

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400290

研究課題名(和文)窒化物半導体フォトダイオードによる真空紫外光検出法の開発

研究課題名(英文)Development of VUV sensor based on nitride semiconductor photodiodes

研究代表者

成田 晋也(NARITA, Shinya)

岩手大学・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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年、様々な電子デバイス材料として実用が進んでいるAlGaIn半導体を用いて、高感度真空紫外光検出器の開発を行った。実験では、AlGaIn材料によるショットキー型ダイオードを作製し各種電気特性や紫外領域での光感度を評価した。その結果、従来のセンサに比べて紫外領域に高い感度を持つ素子の開発に成功した。また、今後のさらなる感度向上のための方策を示すことができた。本研究によって、液体アルゴン三次元飛跡測定器など、素粒子実験分野で用いられる測定器での新しい紫外光検出技術の基礎が築かれた。

研究成果の概要(英文)：We developed a highly sensitive UV photo sensor with AlGaIn semiconductor which has been widely used for various types of electronic devices. We fabricated the Schottky diodes with the material and investigated the electrical properties and the photo responsivity. As the result, we succeeded in developing sensors which shows good performance in UV sensing, and clarified the issues for further improvement in sensitivity. In this study, we have shown that this type of sensor can be applied to a practical detector for high energy physics such as a liquid argon time projection chamber.

研究分野：素粒子実験

キーワード：フォトダイオード 真空紫外光 窒化物半導体 液体アルゴン測定器 シンチレーション光

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学実験に用いられる汎用測定器では、目的や用途に応じて、様々な光検出器が用いられている。また、将来的な実験プロジェクトのための新しい光検出技術の開発研究も進められている。素粒子物理学分野において現在計画されているプロジェクトの一つに、「核子崩壊現象」と「レプトンセクターでの CP 対称性の破れ」の探索を目的とした 100 キロトン級巨大液体アルゴン三次元飛跡測定器（液体アルゴン TPC）を用いた実験がある。液体アルゴン TPC では、装置内を荷電粒子が通過した際に、媒質アルゴンから電離電子とシンチレーション光が発生する。電離電子は、装置内部の電場によってドリフトし、読み出し電極に電気信号を発生させる。また、シンチレーション光の検知によって、粒子の通過・生成タイミングが決定され、そこから電離電子のドリフト時間が求められる。そして、これらの情報を組み合わせることで、粒子の三次元位置情報（飛跡）を mm レベルの精度で捉えることができる。さらには、粒子の飛程と飛跡上のエネルギー損失度合から粒子識別も可能となる。（図 1）

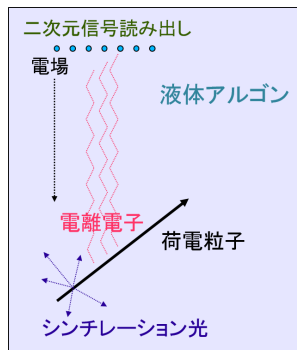


図 1 液体アルゴン三次元飛跡測定器の粒子検出原理

大型液体アルゴン TPC の実現に向けて、小型プロトタイプ測定器の製作・試験を通して、各種要素技術の開発・検討が進められおり、その中では、今後の測定器の大規模化、高性能化に向けたいくつかの重要な課題が明らかになってきている。その一つとして、アルゴンが発するシンチレーション光を検出するための新しい技術開発が挙げられている。

アルゴンが発するシンチレーション光は 128 nm という真空紫外領域の波長を持つ。一般に、このような波長領域の光検出には特別な技術を要し、現在は、紫外→可視への波長変換剤と光電子増倍管（PMT）など既存の光検出器とを組み合わせる方法が主流である。しかしながら、この方法では、波長変換による検出効率や時間応答性の制限、波長変換剤の耐久性などいくつかの検討課題があげら

れている。そこで、測定器の高性能化のために、シンチレーション光を高効率かつ優れた時間特性で検出する全く新しい真空紫外光検出法の開発が強く望まれている。

一方で、近年様々なデバイス材料として注目されている III 族窒化物半導体の一つ AlGaIn は、その禁制帯幅(3.2 - 6.4 eV)から、紫外領域の発光/受光素子としても多様な応用可能性が見込まれている。また、シリコン等既存の半導体受光素子に比べて、その物性上の特徴から、高い受光効率や高速応答性を持つと考えられている。さらに、従来の研究成果によると、低温では、感度・応答速度ともにさらに向上することがわかっており、液体アルゴン中のような極低温（-186 °C）環境下での使用にも適していると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、広禁制帯幅を持つ III 族窒化物半導体 AlGaIn を材料に、紫外光検出器の開発を行った。ここでは、最新の基板によって光検出器の基本素子となる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センサとしての特性（分光感度等）を多角的に調べた。特に液体アルゴン TPC での使用を念頭に、アルゴンからの真空紫外シンチレーション光に対する応答性について評価し、従来の方法である“波長変換剤 + PMT”との比較から、その優位性や改良点を明らかにした上で、受光素子としての高性能化について検討した。

以上から、III 族窒化物半導体による新しい真空紫外光検出器を実現するとともに、液体アルゴン TPC など、そのような光検出技術が必須となる大型汎用測定器への実装に向けた基礎の確立を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) フォトダイオード

本研究では、フォトダイオード用特注 AlGaIn エピタキシャル基板を用いて、ショットキー型フォトダイオードを作製した。基板設計にあたっては、フォトダイオード用素子としての使用を念頭に、バンドギャップの異なるいくつかの AlGaIn 材料やエピ基板構造を検討した結果、ウェハ材料 n-SiC 上に、縦方向の導通を持つバッファ層を介して、AlGaIn 層をエピタキシャル成長させた構造となっている。SiC 面にスツパタリングにより Ti 20 nm、Au 50 nm を成膜し、熱処理によりオーミック電極を形成した。また、AlGaIn 面側にショットキー電極として Pt 3nm の透明電極を成膜した。図 2 に使用した基板構造、作製したダイオードの電極構造を示す。

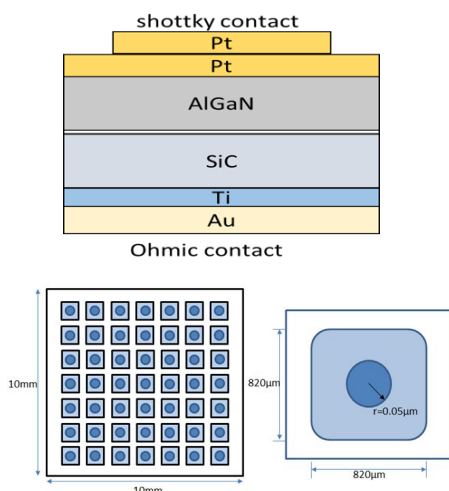


図2 基板構造とショットキーフォトダイオードの電極構造

## (2) 特性評価

作製したダイオード素子に対して、以下の内容・方法による特性評価を行った。

### 電気特性測定

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)、容量 - 電圧特性(C-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、作製したダイオードの品質評価を総合的に行った。ここでは、紫外光に対する感度向上の観点から、アバランシェ型フォトダイオードの開発も念頭におき、耐圧性能向上のための方策についても検討をした。また、将来的な液体アルゴン測定器での使用を想定し、作製した素子を液体窒素中(-196℃)に浸した極低温環境下での電気特性についても調べた。

### 分光感度特性

作製したフォトダイオードの紫外領域の光感度を評価するため、Xeランプを光源とした分光照射装置を用い、波長200-400nmの範囲の紫外光に対する出力電流を調べた。この際、波長250nm以上の光については、減衰器により光強度を一定(0.01 mA/cm<sup>2</sup>)にして照射したが、250nm以下については、光源の光強度が減少するため、減衰器を除いた光学系で直接照射を行っている。また、装置の制約上、照射波長の下限が200nmまでとなっており、アルゴンのシンチレーション光に対応する波長(128nm)については、200nm以上の波長に対する分光感度曲線の外挿からその感度を類推した。

## 4. 研究成果

図3に本研究で作製したAlGaInフォトダイオードのI-V特性結果を示す。

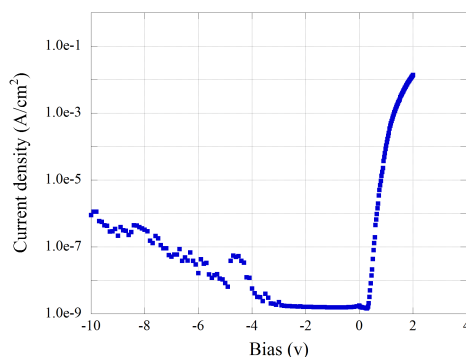


図3 フォトダイオードの電流 - 電圧 (I-V) 特性

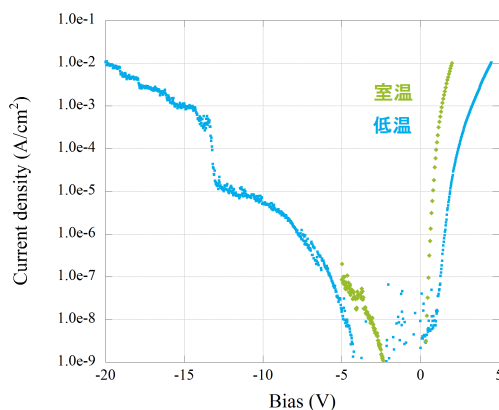


図4 室温と低温(-196℃)での電流 - 電圧 (I-V) 特性

この図より、逆方向電圧が-5V程度までの範囲では、暗電流が数10 nA/cm<sup>2</sup>程度であることがわかるが、その後、徐々に暗電流は増加する。

図4は、室温と低温でのI-V特性を示す。(この特性は、低温用に構築した測定系で測定しているため、室温での振る舞いも図3のそれとは異なっていることに留意されたい)

一般にダイオードの電流  $I$  は、逆方向飽和電流を  $I_s$ 、電荷素量  $q$ 、ボルツマン定数  $k$ 、温度を  $T$  として、

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

のように表され、電圧一定の時、低温で電流が減少する。本測定結果でも、低温時に、順方向電流の立ち上がり電圧が大きくなっていることがわかる。一方で、この図から、立ち上がり後の抵抗については、低温の方が小さいことがわかる。また、逆方向電流に着目すると、-5V程度までの範囲で、低温において、暗電流が1/10程度に抑制される。このことは、液体アルゴン中での動作を考えたときに、信号雑音比向上に対する優位性と考えられる。耐圧性能については、従来の市販品

に比べて優位性が示されたものの、しかしながら、-5 V 程度以上の逆方向電圧では、暗電流が増加し、さらに、本研究による素子では、-14 V 程度で急激な増大も観測されている。この原因の一つとして、基板や表面の欠陥によるものと考えられる。後述のように、光感度の向上には、増幅機構を持たせたアバランシェ型ダイオードの開発が必須であることから、基板の高品質化やプロセス条件のさらなる最適化、ダイオード構造など、今度の検討課題であると言える。

アバランシェ増幅の生起には数 10 V 以上の耐圧性能が求められるが、上に示したように、現在までのところ約 15-20V 程度にとどまっている。本研究では、いくつかの基板条件に対して予想されるダイオード特性を系統的に検討しており、例えば、低抵抗バルク GaN 基板上への半絶縁 AlGaN 層の成膜といったエピ基板構造改良などにより、耐圧性能の向上が見込めることもわかった。

図 5 に、本研究で作製した素子の分光感度を示す。測定時の入射光量については、標準フォトダイオードを用いてモニターしているが、装置の構成上、波長範囲毎に異なるフィルターで光量を調整しており、それにより、波長感度に一部不連続な箇所が見られている。この結果より、作製したダイオードのカットオフ波長が 300 nm 程度であり、200-250 nm の領域に 100-200 mA/W の感度を有することが確認できる。この領域での波長感度は、従来の市販品より数倍程度大きい。また、アルゴンシンチレーション光の波長に対応する 130 nm の感度は数 10 mA/W と予想される。

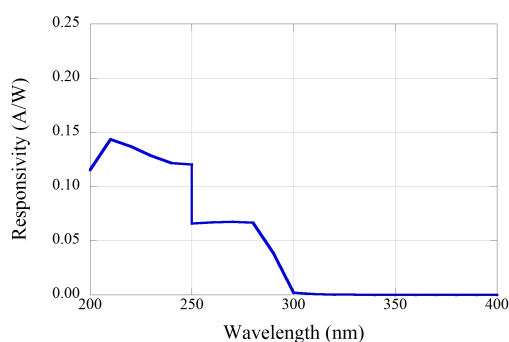


図 5 AlGaN フォトダイオードの分光感度

液体アルゴン測定器でのシンチレーション光測定では、現状、波長変換剤（テトラフェニルプタジン塗布フィルム）と PMT との組み合わせが用いられているが、そこでの PMT の量子効率や波長変換剤の変換効率を考慮し今回得られた光感度と比較した場合、 $10^3$  程度の出力向上が必要になると見積もられている。これについては、今後の基板の高品質化やプロセス条件の最適化による量子効率の改善、アバランシェ増幅機構を持つ素子の開発で達成可能であると考えられる。他にも、受光面積の拡大や複数のダイオードチ

ップによるアレイ型センサといった方法での出力の向上が図れる可能性もある。

以上の結果より、新しい紫外光検出器として、族窒化物半導体フォトダイオードの可能性を示すことができたと言える。また、液体アルゴン三次元飛跡測定器など、素粒子実験分野で用いられる測定器での新しい紫外光検出技術の基礎が築かれた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### 〔学会発表〕(計 5 件)

黒川真行, 池野正弘, 内田智久, 笠井聖二, 笠見勝祐, 黒森雄介, 小林隆, 坂下健, 庄子正剛, 千代浩司, 田中真伸, 田頭拓也, 中平武, 仲吉一男, 成田晋也, 長谷川琢哉, 牧宗慶, Laura Zambelli “大型液体アルゴン TPC 測定器 (> 10kt) の開発に用いる 30L 小型測定器の運転試験および性能評価” 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016.3.19  
 黒森雄介, 池野正弘, 内田智久, 笠井聖二, 笠見勝祐, 黒川真行, 小林隆, 坂下健, 庄子正剛, 千代浩司, 田中真伸, 田頭拓也, 中平武, 仲吉一男, 成田晋也, 長谷川琢哉, 牧宗慶, Laura Zambelli “大型液体アルゴン TPC 測定器 (> 10kt) で用いる信号読み出しエレクトロニクスの開発” 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016.3.19  
 東海林諒, 田頭拓也, 黒川真行, 黒森雄介, 庄司愛子, 千葉寿, 志田寛, 成田晋也, 遠藤治之 “液体アルゴン TPC における真空紫外光検出方法の検討” 平成 27 年度電気関係学会東北支部連合大会, 岩手県立大学, 2015.8.28  
成田晋也, 東海林諒, 佐々木亮輔, 田頭拓也, 千葉寿, 志田寛, 遠藤治之 “アルゴンからの微弱シンチレーション光検出に関する研究” 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 山形大学, 2014.8.21  
 磯木崇史, 渡邊孝太, 佐々木亮輔, 千葉寿, 志田寛, 成田晋也 “アルゴンからの真空紫外シンチレーション光検出に関する研究” 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 会津大学, 2013.8.23

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

成田 晋也 (NARITA SHINYA)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：80322965

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

山口 栄一 (EIICHI YAMAGUCHI)

同志社大学大学院・総合政策科学研究科・

教授  
研究者番号：30367974