

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656230

研究課題名(和文) 温度に依存しない感度特性を持つ500℃まで動作可能な炭化珪素紫外光検出器の実現

研究課題名(英文) Temperature independent SiC photodetector operating up to 500 degreeC

研究代表者

須田 淳 (Suda, Jun)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00293887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：500℃という高温でも動作可能な紫外線検出器は、発電・化学プラントのモニタリングやエンジンのリアルタイム燃焼制御用のセンサーなどに貢献しうるデバイスである。現在、光センサーに用いられているシリコン(Si)は禁制帯幅が1.12eVと小さいため200℃を超える動作は不可能である。本研究ではSiに比べて3倍の禁制帯幅、3.26eVを有する炭化珪素(4H-SiC)を用いて高温動作可能な紫外線検出器の実現を目指した。検出器の設計に必要なSiCの屈折率や光吸収係数などを明らかにし、また、検出感度低下の原因となるリーク電流の低減方法を確立し、500℃で動作可能なSiC光検出器の試作に成功した。

研究成果の概要(英文)：Ultra-violet photo detectors which can be operated up to 500 degreeC are needed for monitoring system of power plant and chemical plant. Such photo detectors are also expected to be used in engine combustion monitoring for automotive or aerospace field. Silicon (Si) which is mainly used in nowadays electronics cannot be operated at over 200 degreeC due to its small energy bandgap of 1.12 eV. Wide-bandgap semiconductor, silicon carbide (4H-SiC) is promising candidate for such photo detectors. In this study, we investigated optical properties of SiC, which are required for device design. We also found effective suppression method of leakage current which degrades sensitivity of photo detector. Based on these results, we successfully demonstrated operation of SiC photo detectors at 500 degree C.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：SiC センサー 光検出器 高温 厳環境 紫外線 pn接合

## 1. 研究開始当初の背景

500 という高温でも動作可能な紫外線検出器は、発電・化学プラントのモニタリングやエンジンのリアルタイム燃焼制御用のセンサーなどに貢献しうるデバイスである。現在、光センサーに用いられているシリコン (Si) は禁制帯幅が 1.12eV と小さいため 200 を超える動作は不可能である。本研究では Si に比べて 3 倍の禁制帯幅、3.26eV を有する SiC を用いて高温動作可能な紫外線検出器の実現を目指す。

SiC は次世代のパワースイッチングデバイス用半導体材料として注目を集めているが、その大きな禁制帯幅に注目して厳しい環境で動作する半導体、センサーデバイスとしての検討も進められている。光検出器に関しては試作および 300 程度の高温測定の報告例はあるが、リーク電流や感度特性の温度依存性などの詳細な検討や、500 以上の高温動作の報告例はまだない。

## 2. 研究の目的

本研究では 3.26eV という大きな禁制帯幅を有する炭化珪素 (4H-SiC) を用いることで、室温 ~ 500 で動作可能な紫外線検出器の実現を目指す。SiC の禁制帯幅を考えれば 500 動作の可能性はあるが、高温ではリーク電流が問題となる。また、吸収係数などの物性値の温度依存性に起因した高感度特性の大きな温度依存性の問題がある。本研究ではこの二つの問題の解決を目指す。

## 2. 研究の方法

- (1) 光検出器の設計のためには、屈折率や光吸収係数の波長依存性という光学定数が必要になる。さらに温度に対してそれがどのように変化するかを知る必要がある。本研究では、測定用試料を作製し、また、高温で測定が可能な測定装置を独自に設計・製作することでこれらの物性値を測定し、共通のデータとして論文発表することを目指す。
- (2) 本研究では p n 接合型のフォトダイオードの作製を目指している。p n 接合の電流電圧特性の温度特性はフォトダイオードの性能を決める重要な指標となる。(特に高温でのリーク電流は暗電流となりフォトダイオードの感度を制限することになる。)メサ型 p n 接合を作製して詳細にその温度特性を測り、リーク電流の起源を明らかにすると共に、その抑制方法を見つけ出すことを目指す。
- (3) これらを総合し、500 で動作可能な SiC フォトダイオードを作製し、その分高感度特性など特性を詳しく評価する。

## 4. 研究成果

屈折率の温度変化を室温から 500 の間で詳細に測定した。本研究で扱う 4H-SiC に加え、同じく大きなバンドギャップを有する窒化物半導体、GaN、AlN についても合わせて測定し、屈折率の温度変化の挙動を明らかにした。その結果は論文として公開している。

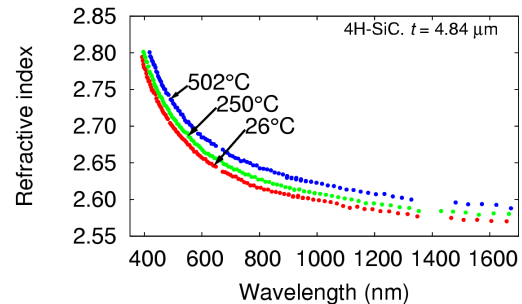


図 1 : 4H-SiC の屈折率の温度依存性

光吸収係数について、本研究で扱う 4H-SiC、また、ほぼ同じ物性をもつ 6H-SiC について、温度特性を詳細に評価した。間接遷移型半導体の励起子遷移のモデルとフォノンのエネルギーから測定結果をモデル式でフィッティングしてパラメータ抽出を行った。上記の屈折率と合わせて SiC を用いた光学素子や光デバイス設計のための重要なデータとなる。光吸収の温度依存性に関するデータは現在論文投稿済みで審査中である。

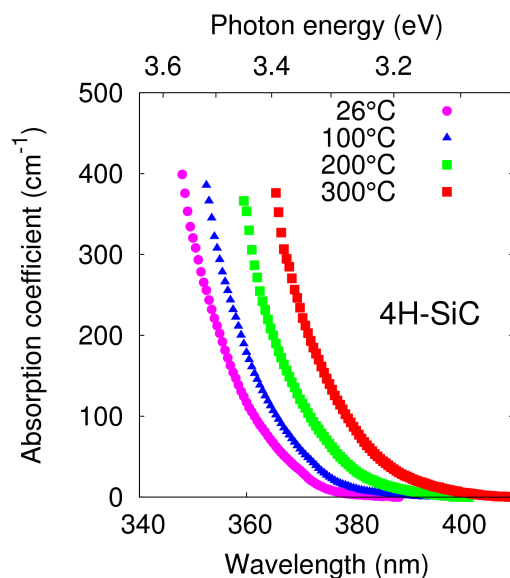
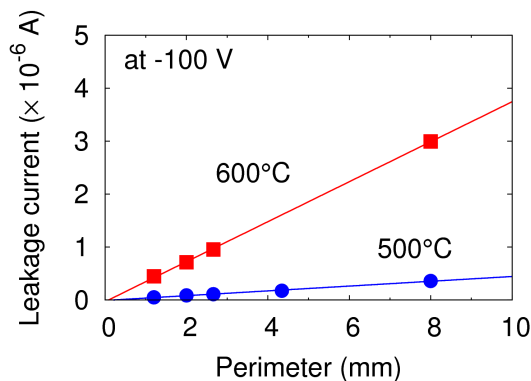


図 2 : 4H-SiC の光吸収係数の温度依存性

炭化珪素 (SiC) 紫外線検出器 (フォトダイオード、PD) の電流-電圧特性の温度特性の詳細な評価を行い、順方向および逆方向リーク電流のメカニズムについて検討を行った。これは高温動作における PD の性能向上を進める上での基礎となる。

順方向は室温付近では低電圧でn値は2.0、直列抵抗現れる直前の電圧でn値は1.0であった。高温になるにつれて、低電圧側でのn値が減少し、600 nmでは1.45まで減少した。拡散電流に比べ再結合電流の割合が減ったものと解釈できる。

逆方向は高温になるにつれてリーク電流が増大し特に200 nm以上では顕著であった。リーク電流のアレニウスプロットを行ったところ200 nm以上ではほぼ直線となり、その活性化エネルギーは1.1eVとなった。SiCのバンドギャップは3.2eVであり、およそその半分弱である。これは深い準位を介した電子-正対の生成の可能性が高い。昨年度の研究でこの逆方向リークは周辺長に比例しておりおそらくメサ構造の側面における表面



欠陥が関与しているものと思われる。

図3：逆方向リーク電流の周辺長依存性

側面のパッシベーションを熱酸化膜から熱酸化+NOアニールにすることでリーク電流が低減され、またそのアレニウスプロットの傾きも1.1eVから2.0eVに変化した。現時点ではこの2.0eVが何を反映しているのかは不明であるが、メサ構造側面の状態が変わったことがリーク電流低減につながったと言える。

最後にこれらの知見をもとにSiCフォトダイオードを作製した。500 nmまでの良好な動作を確認し、分高感度特性を得た。測定した物性値は波長範囲が限られていたために、その特性を完全にモデルから予測することはできていないが、定性的に一致する結果を得ている。この成果は2013年春の応用物理学会で発表しており、現在、論文にまとめているところである。

以上の通り、物性評価、電気的特性評価、リーク電流低減方法の提案、デバイスの試作実証と、当初の目標を達成することができた。今後の課題としては、短波長領域における光吸収係数の測定が挙げられる。現在は数十μmのSiC結晶の透過率測定から求めているが、短波長領域では吸収係数が大きくなり、透過率がほぼ0になってしまい測定が不可能で

ある。エリプソメトリなどの併用、試料を薄膜化して透過率を高めて測定可能にするなどの試みが必要である。

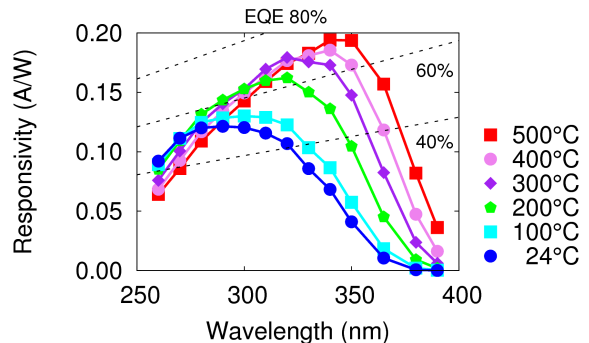


図4：作製したメサ型4H-SiC pn接合型フォトダイオードの分光感度特性の温度依存性

## 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 4件)

(1) N.Watanabe, T. Kimoto, and J. Suda, "Thermo-optic coefficients of 4H-SiC, GaN, and AlN for ultraviolet to infrared regions up to 500 degrees C", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51, 112101(2012). DOI:10.1143/JJAP.51.112101

(2) N.Watanabe, T. Kimoto, and J. Suda, "4H-SiC pn photodiodes with temperature-independent photoresponse up to 300 degrees C", Appl. Phys. Exp., 査読有, 5, 94101(2012). DOI:10.1143/APEX.5.094101.

(3) N.Watanabe, T. Kimoto, and J. Suda, SiCの光吸収係数の温度依存性に関する論文、投稿済み 現在 minor revision で改訂対応中  
(4) N.Watanabe, T. Kimoto, and J. Suda, SiCフォトダイオードの500 nm動作の報告論文、準備中

〔学会発表〕(計 1件)

(1) 渡辺直樹、木本恒暢、須田淳、"500 nm動作 SiC pn フォトダイオード", 応用物理学会、2013年3月28日、神奈川工科大学(2013).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://semi.con.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

須田 淳 (SUDA Jun)

京都大学大学院・工学研究科・准教授

研究者番号：00293887

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし