

一般セッション(口頭講演) | 15 結晶工学：15.6 IV族系化合物 (SiC)

2025年3月14日(金) 13:00 ~ 15:45 皿 K402 (講義棟)

**[14p-K402-1~9] 15.6 IV族系化合物 (SiC)**

児島 一聡(産総研)

13:00 ~ 13:30

[14p-K402-1]

[第46回優秀論文賞受賞記念講演] SiCパワーデバイスにおける高エネルギーイオン注入による積層欠陥拡張抑制

○原田 俊太<sup>1</sup>、坂根 仁<sup>2</sup>、三井 俊樹<sup>3</sup>、加藤 正史<sup>3</sup> (1.名大、2.住重ATEX、3.名古屋工業大学)

## ◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[14p-K402-2]

4H-SiCにおける基底面転位の収縮に表面が与える影響解明のための転位動力学解析

○平能 敦雄<sup>1</sup>、高橋 伸<sup>1</sup>、高橋 昭如<sup>1</sup> (1.東京理科大)

## ◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[14p-K402-3]

深い準位の評価を目的とした過渡容量解析におけるベイズ推定の適用

○(B)山中 孝太郎<sup>1</sup>、木本 恒暢<sup>1</sup>、金子 光顕<sup>1</sup> (1.京大工)

14:00 ~ 14:15

[14p-K402-4]

 $\mu$ -PCD法による4H-SiCウェハ欠陥周辺のライフタイムマッピングおよび減衰曲線の解析○若林 琢巳<sup>1</sup>、林 和志<sup>2</sup>、藤井 秀夫<sup>2</sup>、平野 貴之<sup>3</sup>、岡野 直樹<sup>3</sup>、先崎 純寿<sup>1</sup> (1.産総研、2.神戸製鋼、3.コベルコ科研)

## ◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[14p-K402-5]

電圧制御陽極酸化による蛍光4H-SiCポーラス加工条件の改善に関する研究

○(M1)高橋 直暉<sup>1</sup>、水野 大誠<sup>1</sup>、秋吉 翔太<sup>1</sup>、坂 卓磨<sup>1</sup>、上山 智<sup>1</sup>、竹内 哲也<sup>1</sup>、岩谷 素顕<sup>1</sup>、鈴木 敦志<sup>2</sup>、赤澤 絵里<sup>2</sup>、Ou Yiyu<sup>3</sup>、Ou Haiyan<sup>3</sup> (1.名城大理工、2.E&Eエボリューション、3.デンマーク工科大学)

14:45 ~ 15:00

[14p-K402-6]

ITO透明導電膜によるSiC/SiO<sub>2</sub>界面単一光子源の発光強度制御○(M2)武藤 隆太<sup>1,2</sup>、針井 一哉<sup>2</sup>、清水 麻希<sup>1</sup>、木菱 完太<sup>3</sup>、矢崎 結也<sup>3</sup>、相川 慎也<sup>3</sup>、大島 武<sup>2,4</sup>、土方 泰斗<sup>1</sup> (1.埼玉大理工研、2.QST、3.工学院大工、4.東北大院工)

15:00 ~ 15:15

[14p-K402-7]

P型4H-SiC溶液成長法における溶媒インクルージョンおよび結晶の不純物濃度分布の形成要因の分析

○伊藤 貴洋<sup>1</sup>、沓掛 健太郎<sup>1,2</sup>、原田 俊太<sup>1,2</sup>、宇治原 徹<sup>1,2</sup> (1.名大院工、2.名大未来研)

15:15 ~ 15:30

[14p-K402-8]

Al濃度 $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のp型4H-SiC CVDエピ膜での電気的特性と結晶性のオフ角依存性

○日高 淳輝<sup>1</sup>、成田 智哉<sup>1</sup>、岩槻 光栄<sup>1</sup>、梅内 滉武<sup>1</sup>、松浦 秀治<sup>1</sup>、紀 世陽<sup>2</sup>、江藤 数馬<sup>2</sup>、児島 一聡<sup>2</sup>、加藤 智久<sup>2</sup>、吉田 貞史<sup>2</sup> (1.大阪電通大、2.産総研)

---

15:30 ~ 15:45

[14p-K402-9]

Alドープ4H-SiC中の最近接ホッピング(NNH)の伝導キャリア～新しいNNH伝導機構モデルの提案～

○成田 智哉<sup>1</sup>、岩槻 光栄<sup>1</sup>、日高 淳輝<sup>1</sup>、松浦 秀治<sup>1</sup>、紀世 陽<sup>2</sup>、江藤 数馬<sup>2</sup>、児島 一聡<sup>2</sup>、加藤 智久<sup>2</sup>、吉田 貞史<sup>2</sup> (1.大阪電気通信大学、2.産総研)

---

## SiC パワーデバイスにおける高エネルギーイオン注入による 積層欠陥拡張抑制

### Suppression of Stacking Fault Expansion in SiC Power Devices by High-Energy Ion Implantation

名古屋大<sup>1</sup>、住重アテックス<sup>2</sup>、名工大<sup>3</sup> ○原田 俊太<sup>1</sup>、坂根 仁<sup>2</sup>、三井 俊樹<sup>3</sup>、加藤 正史<sup>3</sup>  
Nagoya Univ.<sup>1</sup>, SHI-ATEX<sup>2</sup>, NIT<sup>3</sup> ○Shunta Harada<sup>1</sup>, Hitoshi Sakane<sup>2</sup>, Toshiki Mii<sup>3</sup>, Masashi Kato<sup>3</sup>  
E-mail: harada.shunta.i5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

炭化ケイ素 (SiC) は、広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界、高い熱伝導率といった優れた物理特性を有し、次世代のパワー半導体材料として注目されている。その卓越した特性により、N700S 新幹線や電鉄車両、電気自動車などの社会実装が進んでいる。しかし、SiC には多くの結晶欠陥が存在しており、それが SiC パワーデバイスの広範な普及を阻む要因となっている。特に、SiC バイポーラデバイスにおいては、結晶欠陥に起因する順方向通電劣化 (バイポーラ劣化) が深刻な課題である。この劣化は、基底面転位 (BPD) を起点として積層欠陥が拡張することにより発生し、この拡張はキャリア再結合による促進された部分転位のすべり運動 (recombination-enhanced dislocation glide) によって引き起こされる。さらに、この現象は長時間の通電によって進行するため、デバイス作製時の検査では検出が困難であり、信頼性に大きな影響を与えることが懸念されている。このような SiC デバイスに特有の劣化現象は、量産性と高い信頼性が求められる車載用 SiC パワーデバイスの実用化において、大きな課題となっている。

我々は、順方向通電劣化が部分転位のすべりによって引き起こされることに着目し、転位のすべりを妨げることによって、通電劣化を抑制することに取り組んでいる [1-5]。高エネルギーのプロトン注入を行った結果、部分転位のすべりは抑制され、積層欠陥の拡張を抑制することができると明らかになった。また、高エネルギーのプロトン注入処理を施した結晶から作製されたデバイスでも順方向通電劣化の抑制が確認された。最近の研究では、複数のデバイスメーカーから、高エネルギーのプロトン注入が順方向通電劣化に有効であることが報告されており、SiC パワーデバイスの量産性と高信頼性向上に貢献することが期待される [6,7]。

講演では、高エネルギーイオン注入による積層欠陥拡張抑制 (Stacking Fault Knockdown by High Energy Ion Implantation: SF-KHII) 法の効果やメカニズムについて詳述する。

#### 【参考文献】

- [1] M. Kato, O. Watanabe, S. Harada, H. Sakane, Mater. Sci. Semicond. Process 175 (2024) 108264.
- [2] M. Kato, S. Harada, H. Sakane, Jpn. J. Appl. Phys. 63 (2024) 020804.
- [3] S. Harada, H. Sakane, T. Mii, M. Kato, Appl. Phys. Express 16 (2023) 021001.
- [4] M. Kato, O. Watanabe, T. Mii, H. Sakane, S. Harada, Sci. Rep. 12 (2022) 18790.
- [5] S. Harada, T. Mii, H. Sakane, M. Kato, Sci. Rep. 12 (2022) 13542.
- [6] K. Konishi, N. Watanabe, H. Okino, Y. Mori, A. Shima, ICSCRM2024 Book of Abstracts 565-566.
- [7] K. Ishibashi et al., ICSCRM2024 Book of Abstracts 541-542.

## 4H-SiC における基底面転位の収縮に 表面が与える影響解明のための転位動力学解析

### Dislocation Dynamics Analysis for Contraction of Basal Plane Dislocations near the surface in 4H-SiC

東京理科大学<sup>1</sup> °平能 敦雄<sup>1</sup>, 高橋 伸<sup>1</sup>, 高橋 昭如<sup>1</sup>

Tokyo University of Science<sup>1</sup>, °Atsuo Hirano<sup>1</sup>, Noboru Takahashi<sup>1</sup>, Akiyuki Takahashi<sup>1</sup>

E-mail: hirano.atsuo@rs.tus.ac.jp

【はじめに】パワー半導体材料である 4H-SiC の課題に、結晶中の基底面転位 (BPD: Basal Plane Dislocation) の存在がある。多くは貫通刃状転位へ変換される (BPD-TED 変換) [1]が、一部は残存しデバイス性能を低下させる[2]. 従って、変換メカニズムの解明は不可欠である。本研究では、変換現象の過程の 1 つである、BPD の部分転位対が表面付近で完全転位へ収縮する過程に着目する。これまで、原子シミュレーションである古典分子動力学法での解明が試みられたが、原子間ポテンシャルの再現性や扱える空間スケールに課題があった[3]. そこで本研究では、転位をモデリングし転位論に基づき転位の運動を解析する転位動力学法を用いた解明を行った。

【手法・結果】本研究では表面が部分転位対の平衡距離に与える影響を算出した。表面力  $t=0$  という境界条件を満たすために、「修正応力場」を算出し元の応力場に重ね合わせる (Fig. 1). これにより、表面が転位に与える影響を精度良く再現できる。二次元モデルでの解析の結果、部分転位対が表面に近づくほど平衡距離が小さくなった (Fig. 2). これは、転位が表面に近づくほど表面による修正応力が大きくなり、転位間に強い引力がはたらくためである。さらに本手法を三次元へと拡大し、実際の成膜環境に近いオフ角が付いたモデルで同様の解析を行った。その結果、表面付近で収縮が起りやすいという結果が得られた (Fig. 3). さらに、転位対の種類やオフ角によって、収縮の起りやすさが変わった。以上の結果は、表面近傍で部分転位対が収縮し、TED への変換が起りやすくなることを示唆している。

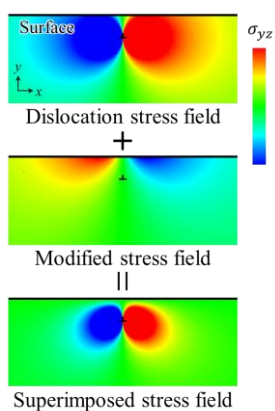


Fig. 1 Superposition of stress field

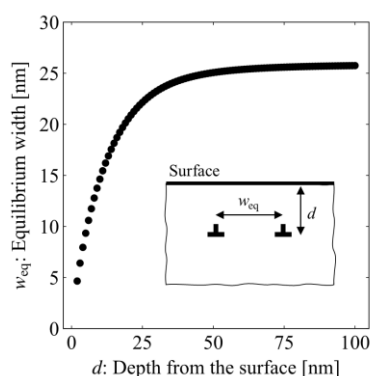


Fig. 2 Relationship between  $w_{eq}$  and  $d$  in 2D model

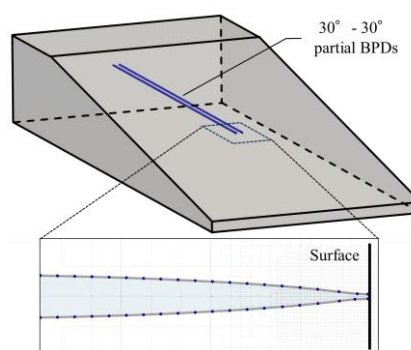


Fig. 3 Dislocations pair near the surface in 3D model

[1] S. Ha, et al., J. Cryst. Growth., 244, 257 (2002). [2] T. Kimoto, et al., IEEE IRPS, pp. 2A-1.1-2A-1.7 (2017).

[3] A. Hirano, et al., Comput. Mater. Sci., 231, 112588 (2024).

# 深い準位の評価を目的とした過渡容量解析におけるベイズ推定の適用

## Application of Bayesian Inference in Capacitance Transient Analysis for Characterization of Deep Levels

京大工<sup>1</sup> ○(B) 山中 孝太郎<sup>1</sup>, 木本 恒暢<sup>1</sup>, 金子 光顕<sup>1</sup>

Kyoto Univ.<sup>1</sup>, ○Kotaro Yamanaka<sup>1</sup>, Tsunenobu Kimoto<sup>1</sup>, Mitsuaki Kaneko<sup>1</sup>

E-mail: yamanaka@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

■背景・目的 半導体中の深い準位は、キャリアの捕獲中心として働き、半導体物性・デバイス特性を変化させる。したがって、深い準位の密度などを正確に決定することは極めて重要であり、その評価手法として Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) が広く利用されてきた。これは、対象となる深い準位に意図的にキャリアを捕獲させ、熱的な放出過程による接合容量の過渡変化を解析する手法である。しかし、従来の DLTS では、半導体中に存在する複数の深い準位のうち、過渡容量変化の時定数が近いものを分離して評価することが困難であった。近い時定数を持つ準位の分離に優れた手法として Laplace DLTS (LDLTS) が知られているが、高い時定数分解能を得るためには高い信号対雑音比 (SN 比) が必要であり [1], 実際に用いるのは必ずしも容易でない。そこで本研究では、近い時定数を持つ準位を分離して評価するために必要な SN 比 (以下、必要最小 SN 比とする。) の低減を目指し、過渡容量解析におけるベイズ推定の適用を提案する。

■LDLTS と提案手法の比較 LDLTS では、測定した過渡容量変化を逆ラプラス変換することによって時定数のスペクトルを得る。しかし、逆ラプラス変換は解を一意に決定することが困難な不良設定問題であり、雑音の影響が顕著である。一方、提案手法では、ガウス雑音を仮定した容量変化測定値モデルを用いてベイズ推定を行い、測定値を再現する時定数の確率分布 (事後分布) を得る。これにより、雑音の影響を考慮しつつ、統計的に適切な解析を行うことができる。

必要最小 SN 比の低減を検証するために、 $\tau_1 = 1\text{ s}$ ,  $\tau_2 = 2\text{ s}$  の 2 つの時定数を含む過渡容量変化を異なる SN 比でシミュレーションし、LDLTS および提案手法を適用した。なお、LDLTS には CONTIN 法 [2] を用いた。図 1 が LDLTS の結果、図 2 が提案手法の結果であり、ピークから得られた時定数を図中に併せて示した。 $\tau = 1, 2\text{ s}$  にピークが現れることが期待されるが、SN 比が 1 のときはいずれの手法でも 1 つのピークしか存在しない。一方、SN 比が 10 および 100 のときは、提案手法 (図 2) のみで 2 つのピークが存在し、得られた時定数もシミュレーションで仮定した時定数とよく一致している。SN 比が 1000 のときは LDLTS (図 1) でも 2 つのピークが存在するが、 $\tau_{1,\text{est}}$  については仮定した値と乖離しており、適切な解析ができたとは言いがたい。以上から、この条件では、必要最小 SN 比が約 100 倍改善したといえる。過渡容量変化に 2 つの時定数が含まれる場合について、その時定数比と必要最小 SN 比の関係を図 3 に示す。提案手法は必要最小 SN 比が LDLTS に比べて大幅に小さく、近い時定数を持つ準位の分離評価に有効であるといえる。

[1] L. Dobaczewski et al., *J. Appl. Phys.*, **96**, 4689–4728 (2004).

[2] S. W. Provencher, *Comput. Phys. Commun.*, **27**, 229–242 (1982).

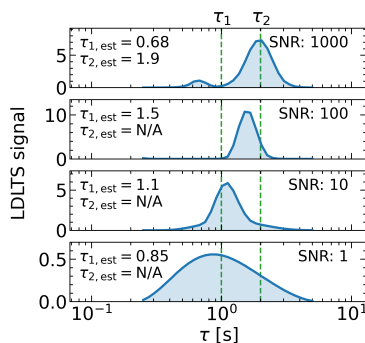


Fig. 1. LDLTS signals calculated using CONTIN algorithm[2] at different signal-to-noise ratio (SNR) values.

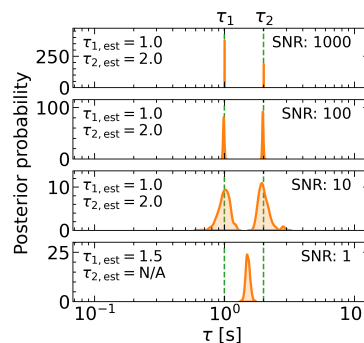


Fig. 2. Posterior probability distributions of time constants obtained with the proposed method at different SNR values.

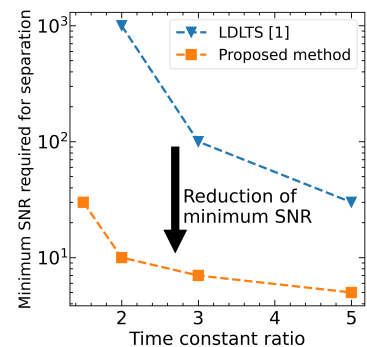


Fig. 3. Comparison of minimum SNR required to separate two time constants between LDLTS and the proposed method.

# μ-PCD 法による 4H-SiC ウェハ欠陥周辺のライフタイムマッピングおよび減衰曲線の解析

## Lifetime mapping and decay curve analysis around defects on 4H-SiC wafer using μ-PCD measurement

産総研<sup>1</sup>, (株)神戸製鋼所<sup>2</sup>, (株)コベルコ科研<sup>3</sup> °若林琢巳<sup>1</sup>, 林和志<sup>2</sup>, 藤井秀夫<sup>2</sup>,  
平野貴之<sup>3</sup>, 岡野直樹<sup>3</sup>, 先崎純寿<sup>1</sup>

AIST.<sup>1</sup>, Kobe Steel, LTD.<sup>2</sup>, Kobelco Research Institute, Inc.<sup>3</sup>, °Takumi Wakabayashi<sup>1</sup>,  
Kazushi Hayashi<sup>2</sup>, Hideo Fujii<sup>2</sup>, Takayuki Hirano<sup>3</sup>, Naoki Okano<sup>3</sup>, Junji Senzaki<sup>1</sup>

E-mail: Wakabayashi.takumi@aist.go.jp

SiC パワーデバイスにおいて、キャリアライフタイムは、性能および信頼性にかかわる重要なパラメータであり、基板およびエピ膜に存在する各種欠陥によって影響を受ける。これまで自由キャリア吸収(FCA)法によって、基板を含むエピ膜の深さ方向[1]および面内のライフタイム分布[2]が調べられている。本研究では、欠陥に着目し、マイクロ波光導電減衰(μ-PCD)法を用いて、SiC 基板面内のライフタイムマッピング像(LT 像)、減衰曲線の取得を行い、欠陥がライフタイムに与える影響と欠陥検知の可能性について検討した。

試料は、6 インチ n 型 4H-SiC 基板の上に 70μm のエピ膜を成膜したものを用いた。SICA88 によって欠陥が確認された箇所周辺を、μ-PCD 測定により評価した。μ-PCD 測定には波長 349nm の励起光を用い、信号強度がピーク値の 1/e となる時間までの傾きをライフタイムとして用いた。

Fig. 1(a), (b)に SICA88 によるフォトルミネッセンス(PL)像および μ-PCD による LT 像を示す。LT 像では、PL 像で得られた欠陥に対応するライフタイムの減少が観察された。Fig. 1(b)の①~③における減衰曲線を Fig. 2 に示す。減衰初期では、LT 像に対応してポリタイプインクルージョン(PI)における減衰曲線が最も大きな傾きをとるが、約 2μs 以降では、PI の減衰曲線の傾きが積層欠陥(SF)のものより小さくなっている。欠陥の種類によって減衰曲線の振る舞いが異なることから、減衰曲線およびライフタイムは、欠陥箇所の特定および識別に活用できる可能性がある。

謝辞：本研究は、つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)の共同研究プロジェクト下で実施された。

[1] K. Nagaya *et al.*, J. Appl. Phys. 128, 105702 (2020).

[2] 長屋他 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 11p-70A-9.

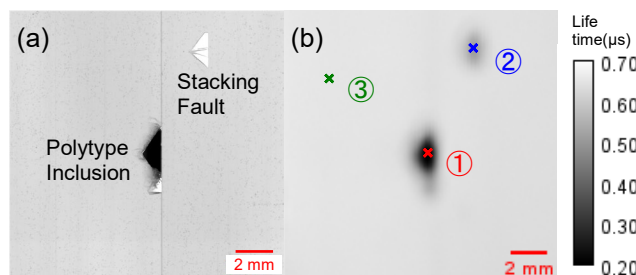


Fig. 1. (a)PL image. (b)μ-PCD lifetime image.

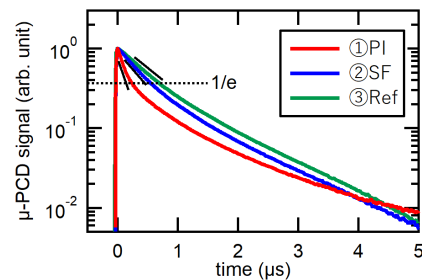


Fig. 2. Decay curve at defects and reference section.



## 電圧制御陽極酸化による蛍光 4H-SiC ポーラス加工条件の改善に関する研究 Study on improvement of fluorescent 4H-SiC porous processing conditions by voltage controlled anodic oxidation

○高橋 直暉<sup>1</sup>, 水野 大誠<sup>1</sup>, 秋吉 翔太<sup>1</sup>, 坂 卓磨<sup>1</sup> 上山 智<sup>1</sup>, 竹内 哲也<sup>1</sup>, 岩谷 素顕<sup>1</sup>,  
鈴木 敦志<sup>2</sup>, 赤澤 絵理<sup>2</sup>, Y.Ou<sup>3</sup>, H. Ou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名城大学理工学研究科、<sup>2</sup>E&E エボリューション、<sup>3</sup>デンマーク工科大学

○N. Takahashi<sup>1</sup>, T. Mizuno<sup>1</sup>, S. Akiyoshi<sup>1</sup>, T. Ban<sup>1</sup>, S. Kamiyama<sup>1</sup>, T. Takeuchi<sup>1</sup>, M. Iwaya<sup>1</sup>,  
A. Suzuki<sup>2</sup>, E. Akazawa<sup>2</sup>, Y. Ou<sup>3</sup>, H. Ou<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Meijo Univ., <sup>2</sup>E&E Evolution Corp. <sup>3</sup>Technical Univ. Denmark

E-mail: 243428027@ccmailg.meijo-u.ac.jp

【はじめに】B・N を SiC にドーピングした材料は蛍光 SiC と呼ばれ、580 nm の波長で発光する[1]。この結晶表面を陽極酸化法でエッチングし、ポーラス層を形成することで、460 nm の短波長発光を得ることができる。ポーラス層の形成は電荷量に依存するため、電流密度と酸化時間が重要な要素となる。本研究では、電圧制御を通じて電流密度と酸化時間の最適化を試みた。

【実験】試料には、4H-SiC 単結晶基板に近接昇華法を用いて B・N をドーピングした基板を使用した。電流密度を 1~3 mA/mm<sup>2</sup> に固定し、反応時間を 1~15 時間の範囲で変化させ、電流密度の時間依存性を検討した。実験では初期条件で設定した電流密度を維持するため、電圧を制御し固定した。時間経過により電流密度は最大 10%変動した。ポーラス層形成前後の試料に対し、He-Cd レーザー（波長 325 nm、強度 650 mW/cm<sup>2</sup>）励起による室温フォトルミネッセンス (PL) 測定を行い、発光強度比を算出し、最適なポーラス条件を検証した。

【結果】図 1 には、各電流密度における発光強度比の時間依存性を示す。電流密度が 1 mA/mm<sup>2</sup> の試料では、酸化時間の増加とともに発光強度比が増加した。一方、2 mA/mm<sup>2</sup> および 3 mA/mm<sup>2</sup> では、酸化時間が増加すると発光強度比は減少した。また、電流密度を 2 倍にし、反応時間を半減した条件では、発光強度比が低下し、単純に電流密度と酸化時間の積で決まるような関係とはならなかった。この結果は、基板ごとの抵抗率の違いの可能性も考えられるが、電流密度の増大に伴う過剰な反応によってポーラス層の表面付近が削られ、発光面積が減少したためと考えられる。今後、XPS や XRD によるポーラス層の構造評価が必要であり、その詳細については当日議論する。

[1] S. Kamiyama, et al. J. Appl. Phys. 99, 093108 (2006).

謝辞 :本研究の一部は文部科学省・私立大学研究ブランディング事業の援助により実施された。

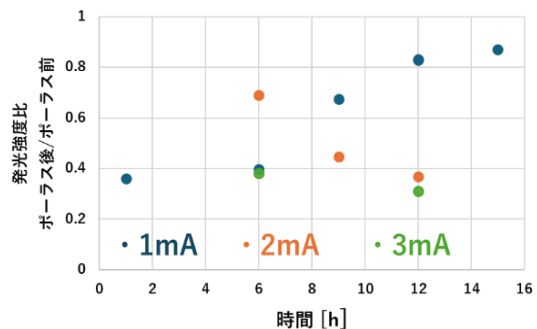


図 1 各電流における発光強度比の時間依存性

# ITO 透明導電膜による SiC/SiO<sub>2</sub> 界面単一光子源の発光強度制御

## Control of emission intensity of SiC/SiO<sub>2</sub> interfacial single-photon sources using ITO transparent conducting film

埼玉大理工研<sup>1</sup>, QST<sup>2</sup>, 工学院大工<sup>3</sup>, 東北大院工<sup>4</sup>, ○(M2) 武藤 隆太<sup>1,2</sup>, 針井 一哉<sup>2</sup>,  
清水 麻希<sup>1</sup>, 木菱 完太<sup>3</sup>, 矢崎 結也<sup>3</sup>, 相川 慎也<sup>3</sup>, 大島 武<sup>2,4</sup>, 土方 泰斗<sup>1</sup>  
Saitama Univ.<sup>1</sup>, QST<sup>2</sup>, Kogakuin Univ.<sup>3</sup>, Tohoku Univ.<sup>4</sup>, °Ryuta Muto<sup>1</sup>, Kazuya Harii<sup>2</sup>,  
Maki Shimizu<sup>1</sup>, Kanta Kibishi<sup>3</sup>, Yuya Yasaki<sup>3</sup>, Shinya Aikawa<sup>3</sup>, Takeshi Ohshima<sup>2,4</sup>,  
Yasuto Hijikata<sup>1</sup>

E-mail: r.muto.970@ms.saitama-u.ac.jp

### 1. はじめに

SiC 基板の熱酸化により SiO<sub>2</sub> と SiC の界面にできる結晶欠陥は、室温下でも高輝度な単一光子を発生し、発光を電氣的に制御できることから、量子暗号通信への応用が期待されている。この結晶欠陥（表面 SPS）の電氣的制御は、これまでに pn 接合を用いたデバイスに順/逆方向に電界を掛けた際の発光強度の変化が報告されているが[1]、少数の発光点に関する調査にとどまっている。そこで本報告では低蛍光の ITO 透明導電膜を用いたゲート電極から広範囲にわたって様な電界を掛け、フォトルミネッセンス (PL) 測定を行うことで、多数の発光点の発光特性の変化を調べた。

### 2. 実験および結果

本研究では、ゲート電極を ITO 透明導電膜としグラウンド電極を裏面に配置した 4H-SiC MOS キャパシタンス構造のデバイスを作製し、表面 SPS の発光強度のゲート電圧依存性を測定した。デバイスの作製方法は以下の通りである。n 型 4H-SiC (エピ膜厚 10.2 μm、キャリア濃度  $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、Si 面 4°オフ角) に対し、1200°Cでの O<sub>2</sub> 熱酸化 (時間 3.5 h)、1200°Cでの CO<sub>2</sub> アニール (時間 30 min)、で酸化膜を形成した (膜厚  $29 \pm 6 \text{ nm}$ )。なお、CO<sub>2</sub> アニールは過去の文献に基づき[2]、発光点の数を減らすために実施した。その後ゲート電極として SiO<sub>2</sub> 上に膜厚 100 nm の低蛍光 ITO 透明導電膜[3]を、基板の裏面に膜厚 100 nm の Al をスパッタ法により形成した。PL 測定は共焦点顕微鏡を用い、波長 532 nm 出力 0.7 mW のレーザーで励起し、室温で行った。

形成された ITO 透明導電膜の発する蛍光は SPS に比べて十分小さく、ITO 上からも明瞭な発光点を確認した。30 点の発光点について測定を行った結果、発光強度の電圧依存性は個々で異なることが分かった。Fig. 1. に典型的な 3 種類の発光点の 2 V ごとの発光強度の推移を示す。発光強度が最大になる電圧値は発光点によって異なるが、概ね -10 ~ +10 V 内に存在し、最大値から高/低電圧側に進むにつれ対称的に減少していた。このことから、表面 SPS の発光のオン/オフは 10 V 程度の電圧印加という低電力で実現でき、極性を持たないことが分かった。また、発光点のスペクトルについても測定を行った結果、数種類のスペクトル形状にグループ分けされた。講演会では、発光スペクトルの分類と発光強度のゲート電圧依存性との関連性についても発表する。

### 謝辞

本研究の一部は科研費(21H04553, 22H01517, 22K18292)及び JST A-STEP (JPMJTR22R)の支援によって行われた。

[1] S.-i. Sato et al., ACS Photonics 5, 3159–3165 (2018).

[2] T. Nakanuma et al., Appl. Phys. Lett. 123, 102102 (2023).

[3] M. Shimizu et al., Phys. Stat. Solidi A 220, 2200896 (2023).

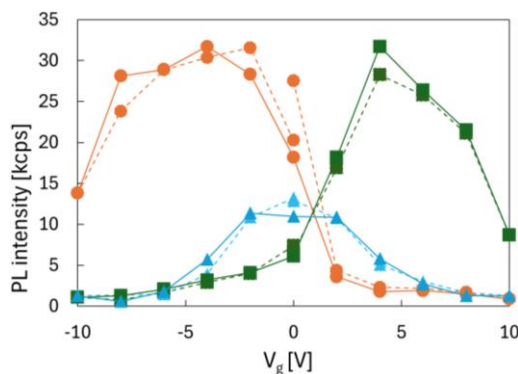


Fig. 1. Gate voltage dependence of PL intensity

Solid line: + sweep, dashed lines: - sweep

0 V → -10 V → +10 V → 0 V



## P 型 4H-SiC 溶液成長法における溶媒インクルージョンおよび 結晶の不純物濃度分布の形成要因の分析

Analysis of solvent inclusion and impurity concentration distribution  
in solution growth of p-type 4H-SiC

名大院工<sup>1</sup>, 名大未来研<sup>2</sup>

○伊藤 貴洋<sup>1</sup>, 沓掛 健太郎<sup>1,2</sup>, 原田 俊太<sup>1,2</sup>, 宇治原 徹<sup>1,2</sup>

Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ.<sup>1</sup>, IMASS Nagoya Univ.<sup>2</sup>

○Takahiro Ito<sup>1</sup>, Kentaro Kutsukake<sup>1,2</sup>, Shunta Harada<sup>1,2</sup>, Toru Ujihara<sup>1,2</sup>

E-mail: ito.takahiro.it@unno.material.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】4H-SiC の溶液成長法は、低転位密度の高品質な結晶が得られる。<sup>[1]</sup>一方で、成長中の結晶に溶媒が取り込まれる「溶媒インクルージョン」を生じるという課題がある。溶媒インクルージョンについてはこれまで主に結晶表面の観察による評価が行われてきたが、近年の大口径化、長尺化に伴い、結晶内部の溶媒インクルージョンについても評価が求められている。本研究では結晶内部の溶媒インクルージョンと結晶の不純物濃度について分析した。

【実験方法】58at%Si-40at%Cr-2at%Al の溶液で 30 時間結晶成長を行い、Al ドープの p 型 4H-SiC 結晶を作製した。作製した結晶をステップフロー方向に平行に切断し、両面研磨を行い、厚み約 100  $\mu\text{m}$  の薄片を作製した。薄片の裏から光を当て、透過像を光学顕微鏡で観察した。また、SIMS で結晶の不純物濃度分布を測定した。

【結果】Fig. 1 に溶媒インクルージョンの透過像を示す。光を透過していない点状の像が溶媒インクルージョンである。透過像を見ると、結晶には明るい層と暗い層が存在し、溶媒インクルージョンは明るい層のみ形成している。明るい層の形成要因を調べるため不純物濃度分布を測定すると、明

るい層で不純物濃度が低く、暗い層で不純物濃度が高いことが分かった。また Fig. 2 に結晶表面近傍の透過像を示す。明るい層がマクロステップのステップフロントに続いていることが確認できる。

【考察】以上の結果から、不純物濃度分布の形成機構として次のように考えられる。マクロステップでは不純物の取り込み濃度が小さく、マクロステップが進展した跡が明るい層となって形成された。マクロステップではステップ間距離が狭く、ステップ表面に不純物が十分吸着する前に次のステップに覆われてしまうため、不純物濃度が小さくなると考えられる。

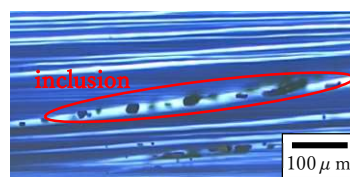


Fig. 1 transmission optical microscope image of solvent inclusion

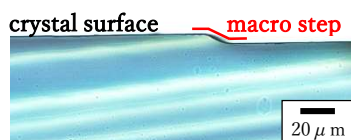


Fig. 2 transmission optical microscope image of macro step

### 【参考文献】

[1] S. Harada et al., MSF, Vols. 821-823 (2015) 3-8.

# Al 濃度 $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の p 型 4H-SiC CVD エピ膜での 電気的特性と結晶性のオフ角依存性

## Off-cut Angle Dependence of Crystalline Quality and Electric Properties in CVD-Grown Heavily Al-Doped p-Type 4H-SiC Epilayers with Al Concentration of $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

大阪電気通信大学<sup>1</sup>, 産総研 先進パワーエレクトロニクス研究センター<sup>2</sup>

○日高 淳輝<sup>1,a)</sup>, 成田 智哉<sup>1</sup>, 岩槻 光栄<sup>1</sup>, 梅内 滉武<sup>1</sup>, 松浦 秀治<sup>1,b)</sup>,

紀 世陽<sup>2</sup>, 江藤 数馬<sup>2</sup>, 児島 一聡<sup>2</sup>, 加藤 智久<sup>2</sup>, 吉田 貞史<sup>2</sup>

Osaka Electro-Communication University<sup>1</sup>, AIST Advanced Power Electronics Research Center<sup>2</sup>

○Atsuki Hidaka<sup>1,a)</sup>, Tomoya Narita<sup>1</sup>, Mitsuhide Iwatsuki<sup>1</sup>, Hiromu Umeuchi<sup>1</sup>, Hideharu Matsuura<sup>1,b)</sup>,

Shiyang Ji<sup>2</sup>, Kazuma Eto<sup>2</sup>, Kazutoshi Kojima<sup>2</sup>, Tomohisa Kato<sup>2</sup>, and Sadafumi Yoshida<sup>2</sup>

E-mail: h-atsuki@osakac.ac.jp<sup>a)</sup>, matsuura@osakac.ac.jp<sup>b)</sup>

**1. はじめに** SiC を用いたオン抵抗の低いパワーデバイスである n チャネル Insulated-Gate Bipolar Transistor の実用化のため, Al 濃度 ( $C_{Al}$ ) が  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上の p 型 4H-SiC の電気的特性を調べてきた[1-3].  $C_{Al}$  が  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  台前半の高濃度試料において抵抗率の温度依存性 ( $\rho(T)-1/T$ ) より, オフ角をもった n 型基板に成膜した試料において低温域の NNH 伝導と高温域の Band 伝導の間に温度依存性 (活性化エネルギー) の最も少ない伝導 (X 伝導と呼ぶ) 領域が現れた事を報告した[3]. 本研究では, オフ角の異なる n 型 4H-SiC 基板に Chemical Vapor Deposition (CVD) 法で成膜した試料について,  $\rho(T)$  の測定および結晶の周期構造の乱れとして格子面間隔の揺らぎを調べるため, X-ray diffraction (XRD) 測定を行った. (0004) 面の回折パターンからのピークから得られる C 面 (0001) 面間隔 ( $d_c$ ) と半値幅から得られる格子面間隔の分布 ( $\Delta d_c$ ) から C 面間隔の揺らぎの目安 ( $\Delta d_c / d_c$ ) を求め, 電気的特性と結晶性のオフ角依存性について議論する.

**2. 実験及び評価方法** [11-20] 方向に  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  と  $8^\circ$  の異なるオフ角をもつ C 面 n 型 4H-SiC 基板に, CVD 法で約  $90 \mu\text{m}$  厚の Al 単独ドープ p 型 4H-SiC エピ膜を同時に成膜した. 同様に 3 種類の Al-N コドープ p 型 4H-SiC エピ膜を同時に成膜した. SIMS 測定より, これら試料の  $C_{Al}$  は  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  であり, Al-N コドープ試料での N 濃度 ( $C_N$ ) は  $4.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  であった.  $\rho(T)$  は, 東陽テクニカ製 ResiTest8400 を用いて van der Pauw 法で求めた. また, 結晶面の C 面に平行である (0004) 面の XRD パターンは, リガク製 SmartLabXE を用いた XRD 測定により求めた.

**3. 実験結果と考察** 図 1 に Al 単独ドープ (Al doped) および N コドープ (Al-N doped) 試料の  $\rho(T)-1/T$  特性を示す. 全試料で 3 種類の線形性が得られ, 高温側で Band 伝導, 低温側で NNH 伝導と見られる以外に, 図中の X と示す中温域で NNH 伝導より活性化エネルギーの小さな伝導 (X 伝導) が現れた. X 伝導以下の低温域について, Al doped のオフ角  $2^\circ$  (○) よりも  $8^\circ$  (×) で, Al-N doped のオフ角  $2^\circ$  (●) よりも  $8^\circ$  (+) でそれぞれ  $\rho(T)$  が高く,  $\rho(T)$  のオフ角依存性を示した. しかし X 伝導の温度幅は Al doped 同士と Al-N doped 同士では同じであり, これはオフ角依存性の無い事が分かった. 次に, 各試料の  $\rho(T)-1/T$  から見積もった X 伝導と NNH 伝導の活性化エネルギー ( $\Delta E_X$ ,  $\Delta E_{NNH}$ ) を図 2 に示す. 枠線に示す様に Al doped と Al-N doped それぞれで活性化エネルギーのオフ角依存性が無い事が分かった. そして,  $\Delta E_X$  が全試料で  $5 \text{ meV}$  程度と非常に低い事が分かった. したがって, 同環境下で同時に成膜した試料であるにも関わらず X 伝導と NNH 伝導で  $\rho(T)$  のオフ角依存性がある事が分かった. 次に XRD 測定により結晶性のオフ角依存性について確かめた. 図 3 に XRD パターンより得られた  $\Delta d_c / d_c$  のオフ角依存性を示す. Al doped 試料 (○) についてオフ角の増加に伴い  $\Delta d_c / d_c$  が減少する事が分かった. これはオフ角が増加すると結晶の周期性の揺らぎが少なくなる事を示している. しかし Al-N doped 試料 ( $\Delta$ ) では Al doped 試料とは逆にオフ角増加に対して結晶の周期性の乱れが増加する事が分かった. 一方, オフ角  $2^\circ$  以外は N コドープのほうで結晶性が悪い傾向にある事が分かった.

**4. まとめ**  $C_{Al}$  が  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の p 型 4H-SiC 試料において, CVD 法で成膜されたオフ角  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  と  $8^\circ$  の試料の全てで  $\Delta E_X$  が  $5 \text{ meV}$  程度と非常に低い X 伝導が現れた. この X 伝導領域の温度幅や  $\rho(T)$  の  $\Delta E_X$  にオフ角依存性は無く,  $\rho(T)$  の値にはオフ角依存性のある事が分かった. そしてオフ角の増加に伴い, C 面の格子面間隔の揺らぎの目安である  $\Delta d_c / d_c$  について Al 単独ドープ試料では減少するが N コドープ試料では増加する事が分かった.

**謝辞:** 本研究の一部は, 科学研究費補助金 (基盤研究 C) 及び総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「次世代パワーエレクトロニクス/SiC 次世代パワーエレクトロニクスの統合的研究開発」(管理法人: NEDO) によって実施されました.

### 【参考文献】

- [1] H. Matsuura, et al.: APEX 11 (2018) 101302 1-5.  
[2] H. Matsuura, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 58 (2019) 098004 1-3.  
[3] A. Hidaka, et al.: Materials Science Forum. Vol.1004 (2020) 224-230.

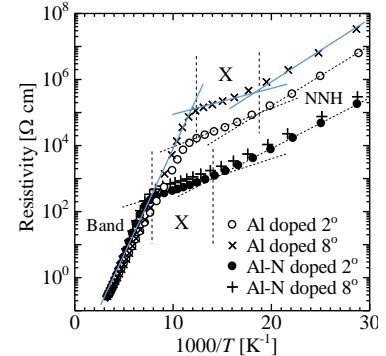


Fig.1.  $\rho(T) - 1/T$ .

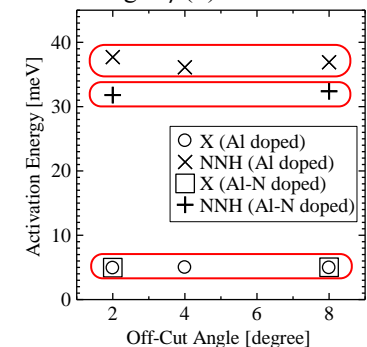


Fig.2. Dependence of activation energy on off-cut angle.

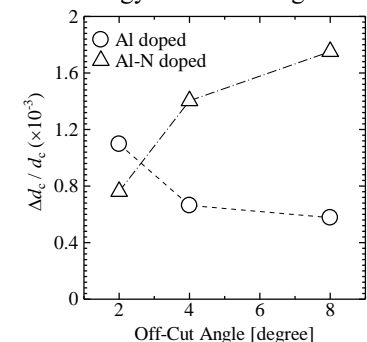


Fig.3. Dependence of  $\Delta d_c / d_c$  on off-cut angle.

# Al ドープ 4H-SiC 中の最近接ホッピング (NNH) の伝導キャリア ~新しい NNH 伝導機構モデルの提案~

## Conduction Carriers in Nearest-Neighbor Hopping (NNH) Conduction in Al-Doped 4H-SiC ~New Conduction Mechanism Model for NNH Conduction~

大阪電気通信大学<sup>1</sup>, 産総研 先進パワーエレクトロニクス研究センター<sup>2</sup>

○(M1) 成田智哉<sup>1</sup>, 岩槻光栄<sup>1</sup>, 日高淳輝<sup>1</sup>, 松浦秀治<sup>1</sup>,

紀世陽<sup>2</sup>, 江藤数馬<sup>2</sup>, 児島一聡<sup>2</sup>, 加藤智久<sup>2</sup>, 吉田貞史<sup>2</sup>

Osaka Electro-Communication University<sup>1</sup>, AIST Advanced Power Electronics Research Center<sup>2</sup>

○Tomoya Narita<sup>1</sup>, Mitsuhide Iwatsuki<sup>1</sup>, Atsuki Hidaka<sup>1</sup>, Hideharu Matsuura<sup>1</sup>,

Shiyang Ji<sup>2</sup>, Kazuma Eto<sup>2</sup>, Kazuaki Kojima<sup>2</sup>, Tomohisa Kato<sup>2</sup>, Sadashi Yoshida<sup>2</sup>

Mail: mf24a010@oecu.jp

### 1. はじめに

Al 濃度 ( $C_{Al}$ ) が  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上の高濃度 Al ドープ p 型 4H-SiC 試料において、p 型半導体にもかかわらず低温領域で Hall 係数 ( $R_H(T)$ ) が負になることが報告されている[1]。そして  $C_{Al}$  が  $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の 4H-SiC では低温領域で最近接ホッピング (NNH) 伝導が現れる事も分かった。 $R_H(T)$  が負になる事を明らかにするために、NNH 伝導に寄与する伝導キャリアに関して考察した。

### 2. 実験および結果

Al ドープ p 型 4H-SiC エピ膜試料を CVD 法で n 型 4H-SiC 基板の上にエピタキシャル成長させた。 $C_{Al}$  が  $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の Al 単独ドープ試料と、 $C_{Al}$  が  $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  で N 濃度 ( $C_N$ ) が  $2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ( $C_{Al}$  の 20% 程度の  $C_N$ ) をコドープした N コドープ試料の 2 種類を作製した。東陽テクニカ製 ResiTest8400 にて 30 ~ 300 K の温度範囲で、van der Pauw 法による抵抗率 ( $\rho(T)$ ) の測定及び、Hall 効果測定による  $R_H(T)$  の測定を行った。図 1 に  $\rho(T)$  を示す。図 2 に  $R_H(T)$  から求めた Hall キャリア密度 ( $n_H(T)$ ) の温度依存性を示す。図 1 より NNH 伝導領域での  $\rho(T)$  が、Al 単独試料より N コドープ試料の方が低いこと、かつ温度上昇に従い両試料とも  $\rho(T)$  が低下することが分かった。図 2 より両試料ともに NNH 伝導領域で  $R_H(T)$  が負であり、温度上昇及び N コドープで  $n_H(T)$  が増加することが分かった。

### 3. 考察

p 型半導体では正孔を伝導キャリアと考える (従来モデル)。この場合、図 3 に示すように温度上昇により正孔がアクセプタ準位 ( $E_A$ ) から価電子帯へ励起することでアクセプタサイトの正孔密度が減少する。一方、N コドープによりドナー (ドナー準位:  $E_D$ ) がアクセプタサイトの正孔を捕獲し、アクセプタサイトの正孔密度が減少する。しかし従来モデルでは Hall キャリアを正孔と考えるので、図 2 に示すように (1)  $R_H(T)$  が NNH 伝導領域で負になることと、(2) 温度上昇に従って  $n_H(T)$  が増加すること及び (3) N コドープにより  $n_H(T)$  が増加することが説明できない。そこで、これらの矛盾点を全て定性的に解決できる、新たな伝導機構モデルを提案する。

図 3 に示されている正孔で占有されていないアクセプタサイトは、電子で占有されているアクセプタサイトと同じであるので、図 4 のように電子で占有されたアクセプタサイトを考えることができる。そして、ホッピングの方向 (赤で描かれた矢印) は正孔と電子は反対方向である。新モデルでは、アクセプタサイトで少ない方のキャリアを考える。つまり、NNH 伝導が現れるのは極低温のためフェルミ準位が  $E_V$  と  $E_A$  との間にあるので、アクセプタサイトでは電子の方が少ない。

新モデルでは NNH 伝導領域でホッピングするのは電子と考えるので、図 2 に示すように  $R_H(T)$  は負になる。次に、図 4 に示すように温度上昇によって価電子帯の電子がアクセプタサイトに励起され、図 2 に示すようにアクセプタサイトの電子密度が増加するため、図 1 のように  $\rho(T)$  が下がる。さらに、N コドープでも N ドナーの電子がアクセプタに捕獲され、図 2 に示すようにアクセプタサイトの電子密度が増加するため、図 1 に示すように同じ温度でも Al 単独ドープ試料より N コドープ試料の方が  $\rho(T)$  は減少する。図 1、図 2 に示すように温度上昇に従って Al 単独試料と N コドープ試料の  $\rho(T)$  及び  $n_H(T)$  の差が小さくなる。価電子帯から励起する電子は温度上昇で増加するが、N から提供される電子は温度に関わらず一定のため、温度上昇に伴う電子密度の増加割合が N コドープ試料では Al 単独ドープ試料より小さい。したがって、温度上昇に伴う  $\rho(T)$  及び  $n_H(T)$  の差が小さくなることが説明できる。

### 4. まとめ

NNH 伝導では、ドープドント (ドナーまたはアクセプタ) 準位で少ない方のキャリアが伝導に寄与する伝導機構モデルを提案した。そして、 $C_{Al}$  が  $1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の p 型 4H-SiC 試料では、電子によるホッピングで考えることで、NNH 伝導領域での実験結果 ( $\rho(T)$  及び  $n_H(T)$  の温度依存性および  $R_H(T)$  の符号) を矛盾無く定性的に説明できた。

【参考文献】 [1] H. Matsuura, et al.: Materials Science Forum. Vol.963(2019), p. 324.

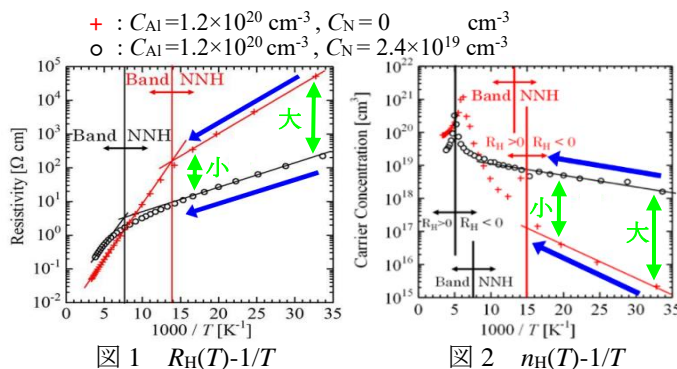


図 1  $R_H(T)-1/T$

図 2  $n_H(T)-1/T$

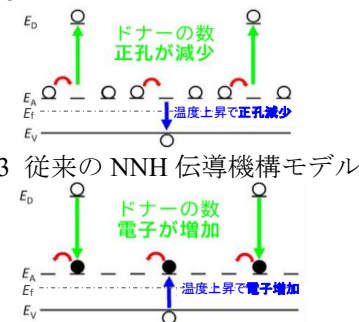


図 3 従来の NNH 伝導機構モデル

図 4 新しい NNH 伝導機構モデル