

論文の内容の要旨

論文題目 半導体露光装置光学系の偏光を考慮した結像解析

氏名 畔野靖行

半導体露光装置は、CPU、メモリ等の半導体素子を製造する際に、レチクルと呼ばれる原板上の回路パターンを半導体ウェハ上に転写する役割を有する。素子の高集積化に対応して回路パターンも年々微細化しており、最近では最小パターンサイズは 100nm 程度にまで至っている。光学系の解像度は、 λ を露光波長、NA を投影レンズの開口数として λ/NA に比例するため、半導体業界ではこれまで、 λ を小さく、そして NA を大きくする取り組みが行われてきた。そして現在では、 $\lambda = 248\text{nm}$ (KrF エキシマレーザ)、 193nm (ArF エキシマレーザ) の光源とともに NA0.75~0.8 の光学系が用いられている。高 NA で、しかも数十 mm 角の素子領域をほぼ無収差で結像する必要から、光学系は図 1 に示すように多数の元素から構成される。

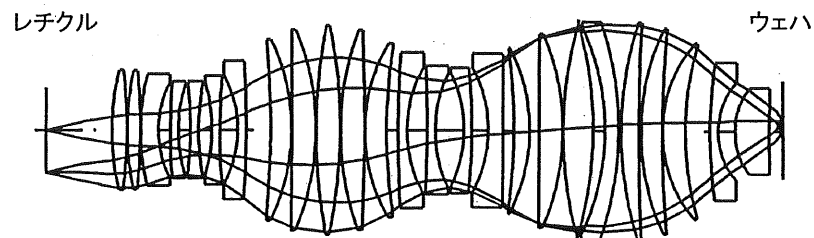


図1 投影光学系の構成例 (*Principles of lithography*, SPIE press)

図1のような複雑な光学系で所望の解像度を実現するには、設計時の残収差、製造誤差等の影響を評価するために、シミュレーションによる結像特性解析が必須となる。そして従来は、電磁波である光を単一の振幅成分で近似したスカラー回折理論に基づいた計算が行われてきた。しかしながら近年、上に述べたような装置の高 NA 化、対象とする回路パターンの微細化によって、スカラー回折理論では対応できない偏光の影響が表面化しつつある。特に、高 NA 光学系において光束が大きな相対角度を有して干渉する際の偏光による干渉性の低下、光学系のレンズ材料に内在する微少な複屈折による偏光状態変化の影響が無視し得ない状況となっている。そこで本論文では、偏光を考慮して半導体露光装置光学系の結像特性を評価することが可能な式を導き、高 NA 及び複屈折が結像に及ぼす影響を系統的に解析することを目的とする。

結像式の導出

まず、高 NA と光学系内部の偏光状態変化の影響を同時に考慮することが可能な部分的コヒーレント結像式を導いた。複屈折による偏光状態変化を Jones 行列で表し、像空間における偏光状態の分布を Jones ベクトルとして求めた。そして偏光状態分布を x, y, z の直交 3 成分に分解して各成分で独立に干渉を考えることにより、合計 6 個の像成分 $I_{\alpha\beta}(x, y)$ の和として全体の像強度分布を表した。成分 $I_{\alpha\beta}(x, y)$ は、 β 方向 ($\beta = x, y$) の直線偏光照明に対して像空間では α 方向 ($\alpha = x, y, z$) の偏光成分として形成される像強度分布に対応する。つまり、 x 方向の直線偏光照明によって x, y, z の 3 成分からなる像強度分布が形成され、それとはインコヒーレントに、 y 方向の直線偏光照明によって x, y, z の 3 成分からなる像強度分布が形成される。

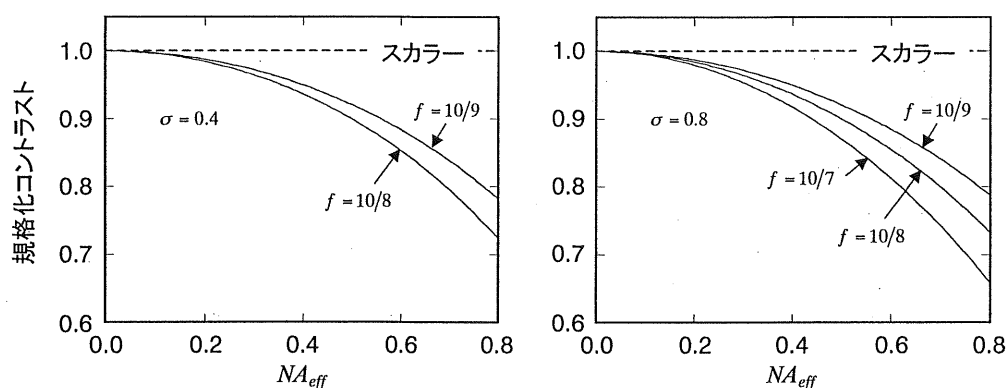


図2 規格化コントラストの NA_{eff} 依存性

高 NA の影響

上で導出した結像式をもとに、一次元 L/S パターンに対する高 NA 光学系の結像特性を調べた。光学系内の偏光状態変化をゼロとして像形成時の干渉角度の影響のみを考慮するとともに、パターンからの回折光のうち 0 次、 ± 1 次光のみが結像に寄与する場合を考えて、像の強度分布を計 12 個の係数によって表す式を導いた。そして各係数を NA_{eff} (レジスト内での干渉角度を表す実効 NA)、 σ (照明光コヒーレンス)、 f (パターン空間周波数) の関数として計算することにより、像コントラストについて系統的な評価を行った。図2は、 $NA_{eff} = 0$ の像コントラストに対する相対値として規

規格化コントラストを計算した結果を表す。スカラー近似からは NA_{eff} による像特性の差は現れず、解像度が λ/NA に比例するという従来の結論に至る。一方偏光を考慮すると、その影響は σ には依存せずに、規格化コントラストの低下は NA_{eff} の自乗、及び f の自乗に比例するという関係式が得られる。即ち、スカラー回折理論から求まる規格化コントラストを $C(f, \sigma, \lambda/NA)$ とすれば、偏光を考慮した規格化コントラストは $C(f, \sigma, \lambda/NA)(1 - 0.25f^2 NA_{eff}^2)$ によって表されることが分かった。

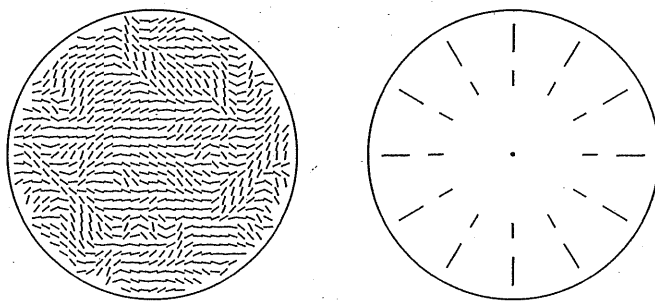


図3 計算に用いた複屈折分布モデル

複屈折の影響

$\lambda = 248, 193\text{nm}$ 領域のレンズ材料としては、ほぼ例外なく CaF_2 結晶と合成石英が用いられる。図3左は CaF_2 で観測されるランダム性の大きな複屈折分布をモデル化したものであり、図3右は石英で観測される光軸対称な複屈折分布をモデル化したものである。

まずランダムモデルにおいて、乱数により各エレメント内の進相軸分布を決定し、多数のレンズデータに関する評価結果から得られる統計的な量として光学性能の変化を調べた。複屈折量はエレメント内で一定、そして光学系は統計的に独立な複屈折分布を有する K 枚のエレメントから構成されるとして、5本バーL/Sパターンに対して複屈折ゼロの状態からの相対的な性能低下を像の規格化コントラストで表し数値計算を行った。その結果、規格化コントラストの平均に関する低下量は、図4に示すように各エレメント内で与えた複屈折量 B の自乗に比例し、光学系を構成するエレメント数 K に比例することが分かった。

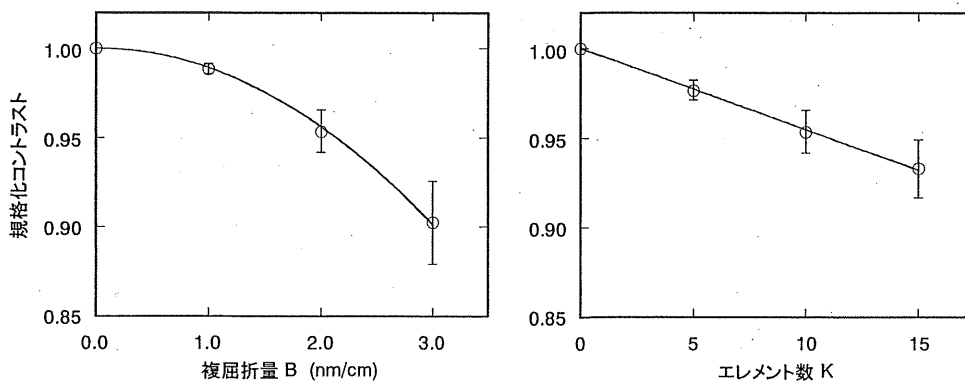


図4 ランダム複屈折分布が結像特性に及ぼす影響

次に、光軸対称モデルで半径の自乗に比例して複屈折量が増加すると仮定して、瞳関数から波面の特徴を解析するとともに、点像強度分布関数から複屈折の影響を受けた像の特性を解析した。直線偏光照明による波面は、Seidel 収差領域で複屈折の大きさに比例する非点収差を有し、周辺部には位相の特異点が発生することが分かった。点像強度分布関数は、Lommel 関数及び0次の Bessel 関数を用いて、複屈折量、デフォーカス量を変数として解析的に表せることが分かった。そして光軸対称複屈折モデルの一般的な特性として、Strehl 強度の低下は各エレメント内の複屈折量 B の自乗に比例し、光学系を構成するエレメント数 K の自乗にも比例することが分かった。

最後に2つのモデルから得られる複屈折量の許容値を示す。光学系が 4cm 厚のエレメント K 枚から構成されるとして、規格化コントラスト、あるいは Strehl 強度の低下を $n\%$ まで許すとすれば、エレメント数 K に対して許容される複屈折量 B の最大値は図5に示す関係として与えられる。典型的な例として $K = 10, n = 2\%$ の場合、ランダムモデルに対する複屈折量許容値は 1.3 nm/cm 、そして光軸対称モデルに対する許容値は 0.38 nm/cm となり、光軸対称モデルで複屈折の影響がより顕著に現れることが分かった。

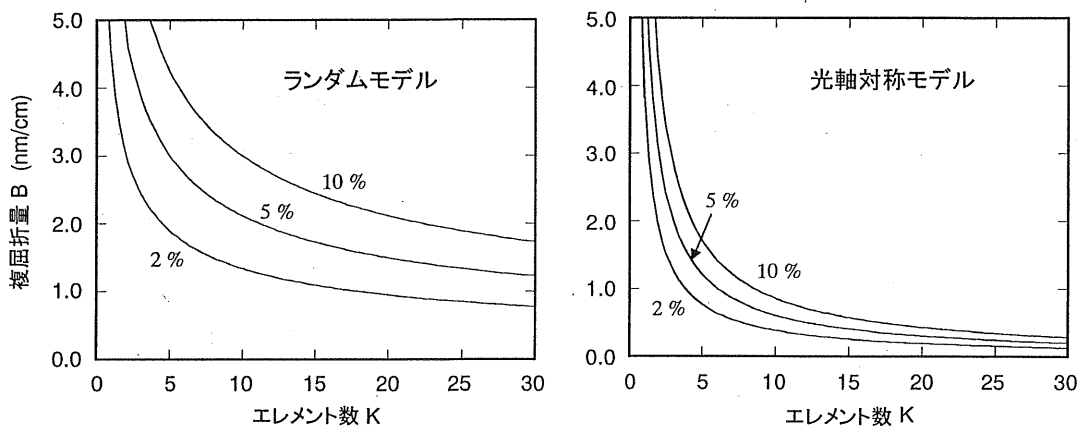


図5 エレメント数と複屈折量許容値の関係

まとめ

偏光を考慮して評価した結像性能は、従来のスカラー回折理論で得られる評価結果よりも常に低くなる。スカラー回折理論から予想される性能を1として、そこからの像劣化の度合いを表す式をまとめると、

$$\text{高 NA 干渉による像の劣化} : 1 - 0.25 f^2 NA_{\text{eff}}^2$$

$$\text{ランダム複屈折による像の劣化} : 1 - c_1 B^2 K$$

$$\text{光軸対称複屈折による像の劣化} : 1 - c_2 B^2 K^2$$

となる。 c_1, c_2 は光学系の構成に依存する定数である。