

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04565

研究課題名(和文) 超高濃度Al添加4H-SiCの抵抗率及びHall係数の温度依存性の物理モデル構築

研究課題名(英文) Physical Models of Temperature-dependent Resistivity and Hall Coefficient in Heavily Al-doped 4H-SiC

研究代表者

松浦 秀治 (Matsuura, Hideharu)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：60278588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：SiC nチャネルIGBTのp型4H-SiC基板(コレクタ層)の低抵抗率化のために、Alを高濃度添加した場合の電気伝導機構を調べた。Al添加4H-SiCはp型半導体であるが、低温領域でのNNH伝導やVRH伝導のようなホッピング伝導ではホール係数が負(つまり、n型の性質を表すよう)になることを実験的に明らかにした。そして、ホッピング伝導でのホール係数の符号に関する一般的な物理モデルを構築した。さらに、NNH伝導領域での抵抗率の温度依存性とホール係数の温度依存性を表す活性化エネルギーがほぼ等しくなる物理モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アモルファス半導体においては、伝導型(p型またはn型)とは反対のホール係数の符号(負または正)が現れることが知られていて、理論的検討が行われている。

一方、結晶半導体では高濃度p型半導体でのホッピング伝導領域では、ホール係数が負になるとの報告はほとんど無く、さらに理論的検討は行われていない。したがって、今回提案した物理モデルには学術的意義がある。さらに、ホッピング伝導領域での抵抗率の活性化エネルギーとホール効果の活性化エネルギーがほぼ等しくなることは、我々の報告だけである。したがって、その物理モデルを提案できたことは学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the resistivity of the p-type 4H-SiC substrate (collector) of SiC n-channel IGBT, we investigated the conduction mechanism in highly Al doping. Although Al-doped 4H-SiC is a p-type semiconductor, it has been experimentally found that the Hall coefficient becomes negative (i.e., n-type semiconductors) in hopping conduction such as NNH conduction and VRH conduction in the low-temperature region. Therefore, we have proposed a physical model for the sign of the Hall coefficient in hopping conduction. Furthermore, we have proposed a physical model that elucidates that the activation energies of the resistivity and Hall coefficient in the NNH conduction region are almost equal.

研究分野：半導体工学

キーワード：p型4H-SiC IGBT 高濃度Al添加4H-SiC NNH伝導 VRH伝導 Hall係数 Hall係数の符号反転

1. 研究開始当初の背景

SiC Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) のコレクタ層 (つまり p 型 4H-SiC 基板) での電力損失を減らすために、p 型 4H-SiC 基板の低抵抗率化が必須である。このために、4H-SiC にアクセプタである Al を高濃度添加した p 型 4H-SiC の電気伝導機構を調べてきた。

高温領域では、すべての試料の電気伝導機構はバンド伝導であったが、低温領域での電気伝導機構はホッピング伝導であり、Al 濃度 (C_{Al}) が増加するに従って最近接ホッピング (NNH) 伝導から可変領域ホッピング (VRH) 伝導に変化することがわかった[1,2]。図 1 には、 C_{Al} が $9.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である試料の抵抗率の温度依存性 ($\rho(T)$) を示し、高温側がバンド伝導であり、低温側が NNH 伝導である。 C_{Al} が $1.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上の試料では、低温側では VRH 伝導であることがわかった[2]。このようにホッピング伝導が変化する理由は、Si より共有結合半径が大きい Al を添加することにより、SiC 結晶にひずみが生じ、禁制帯中に局在準位が多く形成されたためと考えられる[1,2]。図 2 (a)には価電子帯、Al アクセプタ準位 (E_{Al})、そして結晶の歪みにより形成された局在準位 (バンドテール) を示している。図 2 (b)には、正孔が価電子帯を移動するバンド伝導、 E_{Al} を移動する NNH 伝導とフェルミ準位 (E_F) 付近のバンドテールを移動する VRH 伝導を示している。このように、正孔は異なるエネルギーの場所を電気伝導しているため、これらの合成抵抗 (つまり $\rho(T)$) は

$$\frac{1}{\rho(T)} = \frac{1}{\rho_{\text{Band}}(T)} + \frac{1}{\rho_{\text{NNH}}(T)} + \frac{1}{\rho_{\text{VRH}}(T)} \quad (1)$$

で表すことができる[1]。ここで、 $\rho_{\text{Band}}(T)$ 、

$\rho_{\text{NNH}}(T)$ と $\rho_{\text{VRH}}(T)$ はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導での抵抗率である。このように、高濃度 Al 添加 4H-SiC での電気伝導機構は、バンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導が並列であり、(1)式より各温度で最も抵抗率の低い伝導機構が観測されることがわかってきた。そして、超高濃度 Al 添加により、VRH 伝導の抵抗率が NNH 伝導より低くなり、VRH 伝導が観測されることがわかった[2]。

ホール係数の温度依存性 ($R_H(T)$) に関しては、低温領域での NNH 伝導や VRH 伝導のようなホッピング伝導では、p 型半導体であるにも関わらず、負 (つまり、n 型の性質を表すよう) になることが実験的にわかった (図 1) [3]。しかし、単結晶半導体においては、ホッピング伝導でホール係数が負になる物理モデルが存在しなかった。さらに図 1 からわかるように、NNH 伝導領域で $\ln \rho(T) - 1/T$ の傾き (実線) と $R_H(T) - 1/T$ の傾き (破線) がほぼ等しいことを報告したが [3,4]、この物理モデルもわかっていなかった。

2. 研究の目的

高濃度ドーパント添加半導体のキャリア密度は非常に高いため、Hall 電圧は $1 \mu\text{V}$ 以下になる。このため、Hall 電圧を正確に測定することが難しい。そこで、本研究の目的は、Hall 電圧を高精度で測定し、多くの Al 濃度での試料の Hall 係数の温度依存性を正確に求め、物理モデルを構築することである。具体的には、p 型半導体のホッピング伝導領域での、

- (1) 電気伝導機構の物理モデルの構築、
- (2) Hall 係数が負になる物理モデルの構築、
- (3) 抵抗率と Hall 係数の活性化エネルギーがほぼ等しくなる物理モデルの構築

である。

3. 研究の方法

測定試料は、水平ホットウォール CVD システム (VP508 GFR、Aixtron) を用いて、約 1620°C

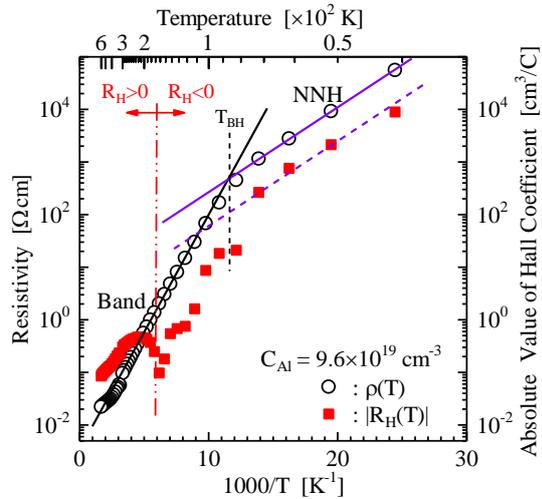


図 1 Al 濃度が $9.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の p 型 SiC エピ膜の抵抗率の温度依存性とホール係数の温度依存性

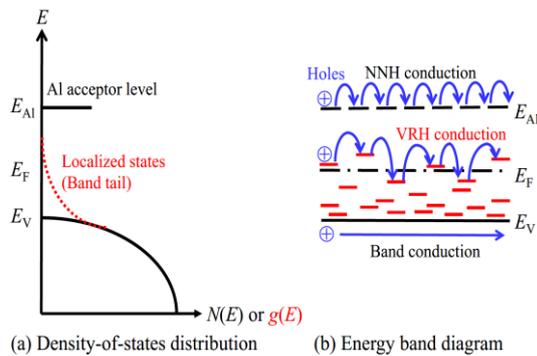


図 2 p 型半導体での伝導モデル

で (0001) 面の 3 インチ n⁺型 4H-SiC ウェハ ([11-20] 方向にオフ角 8°) 上に成長した、厚さ約 90 μm の Al 添加 4H-SiC エピ層である。Al と Ti の電子ビーム蒸着によって van der Pauw 構造の 4 つの Al/Ti/Al 電極を蒸着し、その後試料を N₂ 雰囲気下 1000 °C でアニール処理した。二次イオン質量分析法によって測定された C_{Al} が 2.4 × 10¹⁹~4.7 × 10²⁰ cm⁻³ の範囲の p 型 4H-SiC エピ層を成膜した。

ホール効果測定装置 (東洋テクニカ製 ResiTest8400) を用いて、20~600 K の温度範囲で van der Pauw 法により試料の ρ(T) を測定し、0.1 Hz の周波数で 0.35 T の AC 磁場により R_H(T) を測定した。ここで、信頼できる ρ(T) および R_H(T) を測定するために以前の論文で説明した手法を用いた[5,6]。また、pn 接合 (p 型エピ層/n⁺型基板) により形成される空乏層 (絶縁体層) により、p 型 4H-SiC エピ層と n⁺型 4H-SiC 基板が電氣的に分離されることが確認されており、高濃度に Al が添加された p 型 4H-SiC エピ層の電氣的特性が測定できることは確認している。

図 3 に、van der Pauw 法での測定方法(a)とホール電圧 (V_H(T)) の等価回路(b)を示す。ここで、V_{Hband}(T)、V_{HNNH}(T)、V_{HVRH}(T) はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導によるホール電圧であり、r_{Band}(T)、r_{NNH}(T)、r_{VRH}(T) はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導による電極 2 と電極 4 間の抵抗である。電気伝導において、バンド伝導、NNH 伝導と VRH 伝導が並列であることより、V_{Hband}(T)、V_{HNNH}(T) および V_{HVRH}(T) が並列で表すことができる。したがって、V_H(T) から求められる R_H(T) は次式で表される[4]。

$$R_H(T) = \frac{\frac{R_{H\text{Band}}(T)}{\rho_{\text{Band}}(T)^2} + \frac{R_{H\text{NNH}}(T)}{\rho_{\text{NNH}}(T)^2} + \frac{R_{H\text{VRH}}(T)}{\rho_{\text{VRH}}(T)^2}}{\left(\frac{1}{\rho_{\text{Band}}(T)} + \frac{1}{\rho_{\text{NNH}}(T)} + \frac{1}{\rho_{\text{VRH}}(T)} \right)^2} \quad (2)$$

ここで、R_{Hband}(T)、R_{HNNH}(T)、R_{HVRH}(T) はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導に対するホール係数である。(2)式より、各伝導領域でのホール係数を求め、ホール係数および温度依存性の物理モデルを検討する。

4. 研究成果

(1) p 型半導体のホッピング伝導領域での電気伝導機構の物理モデルの構築

電界中でのホッピング伝導では、局在準位 (ここでは、アクセプタまたはバンドテール) に存在する電子は、電子が占有されていない局在準位にホッピングできる。一方、価電子帯の正孔の概念と同様に、電子が占有していない局在準位は、正孔が占有している局在準位とみなせるので、正孔のホッピングは電子のホッピングと同じ現象であり、ホッピング方向は互いに逆である。このため、2 つの局在準位間の正孔のホッピング確率の数学的表現は電子のホッピング確率と同じである。したがって、電界中ではホッピングしている正孔の密度はホッピングしている電子の密度と同じである。そこで、ホッピングしている荷電粒子の密度を n_{Hopping}(T) と定義した[7-10]。

図 4(a)には、NNH 伝導での電子および正孔のホッピングを示す。電子を占有し

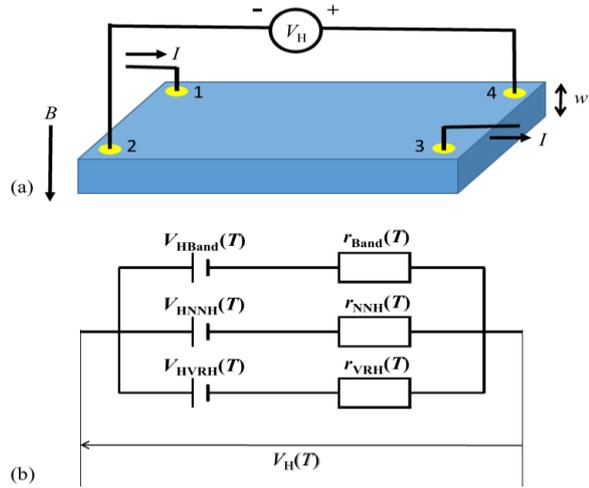


図 3 Hall 効果測定(a)と 3 種類の伝導機構が並列の時の等価回路(b)

図 3 に、van der Pauw 法での測定方法(a)とホール電圧 (V_H(T)) の等価回路(b)を示す。ここで、V_{Hband}(T)、V_{HNNH}(T)、V_{HVRH}(T) はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導によるホール電圧であり、r_{Band}(T)、r_{NNH}(T)、r_{VRH}(T) はバンド伝導、NNH 伝導、VRH 伝導による電極 2 と電極 4 間の抵抗である。電気伝導において、バンド伝導、NNH 伝導と VRH 伝導が並列であることより、V_{Hband}(T)、V_{HNNH}(T) および V_{HVRH}(T) が並列で表すことができる。したがって、V_H(T) から求められる R_H(T) は次式で表される[4]。

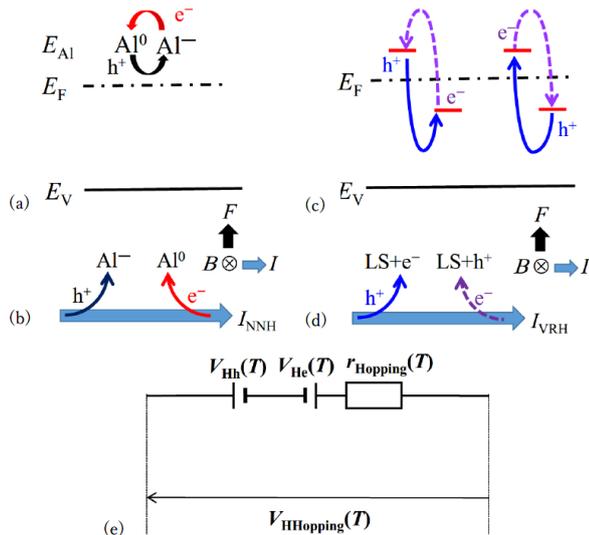


図 4 NNH 伝導での電界による電子または正孔のホッピングのエネルギーバンド図(a)、磁界中での電子または正孔のホッピングを示す図(b)、VRH 伝導での電界による電子または正孔のホッピングのエネルギーバンド図(c)、磁界中での電子または正孔のホッピングを示す図(d)とホール電圧の等価回路(e)

ている Al アクセプタ (Al⁻) に存在する電子は、電子を占有していない Al アクセプタ (Al⁰) にホッピングする。一方、正孔を占有している Al アクセプタ (つまり Al⁰) に存在する正孔は、正孔を占有していない Al アクセプタ (つまり Al⁻) にホッピングする[7,9,10]。

図2や図4(a)に示すように E_{Al} が E_F より上の場合、Al アクセプタには電子が少なく、Al アクセプタを占有している全ての電子がホッピングに寄与するため、 $n_{Hopping}(T)$ は電子密度となる。したがって、

$$n_{Hopping}(T) = N_{Al} f_{FD}(E_{Al}) \quad (3)$$

で表される[9,10]。ここで、 N_{Al} はAl アクセプタ密度であり、Alに4個のCが結合している状態である。したがって、 N_{Al} は C_{Al} と等しいかそれ以下である。また、 $f_{FD}(E_{Al})$ は E_{Al} での電子の占有確率 (Fermi-Dirac 分布関数) であり、

$$f_{FD}(E_{Al}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{Al} - E_F}{k_B T}\right)} \quad (4)$$

で表され、 k_B はボルツマン定数である。正孔で考えると、正孔密度のうち電子密度と同じ密度の正孔がホッピングに寄与するため、ホッピングに関与する正孔密度は $n_{Hopping}(T)$ である。

一方、 E_{Al} が E_F より下の場合、Al アクセプタには正孔が少なく、Al アクセプタを占有している全ての正孔が k ホッピングに寄与するため、 $n_{Hopping}(T)$ が正孔密度となり、

$$n_{Hopping}(T) = N_A [1 - f_{FD}(E_{Al})] \quad (5)$$

で表される[9,10]。電子で考えると、電子密度のうち正孔密度と同じ密度の電子がホッピングに寄与するため、ホッピングに関与する電子密度は $n_{Hopping}(T)$ となる。

VRH 伝導は E_F 付近の局在準位間でのホッピングであり、図4(c)に電子および正孔のホッピングを示す[8-10]。

(2) p 型半導体のホッピング伝導領域での Hall 係数が負になる物理モデルの構築

電子と正孔のホッピングの観点から $R_H(T)$ の符号について検討した。左から右へ流れるホッピング電流 ($I_{Hopping}$) の場合、紙面から奥に向かう磁界中 (B) 中で、 $n_{Hopping}(T)$ を構成する正孔または電子は上方向にホッピングし (図4(b)と(d)参照)、その結果ホッピング先の局在準位の帯電状態が変化する。帯電状態が負に変化する場合、「磁界中での電子のホッピング」として定義し、この帯電状態の変化が負の $V_H(T)$ に関与する。逆の場合では、「磁界中での正孔のホッピング」として定義し、この帯電状態の変化が正の $V_H(T)$ に寄与する。図4(e)は、ホッピング伝導によるホール電圧 ($V_{HHopping}(T)$) の等価回路を示す。ここで、 $V_{Hh}(T)$ と $V_{He}(T)$ はそれぞれ磁界中での正孔および電子のホッピングによるホール電圧、 $r_{Hopping}(T)$ は図3のホッピング伝導による電極2と電極4間の抵抗である。図4(e)に示す等価回路から $V_{HHopping}(T)$ が求められ、

$$V_{Hopping}(T) = R_{HHopping}(T) \frac{IB}{w} \quad (6)$$

からホッピング伝導でのホール係数 ($R_{HHopping}(T)$) の大きさおよび符号が決まる[7-10]。

NNH 伝導の場合、電界でホッピングしている電子の密度も正孔の密度も $n_{Hopping}(T)$ と同じである。磁界により図4(b)のように同じ方向にホッピングする。しかし、磁界によりホッピングできる確率は、電子の場合ホッピング先の Al⁰ の密度

$$N_{Al^0} = N_{Al} [1 - f_{FD}(E_{Al})] \quad (7)$$

および正孔の場合ホッピング先の Al⁻ の密度

$$N_{Al^-} = N_{Al} f_{FD}(E_{Al}) \quad (8)$$

に比例する。したがって、 E_{Al} が E_F より上の場合 Al⁰ 密度の方が Al⁻ 密度より大きいため、電子のホッピング確率が多くなり、 $V_{He}(T)$ が $V_{Hh}(T)$ より高くなり、 $R_{HNNH}(T)$ が負になることがわかる。高濃度 Al 添加 4H-SiC の場合 E_{Al} が E_F より上のため[11-13]、 $R_{HNNH}(T)$ が負になることがわかった。NNH 伝導領域では、(2)式より $R_H(T)$ は $R_{HNNH}(T)$ となるので、観測されるホール係数は負になることを示すことができた[7,9,10]。

VRH 伝導の場合も電界でホッピングする電子の密度も正孔の密度も $n_{Hopping}(T)$ と同じである。磁界により図4(d)のように同じ方向にホッピングする。 E_F 付近の局在準位は、図2に示すように E_F より下の局在準位の方が E_F より上の局在準位より多い。一方、低いエネルギーの局在準位にホッピングする図4(c)の右側の過程の方が、高いエネルギーの局在準位にホッピングする図4(c)の左側の過程より起こりやすい。したがって、磁界中では電子のホッピングの方が起こりやすい。このことより、 $V_{He}(T)$ が $V_{Hh}(T)$ より高くなり、 $R_{HVRH}(T)$ が負になることがわかる。VRH 伝導領域では、(2)式より $R_H(T)$ は $R_{HVRH}(T)$ となるので、観測されるホール係数は負になることを示すことができた[8-10]。

(3) p 型半導体のホッピング伝導領域での抵抗率と Hall 係数の活性化エネルギーがほぼ等しくなる物理モデルの構築

NNH 伝導の場合、抵抗率は

$$\rho_{\text{NNH}}(T) = \frac{1}{qn_{\text{Hopping}}(T)\mu_{\text{Hopping}}(T)} \quad (9)$$

で表すことができ、一方ホール係数は

$$R_{\text{HNNH}}(T) = \frac{\gamma_{\text{NNH}}}{qn_{\text{Hopping}}(T)} \quad (10)$$

で表すことができる。ここで、 $\mu_{\text{Hopping}}(T)$ はホッピング伝導での移動度であり、 γ_{NNH} はホッピング伝導での散乱係数である。 $n_{\text{Hopping}}(T)$ は $\mu_{\text{Hopping}}(T)$ より温度依存性が強い。このため、(9)式と(10)式の温度依存性はほぼ等しく、 $n_{\text{Hopping}}(T)$ によって依存性が決まる。一方、NNH 伝導領域の温度範囲では E_{F} がほぼ一定のため[11-13]、(3)式と(4)式からわかるように $n_{\text{Hopping}}(T)$ の活性化エネルギー($E_{\text{Al}}-E_{\text{F}}$)は一定と見なせる。したがって、NNH 伝導領域での $\ln \rho(T) - 1/T$ の傾きと $R_{\text{H}}(T) - 1/T$ の傾きがほぼ等しくなる理由がわかった。

<引用文献>

- [1] Hideharu Matsuura, et.al., “Dependence of conduction mechanisms in heavily Al-doped 4H-SiC epilayers on Al concentration”, Applied Physics Express Vol. 11, 2018, pp. 101302 1-5.
- [2] Hideharu Matsuura, et.al., “Transition of conduction mechanism from band to variable-range hopping conduction due to Al doping in heavily Al-doped 4H-SiC epilayers”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 58, 2019, pp. 098004 1-3.
- [3] Hideharu Matsuura, et.al., “Relationship between Temperature Dependencies of Resistivity and Hall Coefficient in Heavily Al-Doped 4H-SiC Epilayers”, Mater. Sci. Forum Vol.963, 2019, pp. 324-327.
- [4] Hideharu Matsuura, et.al., “Anomalous Temperature Dependence of Hall Coefficient of Heavily Al-doped 4H-SiC Epilayers in Band Conduction Region”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM2019), Kyoto, Japan, September 29-October 4, 2019.
- [5] Hideharu Matsuura, et.al., “Comparison of Conduction Mechanisms in Heavily Al-Doped 4H-SiC and Heavily Al- and N-Codoped 4H-SiC”, Mater. Sci. Forum Vol. 924, 2018, pp. 188-191.
- [6] Hideharu Matsuura, et.al., “Relationship between Temperature Dependencies of Resistivity and Hall Coefficient in Heavily Al-Doped 4H-SiC Epilayers”, Mater. Sci. Forum Vol.963, 2019, pp. 324-327.
- [7] Hideharu Matsuura, et.al., “Sign of Hall coefficient in nearest-neighbor hopping conduction in heavily Al-doped p-type 4H-SiC”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 59, 2020, pp. 051004 1-6.
- [8] Hideharu Matsuura, et.al., “Simple physical model for the sign of the Hall coefficient in variable-range hopping conduction in heavily Al-doped p-type 4H-SiC”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 60, 2021, pp. 031008 1-8.
- [9] Hideharu Matsuura, et.al., “Sign and Activation Energy of Hall Coefficient for Hopping Conduction in Heavily Al-doped 4H-SiC”, J. Phys. Chem. Research Vol. 4, Issue 1, 2022, pp. 145 1-8.
- [10] Hideharu Matsuura, et.al., “Electrical Properties of Heavily Al-Doped 4H-SiC”, Materials Science Forum to be published.
- [11] Hideharu Matsuura, “Investigation of a distribution function suitable for acceptors in SiC”, J. Appl. Phys. Vol. 95, 2004, pp. 4213-4218.
- [12] Hideharu Matsuura, et.al., “Dependence of acceptor levels and hole mobility on acceptor density and temperature in Al-doped p-type 4H-SiC epilayers”, J. Appl. Phys. Vol. 96, 2004, pp. 2708-2715.
- [13] Hideharu Matsuura, “Influence of excited states of a deep substitutional dopant on majority-carrier concentration in semiconductors”, Physical Review B vol. 74, 2006, pp. 245216 1-8.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsuura Hideharu, Kondo Yuki, Iida Kosuke, Hidaka Atsuki, Ji Shiyang, Eto Kazuma, Kojima Kazutoshi, Kato Tomohisa, Yoshida Sadafumi, Okumura Hajime	4. 巻 60
2. 論文標題 Simple physical model for the sign of the Hall coefficient in variable-range hopping conduction in heavily Al-doped p-type 4H-SiC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 031008 ~ 031008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abe645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuura Hideharu, Nishihata Rinya, Takeshita Akinobu, Ogawa Kohei, Imamura Tatsuya, Takano Kota, Okuda Kazuya, Hidaka Atsuki, Ji Shi Yang, Eto Kazuma, Kojima Kazutoshi, Kato Tomohisa, Yoshida Sadafumi, Okumura Hajime	4. 巻 1004
2. 論文標題 Anomalous Temperature Dependence of the Hall Coefficient of Heavily Al-Doped 4H-SiC Epilayers in the Band Conduction Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 215 ~ 223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.215	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 -

1. 著者名 Hidaka Atsuki, Takeshita Akinobu, Ogawa Kohei, Imamura Tatsuya, Takano Kota, Okuda Kazuya, Matsuura Hideharu, Ji Shi Yang, Eto Kazuma, Mitani Takeshi, Kojima Kazutoshi, Kato Tomohisa, Yoshida Sadafumi, Okumura Hajime	4. 巻 1004
2. 論文標題 Anomalous Conduction between the Band and Nearest-Neighbor Hopping Conduction Regions in Heavily Al-Doped p-Type 4H-SiC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 224 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.224	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 -

1. 著者名 Matsuura Hideharu, Takeshita Akinobu, Hidaka Atsuki, Ji Shiyang, Eto Kazuma, Mitani Takeshi, Kojima Kazutoshi, Kato Tomohisa, Yoshida Sadafumi, Okumura Hajime	4. 巻 59
2. 論文標題 Sign of Hall coefficient in nearest-neighbor hopping conduction in heavily Al-doped p-type 4H-SiC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 051004 ~ 051004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hideharu Matsuura, Rinya Nishihata, Atsuki Hidaka	4. 巻 4
2. 論文標題 Sign and Activation Energy of Hall Coefficient for Hopping Conduction in Heavily Al-Doped 4H-SiC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.36266/JPCR/145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hideharu Matsuura, Akinobu Takeshita, Rinya Nishihata, Yuuki Kondo, Atsuki Hidaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Electrical Properties of Heavily Al-Doped 4H-SiC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 近藤 佑樹, 日高 淳輝, 松浦 秀治, 紀 世陽, 江藤 数馬, 児島 一聡, 加藤 智久, 吉田 貞史, 奥村 元
2. 発表標題 Al濃度 $1E20 \text{ cm}^{-3}$ 台前半でのp型4H-SiC CVDエピ膜の結晶性と電気特性との関係
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤 佑樹, 竹下 明伸, 今村 辰哉, 高野 晃大, 奥田 和也, 日高 淳輝, 松浦 秀治, 紀 世陽, 江藤 数馬, 児島 一聡, 加藤 智久, 吉田 貞史, 奥村 元
2. 発表標題 Al濃度 10^{20} cm^{-3} 台前半でのp型4H-SiCエピ膜の電気抵抗率の温度依存性とAl濃度との関係
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideharu Matsuura, Akinobu Takeshita, Rinya Nishihata, Yuuki Kondo, Atsuki Hidaka
2. 発表標題 Electrical Properties of Heavily Al-Doped 4H-SiC
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Silicon Carbide and Related Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------