

面発光レーザーからの第二高調波の発生

金子 泰久*・D. E. MARS**・中川 茂*・市村 好克*・山田 範秀*

ワイドギャップ半導体を用いた半導体レーザーの開発が活発に行われており、窒化物半導体レーザーで3,000時間以上の連続発振が報告されている¹⁾。第二高調波発生(second harmonic generation: SHG)を用いた緑・青色・紫外領域の発光素子の開発も進められており、半導体レーザーパッケージと同等の大きさのSHG素子も実現している²⁾。本報告では、最近提案されている第二高調波発生を用いた青色垂直共振器型面発光レーザー(以下ではSHG-VCSELと呼ぶ)について報告する³⁻⁶⁾。

1. SHG-VCSELの特徴

SHGは結晶中を伝搬する光が2次の非線形光学効果によって半分の波長に変換される現象を利用している。SHG-VCSELは、垂直共振器型面発光レーザー⁷⁾(VCSEL)内で、レーザー発振している光を基本波とし、第二高調波(SH光)を発生させて得られる短波長光を取り出すモノリシックな短波長発光素子である。SHG-VCSELの素子構造の概略図を図1に示す。基本的にはVCSELと同様の構造をしているが、共振器内に効率的にSH光を発生させるため、2次の光学非線形性をもつ物質で構成された層(SHG層)が付加されている。

SHG-VCSELの特徴としては以下のことがあげられる。VCSELを構成する反射鏡は非常に高い反射率をもっている(>99%)ことから、内部での基本波光強度はきわめて高い。このことはSH光の強度が基本波の強度の2乗に比例することからSHGにとって有利である。VCSELを構成するIII-V族半導体は、高い2次の光学非線形性をもつので、エピタキシャル成長によりSHG層の導入が容易である。ただし結晶性の対称性から実効的にゼロでない非線形係数を得るためには、(100)以外の面方位を使用する必要がある。最も高い非線形係数が得られる面方位は(211)、(011)面である³⁾。変換効率を上げるためにSHG層には非線形係数の異なる多層膜による擬位相整合(quasi phase matching: QPM)が用いられる。

2. 青色 InGaAs/GaAs SHG-VCSEL の特性

筆者らはSHG-VCSELを実現するために、(311)B^{4,5)}、(411)A⁶⁾ GaAs基板上に製作している。理想的には(211)か(011)面上に成長することが重要であるが、それらの面

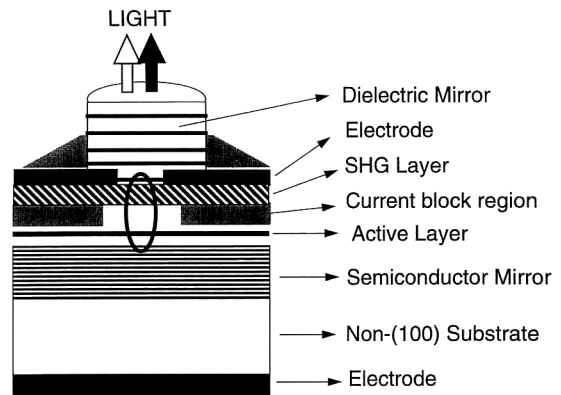


図1 SHG-VCSELの概略図。

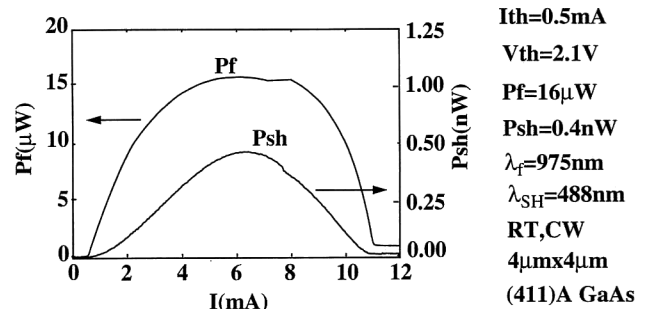


図2 MBE法により(411)A上に製作したSHG-VCSELの基本光, SH光の電流-光出力特性。

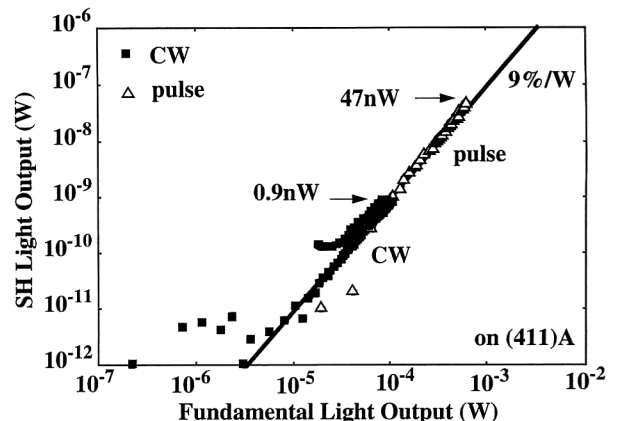


図3 CW, パルス動作時の基本光に対するSH光特性。

* Hewlett-Packard 研究所 (〒213-0012 川崎市高津区坂戸 3-2-2)

** Hewlett-Packard 研究所 (P. O. Box 10350, Palo Alto, CA 94303, USA)
E-mail: kaneko@jp.hpl.hp.com

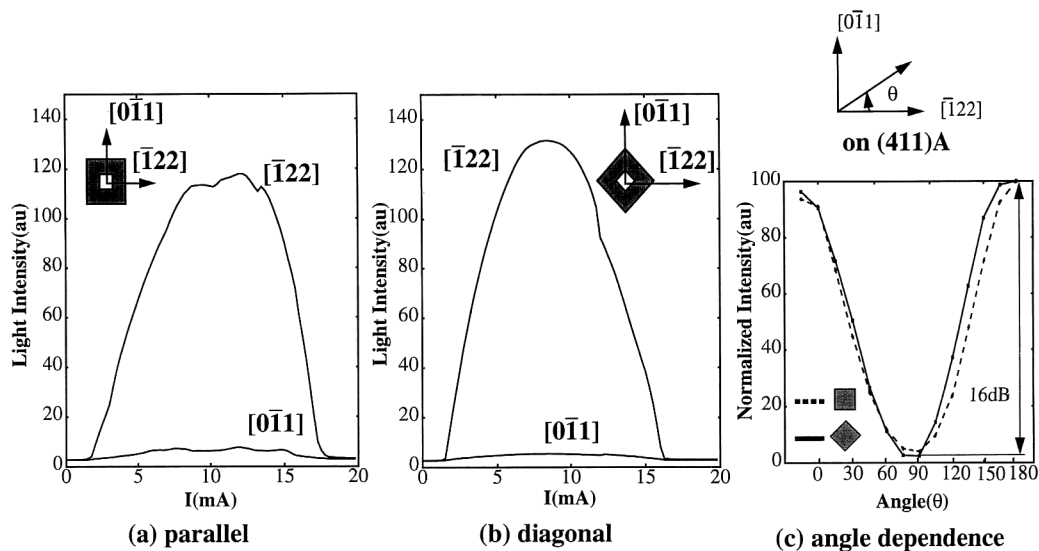


図4 (411)A上SHG-VCSELにおける偏波面特性。(a) $[\bar{1}22]$ 方向に平行なメサの場合、(b) $[\bar{1}22]$ 方向から45°傾けたメサの場合、(c) 光出力の偏波角度依存性。

上への結晶成長は難しいため、それより(100)面方向に傾けた(311)B、(411)A面上に成長している。(311)面のほうが(411)面に比べて非線形定数は大きい、(311)B面上においても十分な結晶性(特に活性層)を得ることができなかった。(411)A面上では高品質な結晶を得ることができ、それにより(311)B面よりも(411)A面上において良好な特性が得られている。

SHG-VCSELの下部ミラーにはn-GaAs/AlAs多層膜、活性層はInGaAs歪み量子井戸、SHG層としてはGaAs単層、上部ミラーにはSiO₂/TiO₂多層膜を用いている。電流狭窄には選択酸化を用いている。

図2にMBE(molecular beam epitaxy)法で(411)A基板上に製作したSHG-VCSELの室温、CW(continuous wave)での電流に対する基本光 P_f およびSH光 P_{sh} 出力特性を示す⁹⁾。4×4μm²の発光領域において閾値電流0.5mA、SH光出力0.4nWが得られた。このSH光は裸眼でも観測でき、青色光が確認できた。基本光の波長は975nmであり、SH光の波長は488nmになる。

図3にはCW、パルス動作での基本光とSH光出力の関係を示している。得られたSH光出力は基本光の2乗に比例している。このことは観測された青色光がSHGによるものであることを証明している。CW動作で最大0.9nW、パルス動作で47nWの光出力が得られた。変換効率は9%/Wであった。将来的にはQPM-SHG層を導入することでSH光出力の改善が期待できる。

傾斜基板上でのVCSELは偏波面の安定化が可能である。これは傾斜基板上での光学利得が面内異方性をもつためである⁹⁾。通常の(100)面上においては偏波面方向はメ

サ形状に影響することが報告されている⁹⁾。(411)A面上においてメサの方向を光学利得から決まる偏波面方向((411)Aの場合 $[\bar{1}22]$ 方向)からずらしてやることで、偏波面の安定化がどちらに強く影響するかを調べた。図4にメサが $[\bar{1}22]$ 方向に、(a)平行な場合と、(b)45°ずらした場合の偏波面特性を示す。どちらにおいても偏波面方向は $[\bar{1}22]$ 方向に向いていることから、光学利得の異方性が偏波面安定化に効いていることがわかった。したがってVCSEL単体においても傾斜基板上へ製作することで偏波面安定化が図れることが確認された。

SHG-VCSELによる青色面発光レーザーを実現した。(411)A基板上において50nWの青色SH光、1mAを切る閾値電流と、メサ形状に依存しない安定な偏波特性が確認された。筆者らの計算においてはQPM-SHG層を導入することでサブミリワットからミリワットオーダーのSH光出力が期待できる。

文 献

- 1) S. Nakamura, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) L1568.
- 2) 日経エレクトロニクス, No. 708 (1998) 117.
- 3) N. Yamada, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 2659.
- 4) Y. Kaneko, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 805.
- 5) N. Yamada, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **68** (1996) 1895.
- 6) 金子泰久, ほか: 1997年秋季応用物理学会, 3a-ZC-2 (1997).
- 7) K. Iga, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 348.
- 8) T. Ohtoshi, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 1886.
- 9) T. Yoshikawa, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 1573.

(1998年5月28日受理)