



Title	Understanding and Control of Single-Photon Emitters at SiO ₂ /SiC Interfaces for Quantum Applications
Author(s)	中沼, 貴澄
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105428
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (中 沼 貴 澄)	
論文題名	Understanding and Control of Single-Photon Emitters at SiO ₂ /SiC Interfaces for Quantum Applications (量子技術応用に向けたSiO ₂ /SiC界面単一光子源の理解と制御)
論文内容の要旨 トランジスタ微細化の限界を背景にエレクトロニクスの高度化が物理限界に近づいており、ポストエレクトロニクスを担う革新的技術として量子技術への期待が高まっている。量子特有の性質を活用することで、計算・通信・測定といった幅広い領域でデバイスの高性能化や新機能の実現が可能となる。量子情報の基本単位である量子ビットとして、光子が注目を集めている。光子は、室温・大気圧下でも安定動作が可能であり、既存の光通信インフラとも高い親和性を有する。光子を任意のタイミングで放出可能な光源として、半導体中の点欠陥に由来する発光中心が期待されている。数ある半導体の中でも炭化ケイ素 (SiC) は広いバンドギャップ (3.26 eV) を有する上、n・p型伝導制御等の結晶成長・プロセス技術が確立していることから、発光中心の母材として有望である。発光中心として、これまでにSiC中のシリコン空孔 (I_{Si}) などの欠陥が盛んに研究されてきた。一方で、金属-酸化物-半導体 (MOS) デバイスの心臓部であるSiO₂/SiC界面においても、有望な発光中心 (界面発光中心) が報告されている。界面発光中心は室温でも極めて高強度の発光を示す上、その形成にはイオン注入などの高コストプロセスを必要とせず、熱酸化により容易に形成可能である。さらに、界面発光中心は電子デバイス中に組み込むことで、外部電圧によって蛍光強度を制御できるという特徴を有する。しかし、界面発光中心の密度や発光特性の制御指針は十分に確立されておらず、その微視的起源も未解明である。そこで本研究では、これらの課題解決に向けた基礎研究に取り組んだ。以下に本論文の構成を示す。 第一章では、本研究の背景として、量子技術の概要やSiCにおける単一光子源 (SPE) の研究開発状況を述べた。 第二章では、界面発光中心を評価するために構築した共焦点レーザー走査顕微鏡 (CLSM) の構成と測定原理を詳述した。構築したCLSMでは、高NA対物レンズとピンホールによる焦点外光除去を組み合わせることで、サブマイクロメートルの空間分解能を実現しており、空間的に局在した発光中心を選択的に評価可能である。本研究ではこの評価系を用いて、発光中心の空間分布、フォトルミネッセンス (PL) スペクトル、およびHanbury-Brown and Twiss (HBT) 測定による単一光子性の評価を実施した。 第三章ではまず、超高温酸化および二酸化炭素 (CO₂) 熱処理プロセスによる界面SPEの密度制御に取り組んだ。高温での酸化により界面発光中心密度は約1/5に低減するものの、依然として高密度 (10^7 cm⁻²台) に留まることが分かった。これに対し、CO₂熱処理を適用することで、密度が10^5 cm⁻²台と顕著に低減することを見出した。このように、発光中心密度を広範囲に制御する手法を確立した。さらに、発光中心の起源解明に向け、発光中心密度とMOSデバイスの電氣的欠陥密度の相関を詳細に調査した。この結果、界面発光中心の起源として、伝導帯からエネルギー的に深い準位を形成するアクセプタ型欠陥が有力であることを見出した。 第四章では、CO₂熱処理による発光中心の低減メカニズムを明らかにするため、アルゴン (Ar) 熱処理の効果との比較を行った。Ar熱処理の場合、熱処理時間の増加とともに、発光中心密度が緩やかに単調減少する結果が得られた。一方で、CO₂熱処理では短時間の処理で密度が急速に低減するが、長時間処理では僅かに増加する傾向を見出した。本結果は、CO₂分子が酸素供給源として機能して界面欠陥を効果的に除去する一方、長時間の処理ではSiC表面の酸化が進行することで欠陥が新たに形成されたと解釈できる。さらに、量子技術への応用に向けて、発光中心の単一光子性を確保する指針の確立に取り組んだ。発光中心の高分解能PLマッピング測定を実施することで、発光中心同士のオーバーラップが単一光子性を劣化させる主要因であることを明らかにした。適切なCO₂熱処理により発光中心を空間的に分離することが可能であり、高い確率で単一光子源を形成可能であることを見出した。 第五章では、第三章および第四章で調査した結果を踏まえ、(i) 熱処理による発光中心密度低減のメカニズム、(ii) 単一光子源の形成戦略、(iii) 発光中心密度と電氣的欠陥密度の絶対値の乖離要因、(iv) 界面発光中心の起源について考察した。 第六章では本論文の総括を述べた。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (中 沼 貴 澄)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	准教授	小林 拓真
	副 査	教授	渡部 平司
	副 査	教授	有馬 健太
	副 査	教授	大参 宏昌
	副 査	教授	荻 博次
	副 査	教授	桑原 裕司
	副 査	教授	佐野 泰久
	副 査	教授	森川 良忠
	副 査	教授	山村 和也

論文審査の結果の要旨

半導体中の点欠陥に由来する発光中心は単一光子源として機能し、量子情報処理技術への応用で期待される。SiC は広いバンドギャップを有し、結晶成長や各種プロセス技術が確立しているため、発光中心の母材として有望である。これまでに金属-酸化物-半導体 (MOS) デバイスの心臓部である酸化膜/SiC 界面において、極めて高輝度の発光中心 (界面発光中心) が見出されている。界面発光中心は SiC 基板の熱酸化により比較的容易に形成可能であるという利点も有する。しかし、発光中心の物理的起源は明らかでなく、その密度や光学特性を制御するための指針は十分に確立されていない。本論文は、界面発光中心の性質および制御手法について体系的に研究したものである。

第 1 章では、量子情報処理の研究分野の進展を概観すると共に、半導体の色中心研究の動向を整理している。

第 2 章では、界面発光中心を評価するために構築した共焦点レーザ走査顕微鏡 (CLSM) の構成と原理を示し、サブ μm 分解能でのフォトルミネッセンス (PL) マッピング測定やスペクトル評価、また、Hanbury-Brown and Twiss (HBT) 測定による単一光子性評価について説明している。

第 3 章では、超高温酸化および二酸化炭素 (CO_2) 雰囲気での熱処理による界面発光中心の密度制御を試み、実際に CO_2 熱処理により、発光中心密度を 10^7 cm^{-2} 台から 10^5 cm^{-2} 台まで大幅に低減できることを見出している。さらに、発光中心の密度と、MOS キャパシタの評価により得られた電氣的欠陥密度との相関を調べることで、界面発光中心が伝導帯から深い準位を形成するアクセプタ型欠陥に由来する可能性を指摘している。

第 4 章では、発光中心の低減メカニズム解明および単一光子源の形成指針確立を目的とした実験を実施している。まず、 CO_2 熱処理では不活性ガスであるアルゴン (Ar) 熱処理よりも短時間で効果的に発光中心を低減できることを見出し、 CO_2 分子が欠陥除去に直接寄与する可能性を明らかにしている。また、高分解能モードの PL マッピング測定と HBT 測定の結果を解析することで、発光中心同士の重なりが単一光子性劣化の主要因であることを突き止めている。このため、 CO_2 熱処理によって発光中心密度を低減することで、高確率で単一光子源を形成できることを明らかにしている。

第 5 章では、実験結果を踏まえた考察をまとめており、発光中心の起源や制御手法について詳細に議論している。

以上のように、本論文は、多角的な評価手法により酸化膜/SiC 界面に形成される高輝度発光中心の性質と制御指針を明らかにしたものである。量子技術研究の進展に寄与する学術的に重要な成果を示しており、博士論文として十分な価値を有するものと認める。