

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：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820128

研究課題名(和文) 高効率パワーデバイスの動作に影響を及ぼすCVDダイヤモンドの転位の解明

研究課題名(英文) Defect analysis in p- Diamond Layer of Diamond Power Device

研究代表者

加藤 有香子 (Kato, Yukako)

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：90509837

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)：ダイヤモンドパワーデバイス高性能化の糸口として、デバイス特性とダイヤモンドの結晶性の相関に着目した。今回特に、リーク電流とドリフト層中の転位の相関を明らかにするため、疑似縦型ショットキーバリアダイオード(SBD)を作製し、逆方向にバイアスをかけた際のリーク電流を測定した。これに加えて、ショットキー電極直下に存在する転位をX線トポグラフィ像で解析した。その結果、転位密度が同程度の素子で耐電圧特性にばらつきがあり、所謂キラ欠陥となる転位の存在を見出すことはできなかったが、刃状転位と未同定の欠陥がデバイス特性への影響力が大きいことを見出した。

研究成果の概要(英文)：For development of high-performance diamond power device, I study about the dislocations in semiconducting diamond layer of Schottky barrier diode by using x-ray topography. Focused device performance is breakdown voltage characteristics. For the estimate the distribution of dislocations in the area of the each Schottky electrode, dislocations in semiconducting diamond layer were estimated by using X-ray topography. From experimental data, any killer dislocation was not found. However, if dislocations work as several type of resistors of power device, it is assumed that edge dislocation and unknown defect disturb the device performance.

研究分野：結晶評価

キーワード：ダイヤモンド パワーデバイス 転位

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギーの安定供給や地球環境保全のため、エネルギー消費量削減・自然エネルギー利用技術の開発が推進されている。しかし、各国での生活水準向上に伴って、1人あたりのエネルギー消費量は増加する一方である。そこで、生産された電力の約60%が損失する発電・送電・変換時のエネルギー効率の向上を担う研究が脚光を浴びている。損失の低減、すなわち、電力変換・制御用半導体素子(パワーデバイス)の低ゲート制御電力化と高破壊耐圧化は、省エネルギー社会の構築に必要不可欠で、近年非常に盛んに研究される分野である。

ダイヤモンドは、高耐圧・低損失・高速動作のデバイス材料として期待されている。例えば船木らが報告した、p型ボロンドープダイヤモンドを用いたショットキーバリアダイオード(SBD)の200V-0.8Aの動作特性と、高温(250°C)での安定したスイッチング特性は実用化に向けた第一歩と言える[Funaki et al., IUMRS-ICEM, Yokohama (2012, September)]。

一方、材料の面からのデバイス開発については、『欠陥評価』が始まりつつある、といった状況で、基板の『どういった種類の結晶品質』がCVDダイヤモンドの品質に影響を及ぼすかどうかの知見は非常に少ない。ましてや、CVDダイヤモンド中の転位のデバイスへの影響をしめす実験データは未だ示されていないのが、研究開発当初の状況であった。

2. 研究の目的

高品質CVDダイヤモンドを得るための技術開発及び高いデバイス特性を実現するために必要なダイヤモンド品質の解明が本研究の目的である。

3. 研究の方法

まず高品質CVDダイヤモンドを得るために、合成前の基板表面処理手法に着目した。これまで、購入したダイヤモンド基板をスカイフ研磨処理して平坦面を出したのちに、有機溶剤と熱混酸で洗浄していた。この作業でRa=数10Å程度の平坦な基板表面が得られていたが、機械研磨であるために研磨傷を完全に取り除くことは難しかった。他の半導体材料の場合、化学的機械研磨(CMP)や薬液による研磨が可能であるが、硬度が高く科学的に安定なダイヤモンドの場合は、スカイフ研磨以外に実用的な研磨手法は開発されていなかった。近年、熊本大学の峠研究室で開発された『UVアシスト研磨』は石英板と紫外光を併用した手法でダイヤモンドの平坦化が可能であることに着目し[J. Watanabe, et al. DRM (2013)], スカイフ研磨処理をした場合と、UVアシスト研磨をした場合とで、得られるダイヤモンドエピタキシャル成長膜の品質に違いがあるかどうかを比較検証した。ダイヤモンドエピタキシャル成長膜の合成にはμ波アシストCVD装置を用いた。エピ成長膜の厚さは10μmである。基板とエピ成長膜

の結晶性評価にはX線トポグラフィを用いた。X線トポグラフィはX線回折強度の二次元像が得られる手法であり、結晶内部の転位分布評価によく用いられている。X線トポグラフィ実験は高エネルギー加速器研究機構内のフォトンファクトリーBL15Cで実施した。(現在、BL15Cは解体され、X線トポグラフィ実験設備はBL20Bに移設されている)

また、基板表面処理方法の改善により得られた高品質CVDダイヤモンド膜を用いて、ショットキーバリアダイオードを作製し、ショットキー電極中の転位分布とダイオード特性との比較を試みた。ショットキー電極中の転位分布解析にも、X線トポグラフィを用いた。

4. 研究成果

4-1. 基板表面平坦処理によるCVDダイヤモンドの高品質化[Y. Kato, et al., APEX (2013), Y. Kato, et al., acta Phys. Pol. A (2014)]

ダイヤモンド基板は基板品質の個体差が激しく、例えば転位密度は $10^3 \sim 10^5/cm^2$ と幅がある。そこで、基板表面平坦処理の優位性を議論するために、同じ基板を用いて表面処理方法とエピ膜品質を議論した。具体的な実験工程は以下のとおりである。はじめにUVアシスト研磨処理をしてエピ膜を合成し、次にエピ膜を取り除いてから改めてスカイフ研磨で表面を平坦化し、もう一度エピ膜を合成した。基板研磨後の表面粗さをRa値で定量評価した結果、スカイフ研磨とUVアシスト研磨のRaはそれぞれ、70Åと21.5Åであった。また、スカイフ研磨のほうは基板の端に研磨傷が残っており、傷の幅と深さは一樣ではないが、平均して幅約50μm、深さ約160Åの傷が走っていた。研磨後のダイヤモンド基板の転位密度は図1に示すように、約 $1 \times 10^4/cm^2$ であった。

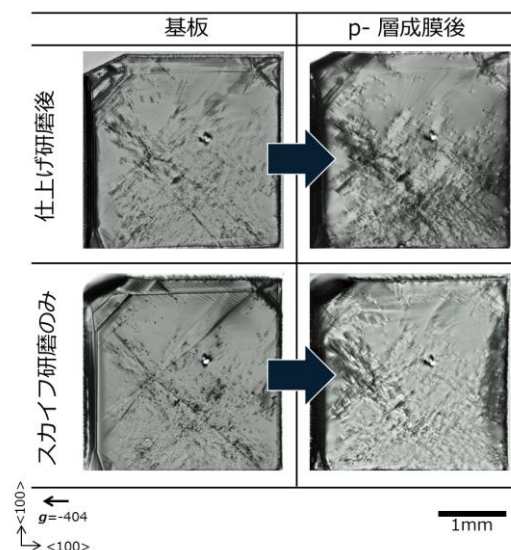


図1) 仕上げ研磨(UVアシスト研磨)後、スカイフ研磨後、およびエピ膜成長後のX線トポグラフィ像

UV アシスト研磨した基板を用いた場合、エピ膜の転位密度は基板と同じ約 $1 \times 10^4 / \text{cm}^2$ であったが、スカイフ研磨基板では転位密度は 1.2 倍に増加した。転位増加は研磨傷の直上で顕著にみられたが、研磨傷が確認できない箇所でもエピ膜中で転位が新しく発生していた(図 2)。

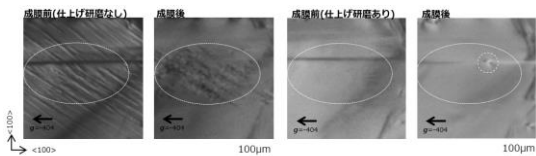


図 2) 図 1 の拡大図。左側がスカイフ研磨基板の合成前(研磨傷あり)と合成後の X 線トポグラフィ像。右側が同じ場所で UV アシスト研磨した後の基板と合成後の X 線トポグラフィ像

この実験結果から、高品質 CVD ダイヤモンドを合成するためには、研磨傷がない平坦面の作成が必要不可欠であること、スカイフ研磨では光学顕微鏡では確認できない研磨損傷が残っており、エピ膜成長時にその損傷部が新たな転位発生源となっていることを示唆することができた。

4-2. CVD ダイヤモンドの転位とデバイス特性の相関[Y. Kato, et al., DRM (2015)]

ダイヤモンド基板に半導体ダイヤモンドを成長させて、ショットキーバリアダイオードを作製した。耐压特性を評価したところ、リーク電流が 1mA に到達した時の電圧が 300-1000 超 V とばらつきが見られた。

そこで、逆方向特性の要となる低濃度 p 型半導体ダイヤモンドの転位を X 線トポグラフィ像を用いて評価した。その結果、全体の転位密度 ($3 \times 10^4 / \text{cm}^2$) に対して、 $\phi 200 \mu\text{m}$ サイズの各電極の中にある転位が 1~20 超個と分布にばらつきが見られた。この転位分布と耐压特性との相関は得られなかったが、転位種を同定し、転位種ごとに耐压特性との相関を定量化した結果、キラー欠陥の存在はないものの、ほかの転位種と比較して、刃状転位と未同定欠陥(転位束の可能性はあるが、X 線トポグラフィでの同定はできなかった)が耐压特性を阻害していることを見出した。

これまで、ダイヤモンドパワーデバイスの高度化には、CVD ダイヤモンドの低転位化が必要不可欠であるということが概念的に示唆されてきた。今回の実験結果によって、それを耐压特性と転位密度の相関として、定量的に示すことができた。

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 4 件)

- ① Yukako KATO, Hitoshi UMEZAWA,

Shin-ichi SHIKATA, X-ray topographic study of defect in p- diamond layer of Schottky barrier diode, Diamond and Related Materials, 査読有, 57, 2015, pp. 22-27

DOI:10.1016/j.diamond.2015.03.021

② Yukako KATO, Hitoshi Umezawa, Shin-ichi Shikata, X-ray Topographic Study of a Homoepitaxial Diamond Layer on an Ultraviolet-irradiated Precision Polished Substrate, acta physica polonica A, 査読有, 125, 2014, pp. 969-971

DOI:10.12693/APhysPolA.125.969

③ 加藤有香子, X 線トポグラフィを用いたダイヤモンドの欠陥評価, NEW DIAMOND, 査読なし, 29, 2013, pp.23-24

④ Yukako KATO, Hitoshi Umezawa, Shin-ichi Shikata, Effect of an Ultraflat Substrate on the Epitaxial Growth of Chemical-Vapor-Deposited Diamond, Photon Factory Activity Report 2012 Part A, 査読なし, 30, 2013, pp.66-67

[学会発表] (計 5 件)

① 加藤有香子, 梅澤仁, 『ダイヤモンドショットキーバリアダイオードのデバイス動作と結晶品質』, 電子デバイス界面テクノロジー研究会, 2016/01/22, 東レ総合研修センター(静岡県)

② 加藤有香子, 梅澤仁, 鹿田真一, 『X-ray Topographic Study of Defect in p- diamond layer of Schottky barrier diode』, International conference on diamond and carbon materials, 2014/09/7, マドリード(スペイン)

③ 加藤有香子, 梅澤仁, 鹿田真一, 『ダイヤモンドパワーデバイス: ドリフト層中の転位密度とリーク電流特性』, 第 22 回 SiC 講演会, 2013/11/21, 日本工業大学(埼玉県)

④ 加藤有香子, 梅澤仁, 鹿田真一, 『X-ray Topographic Study of Homoepitaxial Diamond Layer』, 15th International Conference on Defect Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors, 2013/9/15-2016/9/19, Hotel Sound Garden (ワルシャワ, ポーランド)

⑤ 加藤有香子, 梅澤仁, 鹿田真一, 『ショットキーバリアダイオードの p-層の欠陥評価』, 第 27 回ダイヤモンドシンポジウム, 2013/11/21, 日本工業大学(埼玉県)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

産総研ダイヤモンドデバイス化グループ研究成果(組織改編のため、現在公開停止)

<http://unit.aist.go.jp/ubiqen/gdr/result01.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤有香子(KATO, Yukako)

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：90509837