

令和元年6月6日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03990

研究課題名(和文)ダイヤモンドを用いた次世代半導体ピクセル検出器の開発と高性能化研究

研究課題名(英文) Research and development of the next generation diamond pixel sensor

研究代表者

田中 真伸 (Tanaka, Manobu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：00222117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：高強度化・高輝度加速器ビームを利用した実験に使用可能な耐環境性能(放射線耐性を含む)・高速応答・高位置分解能を兼ね備えたダイヤモンド半導体測定装置実用化のための技術基盤を確立し、従来の装置性能を大きく向上させることを目的とし研究を行った。その結果、従来の半導体検出器と同じ性能を持ちつつ耐環境性能に優れたダイヤモンドを用いた半導体測定装置用センサー開発に成功した。更に100 μ m以下の位置分解能を達成するためのダイヤモンドセンサー製造の知見を蓄積しつつ、ダイヤモンド半導体測定装置用信号処理集積回路用技術開発では、開発したトランジスタが0.3MGy以上の放射線耐性を持つことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器の量子ビームのトレンドは高強度化・高輝度化へ向かっており、現存する半導体測定装置の使用限界を超えつつある。よって高強度・高輝度量子ビームを使用した実験で使用できる耐環境性能・高速応答・高位置分解能を兼ね備えた半導体測定装置実用化が必要となる。高強度・高輝度量子ビームは、物質の根源は何か、宇宙・物質・生命はどのように成り立っているかという疑問に答えるためだけでなく、社会を豊かにするための新材料開発や医療分野への応用など多くの分野に応用され社会基盤の一部となっている。このため高強度・高輝度量子ビームを有効利用するための半導体測定装置実用化は学術的だけでなく社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The development of a diamond detector with the charge collection efficiency (CCE) of $\sim 100\%$ was done, and the process requirements for developing a pixel detector based on diamond basis achieves less than 100-micron meter position resolution are investigated. Since the radiation tolerant transistors are necessary to integrate signal processing circuits on the pixel detector, total integrated dose characteristics of transistors are evaluated and confirmed those transistors have radiation resistivity more than 0.3MGy.

A trend of accelerators R&D is high intensity/luminosity. From the viewpoint of the detection system, the radiation resistivity and the fast response are required. Si-based detectors are insufficient for the purpose. Diamond-based detectors can solve the problems. We succeeded to develop diamond detectors for those requirements and established the TCAD numerical model which can reproduce the I-V characteristics, the bias dependence of the CCE and the current signal waveform.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：粒子線検出器 ダイヤモンド 集積回路 耐放射線 ピクセル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国内だけでなく国際的にも加速器ビームの高強度化・高輝度化のトレンドは今後も続く。それに伴い粒子線・光子・放射線測定装置の耐放射線性能に代表される耐環境性能と検出素子当りの高係数率耐性は更に向上させなくてはならない。現在まで高耐放射線環境で動作する半導体検出器の研究開発が進められてきた。検出器として半導体を選択する理由は一素子のサイズが小型化(ピクセル化)可能で高速応答である(高キャリア移動度)ため、高係数率耐性が他の材料よりも高いことがあげられる。

半導体の物性を、高キャリア移動度及び高放射線/粒子線環境下での雑音増加の観点から見た場合、既存の半導体検出器の材料として使用されるシリコンと比較するとダイヤモンドは有利である。さらに誘電率が小さいことで同じ体積のシリコン検出器と比較して雑音が小さくできること、熱伝導率が高く冷却が容易であることや物質質量が小さいことでピクセル検出器として衝突点近くに実装する場合にも有利である。よって低雑音ピクセル検出器の開発を考えた場合、ダイヤモンド材料は非常に魅力的な材料である。ただ欧米の例を取ると結晶供給を行う会社が寡占状態で品質ばらつきもあり研究開発の進捗が遅く、研究コストが高く問題である。

2. 研究の目的

本研究では高耐放射線特性を持つダイヤモンドピクセル検出器とその読み出し集積回路を実用化するための基礎技術確立を目的として次の3項を行う。1) 良質なダイヤモンド結晶を定常的に製作するため装置改良、2) ダイヤモンド検出器の製作と小型ピクセル電極生成プロセスの評価、3) 高耐放射線性能を持つ半導体プロセスの耐放射線評価。これらをベースに高強度、高輝度加速器実験用ピクセル検出器開発の中心を日本へ導くと共にそのセンサーを使用したサイエンスのアウトプットを押し上げる基礎を確立する。

3. 研究の方法

研究目的で述べた研究期間内に達成する項目に対して、具体的な計画・方法を示す。

1) 良質なダイヤモンド結晶を定常的に製作するため装置改良

現在北海道大学で所有のCVDダイヤモンド合成装置に対して次項の改良を行う事で安定した高品質のダイヤモンド基板を製作する。A) 結晶の品質を落とす大気リークをより減らすためにダイヤモンド合成チャンバーを変更する。B) 現在の装置のメタン添加ラインの濃度を細かく制御可能な原料供給ラインを合成装置に付加することで、ダイヤモンド基板の合成条件をより詳細に制御し最適点を見つけ出す。

2) ダイヤモンド検出器の開発評価と小型ピクセル電極生成プロセスの評価

耐放射線環境下で性能を維持するための重要な指標は信号強度と雑音評価である。信号強度はアルファ線による電荷収集効率で測定する。雑音は、放射線による検出器容量への影響はないと仮定しリーク電流で評価する。北海道大学で開発された基板を使用し検出器を製作しこれらの評価を行う。さらにこれらを基にした数値モデルを開発し、検出器の定量的な理解を基礎としたピクセル検出器を含む新しいダイヤモンド検出器開発基盤の構築を行う。ピクセル電極生成プロセス評価に関しては、実際のプロセス技術への落とし込みに関する問題点を明確にする。

3) 高耐放射線性能を持つ半導体プロセスの耐放射線評価

我々の目的はピクセル検出器の実用化の基礎技術確立であるため、信号読み出し集積回路の放射線耐性及び回路構成も技術的めどを付ける必要がある。よって高耐放射線性能を持つ半導体プロセスの耐放射線評価と基本回路設計を行う。

4. 研究成果

表1に本研究目的に合致する可能性のある半導体検出器開発に使用可能な半導体の特性をまとめた。これを見ると単位厚さ当りの信号の大きさ(電子-正孔対生成エネルギーが小さい方が信号は大きくなる)以外はピクセル検出器用途半導体材料として一番優れているのはダイヤモンドである事がわかる。高放射線環境下での材料損傷による性能劣化は大きく分けて2つに分類できる。

	Si	Diamond	SiC(4H)	GaN	GaAs
バンドギャップ(eV)	1.12	5.48	3.27	3.39	1.42
電子-正孔対生成エネルギー(eV)	3.6	13	7.8	8.9	4.6
電子移動度(cm ² /Vs)	1500	1800	1000	1200	9200
正孔移動度(cm ² /Vs)	450	1500	115	~30	320
比誘電率	11.9	5.7	9.7	8.9	12.4
X ₀ (cm)	9.36	12.15	8.7	2.7	2.3
熱伝導率(W/cm ² °C)	1.5	20.9	4.9	1.3	0.46

表1: 主な半導体検出器材料の特性表

1. 半導体静特性の劣化による不具合: リーク電流の増加によるイントリンジックノイズの増加等が例としてあげられる。これはバンドギャップが大きいダイヤモンドによって影響を低減できる。

2. 結晶欠陥により、放射線により生成された電子正孔対が捕獲されることによる電荷収集効率の低下及び捕獲電荷による検出器のチャージアップによる動作不良及びリーク電流の増大。GeV程度の粒子線による欠陥生成量はファーストオーダーでは材料に依存せず、初期結晶の品質によるため、現時点で枯れた技術であるシリコンが有利となる。現在複数の研究機関では、シリコンピクセル検出器の開発を進めている。この時1の問題及び高速応答性能に対応するため、1チャンネルのサイズの小型化と検出層を薄くすることによって、チャンネル当たりのリーク電流の増加を抑えかつセンサーからの信号処理時間を短くする事で解決しようとしている。しかしこのように検出層を薄くする事で、シリコン検出器の”単位厚さ当りの信号強度はダイ

ヤモンド検出器より大きい”という利点は失われている。さらにセンサーからの信号処理時間を必要以上に短くしようとする事により信号処理集積回路の消費電力をあげる事になるため検出器全体の熱量が増え冷却等の新たな問題を解決しなくてはいけなくなる。よって本研究を遂行することで高耐環境性能をもつ半導体検出器のもつ根本的な問題点の解決に寄与する。ここでは研究の方法で述べた3つの項目に関してそれぞれ成果を示す。

(1) 良質なダイヤモンド結晶を定常的に製作するための装置改良

北海道大学所有の CVD ダイヤモンド合成装置に対して下記の改良を行う事で安定した検出器用 100 μ m 厚のダイヤモンド基板を製作した(図1)。実際のダイヤモンド基板の特性評価は検出器としての特性によって評価したため、(2)において説明する。



図1：ダイヤモンド合成後微分干渉写真。サイズは8mmx8mm。メタン濃度0.20%で製作した。

(1-1) 現在使用している装置は石英チャンバーを使用しているが、大気リークがあるため空気中の窒素によりホウ素の活性度が上がり所定の比抵抗が得られない。よって合成装置のシールを全てメタルシール製の SUS チャンバーに交換し、安定したホウ素ドーパダイヤモンド電極作製を可能とした。

(1-2) メタン濃度0.2%までしか正常に制御できなかったメタン添加ラインを、細かくメタン濃度を制御可能な原料供給ラインを合成装置に付加し、最良の検出器がメタン濃度0.2%付近で合成されていることを明らかにした。

(1-3) 大型化に関しても、検出器で使用可能な

ベルの8mm角のダイヤモンド基板を製作することが可能となった。

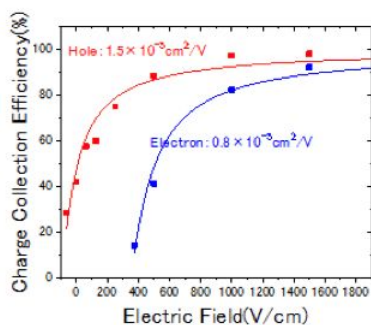
これらによってダイヤモンド基板の合成装置の改良が行われ、それをもとに世界トップクラスの特性を持つダイヤモンド検出器を開発できるようになった。今後国外の会社のみならず依存せず研究開発可能な体制が整いつつある。

(2) ダイヤモンド検出器の開発評価と小型ピクセル電極生成プロセスの評価

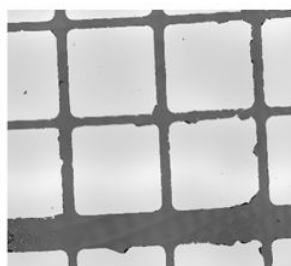
(2-1) ダイヤモンド評価結果およびピクセル化要素技術開発に関して

北海道大学で開発された基板を使用し検出器を製作し電荷収集効率の評価を行い、図2aに示すように100 μ m厚のダイヤモンドに対して18Vのバイアス電圧で電荷収集効率90%以上の品質の良いダイヤモンド基板の開発に成功している。また2MeVのエネルギーを持つ中性子を9.6x10¹²個/cm²照射後、30GeVのエネルギーを持つ陽子を10¹³/cm²照射後でもリーク電流の目立った増加はなくノイズの増加は認められず十分な特性を示すことが確認された。今後更に10¹⁷個/cm²まで照射し特性の確認を行う予定である。ピクセル検出器開発に関してはピクセル電極プロセスとしてフォトリソグラフを使用し、基板サイズは8mmx8mmのダイヤモンド基板に対しピクセル間隔30 μ mピクセルのサイズ240 μ m角のピクセル検出器の電極開発を行った(図2b参照)。電極材料はTiC/Pt/Au、50nm/50nm/50nmである。またダイヤモンドピクセル検出器と信号処理用集積回路の接続のための金属バンプを用いた接合技術のフィージビリティも検討した。図2cに示す金およびアルミニウムを用いてシヤア強度30g以上を持つ金属バンプが生成できる事を確認した。以上によりダイヤモンドピクセル検出器の国内の要素開発技術は確立でき、100 μ m角の電極を持つダイヤモンドピクセル検出器の開発が可能であることを示すことができた。

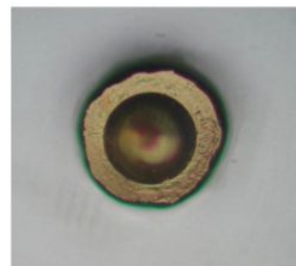
電極形状に関しては、ガードリングの有無による性能の比較等は本研究の目的ではなかった



a) 印加電圧による電荷収集効率の変化



b) ダイヤモンドピクセル電極の拡大写真



c) 条件最適化後の接合用金属バンプの写真

図2 ダイヤモンド検出器の開発評価と小型ピクセル電極生成プロセスの評価に関する研

ため行わなかったが、今後検出器性能向上に向けた研究課題としてあげられる。またプロセス時に注意すべき点として、基板表面研磨による基板の平坦度を確保がピクセルの歩留まりを決定することが挙げられる。現状では一品ごと手作りによる手法が効率良く大量生産が困難であるため、100 μm 厚以下の基板を取り扱う時の割れやすさを考慮した量産電極生成プロセスの検討が挙げられる。

今後の開発の定量的な指針を得るためのダイヤモンド検出器の数値モデルの開発は、シリコン半導体素子のデバイスモデルをダイヤモンド用に変更することで行った。しかしながらダイヤモンドの物理パラメータは、現状の測定技術では測定限界以下もしくは複数の先行研究における値のばらつきが大きいため、独自に測定を行い物理パラメータセットをセルフコンシステントに決定した。現在までダイヤモンド検出器特性をセルフコンシステントに再現することは困難であったが、図3に示すようにその特性をシステムティックに再現することに成功した。このなかで SIMS 等の測定手法では決定できない値を、粒子線から得たデータを用い確定できる有効な手法も開発した。今後このデバイスモデルを使用しセンサー開発へ発展させる。

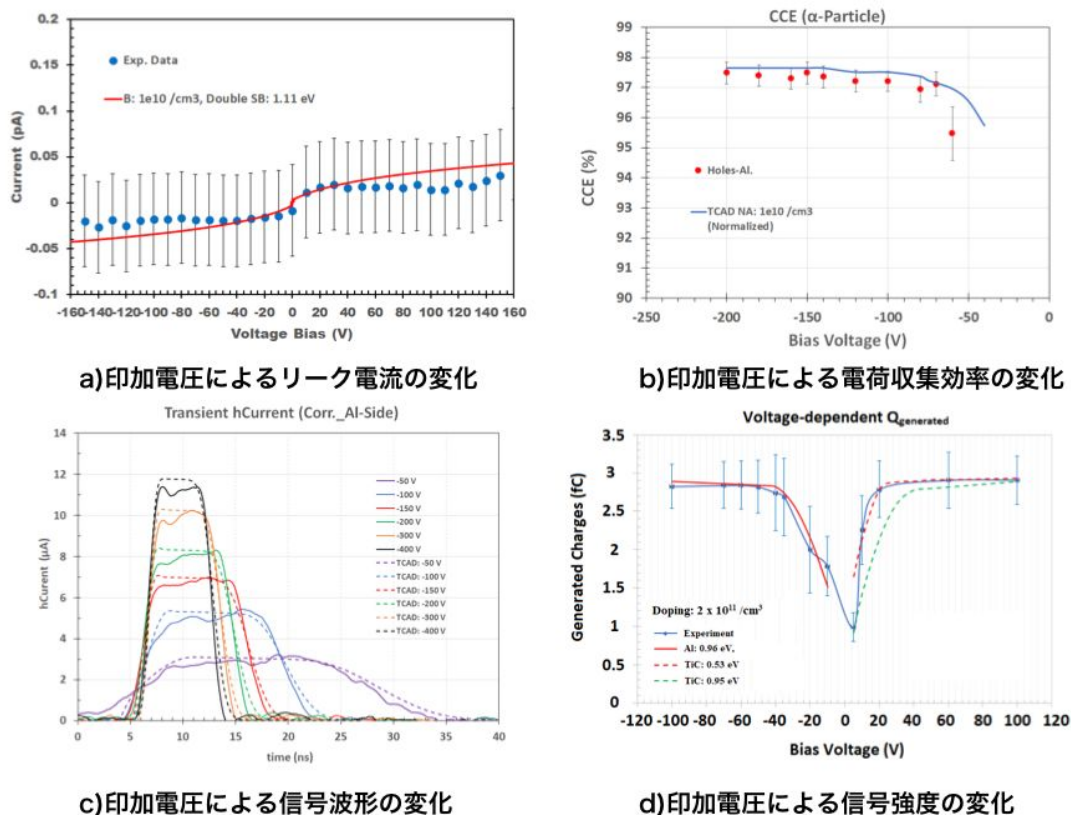


図3：開発した数値モデルによるシミュレーション値と種々の特性の実測値との比較

(3) 高耐放射線性能を持つ半導体プロセスの耐放射線評価

我々の目的はダイヤモンドピクセル検出器の実用化の基礎技術確立であるため、信号読み出し集積回路の放射線耐性及び回路構成も技術的めどを付ける必要がある。よって高耐放射線性能を持つ半導体プロセスの耐放射線評価と基本回路設計を行った。

(3-1) 耐放射線トランジスタの開発研究

検出器信号処理用アナログ回路においては電離放射線吸収量(以降 TID と略す)によるトランジスタの閾値変化とソースドレイン間のオフリーク電流変化による動作不良と消費電力の増加が主要な問題となる。シングルイベント効果に関しては回路構成レベルで対応するため今回の研究の対象とはしていない。評価トランジスタは、W を $2\mu\text{m}$ に固定し L を 60nm から 480nm まで変化させたもので、形状は通常のトランジスタ形状と放射線耐性を強化した形状の 2 種類である。ガンマ線照射は、量子科学技術研究機構・高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設にて行われた。CMOS65nm 半導体プロセストランジスタの照射結果についてトランジスタ特性の変化が一番大きかった例(N 型 MOS トランジスタ W/L= $2\mu\text{m}/60\text{nm}$)のゲートソース電圧とドレイン電流の特性を図 4 a に示す。0.36MGy 照射後ではトランジスタの閾値電圧変化は 18% 変化したが、半導体プロセスばらつきによるトランジスタの閾値変動以下となっており集積回路デザイン上の支障は全くないことが明らかとなった。

(3-2) 信号処理集積回路の開発研究

検出器用信号処理回路として GHz 帯広帯域電圧変換増幅器を前述の放射線耐性を持つ商用 CMOS65nm 半導体プロセスを利用し開発した。すでに述べたようにダイヤモンド検出器の応答

性能を十分に引き出すために広帯域性能を重視しデザインし、図 4 b に示すように GHz を超える性能を持つことが確認された。

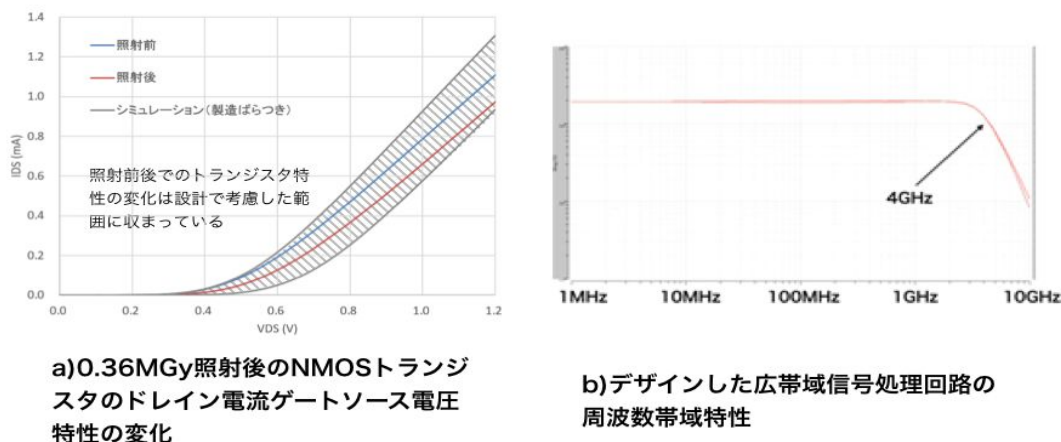


図 4 : 耐放射線ピクセル検出器用読み出しエレクトロニクスに関する研究開発結果

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

Takehiro Shimaoka, Satoshi Koizumi, Manobu M. Tanaka. Diamond photovoltaic radiation sensor using pn junction. Applied Physics Letters. 113 [9] (2018) 093504 10.1063/1.5034413

Shintaro Hirano, Junichi H. Kaneko, Shogo Ito, Takenori Hanada, Takehiro Shimaoka, Hiroaki Shimmyo, Masakatsu Tsubota, Akiyoshi Chayahara, Yoshiaki Mokuno, Hitoshi Umezawa, Substrate Effects on Charge Carrier Transport Properties of Single-Crystal CVD Diamonds and an 8 mm Square Radiation Energy Spectrometer, Phys. Status Solidi A, 2018, 215, 1800333, <https://doi.org/10.1002/pssa.201800333>

Takehiro Shimaoka, Daisuke Kuwabara, Asuka Hara, Toshiharu Makino, Manobu Tanaka, Satoshi Koizumi. Charge transport properties of intrinsic layer in diamond vertical pin diode. Applied Physics Letters. 110 [21] (2017) 212104 10.1063/1.4984280

[学会発表] (計 11 件)

M. J. Kholili, "New Type of Diamond Particle Detector TCAD Simulation". ISRD 2018. KEK Tsukuba Jan 23-26, 2018

Asuka Hara, "Development of a Single Crystal CVD Diamond Detector for High Energy Elementary Particle Experiment", International Symposium on Radiation Detectors (ISRD2018) KEK Tsukuba Campus, 24 January 2018

M. J. Kholili, A. Hara, T. Shimaoka, T. Kishishita, S. Koizumi, A. Traoré, E. T. Makino, S. Yamasaki, Y. Fujii, H. Nishiguchi, M. M. Tanaka, "Comparison of Experimental Data and TCAD Simulation of Diamond-Based Particle Detector and Proposal of 3D-Contact Diamond Detector", JPS Autumn Meeting. Shinshu University Sept 14-17, 2018

SHIMAOKA, Takehiro, KOIZUMI, Satoshi, TANAKA Manobu. Diamond pn diodes for charged-particle measurement. Hasselt Diamond workshop 2018. 2018

M.J. Kholili, Takehiro Shimaoka, Asuka Hara, Tetsuichi Kishishita, Satoshi Koizumi, Aboulaye Traoré, Toshiharu Makino, Satoshi Yamazaki, Yuki Fujii, Hajime Nishiguchi, Manobu Tanaka, "New Type of Diamond Particle Detector". JPS Autumn Meeting, Utsunomiya University. Sept 12 - 15, 2017

SHIMAOKA, Takehiro, KUWABARA Daisuke, HARA Asuka, MAKINO Toshiharu, TANAKA Manobu, KOIZUMI, Satoshi. Charge collection properties of drift layer in diamond vertical pin diode. 28 th International Conference on Diamond and Carbon Materials. 2017

SHIMAOKA, Takehiro, TERAJI, Tokuyuki, WATANABE, Kenji, KOIZUMI, Satoshi. Detection of killer defects in diamond by cathodoluminescence. Hasselt diamond workshop. 2017

SHIMAOKA, Takehiro, KUWABARA Daisuke, Hara Asuka, MAKINO Toshiharu, TAKANA Manobu, KOIZUMI, Satoshi. Charge transport properties of intrinsic layer in diamond vertical pin diode. Hasselt diamond workshop. 2017

原明日翔,田中真伸,金子純一,藤井祐樹,平野慎太郎,水越司,西口創,嶋岡毅紘,山崎聡,牧野俊晴,小泉聡,上殿明良,八井崇,三原智,田中秀治,佐波俊哉,萩原雅之,吉田光宏,橋本義徳,岸本俊二,小嶋健児,大友季哉,大下英敏,瀬谷智洋,単結晶ダイヤモンドを用いた測定器の開発及び評価,日本物理学会 2017 年秋季大会,宇都宮大学(峰キャンパス),2017 年 9 月 12 日

原明日翔,田中真伸,金子純一,藤井祐樹,平野慎太郎,水越司,西口創,嶋岡毅紘,山崎聡,牧野俊晴,小泉聡,上殿明良,八井崇,三原智,田中秀治,佐波俊哉,萩原雅之,吉田光宏,橋本義徳,岸本俊二,小嶋健児,大友季哉,大下英敏,瀬谷智洋,単結晶ダイヤモンドを用いた測定器の開発及び評価,日本物理学会 2017 年春季大会,大阪大学 豊中キャンパス,2017 年 3 月 17 日

原明日翔,田中真伸,金子純一,藤井祐樹,平野慎太郎,水越司,西口創,嶋岡毅紘,山崎聡,牧野俊晴,小泉聡,上殿明良,八井崇,三原智,田中秀治,佐波俊哉,萩原雅之,吉田光宏,橋本義徳,岸本俊二,小嶋健児,大友季哉,大下英敏,瀬谷智洋,単結晶ダイヤモンドを用いた測定器の開発及び評価,日本物理学会 2016 年秋季大会,宮崎大学 木花キャンパス,2016 年 9 月 23 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 金子純一

ローマ字氏名:(KANEKO, jun-ichi)

所属研究機関名: 北海道大学

部局名: 工学系研究院

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 90333624

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 小泉聡

ローマ字氏名:(KOIZUMI, satoshi)

https://samurai.nims.go.jp/profiles/koizumi_satoshi?locale=ja

研究協力者氏名: 嶋岡 毅紘

ローマ字氏名:(SHIMAOKA, takahiro)

https://samurai.nims.go.jp/profiles/shimaoka_takehiro?locale=ja

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。