

最近の技術から

ZnMgSSe 系 II-VI 半導体レーザー

石橋 晃*・伊藤 哲*・奥山 浩之*・大畑 豊治*・中山 典一*
中野 一志*・小沢 正文*・池田 昌夫*・秋本 克洋**・森 芳文*

* ソニー(株)中央研究所 〒240 横浜市保土ヶ谷区藤塚町 174

** 筑波大学物質工学系 〒305 つくば市天王台 1-1-1

1. ま え が き

Haase らが ZnCdSe 活性層を用いて世界最初の blue-green レーザー発振を報告し¹⁾, 現在多くの研究機関が II-VI 半導体 LD に取り組んでいる. より短波長の ZnCdSe, あるいは ZnSe を活性層とするには, クラッド層のバンドギャップ (E_g) が約 2.9 eV より大きく, キャリアを効率よく閉じ込めることが求められるが, ZnSe, ZnS, ZnTe, CdS などからなる既存の II-VI 系ではこれを達成することが難しい. 例えば, ZnSTe はエネルギーギャップのボウイングが激しく, また ZnCdS は ZnSe に対しタイプ II のバンド構造となってしまう, ともにクラッド層として用いることができない. われわれは, (100)GaAs 基板に格子整合し, 約 4.5 eV まで大きくバンドギャップを制御でき, かつ ZnSe に対してタイプ I のバンド構造を持つ材料として, ZnMgSSe 系を見だし, この ZnMgSSe をクラッド層に用い波長 498.5 nm で室温パルス発振に成功した²⁾. 本稿では, われわれの取り組んできた青色レーザーについてまとめる.

2. ZnMgSSe 混晶

GaAs (格子定数: $a=5.66$ Å) 基板に格子整合するワイドギャップ II-VI 半導体を得るにあたって ZnS がヒントとなる. すなわち ZnS は $a\sim 5.4$ Å, $E_g\sim 3.8$ eV (@77 K) であるので GaAs に格子整合するには, 格子定数が 5.66 Å より大きく, かつ S または Se と結合してワイドギャップ II-VI 半導体となる II 族元素を探して ZnSSe との混晶にすればよいと予測される. ここで II 族元素を探すのは, 伝導帯はカチオン (今の場合 II 族) の s-軌道, 価電子帯はアニオン (同 VI 族) の p-軌道おともに構成されているので, 電子を閉じ込めるべく伝導帯を歪調するには II 族元素を混入させる必要があるからである (実際単なる ZnSe/ZnSSe 系ではバンド不連続はほとんど価電子帯側にあり, 電子は閉じ込められない).

一般に, 最外殻軌道間のエネルギー差が大きいため周期律表の上段側の元素からなる化合物ほどワイドギャップを有するので, ZnSe よりワイドギャップとすべく混ぜるべき元素は周期律表の 3 段目までの II 族元素である (要請 a). 他方, 原子半径が大きくなるのは, 電子軌道の数が増える周期律表の下段側であり (傾向 1), 同一段では, 中心原子の陽電荷が小さい周期律表の向かって左側 (族数の若いほう) である (傾向 2). したがって ZnSe より格子定数を大きくすべく混ぜるべき元素は周期律表の 5 段目以降の向かって左下の元素である (要請 b). 要請 a と要請 b とは相矛盾するので, 一見目的の II 族元素を得るのは不可能に思えるが, 周期律表の下段側ほど傾向 2 が弱まる (傾向 3) おかげで, 族数の若いほうで共有結合半径の逆転が生じる場合が存在するのである. Ib 族でいえば Ag と Au で, II 族でいえば Zn と Mg でこの逆転が生じている³⁾. この逆転を利用すると, GaAs に格子整合しつつ約 4.5 eV までのエネルギー領域が, ZnMgSSe 混晶でカバーできる⁴⁾. さらに, Harrison の LCAO モデルを用いると ZnSe/ZnMgSSe 系はタイプ I のバンド構造であることが示される⁴⁾. 屈折率についても ZnMgSSe 混晶は ZnSe より小さい⁵⁾ため, キャリア, 光子ともに閉じ込めは十分できると予測される.

3. ZnMgSSe 系レーザー

ZnSe/ZnMgSSe DH 構造に対する光励起実験で, 500 K まで発振することを確認した⁶⁾. これは, われわれの理論的予測が正しかったことを示し, さらに ZnMgSSe の熱的安定性をも示唆している. さて電流注入モードでの発振のためにはドーピングが必要であるが, n-タイプ, p-タイプともに ZnMgSSe に対して十分行うことができる⁷⁾. そこで, ZnSe/ZnMgSSe DH/MQW 構造の LD を作製し 77 K で閾値電流密度 225 A/cm², 発振波長 447 nm で連続発振を確認した⁷⁾. より高温での

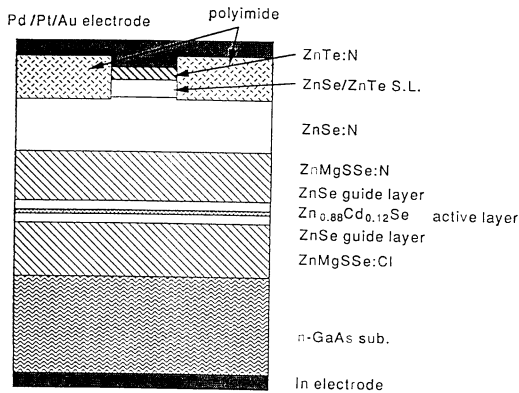


図 1 レーザー構造

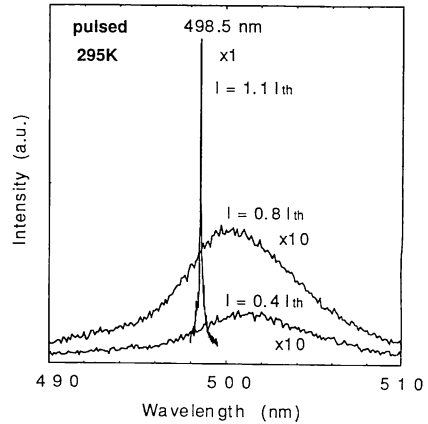


図 3 発振スペクトル

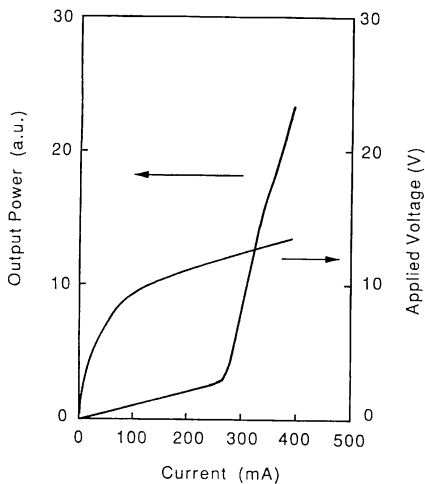


図 2 $L-I$ 特性, $I-V$ 特性

発振を達成するには、動作電圧を抑えることが必要である。現状では、電圧降下の大部分は p-コンタクト部で生じている。そこでわれわれは電極金属を改善し⁸⁾、またホールに対しての ZnSe/ZnTe 共鳴トンネリング構造を p-ZnSe と p-メタルの間に挿入して擬似オーミック性を得た⁹⁾。さらに ZnCdSe/ZnSe/ZnMgSSe 系 SCH (separate confinement hetero) 構造を採用し、理論計算によりそのレーザーダイオード構造を最適化した²⁾。その構造を図 1 に示す。光出力と直流電流の関係を図 2 に示す。ZnSe/ZnTe 共鳴トンネリング構造により、初期の青緑色レーザーの動作電圧 20V¹⁾~30V に比べおよそ半分の約 12V にまでしきい電圧を下げる事ができた。閾値電流は $I_{th}=280$ mA、閾値電流密度は $J_{th}=2.8$ KA/cm² で発振が確認された²⁾。図 3 は発光スペクトルである。波長 498.5 nm で室温パルス発振を達成し

ている。

4. む す び

ZnMgSSe は GaAs に格子整合し ZnSe に対しタイプ I のバンド構造を保ちつつエネルギーギャップを 4.5 eV 近くまでとることができる。これをクラッド層に用いたレーザー素子で波長 498.5 nm の室温パルス発振を確認した。青色レーザー室温連続発振に向けて、p 側オーミック電極の更なる向上と、p ドーピング濃度向上が重要である。

文 献

- 1) M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt and H. Cheng: Appl. Phys. Lett., **59** (1991) 1272.
- 2) S. Itoh, H. Okuyama, S. Matsumoto, N. Nakayama, T. Ohata, T. Miyajima, A. Ishibashi and K. Akimoto: Electron. Lett., **29** (1993) 766.
- 3) L. Pauling: *The Nature of the Chemical Bond* (Cornell Univ. Press, Ithaca, NY, 1960) p. 246.
- 4) H. Okuyama, K. Nakano, T. Miyajima and K. Akimoto: J. Cryst. Growth, **117** (1992) 139.
- 5) 浮田昌一, 石橋 晃, 奥山浩之, 秋本克洋: 1993 春季応用物理学会, 30 pA 2.
- 6) H. Okuyama, Y. Morinaga and K. Akimoto: 7th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy, Schwabisch Gmund, Germany, 1992, TuP 2.
- 7) H. Okuyama, T. Miyajima, Y. Morinaga, F. Hiei, M. Ozawa and K. Akimoto: Electron. Lett., **28** (1992) 1798.
- 8) M. Ozawa, F. Hiei, A. Ishibashi and K. Akimoto: Electron. Lett., **29** (1993) 503.
- 9) F. Hiei, M. Ikeda, M. Ozawa, T. Miyajima, A. Ishibashi and K. Akimoto: Electron. Lett., **29** (1993) 878.

(1993 年 6 月 30 日受理)