博士学位論文 審査結果の要旨

Abstract of review result

芝浦工業大学大学院 理工学研究科 博士（後期）課程

Doctoral thesis defense committee

博士学位論文審査委員会

Main examiner 主査	西川　宏之
Examiner 審査委員	松村　一成
Examiner 審査委員	ラジャゴパラン　ウママヘスワリ
Examiner 審査委員	横井秀樹
Examiner 審査委員	プッタラクサ　ニテイポン
Examiner 審査委員	馬場　暁

氏　名 Applicant's Name	Kunpisit KOSUMSUPAMALA
論文題目 Thesis title	Microstructure Fabrication for Photonic Nanojet Applications and Surface Modification in Polymers by Proton Beam Writing （陽子線描画によるフォトニックナノジェット応用のためのポリマーマイクロ構造作製と表面改質）

〔論文審査の要旨〕

Abstract of review

本論文は、陽子線描画（Proton Beam Writing: PBW）を用いたポリマーマイクロ構造作製技術の高度化と、その光学応用および材料改質への展開を目的とした研究である。

第 1 章から第 3 章では、リソグラフィ技術の発展と高エネルギー陽子の直進性と低散乱性といった PBW の物理的特長を整理するとともに、フォトニックナノジェット（PNJ）およびポリマーに対するイオンビーム改質に関する先行研究を概観し、本研究の位置付けと課題を明確にした。また、芝浦工業大学にて開発された PBW 装置を用いた研究手法として、運転ログデータ解析、ポリメチルメサクリレート（PMMA）マイクロ構造の作製、線状低密度ポリエチレン（LLDPE）薄膜への MeV 級の高エネルギー陽子線照射、および光学・形態評価手法を示した。

第 4 章では、PBW 装置の運転ログ解析により、再現性の高い微細加工に必要な最適ビーム条件形成の指針を提示した。さらに PMMA 中実および中空マイクロ柱状構造による PNJ 形成を実験および数値解析の両面から評価し、構造寸法、壁厚、周囲媒質の屈折率が光集光特性に及ぼす影響を明らかにした。また LLDPE に対する陽子線照射では、照射量に依存した表面形態の遷移および改質深さの増加特性を明らかにした。工学的な応用例として LLDEP 改質表面を用いてポリジメチルシロキサン（PDMS）へのパターン転写を実演した。第 5 章では本研究の成果を総括し、PBW の運用最適化、光学マイクロ構造設計、非レジストポリマー材料改質への応用可能性を示した。

本博士論文に関連する研究業績として、筆頭著者である査読付き原著論文を 2 報（Appl. Phys. Lett. 123, 141102 (2023), J. Micromech. Microeng. 35, 095011 (2025)）および国際会議論文 2 報（EIPBN2024, ICNMTA2024）を発表した。

最終審査は 2026 年 1 月 31 日 14 時 30 分より対面・遠隔のハイブリッドで開催した。発表 1 時間および審査委員による質疑応答を 1 時間の公聴会形式で実施し、その後の審査委員会にて委員 6 名全員が合格と判定した。また審査結果に影響のない範囲で論文原稿の修正すべき点を指摘した。

以上より、本研究は PBW 技術の物理的な特徴を有効に活かして PNJ 形成を可能とする光学マイクロ構造創製、およびポリマー材料改質への応用可能性を拡張したものであり、博士（工学）の学位に十分に値する成果である。

（English version）

This doctoral thesis aims to advance polymer microstructure fabrication technology using Proton Beam Writing (PBW) and to expand its applications to optical microstructures and polymer material modification.

Chapters 1 to 3 review the development of lithography technologies and summarize the physical characteristics of PBW, particularly the high straightness and low scattering of high-energy protons. Previous studies on photonic nanojets (PNJs) and ion-beam-induced modification of polymers are also reviewed, thereby clarifying the positioning and objectives of this research. In addition, the experimental methodologies employed using the PBW system developed at Shibaura Institute of Technology are described, including analysis of accelerator operation log data, fabrication of polymethyl methacrylate (PMMA) microstructures, MeV-class proton irradiation of linear low-density polyethylene (LLDPE) thin films, and optical and morphological characterization techniques.

In Chapter 4, guidelines for establishing optimal beam conditions required for highly reproducible microfabrication are proposed based on a detailed analysis of PBW system operation logs. Furthermore, the formation of photonic nanojets using solid and hollow PMMA micropillar structures is evaluated through both experimental investigations and numerical simulations. The effects of structural dimensions, wall thickness, and surrounding refractive index on light-focusing characteristics are systematically clarified.

In addition, proton irradiation of LLDPE reveals dose-dependent transitions in surface morphology and an increase in modification depth. As an engineering demonstration, pattern transfer from proton-modified LLDPE surfaces to polydimethylsiloxane (PDMS) is successfully demonstrated.

Chapter 5 summarizes the overall achievements of this study and discusses the optimization of PBW operation, the design of optical microstructures, and the applicability of PBW as a material modification technique for non-resist polymer materials.

As research outputs related to this doctoral thesis, the author has published two peer-reviewed original journal papers as first author (*Applied Physics Letters* **123**, 141102 (2023); *Journal of Micromechanics and Microengineering* **35**, 095011 (2025)) and two international conference proceedings (EIPBN 2024 and ICNMTA 2024).

The final doctoral examination was held on January 31, 2026, at 14:30 in a hybrid format combining on-site and remote participation. The public defense consisted of a one-hour presentation followed by a one-hour question-and-answer session with the examination committee. Subsequently, the committee convened and unanimously judged the thesis to be acceptable. Minor revisions to the manuscript were recommended, which did not affect the examination outcome.

In conclusion, this research effectively exploits the physical characteristics of PBW to realize optical microstructures capable of photonic nanojet formation and significantly extends the applicability of PBW to polymer material modification. The achievements presented in this thesis are considered fully worthy of the degree of Doctor of Engineering.