

深紫外 AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザー光の 光学的異方特性

川西 英雄・瀬沼 正憲・貫井 猛晶

Optical Anisotropic Characteristics of Deep-Ultraviolet AlGaN Multiple-Quantum-Well Lasers

Hideo KAWANISHI, Masanori SENUMA and Takeaki NUKUI

End of October 1993, room temperature deep-UV lasing was demonstrated at around 240 nm by AlGaN multiple-quantum-well laser under optical pumping, for the first time. The unique optical anisotropic polarization of laser output was discovered in the AlGaN MQW lasers lasing shorter than 280-290 nm. The anisotropic polarization is the reflection of an anisotropic dipole moment, which directly related in laser gain, in the AlGaN active layer with high Al content.

Key words: deep-UV laser, AlGaN MQW, optical polarization, TE and TM modes, anisotropic polarization

2003年10月の末, AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザーで, 深紫外波長域 240 nm 近傍での室温レーザー発振をはじめて実現した¹⁾. その大きな理由のひとつは, 「交互供給法」とよぶ高品質な AlGaN のエピタキシャル成長の新技術が提案されたことによる²⁾. その方法を, 「ASFE 法」(alternate source-feeding epitaxy) とよんでいる.

もうひとつの理由は, 常識にとらわれず研究を進めてきたからではないだろうか. すなわち, 発光波長が約 280~290 nm 以下で発光する AlGaN エピタキシャル層では, 表面 (*c* 面) 側からの発光はほとんど観測されなかった. しかし, その試料を励起し, レーザー発振の可能性を確かめたからである.

このことは, AlGaN 活性領域における発光過程が「非等方的」であるとすると容易に理解できる. すなわち, 新しい「謎」が生まれたのである.

その「謎」を解明すべく, 深紫外域での AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザーの光学的偏波特性など, 最近筆者らが行った研究成果の一部をここで紹介したい. なお, ここでの研究成果は, 深紫外域発光デバイスの高効率化にも直接関係する可能性があり, この分野の研究者の皆さんに興味をもっていただけると幸いである.

1. AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザーの構造

深紫外域でレーザー発振が得られた AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザーの断面構造を図 1 に示す³⁾. (0001) 面 SiC 基板 (すなわち *c* 面基板) を用いている.

特に, 発光過程に直接影響を与える可能性のある結晶の品質は, X 線回折により, *c* 軸のティルト角の変位および *c* 軸を中心とした結晶のツイスト角の変位をそれぞれ, ω および ϕ に関する XRC (X 線ロッキングカーブ) 半値幅で評価した. ω と ϕ には高品質領域で強い相関があることもわかり, ω スキャン特性を改善することで, ϕ スキャン特性も改善した. 現在, 最も狭いもので $\Delta\omega=78$ arcsec および $\Delta\phi=800$ arcsec となった. すなわち, 今後さらなる改善も必要であるが, 半導体レーザーを構成する AlGaN エピタキシャル層は *c* 軸に強く配向し, その品質は現時点で得られている最も高品質な AlGaN 結晶であろう.

2. 深紫外レーザー光の光学的偏波特性

AlGaN 多重量子井戸型半導体レーザーの, ① 表面発光および, ② 端面発光の偏波特性は, 図 2 に示した光学系で測定した. 試料は固定したまま, 光学系を簡単に変更することによって, 表面発光および端面発光が測定できるよう工夫している. 励起光源には ArF エキシマーレーザーの 193 nm の発振線を用い, 励起光強度は, 直列に並べた

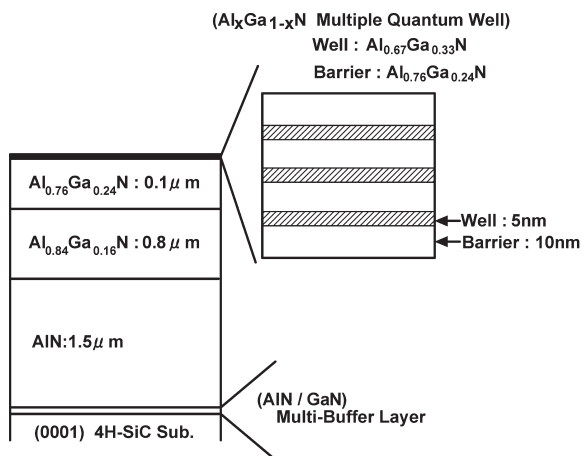


図1 深紫外 AlGaIn 多重量子井戸型半導体レーザーの断面構造。このときの各層の Al 組成は、発振波長が 240.8 nm の場合の例を示している。

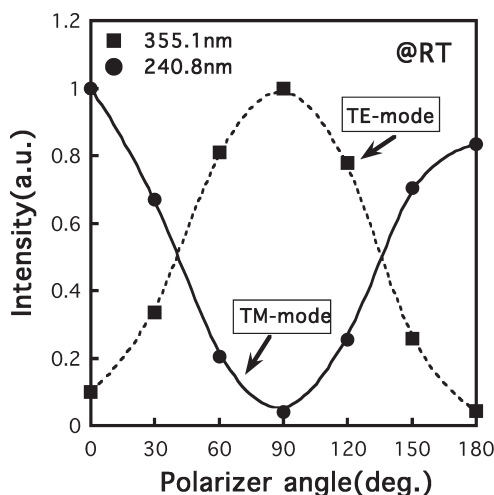


図3 発振波長が、355.1 nm および 240.8 nm の代表的な 2 種類の紫外および深紫外 AlGaIn 多重量子井戸型半導体レーザーからの出力光の偏波特性 (室温)。横軸の偏光角は 0° および 180° で、結晶の *c* 軸方向に一致。

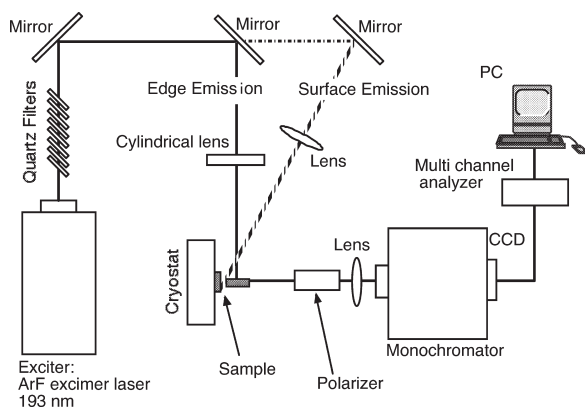


図2 偏波面特性を測定するための光学系。表面発光特性では、励起光は斜め入射。一方、端面発光およびレーザー発振特性の測定では、垂直入射。

石英板の枚数を変えて変化させた。なお、偏波特性の測定では、深紫外域を含む 190~400 nm の波長域で有効なグラン・ティラー型偏光器を利用し、その特性は、300 nm 以上の波長域で有効な通常型の平板型偏光板と、355 nm 域のレーザー発振光とで精密に注意深く校正した。

図3は、組成の異なる2種類の AlGaIn 多重量子井戸型半導体レーザーで得た紫外域レーザー光 (発振波長: 355.1 nm)、および深紫外域レーザー光 (発振波長: 240.8 nm) の偏波特性をまとめたものである (いずれも室温)。測定結果は、紫外域レーザー光は TE モードで発振しているのに対し、深紫外域レーザー光は TM モードで発振している。TE モードでのレーザー発振は、GaAs 系、InP 系などの半導体レーザーでよく知られている通りである。すなわち、発光強度およびレーザー利得は等方的であり、TE モードに対する等価屈折率 (伝搬定数を真空の波数で除し

たもので、屈折率の分散項は含まれていない) が、TM モードのそれに比べわずかに大きいため、TE モードに対する端面の「モード反射率」がわずかに大きくなる。すなわち、閾値利得の面から、レーザー発振モードの選択が起こっている。なお、このときの表面発光強度の異方性はほとんど観測できなかった。

一方、深紫外域 AlGaIn では、発光特性および利得は非等方的であり、TE モード方向の利得はないか、あるにしてもきわめて小さく、TM モードに対するレーザー利得のみしか確保されない。その結果、深紫外域 AlGaIn では、レーザー利得の面から、TM モードでのレーザー発振モードの選択が起こっている。

このことは、図4に示した測定結果のように、2種類の試料で、表面からの自然放出光強度が大きく違うことで明らかになる⁴⁾。図4は、AlGaIn 多重量子井戸型半導体レーザーのそれぞれの試料を変えることなく、図3の測定の励起強度を下げ (レーザー発振をしない励起強度) 測定した。ただし、励起強度は、それぞれの試料での測定でほぼ同じとした。その結果、AlGaIn の *c* 軸方向から検出した深紫外域の表面発光強度 (波長、約 240.8 nm) は、極端に微弱であった。他方、紫外域の自然放出発光強度 (波長、約 355.1 nm) では、表面発光強度は端面発光強度に比べ、逆転し、約 1 桁強かった⁴⁾。

この実験事実から、以下のことが推定できる。すなわち、Al 組成の大きな AlGaIn 活性層内には、深紫外域の発光にかかわる「電気双極子モーメント」が *c* 軸方向に偏っているため、*c* 軸方向への光の放出が観測できない、

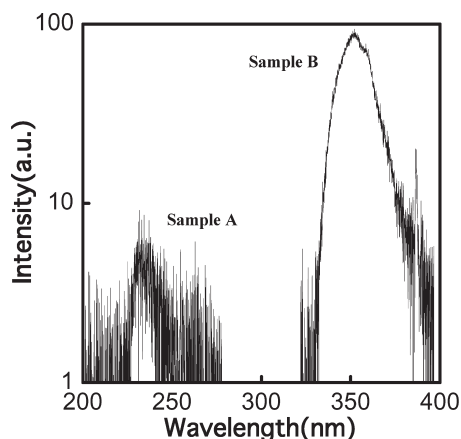


図4 図3の測定に用いた2種類の試料の表面発光強度。励起強度を上げたとき Sample A および B は、それぞれ 240.8 nm および 355.1 nm でレーザー発振した。

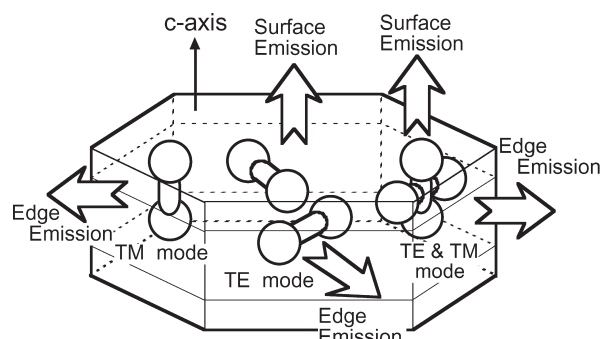


図5 AlGaIn 活性層内に形成される「電気双極子モーメント (光の周波数に対応)」の概念図。この「電気双極子モーメント」が c 軸に平行にのみ形成されるとき、表面発光不可能か、きわめて微弱 (観測系の開口数による) となる。一方、 c 軸に垂直な方向 (c 面内) に形成される場合、表面発光は観測可能。なお、端面発光は、いずれの場合も観測可能。

と古典的に考えるのが妥当である。

上に示した2つの実験事実を理解しやすくするために、図5に、紫外域および深紫外域で発光する AlGaIn に関する「電気双極子モーメント」の形成方位と発光強度との関係をまとめてみた。

紫外域発光の AlGaIn 量子井戸型半導体レーザーでは、「電気双極子モーメント」は、 c 面内に等方的に形成されるとともに、それと垂直な c 軸方向にも形成されている。その結果、TE モードおよび TM モードいずれの場合にも、レーザー利得が確保されている。一方、深紫外域発光の AlGaIn 量子井戸型半導体レーザーでは、「電気双極子モーメント」は、 c 軸方向に偏り形成されるために、TM モードに対するレーザー利得のみしか確保できない。

以上述べた実験結果に対する筆者らの主張は、別の測定結果からも確認できている。ページ数の関係で割愛するが、端面からの自然放光の偏波面依存性を測定することで明らかになった⁴⁾。このような現象が顕著に表れるのが、発光波長として 280~290 nm 以下の波長域である。AlGaIn の Al の組成にして約 40% のあたりからであった。

GaN および AlN のバンド構造が、第一原理計算によりすでに求められている。バンド構造に関する詳しい議論は参考文献を参照願いたい⁵⁾。結論として、筆者らの実験結果は、この理論計算と、紫外域に発光波長を有する GaN においても、その光学的偏波特性とともに、それぞれのバンドのエネルギー差においても、いずれも一致しないようである。ここでは、問題点を指摘するだけにとどめておく。より詳しい議論は、今後の皆さんの精密な測定と、実験・理論両面からの詳細な検討に任せるとする。

3. 深紫外 AlGaIn 多重量子井戸半導体レーザーの今後 に期待すること

深紫外域で動作する半導体レーザーの実現は、ひとつの技術的な夢である。このとき、常識にとらわれることなく、この分野の研究を進めることがきわめて重要ではないか、そのような体験をしたように思う。また、電流注入ではなく、光励起でレーザー発振を試みる、そんな実験・研究は決してしないだろう。それを愚直に試みたことで、常識では理解できない実験結果が、突然現れてきた。たくさんの「謎」が出現したことになる。

ここでの議論は、より詳細な追跡と、今後の詳細な考察が必要であろう。この分野の研究に興味をもつ研究者・技術者の人たちにそれを委ねたい。

本研究は、文部科学省・科学研究補助金、基盤研究 (S) (課題番号: 17106005) として実施しているものである。研究を進める機会を与えていただいたことに感謝する。また、日ごろから貴重な議論をいただいている、本学・特別専任教授・長谷川文夫教授、また、結晶内の歪み解析と、AlN・AlGaIn 結晶の高品質化を手伝っていただいている本学・新倉栄一郎君および村川浩一君に感謝する。

文 献

- 1) T. Takano *et al.*: Appl. Phys. Lett., **84** (2004) 3567-3569.
- 2) T. Takano *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) L1258-L1260.
- 3) 川西英雄ほか: 応用物理, **74** (2005) 1458-1462.
- 4) H. Kawanishi *et al.*: "Anisotropic polarization characteristics of lasing and spontaneous surface and edge emissions from deep-UV AlGaIn MQW lasers," submitted.
- 5) M. Suzuki *et al.*: Phys. Rev. B, **52** (1995) 8132-8139.

(2005年1月12日受理)