

量子デバイス応用に向けた SiO_2/SiC 界面単一光子源の研究

物理学系専攻 精密工学コース
渡部研究室 大西 健太郎

1. はじめに

近年、膨大な情報の処理や完全秘匿な暗号通信の実現に向け、量子コンピュータや量子暗号通信の実用化が期待されている。これらの量子デバイスには、識別不能な単一光子を任意のタイミングで取り出せる単一光子源 (Single Photon Emitter, SPE) が重要である。半導体中の発光中心は SPE として利用可能であり、各種デバイス技術を駆使することで、スケーラブルな量子デバイスの実現が期待されている。炭化ケイ素 (SiC) は、長年にわたるパワーデバイスの研究開発により、結晶成長、伝導型制御、微細加工などの半導体プロセス技術が確立しており、量子デバイス応用に適している。SiC の発光中心は結晶中だけでなく、 SiO_2/SiC 界面にも存在することが報告されており、特に界面発光中心の発光強度は、量子研究分野で最も有名なダイヤモンド中の窒素-空孔中心 (NV センター) を上回ることで知られている[2]。しかし、界面発光中心の形成過程や微視的起源は明らかではない。

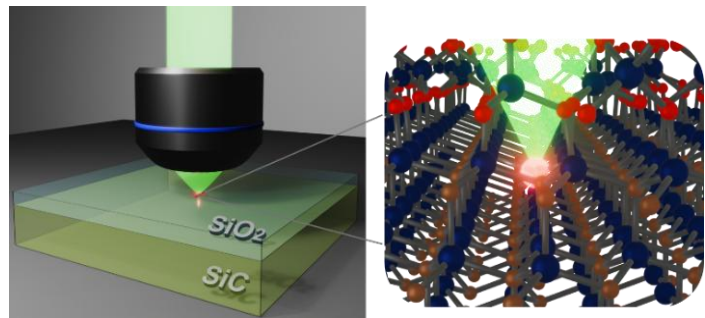


図 1 : SiO_2/SiC 界面発光中心の模式図[1]

2. SiO_2/SiC 界面発光中心の形成過程の研究[3]

SiO_2/SiC 界面発光中心は、SiC 表面の熱酸化により形成される[4]。しかし、一般的な熱酸化条件で形成した SiO_2/SiC 界面には発光中心が高密度に存在し、発光のオーバーラップにより単一光子性が劣化してしまう[5]。

そこで、私は界面発光中心の形成過程の理解及び密度制御に向け、予め発光中心のない高品質な SiO_2/SiC 界面を形成したのち、界面発光中心を後から形成する方法を考案した。具体的には、初めに超高温 (1600°C) かつ低酸素分圧雰囲気下での酸化により高品質 SiO_2/SiC 界面を形成し、後から低温 (200–1000°C) での酸化を施すことで、界面発光中心を形成するアプローチをとった。

結果として、酸化温度 800°C 以上で高輝度な発光中心の形成が見られ、図 2(a) の共焦点フォトルミネッセンス (PL) マッピング像の例に示すように、孤立した発光中心の形成が確認できた。また、Hambury-Brown Twiss 測定を実施した結果、測定した全ての発光中心に対して強度相関関数 $g^{(2)}(0)$ は 0.5 を下回り、発光の単一光子性が示された (図 2(b))。本研究により、 SiO_2/SiC 界面発光中心の形成過程に関する理解を構築すると共に、界面単一光子源を制御性よく形成する手法を確立した。

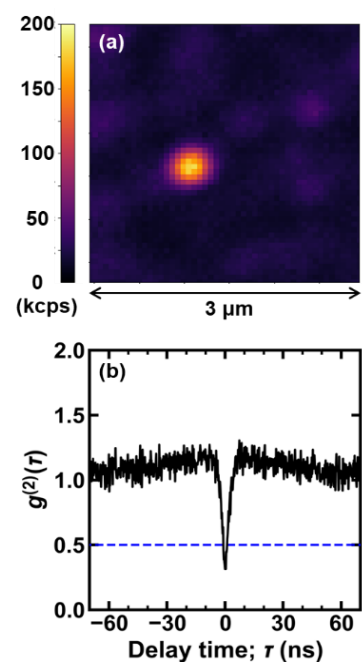


図 2 : 界面発光中心の (a) 共焦点 PL マッピング像、および (b) 強度相関関数の例[3]

3. SiO₂/SiC 界面欠陥の発光中心の起源解明の研究[6]

SiO₂/SiC 界面発光中心は優れた特性を有するものの、量子技術応用には至っていない。量子技術応用には界面発光中心の光学特性(発光波長、偏光など)を精密に制御する必要がある。特に、界面発光中心の起源は明らかではなく、これが実用化を阻む大きな要因の一つである。

そこで、私は発光中心の起源解明に向け、発光中心と電気的欠陥との相関に着目して研究を行った。具体的には、SiC の熱酸化時の酸化温度と酸素分圧とを広範囲で変化させることで、界面欠陥密度を広範囲に変化させた試料水準を準備した。作製した試料に対し、詳細な光学特性および電気特性評価を実施することで、界面発光中心の起源に迫った。

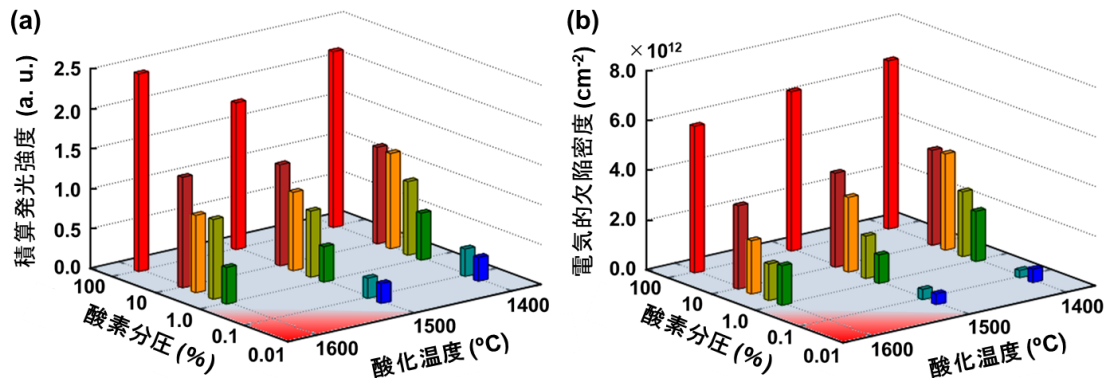


図3: SiO₂/SiC 界面における(a)発光中心の積算発光強度と(b)電気的欠陥密度[6]

図3に示すように、結果として発光中心と電気的欠陥は酸化条件に対して同一の振る舞いを示すことが明らかとなった。これらの相関係数を求めたところ0.95と高く、強い正の相関が得られた。このようにして、界面発光中心と電気的欠陥が共通の起源に由来することを示した。

さらに詳細な解析を進め、界面発光中心がSiCの伝導帯下端から0.65–0.92 eVのエネルギー位置に欠陥準位を形成することを突き止めた。本結果を先行の理論研究と照らし合わせたところ、発光中心の有力候補は、界面近傍SiC中の置換型炭素ダイマー(SiC中のSiが2つのCに置き換わった構造(図4))であることが分かった。本研究で確立した欠陥の基礎的理解に基づき、今後発光中心の光学特性制御の進展が期待される。

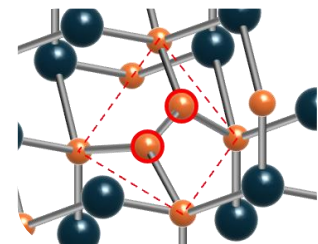


図4: 置換型炭素ダイマー欠陥

4. まとめ

本研究では、SiO₂/SiC 界面における発光中心の形成過程と起源解明の研究に取り組んだ。その結果、界面発光中心の密度制御を達成し、単一光子源を制御性よく形成する手法を確立した。また、発光中心と電気的欠陥の相関を評価したところ、これらは同一の起源に由来することが分かり、界面発光中心のエネルギー準位を突き止めた。本研究成果をもとに、今後界面発光中心の光学特性制御が進めば、界面発光中心を単一光子源として活用した量子技術の実現が期待される。

5. 参考文献

- [1] 大阪大学 ResOU プレス発表記事 (https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2025/20250228_1)
- [2] A. Lohrmann *et al.*, Nat. Commun. **6**, 7783 (2015).
- [3] K. Onishi *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 051004 (2024).
- [4] A. Lohrmann *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 021107 (2016).
- [5] T. Nakanuma *et al.*, Appl. Phys. Lett. **123**, 102102 (2023).
- [6] K. Onishi *et al.*, APL Mater. **13**, 021119 (2025).