

〈一般研究課題〉 車載用低眩惑前照灯 (ハイビーム) に向けた  
青色面発光レーザアレイの開発  
助成研究者 名城大学 竹内 哲也



## 車載用低眩惑前照灯 (ハイビーム) に向けた 青色面発光レーザアレイの開発

竹内 哲也  
(名城大学)

### Blue vertical cavity surface emitting laser arrays for low-dazzling headlights

Tetsuya Takeuchi  
(Meijo University)

#### Abstract :

Since fatal pedestrian accidents at night often happen, use of car's high beam headlights is strongly recommended. However the use is unrealistic because the beam also causes dazzlement of drivers in coming vehicles. A blue vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array is a key device to achieve a low-dazzling headlight since the array can clearly illuminate ahead, but not to the coming vehicles by controlling operations of the individual lasers in the array.

In this study, we have established key structures and technologies for blue VCSELs and the arrays. First, nitride-based distributed Bragg reflectors (DBRs) with high reflectivity were achieved by fabricating novel asymmetric DBR structures. Next emission intensity ratio from the two active regions in periodic gain structure was investigated. The ratio was very stable up to high current injection level corresponding to the laser operation. Finally 10 x 10 matrix blue micro LED array was achieved in which individual micro LEDs contain novel tunnel junctions and semiconductor wiring. The structure enables us to reduce the number of process steps and increase yield. These achievements open the door for realizations of blue VCSEL arrays and low-dazzling headlights.

## 1. はじめに

夜間の歩行者死亡事故が多発していることから、前照灯(ハイビーム)を使用するように各県警察が注意を呼び掛けている。しかしながら、交通量の多い道路では、前照灯により対向車の運転手が眩惑するため、積極的な前照灯の利用は進んでいない。この問題に対し、より制御された前照灯を開発する試みがなされている[1]。具体的には、車載カメラにより対向車の位置を逐一認識し、リアルタイムで前照灯の照射領域を制御する試みである。しかしながら、現在利用可能な光源はハロゲンランプや発光ダイオード(LED)などの拡散光であり、所望の狭い領域のみを必要十分に照らす光源は存在しない。本研究で取り扱う面発光レーザは、LEDと異なって光共振器を有するため、より狭い領域により強い光を放射することができる。ゆえに、この面発光レーザを集光レンズなどの最小限の光学系と組み合わせることで、限定された必要な領域に十分な明るさを供給する光源になり、上記課題を解決することができる。

本研究では、青色面発光レーザ実現とそのアレイ化を目指した。本研究期間内において、青色面発光レーザの動作検証まで到達しなかったものの、以下の三点が成果として挙げられる。

まず、青色面発光レーザ動作に必要な不可欠である窒化物半導体による高品質多層膜反射鏡を実現した。これまで高い表面平坦性、高い反射率を有する窒化物半導体多層膜反射鏡の実現が困難であった[2]が、独自構造として各層厚が1/4波長光学膜厚ではない非対称構造を提案し、それにより表面平坦性と高反射率を有する多層膜反射鏡構造を実現した。続いて、面発光レーザ動作に有利である周期利得構造を作製し、これまで検討されていなかったレーザ動作時と同等の高い電流注入時の発光特性を検討した。その結果、高い電流注入時であっても二つの活性層に均一にキャリアが注入されることを新たに見出し、窒化物半導体による周期利得構造がレーザ動作に適していることを示した。最後に、面発光レーザと同等の大きさである $10\mu\text{m}$ 径微細LEDを作製し、その高密度アレイ化を進めた。その結果、従来よりも大幅に少ない工程数で作製可能な $10\times 10$ チャンネル高密度微細LEDアレイを実現した。さらに、このアレイにおいて発光領域を制御した例として、 $7\times 25$ ドットマイクロディスプレイも新たに開発した。

これらは今後のレーザ動作実現さらにはアレイ素子実現において極めて重要な要素構造および技術であり、本研究を通じて確立することができた。本報告では、上記三点に関して詳細に報告する。

## 2. 実験結果と考察

### 2.1 窒化物半導体による多層膜反射鏡

図1に面発光レーザ素子構造の概略図を示す。面発光レーザは、LEDと同様にウエハに対して垂直に電流を流し、同じ垂直方向に光が出射する。一方で、図1に示すように対向配置された一対の反射鏡による光共振器の有無が大きな違いである。続いて、この面発光レーザを通常の半導体レーザと比較すると、通常の半導体レーザでは、光共振方向がウエハ面内方向であり、かつその長さが数 $100\mu\text{m}$ であるのに対し、面発光レーザでは上述したようにウエハ垂直方向であり、それゆえ、共振器長は約 $1\mu\text{m}$ と二桁も短い。この面発光レーザ構造の特徴により、共振器を形成する反射鏡特性に対して、少なくとも以下の二つの要請が生じる。

まず、共振器長が二桁短いため、面発光レーザ共振器内を進行する光は、従来の半導体レーザ共振器内を進行する光に対して単位時間当たりに反射鏡で反射する回数が二桁多いことを意味する。

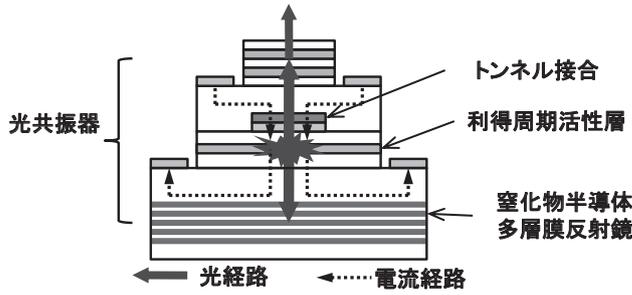


図1 青色面発光レーザーの概略図

には、99%以上の高い反射率が必須である。ゆえに、単一界面による反射や、金属膜による反射では全く不十分であり、1/4波長光学膜厚を多層積層して得られる、位相を揃えた複数反射による高反射構造が必須となっている。また、高い反射率を実現するためには、表面散乱のない平坦な表面が必要であるが、それに加えて、縦方向に共振器を形成するため、下部反射鏡上に高品質活性層を形成する必要がある。活性層の厚さは数nmと薄い層であり、それゆえ、反射鏡の表面平坦性として1nm以下の平坦性が要求される。

ところで、実現されている赤外面発光レーザーで利用されている多層膜反射鏡は、AlAsとGaAsの組み合わせである。大きな屈折率差が得られ、かつ格子定数の大きさがほぼ等しいため、結晶性の劣化なく、多層膜を容易に形成できる。一方、窒化物半導体では、AlNとGaN、もしくはAlInNとGaNの二つの組み合わせが提案されている。しかしながら、現状どちらも実用化の観点からは以下の様な課題を有する。まず、AlN/GaNでは、成長速度も速く、比較的大きな屈折率差が得られるため、理論上高反射率を有する多層膜反射鏡が可能である。しかし、格子定数が2.4%も異なるため、1/4波長光学膜厚(40~50nm)でAlNとGaNを交互積層すると、界面平坦性の劣化や反射率の低下が生じ、実際には高反射率が得られない。一方、AlInN/GaNの組み合わせでは、AlNとInNの混晶であるAlInNを形成することで格子定数をGaNに合わせ、AlAs/GaAsで実現できているような高品質多層膜反射鏡が実現できる。しかしながら、InNを含む混晶では、低い成長温度と低い成長速度が必要になり、必要な反射率を有する多層膜反射鏡の成長に30時間程度かかり、成長装置への負担や生産コスト増が大きな懸念点である。

我々は、GaN層上のAlN層において、AlN層の成長圧力依存性と層厚依存性を詳細に検討した。その結果、50torrの圧力において、厚さ20nm未満のAlN層であれば、AlN層の表面平坦性、およびそのAlN層上に作製したGaN層の表面平坦性が劣化せず、1nm以下の平坦性が得られることを見出した。通常、多層膜反射鏡は各層を1/4波長光学膜厚に設計するが、我々は、上記結果を鑑み、

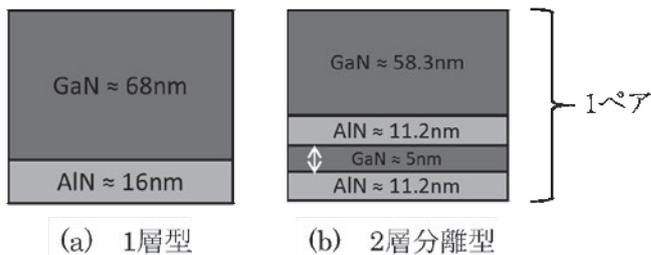


図2 非対称多層膜反射鏡 (a) 1層型と (b) 2層分離型

従来の半導体レーザーでは、半導体と空気の屈折率段差による界面反射率である20~30%でも、この反射による損失は20~30cm<sup>-1</sup>と適度な値であり、レーザー動作可能な範囲である。ところが、共振器長が1μmの場合は、反射率が99%でも反射による損失は50cm<sup>-1</sup>もあり、レーザー動作するため

AlN層を1/4波長光学膜厚より薄い20nm以下にし、GaN層を1/4波長より厚くした非対称多層膜反射鏡を提案した。さらに、AlN層を意図的に二層に分けて各AlN層の厚さをより薄くできる二層分離型非対称多層膜反射鏡を提案した。これらの構造を図2に示す。この構造をもとに、60ペアの多層膜反射

鏡をそれぞれ作製した。図3に各試料表面のAFM像を示す。また、図4に(0002)面反射X線回折曲線を示す。従来のAIN層が厚い多層膜反射鏡では、表面平坦性が劣化し、3nm以上の凹凸が生じ、かつX線回折曲線のサテライトピークの強度が大幅に低下し、半値幅が増大していることがわかっている[3]。すなわち、表面のみならず、各層の界面平坦性も劣化している。一方、我々が提案した二つの構造は、どちらも表面粗さが、RMS値で0.5nm以下と従来よりも一桁以上小さく、良好な表面平坦性を示している。またX線回折曲線も極めてシャープなものが得られており、界面急峻性の優れた構造が得られていることがわかった。続いて、図5に各試料の反射率スペクトルを示す。従来の多層膜反射鏡は、95%程度の反射率しかない[3]が、新たに提案した非対称構造では、測定精度の都合上97%以上の反射率では十分な精度で測定できないものの、99%程度の反射率を有すると見積られる。さらに、二層分離型構造では、実質的に厚いAIN層になっているため、高い反射率を有する波長領域、いわゆるストップバンド幅が一層型に比べて広くできることも明らかになった。今後、この高品質反射鏡上に活性層を成長させ、さらに誘電体による多層膜反射鏡を形成することで光共振器を形成すれば、青色面発光レーザ動作に十分な光共振器が形成できると考えている。

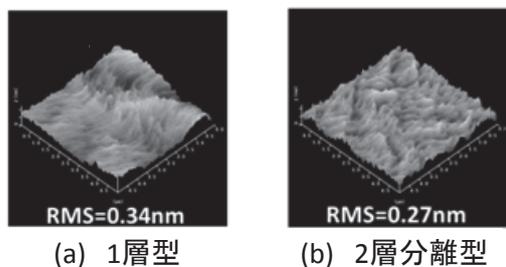


図3 非対称多層膜反射鏡のAFM表面写真  
(a) 1層型と (b) 2層分離型

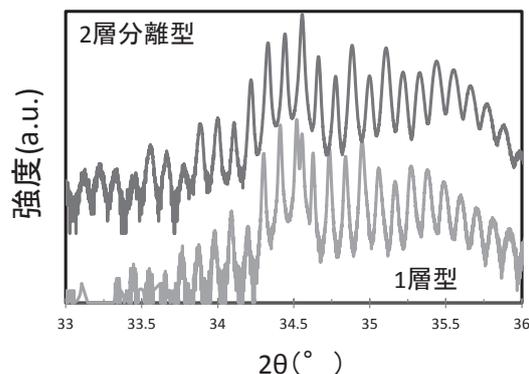


図4 非対称多層膜反射鏡の(0002)面X線回折強度曲線  
(a) 1層型と (b) 2層分離型

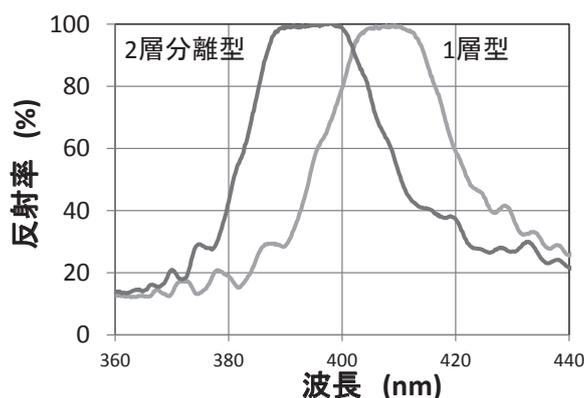


図5 非対称多層膜反射鏡の反射率スペクトル  
(a) 1層型と (b) 2層分離型

## 2.2 周期利得構造における電流注入依存性

上述したように基板に垂直方向に共振する場合、光が活性層を横切る距離は極端に短くなってしまい、いわゆる光閉じ込め係数が小さくなる。この場合、モード利得を大きくすることができず、

しきい値電流密度の増大につながる。一方で、共振器内では光は定在波となって腹や節などの強度分布が生じているため、やみくもに活性層を厚くしても光強度が弱い領域に活性層が存在することになり実効的な光閉じ込め係数は大きくならない。そこで、活性層を二つ以上に分けて、光定在波の腹に活性層を周期的に配置する周期利得構造が提案されている[4]。窒化物半導体のように、電子と正孔の有効質量や拡散長が大きく異なる場合、活性層を二つに分けると各活性層への不均一な電子および正孔の注入が懸念される。我々は、二つの活性層間の40nm GaN中間層にMgを添加し、さらにその膜厚を調整することで、各活性層からの発光強度比が制御可能なことを見出した。しかしながら、面発光レーザへの応用を意識した場合、1kA/cm<sup>2</sup>以上の高い電流密度を使用することになる。そこで、Mg添加層の厚さが、0.8、1.6、4nmと異なる三種類の周期利得構造を有する素子の各活性層における注入キャリア密度バランスの電流密度依存性を評価した。ここでは、各活性層からの発光を区別するために、意図的に活性層の発光波長を410nmと450nmと異なる値にした。図6にその結果を示す。横軸は素子に注入した電流密度であり、縦軸は、450nmの発光ピーク強度と410nmの発光ピーク強度の比である。Mg添加層の厚さによって、発光強度比の値が制御できるだけでなく、幅広い電流密度範囲(500~3kA/cm<sup>2</sup>)において安定した発光強度比、すなわちキャリア注入比が実現できていることがわかった。これにより、このMg添加した中間層を含む周期利得構造が面発光レーザに適用できることが明確になった。

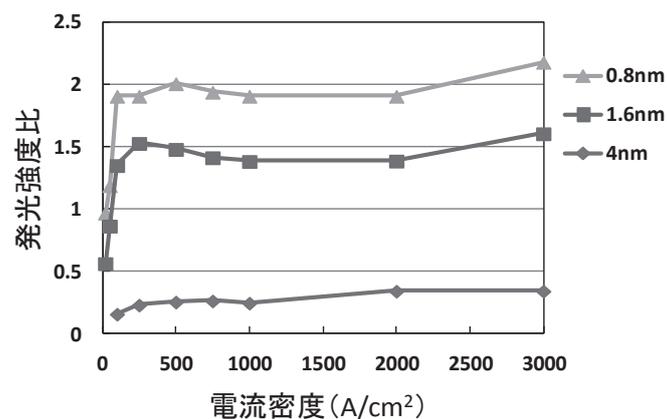


図6 周期利得活性層を有するLEDの発光強度比の電流密度依存性

### 2.3 微細LEDアレイ

LEDはその高出力化が要求され、年々素子の大型化が進行し、現在の高出力素子では1mm角以上のチップが作製されている。一方で、LEDはその母材が半導体であることから、シリコン集積回路作製技術を利用した微細加工が適用でき、白熱電球や蛍光灯などの従来の光源では不可能な新しい付加価値を有する光源が期待される。例えば、微細なLEDを多数個アレイ状に集積配置し、所望の箇所を発光させて、情報伝達機能を持たせた光源などである。すでに、LED光源を用いたプリンタでは、20um程度の赤外発光領域を有する微細LEDが1インチあたり600から1200個(600もしくは1200dpiに相当)配置した微細LEDアレイ光源が利用されている。このような微細LEDアレイは、従来のLEDに比べ、素子サイズが1000um角から10um角へ微細化すると同時に、素子数が1個から100~1000個へ大幅に増大し、個別駆動を可能にするための配線電極および絶縁層形成

に伴う素子作製工程の増大もあって、素子形成歩留りが大幅に低下する。これは、微細LEDに限らず、面発光レーザを集積させる場合でも同様の課題であり、青色面発光レーザアレイ実現に向けても対策が必要である。

我々は、アレイを構成する素子として、トンネル接合と半導体配線を含む新しい素子構造を提案し、それによる作製工数低減を実現した。この構造を用いると、トンネル接合により電極としてn型電極1回の蒸着工程で済むこと、半導体配線を積極利用することで、絶縁膜形成と交差する電極パターン形成の双方が必要なくなることから、工数を従来から半減できる。この手法により10×10チャンネルアレイを試作した。発光領域サイズは10×10 $\mu\text{m}^2$ であり、ピッチ間隔は25 $\mu\text{m}$ と狭い。図7に実際に全素子発光させた場合を示す。全素子が動作し、かつ発光強度も非常に均一であることがわかる。素子作製工程数が大幅に減ったことにより、歩留りや均一性の向上が実現したと考えられる。

さらに、応用例のひとつとして、7×25ドットのマイクロディスプレイを作製した。表示領域は150×600 $\mu\text{m}^2$ であり、文字通りマイクロサイズに収まっている。このマイクロディスプレイに「Meijo」と表示させた場合を図8に示す。このようなマイクロディスプレイを拡大投影すれば、小さな機器から大きな映像を楽しむことが可能になる。

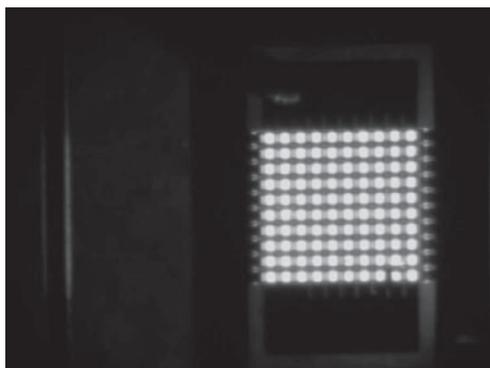


図7 10×10 チャンネル微細LEDアレイ。10  $\mu\text{m}$ 角の発光領域と 25  $\mu\text{m}$ 素子間隔を有する

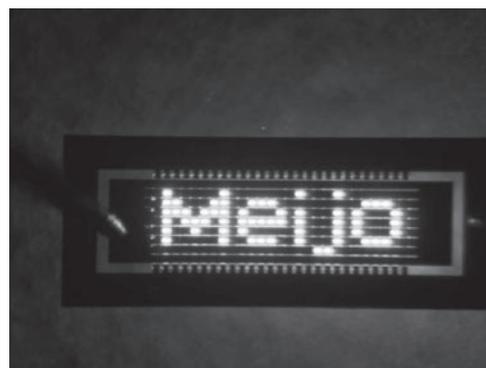


図8 7×25ドットマイクロディスプレイ「Meijo」と点灯表示

### 3. まとめ

本研究により、面発光レーザアレイ実現に向けた三つの重要な要素構造・技術が確立された。まず、非対称多層膜反射鏡構造を用いることで窒化物半導体による高反射多層膜反射鏡を実現した。続いて、光閉じ込め係数を大きくできる周期利得構造を作製し、面発光レーザ動作を可能にする高い電流密度において安定した均一電流注入が可能であることを見出した。さらに、トンネル接合を活用して歩留まりを大幅に高めた新しいアレイ素子構造を実現した。今後は、これら三つの成果を組み合わせることで青色面発光レーザアレイを実現したい。

### 参考文献

- [1] 市光工業ニュースリリース <http://www.ichikoh.com/common/pdf/news/100830.pdf>
- [2] G. S. Huang, T. C. Lu, H. H. Yao, H. C. Kuo, and S. C. Wang, Chih-Wei Lin and Li Chang, Appl. Phys. Lett. 88 (2006) 061904.

- [3] K. Yagi, M. Kaga, K. Yamashita, K. Takeda, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki, *Jap. J. Appl. Phys.* 51 (2012) 051001.
- [4] S. W. Corzine, R. S. Geels, J. W. Scott, R. H. Yan, L. A. Coldren, *IEEE. J. of Quant. Electron.* 25(1989) 1513.

