



Title	Comprehensive Evaluation Framework for Resist Process Based on Scanning Electron Microscope Image and Quartz Crystal Microbalance Method
Author(s)	Jin, Yuqing
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/103204
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (JIN YUQING)

Title

Comprehensive Evaluation Framework for Resist Process Based on Scanning Electron Microscope Image and Quartz Crystal Microbalance Method (走査電子顕微鏡画像と水晶振動子マイクロバランス法に基づくレジストプロセスの包括的評価体系)

Abstract of Thesis

High-fidelity resist patterns are essential for high-volume integrated circuit production, especially with the introduction of EUV lithography. Chemically amplified resists (CARs) are widely used as EUV and electron beam (EB) resists, utilizing heat to amplify photon energy. A typical CAR contains a photoacid generator (PAG), a base quencher, and a polymer with partially protected side chains.¹ Upon exposure, acid from PAG deprotects the polymer during postexposure bake (PEB), increasing its hydrophilicity and solubility in aqueous developers.

Pattern quality is largely determined by the concentration of protecting units on the side chain of polymer (C_p). The accumulation of these stochastic effects⁴ in making patterns finally cause the protected unit fluctuation. This was thought to be the main factors for generating defects such as line edge roughness (LER), on the line-and-space (L/S) pattern which is a typical resist pattern to evaluate the pattern fidelity. On the other hand, the discoverability of a hydrophilic developer in this study was indicated by the dissolution threshold (C_{th}). Whether a polymer dissolves depends on C_p relative to the C_{th} . A key factor affecting LER is the effective deprotection reaction radius (R_p), which is difficult to measure directly. In Chapter 1, both R_p and C_{th} were estimated using simulation and experimental data via Bayesian optimization.

Polymer dissolution kinetics involve complexities beyond C_{th} can describe, such as resist swelling. Quartz crystal microbalance (QCM) method is an essential technique to understand the dissolution kinetics. It measures the dissolution rate of the resist, a critical aspect of lithographic processing. QCM also tracks changes in impedance (ΔZ), which indicate energy loss during development. Although QCM provides valuable measurements, the full potential of the impedance data which it produces is not fully utilized yet. Chapter 2 introduces a stratified polymer dissolution model (SPDM), simulating frequency (Δf) and impedance (ΔZ) changes in QCM measurements. Impedance data reflects not only dissolution rates but also interfacial viscosity. Reproducing QCM charts have shown that impedance not only offers insights into the rate at which the resist dissolves but also provides information on the viscosity at the interface between the developer and the top layer of the resist. Based on impedance data, which allows for the extraction of key parameters such as the diffusion constant (D) and hydrodynamic radius (R_H) from QCM measurements. I analyzed previously reported QCM data for *t*-Boc protected poly(4-hydroxystyrene) (PHS) films in an alkaline developer, aqueous tetramethylammonium hydroxide (TMAH) at different resist film thickness.

In Chapter 3, an image recognition method was developed to evaluate defective L/S resist patterns using SEM images. About 2500 SEM images from EB-printed L/S patterns of varying half-pitches and doses were analyzed using Hough transform, providing quantitative metrics for severe defects like over- or under-dissolution. Monte Carlo simulations were also used to model polymer distribution, and results were compared with experimental data.

Finally, integrating chemical parameters, QCM modeling, and SEM evaluations, a regression analysis model was developed. This model supports the selection and design of developer formulations for next-generation photoresists.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (JIN YUQING)		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	古澤 孝弘 (産業科学研究所)
	副査 教授	菅 大介
	副査 教授	古川 森也
	副査 教授	藤内 謙光
	副査 教授	櫻井 英博
	副査 教授	林 高史
	副査 教授	南方 聖司
	副査 教授	宇山 浩
	副査 教授	佐伯 昭紀
	副査 教授	中山 健一
	副査 教授	能木 雅也 (産業科学研究所)

論文審査の結果の要旨

本論文では、年々微細化が進む半導体製造用のリソグラフィにおける、効率的な材料、プロセスの開発を可能にする機械学習を用いた評価手法を確立している。特に、最先端の極端紫外光(EUV)リソグラフィでは、求められる要求は厳しく、材料、プロセスの効率的な開発には、それらの高精度かつ包括的な評価が要求されている。主な結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 半導体リソグラフィでは、高分子、酸発生剤、塩基から構成される化学增幅型レジストが使用されている。このレジストは露光により生成した酸の触媒反応により、高分子の極性を変え、高分子を現像液に可溶とする。この材料の性能を記述する重要な特徴量は酸触媒の実効反応半径と溶解閾値であるが、有効な評価手法がない。本論文では、ペイズ最適化による実験データとシミュレーションデータの比較により、これらの特徴量の評価手法を確立している。
- (2) 現像プロセスにおける溶解閾値モデルは、レジスト性能を記述する重要な特徴量であるが、現在問題となっている確率統計欠陥を説明するには精度が不十分である。本論文では、水晶振動子マイクロバランス法で得られる現像中のレジスト及び現像液の状態変化を新規の現像モデルで解析することにより、現像プロセスを記述する新たな特徴量の抽出を可能にしている。
- (3) リソグラフィ材料はプロセス後の SEM 画像で評価される。最先端のリソグラフィでは確率統計欠陥が表面化し、同じ材料、プロセスであっても、SEM 画像は施行回ごとに異なる。本論文では、そのような欠陥が多数あるレジスト SEM 画像を新規手法で評価、数値化を可能とし、機械学習における目的変数としての使用を可能としている。

以上のように、本論文は、これまで評価が困難であったリソグラフィの各プロセスの高精度のデータ化手法を確立している。その結果、リソグラフィ材料のプロセス後の SEM 画像を目的変数、材料、プロセスの特徴量を説明変数とした相関解析を可能としている。本研究で確立された手法が活用されることにより、今後、EUV リソグラフィ材料、プロセスの効率的な開発が期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。