

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249036

研究課題名(和文)低欠陥ダイヤモンドウェハ

研究課題名(英文)Low dislocation diamond wafer for power device

研究代表者

鹿田 真一(Shikata, Shinichi)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：00415689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：105cm⁻²以上の欠陥を有するHPHTダイヤモンド結晶の低欠陥部分を切出して、種にして再成長し、概ね2,000cm⁻²以下の結晶が得られるようになった。この結晶を種に用い、CVDを用いたダイレクトウェハ化法により子結晶を得ることが出来、2.4mm角の限定領域ではあるが欠陥数400cm⁻²という驚異的な低欠陥と、 $n=2 \times 10^{-5}$ 以下と極めて低い複屈折を示す高品質低歪結晶基板を得ることに成功した。表面処理としてドライエッチング導入に伴う表面荒れの抑制やUVアシストによるファイン研磨技術も併せて開発できた。本研究によりパワーデバイスに必要な低欠陥ウェハを実現するための基盤技術が確立できた。

研究成果の概要(英文)：Low dislocation density CVD diamond wafer has been studied toward diamond power device application. The evaluation technique including X ray topography has been developed and applied to HPHT seed and CVD crystal. Using high quality seed crystal of low dislocation density less than 2000cm⁻², high quality CVD crystal copying technology with low dislocation density up to 400cm⁻² and low distortion of 2×10^{-5} has been developed associated with sophisticated UV assist polishing and dry etching techniques for the surface treatment prior to the CVD deposition.

研究分野：結晶工学

キーワード：省エネルギー パワーデバイス ダイヤモンド

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは熱伝導率が SiC の約 8 倍、絶縁破壊電界は約 9 倍、移動度も約 2 倍あり、パワーデバイスとして、圧倒的に他材料を凌駕する高耐圧、低損失、高速動作等の性能が予想されている。用途の広い中耐圧で、一桁近い低オン抵抗が予想され、究極の冷却フリー・高出力デバイスとして SiC の次世代を担う材料として期待される。ダイヤモンドのウェハに関しては、イオン注入とリフトオフ、接合による大型化の技術を用いて、絶縁型の単結晶材料の大型化に成功し、 $20 \times 40\text{mm}^2$ の大面積化に成功し、デバイスに関しては 2kV、250 動作かつ 15ns の高速スイッチングが実証されていた。しかしながら、これは 1A 級の小さなデバイスであり、通常 100A 以上の電流を投入する実際のパワーデバイスからは未だほど遠いものであった。これは結晶欠陥及び絶縁性という 2 つの大きなウェハの課題に起因するものである。ダイヤモンドの応用を勘案すると縦型デバイス構造による高出力デバイスが想定されるため、パワーデバイス実現には、ウェハとして大口径化と並んで、低欠陥、低抵抗の 3 つの課題解決が可能であるかを探ることが喫緊の問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、この課題の内、学際的にも難しい低欠陥ダイヤモンドウェハの実現可能性を探索することとした。解決すべき内容を a) 種結晶起因の欠陥 b) 表面起因または成長時の何らかの影響に起因する欠陥 の 2 つに分けた。b) には表面損傷起因、表面研磨起因などが含まれる。欠陥評価法の確立、低欠陥種結晶の実現、それを元にした低欠陥のまま気相成長 CVD 法による低欠陥単結晶のコピー技術を開発し、当時、数 $10,000 \sim 100,000$ 個/ cm^2 程度もある欠陥を低減し、10A 級のデバイス試作が可能な 5000 個/ cm^2 の単結晶 CVD ダイヤモンドウェハの実現を目指した。

3. 研究の方法

上記の目的に対応するため、(1) 結晶評価手法確立 を模索しながら、(2) 低欠陥種結晶 の作製へ結晶評価からフィードバックをかけて開発する。並行して(3) 低欠陥研磨及び低損傷表面 の二つの技術に取組み、そして総合的に低欠陥のウェハを成長する(4) 低欠陥結晶成長 の 4 つのカテゴリーに分けて研究開発を進めた。

(1) については SR 放射光によるトポグラフィをベースに高エネルギー物理学研究所と連携し、さらにその他の実験室における計測手段を組み合わせた。

(2) については住友電気工業㈱とプロジェクト外連携を行い低欠陥 HPHT 基板を入手した。

(3) については SiC で実績のある熊本大学

大学院と組み紫外線アシスト研磨がダイヤモンドにも有効であるか共同で実験を行った。

(4) 低欠陥結晶成長 について、(1) から(3)を総合的に適応し、マイクロ波 CVD 成長と、結晶をコピーする「ダイレクトウェハ化」技術を組合わせて、低欠陥ダイヤモンドウェハを目指した。

なお、最終年は研究代表者が(独)産業技術総合研究所から関西学院大学 理工学部に移籍したため、関学大所有の分布計測技術なども用いた。

4. 研究成果

X 線トポグラフィ、CL などを用い、種結晶となる高温高压 (HPHT) 合成結晶の欠陥評価が可能となり、それにより低欠陥部分を切り出して種にして再成長した低欠陥種結晶を得ることが出来た。従来 10^5cm^{-2} 以上あった種結晶欠陥であるが、概ね $2,000\text{cm}^{-2}$ 以下の結晶が得られるようになり、最もよいものでは平均 100cm^{-2} 以下の欠陥密度の部分を含む種結晶も得られた。

表面起因の欠陥削減の技術として、紫外線 (UV) アシストによる研磨技術に鋭意取り組み、例えば従来 Ra で 0.44nm の表面仕上げを、本技術により Ra で 0.18nm まで仕上げることができ、研磨面は極表面に結晶に乱れやひずみのない極めて良好な平滑面を得ることが可能になった。

低欠陥の結晶を種に用い、CVD を用いたダイレクトウェハ化法により子結晶を得ることが出来、 2.4mm 角の限定領域ではあるが欠陥数 400cm^{-2} という驚異的な低欠陥を実現できた。欠陥のみならず $n=2 \times 10^{-5}$ 以下と極めて低い複屈折を示す高品質低歪結晶基板を得ることに成功した。

3 年間の本研究により、パワーデバイスに必要な低欠陥ダイヤモンドウェハを実現するためのベースとなる技術は確立できた。今後種結晶となる絶縁性大口径結晶の実現が必要であると同時に、大面積での低欠陥実現へより工学的アプローチが不可欠である。今後の大きな課題である「低抵抗」の実現へ向けて、予備机上検討を実施し必要となる段階的なウェハスペックを提案した。

以下、項目ごとに詳述する。

(1) 結晶評価手法確立

計画していた解析手法をすべてトライした。同定及び未同定欠陥の混在したものを、2 次元分布として計測するには、X 線トポグラフィ及びカソードルミネッセンスがダイヤモンドに適していることがわかった。欠陥のデバイスへの影響を、縦型ダイオードを用いて検討し、1kV 以上の耐電圧デバイスには 45° 複合欠陥はデバイスに致命的なキラーク欠陥であることを、初実証することができた。種結晶欠陥評価については、X 線トポグラフィにより班別することが可能になった。欠陥定量評価において通常半導体で用いるウェット

処理によるエッチピット評価に代わり、O₂/H₂によるドライエッチの検討を行い、貫通転移欠陥とよく合致することを見出した。

(2) 低欠陥種結晶

欠陥の少ない部分を切り出して、それを種として成功した種結晶の評価を行った。反射X線トポ計測手法を改善し、結晶の深い部分と表面に伝搬してきている欠陥の評価を行えるようになり、その結果種結晶欠陥評価を可能にし、選別することが可能になった。数個の種結晶評価により、同一のHPHT結晶成長条件でも欠陥の数量、分布に差があることも判明した。(1)(3)と併せて得られた種結晶の表面状態をよくすることも含めて行い、欠陥数として105cm⁻²以上あった種結晶欠陥を、概ね2,000cm⁻²以下の結晶が得られるようになった。

(3) 低欠陥のための研磨

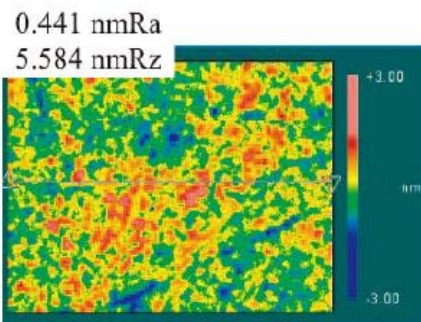
ウェハを低欠陥で超精密研磨でき、かつ研磨域の酸素濃度を高めた縦型UVアシスト研磨装置を製作し、UVアシスト研磨を行った結果、目標値である0.2RMSをほぼ満足できる良好な研磨面が20mm角のモザイクウェハ全面で獲得できた。X線トポの観察結果より、UVアシスト研磨による新たな欠陥の導入がないことを確認した。石英棒や小径石英板をウェハ上で高速ラスタースキャンさせるUVアシスト高速局部研磨技術につき、多くの研磨条件のもとで、到達仕上げ面粗さ及び平面度、研磨後のウェハの反り、モザイクウェハ接合面の段差などについて詳細に調べた。その結果20mm角のダイヤモンドウェハを0.2nmRaレベルの優れた粗さで全面研磨に成功した。研磨は69hrと長時間を要したが、UVアシスト研磨による新たな転位の導入は認められないことをX線トポ像から確認できた。メカニズムの解明も実施した。

さらに、大口径化の際に効力を発揮する、高度な局所研磨技術への適応を検討した。縦型マシニングセンターを用い、従来とは逆に、ウェハ上面から直径6mmの石英棒板を押し付ける方式を考え、ウェハの全面研磨を行った。断面プロファイルからスカイフ加工による凹凸は取り除かれ、算術平均粗さも0.38nmRaと改善されていることが確認できた。さらにこの石英棒の走査によって、広範囲研磨が可能であることも確認した。今後の大口径化の礎となる技術が開発できた。図1にUVアシスト研磨による研磨後表面の例を示す。

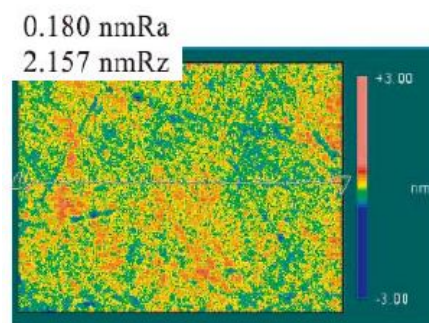
(4) 低欠陥成長

低欠陥化のためガス中窒素濃度を極微量制御して成長最適化した結果、低歪自立基板を作成することができた。またウェハのコピー技術において、種基板へのイオン注入前に基板表面の最終処理として精密研磨(Ra<1nm)と10μm程度の深いイオンビームエッチングを組合わせて行うことにより、損

傷を十分低減できることがわかった。平滑かつ無損傷表面を形成することを目指したドライエッチング(3)の結果に伴う表面荒れの抑制やファイン研磨の適応などの検討を行い、平行してコピー技術により低欠陥種基板の子基板を試作し、結晶性や歪を評価した。その結果、優れた種結晶(低欠陥部分は100cm⁻²以下の低欠陥)を用いてCVDによりダイレクトウェハ化法により子基板を得ることが出来、2.4mm角の限定領域ではあるが欠陥数400cm⁻²という驚異的な低欠陥を実現できた。また、この基板は中央部でn=2×10⁻⁵以下と極めて低い複屈折を示すさらに高品質の低歪結晶基板が得られた。図2に、得られた低欠陥CVDウェハの例を示す。さらに平坦化成長を目的として[110]オフ研磨を施し、低実効メタン濃度による合成で平坦表面が得られ、AFMによる評価の結果、5μm角範囲では、Raが0.33nm、RMSが0.44nm程度であった。また平滑かつ無損傷表面を形成することを目指した表面処理としてドライエッチング導入に伴う表面荒れの抑制やファイン研磨の適応などの検討を行った。



(a) Polished surface without UV irradiation



(b) Polished surface with UV irradiation

図1 紫外線アシスト研磨の表面仕上げの効果

(論文5)のFig2より転載)

(a) 通常研磨の研磨後表面

Raで0.441nm

(b) UVアシスト研磨後の表面

Raで0.180nm

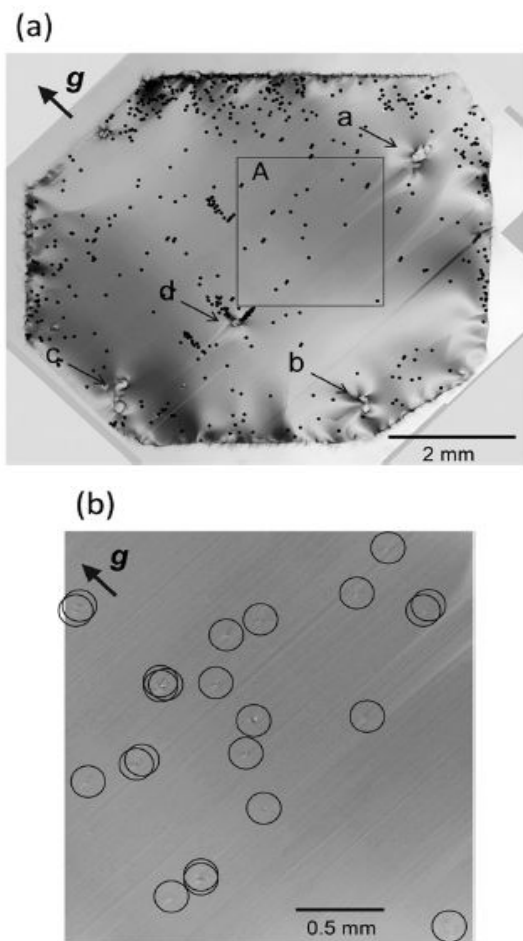


図2 ダイレクトウェハ化によるCVD成長低欠陥ダイヤモンド
(論文6) Fig.4より転載)
(a) X線トポグラフィ(044)による欠陥の分布(黒点でマーク)
(b) A部分の拡大図(欠陥密度 400cm^{-2})

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計17件)

- 1) "Single crystal diamond wafer for high power electronics", S.Shikata, Diamond and Related Materials, 65 (2016) pp.168-175 10.1016/j.diamond.2016.03.013 (査読有)
- 2) "Two-step polishing technique for single crystal diamond (100) substrate utilizing a chemical reaction with iron plate", A.Kubota, S.Nagae, S.Motoyama and M.Touge, Diamond and Related Materials, 60 (2015) pp. 75-80. 10.1016/j.diamond.2015.10.026 (査読有)
- 3) "4インチSiC基板のUVアシスト研磨に関する研究", 坂本武司, 稲木匠, 小田和明, 峠睦, 藤田隆, 砥粒加工学会誌, 58 (2014) pp.235-240 (査読有)
- 4) "デバイス用ダイヤモンドウェハのUVアシスト研磨に関する研究", 田川智彦, 峠睦, 坂本武司, 鹿田真一, 山田英明, 加藤有香子, 精密工学会誌, 80 (2014) pp.587-591 (査読有)
- 5) "紫外光励起による単結晶ダイヤモンドの

研磨メカニズムに関する研究", 峠睦, 長野拓義, 田川智彦, 坂本武司, 横井裕之, 岩本知広, 渡邊純二, 精密工学会誌, 80(2014) pp.112-116(2014年度精密工学会論文賞受賞論文). (査読有)

6) "Large-area high-quality single crystal diamond", M.Schreck, J.Asmussen, S.Shikata, J-C. Arnault, and N. Fujimori, MRS Bulletin 39,(2014)pp.504-510 (査読有)

7) "Diamond Schottky barrier diode for high-temperature, high-power, and fast switching applications", H.Umezawa, S.Shikata, and T.Funaki, Jap.J.Appl.Phys., 53 (2014) 05FP06 (査読有)

8) "Characterization of free standing single crystal diamond prepared by hot-filament chemical vapor deposition", S.Ohmagari, H.Yamada, H.Umezawa, A.Chayahara, T.Teraji and S.Shikata, Diamond and Related Materials, 48(2014) pp.19-23 (査読有)

9) "Effect of an Ultraflat Substrate on the Epitaxial Growth of Chemical Vapor Deposited Diamond", Y.Kato, H.Umezawa and S.Shikata, Photon Factory Activity Report (2012) PartA (Highlights) 30(2014)pp.66-67 (査読無)

10) "Evaluation method for grown in dislocations in CVD single crystal diamond using plasma surface treatment", N.Tsubouchi and S.Shikata, Jap.J.Appl.Phys., 53(2014)068010 (査読有)

11) "Nitrogen doped low-dislocation density free-standing single crystal diamond plate fabricated by lift-off process", Y. Mokuno, Y.Kato, N.Tsubouchi, A.Chayahara, H.Yamada, and S.Shikata, Applied Physics Letters, 104 (2014) 252109 (査読有)

12) "デバイス用ダイヤモンドウェハのUVアシスト研磨に関する研究", 田川智彦, 峠睦, 坂本武司, 鹿田真一, 山田英明, 加藤有香子, 精密工学会誌 80 (2014) pp.587-591 (査読有)

13) "紫外線励起による単結晶ダイヤモンドの研磨メカニズムに関する研究", 峠睦, 長野拓義, 田川智彦, 坂本武司, 横井裕之, 岩本知広, 渡邊純二, 精密工学会誌 80 (2014) pp.112-116 (査読有)

14) "X-ray Topographic Study of a Homo epitaxial Diamond Layer on an Ultraviolet irradiated Precision Polished Substrate", Y.Kato, H.Umezawa and S.Shikata, Acta physica polonica A,125 (2014)pp.969-971 (査読有)

15) "ダイヤモンド砥粒整列ブロックのUVツルイング技術の開発", 坂本武司, 南部陽亮, 斎藤康平, 峠睦, 川下智幸, 峠直樹, 砥粒加工学会誌 57 (2013) pp.600-604 (査読有)

16) "Ultraviolet irradiated precision polishing of Diamond and related materials", J.Watanabe, M.Touge and T.Sakamoto, Diamond and Related Materials, 39(2013)pp.14-19 (査読有)

17) "Leakage current analysis of diamond

Schottky barrier diodes by defect imaging”, H.Umezawa, N.Tatsumi, Y.Kato and S.Shikata, *Diamond and Related Materials*, 40 (2013) pp.56-59 (査読有)

〔学会発表〕(計 26 件)

- 1) 藤林太郎, 坂本武司, 峠 直樹, 峠 睦, 石英を用いた CBN 砥石の精密ツルイングと研削性能, 2015 年度砥粒加工学会 2015 年 9 月 11 日 慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)
- 2) ”Single crystal diamond wafer for high power electronics”, S.Shikata, Int’l Conf. on Diamond and Carbon Materials, Bad Homburg, (Germany), Invited talk Sept.6-10, 2015
- 3) 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, Int’l Conf. on New Diamond and Nano Carbons 2015, 静岡グランシップ(静岡県・静岡市) 2015 年 5 月 24-28 日
- 4) 浦川 翔, 小田和明, 坂本武司, 横井裕之, 峠 睦, 単結晶ダイヤモンド基板の紫外線照射研磨条件の最適化, 2015 年度精密工学会春季大会 2015 年 3 月 17-19 日 東京大学(東京都・文京区)
- 5) 加藤有香子, 梅沢仁, 鹿田真一 複屈折像による簡便な転位解析の模索 第 28 回ダイヤモンドシンポジウム, 2014 年 11 月 19-21 日 東京電機大学(東京都・足立区)
- 6) 柰野由明, 加藤有香子, 坪内信輝, 山田英明, 茶谷原昭義, 鹿田真一, ダイレクトウェハ化による低転位単結晶ダイヤモンド基板の作製 第 28 回ダイヤモンドシンポジウム, 2014 年 11 月 19-21 日 東京電機大学(東京都・足立区)
- 7) 浦川翔, 峠 睦, 久保田章亀, 坂本武司, 山中庸之介, 単結晶ダイヤモンドに対する紫外線照射研磨メカニズムの解明 精密工学会秋季大会学術講演会 2014 年 9 月 16-18 日 鳥取大学(鳥取県・鳥取市)
- 8) 柰野由明, 加藤有香子, 坪内信輝, 山田英明, 茶谷原昭義, 鹿田真一, 高品質高温高圧合成 IIa 基板を用いたダイレクトウェハ化 75 回応用物理学会秋季学術講演会 2014 年 9 月 15-19 日 北海道大学(北海道・札幌市)
- 9) 坂本武司, 三角真彦, 久保田章亀, 峠 睦, 超砥粒軸付と石の UV ツルイングに関する研究, 砥粒加工学会学術講演会 2014 年 9 月 11-14 日 岩手大学(岩手県・盛岡市)
- 10) 峠 睦, 久保田章亀, 坂本武司, 川下智幸, 峠直樹, 紫外線照射研磨によるダイヤモンドホイール研削性能の高度化, 砥粒加工学会学術講演会 2014 年 9 月 11-14 日 岩手大学(岩手県・盛岡市)
- 11) “X ray topographic study of defect in p-diamond layer of Schottky barrier diode”, Y.Kato,

H.Umezawa and S.Shikata, Int’l Conf. Diamond and Carbon Materials, Madrid (Spain) Sept.7-11, 2014

- 12) “UV truing of Diamond grit arranged wheel and evaluation of its grinding performance”, M.Touge, T.Sakamoto, Y.Nambu, K.Takaki, A.Kubota and T.Kawashita, 15th Conf. Precision Engineering, ホテル日航金沢(石川県・金沢市) 2014 年 7 月 22-25 日
- 13) “Lift-off process using high quality HPHT IIa substrate”, Y.Mokuno, Y.Kato, N.Tsubouchi, H.Yamada, A.Chayahara and S.Shikata, New Diamond and Nano Carbons 2014, Chicago, (USA), May 26-30, 2014
- 14) “Diamond based power devices”, S.Shikata, H.Umezawa, Y.Kato, S.Ohmagari, H.Yamada, N.Tsubouchi, Y.Mokuno and A.Chayahara, Int’ Conf. New Diamond and Nano Carbons 2014, Chicago, (USA,) Invited talk, May 26-30, 2014
- 15) “Diamond Wafer Prospect for the Power Device Application”, S.Shikata, H.Umezawa, Y.Kato, S.Ohmagari, H.Yamada, N.Tsubouchi, Y.Mokuno, and A.Chayahara, 6th Int’l Workshop on Crystal Growth Technology, Berlin, (Germany), Invited talk, June 15-19, 2014
- 16) 加藤有香子, 梅沢仁, 鹿田真一, ショットキーバリアダイオードの p - 層欠陥評価 第 27 回ダイヤモンドシンポジウム, 2013 年 11 月 20-22 日 日本工業大学(埼玉県・南埼玉群)
- 17) 柰野由明, 山田英明, 茶谷原昭義, 鹿田真一, 低窒素濃度のダイヤモンドバルク単結晶の合成, 第 27 回ダイヤモンドシンポジウム, 2013 年 11 月 20-22 日 日本工業大学(埼玉県・南埼玉群)
- 18) 鹿田真一, 梅沢仁, 加藤有香子, 大曲新矢, 山田英明, 坪内伸輝, 柰野由明, 茶谷原昭義, パワーデバイスを目指したウェハ・デバイスの開発課題, 第 27 回ダイヤモンドシンポジウム, 2013 年 11 月 20-22 日 日本工業大学(埼玉県・南埼玉群)
- 19) “Diamond based power devices”, S.Shikata, H.Umezawa, Y.Kato, H.Yamada, N.Tsubouchi, Y.Mokuno and A.Chayahara, Int. Conf. SiC and Related Materials, フェニックス・シーガイアリゾート(宮崎県・宮崎市) Invited talk, 2013 年 9 月 29 日-10 月 4 日
- 20) “Fabrication and characterization of 1mm size Diamond SBD”, H.Umezawa, S.Shikata and T.Funaki, Int’l Conf. Solid State Device and Materials, ヒルトン福岡シーホーク(福岡県・福岡市) 2013 年 9 月 24-27 日
- 21) “Leakage Current Analysis of Diamond SBDs Operated at High Temperature”, H.Umezawa and S.Shikata, Int’l Conf. Solid State Device and Materials, ヒルトン福岡シーホーク(福岡県・福岡市) 2013 年 9 月 24-27 日
- 22) “Diamond power devices for high

temperature and high current applications”,
H.Umezawa, Y.Kato and S.Shikata, JSAP-MRS
Symposium,同志社大学(京都府・京田辺市)
2013年9月17-20日

23)“Reduction of epitaxial growth dislocations
originate from the surface”, S.Shikata,
Y.Kato,H.Umezawa and M.Touge, JSAP-MRS
Joint Symposium 同志社大学(京都府・京田
辺市)2013年9月17-20日

24)南部陽亮、斎藤康平、坂本武司、峠 睦、
峠直樹、川下智幸、砥粒整列ダイヤモンド
砥石の UV ツル イング技術の開発とその加
工性能評価、精密工学会 秋季大会学術講演
会 2013年9月12-14日 関西大学(大阪
府・吹田市)

25)田川智彦、峠 睦、久保田章亀、坂本武司、
鹿田真一、山田英明、加藤有香子、大口径ダ
イヤモンドウェハへの UV アシスト研磨技術
の開発、精密工学会 秋季大会学術講演会
2013年9月12-14日 関西大学(大阪府・吹
田市)

26)本山修也、久保田章亀、峠 睦、溶媒中での
鉄の反応性を利用した単結晶ダイヤモンド
の研磨メカニズムに関する研究、精密工学
会 秋季大会学術講演会 2013年9月12-14
日 関西大学(大阪府・吹田市)

〔図書〕(計3件)

1)次世代パワー半導体の高性能化と産業展
開 第7章 pp.56-37(2015)シーエムシ
出版、鹿田真一

2)パワーエレクトロニクスの新展開 普及
版 3章 pp.151-159(2015) シーエムシ
出版、鹿田真一

3)ダイヤモンドエレクトロニクスの最前線
普及版 監修 及び17章 pp.196-204(2014)
シーエムシ 出版、鹿田真一

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

鹿田 真一(SHIKATA Shinichi)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号：00415689

(2)研究分担者

峠 睦 (TOUGE Mutsumi)
熊本大学・先進マグネシウム国際研究セン
ター・教授
研究者番号：00107731

茶谷原 昭義(CHAYAHARA Akiyosshi)
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センター・
上級主任研究員
研究者番号：10357501

空野 由明(MOKUNO Yoshiaki)
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センター・
チーム長
研究者番号：60358166

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センター
主任研究員
研究者番号：80329135

加藤 有香子(KATOU 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センター・
主任研究員
研究者番号：90509837