

平成21年 5月27日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540254

研究課題名（和文） ワイドギャップ窒化物半導体による放射線耐性に優れた
検出器の開発研究研究課題名（英文） Development of particle detector with radiation hardness
using wide-gap nitride semiconductor

研究代表者

成田 晋也 (NARITA SHINYA)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：80322965

研究成果の概要：

本研究では、将来の素粒子実験分野での実用の観点から、放射線損傷に対して高い耐性を持つと考えられているワイドギャップ窒化物半導体を用いた放射線検出器開発を行った。代表的な窒化物半導体である GaN、AlGaIn および InGaIn 材料を用いて、検出器の基本素子となるダイオードを作製し、その性能を評価した。その結果、ワイドギャップ半導体の特徴である高温での安定動作が確認された。さらに GaN ダイオードにおいて重荷電粒子の検出に成功した。また、素子に陽子線を入射して放射線耐性を調査したところ、 10^{16} p/cm²程度の高フルエンスに対しても、極端な性能劣化は見られず、同材料の高放射線耐性が実証された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：半導体検出器、放射線計測、窒化物半導体、放射線耐性

1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子実験物理学分野では、各種物理パラメータの精密測定にともない、使用するビームが高強度化し、高放射線環境下での実験が必須となっている。そのため、そこで使用される検出器にも、放射線損傷に強い材料が求められるようになってきた。素粒子実験では、主に高精度の飛跡検出器としてシリコン (Si) 半導体検出器が用いられているが、

Si 材料は放射線耐性の点で問題を抱えている。このような背景から、放射線耐性に優れた半導体検出器の開発は、本分野において現在最も重要な研究テーマの一つである。

一般に、半導体素子の放射線損傷は、材料の種類が本質的な決定要因となっているため、放射線耐性に優れた検出器の開発には、これまで使われてこなかった半導体材料を

用いた検出器作製と評価が必須である。

現在、実用あるいは研究開発段階において、多種の半導体材料が存在しているが、その中の窒化物半導体は、“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”といった電子デバイス材料として優れた特徴を持つ半導体である。また、放射線損傷に対する耐性も高いことが期待されており、まさに次世代の半導体検出器のための最適な材料である。窒化物半導体の中では、現在、窒化ガリウム (GaN)、窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) が主な実用素子材料として多方面で使われ始めているが、そこには、これら半導体基板の製造技術が近年大きく進歩してきたという背景があり、今なお基板の高抵抗化や厚膜化といった高品質化が急速に進んでいる。また光デバイス応用への需要から、インジウム系窒化物 (InGaIn など) も、その基板開発が進んでいる。今後、既存の半導体材料に代わり、これら窒化物半導体が、多くの電子デバイスの主要な材料になると考えられる。

本研究に先立って行った事前の準備研究では、基板の高品質化が進んでいる GaN 半導体を用い、粒子検出の基本素子となるショットキーダイオードを試作し、基板から検出器までの製作技術を確認し、さらに簡単な特性評価を行いながら、放射線検出器材料としての GaN の有用性に対する裏付けを得てきた。一方、AlGaIn は、GaN に比べてさらにバンドギャップが大きく、高温での安定動作性に優れた検出器開発の可能性がある。また In 系窒化物は、平均原子番号が大きいいため、高い阻止能を持つことから、放射線に対して高い感度を持つ検出器材料としての期待がある。

2. 研究の目的

本研究では、まず、これまで着目して基礎研究を進めてきた GaN 半導体を用いた放射線検出器の開発をさらに発展させ、基板の高品質化に基づく高性能実用粒子検出器を開発する。現状ではデバイス材料として実用可能な基板は n 型半導体のみであり、そこで、製作する検出器素子は表面障壁型 (ショットキーダイオード型) とする。作製した検出器に対して、半導体素子としての電気的特性や、放射線に対する種々の特性 (エネルギー分解能、温度特性、電荷収集効率等) を系統的に調べ、検出器としての性能評価を重ねながら実用検出器への展開を図る。

また、GaN 以外の窒化物半導体による放射線検出器開発の可能性を検討する。ここでは AlGaIn および In 系窒化物を用いて検出器の基本となるダイオード素子を作製し、GaN 検出器と同様の特性評価を行い、それぞれの材料に

おける検出器としての特徴を明らかにし、用途や使用環境に合わせた有用性を検証する。

さらに、それら窒化物半導体検出器に対して各種放射線を入射して、その積算照射量と特性変化の関係を定量的に調べ、放射線耐性に優れていることを実証する。

以上より、窒化物半導体の特性を総合的に判断し、Si など既存の半導体検出器との比較も多角的に行い、素粒子実験分野での実用化の観点から、それぞれの窒化物半導体の特徴的な優位性を明らかにする。その上で、実用化に向けた開発のための指針を得て、素粒子実験分野での使用を見据えた検出器開発の基礎を築く。

3. 研究の方法

本研究では、GaN、AlGaIn、InGaIn それぞれの材料によって、検出器の基本素子となるダイオードを作製した。従来の GaN 素子には、導電性を持たないサファイヤ基板上に結晶成長させた基板が標準的に用いられてきた。この場合、素子となるダイオード等は片面に二種類の電極を持つ構造で、複雑なプロセスを必要とし、さらに検出器として用いる場合には、検出領域も制限されるという欠点があった。そこで本研究では、シリコンカーバイド (SiC) と GaN の結晶構造的な整合性に着目し、サファイヤの代わりに、導電性を持つ SiC 上に成膜した基板を用いた。この GaN/SiC 基板を用いることで、両面に電極を持つ構造が可能となり、電気的特性に優れ、低コストでかつ放射線に対して感度の高い検出器が実現できる。図 1 に本研究で作製した GaN ショットキーダイオード試料を示す。ショットキー電極には Ni/Au、オーミック電極には Ti/Au を用いている。また、本研究では、u-GaN 層の厚さが 1800nm と 900nm の二種類を用いた。

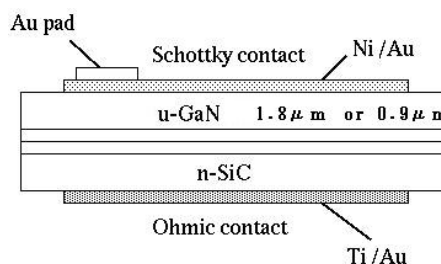


図1 GaN ショットキーダイオード

一方、AlGaIn と InGaIn 半導体についても、GaN と同様に n-SiC 上に成膜した基板を用いてダイオードを作製した。現状使用可能なものとして、AlGaIn は厚さ 500nm、InGaIn は 80nm であった。

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。

(1) ダイオード素子の特性測定

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、基板の不純物濃度 (抵抗) を調べた。これによって、GaN 基板品質について評価した。また、これら電気的特性を、環境温度を変えながら測定し、ダイオード動作の温度依存性を調べた。これによって、ワイドギャップ半導体の優位性と考えられている高温での安定動作性を検証した。さらに、光応答性、分光感度特性から、フォトダイオードとしての性能を調べ、作製したダイオードの品質評価を総合的に行った。

(2) α 線に対する検出性能評価

荷電粒子に対する検出性能を評価するために、 ^{241}Am 線源からの α 線 ($E \sim 4.1\text{MeV}$) をダイオードに入射し、信号の電荷分布 (ADC 分布)、エネルギー分解能、出力信号とダイオードへの印加電圧との相関、電荷収集効率について評価した。また、UV パルス光 ($\lambda = 355\text{nm}$) 入射に対しても同様の評価を行い、放射線検出器としてのパルス信号に対する動作性能を多角的に検証した。

(3) 陽子ビーム照射による放射線耐性評価

ダイオード素子に 70MeV の陽子線を照射量 $10^{12} \sim 10^{16}\text{p/cm}^2$ の範囲で入射し、照射前後の特性の変化から劣化を評価した。放射線損傷による検出器の性能劣化としては、暗電流の増加や生成電荷 (信号電流) の減少、さらに、これらに起因するエネルギー分解能および検出効率の低下が想定される。このうち本研究では、I-V 特性および ADC 分布のから、暗電流値の増加、耐圧の変化、エネルギー分解能の変化について、積算放射線照射量による変化を調べた。

4. 研究成果

(1) ダイオード素子の各種特性

図 2 に GaN ダイオード (u-GaN 層 1800nm) の I-V 特性を示す。この結果より、暗電流が数 nA/cm^2 程度で、逆バイアス耐圧が -50V 以下であることがわかる。また環境温度が $\sim 40^\circ\text{C}$ 程度までの範囲では暗電流の極端な増加は観られず、ワイドギャップ半導体の優位性が裏付けられた。図 3 に AlGaIn ダイオードの I-V 特性を示す。これより、逆バイアス耐圧が数 V 程度で暗電流が数 A/cm^2 であることがわかった。現状、暗電流は GaN 基板に比べて大きく、耐圧も小さいが、温度依存性については、高温での明確な安定性が確認されている。なお、InGaIn ダイオードについても、

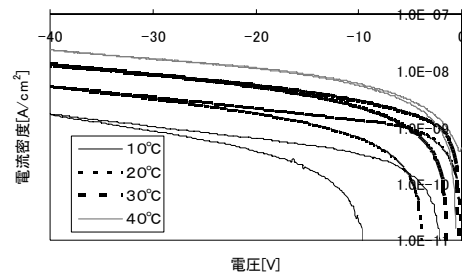


図 2 GaN の I-V 特性

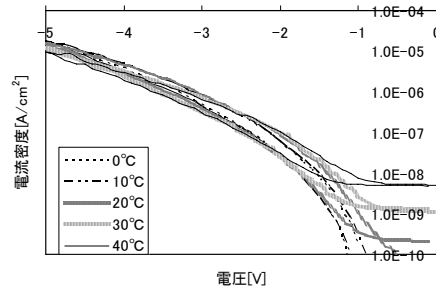


図 3 AlGaIn の I-V 特性

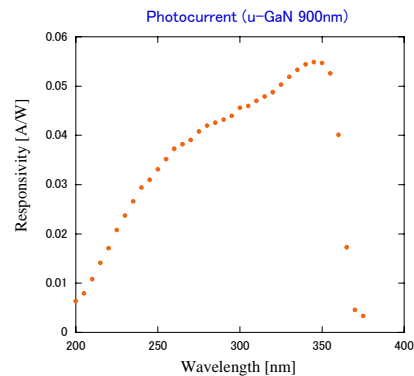


図 4 GaN の分光感度曲線

AlGaIn と同程度の暗電流と耐圧であった。

図 4 に GaN の分光感度曲線を示す。この結果から、紫外光に対する高い感度が示されるとともに、GaN のバンドギャップに対応する波長でのカットオフが確認できた。AlGaIn および InGaIn ダイオードにおいても、それぞれのバンドギャップに対応した波長でのカットオフと高い光応答性が確認された。

(2) α 線に対する性能評価

図 5 に α 線に対する GaN の ADC 分布を示す。印加逆バイアスを大きくすることで放射線に対する有感層となる空乏層の幅が広がり、信号電荷 (ADC 分布のピーク) が大きくなっていることがわかる。また、同一の測定系において、市販 Si ダイオードの ADC 分布を測

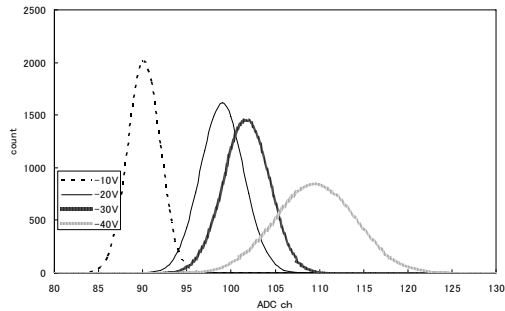


図5 GaN の α 線に対する ADC 分布

定し、電荷収集効率を評価したところ、素子によるばらつきはあるものの、対Si比40-80%程度という結果が得られた。一方、ダイオードへの印加電圧を一定にし、環境温度を0-50°Cの範囲で変えながら、ADC測定を行った。その結果、この温度範囲ではADC分布のピーク幅（エネルギー分解能）に有意な変化は観られなかった。これは、スペクトロメータとしてGaN検出器が高温でも動作することの裏付けとなるものである。

本研究で使用したGaN基板の不純物濃度は、C-V測定の結果から、 10^{17} - $10^{18}/\text{cm}^3$ 程度と見積もられている。このことから、電子線やX線を含む各種放射線に対する感度向上のためには、基板の厚膜化と高抵抗化が今後の課題である。なお、本研究で用いたAlGaInおよびInGaIn基板については、膜厚が限られていたため十分な信号雑音比が得られず、放射線に対する詳しい検出性能評価は行っていない。これらの基板についても、検出器材料としての実用化のためには厚膜化が必須である。

(3) 放射線損傷耐性評価

GaNおよびAlGaInダイオードに対して、エネルギー70MeVの陽子線を照射し、照射前後のI-V特性を測定し、暗電流値および耐圧の変化から劣化を評価した。図6に陽子線照射前後のGaInダイオードのI-V特性を照射量ごとに示す。まずGaInダイオードでは、 $10^{15}\text{p}/\text{cm}^2$ 程度までの照射量に対しては暗電流の有意な増加および耐圧の減少は確認されなかった。さらに $10^{16}\text{p}/\text{cm}^2$ 程度まで照射した場合には10~1000倍程度の暗電流の増加が観られた。ただし、この暗電流増加には個体差があり、従来Si材料で問題となっていたような極端な劣化が観られないものがほとんどであった。さらに、照射直後に暗電流が増加した試料において、照射後数ヶ月単位での経時変化を調べたところ、時間経過と相関のある暗電流値の減少が観測された。このことは、放射線照射によって生じた欠陥が回復した可能性を示唆するものであり、非常に興味深い結果である。

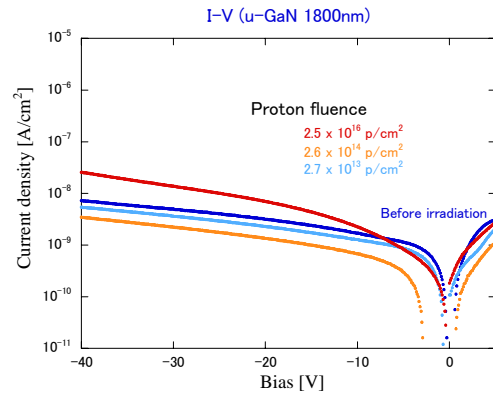


図6 陽子線照射前後のGaInのI-V特性

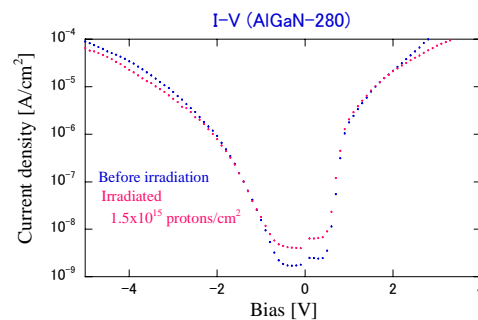


図7 陽子線照射前後のAlGaInのI-V特性

一方、AlGaInダイオードに対する同様の実験結果を図7に示す。ここでも $10^{15}\text{p}/\text{cm}^2$ 程度の照射量までは有意な暗電流の増加は確認されなかった。

放射線耐性については、今後、照射の際の条件を変えるなどした継続した調査が必要であるが、これまでの結果は、窒化物半導体の放射線耐性の高さを強く示唆するものとなっている。

以上の研究成果より、ワイドバンドギャップ窒化物半導体による放射線検出器開発の可能性が示された。また、同材料の持つ放射線損傷に対する耐性の高さが実証された。検出器としての実用化へ向けては、基板の高品質化に呼応した素子作製と特性測定を継続して行っていく必要がある。

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① S. Narita, Y. Yamaguchi, Y. Chiba, Y. Sakemi, M. Itoh, H. Yoshida, and J. Kasagi "Test of Radiation Hardness for GaN diode" CYRIC ANNUAL REPORT,

査読無, pp.14-17, 2008.

- ② S.Narita, Y.Yamaguchi, Y.Chiba, H.Yuki, H.Hinode, and J.Kasagi “Radiation Hardness Test of GaN Diode for Irradiation with High Energy Electron Beam” Research Report of Laboratory of Nuclear Science, 査読有, Vol.40, pp.31-35, 2008.

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① S.Narita, Y.Chiba, D.Ichinose, T.Hitora, E.Yamaguchi, Y.Sakemi, M.Itoh, H.Yoshida, J.Kasagi “Performance of GaN Ionizing Detector and Its Radiation Hardness” 16th Int. Workshop on Room Temperature Semiconductor X- and Gamma-Ray Detectors, Dresden, Germany, 2008.10.23
- ② 千葉祐宜、成田晋也、一瀬大介、山田弘、人羅俊美、山口栄一、酒見康寛、伊藤正俊、吉田英智、笠木次郎太 “Ⅲ族窒化物半導体素子の特性測定と放射線耐性評価” 平成20年度電気関係学会東北支部連合大会、日本大学、2008.8.21
- ③ 山口裕介、人羅俊実、足利義徳、更田誠、山口栄一、山田省二、笠木治郎太、結城秀行、日出富士雄、成田晋也、山田弘、千葉祐宜 “窒化ガリウム荷電粒子検出器の特性測定” 平成19年度電気関係学会東北支部連合大会、弘前大学、2007.8.23

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

- ① 名称：窒化ガリウム系半導体を用いた荷電粒子検出器
発明者：成田晋也、山口栄一、人羅俊実
権利者：岩手大学、同志社大学、ALGAN
種類：特許
特願 2008-231794、2008.9.10、国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 晋也

所属研究機関・部局・職名：

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号： 80322965

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし