

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360113

研究課題名(和文) 高品質半導体ダイヤモンドを用いた高温動作パワースwitchングデバイスの研究

研究課題名(英文) Researches of high temperature power switching devices on high quality semiconductor diamond

研究代表者

梅沢 仁 (Umezawa, Hitoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・先進パワーエレクトロニクス研究センター・主任研究員

研究者番号：80329135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：高温動作が可能な耐環境ダイヤモンドパワーデバイスの実現のため、スイッチングデバイスの開発を行った。材料パラメータを用いた解析モデルからプレーナ型MESFETおよび縦型MOSFETの動作特性を計算し、200-300℃で特性変動のない素子が実現可能であることを求めた。プレーナ型MESFETを試作し、発表時点で世界最高性能である1.5kVの絶縁破壊電圧を得た。デバイスの高出力化のためコンタクト層へのp+選択成長およびイオン注入層の適用を試み、ドレイン電流の大型化が可能であることが分かった。SiO₂を相関絶縁膜に用いたインターコネクト技術を開発し、30mmまでのゲート幅拡大が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In order to realize high temperature high power electronics, development on device fabrication technique has been carried out. Firstly, the operation characteristics was estimated using the analytical model with material parameters. The doping concentration and the thickness of drift layer for diamond switching devices were optimized which realizes constant drain current and transconductance in the temperature ranges from 200 to 300 degC. Fabricated planer MESFET shows breakdown voltages more than 1.5kV which was the best value in the world. To decrease the Ohmic contact resistances on source and drain, p+ contact layers were formed on p- drift layer of MESFET. The increase of the gate width more than 30mm was realized using interconnection of source contact.

研究分野：電子デバイス

キーワード：ダイヤモンド パワーデバイス FET 高温動作

1. 研究開始当初の背景

あらゆる電気機器の電力制御に不可欠なパワーエレクトロニクス技術は、近年の電化技術やエネルギー問題と共に重要性を増しており、地球環境破壊を防ぐ省エネルギー技術の中でも全分野に貢献する横断的技術として重要課題に挙げられている。ダイヤモンドはSiC、GaNとともにワイドギャップ半導体として知られているが、中でも物質中最大の熱伝導率(2200W/mK)、SiC・GaNの数倍の絶縁破壊電界(20MV/cm)、高い移動度と飽和キャリア速度、低い比誘電率(5.7)などの特長により、ダイヤモンド半導体素子は既存材料素子の限界を大きく上回る低損失化や高出力化、高速動作が同時に可能である。特にパワーデバイスとしての材料性能を示すバリーガ指標はSiの44,000倍、SiCやGaNの15倍である。さらに炭素sp³の強い結合により高温でも高い信頼性が得られ、資源枯渇の問題もなく、さらに単元素半導体であるため低欠陥・無転位結晶も可能となりつつあり、究極のデバイスと言われるダイヤモンド素子実用化が現実的となってきている。

2. 研究の目的

これまで研究代表者らはダイヤモンドショットキーダイオードを題材として、世界に先駆けた高温パワーエレクトロニクス素子研究を行ってきた。本申請による研究で、シミュレーションによるデバイス可能性の模索と、ダイヤモンドに適した要素プロセス技術の開発を行う。ダイヤモンドを用いた次世代パワーエレクトロニクス、耐環境型超高温エレクトロニクスへの展開、特に強制冷却システムを極端に小さくし、自己発熱した高温のまま利用できる新しいコンセプトの省エネルギー型パワーデバイスに向けての展開が可能になる。

本研究課題では、高温で動作する低損失パワーエレクトロニクスを実現する為、ダイヤモンド半導体を用いたスイッチング素子の検討と開発を行う。特に、研究課題を「250環境での高電力密度動作の可能性」に集約して調査・研究を行う。まず、各種スイッチングデバイス構造候補におけるデバイス特性予測を行い、ダイヤモンド素子に適した構造と必要とされる要素技術をリストアップする。共通要素技術の開発を平行して進め、高性能スイッチングデバイスを実現する。

3. 研究の方法

パワーエレクトロニクスで低損失かつ高出力密度動作可能なスイッチング素子は必要不可欠であり、ダイヤモンド素子はSiはもとよりSiCやGaNと比較しても性能改善が見込め、さらに高温動作・高信頼性が可能である。しかし、現時点で実質的なパワースイッチング素子の研究・開発はなされておらず、(1)理想パラメータ、経験的パラメータを用いてのスイッチング素子の特性モデ

ル化と性能改善予測、(2)予測から導かれた重要プロセスの技術開発、(3)開発プロセスを組み込んだスイッチング素子の試作と評価、を縦断して行う必要がある。本研究申請ではそれぞれの項目に目標およびスケジュールを組み立てて研究を行う。

(1)ダイヤモンドスイッチングデバイス性能予測:

ダイヤモンドを用いたスイッチング素子が高温でどのような特性になるかを予測し、最適設計構造を導出する為に、半導体デバイス方程式をもとにした二次元解析を行う。ダイヤモンド素子特性に大きな影響を与えるディープアクセプタ・ドナー効果、温度依存移動度効果を解析モデルに取り込み、室温から300までのオン抵抗、耐圧の関係を求める。モデルに使用するパラメータ(絶縁破壊電界、移動度、飽和キャリア速度など)には、理論値もしくは文献トップデータとこれまでの知見による経験値を用いる事で、現状特性と将来特性を比較させる。

さらに、各動作温度で最適構造を求めることにより、素子化の設計指標とする。ここで、(a)反転型FET(MOS/MIS) (b)ディープディプレション型FET(MES/MIS/JFET)、(c)SIT、(d)BJTなどを題材として二次元解析を行い、性能予測を行う。また、現状の未成熟なプロセス(ドーピング濃度制御性、加工制御性など)に依存する寄生素子を組み込んだ予想特性を示す事により、必要となる要素技術とその技術要求精度をリストアップし、知見を広くソサイエティに周知する事で、プロセス研究を促進する。

(2)ダイヤモンドスイッチングデバイス要素技術開発:

上記、性能予測から求めた最適構造を実施するための要素技術の開発と、技術の高精度化を行う。技術目標および精度は、性能予測で導出した最適構造より定める。具体的には、各構造に対して、次のプロセスを検討・確立する。

プレーナ型素子:

A.ダイヤモンド技術:選択的p+層形成、ドーピング濃度制御、原子平坦エピ、高移動度表面、低準位密度MIS界面

B.周辺技術:高温・高耐圧絶縁膜形成、フィールドプレート構造、長ゲート幅(エアブリッジ)、耐熱・高圧パッシベーション

縦型素子:

A.ダイヤモンド技術:高品質n型成長、埋め込みpn接合

B.周辺技術:微細加工プロセス、JTE/RESURFプロセス

(3)ダイヤモンド高温パワーデバイス試作:

性能予測による最適構造による知見と要素技術開発で得られた技術をもとに、高温・高出力ダイヤモンドスイッチング素子の試作を行う。試作した素子は、スイッチング素子の試作と性能評価を行う。獲得要素技術の

技術レベル毎に随時素子への適用を行い、まずはディープディプレッション型単純構造による基本特性の評価を行い上記性能予測モデルへのフィードバックを行う。次にいづれの素子においても利用される最重要基本要素技術である、オーミック領域へのp+層適用、MIS構造試作、高移動度チャンネル、フィールドプレート構造をディープディプレッション型FETに適用する。素子構造は最終構造であるプレーナ型もしくは縦型ダイヤモンドFETを目標として試作開発を行う。

4. 研究成果

上記研究の方法に沿って研究を実施した。以下にその結果を示す。

(1) ダイヤモンドスイッチングデバイス性能予測：はじめにデバイス動作モデルの構築のため、材料基本パラメータについて検討を行った。まず、ドーピング濃度と移動度、および移動度の温度依存性モデルを構築した。キャリアがチャンネル中で飽和速度に到達しないことを前提として、移動度のキャリア濃度と温度の依存性実験データへのフィッティングによる経験的モデルを構築した。これにより、室温から400℃までの温度範囲でダイヤモンドドリフト層チャンネルの特性予測を行うことが可能となった。さらに、上記モデルを用いて基本デバイス方程式の構築を行った。基本方程式として、上記材料基本パラメータを用いて、ダイヤモンドディープディプレッション動作プレーナ型MESFETの動作モデルを構築した。動作モデルにはグラジュアルチャンネル近似、ロングチャンネル近似、移動度一定近似を組み込み、閾値電圧解析および最大動作電流解析を行った。構造解析では閾値電圧を一定としてエピタキシャル成長ドリフト層のドーピング濃度およびエピ膜厚の解析を行った。各ドーピング濃度、エピ膜厚における最大ドレイン電流の温度依存性について解析を行い、動作温度に応じて最適ドーピング濃度およびエピ膜厚の組み合わせがあることを確認した。さらに、1A以上の大電流動作に必要なフィンガー構造について検討を行った。

続いて、上記モデルに寄生抵抗成分の影響を組み込んで解析モデルを構築した。閾値電圧を10、20Vとした場合のFET最大電流値を求め、それぞれ10、100A動作を必要とした場合の必要ゲート幅について設計を行った。また、横型デバイスにおけるセルピッチからチップ面積を求め、必要欠陥密度やウェハ面積、ウェハ単価について検討を行った。

さらに、上記モデルを用いて高温動作時の性能限界と特性の温度依存性を求めた。高温での応用を前提に、200~300℃の範囲で動作が一定となる素子構造の理論設計値を求めた。試作MESFETの寄生抵抗成分を評価し、設計との誤差を評価した。

また、反転型MOSFETにおいて、ドーピング濃度、不純物種、CV特性予測を行い、チャンネル長などのパラメータから閾値電圧、ドリフト層抵抗、チャンネル抵抗、オーミック抵抗の比を求め、要求移動度について検討を行った。

試作したディープディプレッション型MESFETに対して、閾値電圧から求めたドリフト層ドーピング濃度および設計値を用いてTCADによるシミュレーションを行った。この結果、1.5kVの破壊電圧に対してゲート電極のドレイン端には10MV/cm以上の最大電界が印加されていることが予想された。また、一般に用いられているアバランシェパラメータを用いると、シミュレーションによるブレークダウン電圧は実験的に得られているブレークダウン電圧よりも小さいことが分かった。FETの高耐電圧化にはFPなどのゲート電界緩和構造が必要である。

(2) ダイヤモンドスイッチングデバイス要素技術開発：まず、要素技術開発のため、設備拡充を行った。高品質フィールドプレート形成のためイオン化ガス流量制御ユニットを導入した。また厚膜Al₂O₃フィールドプレート構造を縦型ショットキーダイオードに組み込み、FETのゲート構造に適用可能な高耐圧ダイオードを実現した(雑誌論文1、学会発表3、4、7など)。本研究による成果は学会および論文で報告した。

エピ成長時の不純物制御(窒素取り込み低減)を行うため、エピタキシャル成長用マイクロ波プラズマCVD装置に高真空ゲートバルブを導入した。エピ成長時の不純物取り込み、成長レートを計算し、(1)の該当年度にて検討したチャンネルへの必要ドーピング濃度に対して成長条件を確定した。エピタキシャル成長膜の欠陥について検討を行い、デバイスとエッチピット欠陥の相関を評価した(雑誌論文2)。本研究による成果は学会および論文で報告した(学会発表6ほか)。

試作素子の寄生抵抗解析により、600V級素子ではコンタクト抵抗が大きな寄生抵抗成分となることを解析し、コンタクト抵抗の低減に向けて取り組みを行った。低抵抗化にはp-層上にイオン注入もしくは選択成長により局所的に極薄のp+層を形成する方法を用いた。評価にはcTLM法を用い、接触抵抗を評価した。選択成長、イオン注入のいずれにおいても、p-層上に形成したソース・ドレインオーミックコンタクトよりも低抵抗であることを示したが、p-/p+界面にも接触抵抗が存在することが分かった(学会発表20ほか)。本研究による成果は学会で報告した。

高出力化のためゲート幅の大型化を行った。まずドレイン電極をAuワイヤでボンディング接続する方法を行い、9.4mmまでゲート幅を拡張する方法をテストした。ソース・ドレイ

ンコンタクト下には選択成長によるp+層を形成し、コンタクト抵抗の低抵抗化を行った。さらに、 Al_2O_3 および SiO_2 を層間膜として同じ面積で30mm以上までのゲート幅拡張をテストした。この手法ではゲート幅効率は $0.15m/cm^2$ であり、さらなる大型化には縦型構造が必要である。

(3) ダイヤモンド高温パワーデバイス試作：まず、ソースメジャーユニットを購入し3端子測定を可能とした。

また、プレーナ型MESFET試作のためのプロセスフローを構築した。リフトオフによるTi/Auオーミック接合(EB蒸着)、リフトオフによるPtショットキー接合の形成を行い、構造を試作した。

縦型ダイヤモンドFET構造を作製するプロセスを完成させるため、エッチング手法とエッチング後のCVD成長について試験を行った。エッチング時には円形もしくは角丸型構造とした設計がCVD成長による安定面形成により(100)もしくは(111)面が優先的に形成されることがわかった。またSEM観察により、接合界面において異常成長が発生していることがわかった(産業財産権出願済み)。

試作した9.4mmゲート幅素子にて150にて最大ドレイン電流が得られ、28mAまでの実電流を得た。

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. H. Umezawa, "1 On-Resistance Diamond Vertical-Schottky Barrier Diode Operated at 250 °C", Appl. Phys. Express, 6 (2013) 011302. 査読有
2. H. Umezawa, N. Tatsumi and S. Shikata, "Leakage current analysis of diamond Schottky barrier diodes by defect imaging", Diamond Relat. Mater., 40 (2013) 56-59. 査読有
3. H. Umezawa, T. Matsumoto, S. Shikata, "Diamond metal- semiconductor field-effect transistor with breakdown voltage over 1.5 kV", IEEE Electron Device Letters, 25 (2014) 1112-1114. 査読有
4. H. Umezawa, S. Shikata, "Leakage current analysis of diamond Schottky barrier diodes operated at high temperature", Jpn. J. Appl. Phys., 53 (2014) 04EP04. 査読有
5. H. Umezawa, S. Shikata, T. Funaki, "Diamond Schottky barrier diode for

high temperature, high power and fast switching applications", Jpn. J. Appl. Phys., 53 (2014) 05FP06. 査読有

6. 梅沢 仁, "ショットキーダイオードとMESFET", New Diamond, 121 (2016) 10-12. 査読無

[学会発表](計 件)

1. H. Umezawa et al., High current operation of diamond vertical-SBDs at 250oC, IUMRS-Int'l Conf. on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), 2012/9/24, Japan
2. H. Umezawa et al., Diamond high-power and high-temperature SBDs, The 44th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), 2012/9/26, Japan
3. 梅沢仁 他、5A動作ダイヤモンドSBDの高温動作特性評価、SiCおよび関連ワイドギャップ半導体研究会 第21回研究会、2012/11/19、日本
4. H. Umezawa, Y. Kato and S. Shikata, Diamond VSBD with BVBD 1.8kV at 250oC operation temperature, Hasselt Diamond Workshop 2014, 2014/2/19, Hasselt, Belgium.
5. 梅沢仁, 加藤有香子, 鹿田真一, 単結晶および多結晶ダイヤモンドの分光エリプソメトリー法による膜厚評価, 第27回ダイヤモンドシンポジウム, 2013/11/20, 日本工業大学
6. H. Umezawa, Y. Kato and S. Shikata, Diamond power devices for high temperature and high current applications, 2013 JSAP/MRS Joint Symposia, 2013/9/18, 同志社大学
7. H. Umezawa, S. Shikata and T. Funaki, Fabrication and Characterization of 1mm Size Diamond SBD, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), 2013/9/24, ヒルトン福岡
8. H. Umezawa, High Temperature Operation of Diamond SBDs, 1st French-Japanese Workshop on Diamond power devices, 2013/6/19, France
9. H. Umezawa and S. Shikata, Leakage Current Analysis of Diamond SBDs Operated at High Temperature, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), 2013/9/24, ヒルトン福岡
10. S. Shikata, H. Umezawa et al., Major tasks toward Diamond power device and wafer, 8th International Conference on New Diamond and Nano Carbon 2014 (NDNC2014), 2014/5/19, Chicago, USA.
11. H. Umezawa, Diamond unipolar devices

- for high power and high temperature electronics, SBDDXX (招待講演), 2015/2/25, Hasselt, Belgium
12. 梅沢仁, Diamond Power Devices, SBDs and MESFETs, 2nd Japan-France Workshop on Diamond Power Device (招待講演), 2014/10/8, 九重, 大分
 13. 梅沢仁、松本猛、鹿田真一, 高温動作ダイヤモンド MESFET の試作と評価, 第 75 回 応用物理学会秋季学術講演会, 2014/9/18, 札幌, 北海道
 14. 梅沢仁、松本猛、鹿田真一, ダイヤモンド MESFET の高電圧ブレイクダウン特性, 第 28 回 ダイヤモンドシンポジウム, 2014/11/20, 北千住、東京
 15. H. Umezawa, Diamond Unipolar Devices for Future Power Electronics, 2016 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演), 2016/3/29, Phoenix Convention Center, Arizona, USA
 16. H. Umezawa, T. Matsumoto, M. Tsubota, J. Kaneko, Y. Mokuno, Relaxation of electrical field at the edge of diamond Schottky barrier diode using X-ray irradiated surface semi-insulating layer, Hasselt Diamond Workshop 2016 - SBDD XXI, 2016/3/9, cultuurcentrum Hasselt, Hasselt, Belgium
 17. S. Rugen, H. Umezawa, N. Kaminski, Floating Metal-Fieldring Edge-Termination of diamond Schottky barrier diodes, Hasselt Diamond Workshop 2016 - SBDD XXI, 2016/3/9, cultuurcentrum Hasselt, Hasselt, Belgium
 18. H. Umezawa, T. Matsumoto, S. Ohmagari, Y. Kato and Y. Mokuno, High Voltage Diamond MESFET with VBR > 1.5kV, The 2015 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2015), 2015/9/27, International Conference Center, Sapporo, Japan
 19. H. Umezawa, Y. Kato, Y. Mokuno, S. Shikata, Y. Takahashi, H. Sugiyama, K. Hirano, Local area characterization of self-standing single crystal diamond by Synchrotron radiation X-ray topography and rocking curve measurement, 9th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2015), 2015/5/24, International Conference Center, Shizuoka, Japan
 20. H. Umezawa, S. Ohmagari, Y. Kato, T. Matsumoto, Y. Mokuno, Diamond MESFET with low resistive p+ contact layer for source and drain, International Conference on Diamond and Carbon Materials 2015 (DCM2015), 2015/9/6,

International Conference Center, Bad Homburg, Germany

21. H. Umezawa, J. Pernot, D. Eon, S. Shikata and E. Gheeraert, Optimized doping structure of drift layer on punch-through type diamond power devices, International Conference on Diamond and Carbon Materials 2015 (DCM2015), 2015/9/6, International Conference Center, Bad Homburg, Germany

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計1件)
未公開

〔その他〕
ホームページ等
<https://unit.aist.go.jp/adperc/ci/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅沢 仁 (Hitoshi UMEZAWA)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所・
先進パワーエレクトロニクス研究センター・主任研究員
研究者番号：80329135