

量子井戸型近赤外フォトダイオード開発

稲田博史*・三浦広平・森大樹
永井陽一・猪口康博・河村裕一

Low Dark Current SWIR Photodiode with InGaAs/GaAsSb Type II Quantum Wells Grown on InP Substrate — by Hiroshi Inada, Kouhei Miura, Hiroki Mori, Youichi Nagai, Yasuhiro Iguchi and Yuichi Kawamura — We have developed a PIN photodiode with a type-II quantum well structure, which can operate in a short wavelength region up to $2.5\mu\text{m}$. This photodiode will make uncooled operation possible. The absorption layer consisting of 250 pair-InGaAs(5nm)/GaAsSb(5nm) quantum well structures was grown on InP substrates by solid source molecular beam epitaxy (MBE). The p-n junctions were formed in the absorption layer by the selective diffusion of zinc. Dark current density was $0.92\text{mA}/\text{cm}^2$, which was smaller than that of a conventional HgCdTe detector.

Keywords: SWIR, quantum well, type II, InGaAs/GaAsSb, InP

1. 緒言

1-1 近赤外フォトダイオード 中赤外、遠赤外領域には多くの分子の基準振動が存在し、その倍音や結合音が近赤外領域には存在する。いわゆる「Sleeping giant」と呼ばれていたこれらの領域は、Norrisらの近赤外スペクトルに対する統計的処理方法の提案以降、一気にその応用分野が開拓され、近年では、ケモメトリクス手法により非破壊での物質同定方法として期待されている。特に、 $1.7\mu\text{m}$ から $2.5\mu\text{m}$ にかけての領域は環境ガス検出、化学プラントのプロセスモニタリング、医療用モニタなどに適しているとして有望視されている。

しかしながら、近赤外領域での倍音、結合音での遷移に伴う信号は微弱であり、高精度の分析には高S/N、すなわち、高感度、低暗電流のフォトダイオード (PD) が必要とされる。この波長領域では、HgCdTe (MCT) を受光層材料とするPDが主に使われているが、暗電流低減のために冷却機構を必要とする。冷却機構の付帯は消費電力やサイズおよびコスト増につながり、応用分野拡大への障害となっている。

一方、InP基板上に格子整合したInGaAsを受光層とするPDは、低暗電流、高信頼性を有し生産性にもすぐれ、非冷却で既に光通信分野で使われている。しかしながら、カットオフ波長は $1.7\mu\text{m}$ にとどまっている。格子不整合系InGaAs⁽¹⁾を用いると、カットオフ波長は $2.6\mu\text{m}$ に達するが、暗電流が大きくなり、MCTと同様に冷却機構を要する。

我々のグループでは、近赤外センサの非冷却動作実現をめざし、量子井戸を受光層とするPDの検討をおこなった。本報告では、InGaAs/GaAsSbタイプII型量子井戸構造の作製とそれを用いたPD作製、特性について報告する。

1-2 タイプII型量子井戸 量子井戸構造とは異なるバンドギャップをもつ半導体を数nmオーダーで積層したものであり、バルク半導体では実現できない特性を具現化できる。図1にタイプII型の量子井戸構造を示す。タイプIと呼ばれる量子井戸では、同一半導体内で光学遷移は生じるのに対し、タイプII型量子井戸構造では、電子、および正孔は空間的に分離されており、その波動関数のオーバーラップにより、異なる半導体間で光学遷移が生じる。結果的に、バンドギャップの大きな半導体を用いながら、赤外受光素子で必要とされる狭いバンドギャップでの遷移を実現できる。

タイプII型量子井戸については、江崎らによる報告を端緒とし、赤外用受光素子としての利用がSmithらによって提案されている。InGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸に関しては、JPL、テキサス大、大阪府立大学他のグループが

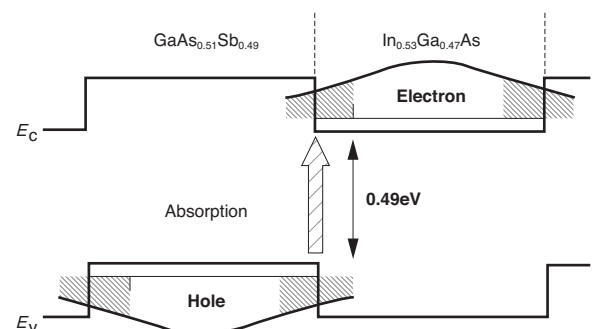


図1 タイプII型量子井戸構造

先駆的研究を報告している^{(2)~(5)}。

タイプII量子井戸構造の特徴としては、

①それぞれの半導体の厚みを変えることにより、波動関数のオーバーラップを変化させ、光学的なバンドギャップを工学的に設計できること

②オージェ効果の抑制が期待されること

などがあげられる。また暗電流の低減が期待されている。

2. エピタキシャル成長とフォトダイオード作製

2-1 GaAsSb結晶成長

GaAsSbおよびInGaAsエピタキシャル膜の作製は固体ソース分子線エピタキシャル成長法 (Molecular Beam Epitaxy Method) を用いた。III族供給にはクヌードセンサー、V族供給にはバルブクラッカーセルを用いて、それぞれ、As₄、Sb₁を供給した。また、成長前にAsフラックス下で、500°C程度まで昇温しInP基板表面のサーマルクリーニングをおこなった。

InGaAsと比較して、受光層としてのGaAsSbの結晶成長に関しては、これまで報告例が少なく知見に乏しい。そこで我々は、その結晶成長の最適化を進めた。GaAsSbの結晶性評価にあたり、Fe-InP基板上にAlInAsバッファ層 (0.2μm) を成長したのち、GaAsSb層 (1.0μm) を基板温度、V/III比を変えて成長させた。成長速度は、それぞれ、GaAsSb : 0.8μm/hr, AlInAs : 1.5μm/hrとした。X線回折法、フォトルミネッセンス (YAG-レーザー 励起波長 1.06μm) を用いて評価した。

2-2 GaAsSbフォトダイオードおよびInGaAs/GaAsSb type II量子井戸型フォトダイオード作製

まず、結晶性評価を目的として、図2に示すようなGaAsSbを受光層とするPIN-PDを作製した。S-dope InP基板上にInGaAsバッファ層 (1.5μm)、GaAsSb受光層 (2.5μm)、

およびInGaAsキャップ層を成長した。InGaAs層の成長速度は1.8μm/hであり、V/IIIフラックス比は10とした。

さらに、受光層としてInGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸構造を用いるPDを作製した。各層の厚みはInGaAs、GaAsSbとも5nmとし250対を形成した。GaAsSbの成長条件は単層で最適化したものを用いた。GaAsSbと同様にバッファ層、キャップ層にはInGaAsを用いた。

PIN-PDの作製プロセスは一般的なフォトリソグラフィ技術を用いた。デバイス構造は図2に示すように、プレーナー型を採用し、閉管法による亜鉛選択拡散をおこない、pn接合を形成した。拡散ソースとしてはZn₃P₂を用い拡散温度は480°Cとした。P-CVD法を用いて、拡散マスクのSiN (100nm)、および反射防止膜のSiON (180nm) を形成した。p、n電極には、それぞれ、Au-ZnおよびAu-Ge-Ni合金系電極を採用した。それぞれの金属を蒸着したのち、リフトオフ法によりパターンニングした。

3. 評価結果と考察

3-1 GaAsSb結晶成長条件最適化

GaAsSbのフォトルミネッセンス (PL) の発光強度のV/IIIフラックス依存性を図3に示す。基板温度480°Cでの発光強度が他の温度での成長に比べて強いことがわかる。また、V/IIIフラックス比が12に比べて、24の場合はPL発光は強くなり、V/IIIフラックス比20以上では飽和傾向にある。このことは、基板温度480°C、V/IIIフラックス比20以上がGaAsSb成長条件として適していることを示唆している。GaAsSbを受光層として作製したPDの暗電流温度依存性を図4に示す。温度係数を示すn値は、V/IIIフラックス比が12場合の2.8に比べて、24の場合は1.3と小さくなっている。n値が1に近いほど結晶欠陥を介したリーク電流成分が少ないことから、V/IIIフラックス比24での結晶性改

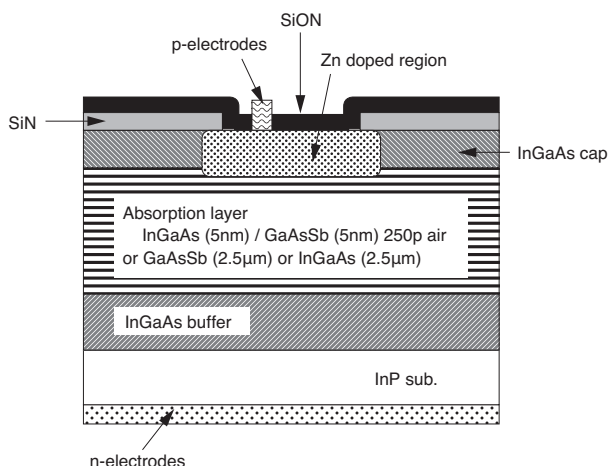


図2 フォトダイオード断面の模式図

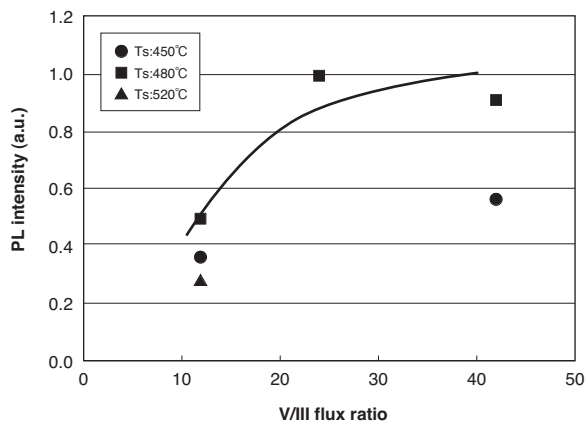


図3 フォトルミネッセンス発光強度のV/IIIフラックス比依存性

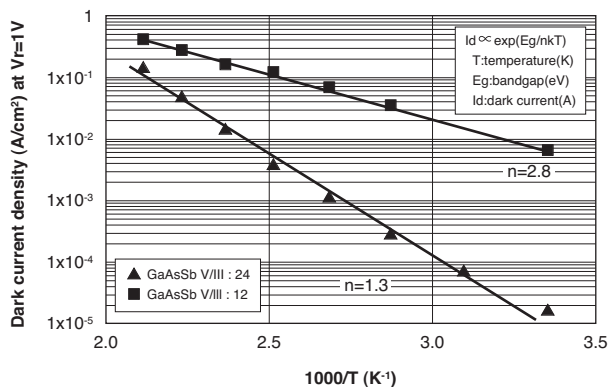


図4 GaAsSb PDの暗電流温度依存性

善を示唆しており、結晶欠陥を介した発生-再結合電流が抑制され、理想ダイオードの値に近づいていると考えられる。

3-2 InGaAs/GaAsSb 量子井戸型フォトダイオード V/III フラックス比 24, 基板温度 480 °C の GaAsSb 成長条件を用いて成長した InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸の発光スペクトルを図 5 に示す。室温で 2.4 μm にピークが観測された。この発光は InGaAs と GaAsSb のタイプ II ヘテロ界面での遷移によるものと考えられる。

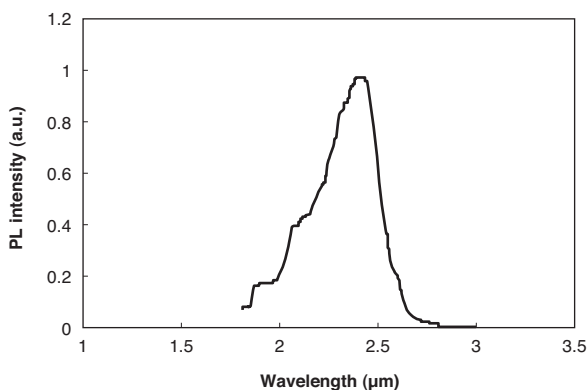


図5 InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸の室温での発光スペクトル

さらに、InGaAs/GaAsSb 量子井戸を受光層とする PD の暗電流のバイアス依存性を図 6 に示す。受光径は 140 μm である。暗電流は 140 nA @ -1V であった。厳密にはデバイス構造の違いを考慮するべきであるが、これまで報告された値より改善されており、MCT に比べても約 1 桁程度、暗電流は低い。この結果は InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸型 PD の室温動作の可能性を示唆するものである。

図 7 に感度の波長依存性を示す。測定は室温、無バイアスで行った。2.5 μm までの感度が確認され、最大 0.6 A/W の感度が得られた。

図 6 に示されるように、量子井戸の構成要素である InGaAs および GaAsSb の単層を受光層とする PD の暗電流は、量子井戸型の PD の暗電流よりバイアスにかかわらず小さい。このことは、量子井戸型 PD では各層の InGaAs/GaAsSb ヘテロ界面品質が特性を大きく左右することを意味する。したがって、今後、暗電流を低減して S/N を改善するためには量子井戸を構成する InGaAs と GaAsSb ヘテロ界面品質の改善が必要であると考えられる。

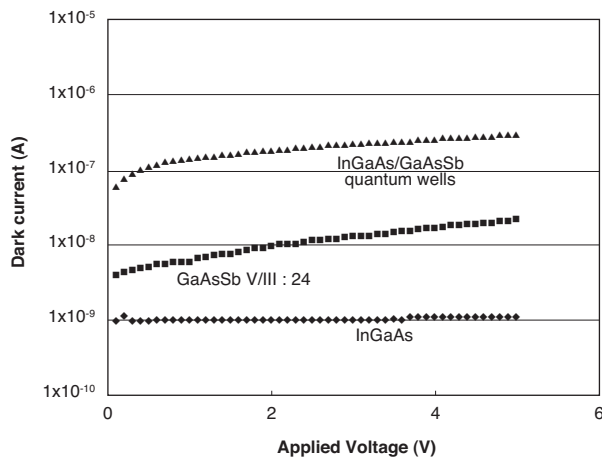


図6 作製したPDの暗電流バイアス依存性

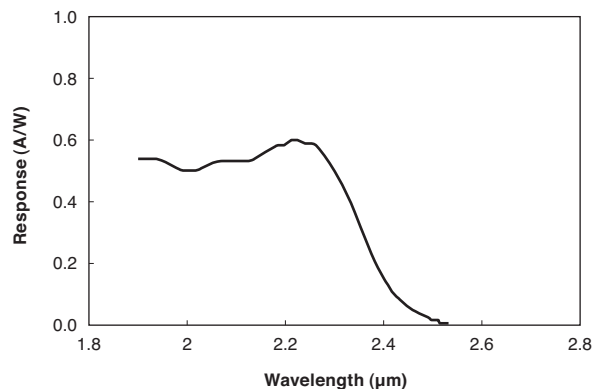


図7 感度の波長依存性

4. 結 言

InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸構造を受光層に用いた、プレーン型の PIN-PD を作製した。室温で受光径 140 μm の素子で暗電流 140 nA、感度 0.6 A/W を実現した。このことは、InGaAs/GaAsSb タイプ II 量子井戸型 PIN-PD がイメージセンサ等の応用分野において、非冷却動作の可能性を有することを示唆している。

4. 謝 辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の産業技術実用化開発費助成事業の支援を受けて行われた。

参 考 文 献

- (1) M.Wada and H.Hosomatsu : Appl. Phys. Lett. 64, 1265 (1994)
- (2) A.Yamamoto, Y.Kawamura, H.Naito, and N.Inoue : J.Cryst. Growth.201, 872 (1999)
- (3) R.Sidhu, N.Duan, J.Campbell, and A.Holmes : IEEE Photon. Technol. Lett. 17, 2715 (2005)
- (4) G.J. Brown, J.E. Van Nostrand, S.M. Hedge, W. Siskaninetz, Q.-H.Xie Proc. of SPIE 4650, 179 (2002)
- (5) Y. L. Goh, D. S. G. Ong, S. Zhang, J. S. Ng, C. H. Tan, J. P. R. David Proc. of SPIE 7298, 729837-1 (2009)

執 筆 者

稲田 博史* : 伝送デバイス研究所 新領域研究部
主席
化合物半導体光デバイス／センサーの研究開発に従事



三浦 広平 : 伝送デバイス研究所 新領域研究部
森 大樹 : 伝送デバイス研究所 新領域研究部 主査
永井 陽一 : 伝送デバイス研究所 新領域研究部 主席
猪口 康博 : 伝送デバイス研究所 新領域研究部 グループ長
工学博士
河村 裕一 : 大阪府立大学 教授 理学博士

*主執筆者