

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05990

研究課題名(和文)高周波大電力変換デバイスの実現に向けた新規ワイドバンドギャップ半導体の研究

研究課題名(英文) Study on super wide band gap semiconductor toward fabrication of high power electric devices operating at high frequency

研究代表者

大石 敏之(OISHI, Toshiyuki)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40393491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：大電力の無線(高周波, RF)エネルギーを直流(DC)に変換する電子デバイスは, 省エネルギーで安心安全な社会の構築できると期待される。本研究では, 現在, 使用されている半導体の材料固有の限界を打ち破るための新しい材料について学術的に研究を行った。

酸化ガリウムとダイヤモンドの高周波大電力変換デバイス適用について, 物性面から検討し, 実際に動作を実証した。半導体の材料物性からRF-DC変換効率を見積もった結果, 従来の半導体と比べて, 高電圧でダイヤモンドの効率が高いことがわかった。そこで, 実際に試作したダイヤモンドダイオードを回路に実装, 10 MHzの高周波を直流に変換できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Super wide band gap semiconductors such as diamond and gallium oxide are considered to be promising to realize electric devices operating with high power at high frequency toward energy saving society with safe and secure. In this research, we have studied academically on breakthrough semiconductor devices toward high frequency RF input with high power to DC output energy.

At first, maximum RF-DC conversion efficiency at 5 GHz was calculated using material properties and equivalent circuit. For diamond Schottky barrier diode (SBD), very high efficiency of 98 % was expected at high operating voltage of 127 V. Next, diamond SBDs with low resistance were fabricated with NO₂ hole doping technique to hydrogen terminated diamond surface. RF-DC conversion using dual diode rectifier circuit was realized for input RF signal with frequency of 10 MHz and peak to peak voltage of 18 V. RF-DC conversion of input RF signal with high peak to peak voltage of 100 V was also obtained at 10 MHz.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：半導体物性 電子デバイス・機器 エネルギー効率化 電子・電気材料 デバイス設計・製造プロセス

1. 研究開始当初の背景

電力変換技術は電力分野だけでなく、産業、自動車、家電、通信などの様々な分野で活躍している。今後も省エネルギーで安心安全な社会の構築に貢献し、日本の発展を支える技術である。

キーデバイスとなる電力変換デバイスは、電力を精密に制御するために、高周波かつ大電力動作が望まれる。このため、窒化ガリウム(GaN)や炭化シリコン(SiC)といったワイドバンドギャップ半導体の研究開発が盛んになっている。

2. 研究の目的

本研究は GaN や SiC の性能を凌駕する高周波大電力変換デバイスを実現するため、新規なワイドバンドギャップ半導体である酸化ガリウム(Ga₂O₃)、ダイヤモンドのデバイス性能を物性面から追求し、高周波大電力を直流に変換するレクテナデバイスの基本構造を作製する。

3. 研究の方法

デバイスの試作、評価を通して、物性の解明、物性値を使った等価回路モデルの作成、物性値から回路性能の予測を行い、回路性能を向上させるデバイス構造を学術的に研究する。

4. 研究成果

(1) 物性値を使ったショットキーバリアダイオード(SBD)の等価回路を基に回路性能(RF-DC 変換効率)を計算し、ダイヤモンドが最高の性能が期待できることを示した。

図1はSBDの構造模式図と等価回路モデルを示す。SBDは半導体の上下にショットキー電極とオーミック電極を配置したものである。等価回路はショットキー接合の容量と半導体中の抵抗からなる簡単なモデルを用いた。

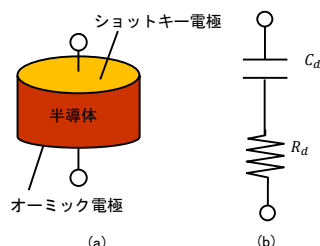


図1 SBDの(a) 構造模式図と(b) 等価回路モデル

図1のモデルを用いて、高周波(RF)入力を直流(DC)に変換する際の回路性能(RF-DC 変換効率)を計算した(周波数 5 GHz)。DCに変換されなかった入力電力は無駄な熱エネルギーとなるため、変換率はシステムにとって重要な指標である。図2はRF-DC変換率が最大値をとる動作電圧を半導体材料で比較した図である。従来の半導体であるシリコン(Si)、ガリウムヒ素(GaAs)と比べて、ワイドバンドギャップ半導体は効率が高い。その

中でもダイヤモンドは高い動作電圧 127 V でもっとも高い効率 98%が期待できる。動作電圧を高くできるということは、取り扱える電力を高くできることを意味する。このため、ワイドバンドギャップ半導体でもダイヤモンドが高周波大電力に向けたデバイスとして有用であることがわかった。

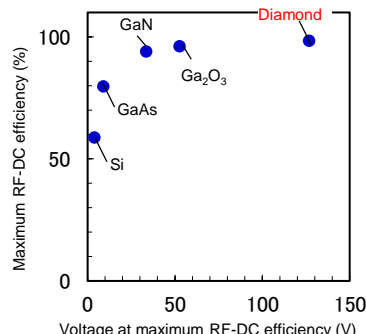


図2 回路性能(RF-DC変換効率)が最大値をとる動作電圧

ダイヤモンドが高い電圧で効率が高い理由を考察するためにオン時とオフ時の損失の動作電圧依存性を計算した(図3)。いずれの半導体においても、動作電圧が高くなるとオン時、オフ時とも損失が増加することがわかる。しかし、その増加する割合がダイヤモンドで非常に小さくなっている。ダイヤモンドでは、他の半導体と比較し、同じ動作電圧で、不純物濃度を高くできること(低抵抗化)がオン時の損失低減に効いている。また、オフ時の損失は容量の影響が大きい。容量は不純物濃度が高いと大きくなり、損失が増加する要因となる。しかし、ダイヤモンドは誘電率が低いいため、オフ時の損失が抑えられていると考えられる。

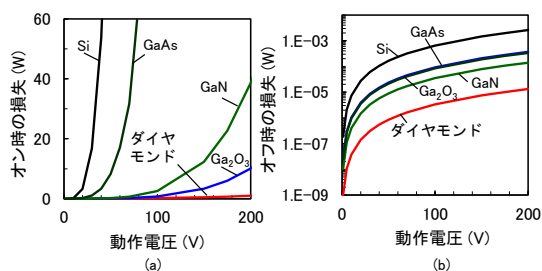


図3 (a) オン時の損失。(b) オフ時の損失の動作電圧依存性

(2) ダイヤモンドが高周波大電力変換用デバイスとして有用であるという結果を受け、実際にダイヤモンドを用いてRF-DC変換動作を実証した。

図4(a)はダイヤモンドSBDの断面模式図である。ダイヤモンド基板上にダイヤモンドをエピタキシャル成長したものを用いて、水素プラズマ処理、NO₂ガス曝露を行い、ダイヤモンド表面に正孔濃度の高い領域(2次元ホールガス)を形成している。このため、抵抗成分が減少することが期待される。図4(b)は実際に作製したSBDの平面写真である。中心にショットキー電極を配置し、その周辺にオー

ミック電極を形成している。

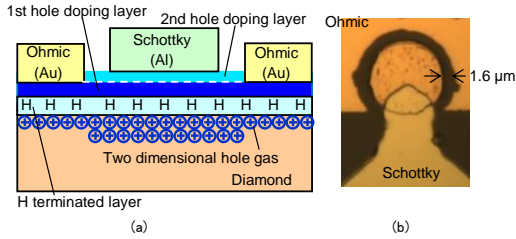


図4 ダイヤモンドSBDの(a)断面構造模式図と(b) 作製した試料の平面写真

まず、試作したダイヤモンド SBD の電気的特性を図 5 に示す。電流-電圧特性において、逆方向電圧(電圧が正)領域において電流は流れず、順方向電圧(電圧が負)領域において電流は-1.4 V 付近から急激に立ち上がる、良好なショットキー特性が得られた。また、容量-電圧特性から算出した正孔濃度の深さ分布では、表面に向かって急激に正孔濃度が増加する特性が得られた。これは $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ の高濃度な正孔が存在することを示し、低い抵抗が得られていることを示している。また、深い領域での正孔濃度は急激に減少し、電圧の高い領域では低い容量が期待できると考えられる。

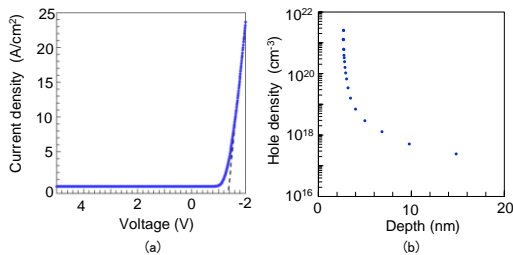


図5 試作したダイヤモンドSBDの(a) 電流-電圧特性と(b) 正孔濃度の深さ分布

良好な電気的特性を示すダイヤモンド SBD が作製できたため、これを用いて RF-DC 変換回路を試作した。図 6 は試作した RF-DC 変換回路の回路図である。SBD を 2 個使用するデュアルダイオード回路を用いた。インピーダンス 50Ω の電源から 10 MHz の正弦波を RF-DC 変換回路に入力する。正弦波はコンデンサを通過した後、2 個の SBD にて RF を DC に整流し、コンデンサにて平滑される。平滑された DC 信号は負荷で消費される構成となっている。

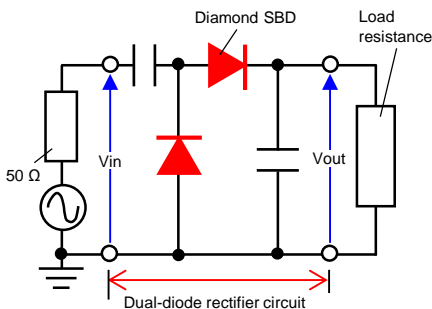


図6 試作したRF-DC変換回路の回路図

図 6 の回路を用いた測定結果を図 7 に示す。入力は 10 MHz の高周波でピーク間の電圧は 18 V(振幅 9 V)である。約 4 V の DC 出力が得られていることがわかる。これからダイヤモンド SBD を使って、RF-DC 変換動作が実際に行えることを実証した。しかし、この実験において、周波数が 10 MHz と低いこと、入力電圧がピーク間電圧で 18 V と低いことが課題である。

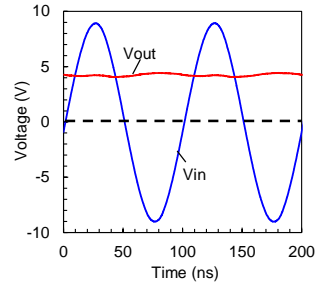


図7 試作したRF-DC変換回路における入力と出力の波形

(3) 他の半導体と比較し、ダイヤモンド SBD は高電圧動作が実現可能であることが特長のひとつである。(2)の実験において、入力電圧が低いのは高周波電源の仕様による制限であった。そこで、高周波電源の信号を増幅させる増幅器を用意し、入力電圧を 100 V(ピーク間電圧)に大きくした。図 8 に入力と出力波形を示す。RF 入力の周波数は 10 MHz、ピーク間電圧は 100 V である。一方、出力は約 38 V であった。これによりダイヤモンド SBD による高電圧における RF-DC 変換動作を実証することができた。

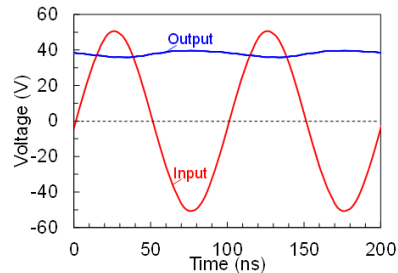


図8 入力電圧を高めた場合(ピーク間電圧 100 V)における RF-DC変換回路の入力と出力の波形

(4) RF-DC 変換効率を向上させるために SBD のショットキー電極面積依存性を検討した。(1)の原理計算から SBD の抵抗と容量が回路性能における指標のひとつであると考えられた。そこで、SBD の抵抗、容量のショットキー電極面積依存性について検討した。

図 9 は SBD の抵抗、容量、および RF-DC 変換後の DC 出力のショットキー電極面積依存性である。抵抗は面積が増加すると電流が流れる領域が増加するため、減少する。一方、容量は電極面積が増加すると電荷が貯まる領域が増加するため、増加する。回路の損失は抵抗が増加、容量が増加すると増加し、効率を劣化させる。よって、抵抗と容量の関係

はトレードオフの関係にある. 図 9(c)は回路の RF-DC 変換後の出力 DC 電圧の面積依存性を示す. 面積が増加すると DC 出力電圧が増加することがわかる. このため, 面積を増加させた時, 容量増加による効率の劣化より, 抵抗低減による効率の向上が勝っていると考えられる.

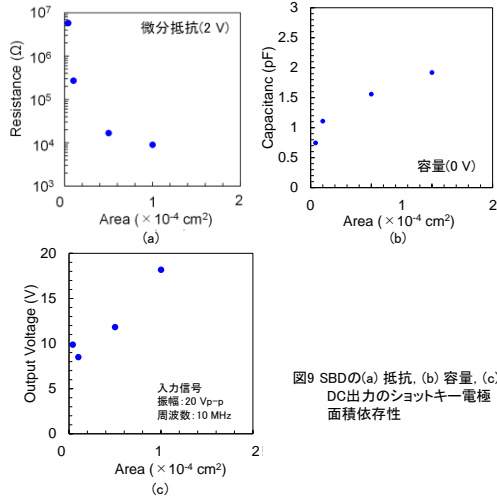


図9 SBDの(a)抵抗, (b)容量, (c) DC出力のショットキー電極面積依存性

図 10 はショットキー電極面積を大きくしたダイヤモンド SBD で回路を作製した場合の RF 入力と DC 出力の波形を示す. RF 入力の周波数は 10 MHz, ピーク間電圧は 20 V とした. 約 18 V の DC 出力が得られており, これまでのダイヤモンド SBD より出力電圧が向上していることがわかる.

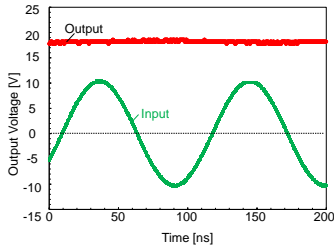


図10 面積を大きくしたSBDによるRF-DC変換回路の入力と出力の波形

(5) 高周波大電力変換システムにおいて, SBD だけでなく, トランジスタも使用することになる. そこで, ダイヤモンドトランジスタのシミュレーション用モデルを提案した.

図 11(a)は実際に作製されているダイヤモンドトランジスタ (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)) の断面構造模式図である. ダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長されたダイヤモンド上に水素終端層, NO₂ 吸着層があり, その上部にソース電極とドレイン電極が形成されている. さらにソース・ドレイン間にゲート絶縁膜(アルミナ膜)が形成され, その上にゲート電極が形成される構造となっている. 水素終端層や NO₂ 吸着層は気体が半導体表面上に吸着しているため, 通常のシミュレーションでは計算できない. 今回, この気体の層を固定電荷で置換えたモデルを提

案した(図 11(b)).

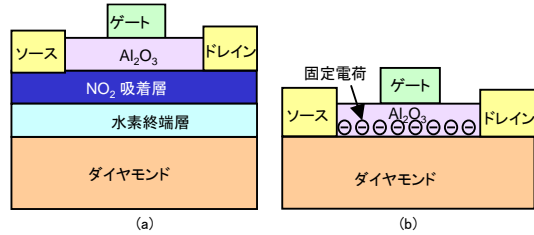


図11 ダイヤモンドMOSFETの(a)実際の断面構造模式図, (b)シミュレーション用モデル

図 12 は, 図 11(b)のモデルを使って計算した結果を示す. 実測のドレイン電流-ドレイン電圧特性と計算結果の比較を図 12(a)に示す. 若干, ずれが生じているものの全体の傾向は実測と計算が一致しているといえる. また, 図 12(b)に周波数 1 GHz で RF 入力の振幅を 2 V, 10 V と変化させた場合のドレイン電流-ゲート電圧特性を示す. 振幅を大きくすると DC 特性からのずれが大きくなることがわかる. 今回, トラップの効果を考慮していないため, ダイヤモンド MOSFET の持つ容量や抵抗の影響で高い周波数では DC 特性とずれが生じていると考えられる. 今後, デバイス構造を検討していくことが課題である.

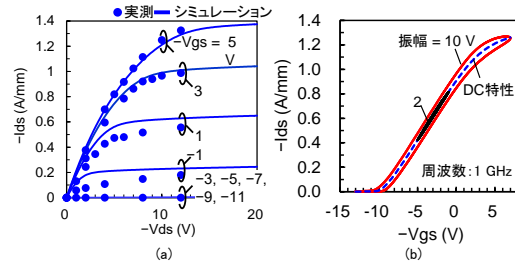


図12 (a) 電流-電圧特性における実測と計算値の比較. (b) RF入力した場合の出力の計算による予測

(6) 実際にダイヤモンド MOSFET を使用する場合, 電気的特性が安定していることが望ましい. そこで, DC ストレス試験を実施した.

図 13 は, 試作したダイヤモンド MOSFET の平面図とストレス試験前のドレイン電流-ドレイン電圧特性である. ゲート長は 5.5 μm, ゲート幅は 94 μm である. ストレス試験前の特性としては最大ドレイン電流 82 mA/mm と大きく, ドレインリーク電流は 6.4 x 10⁻³ A/mm と小さい良好な特性が得られた.

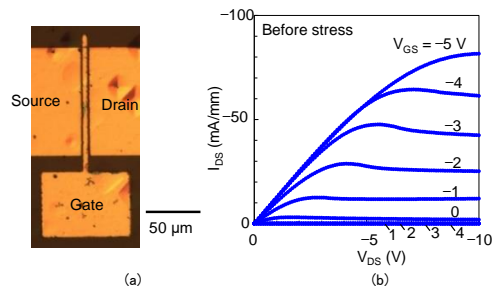


図13 (a) ダイヤモンドMOSFETの平面写真, (b) ストレス試験前の電流-電圧特性

次にドレイン電圧 -5 V 、ゲート電圧 -1 V の DC ストレスを印加し、ドレイン電流の時間変化を測定した。ドレイン電流の初期変動が見られたものの、ドレイン電流は 14.3 時間同じ値を維持した。しかし、それ以後はドレイン電流が急激に劣化することがわかった。この理由を調べるため、ストレス試験前後のドレイン電流-ゲート電圧特性を比較した(図 14(b))。トランジスタがオフの状態ではストレス後にドレイン電流が増加している。これはゲート電流が増加したため、DC ストレスによりゲート絶縁膜のアルミナが劣化したと考えられる。また、オフからオンに変化するピンチオフ電圧が負にシフトし、オン時のドレイン電流もストレス後に低下が観察された。これはダイヤモンド表面が劣化し、2次元ホールガス濃度が減少しているためと考えられる。

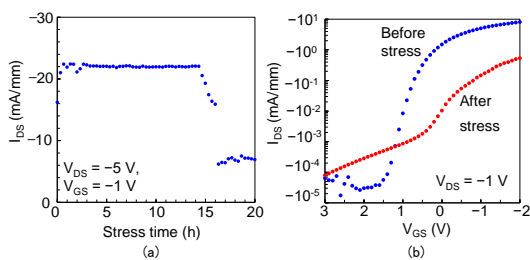


図14 (a) ストレス試験中のドレイン電流の変化、
(b) ストレス試験前後での電流-電圧特性の比較

ストレス試験時に印加している電圧状態における電界分布をシミュレーションした結果を図 15 に示す。ゲート電極下に高い電界が発生していることがわかる。ゲート電極下でも特にドレイン側のゲート端における電界が高いことがわかる。図 15(b)にゲート電極付近のダイヤモンド表面における電界分布を示す。ゲートのドレイン側で電界が非常に高くなることがわかる。以上の結果からドレイン側のゲート端で、高電界が発生し、ゲート絶縁膜とダイヤモンド表面の両方が劣化したため、ドレイン電流が劣化したと考えられる。

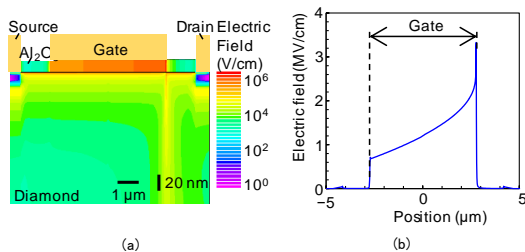


図15 シミュレーション結果
(a) 電界の2次元分布、(b) ダイヤモンド表面の電界分布

(7) Ga_2O_3 は、新しい半導体で、物性が明確でない部分がある。ここでは、デバイス性能に大きな影響を与える伝導機構について、明らかにした。

図 16(a)は Ga_2O_3 の電子濃度の温度依存性を示す。従来の半導体では温度が減少すると電子濃度は単調に減少する。しかし、 Ga_2O_3

では、室温で $3 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ の電子濃度が、温度とともに減少するが、 160 K 以下で、依存性が緩やかになる傾向が観察された。この傾向を説明するモデルとして、不純物が Ga_2O_3 バンド内に内部バンド(Inter band)を作る 2バンドモデルを考えた(図 16(b))。このモデルによりホール測定におけるホール係数と抵抗率を計算した結果、図 17 に示すように非常に良い一致が見られた。このことから不純物が比較的濃い Ga_2O_3 では、2バンドを形成していると考えられる(本結果では、活性化エネルギー 7.4 meV 、実効的な電子濃度 $5.1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ であった)。

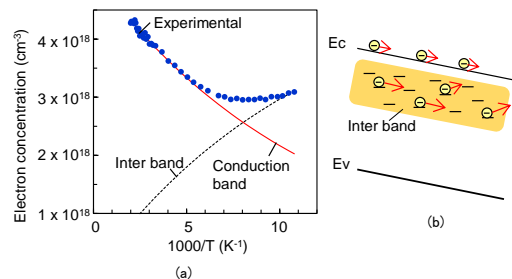


図16 Ga_2O_3 半導体の(a) 電子濃度の温度依存性と(b) 電子の伝導機構模式図

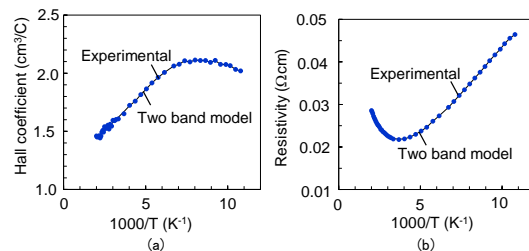


図17 Ga_2O_3 半導体のホール測定結果(a) ホール係数、(b) 抵抗率と2バンドモデルによる計算結果の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. **T. Oishi, N. Kawano, S. Masuya, and M. Kasu**, "Diamond Schottky Barrier Diodes with NO_2 Exposed Surface and RF-DC Conversion Toward High Power Rectenna," *IEEE Electron Device Lett.* 38 pp.87-90 (2017).
2. 大石敏之、岸川拓也、吉川大地、平間一行、嘉数誠、「表面伝導型ダイヤモンド FET のデバイスシミュレーションに関する検討」電子情報通信学会論文誌 C、J99-C、No.5、pp.193-200 (2016).
3. **T.Oishi, K.Harada, Y.Koga, and M.Kasu**, "Conduction mechanism in highly doped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-2 0 1) single crystals grown by edge-defined film-fed growth method and their Schottky barrier diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 030305 (2016).

[学会発表] (計 15 件)

審査付き国際会議

1. **T. Oishi, N. Kawano, and M. Kasu**, "Demonstration of RF-DC conversion

using dual diode rectifier circuit for rectenna with diamond Schottky barrier diodes,” Compound Semiconductor Week 2016 (the 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS)), June 27-30, 2016, Toyama, MoP-ISCS-015.

2. T.Oishi, R.Higashi, K.Harada, K.Hirama, and M.Kasu, “Simulation study of NO₂-exposed H-terminated diamond FETs with Al₂O₃ insulator gate,” The 2015 international Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), June 4-5 2015, Kyoto, PA-01.

研究会, 学会発表

1. 嘉数 誠、深見 成、石松 裕真、榎谷 聡士、大石 敏之、藤居 大樹、金 聖佑, “マイクロニードル技術を用いた高品質ヘテロエピタキシャル膜上に作製したダイヤモンドFET”, 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京 (2018年3月17-20日) 18p-C302-9.
2. 深見 成、網代 康佑、大石 敏之、河野 直士、荒木 幸二、榎谷 聡士、嘉数 誠, “高い電圧変換比を持つダイヤモンドショットキーバリアダイオードRF-DC変換回路”, 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京 (2018年3月17-20日) 18p-C302-11.
3. 石松 裕真 舟木 浩祐 榎谷 聡士 宮崎 恭輔 大島 孝仁 嘉数 誠 大石 敏之 「NO₂ ホールドピング水素終端ダイヤモンド MOS FET の DC ストレス評価」 電子情報通信学会研究会 ED2017-63、2017年12月1日, pp. 69-72.
4. 舟木 浩祐, 石松 裕真, 榎谷 聡士, 宮崎 恭輔, 大島 孝仁, 嘉数 誠, 大石 敏之, “NO₂ ホールドピング水素終端ダイヤモンド MOS FET の DC ストレスによる劣化メカニズムの検討”, 2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 福岡県 (2017年9月5-8日) 8a-S22-8.
5. 河野直士, 深見成, 榎谷聡士, 大島孝仁, 嘉数誠, 大石敏之 “ダイヤモンド素子を用いたレクテナ回路の高電圧動作” 2017年第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県 (2017年3月14-17日) 15p-315-17.
6. 舟木浩祐, 石松裕真, 榎谷聡士, 大島孝仁, 嘉数誠, 大石敏之, “ダブルNO₂ ホールドピングした水素終端ダイヤモンド MOSFET の連続動作”, 2017年第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県 (2017年3月14-17日) 15p-315-16.
7. 大石 敏之, 河野 直士, 嘉数 誠 「ダイヤモンド素子を用いたレクテナの理論的検討と動作実証」, 第8回集積化MEMSシンポジウム, 平戸文化センター, 2016年10

月25日, 25am2-PM-015.

8. 大石 敏之, 河野 直士, 嘉数 誠 「ダイヤモンドデバイスを用いた無線電力伝送用レクテナの理論的検討」 第77回応用物理学会春季学術講演会, 2016年9月15日, 朱鷺メッセ, 15a-B1-4.
9. 河野 直士, 大島 孝仁, 嘉数 誠, 大石 敏之 「酸化ガリウムダイオードを用いたレクテナ回路動作」 第77回応用物理学会春季学術講演会, 2016年9月15日, 朱鷺メッセ, 15a-B1-5.
10. 河野 直士, 榎谷 聡士, 大島 孝仁, 大石敏之 「レクテナにおけるダイヤモンドショットキーバリアダイオードの抵抗容量積の影響」 第77回応用物理学会春季学術講演会, 2016年9月15日, 朱鷺メッセ, 15a-B1-6.
11. 河野直士, 嘉数 誠, 大石敏之 「ダイヤモンドショットキーバリアダイオードによるレクテナ回路の作製」 電子情報通信学会研究会 ED2016-18、2016年5月20日, pp. 25-28.
12. 嘉数誠, 原田和也, 花田賢志、大石敏之, 「β-Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード素子特性の分布」 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月21日, 東工大、21a-S222-8.
13. 大石敏之, 河野直士, 嘉数誠, 「高効率無線電力伝送を目指したダイヤモンド・レクテナデバイスの提案」 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月20日, 東工大、20p-P9-19.
14. 大石敏之, 嘉数誠, 「高濃度 Sn ドープ β-Ga₂O₃ (2-01) 単結晶の温度特性の検討」 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月20日, 東工大、20p-P9-18.
15. 大石敏之, 嘉数誠 「等価回路モデルを利用したレクテナ RF-DC 変換効率計算—大電力 RF デバイスに適した半導体材料の検討—」 電子情報通信学会研究会 ED2015-116、2016年1月20日, pp. 25-29.

[その他]

ホームページ

<http://www.ee.saga-u.ac.jp/sedlab/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大石 敏之 (OISHI Toshiyuki)

佐賀大学 教育研究院自然科学域理工学系
工学系研究科 電気電子工学専攻 教授

研究者番号: 40393491