

令和元年6月14日現在

機関番号：11201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13792

研究課題名（和文）広禁制帯幅半導体による微弱紫外光検出素子の開発

研究課題名（英文）Development of highly sensitive UV sensing device with wide band gap semiconductor

研究代表者

成田 晋也（Narita, Shinya）

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：80322965

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広禁制帯幅を持つ化合物半導体を用いて、高感度紫外光検出素子の開発を行った。研究では、いくつかの材料でフォトダイオードを作製し、その特性を評価しながら、基板仕様や素子作製条件の最適化を図り、それにより紫外光に対する高感度化を目指した。その結果、SiC半導体によるアバランシェ型高感度フォトダイオードの開発に成功した。それとともに、さらなる感度向上のための具体的な方策も得た。本研究で開発された素子は、紫外光検出が必須である素粒子物理学分野、天文学、環境科学分野の実用測定器への応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学分野では、紫外光検出技術をベースとしたエネルギー spektrometer やトラッキングデバイスが使用されているが、本研究で開発された高感度紫外光受光素子をそれら測定器に応用できれば、飛躍的な性能向上が期待され、目的とする物理事象観測の高精度化が実現できる。一方で、高感度紫外光素子の実用化が進めば、天文学分野での高感度天体計測機器、医療分野での高精度イメージングセンサ、環境科学分野での紫外線に対する新しい評価システムなど、様々な分野での革新的な波及効果が想定される。

研究成果の概要（英文）：We developed a highly sensitive UV sensing device with a wide-bandgap semiconductor. We fabricated photodiodes with various types of compound semiconductor, and measured the electrical properties and the spectral responsivity in UV region. Then, we optimized the condition of the substrate, the device design, and the fabrication process. As the result, we successfully developed an avalanche photodiode with SiC which indicated high sensitivity to the UV light. The device is expected to be applied to the sensor used in high energy physics, astronomy, and environmental measurements.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：フォトダイオード 紫外光センサ 化合物半導体 アバランシェダイオード

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高感度紫外光センサは、素粒子物理学分野をはじめ、天文計測、医療分野、半導体プロセス、プラズマ計測、火災検知、環境分野、さらには次世代光ディスクの読み出しなど、極めて多岐に渡る分野で必要とされている技術である。素粒子物理学分野において、例えば、希ガスを用いた実験では、希ガスが発する紫外領域のシンチレーション光の高感度・高時間分解能検知は、測定器性能、さらには観測対象である反応事象の同定に極めて重要である。従来、そういった実験では、紫外光を可視光へ波長変換することにより光電子増倍管 (PMT) 等で検出する方法が一般的であった。しかし、その方法の場合、応答速度や耐久性 (波長変換剤の安定性) 高電圧印加の必要性など、留意すべき問題がある。一方で、半導体フォトダイオードは、それら問題に依らない、直接的な紫外光検出素子として有用である。しかし、現在フォトダイオードに主に用いられているシリコン (Si) やガリウムヒ素 (GaAs) といった半導体材料は、その禁制帯幅から、波長感度のピークは可視から赤外領域であり、紫外光に対する感度は高くない。そこで、紫外波長領域に対応した広い禁制帯幅を持つ材料による高感度フォトダイオードの実現が素粒子物理学分野のみならず多くの分野で熱望されている。

既存の半導体材料に代わる新世代化合物半導体として、窒化アルミニウムガリウム AlGaIn に代表される 族窒化物、SiC、ZnO など広禁制帯を持つ半導体が電子デバイス材料として注目されており、今後、あらゆる分野で主要な材料として実用展開されることが見込まれている。これら半導体は、“原子間距離が短いため機械的に堅牢”、“化学的に安定・無毒”、“高速で動作する”といった多くの優れた特徴を持つ材料である。中でも、その禁制帯幅から、紫外領域の受光/発光素子として高いポテンシャルを持つものである。

本研究の開始以前より、我々は AlGaIn 材料等の持つ優れた特徴に早くから着目して、それら材料の基板開発から素子応用に関して継続的な情報収集、実用検討を進めてきた。このような継続した研究の中で、近年、上記半導体材料において、格子欠陥や転位密度の低減、伝導性の制御、耐圧性能向上など、結晶作製技術が著しく進歩し、高品質エピタキシャル基板が作製されるようになったことを受け、それら基板を用い、我々がこれまで培った半導体プロセス技術 (表面処理、基板構造、電極構成などの最適化に関する知見) を組み合わせ、微弱紫外光検出のための素子開発という本研究テーマの着想を得た。

### 2. 研究の目的

本研究では、近年様々なデバイスで実用化が進んでいる広禁制帯幅を持つ材料による微弱紫外光に感度を持つフォトダイオードの実現を目標とした。本研究の着手にあたっては、事前に、窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn)、酸化亜鉛 (ZnO) などのいくつかの半導体材料でダイオードを試作し、特性評価を行いながら本研究で目指すべき方向性について検討してきた。本研究では、準備研究で得た知見を生かしながら、最新の高品質基板によってフォトダイオードを作製し、半導体素子としての電気的特性および紫外光に対する感度特性等を定量的・系統的に調べ、紫外光センサとしての性能と課題を明らかにし、基板や半導体プロセス条件の最適化を図った。さらに本研究では、耐圧性の高い基板によるアバランシェ型ダイオードを開発し、それにより、微弱紫外光にも十分な感度を持つ実用性の高い受光素子の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、フォトダイオード用として独自に考案した構造を持つ GaN、AlGaIn (Al 比率を変えた異なるバンドギャップを持つ複数の基板)、SiC それぞれのエピタキシャル基板でダイオードを試作し特性評価を行いながら有用性を検討した。さらに、それぞれの評価結果を踏まえ、伝導度や膜厚条件を変えながら、受光素子の基板材料として最適な条件を探索した。その結果、n 型 4H-SiC 基板に SiC を成膜した 2 種類の基板 (SiC Type-I、SiC Type-II) が優れた特性を示したことから、本成果報告では、以降、これら基板に対する結果について述べる。

#### (1) フォトダイオード

本研究で用いた 2 種類の SiC 基板は、4H-SiC 上に SiC をエピタキシャル成長させたもので、それぞれ、Type-I (エピ厚: 2  $\mu\text{m}$ 、不純物濃度:  $N_0=10^{16}/\text{cm}^3$ )、Type-II (エピ厚: 1  $\mu\text{m}$ 、不純物濃度:  $N_0=10^{17}/\text{cm}^3$ ) という構造である。この基板を用いて SiC エピ面にショットキー電極、SiC パルク基板面にオーミック電極を形成しショットキーダイオード素子を作製した。素子作製プロセスは以下の通りである。1) 基板表面の酸化膜除去のためのフッ酸処理、2) フィールドプレート (詳細は後述) 用 SiO<sub>2</sub> 絶縁膜を成膜、3) ボンディングパッド剥離防止用金属 (Pt, Ti) 成膜、4) フィールドプレート用 SiO<sub>2</sub> 絶縁膜エッチング、5) Pt 電極成膜、6) ボンディングパッドおよびガードリング Pt 成膜、7) SiO<sub>2</sub> 反射防止膜成膜、8) オーミック電極 (Au, Ti) 成膜。素子構造を図 1 に示す。受光部面積は 0.0379  $\text{mm}^2$  である。

本研究では、光感度向上のための有用な手段として、アバランシェ増幅機構を持つダイオードの開発を目指した。同型ダイオードでは、高電圧印加により素子内部に高電界形成することで、光入射によって発生した電子のなだれ増幅が図られ、これにより信号強度を増大させることができる。一方で、素子に高電圧を印加した場合に、電極端に電界が集中することで絶縁破壊が問題となる。そこで、表面電極を、受光部端を含め外側を覆う構造 (フィールドプレート構造) とすることで電界集中の緩和を図った。このフィールドプレート構造の設計にあたって

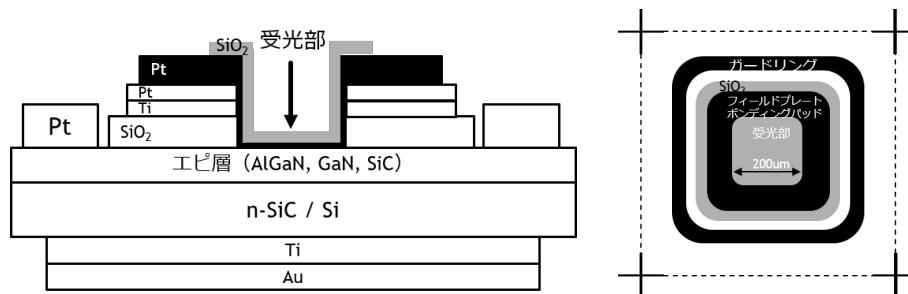


図1 ダイオード素子構造

は、電界シミュレーション ( ANSYS Mechanical APDL ) により、様々な構造条件での表面電極端の電界強度を調べながら、設計の最適化を行った。また、ガードリングの Pt 電極も同様に、電界集中の緩和を目的に配置されたものである。

## (2) 特性評価

作製した各ダイオード素子に対して、電流 - 電圧特性 ( I-V 特性 ) 等の電気的特性を測定し、暗電流の大きさ、逆バイアス耐圧、さらにはショットキー障壁高さや理想因子などダイオード素子の基本パラメータを調べた。

また、紫外光に対する感度評価として、Xe ランプを光源とした分光照射装置を用い、波長 200-400 nm の範囲の光照射を行った。この際、入射光の波長ごとにフィルタ、減衰器を通すことで強度を 10  $\mu$ W で一定とした。ただし、波長 250 nm 以下は光源強度が減少して 10  $\mu$ W 以下となるため、この領域の感度は参考値とする。

## 4. 研究成果

図2に Type-I、Type-II それぞれの I-V 特性を示す。これより、Type-I では、暗電流が 1 nA/cm<sup>2</sup>、整流比が  $\sim 10^9$ 、立ち上がり電圧 1.6 V、ショットキー障壁高さ 0.4 eV という結果が得られた。一方、Type-II では、暗電流が 1-10 nA/cm<sup>2</sup>、立ち上がり電圧 1.4 V、ショットキー障壁高さ 0.4 eV であった。また、高電圧印加による耐圧特性を図3に示す。図より、Type-I では -260 V 程度、Type-II では -70 V 程度で降伏現象が確認された。これらの違いは、それぞれの不純物濃度とエピ層の厚さの違いによるものと考えられる。いずれのタイプにおいても、優れた整流性、耐圧性を示していることがわかる。

図4および図5に Type-I、Type-II それぞれの分光感度特性を示す。この測定の際のダイオードの印加電圧は -0.01 V である。波長 260 nm の紫外光に対する感度は Type-I、Type-II それぞれ 0.12 A/W、0.11 A/W である。また、波長 260 nm の紫外光に対して、逆バイアス印加時のそれぞれのタイプの感度を図6および図7に示す。Type-I では、-257 V 印加時の出力が  $\sim 10$  A/W と、100 倍程度の信号増幅が確認された。また、Type-II では、-35 V 程度の印加電圧に対して 1000 倍以上の増幅率が得られた。このことから、アバランシェ増幅の誘起が確認できたといえる。ここで得られた 100-1000 A/W の感度は、紫外光検出素子として極めて高いものである。Type-I と Type-II の耐圧性能、感度の違いから、基板の不純物濃度や電子のドリフト層の厚さを最適化することで、さらなる高感度化が図られることが示唆される。

以上の結果より、広禁制帯幅半導体による微弱紫外光検出素子実用化への基盤確立が達成されたといえる。今後、本研究成果を基にした様々な応用が期待できる。例えば、素粒子物理学分野では蛍光体が発するシンチレーション光など、紫外光検出が必須となる測定器が数多くあり、エネルギー・位置・時間測定など目的に合わせた検出方法が用いられている。本研究の成果により、エネルギー spektrometers、トラッキングデバイスの分解能改善が期待できる。また、高集積化によって紫外光に高い感度を持つマルチピクセルフォトンカウンター ( MPPC ) の実現可能性も検討できるようになる。こういった装置の実用化が進めば、素粒子物理学のみならず、例えば、天体計測・紫外線天文学にも大きな進展をもたらすと予想される。他にも医療用イメージングセンサへの応用や、近年世界的規模でその影響の議論が高まっている環境紫外線に対する新しい評価システムへの応用など、医療分野、環境分野などでの革新的な波及効果が想定される。

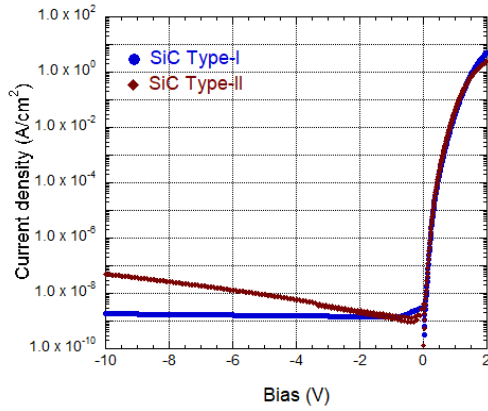


図2 電圧 - 電流特性

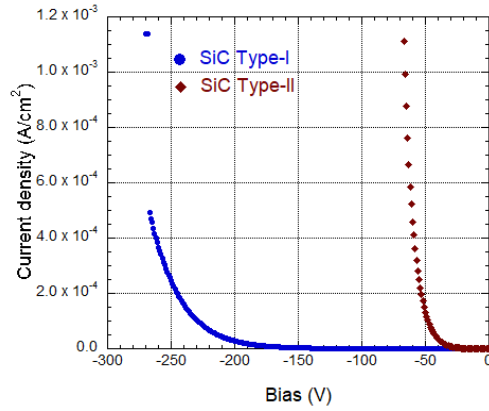


図3 耐圧特性

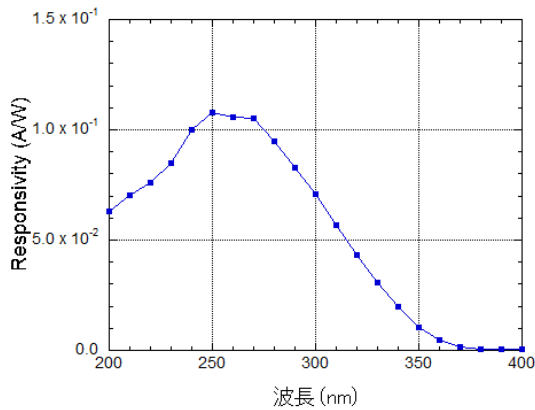


図4 分光感度特性 (Type-I)

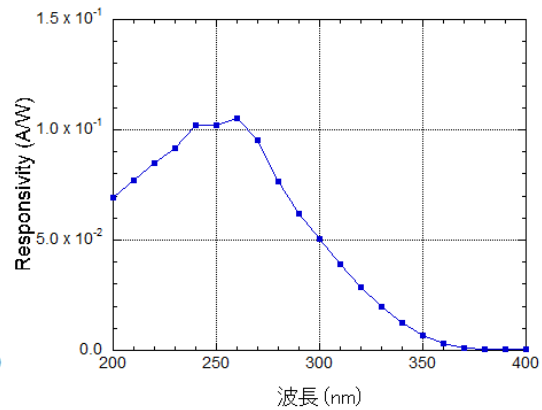


図5 分光感度特性 (Type-II)

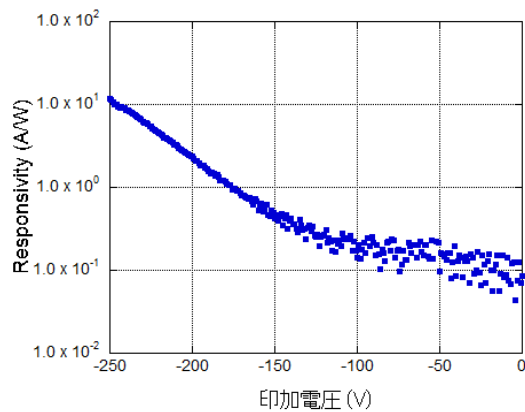


図6 感度 - 電圧特性 (Type-I)

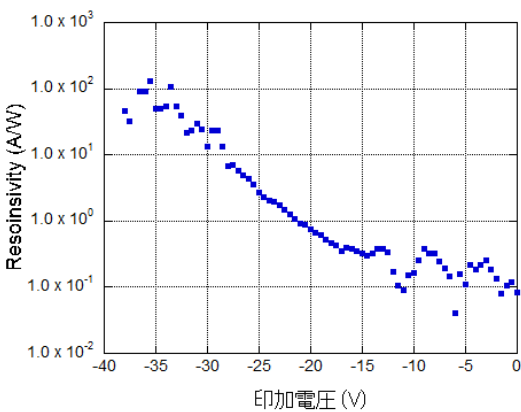


図7 感度 - 電圧特性 (Type-II)

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計3件)

遠藤巧、成田晋也、根岸健太郎、遠藤治之、山口栄一 “化合物半導体による高感度紫外光センサの開発” 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会、岩手大学、2018.9.7

中里悠人、遠藤巧、成田晋也、根岸健太郎、遠藤治之、山口栄一 “族窒化物半導体を用いた高感度紫外光検出器の開発研究” 平成29年度電気関係学会東北支部連合大会、弘前大学、2017.8.26

東海林諒、中里悠人、千葉寿、志田寛、成田晋也、根岸健太郎、遠藤治之、山口栄一 “極低温環境下で用いる紫外光センサの開発” 平成28年度電気関係学会東北支部連合大会、東北工業大学、2016.8.31

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：山口 栄一

ローマ字氏名：YAMAGUCHI, Eiichi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。