

フィールドガイド
オプティカル
リソグラフィ

Chris A. Mack / 著

木下 博雄 / 訳

Field Guide to Optical Lithography
by Chris A. Mack

Originally published by

SPIE
P.O. Box 10
Bellingham, Washington 98227-0010 USA
Phone: +1 360 676 3290
FAX: +1 360 647 1445
Email: Books@SPIE.org
Web: spie.org

Copyright © 2006 The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from SPIE.

Translated and published in Japan by special arrangement with SPIE Press, 1000 20th Street, Bellingham, WA 98225 USA.

Authorized Japanese-language edition

SPIE フィールドガイドシリーズについて

SPIE フィールドガイドシリーズへようこそ。本書は現場の技術者や研究者に向けた新シリーズ「SPIE フィールドガイド」の1冊です。

光の原理や技術に関しては、これまでも専門家を対象とする優れた参考書、専門書が数多く出版されています。本シリーズでは、先人の英知に学び、その重要な原理や技術を採り上げて、ラボや現場でもすぐに参照できるわかりやすい実用書として作成しました。机上で使用するにも、持ち運ぶにも便利な参考書兼ハンドブックです。現場の技術者や研究者の実務および作業効率の向上を図るものでもあります。シリーズの各書籍とも、光学の基礎原理などの基本的事項から、技術および実用面、さらに参考文献に至るまで、項目別に参照しやすい配列でまとめています。また、共通の統一されたレイアウトと記号を使用し、読者への平易な解説に努めています。

本「SPIE フィールドガイドシリーズ」では、個々一編で主要な光技術一題を取り扱っています。モジュール形式によって、大方の場合、1ページに1つのトピックを置き、そのページの中でそのトピックをほぼカバーできるよう構成しました。そのため、検索も容易で、しかも、図や式を原理的に理解することが可能です。また、巻末には付録として、関連する文献、基本となる公式集、あるいは、本文で言及していない他の方法などについての情報も掲載されており、各分野を完全にカバーするように努めています。但し、最新のトピックは、十全に認知されていないものとして省きました。

「SPIE フィールドガイドシリーズ」はまた常に生きたドキュメントであるよう心がけています。モジュールページ形式の採用により、本文の改訂や増補が容易に行なえることから、新しいテーマや各巻への追加が望ましいと思われるトピックなどについては、ご意見、ご提案などメールにてお寄せ下さい。

(Email: fieldguides@SPIE.org)

John E. Greivenkamp, シリーズ編集者
Optical Science Center
The University of Arizona

The Field Guide Series
フィールドガイド刊行リスト

Field Guide to Geometrical Optics, John E. Greivenkamp (FG01)

Field Guide to Atmospheric Optics, Larry C. Andrews (FG02)

Field Guide to Adaptive Optics, Robert K. Tyson & Benjamin W. Frazier (FG03)

Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, Jim Schwiegerling (FG04)

Field Guide to Polarization, Edward Collett (FG05)

Field Guide to Optical Lithography, Chris A. Mack (FG06)

Field Guide to Optical Thin Films, Ronald R. Willey (FG07)

Field Guide to Spectroscopy, David W. Ball (FG08)

Field Guide to Infrared Systems, Arnold Daniels (FG09)

Field Guide to Interferometric Optical Testing, Eric P. Goodwin & James C. Wyant (FG10)

Field Guide to Illumination, Angelo V. Arecchi; Tahar Messadi; R. John Koschel (FG11)

Field Guide to Lasers, Rüdiger Paschotta (FG12)

Field Guide to Optical Lithography まえがき

この「フィールドガイドオブティカルリソグラフィー」*Field Guide to Optical Lithography*は、私の約20年間の資料をまとめたものである。オースティンのテキサス大学で、学部生のリソグラフィーコースの指導を担当した14年間の未整理ノート、私の初版である*Inside PROLITH*の資料、そして*Microlithography World*での私のコラム“The Lithography Expert”を基に編集した。しかし、ここでの挑戦は、本のための資料作りというよりも、何の資料を省くかを決め、できるだけ凝縮したものをどのように作るかであった。私を知る人々が証明するように、私は語彙に乏しく、簡潔な表現を苦手としている（おまけに、私は貧相な詩人なのだ）。もし、読者が興味のあるページを開き、その内容に満足が得られないとすれば、それは簡潔を旨としたField Guide formatの避けられない要素のひとつであり、それ以上に冗長になりがちな私自身の限界として、寛容な読者にお許し願うしかない。

このField Guideの原稿を校閲するに当たり、私の多くの間違いを正すのに多大な労力を負わせてしまったJeff Byers, William Howard, Rob Jonesに感謝する。

世の中にはリソグラフィーよりも、はるかに楽しい何かがあると教えてくれた私の妻Susanと娘のSarahとAnnaに、この「フィールドガイド」を捧げる。

Chris Mack
chris@lithoguru.com

訳者まえがき

本書は、クリス・マック (Chris A. Mack) 博士が著した “Field Guide to Optical Lithography” の翻訳書である。フィールドガイドの編集者によれば、本書の目的は光学原理・技術・現象について基本的かつ本質的な情報を理解しやすく提供することにある。多岐にわたる内容が手軽に読めるよう、リソグラフィーに関する重要項目をページの頭に配し、その解説は1ページで完結するよう構成された。このため、著者のまえがきにもあるように、いかに簡潔に書くか、どこまで削れるかに相当の時間と労力を費やしたものと推察される。

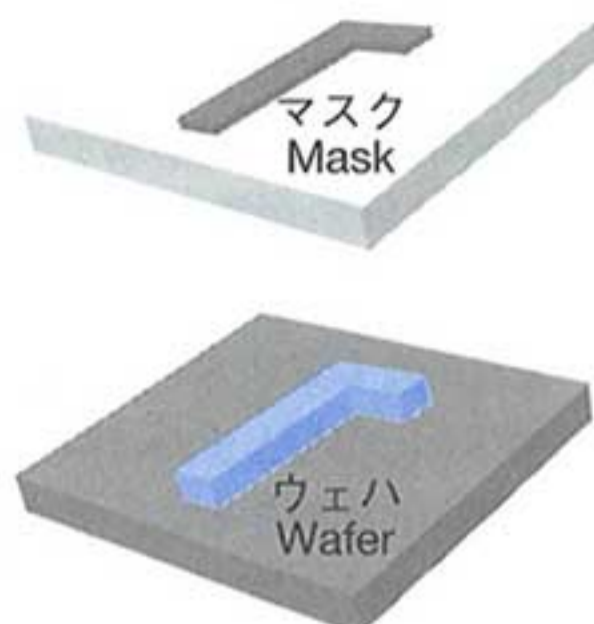
これまで、訳者の乏しい記憶のなかにも、リソグラフィー技術の基本から最新の技術に至るまでをこれほどに理論的に著した書はなく、しかも、光学基礎からイメージング技術、レジストの振る舞い、リソグラフィーの評価手法までを総じて記述した著書には出会えていなかった。元来、“リソグラフィー” という確立した専門分野はなく、リソグラフィーを語るには、装置からアプリケーションまでを含めると、光学物理、高分子化学、精密工学、機械工学、計測工学、化学工学、計算機科学…など多数分野の境界領域に触れなければならない。このため、例えば、露光装置の光学に関する書物やレジストに関する書物はあってもリソグラフィー全般を記述した良書は数少なかった。とくに、クリス・マックの得意分野である露光評価のシミュレーション技術について書かれたものはなかった。この書によってリソグラフィーが初めて学問的に体系づけられたといっても過言ではない。

翻訳にあたっては簡潔に表現することを旨とし、難解な内容をより分かりやすい日本語に置き換えることに腐心した。出来るかぎり原著に忠実に訳したつもりではあるが、すでに英語表現で一般的に通用している言葉については、読者にとって違和感を覚える訳語もあるかと思う。そのあたりはこの良書に免じてご容赦願いたい。本書がリソグラフィー技術者の座右に置かれ、リソグラフィー技術の理解の一助となれば幸いである。

木下 博雄

定義：半導体リソグラフィ Definition: Semiconductor Lithography

集積回路 integrated circuit (IC)の製造では、半導体（例、Si）基板に様々な物理的および化学的加工が施される。これらの加工プロセスは3つに分類される。すなわち、薄膜形成、微細加工、不純物導入である。ポリシリコン、アルミニウム、最近では、銅などの導体やSi酸化膜、Si窒化膜などの絶縁体薄膜はトランジスタ間、あるいは他の素子との結合・分離に用いられる。シリコンの様々な領域への選択的な不純物導入により、シリコンの導電性を素子のしきい値電圧に合わせて変えることができる。これらの、導体、半導体、絶縁体を組み合わせた構造により、数百万個のトランジスタが作られ、最近のマイクロエレクトロニクス複雑な回路の構成が可能となる。これらの加工プロセスの最も重要な要素が**リソグラフィ lithography**であり、つまりSi基板に3次元的な構造を形成することである。



リソグラフィの語源はギリシャ語に由来し、*lithos*は石を、*graphia*は書くことを意味する。すなわち、石の上に文章を書くことである。半導体リソグラフィの場合では、石はSiウェハであり、文章にあたるパターンは**フォトレジスト photoresist**と呼ぶ感光性樹脂である。

トランジスタを構成する複雑な構造、ならびに数百万のトランジスタ回路を接続する回路網を構築するためには、リソグラフィ工程を数十回以上繰り返して行わねばならない。ウェハ上に形成されたパターンは前工程で形成されたパターンに対して高精度に位置合わせされ、最終デバイスが構築されるまで、導体、半導体、絶縁体のパターン形成が繰り返し行われる。

リソグラフィ工程の概要 Overview of the Lithography Process

光リソグラフィ **Optical Lithography** は、フォトレジスト **photoresist** と呼ばれる感光性樹脂が露光、現像された結果、基板上に3次元レリーフ像を形成する写真製版技術である。理想的なフォトレジスト像は、概して基板上では設計通りあるいは意図した形状となり、レジストの厚さの垂直な壁を形成したものとなる。

最終的なレジストパターンはバイナリーであり、基板の一部がレジストに覆われた部分と完全に除去された部分からなる。このバイナリーパターンは露光に必要となる。すなわち、エッチング、不純物導入、あるいは他の露光メカニズムの際に、レジストに覆われた基板部分（パターン）が保護される。

一般的な光リソグラフィの手順を図に示す。すなわち、基板準備、フォトレジストのスピンコート、プリベーク、露光、露光後ベーク、現像、ポストベークである。レジスト剥離は、リソグラフィ工程の最終段階で行われ、下層にエッチングやイオン注入によりレジストパターンが転写された後に行われる。この手順は一般にリソグラフィークラスター **Lithographic cluster** と呼ばれ、幾つかの関連する装置が集められたプロセスラインで行われる。



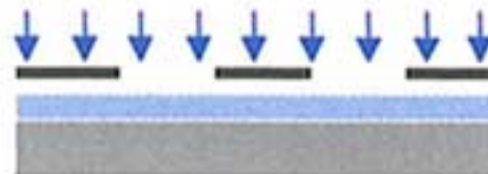
ウェハ準備
Prepare Wafer



フォトレジストの形成
Coat with
Photoresist



プリベーク
Prebake



位置合わせと露光
Align and Expose



現像
Develop



エッチング、イオン注入
Etch, Implant



レジスト剥離
Strip Resist

工程：基板の準備 Processing: Substrate Preparation

基板の準備は、フォトリソ材料の基板への接着性の向上のために行われる。これは以下に述べる工程で行われる。すなわち、コンタミネーション除去のための**基板洗浄 substrate cleaning**、水を除去するための**ベーキング**、水が戻ってくるのを防ぐ**接着性促進剤 adhesion promoter**の添加である。

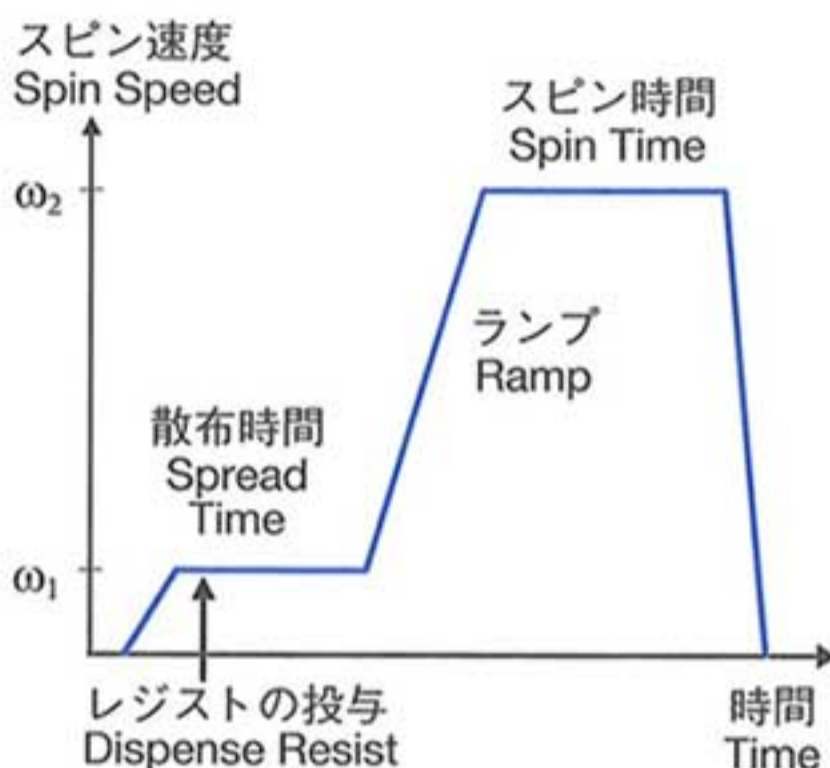
基板のコンタミネーションは粒状または膜状のもの、あるいは有機物、無機物のいずれかとなる。粒状のものは最終的にはレジストパタンの欠陥となり、膜状のものは接着性を低下させ、それが線幅制御性を低下させる。コンタミの1つである吸着した水は**脱水加熱 dehydration bake**と呼ぶ高温加熱プロセスでほとんどが除去される。

脱水加熱はその名の通り、 $200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ の温度での加熱を、通常30-60分間行い、基板表面から水を除去する。基板は乾燥空気下で冷却され、出来るだけ早くレジストをコートする。しかしながら、標準的な脱水加熱では完全に水をSi基板 (Si, Poly-Si, SiO_2 , Si_3N_4 などを含む) 表面から除去できない。表面のSi原子が水の分子と強く結合し、シラノール基 (SiOH) を形成するためである。このシラノールの除去には化学的方法が有効である。

接着性促進剤は、表面のシラノールを化学的に反応させるために用いられ、-OH基をヒドロキシル基 (hydroxyl group) とは異なる官能基 (organic functional group) に置き換え、フォトリソの接着性を高める。シランはこの目的によく用いられ、最も一般的に使われるものは**ヘキサメチルジシラザン hexamethyldisilazane (HMDS)**である。基板処理はおよそ60秒間の昇温と減圧されたHMDS蒸気にさらすことで行われる (これを**ベーパープライム Vapor Prime**と呼ぶ)。同じ炉で脱水加熱とVapor Primeを行うことで、最良の性能が得られる。これらのVapor prime炉はフォトリソのコートおよびベーク装置に標準的に装備されている。

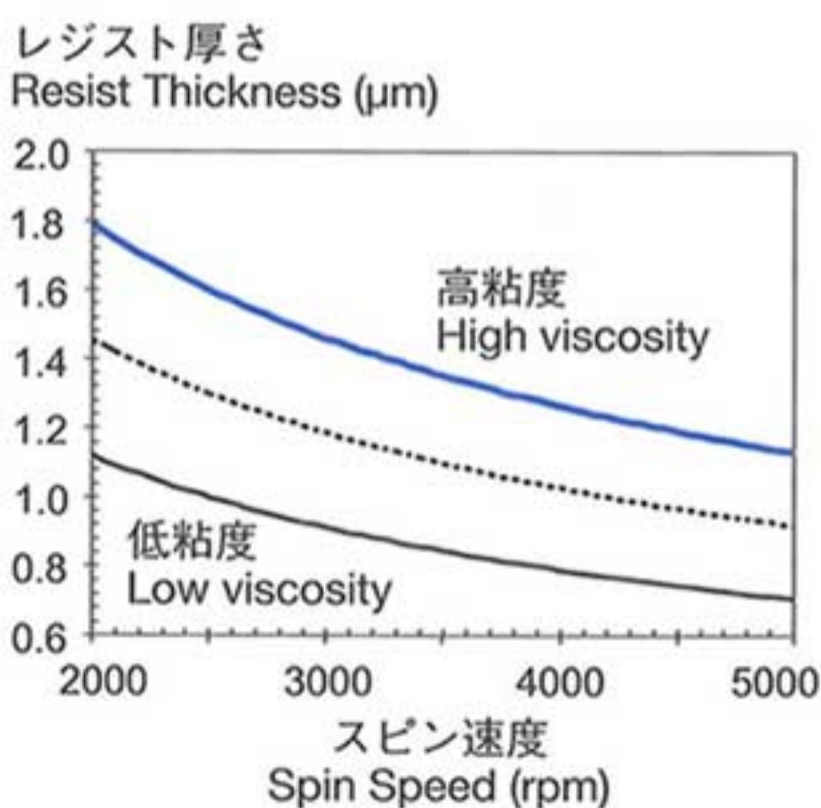
工程：フォトレジストスピンコート Processing: Photoresist Spin Coating

仕様に合った薄く一様な厚さのフォトレジストの形成は、**スピンコート spin coating**工程で行われる。固体を溶液に溶かして液状となったフォトレジストをウェハ上に注ぎ、高速回転可能なテーブルでスピンさせると薄膜が形成される。所望の厚さと一様性を得るための方法が幾つかある。すなわち、静的な投与方法（ウェハが静止中にレジストが注がれる）、あるいは動的な投与方法（ウェハが回転している時にレジストが注がれる）、スピン速度と時間、スピン速度などを個々に変化させる方法である。



また、投与されるレジストの量とレジストの特性（例えば、粘性、固体分量比、溶液の配合）も重要な役割をになう。実際のスピンオペレーションの状況、例えば、排気、温度と湿度制御、スピナーの清浄度もレジストの厚さに重要な影響を及ぼす。

フォトレジストの**スピン速度曲線 spin speed curve**は、所望のレジスト厚を得るためのスピン速度の設定において不可欠なものである。最終的なレジスト厚はスピン速度の平方根に反比例して変化し、おおよそフォトレジストの粘性に比例する。



工程：塗布後ベーク Processing: Post-Apply Bake

レジスト形成後、レジスト膜には重量で20~40%ほどの溶媒が残存している。塗布後ベーク **post-apply bake** (ソフトベーク **softbake**あるいはプリベーク **prebake**とも呼ぶ) は、この過剰な溶媒を除去するために、スピンコート後にフォトレジストを乾燥させる工程である。フォトレジストから溶媒を除去することによる4つの重要な効果は、(1)膜厚が減少する、(2)露光後ベークと現像特性が変化する、(3)膜の接着性が改良される、(4)膜のべと付きがなくなり、微粒子のコンタミの影響を受けにくくなることである。通常のプリベークプロセスでは、レジスト膜中の残留溶媒を3~8%とすることにより、後続のリソグラフィ工程での膜の安定性を維持することができる。

DNQ/Novolak レジストでは、約70℃以上の温度で、感光剤 (DNQ) が分解し始める。通常の化学増幅レジストでは、残留溶媒が露光後ベーク中に拡散と反応のプロセスに重要な役割を果たすため、塗布後ベークでは注意深い制御が必要となる。幸いにも、これらの化学増幅レジストでは、プリベーク中には感光剤の分解が見られない。

最も一般的なベーク方法は**近接ベーキング proximity baking**と呼ばれるホットプレートが用いられる。ウェハは高温の高融点金属板に、近接 (およそ100 μ m間隔) して置かれる。シリコンの高い熱伝導性のため、フォトレジストはホットプレート温度にまで急速に高められる (およそ20秒)。

ウェハがホットプレートから除去された後も、ウェハが高温である間、ベーキングが続けられる。ウェハの冷却が十分でない場合、完全なベーキング工程は制御できない。このため、ホットプレートベーキングでは、ウェハは加熱後即座に急速冷却板に移され冷却される (室温より若干低い温度に保たれる)。