

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	走査型透過電子顕微鏡を用いたカソードルミネセンス光子相関計測
Title(English)	Study on Photon Correlation in Cathodoluminescence Using Scanning Transmission Electron Microscopy
著者(和文)	柳本宗達
Author(English)	Sotatsu Yanagimoto
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第224号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三宮 工,横田 紘子,中辻 寛,中村 一隆,梶川 浩太郎,秋葉 圭一郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第224号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	柳本宗達	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	三宮工	教授	梶川浩太郎	教授
	審査員	横田紘子	教授	秋葉圭一郎	主幹研究員 (QST)
		中辻寛	准教授		
	中村一隆	准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「走査型透過電子顕微鏡を用いたカソードルミネセンス光子相関計測」と題し、全5章から構成されている。

第1章「序論」では、まずカソードルミネセンス (CL) 法が、光の回折限界を超えたナノスケールでの光計測法として有用であることを、その他のナノ光計測法と比較して説明している。さらに、電子線のパルス化を必要としない発光寿命計測法として近年注目を集めている Hanbury Brown-Twiss (HBT) 干渉計を用いた CL 光子相関計測の世界動向について述べている。この CL-HBT 測定において、光子の強度相関がスーパーポアソン統計に相当するバンチングを示し、そのバンチングの強さは電子線電流によって変化することを説明し、CL 光子自体の統計性の定量評価ができていないこと、また励起する電子側の情報が活用できていないことが課題であると指摘している。これらをふまえて、本研究の目的が励起電子の情報を含めて CL の光子統計を包括的に理解し、CL 光子統計の評価方法を確立することであることを説明している。

第2章「理論・手法」では、CL におけるコヒーレントおよびインコヒーレントな発光について説明し、光子相関計測における相関関数の表式および CL における光子状態と相関関数の形状について述べ、本研究で確立した CL-HBT 測定系とノイズおよび誤差の評価について説明している。

第3章「CL の光子数統計計測」では、CL における電子線の変調効果を取り除き、1 電子による励起イベント中の光子統計性を示す相関因子の導出と、その実験的な評価についてまとめている。発光モードを直接励起するコヒーレント発光では、この相関因子がポアソン統計に相当する 1 となることを理論的に説明し、単一の双極子となる局在表面プラズモンや遷移放射、波動関数が平面的に広がるプラズモニック結晶、および厚さ方向に長い相互作用距離をもつ Smith-Purcell 放射や Cherenkov 放射について実験的に相関因子が 1 となることを示している。一方で、体積プラズモンや 2 次電子に代表される仲介粒子を介して光子が生成されるインコヒーレント発光では、相関因子が 1 を超えることを理論的に示し、窒素-空孔中心を含むナノダイヤモンド粒子と、Ce の発光中心をもつイットリウムシリケートについてこの相関因子を実験的に評価している。相関因子を評価することで、多段過程を支配する体積プラズモンや 2 次電子に代表される仲介粒子が 1 電子あたりに生成される平均個数や、仲介粒子 1 つが生成する平均光子数を抽出できることを実験的に示している。さらに、複数の仲介過程を含む多段過程においても、相関因子を一般化することができることを示している。

第4章「電子光子相関計測法」では、試料と相互作用し透過した電子と、生成した光子の相関計測についてまとめている。単一電子検出にはシンチレータを利用することで、これまでの HBT 測定系をそのまま利用することができ、理論計算からはシンチレータの寿命とは独立に試料の発光寿命が測定できることを説明している。この電子光子相関計測法を、窒素-空孔中心を含むナノダイヤモンド粒子に適用し、得られた発光寿命がシンチレータの寿命によらないことを実験的に示している。さらに、測定から得られる相関ヒストグラムからは、電子と光子の相関の強度を示す励起相関係数を算出することができ、インコヒーレント CL において電子を選択することなく全て検出する場合にはこの励起相関係数が 1 になることを理論的、実験的にも確認している。一方、コヒーレント CL では、特定の電子および光子の運動量を選択検出することで、光子生成時に運動量が保存された電子光子ペアを選択的に測定することになり、この場

合は励起相関係数が変化し理想的な場合には1を超えることを理論的に示している。対応する実験からは、運動量保存する電子光子ペアを優先的に検出する測定において、励起相関係数が増加することが確認されており、電子と光子のペア相関の強さが抽出可能であることを示している。

第5章「結論」では、本研究の結果をまとめ、本論文を総括するとともに将来展望について述べている。

以上を要するに本論文は、CL光子相関計測法を開発し、1電子の励起イベントにおける光子統計性が励起発光過程を反映することを解明し、さらに電子と光子の相関からは発光寿命だけでなく電子と光子の相関強度を評価できることを見出したもので、電子線励起発光における光子統計性を活用する新たなアプローチを提案しており、理学上及び科学技術上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値のあるものと認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。