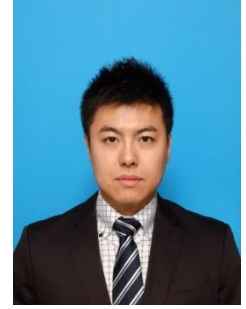


半導体ナノ細線フォトトランジスタを用いた単一光子検出器の開発

研究代表者

大森 雅登 豊田工業大学 嘱託研究員



1. 研究の背景と達成目標

波長 $1\mu\text{m}$ 以上の赤外光を検出する化合物半導体光センサは、材料に起因する種々の要因から微弱光検出が難しく性能は頭打ちとなっている。しかし近年、先端計測や自動運転技術等で赤外光センサ、特にイメージセンサの需要が高まっており、そのさらなる高感度化が求められている。そこで本研究では、今までにない超高感度かつイメージセンサに適した赤外光センサを実現するため、新たに半導体ナノ構造を用いた新光センサを考案し、その試作と性能評価から単一光子レベルの微弱光を検出可能な光センサの開発を目的としている。具体的には、InP 基板上に結晶成長した In(Al)GaAs ナノ細線と GaSb 量子ドットを組み合わせたナノ細線フォトトランジスタを分子線エピタキシー (MBE) にて結晶成長し、波長 $1\sim 1.7\mu\text{m}$ 帯に感度のある単一光子検出器の開発を目指した。これを達成するため、(1) MBE 法を用いた $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上への InAs 量子ドットの近接積層による InAs ナノ細線構造の形成手法確立と、(2) InAs ナノ細線と GaSb 量子ドットを結合させたナノ細線フォトトランジスタ構造の結晶成長とプロセスによる光検出素子の作製、および光検出特性評価による単一光子検出の可能性探索を目標とした。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

・InP(100)基板上での InAs 量子ドット積層型ナノ細線の形成手法確立

今までに例のない InP(100)基板上への円筒状ナノ細線構造の作製に成功した。この基板上では通常 InAs 量子ドットは円形にはならず長細い筋状の構造を形成するが、円形となる GaSb ドットを先に成長しその直上に InAs ドットを成長することで、歪の影響で円形の InAs 量子ドットを形成することに成功した。これらの技術は新しいナノ構造の形成技術として結晶成長工学分野へ大きく寄与すると考えられる。

・ナノ細線フォトトランジスタ素子による 100A/W 以上の高受光感度達成

本素子はアバランシェフォトダイオードと異なり動作電圧が 1V 以下と低く単純な 2 端子素子のためアレイ化が容易でイメージセンサに最適である。したがって、本素子を用いた超高感度赤外イメージセンサが実現できれば、天体観測や物性計測などの学術分野への影響だけでなく、医療応用や自動運転技術におけるナイトビジョンカメラなどへも応用でき、安心安全社会実現への貢献

3. 研究成果

ナノ細線は、MBE 法を用いて InP(100)基板上に $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 層を成長した後に円形のドットを形成するため GaSb 量子ドットを形成し、その直上に InAs 量子ドット層と InAlGaAs スペーサ層を交互に積層させることで形成した。このときドット層と InAlGaAs 層の厚さおよび組成を適切な値とすることで歪を補償した。作製した試料の断面 TEM 像を図 1(a)に記す。評価の結果、ナノ細線は $15\times 30\text{nm}$ の楕円柱状となっており、転移もなく良好なナノ細線が得られたことが分かった。また、試料の蛍光スペクトルの測定から、ナノ細線は $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ バンド端より約 80meV 低いエネルギーでの発光を示し、電流路として機能することが分かった。

次に、図1(b)に示すように長さ約 30nm の InAs ナノ細線直上に GaSb 量子ドットを形成し、基板側と表面側に電極を形成したフォトランジスタ素子を作製した。InAs ナノ細線は電子電流路となっているが、電子に対して障壁、正孔に対して井戸となる GaSb ドットで堰を設けた構造となっており、光生成正孔の GaSb ドットへの蓄積によってその堰が開放し電子が流れやすくなる仕組みとなっている。素子温度 10K、暗状態における電流電圧特性を図1(c)に示す。この素子に対し、波長 $1.3\mu\text{m}$ 、強度 100fW の信号光に対し 10^5A/W の受光感度が得られた。これは光子1個当たり 10fA の電流が流れる計算となり、一般的な電流測定で容易に検知可能な値である。動作温度が 10K と低いため、液体窒素以上温度での動作が課題となっている。

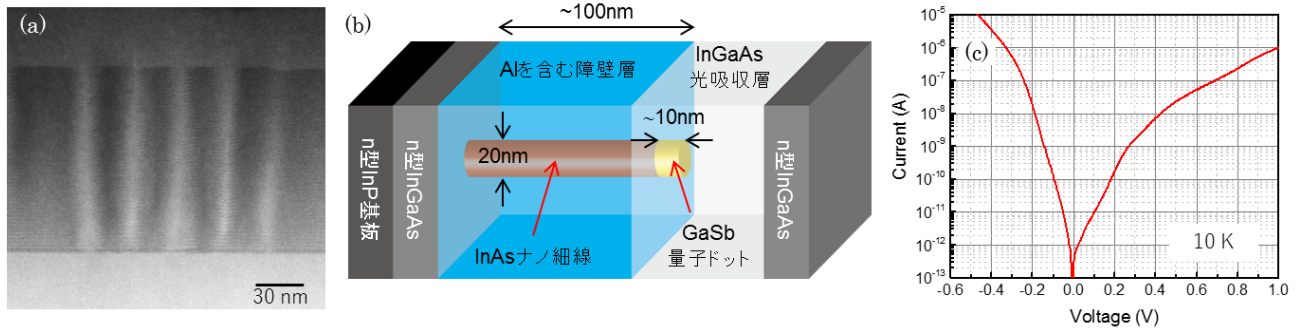


図1. InAs ナノ細線試料の断面 TEM 像(a)とナノ細線フォトランジスタの素子構造(b)および素子の暗状態における電流電圧特性(c)

4. 今後の展開

現在本素子をアレイ化したイメージセンサの作製を進めており、実現すれば今までにない超高感度赤外イメージセンサが得られ、医療や自動運転技術等の分野に大きく貢献すると考えられる。

5. 発表実績

1. T. Kojima, M. Ohmori, P. Vitushinskiy, H. Sakaki, "Transport of Electrons in Self-assembled GaInAs Quantum Rod Structures", The 41st International Symposium on Compound Semiconductors, Montpellier, (France), May11-15, 2014, P47.
2. 大森雅登, 杉村和哉, 小嶋友也, 加戸作成, 野田武司, Pavel Vitushinskiy, 岩田直高, 榊裕之, "三角障壁フォトランジスタによる高感度赤外光検出", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015 年 3 月 13 日, 13p-P4-3.
3. 大森雅登, 野田武司, 小嶋友也, 杉村和哉, Pavel Vitushinskiy, 岩田直高, 榊裕之, "InP(100)基板上におけるInAs/InAlGaAs量子ロッド構造の形成", 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 14 日, 14p-2W-10.
4. 杉村和哉, 大森雅登, 野田武司, Vitushinskiy Pavel, 岩田直高, 榊裕之, "赤外用三角障壁フォトランジスタの暗電流低減と室温動作", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 15 日, 15a-1E-7.
5. P. Vitushinskiy, M. Ohmori, T. Kuroda, T. Noda, T. Kawazu, and H. Sakaki, "GaAs-based triangular barrier photodiodes with embedded type-II GaSb quantum dots", Appl. Phys. Express 9, 052002 (2016).
6. K. Sugimura, M. Ohmori, T. Noda, T. Kojima, S. Kado, P. Vitushinskiy, N. Iwata, H. Sakaki, "InGaAs Triangular Barrier Photodiodes for High-Responsivity Detection of Near-Infrared Light", Appl. Phys. Express 9, 062101 (2016).