

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390067

研究課題名(和文) 4H-SiC表面再結合速度の定量的観測

研究課題名(英文) Quantitative observation of surface recombination velocities for 4H-SiC

研究代表者

加藤 正史 (Kato, Masashi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80362317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題により得られた成果は、以下の5点である。

1. n型4H-SiC(0001)Si面およびC面の表面再結合速度の定量値およびそれらの温度依存性を得た。また4H-SiCの表面再結合速度が表面に吸着した物質の影響を受けることを見出した。2. マイクロ波によるキャリアライフタイム測定において、測定値の精度を高める手法を見出した。3. p型4H-SiC(0001)Si面およびC面の表面再結合速度の定量値を得た。4. 様々な温度、伝導型、ドーピング密度および過剰キャリア濃度での実験結果に対して、高精度に表面再結合速度の見積もりが可能な解析手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：The products of this research are the follows.

1) Quantitative values of surface recombination velocities and their temperature dependence are obtained for the (0001) Si- and C-faces of n-type 4H-SiC. It was also found that surface recombination velocities for 4H-SiC depend on chemicals adsorbed on the surface. 2) Methods for accuracy improvement were established in the carrier lifetime measurements based on a microwave technique. 3) Quantitative surface recombination velocities are obtained for the (0001) Si- and C-faces of p-type 4H-SiC. 4) An analysis method was established for evaluation of surface recombination velocities from experimental results under any temperature and excess carrier concentration for various samples.

研究分野：半導体工学

キーワード：電気・電子材料 電子デバイス・機器 材料加工・処理 省エネルギー 半導体物性

## 1. 研究開始当初の背景

4H-SiC によるパワーデバイス開発においてユニポーラデバイス各種は実用化のフェーズにある。その一方で、pin ダイオードなどのバイポーラデバイスは電力系統用デバイスとして多大な省電力効果が期待されているものの、未だ研究開発の段階である。例えば京都大学や CREE 社などから研究レベルでは優れた特性のデバイスが報告されているが[1,2]、実用化にはプロセスの更なる最適化が必要な状態である。ここでキャリアライフタイム はバイポーラデバイスの設計においてオン抵抗とスイッチング速度を決める重要なパラメータである。このバルクの値は定量的な見積りがなされ、制御手法の提案も複数なされている。その一方で、バルクと同様に全体の に大きな影響を与える表面再結合については、その速度(表面再結合速度  $S$ )の定量的観測の報告が少なく、その温度依存性も見かけ上から見積もられたものしか報告されていない[3]。また表面再結合を抑制する手法も表面へのパッシベーション膜形成が比較的良好という定性的な報告のみである[4]。そのため、デバイスの設計に  $S$ の定量的な値を用いることができず、また表面処理プロセスによる影響も定量化できていなかった。そのことが、バイポーラデバイスの効率的な設計および実用化の足枷となっていた現状がある。

我々はこれまで、自立エピ基板を利用することで4H-SiC(0001)面の  $S$ の定量的な値を報告してきた[5]。その測定手法はマイクロ波光導電減衰法( $\mu$ -PCD法)であり、試料として自立エピ基板を用意し、表面と裏面へのキャリアの拡散を利用することで  $S$ を見積もるといものである。しかしながら、これまで成長直後もしくは化学機械研磨(CMP)処理後の表面のみに対し、室温で  $S$ を見積もったに過ぎない。実際のデバイス設計に活かすには、プロセス後の表面を評価する必要があり、さらにはデバイスの高温動作を考慮すると、温度依存性を測定する必要がある。加えてバイポーラデバイスにおいてはメサもしくはトレンチ構造を形成することが一般的であるため、(11 $\bar{2}$ 0)もしくは(1 $\bar{1}$ 00)表面における再結合の観測も必須である。

## 2. 研究の目的

上記の研究動向および我々のこれまでの成果を考慮し、今後さらに明らかにさせるべき事項を述べると、 $S$ に対するプロセスの影響評価、 $S$ の温度依存性の観測、(11 $\bar{2}$ 0)面および(1 $\bar{1}$ 00)面の  $S$ の評価、の3点である。それらを明らかにするため、本研究では以下の4項目の取り組みを実施することとする。

- 1) 表面処理プロセスを施した4H-SiC(0001)面の  $S$ 評価
- 2)  $S$ の温度依存性観測
- 3) (11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面の  $S$ 評価
- 4) pin ダイオード測定による  $S$ の確認

これらの取り組みで到達する目標は、様々な表面処理プロセスが施された4H-SiC(0001)、(11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面における  $S$ を高い信頼性で定量的に得る、ということである。

項目1)、2)により従来の成長直後もしくはCMP処理の状態だけでなく表面処理プロセスを施した表面においても、温度上昇時の表面再結合の影響を定量的に観測することができる。また項目3)により、(11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面における  $S$ を定量的に得ることができる。実際のメサもしくはトレンチ構造の側壁は、(11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面とは若干方位が違うものの、(11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面の測定により、側壁における  $S$ の近似値を得ることができる。さらには項目4)により、pin ダイオードの測定における表面再結合の影響を確認し、測定した  $S$ の信頼性を可能な限り高める。これらの結果により、如何なる構造のバイポーラデバイスにおいても、その動作に対する表面再結合の影響が判明し、さらにデバイスプロセス全体のフローと整合しつつ、表面再結合を抑制できる表面処理プロセスも見出すことができる。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず表面処理プロセスを施した  $n$ 型4H-SiC(0001)面の表面再結合速度  $S$ 評価、および  $S$ の温度依存性観測を実施した(上記目的1)、2))。その手法として、複数の膜厚を有する  $n$ 型4H-SiC自立エピタキシャル層(0001)面の試料に対して、化学機械研磨(CMP)、溶融NaOHエッチングおよび反応性プラズマエッチング(RIE)処理を施したものを用意した。それらの試料に対して様々な温度で  $\mu$ -PCD法による測定を行い、得られたキャリアライフタイムの値と数値計算の結果を比較した。これにより  $S$ に対する表面処理プロセスの影響、また  $S$ の温度依存性を定量的に明らかにした。

一方で、 $S$ の評価において、 $\mu$ -PCD法の正確性が問題となる。我々は  $\mu$ -PCD法の結果が励起されたキャリア密度によっては不正確になることを見いだした。そこで、当初の目的には含まれていないが、 $\mu$ -PCD法の不正確さの原因の解明と対処法の確立を、 $n$ 型4H-SiC(0001)面試料の測定を通じて実施した。

また  $p$ 型4H-SiC(0001)面に対する  $S$ 評価、さらに、 $n$ 型4H-SiC(11 $\bar{2}$ 0)および(1 $\bar{1}$ 00)面に対する  $\mu$ -PCD測定を実施し、メサおよびトレンチ構造のデバイスにおける表面再結合現象の理解を深めた(目的3))。

なお、目的4)pinダイオード測定による  $S$ の確認については、他の実施内容においてより注目すべき成果が上がったため、実施に至らなかった。

## 4. 研究成果

- (1)  $n$ 型4H-SiC(0001)面の  $S$

図1はCMP処理を施した自立n型4H-SiCエピタキシャル膜(0001)面に対する355nm励起での $\mu$ -PCD法による測定結果である。減衰曲線の傾きは試料の膜厚に依存し、さらにC面の方がSi面より急峻な減衰を示していることがわかる。一方、266nmの励起では355nmの励起に比べ、減衰は急になったが、膜厚依存性および面方位の依存性に変化はなかった。

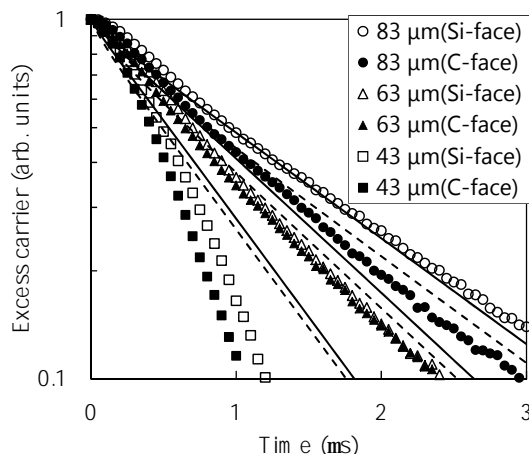


図1 表面にCMP処理を施した自立n型4H-SiCエピタキシャル膜(0001)面に対する355nm励起での $\mu$ -PCD測定結果

上記の $\mu$ -PCD測定結果を用い、 $\mu$ -PCD信号のピークから1/eの値になるまでの時間である、1/e ライフタイムを抽出し、その膜厚依存性を図2のようにプロットした。膜厚が厚くなると1/e ライフタイムは大きくなり、Si面の方がC面よりも、355nm励起の方が266nm励起よりも大きい1/e ライフタイムを示した。また、既報の文献で示した計算モデル[5]により1/e ライフタイムも見積もった。SiC内部のバルクライフタイムと $S$ をパラメータとし、最も実験結果に近くなる組み合わせを見いだした。その結果を図中の線により示す。この時、バルクライフタイムを3 $\mu$ s、 $S$ をSi面で2000cm/s、C面で5500cm/sとなり、CMPで処理した表面における $S$ が明らかになった。

また、NaOHエッチング処理もしくはRIE処理を表面に施した試料に対する $\mu$ -PCD測定結果も得た。それらの結果から1/e ライフタイムを抽出し、上記した計算モデルとのフィッティングにより $S$ を見積もった。得られた $S$ をまとめたものを表1に示す。NaOHエッチング処理後はCMP処理後よりも低い $S$ を示し、一方で、RIE処理後はCMP処理後よりも高い $S$ を示した。

また、 $\mu$ -PCD法による測定を室温から250 $^{\circ}$ Cまで測定し、同様のフィッティングにより $S$ を見積もった。その結果、 $S$ が温度に対してほぼ一定であることがわかった。

なお、これらの $S$ の見積もりに用いた計算モデルでは、キャリア拡散の励起キャリア密度依存性を考慮しておらず、また輻射再結合、

オージェ再結合、キャリア移動度における電子正孔対散乱を無視している。従って、この結果が得られた後、より正確な見積もりが可能な計算モデルを確立した。それによる再計算を現在実施しており、後日その結果を公表する予定である。

また、n型4H-SiC(0001)面の $S$ は水溶液に浸すことで低下させることが可能であることも明らかにしている。定量的な解析は今後していく予定である。

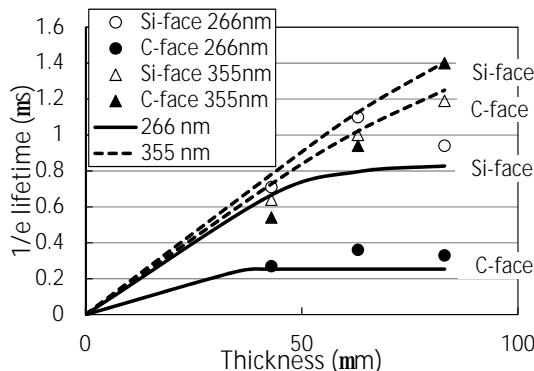


図2 表面にCMP処理を施した自立n型4H-SiCエピタキシャル膜(0001)面から得られた1/e ライフタイム。線はバルクライフタイムを3 $\mu$ s、 $S$ をSi面で2000cm/s、C面で5500cm/sとした計算で得られた1/e ライフタイム。

表1. 各処理後の表面から見積られたn型4H-SiC(0001)面の $S$  [cm/s]

処理	Si面	C面
CMP	2000	5500
NaOH	1500	5000
RIE (Si面処理)	2500	5000
RIE (C面処理)	2500	7500

## (2) $\mu$ -PCD法の不正確さの原因と対処法

$\mu$ -PCD法による測定が正しいライフタイム値を示すか、という点を確認するために、励起されたキャリアと $\mu$ -PCD信号との相関をチェックした。図3に表面にCMP処理を施した自立n型4H-SiCエピタキシャル膜(0001)面における励起レーザーの強度(=注入光子密度)に対して得られた $\mu$ -PCD信号を示す。ここで、試料のSi面もしくはC面に対して266nmもしくは355nmの励起レーザーを当てている。また、文献[6,7]で報告されている4H-SiC試料に対する結果も示す。ここで図中実線は、励起キャリアと $\mu$ -PCD信号が比例関係である場合に観測されるべき傾きを示している。図に示されるように、注入光子密度が $10^{14}$ cm $^{-2}$ 以下の場合には、どの実験結果も実線で示されている傾きに近いが、注入光子密度がそれより大きい

場合、傾きは小さくなった。なお、 $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 以上の注入光子密度は、試料内にドナー密度以上の過剰キャリアを生成している高注入状態に相当する。従って、この結果は、高注入状態での $\mu$ -PCD測定においては、キャリアライフタイムを過剰評価することを意味している。

この比例関係がずれる原因は、2つ考えられる。1つ目として、 $\mu$ -PCD法は試料からのマイクロ波の反射を利用しているが、反射率が試料の導電率に比例しないことが挙げられる。励起キャリアによる試料の導電率変化が小さい場合は、線形(比例)近似が可能であるが、高注入条件のように導電率変化が大きくなると近似ができなくなる。2つ目として、高注入で励起キャリアが多くなると、キャリア移動度が変化し、キャリア密度と導電率が比例しなくなることが挙げられる。この移動度の変化は、励起された電子と正孔との間での散乱(電子正孔対散乱)が大きくなるためだと考えられる。

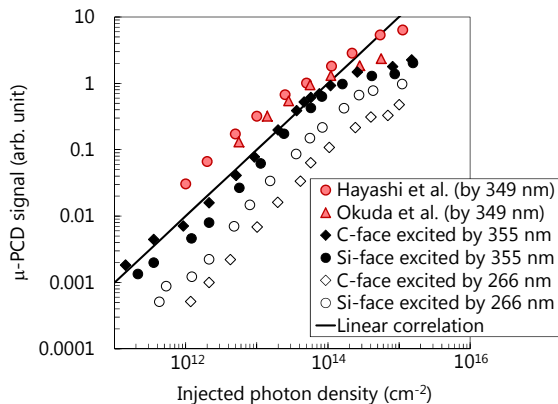


図3 n型4H-SiC(0001)面における注入光子密度に対する $\mu$ -PCD信号。文献[6,7]のデータも共に示す。

これら2つの要因の1つ目に対して、確認と対策のために、試料の導電率変化を抑えた形での $\mu$ -PCD測定を試みた。試料に対するレーザー照射範囲をピンホールにより制限し、マイクロ波照射領域全体での導電率変化を抑えた。複数の大きさのピンホールを通じてn型4H-SiC(0001)Si面に355nmのレーザーを照射し、 $\mu$ -PCD信号を確認した結果を図4に示す。図中の複数の実線は図3と同様に、注入光子密度と $\mu$ -PCD信号との比例関係を示している。同じ注入光子密度の場合、ピンホールを小さくすれば傾きが比例関係に近くなることがわかる。また、最も小さい $25 \mu\text{m}$ のピンホールを用いれば、 $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 以上の注入光子密度でも比例関係が得られることがわかった。従って、導電率変化が大きいことによる、マイクロ波と導電率との間の比例関係からのずれが、 $\mu$ -PCD測定の正確性に影響を与えていることがわかった。また、導電率変化を抑制して測定することで、測定の正確性が向上することも明らかにな

った。

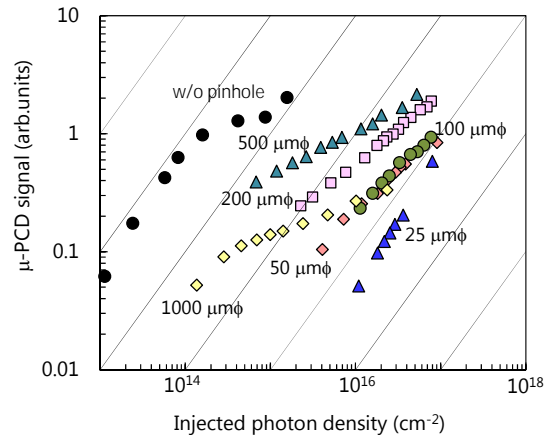


図4 ピンホールを通じてn型4H-SiC(0001)Si面に355nmのレーザーを照射した場合の注入光子密度に対する $\mu$ -PCD信号。実線は比例関係を示す傾き。

しかしながら、図4に示されるように注入光子密度 $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 付近では、如何なるピンホールを用いても比例関係が得られない。従って、前記2つ目の原因を検討した。電子正孔対散乱は文献[8]に計算モデルが示されており、SiCの有効質量を用いることで、そのキャリア移動度に対する影響を定量的に見積もることができる。見積もられた電子正孔対散乱を考慮して、キャリア移動度を計算し、励起キャリア密度に対する導電率を示したものを図5中の丸の記号で示す。図に示されるように、励起キャリアが $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上になると、比例関係が得られなくなることがわかる。これは注入光子密度にすると、図中上部の横軸に示すように、おおよそ $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 以上となり、図3および図4の結果と整合する。

また、さらに電子正孔対散乱の影響を確認するため、ピンホールを用い導電率変化を抑えた状態で、 $\mu$ -PCD測定を実施し、キャリアライフタイムを見積もった。また、電子正孔対散乱の影響を受けた状態で、 $\mu$ -PCD測定によるキャリアライフタイムが、実際の値とどの程度異なるかを計算した。測定結果を図5中菱形の記号で、計算結果を点線で示し、どちらも電子正孔対散乱がない場合でのキャリアライフタイムで規格化している。菱形のプロットと点線は似た傾向を示し、 $\mu$ -PCD測定結果は、電子正孔対散乱の影響を受けていることが示唆された。

以上より、 $\mu$ -PCD測定を不正確にする原因は、導電率変化に対するマイクロ波反射率の比例関係のずれ、およびキャリアの電子正孔対散乱によるものだということがわかった。また、導電率変化はキャリアを励起する領域を制限することで、対処することが可能であることが示された。

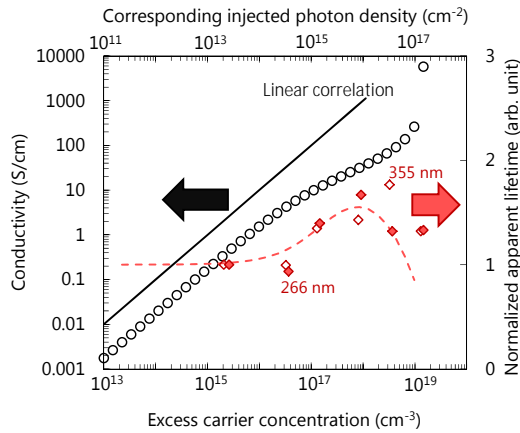


図5 電子正孔対散乱を考慮した励起キャリア密度に対する導電率依存性 ( )。実線は比例関係を示す傾き。菱形はピンホールを用いた  $\mu$ -PCD 測定により得られたキャリアライフタイムであり、低注入での値で規格化している ( 355 nm 励起、 266 nm 励起)。一方、点線は電子正孔対散乱を考慮した場合のキャリアライフタイムの計算値。

(3) p 型 4H-SiC(0001)面の  $S$  および n 型 4H-SiC(11  $\bar{2}$ 0)、(1  $\bar{1}$ 00)面に対する測定

CMP 処理を施した様々な膜厚の p 型 4H-SiC エピタキシャル膜(0001)Si 面に対して、355 nm のレーザーで励起した場合の  $\mu$ -PCD 測定結果を図6に示す。図1に示した n 型の場合と同様に、減衰曲線の傾きは試料の膜厚に依存していることがわかる。また、355nm で励起した場合および、C 面に対する場合も測定しており、それぞれの条件での  $1/e$  ライフタイムを得た。

得られた  $1/e$  ライフタイムを用いて、(1) で用いた計算モデルではなく、改良した手法により  $S$  を見積もった。この改良モデルは、キャリア拡散の励起キャリア密度依存性、輻射再結合およびオージェ再結合、キャリア移動度における電子正孔対散乱を考慮したものである。その結果、p 型 4H-SiC(0001)Si 面の  $S$  は 350 cm/s、C 面の  $S$  は 500 cm/s と見積もられた。なお、図6中の点線は、得られた  $S$  を用いて計算した励起キャリアの減衰を示したものである。

n 型 4H-SiC(11  $\bar{2}$ 0)および(1  $\bar{1}$ 00)面については、実験結果は得られているが、計算モデルとの比較による  $S$  の見積もりには至っておらず、今後報告する予定である。

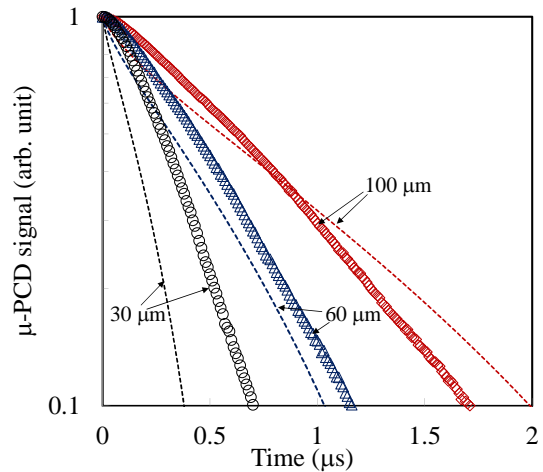


図6 p 型 4H-SiC エピタキシャル膜(0001)Si 面に対して、355 nm で励起した場合の  $\mu$ -PCD 測定結果。点線は Si 面の  $S$  を 350 cm/s、C 面の  $S$  を 500 cm/s と計算した  $\mu$ -PCD 減衰曲線。

#### (4) 成果のまとめ

以上に述べたように、本課題では以下の成果を得た。

- ・様々な表面処理を施した n 型 4H-SiC(0001)面の  $S$  とその温度依存性を定量的に評価した。なお、現在より正確な計算モデルを確立しており、それによる解析結果を後日発表する予定である。

- ・高注入状態での  $\mu$ -PCD 測定の不正確さの原因の解明と対処法の確立を実施した。

- ・p 型 4H-SiC(0001)面の  $S$  を見積もり、n 型 4H-SiC(11  $\bar{2}$ 0)および(1  $\bar{1}$ 00)面に対する測定を行った。

- ・ $S$  の見積もりにおいて、キャリア拡散の励起キャリア密度依存性、輻射再結合およびオージェ再結合、キャリア移動度における電子正孔対散乱を考慮した計算モデルを確立した。

これらの結果は 4H-SiC における  $S$  の定量化に貢献するものであり、パイポーラデバイスの設計に利用することができるものである。

[1] 例えば Niwa et al., Abstract of ISPSD 2012, WBG3-1.

[2] 例えば Cheng et al., Abstract of ECSCRM 2012, WeP-75.

[3] Klein et al., J. Appl. Phys. **108**, 033713 (2010)

[4] Kimoto et al., Appl. Phys. Express **3** (2010) 121201.

[5] Kato et al., Jpn. J. Appl. Phys., **51** (2012) 02BP12.

[6] Hayashi et al., J. Appl. Phys. **109**, 014505 (2011).

[7] Okuda et al., Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 010202 (2013).

[8] Davies, Nature **194**, 7621 (1962).



## 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 6 件)

(1) Subacius Liudvikas, Jarasiunas Kestutis, Ščajev Patrik, Kato Masashi, Development of a microwave photoconductance measurement technique for study of carrier dynamics in highly-excited 4H-SiC Measurement Science and Technology 査読有 26 巻, 2015, 125014.

DOI: 10.1088/0957-0233/26/12/125014

(2) Masashi Kato, Yuto Mori, Masaya Ichimura, Microwave reflectivity from 4H-SiC under a high-injection condition: impacts of electron - hole scattering Japanese Journal of Applied Physics 査読有 54 巻, 2015, 04DP14.

DOI: 10.7567/JJAP.54.04DP14

(3) Yuto Mori, Masashi Kato, Masaya Ichimura, Surface recombination velocities for n-type 4H-SiC treated by various processes Journal of Physics D: Applied Physics 査読有 47 巻, 2014, 335102.

DOI: 10.1088/0022-3727/47/33/335102

(4) Yuto Mori, Masashi Kato, Masaya Ichimura, Estimation of surface recombination velocities for n-type 4H-SiC surfaces treated by various processes

Materials Science Forum 査読有 778-780 巻, 2014, 432-435.

DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.432

(5) Masashi Kato, Yuto Mori, Masaya Ichimura, Correlation between Microwave Reflectivity and Excess Carrier Concentrations in 4H-SiC

Materials Science Forum 査読有 778-780 巻, 2014, 293-296.

DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.293

(6) Masashi Kato, Atsushi Yoshida, Masaya Ichimura, Hiroyuki Nagasawa, Excess carrier lifetime and strain distributions in a 3C-SiC wafer grown on an undulant Si substrate

Physica Status Solidi (a) 査読有 210 巻,

2013, 1719-1725.

DOI: 10.1002/pssa.201329015

〔学会発表〕(計 23 件)

(1) Masashi Kato, Yuto Mori, Nguyen Xuan Truyen, Masaya Ichimura, Time-Resolved Observation of Free Carrier Absorption for Carrier Lifetime Measurement of SiC IUMRS-ICA 2014, 2014 年 8 月 28 日、福岡大学

(2) Masashi Kato, Kimihiro Kohama, Yuto Mori, Masaya Ichimura, Temperature dependence of surface recombination velocities for n-type 4H-SiC European Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2014, 2014 年 9 月 23 日、Grenoble, France

(3) Kimihiro Kohama, Yuto Mori, Masashi Kato, Masaya Ichimura, Evaluation of Temperature Dependence of Surface Recombination Velocities for 4H-SiC 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2015 年 9 月 28 日、札幌コンベンションセンター

(4) Masashi Kato, Kimihiro Kohama, Hiroto Shibata, Masaya Ichimura, Tsunenobu Kimoto, Surface recombination velocities for polished p-type 4H-SiC International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015, 2015 年 10 月 6 日、Giardini Naxos, Italy

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 半導体キャリアライフタイム測定方法

発明者: 加藤正史、森祐人

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2013-165683

出願年月日: 2013 年 8 月 9 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 正史 (KATO MASASHI)

名古屋工業大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80362317