分子線エピタキシャル成長 InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの発光特性*

中川 智克*¹・河村 裕一*^{1,2}・井上 直久*¹

Electroluminescence Properties of InGaAsSbN Quantum Well Diodes Grown by Molecular Beam Epitaxy

Tomokatsu NAKAGAWA*¹, Yuichi KAWAMURA*^{1,2} and Naohisa INOUE*¹^{*1}Research Institute for Advanced Science and Technology, Osaka Prefecture University,
1-2 Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8570, Japan^{*2}CREST, Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi Center Building,
4-1-8, Hon-cho, Kawaguchi-shi, Saitama 332-0012, Japan

(Received October 28, 2004, Accepted January 8, 2005)

InGaAsSbN quantum well diodes on GaAs substrates and InP substrates were grown by molecular beam epitaxy (MBE) and their electroluminescence properties were studied. It was found that a marked carrier localization effect was observed at low temperature for the InGaAsSbN quantum well diodes on GaAs, while not for the diode on InP. This might be related to the high In composition in the latter structure.

1. はじめに

近年、窒素 (N) 原子を微量に含む InGaAsN や InGaAsSbN 半導体混晶は、赤外発光デバイスの材料として注目を集めている。これは微量の N の導入により顕著なバンドギャップの減少が得られ、発光波長の長波長化が容易に得られるという利点があるためである。これらの材料は強い非混和性のため、従来結晶成長が困難であったが、分子線成長法 (MBE) や有機金属気相成長法 (MOVPE) など、非平衡度の高い結晶成長技術の発達により、最近ではデバイスレベルの結晶成長が可能となって来ている。実際、GaAs 基板上の InGaAsN や InGaAsSbN を用いることにより波長 1.3–1.5 μm 帯光通信用レーザが実現されている¹⁻³。また In 組成を多くした InP 基板上的 InGaAsN や InGaAsSbN では環境計測やガス分析などで有用な波長 2 μm 帯のレーザが実現されている^{4,5}。本報告では、波長 1.3 μm 帯の GaAs 基板上的 InGaAsSbN 量子井戸ダイオードと波長 2 μm 帯の InGaAsSbN 量子井戸ダイオードを作製し、発光特性の比較を行ったので報告する。

2. 実験

InGaAsSbN 量子井戸ダイオードは n 型 (100) GaAs 基板、及び n 型 (100) InP 基板に分子線結晶成長法 (MBE) により作製した。In, Ga, Al, Sb, As には固体ソースを用い、N ソースとしては ECR ラジカル源を用いた。成長中の真空度はおおよそ 6×10^{-3} Pa (N 流量 0.7 sccm) である。排気系には液体窒素コールドトラップ付きのディフュージョン・ポンプを使用している。波長 1.3 μm 帯の GaAs 基板上的素子は、下部 n 型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層、下部 GaAs 光ガイド層、InGaAsSbN / $\text{GaAs}_{0.984}\text{N}_{0.014}$ 2 重量子井戸発光層、上部

GaAs 光ガイド層、上部 p 型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層、p 型 GaAs 電極層を順次積層した構造となっている。InGaAsSbN 量子井戸層の組成は $\text{In}=0.15$, $\text{Ga}=0.85$, $\text{As}=0.846$, $\text{Sb}=0.14$, $\text{N}=0.014$ である。量子井戸発光層の成長温度は 505 $^{\circ}\text{C}$ 、他の層の成長温度は 600 $^{\circ}\text{C}$ とした。他方、波長 2 μm 帯の InP 基板上的素子は、下部 n 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ クラッド層、下部 $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.39}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ 光ガイド層、InGaAsSbN / $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.39}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ 2 重量子井戸発光層、上部 $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.39}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ 光ガイド層、上部 p 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ クラッド層、p 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 電極層を順次積層した構造となっている。量子井戸発光層以外は InP 基板に格子整合している。InGaAsSbN 量子井戸層の組成は $\text{In}=0.80$, $\text{Ga}=0.20$ であり、As, Sb, N については GaAs 基板上的量子井戸と同じ組成である。成長温度はすべての層で 505 $^{\circ}\text{C}$ とした。素子は p 側に幅 100 μm のストライプ電極を形成し、n 側は全面電極を形成した。素子長は約 400 μm である。

3. 結果と考察

まず GaAs 基板上的 InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの結果を示す。Fig. 1 に GaAs 基板上的 InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの EL スペクトル (20 K と 300 K) を示す。EL は長波長帯のフォトマルで検出している。300 K での発光波長は 1.24 μm 、20 K での発光波長は 1.1 μm となっている。Fig. 2 にピークエネルギー及びスペクトル半値幅 (FWHM) の温度依存性を示す。ピークエネルギーは温度とともに単調に減少するのではなく、100 K 付近にショルダー構造が観測されることが分かる。同様の現象は GaAs 基板上的 InGaAsN 層においても報告されている^{6,7}。このピークエネルギーの温度依存性の異常は、N 導入により結晶中に形成された局在準位に捕獲された電子が、温度上昇にともない伝導帯に活性化されることに起因していると考えられる。Pinault 等は InGaAs、及び GaAsN ではピークエネルギーの温度依存性に異常が観測されず、InGaAsN でのみ異常が観測されることから、この局在準位の形成には N のみでなく、

* 平成16年10月28日 第45回真空に関する連合講演会で発表

*¹ 大阪府立大学 先端科学研究所 (〒599-8570 大阪府堺市学園町 1-2)*² CREST-JST (〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

Fig. 1 EL spectra of the InGaAsSbN quantum well diode on GaAs at 20 K and 300 K.

Fig. 3 EL spectra of the InGaAsSbN quantum well diode on InP at 20 K and 300 K.

Fig. 2 Temperature dependence of the peak energy and FWHM of the EL spectrum for the InGaAsSbN quantum well diode on GaAs.

Fig. 4 Temperature dependence of the peak energy and FWHM of the EL spectrum for the InGaAsSbN quantum well diode on InP.

In と N の両方が関与している可能性を述べている⁷⁾。また同図における FWHM の温度依存性を見ると、10 K では 54 meV、300 K では 79 meV と比較的広がっている。図から明らかなように、ピークエネルギーの温度依存性におけるショルダ構造に対応して 100 K 付近で半値幅が増大していることがわかる。これは局在準位からの発光とバンド端発光がこの温度領域で同程度となるため、それぞれのスペクトルが重なるために半値幅の増大が生じているものと考えられる。

次に InP 基板上の InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの結果について示す。Fig. 3 に InP 基板上の InGaAsSbN 量子井戸ダイオードの EL スペクトル (20 K と 300 K) を示す。EL は InSb で検出している。300 K での発光波長は $2.43 \mu\text{m}$ 、20 K での発光波長は $2.2 \mu\text{m}$ となっている。Fig. 4 にピークエネルギー及び FWHM の温度依存性を示す。GaAs 基板上の InGaAsSbN の場合と異なり、ピークエネルギーは温度とともに単調に減少しておりショルダ構造は観測されていない。また、同図における半値幅の温度依存性を見ると、10 K では 28 meV、300 K では 48 meV と比較的狭くなっており、Fig. 2 に示した GaAs 基板上の場合と異なり、温度上昇

とともに単調に増加していることがわかる。

以上の結果は、In が少ない場合には局在準位が形成されるのに対し、In が多い場合は局在順位が形成されないことを示唆している。この局在準位の形成メカニズムについては現在検討中であるが、ひとつの可能性として、N 原子の導入によって引き起こされる In 原子の不均一性が考えられる。In が少ない場合は N 原子の影響によって、In の組成揺らぎが顕著になるのではないかと考えられる。

4. 結 論

分子線エピタキシー法により波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の GaAs 基板上の InGaAsSbN 量子井戸ダイオード、及び波長 $2 \mu\text{m}$ 帯の InGaAsSbN 量子井戸ダイオードを作製し、エレクトロルミネッセンス特性の比較を行った。その結果、GaAs 基板上のダイオードにおいては局在準位が形成され、それによる発光ピークエネルギーおよび半値幅の温度依存性に異常が観測されるのに対し、InP 基板上のダイオードにおいては局在準位が形成されていないことが明らかとなった。

〔文 献〕

- 1) K. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki and Y. Yazawa: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 1273.
- 2) H. Shimizu, K. Kumada, S. Uchiyama and A. Kasukawa: IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., **7** (2001) 355.
- 3) S. R. Bank, M. A. Wistery, H. B. Yuen, L. L. Goddard, W. Ha and J. S. Harris Jr.: Electron. Lett., **39** (2003) 1445.
- 4) J. Wagner, D. Serries, K. Kohler, P. Ganser, M. Maier, L. Kirste and R. Kiefer: Proc. 16th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials, (IEEE, NJ, 2004) 32.
- 5) Y. Kawamura, T. Nakagawa and N. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) L1320.
- 6) L. Grenouillet, C. Bru-Chevallier, G. Guillot, P. Gilet, P. Duvaut, C. Vannuffel, A. Million and A. Chenevas-Paule: Appl. Phys. Lett., **76** (2000) 2241.
- 7) M.-A. Pinault and E. Toumie: Appl. Phys. Lett., **78** (2001) 1562.