

## 二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年6月20日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

高崎量子応用研究所 機能創製研究センター

[職・氏名]

上席研究員 ・佐藤真一郎

[課題番号]

JPJSBP 120217718

1. 事業名 相手国: インド (振興会対応機関: DST) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 高エネルギー粒子線によって形成した炭化ケイ素中の点欠陥の量子技術への応用

(英文) Fingerprinting of point defects in silicon carbide created by energetic particles for their relevance in quantum technologies

3. 共同研究実施期間 2021年6月1日 ~ 2023年5月31日 (2年0ヶ月)【延長前】 年 月 日 ~ 年 月 日 (年0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

University of Delhi ・ Professor ・ Shyama Rath

5. 委託費総額(返還額を除く)

|                 |          |             |
|-----------------|----------|-------------|
| 本事業により執行した委託費総額 |          | 1,931,977 円 |
| 内訳              | 1年度目執行経費 | 850,000 円   |
|                 | 2年度目執行経費 | 950,000 円   |
|                 | 3年度目執行経費 | 131,977 円   |

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

|          |    |
|----------|----|
| 日本側参加者等  | 4名 |
| 相手国側参加者等 | 3名 |

\* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

|      | 派遣  |     | 受入   |
|------|-----|-----|------|
|      | 相手国 | 第三国 |      |
| 1年度目 | 0   | 0   | 0(0) |
| 2年度目 | 2   | 0   | 2(2) |
| 3年度目 | 0   | 0   | 0(0) |

\* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣:委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入:相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

## 8. 研究交流の概要・成果等

### (1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

炭化ケイ素(SiC)中の点欠陥の量子技術応用に向け、高エネルギーイオンを用いた点欠陥の形成、そしてその後の高温熱処理による点欠陥の消滅や複合欠陥の形成について、包括的に明らかにすることが本研究交流の目的である。具体的には以下 2 項目を実施した。

#### ① 高エネルギーイオン照射と高温熱処理による SiC 点欠陥の形成

n 型 SiC もしくは高純度半絶縁 SiC に対し高エネルギーイオン(C、N、Si)を照射し、高温熱処理を行うことで、点欠陥(主にシリコン空孔: $V_{Si}^-$ )や窒素・空孔複合欠陥( $N_C V_{Si}^-$ )の形成を行った(**両国で共同実施**)。その後、ラザフォード後方散乱(RBS)法やラマン分光法、X 線回折(XRD)法を用いて解析することで、 $V_{Si}^-$ および  $N_C V_{Si}^-$ の形成と照射損傷との関係を系統的に明らかにした(**相手国にて実施**)。

#### ② SiC 点欠陥の光学的評価、温度依存性解析

①で作製した試料の光学評価を、可視・近赤外 PL 分光により解析することで、照射量や熱処理による増加・減少とそのメカニズムについて明らかにした。また、熱処理にともなう PL スペクトルの変化に基づき、 $V_{Si}^-$ の熱的安定性および  $N_C V_{Si}^-$ の形成温度について明らかにするとともに、それら PL スペクトルの励起光波長依存性、温度依存性を明らかにした(**日本側が実施**)。

### (2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

日本側はこれまで、SiC 中に形成した点欠陥の量子ビットとしての特性を明らかにする研究を行ってきたが、点欠陥の高エネルギーイオン照射による形成の条件を系統的に調べることでできていなかった。今回の共同研究の結果、イオン種、照射量、熱処理条件といったさまざまな条件を広範囲かつ系統的に調査することができたことは、量子ビット形成技術の基礎的な知見の蓄積として有意義であった。高エネルギーイオン照射によって形成した点欠陥が、照射損傷の蓄積により却って減少すること、熱処理によって損傷が回復した場合でもその負の影響が残留するため、最適な照射条件が存在することを明らかにすることができた。

今回得られた研究結果をもとに、国際学会での発表 3 件(うち 1 件は招待講演)という研究成果を得た。また、学術論文の投稿を複数件予定しており、現在論文の執筆を進めている。

### (3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

日本側はこれまで、SiC 中に形成した点欠陥の量子ビットとしての特性を明らかにする研究を行ってきたが、相手国の得意とする照射損傷分析を導入することにより、上記(2)のような知見を得ることができた。これは、単一の照射条件だけでなく、イオン種、照射量、熱処理条件といったさまざまな条件で検討した結果得られたものであるが、それが実行できたのは、日本側の所属機関(高崎量子応用研究所)および相手国の IUAC (Inter-University Accelerator Centre)が有するイオン加速器施設を最大限に活用することができたからであり、日本・インドの学術交流の結果であるといえる。

### (4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

現在、世界中で量子技術に関する研究開発が活発に進められており、日本国内での研究の推進はもちろん

のこと、諸外国との効果的な連携研究も必要とされている。今回我々が進めた共同研究は、量子技術への発展を見据えた材料科学をベースにした研究であり、互いの研究期間の強みを活かした内容であった。相手国であるインドは量子技術分野に関しては後発であるが、今後、急速に成長するのではないかと予想されるため、今回の共同研究がベースとなり、量子技術分野における日本とインドの連携が深まっていくことが期待される。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

日本側代表者は、近隣の大学院学生を実習生やリサーチアシスタントとして常時数名受け入れており、2022年5月に相手国研究者が2名来日した際に、相互の研究発表・紹介(小規模なセミナー)、食事や休憩時間での交流、実験装置利用補助など、英語でのコミュニケーションを経験してもらった。また2022年11月に日本側研究者2名が相手国(インド・デリー)を訪問した際は、相手国代表者の研究室の学生らとの研究交流を図り、研究紹介、実験施設案内、食事・休憩時間での交流等を通じて、相手国若手研究者の養成にも貢献した。

さらに、相手国研究者の1人である Gaurav Gupta 氏は博士課程の学生であり、本研究成果をまとめ、博士の学位を取得予定である。さらに、学術論文への投稿の準備を進めている。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

今回の共同研究により、お互いの得意とする分析・解析手法を共有することができた。現時点で具体的な計画はないが、今回の共同研究を発展させた国際共同研究プロジェクトの提案に向けて、相手国の代表者とともに検討を進める。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

特になし。