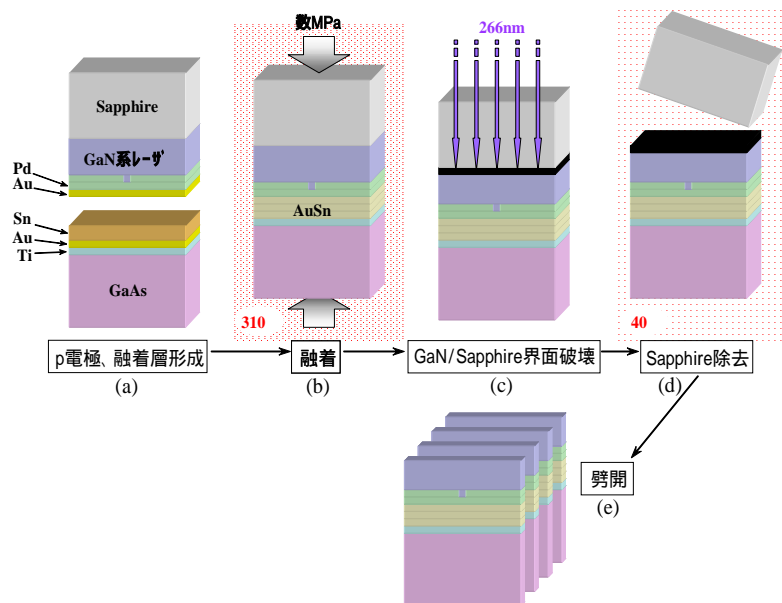


図1 LL0法による青色レーザ作製方法

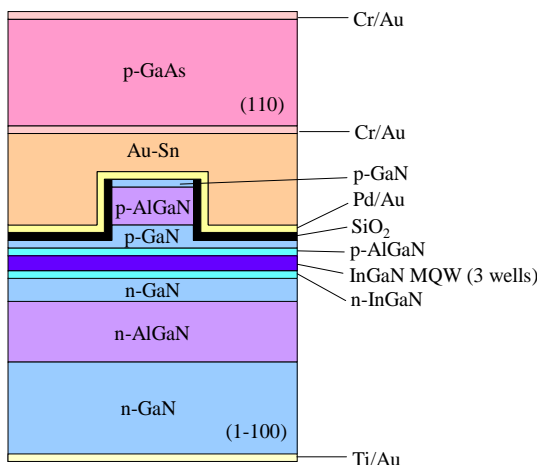
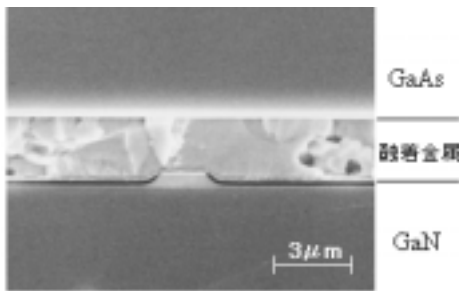
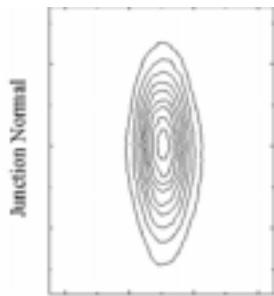


図2 LL0法により作製した青色レーザ素子構造図

とサファイアを剥離した n 型 GaN 面に電極を形成することによって，上下(縦)方向の電流注入によりレーザチップを駆動することができる。このように LLO 法を用いて基板貼り替えを行うことにより，図 3 (a) のように非常に良好なレーザ出射端面を再現性良く得ることができ，その放射パターンを同図(b)のようにリップルのないきれいな楕円形とすることが可能となった。



(a) 素子端面電子顕微鏡像



(b) 遠視野像

図 3 LD 素子の劈開端面の SEM 像と遠視野像

### 3. 二波長集積レーザ作製プロセス

上述したように LLO 法を用いることで，サファイア基板の上にエピタキシャル形成した GaN 系薄膜を比較的簡便に別の基板に貼り替えることが可能となる。我々はこの手法を応用することにより，GaN 系青色半導体レーザと AlGaInP 系赤色半導体レーザを集積した二波長半導体レーザを作製する方法を考案した。

図 4 に青 / 赤二波長集積レーザの作製プロセ

スのフローを示す。まず， $\text{-Al}_2\text{O}_3$  基板上に GaN 系半導体レーザを減圧 MOCVD 法を用いて作製する。次に幅  $3.5 \mu\text{m}$  のリッジストライプを形成し，オーミック電極および AlGaInP 系半導体レーザとの貼り合わせ，接着層として Ni/Au を形成する(a)。この青色レーザ側のプロセスとは別に，AlGaInP 系半導体レーザ薄膜構造を GaAs(001) 基板の上にエピタキシャル成長する。

次に，幅  $3.0 \mu\text{m}$  のリッジストライプを形成し，オーミック電極として Cr/Au を形成する。さらにその上に GaN 系半導体レーザとの接着層として Sn を形成するが，Sn は全面には形成せず，図 2(b) に示すように AlGaInP 系半導体レーザのリッジストライプを含む所定領域のみに形成する。次にここまで別々に作製してきた 2 つのレーザウェハを，GaN 系半導体レーザ側の Au 接着層と AlGaInP 系半導体レーザ側の Sn 接着層とを融着することにより貼り合わせを行う。融着はフォーミングガス中において  $300^\circ\text{C}$  の状態を 10 分間保持して行った。この貼り合わせプロセスは，GaN 系半導体レーザと AlGaInP 系半導体レーザのリッジストライプが最も近接するように位置合わせをして行われている。ま

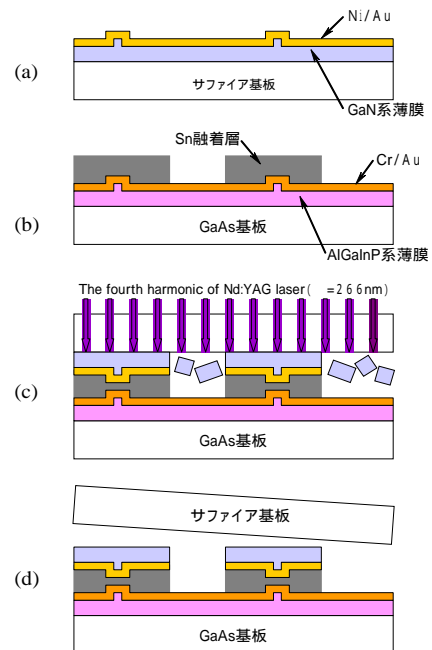


図 4 二波長集積レーザ作製フロー

た、GaN系半導体レーザの劈開面である(1-100)面とAlGaInP半導体系レーザの劈開面である(110)面が一致するように貼り合わせている。次にNd:YAGレーザの第4高調波である波長266nmのレーザ光をサファイア基板裏面側から照射する。前節で述べたようにこのレーザ光照射によってサファイア基板との界面近傍のGaN層を分解することができ(c)、次いで金属Gaの融点以上に加熱することにより容易にサファイア基板を除去することができる。このプロセスによって、AlGaInP系半導体レーザ側にSn融着層を形成している領域ではGaN系半導体レーザのAlGaInP系半導体レーザへの貼り替えが有効に行われる。

一方、AlGaInP半導体系レーザ側のSn融着層がない領域では、2つのレーザウェハが接着されないためGaN系半導体レーザは崩落し、素子が完成した際に共通アノード電極となるAu電極部分が表面に露出する(d)。ここまでのプロセスをウェハレベルで行い、最後に劈開をして共振器端面形成、チップ化を行う。劈開はGaN系半導体の(1-100)面およびAlGaInP系半導体の(110)面で行った。また、今回作製した素子はいずれも端面のコーティングは行っていない。以上のようなプロセスにより、図5に示す二波長集積レーザを作製することができる。このようにウェハレベルでの貼り合わせによる

集積をおこなっているため、高い量産性と高い位置合わせ精度を実現することが可能となっている。また、図5に示す完成素子にはGaN系半導体レーザの成長用基板として用いたサファイア基板は存在せず、GaN系半導体レーザ部分のトータルの厚さは18μm程度と非常に薄くなっている。このためサファイア基板を剥離した面にヒートシンクを形成し、この面から放熱を取ることによって高い放熱特性を得ることができる。電極構成は図5に示すようにアノードを共通とした3電極構成となっている。このため、GaN系半導体レーザとAlGaInP系半導体レーザはそれぞれ独立に駆動することが可能となっている。

#### 4. 二波長集積レーザの特性

図6は作製した二波長集積レーザのパルス駆動における電流対光出力特性である。GaN系半導体レーザ、AlGaInP系半導体レーザはそれぞれ82mA以上、48mA以上でレーザ発振を観測することができた。また、同図中にはその発振スペクトルも併せて示してある。この二波長集積レーザのアプリケーションとしてはBlu-rayとDVDの互換機用の光源を想定しており、発振波長はほぼ設計通りそれぞれ405nm、652nmとなっている。

図7は出射端面付近の電子顕微鏡像(a)と、

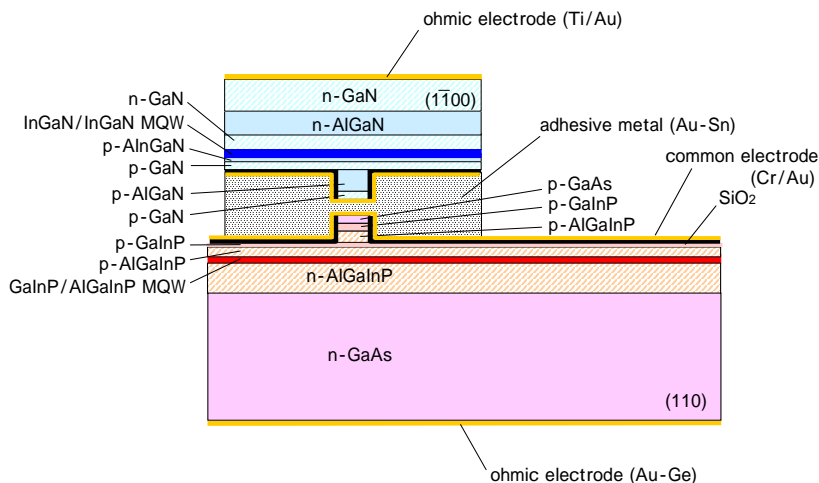


図5 二波長集積レーザ素子の模式

赤，青同時駆動した場合の光学顕微鏡写真 (b) である。図(a)のようにAlGaInP系半導体レーザとGaN系半導体レーザはAuSn融着層を介して貼り付けられている。上述したように端面

形成プロセス段階ではサファイア基板は除去されているために，AlGaInP系半導体レーザのみならずGaN系半導体レーザでも非常に良好な劈開端面を得ることができている。2つのリッジ

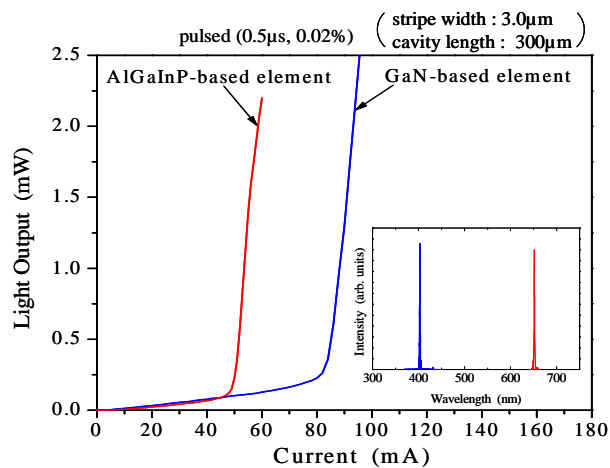
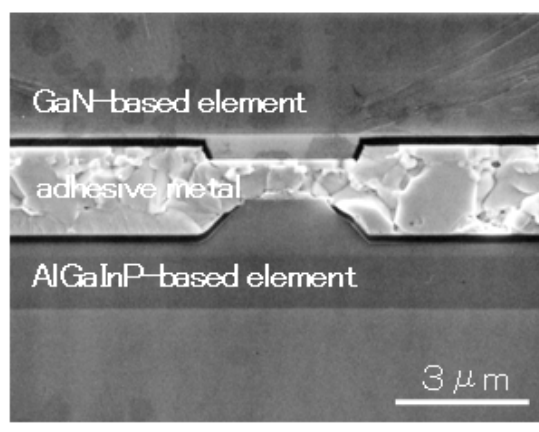
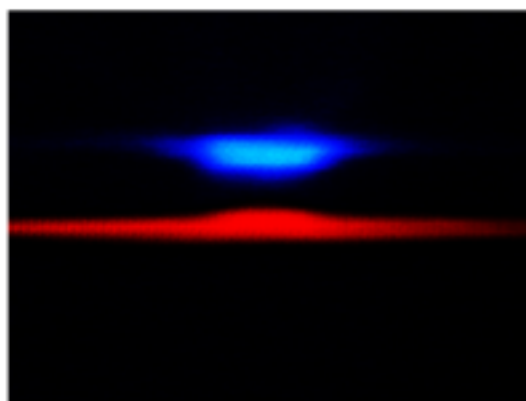


図 6 二波長集積レーザ特性



(a) 電子顕微鏡写真



(b) 同時駆動時の光学顕微鏡写真

図 7 二波長集積レーザ素子端面

ストライプは最も近接するように位置合わせされており、赤 - 青 2 つの発光点はその間隔が 3  $\mu\text{m}$  と非常に近接した状態が実現されている。

今回の試作では、図 4 で説明したように GaN 系半導体レーザ薄膜とサファイア基板との分離に LL0 法を用いている。このプロセスでは高出力レーザによってサファイア基板近傍の GaN にレーザアブレーションを起こさせているため、GaN 系半導体レーザに与えるダメージが懸念される。そこで、まず LL0 プロセスが GaN 系半導体レーザの発振閾値に与える影響について検討を行った。図 8 はサファイア基板上の通常の GaN 系半導体レーザ (白抜き) と図 4 と同様なプロセスによって GaN 系半導体薄膜を部分的に GaAs 基板上に貼り替えた GaN 系半導体レーザ (黒) の発振閾値のヒストグラムである。

今回比較した 2 つの GaN 系半導体レーザは同じレーザウェハから切り出して作製している。図のように、サファイア基板上の通常の GaN 系半導体レーザは発振閾値の分布が広がっているが、これはサファイア基板の劈開性が乏しいために、再現性良く良好な共振器端面を得られていないことによる。一方で LL0 法によって劈開性の高い GaAs 基板上に貼り替えた GaN 系半導体

レーザの場合には再現性良く良好な劈開端面が得られるために発振閾値のばらつきは小さくなっている。このため、通常の GaN 系半導体レーザの全てのデータを LL0 ダメージ検討の比較対象とすることはできないが、良好な劈開端面が得られている最高性能のもので比較しても、LL0 プロセスを行ったものは同等以上の特性が得られている。よって、少なくとも発振閾値に関しては、LL0 による影響はないものと考えられる。今後はさらに詳細に LL0 による影響を見積もるために、CW 駆動下での寿命に与える影響や、透過電子顕微鏡による転位の観察などを行うことが必要であると思われる。

## 5 . 二波長集積レーザ用高反射膜

今回作製した二波長集積レーザは、図 4 で説明したように 2 つのレーザをウェハの状態で貼り合わせた後に、劈開によって共振器端面形成を行っている。2 つの発光点間隔は 3  $\mu\text{m}$  と非常に近接しているため、共振器端面に形成する反射膜は 2 つのレーザで同一のものとなる。出射端側の低反射膜に関しては、2 層程度の誘電体多層膜により、比較的任意に反射率を設計することが可能であるが、後側端面の高反射膜に

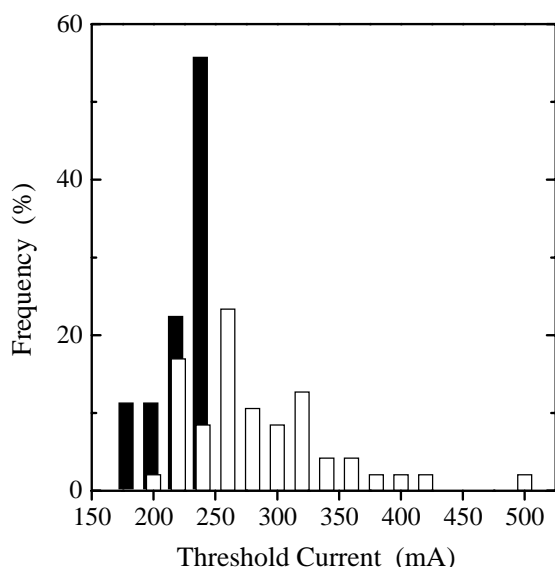


図 8 サファイア基板上デバイスと二波長構造デバイスにおける GaN 系レーザの閾値比較

関しては従来の1/4波長膜のみの多層膜では、405nmと650nmの両方の波長に対して高反射率とすることが難しい。そこで我々は、図9のような構成の高反射膜の検討を行った。この高反射膜は大きく分けて3つの領域から構成されている。

1つは波長405nmに対する1/4波長の多層膜(領域①)で1つは波長650nmに対する1/4波長の多層膜(領域②)である。仮に領域①で405nmの光が全反射され、650nmの光が全透過した場合には、この2つの領域を重ねるだけで両波長に対して同時に高反射率とすることが可能である。しかしながら、実際には領域②でも650nmの光は少なからず反射される。この反射光は領域①で反射された光に対して必ずしも位相が一致していないために、場合によっては光強度を弱める結果となってしまう。また、405nmの光の一部は領域②を透過し、その一部は領域①で反射される。この反射光が領域②での反射光と位相が一致していない場合には、十分な高反射率を得ることができない。そこで、この2つの領域の間に、それぞれの領域で反射された光の位相を調整するための位相調整層(領域③)を挿入し、両波長共に反射率が向上するように図っている。

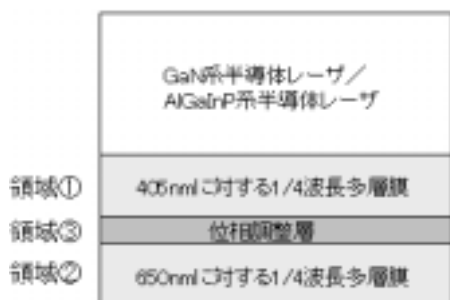


図9 二波長用高反射膜の構造

図10は一例として、領域①をSiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>からなる405nmに対する1/4波長の3対多層膜とし、領域②をSiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>からなる650nmに対する1/4波長の1.5対多層膜とした場合における、波長405nmと650nmに対する反射率のSiO<sub>2</sub>

位相調整層膜厚依存性を示したものである。波長405nmと650nmに対して1/4波長となるSiO<sub>2</sub>の膜厚はそれぞれ69nmと112nmであるが、図のようにどちらの波長に対しても1/4波長とは異なる膜厚で反射率が最大となっている。この図から、位相調整層の膜厚を100nmとすると、両波長とも90%を越える反射率が得られると見積もることができる。

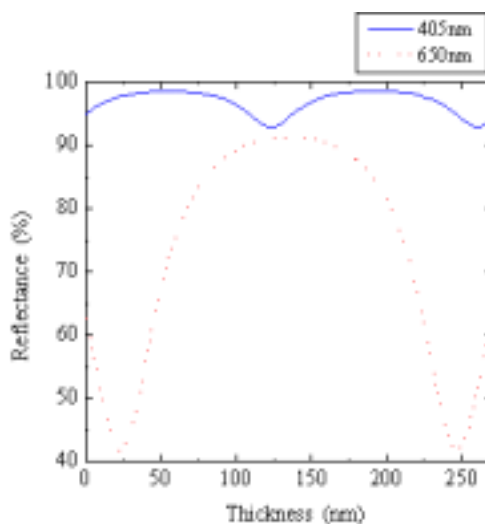


図10 反射率の位相調整層膜厚依存性

図11は図9の構造において、SiO<sub>2</sub>位相調整層の膜厚を100nmとした多層膜の反射スペクトルの実測値(実線)である。多層膜はサファイア基板上に作製し、サファイア基板側から見た反射率を測定している。この結果から、半導体(GaInNまたはGaInP)から見た、この多層膜の反射率を見積もると(図中破線)波長405nmに対して98%、波長650nmに対して91%となり、両波長に対して非常に高い反射率が得られることがわかった。実際には、半導体との付着力や歪みなどを考慮して誘電体材料を選ばなければならないが、基本的に図8のような構成をとることで、2つの波長に対して高反射率となる多層膜を実現することができるものと考えられる。

## 6. まとめ

光ディスクはCDからDVDへと進化してきた



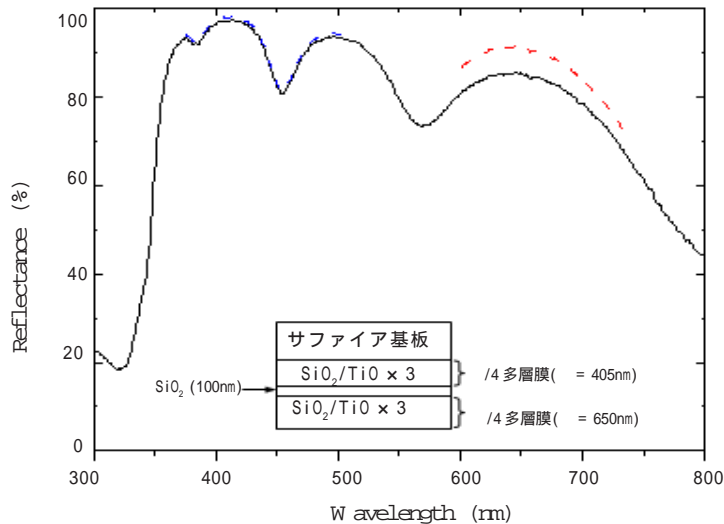


図 11 二波長用 HR コーティング膜の反射スペクトル

が、CD はオーディオ用途やデータ記録用途としてその地位を確立しており、DVD 記録再生機に CD との互換性を持たせることは今や必須の要件となっている。次世代の光ディスクである Blu-ray Disc (BD) や HD-DVD (HD) もやはり同様に、現在広く普及している DVD との互換は必須となってくると考えられ、現在、互換ピックアップの小型化に向けて、種々の光学部品を 2 つあるいは 3 つの波長で共用する検討が各社で行われている。1 つのチップから複数の波長を出力することができる多波長レーザはそのための究極の部品であると考えられる。今回我々は、BD (HD) / DVD 互換用光源としての青 / 赤二波長集積レーザを量産性の高い方法によって実現できることを示した。今後は、高出力化、長寿命化の検討に加えて、さらに CD との互換性を持たせた三波長集積レーザの検討も取り組んでいくべき課題である。

## 7. 謝辞

本研究開発を進めるにあたり、適切なお指導とご助言をいただいた独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センターの竹間清文氏に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) K. Schep, B. Stek, R. van Woudenberg, M. Blum, S. Kobayashi, T. Narahara, T. Yamagami and H. Ogawa; Format Description and Evaluation of the 22.5GB Digital-Video-Recording Disc, Jpn. J. Appl. Phys. [40] (2001) pp. 1813-1816
- (2) Y. Wada, M. Katsumura, Y. Kojima, H. Kitahara and T. Iida; High-Density Recording Using an Electron Beam Recorder, Jpn. J. Appl. Phys. [40] (2001) pp. 1653-1660
- (3) K. Nemoto, T. Kamei, H. Abe, D. Imanishi, H. Narui and S. Hirata; Monolithic-Integrated Two-Wavelength Laser Diodes for Digital-Versatile-Disk/Compact-Disk playback, Appl. Phys. Lett. [78] (2001) pp. 2270-2272
- (4) T. Onishi, O. Imafuji, T. Fukuhisa, A. Mochida, Y. Kobayashi, M. Yuri, K. Itoh and H. Shimizu; Monolithically Integrated Dual-Wavelength Self-Sustained Pulsating Laser Diodes with Real Refractive Index Guided Self-Aligned Structure, Jpn. J. Appl. Phys. [40] (2001) pp. 6401-6405.
- (5) H. F. Shih, T. P. Yang, M. O. Freedman, J. K. Wang, H. F. Yau and D. R. Huang; Holographic Laser Module with Dual Wavelength for

Digital Versatile Disc Optical Heads,  
Jpn. J. Appl. Phys. [38] (1999) pp. 1750-  
1754.

(6) 宮地護, 太田啓之, 渡辺温, 田中利之, 高橋宏和, 木村義則, 伊藤敦也, 園部雅之, 伊藤和, 田辺哲弘, 藤井哲雄, 丸田秀昭, 中川大輔, 高須秀視, 竹間清文; GaN 系半導体レーザー薄膜の GaAs 基板への貼り替え, 第48回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 28p-E-10 (2001)

(7) W. S. Wong, M. Kneissl, P. Mei, D. W. Treat, M. Teepe and N. M. Johnson; Continuous-Wave InGaN Multiple-Quantum-Well Laser Diodes on Copper Substrates, Appl. Phys. Lett. [78] (2001) pp. 1198-1200

(8) W. S. Wong, T. Sands, N. W. Cheung, M. Kneissl, D. P. Bour, P. Mei, L. T. Romano and N. M. Johnson; InGaN Light Emitting Diodes on Si Substrates Fabricated by Pd-In Metal Bonding and Laser Lift-Off, Appl. Phys. Lett. [77] (2000) pp. 2822-2824

(9) M. Miyachi, Y. Kimura and K. Chikuma; AlGaInN/AlGaInP Two-Wavelength Laser Diodes Fabricated by Wafer-Level Transferring Technique, Jpn. J. Appl. Phys. [43] (2004) pp. L136-L138

(10) Y. Kimura, M. Miyachi, H. Takahashi, T. Tanaka, M. Nishitsuka, A. Watanabe, H. Ota and K. Chikuma; Room-Temperature Pulsed Operation of GaN-Based Laser Diodes on a-Face Sapphire Substrate Grown by Low-Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Jpn. J. Appl. Phys. [37] (1998) pp. L1231-L1233.

## 筆者紹介

### 宮地 護 (みやち まもる)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス研究部。GaN 系青紫色半導体レーザーの研究開発を経て、現在、二波長集積半導体レーザーの開発に従事。

### 木村 義則 (きむら よしのり)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス研究部。GaN 系青紫色半導体レーザーの研究開発を経て、現在、二波長集積半導体レーザーの開発に従事。

### 三村 泰弘 (みむら やすひろ)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス研究部。現在、二波長集積半導体レーザーの開発に従事。

### 尾上 篤 (おのえ あつし)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス研究部。磁気ヘッド, 薄膜結晶 SHG デバイスの研究開発を経て、現在、強誘電体ストレージ, 二波長集積半導体レーザーの開発に従事