

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14203

研究課題名（和文）SiCバイポーラ動作時におけるキャリア移動度の評価手法確立

研究課題名（英文）Evaluation method of carrier mobility in SiC bipolar devices

研究代表者

浅田 聡志（SATOSHI, Asada）

一般財団法人電力中央研究所・エネルギー変換・エレクトロニクス研究本部・主任研究員

研究者番号：70870509

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：半導体素子であるバイポーラトランジスタの電気特性から、材料物性値（真性キャリア密度・バンドギャップ）を導出する新手法を考案した。炭化ケイ素（SiC）に対して本手法を適用することで、SiCの上記の物性値の導出に成功した。従来手法により得られる値と新手法により導出した値とを比較することで本手法の妥当性を確認した。また、導出過程にもとづいてSiCの物性値の見積り誤差を明示することで、本手法により求められる物性値の誤差範囲を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体材料の物性値を明らかにすることは、学術的に重要であるのみならず、半導体デバイスの高精度な電気・光学特性シミュレーションや、それにもとづくデバイス設計・性能向上に必須である。昨今では、脱炭素の実現にむけてSiCパワーデバイスの性能向上が強く求められており、本研究で得られた知見はその社会的要請に資する。また、本研究で確立した手法は他材料にも適用可能な普遍的な手法となる。以上のように本研究の成果は学術・産業応用の両方に寄与する。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new method to derive material properties, including an intrinsic carrier density and bandgap, from electrical characteristics of a bipolar transistor, which is a semiconductor device. The material properties of Silicon Carbide (SiC) were successfully obtained by applying the new method to the SiC. The validity of the derived values was confirmed by comparing the values determined by a conventional method. The error range of the property values of SiC was also clarified based on the derivation process.

研究分野：パワー半導体

キーワード：炭化ケイ素（SiC） バイポーラトランジスタ 少数キャリア移動度 真性キャリア密度 バンドギャップ

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

炭化ケイ素(SiC)パワーデバイスは、低損失な電力変換を実現できる半導体デバイスとして注目されており、耐電圧0.6 - 3.3 kV以下のものは既に実用が始まっている。5 kV以上の高耐圧域においては、少数キャリア注入(図1)により耐圧維持層を低抵抗化できるバイポーラ型デバイスの活用が期待されており、デバイス高性能化に向けた研究開発が進んでいる。

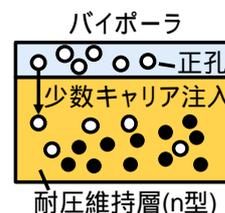


図1:バイポーラ型デバイスの耐圧維持層

SiCバイポーラデバイスのシミュレーションや動作解析においては、SiCの真性キャリア密度や、耐圧維持層に注入された少数キャリアの移動度が明らかでないことが課題の一つとなっている。これらの物性値は、デバイスシミュレーションや、それに基づくデバイス設計を行う上で必須のパラメータであり、これらの値の正確度の向上が求められている。

SiCの真性キャリア密度は、SiCの大きなバンドギャップに起因して値が極めて小さく、直接的に計測することが困難である。そのため、光吸収実験およびサイクロトロン共鳴実験により測定されたバンドギャップと有効状態密度の値を用いて、理論式に基づいて導出手法がとられている[1]。しかし、これらの実験は低温(光吸収実験: < 300 K、サイクロトロン共鳴実験: < 10 K)で実施され、特に室温を超える温度における真性キャリア密度の正確度は不明瞭となっている。また、少数キャリア移動度に関しては、導出手法がまだ確立されておらず、新たに考案する必要がある。

2. 研究の目的

半導体素子であるバイポーラトランジスタ(BJT)の電気特性から少数キャリア移動度もしくは真性キャリア密度を導出手法を提示する。SiCに対する本手法適用の可否を確認するとともに、本手法によりSiCの少数キャリア移動度ならびに真性キャリア密度を導出する。この値と従来手法により得られる値とを比較することで、新たな導出手法で得られた値の妥当性を確認する。また、新手法により導出したSiCの真性キャリア密度からバンドギャップを見積り、先行研究の結果[1]と比較して値の妥当性を確認する。

3. 研究の方法

少数キャリア移動度ならびに真性キャリア密度の新たな導出手法として、npn型BJTを利用して実験的に導出する方法を考案した。BJTのコレクタ電流は、ベース層に注入された少数キャリア(電子)の拡散によって律速される(図2)、その大きさは少数キャリア移動度と、ベース膜厚、真性キャリア密度、ベース層における正孔密度で近似的に決まる。ベース膜厚は実測が可能で、ベース層における正孔密度は半導体統計に基づいて算出できるため[1,2]、少数キャリア移動度と真性キャリア密度のいずれかが定めれば、コレクタ電流を評価することで、他方を導出することができる。

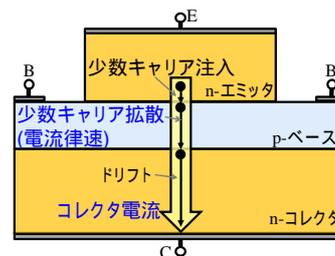


図2: npn型BJTのコレクタ電流

4. 研究成果

(1) デバイス構造設計

本導出手法においては、BJTのコレクタ電流の大きさが、少数キャリア移動度と、ベース膜厚、真性キャリア密度、ベース層における正孔密度で近似的に決まることを用いている。この近似が成立するためには、通電時に、エミッタからベースへ注入された電子の密度分布が、ベース層において直線的に分布する必要がある([3], 図3)。ベース層における電子密度分布は、電子拡散長よりもベース膜厚が薄い場合に直線的となる。そのため、ベース膜厚を薄く設計する方が、本手法に適すると考えられるが、一方で薄くしすぎると、pn接合(エミッタ/ベースまたはベース/コレクタ接合)から伸びる空乏層の影響が大きくなり、移動度の見積り誤差が大きくなる。そこで、デバイスシミュレータ(TCAD)を用いてBJTの電気特性およびベース層内のキャリア密度分布を解析することで、本手法に適するSiC BJTのベース膜厚を導出した。その結果、ベース膜厚が2-5 μmの範囲であれば、ベース層のキャリア密度分布が直線的に分布し、移動度導出の際には空乏層による見積り誤差が小さくなることが分かった。

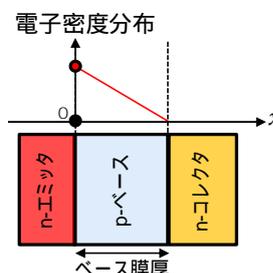


図3: ベース層における電子密度分布[3]

(2) デバイス作製

シミュレーションにより得られた知見をもとに、SiC BJT を作製した ([3], 図4)。各層の膜厚およびドーピング密度は、二次イオン質量分析 (SIMS) 測定により得た。エミッタ幅は、ベース拡がり抵抗の影響 [4] を緩和するために通常は 10 μm 程度で設計するが、本手法では低電流域を評価・解析することからベース拡がり抵抗の影響は無視できるため、120 μm と大きく設計・作製した。エミッタ幅を大きくすることで、動作面積の見積誤差や、エミッタメサ側壁における電界集中などの影響を小さくできる。

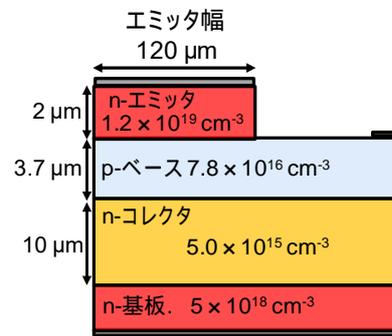


図4: 作製した SiC BJT のデバイス構造[3]

(3) 電気特性測定

作製した BJT のコレクタ電流のベース電圧依存性を 294 - 595 K において測定した結果を図5の実線に示す [3]。破線は、各温度において、理想因子 η を 1.0 と仮定して算出した電流 - 電圧特性である。実験値と計算値は、低電流域において一致しており、測定したコレクタ電流の低電流域の理想因子が 1.0 であることを示す。これはコレクタ電流が、ベース層での電子拡散のみで支配されていて理想的な電気特性として解析できることを表し、考案した解析手法が適用可能であることを示す。

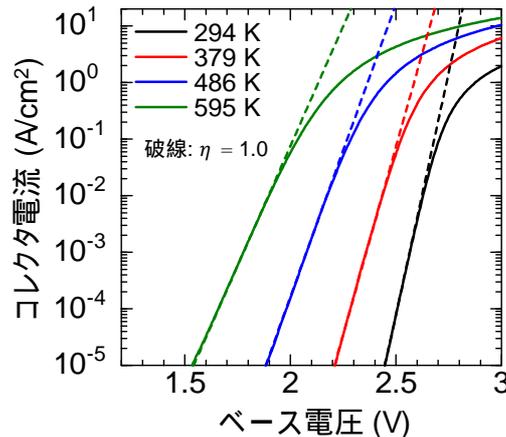


図5: 作製した BJT の電流-電圧特性[3]

(4) 少数キャリア移動度の導出

ベース層における電子密度分布が直線近似できる場合、少数キャリア移動度とコレクタ電流は、以下の関係式で表される。

$$\mu_n = J_{C0} W_B p_B / k T n_i^2$$

ここで、 μ_n は少数キャリア移動度、 J_{C0} は印加電圧が 0 V におけるコレクタ電流、 W_B はベース幅、 p_B はベース層における正孔密度、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 n_i は真性キャリア密度である。 J_{C0} は図5に示す測定結果から決定でき、 W_B は 3.7 μm (図4) である。これらの値と、先行研究 [1, 2] から得られる p_B および n_i を用いることで少数キャリア移動度の温度依存性を導出した結果を図6に示す。得られた値は、294 K で 3000 cm^2/vs を超える値となっており、この値は、先行研究でホール効果測定により求められた低ドーピング密度 ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度) n 型 SiC 層中の電子移動度 (室温で 1000 cm^2/vs 程度, [5]) よりも遥かに高く不自然である。

本手法で導出した少数キャリア移動度が高い値を示す要因は、真性キャリア密度の見積誤差に起因すると考える。本手法において導出される少数キャリア移動度は、真性キャリア密度の値に強く依存するため、用いる真性キャリア密度の値が正確でない場合、得られる少数キャリア移動度の見積誤差も大きくなる。SiC における真性キャリア密度の値は上述の通り、極低温 (10 K 程度) 以上の温度では未だ正確な値は得られていない。よって、真性キャリア密度の正確な値が判明しない限り、本手法では少数キャリア移動度を高精度に導出することが困難であることが分かった。

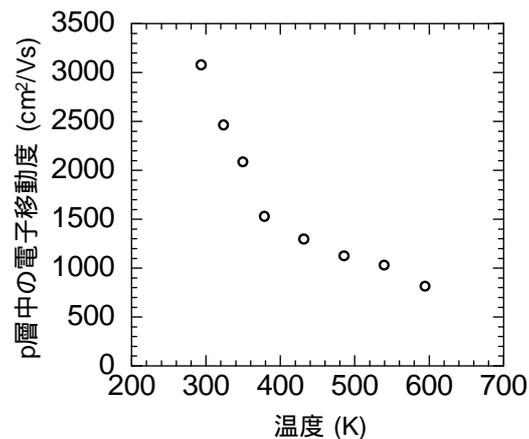


図6: 新手法で導出した少数キャリア移動度

(5) 真性キャリア密度の導出

(4)の結果を受け、少数キャリア移動度を仮定することで、式を用いて真性キャリア密度の導出を試みた。式を用いると、少数キャリア移動度 μ_n およびベース層の正孔密度 p_B を仮定することで、測定したコレクタ電流から真性キャリア密度 n_i を導出できる。本研究では、n型SiC層中の電子移動度に関する知見[5]をもとにp層中の電子移動度を仮定した。その際、少数キャリア移動度の値が取り得る範囲を考えるため、pベース層中の電子が、(i)不純物散乱を受けない場合、(ii)イオン化したアルミニウム不純物に散乱を受ける場合、(iii)イオン化したアルミニウム不純物および正孔に散乱を受ける場合、の3つのケースを仮定した。

また、ベース層の正孔密度の値が取り得る範囲についても考慮した。ベース層の正孔密度は、アルミニウム原子のイオン化エネルギーで決まるが、そのイオン化エネルギーは、およそ200 meV程度と正確には分かっていない[2]。そこで本研究では、先行研究[2]を参考に、イオン化エネルギーを190 - 220 meVの範囲で仮定し、ベース層の正孔密度の値が取り得る範囲を得た。

少数キャリア移動度とベース層の正孔密度に関する以上の仮定をもとに、式より求められる真性キャリア密度の値の最大値($n_{i,max}$)、中間値($n_{i,mid}$)、最小値($n_{i,min}$)を見積もった結果を図7のシンボルに示す[3]。少数キャリア移動度および正孔密度の見積誤差に起因して、真性キャリア密度にも誤差が生じている。挿入図は、見積誤差の温度依存性を表している。見積誤差は、294 Kにおいて43%となったが、温度上昇と共に低下し、595 Kにおいては8%程度となった。高温における見積誤差の縮小は、温度上昇と共に少数キャリア移動度およびベース層の正孔密度の誤差が小さくなることに起因する。

得られた真性キャリア密度の妥当性を評価するため、従来手法により得られる真性キャリア密度との比較を行った。従来手法においては、真性キャリア密度は有効状態密度およびバンドギャップにもとづいて以下の式で算出される。

$$n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT)$$

ここで、 N_C 、 N_V は、それぞれ電子および正孔の有効状態密度、 E_g はバンドギャップである。先行研究[1]においては、バンドギャップを3.26 eVとし、有効状態密度は、単一バンド構造を仮定して算出した値(図8、破線)が用いられた。この値を用いて、式により真性キャリア密度を算出した結果を図7の黒破線に示す。バンド端のみを考慮することで従来手法により得た値(黒破線)は、本研究で導出した値(シンボル)よりも小さくなり、双方に差が見られた。この差の要因は、従来手法における有効状態密度が、バンド端のみを考慮した値となっていることに起因する。

そこで、従来手法を用いて真性キャリア密度を求める際に、有効状態密度として複数バンドを考慮した値を用いることとした。複数バンドを考慮することで算出した有効状態密度を図8の実線に示す。複数バンドを考慮することで、特に正孔の有効状態密度は大きく増大した。複数バンドを考慮した有効状態密度を用いて、式により算出した真性キャリア密度を図7の赤破線に示す。得られた値は、BJTを用いて導出した値とよく一致した。高温でわずかに乖離が見られる要因は、従来手法を用いて真性キャリア密度を求める際に、バンドギャップを3.26 eVで一定と仮定し、温度依存性を考慮していないことに起因する。

以上により、BJTを用いた真性キャリア密度導出手法の妥当性が確認されるとともに、同手法により求められる真性キャリア密度の誤差範囲の評価結果を得た。また、従来手法を用いて真性キャリア密度を求める場合に有効状態密度を算出する際には、複数バンドを考慮する必要があることが分かった。

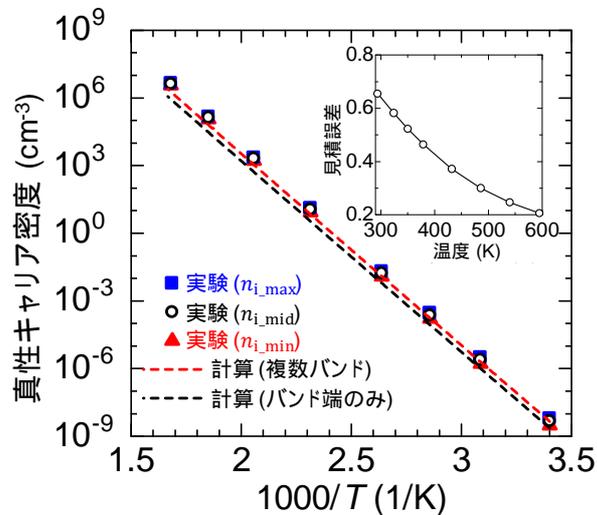


図7:真性キャリア密度の温度依存性[3]

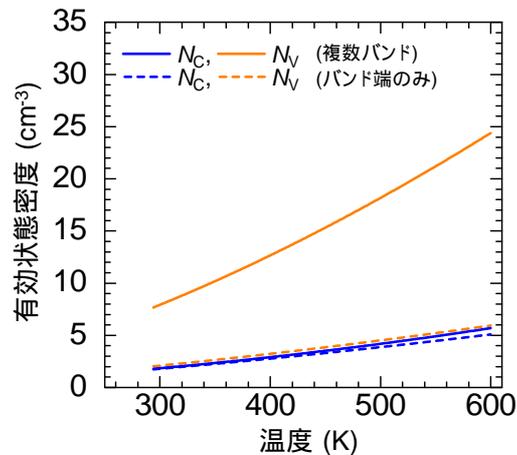


図8: 電子および正孔の有効状態密度[3]

(6) バンドギャップの導出

SiC BJT を用いて導出した真性キャリア密度の値 (n_{i_max} , n_{i_mid} , n_{i_min}) から、式 および複数バンドを考慮した有効状態密度を用いてバンドギャップを導出した結果を図9に示す。真性キャリア密度の見積誤差に起因してバンドギャップも誤差を有するものの、得られた値はバンドギャップの温度依存性の経験式で見積もられる値[1]とよく整合している。このことは、本手法によるバンドギャップの導出の妥当性を示す。

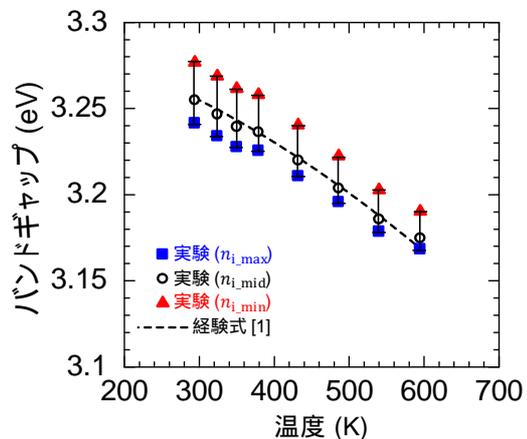


図9: バンドギャップの温度依存性[3]

<引用文献>

- [1] T. Kimoto and J. A. Cooper, "Fundamentals of Silicon Carbide Technology" (John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2014).
- [2] S. Contreras, L. Konczewicz, R. Arvinte, H. Peyre, T. Chassagne, M. Zielinski, and S. Juillaguet, Phys. Status Solidi 214, 1600679 (2017).
- [3] S. Asada, K. Murata, H. Tanaka, and H. Tsuchida, Journal of Applied Physics 134, 234502 (2023).
- [4] S. Asada, T. Kimoto, and J. Suda, IEEE Trans. Electron Devices 64, 2086 (2017).
- [5] J. Pernot, W. Zawadzki, S. Contreras, J. L. Robert, E. Neyret, and L. Di Cioccio, J. Appl. Phys. 90, 1869 (2001).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoshi Asada, Koichi Murata, Hajime Tanaka, and Hidekazu Tsuchida	4. 巻 134
2. 論文標題 Experimental determination of intrinsic carrier density in 4H-SiC based on electron diffusion current in an npn bipolar junction transistor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 234502-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0180737	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 浅田 聡志, 村田晃一, 土田秀一
2. 発表標題 トランジスタ構造を用いて導出した4H-SiCの真性キャリア密度
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Asada, Koichi Murata, Hajime Tanaka, and Hidekazu Tsuchida
2. 発表標題 Intrinsic carrier density in 4H-SiC obtained from diffusion current in bipolar junction transistor
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅田 聡志, 村田晃一, 田中一, 土田秀一
2. 発表標題 両極性トランジスタを用いて導出した4H-SiC の真性キャリア密度
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 少数キャリアの移動度の導出装置、導出プログラム、導出方法及び品質評価方法	発明者 浅田聡志	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2022-189688	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------