

論文の内容の要旨

論文題目 行列表記による部分コヒーレント結像理論と半導体露光装置における超解像方法への応用

氏名 山添 賢治

本論文は、部分コヒーレント結像式の行列表記理論に関しており、それを用いた部分コヒーレント結像計算の高速化、及び、部分コヒーレント結像理論の構築、さらに、部分コヒーレント結像における干渉効果を利用して半導体露光装置における超解像手法の提案すること、を主たる研究目的としている。

行列表記を用いた部分コヒーレント結像計算の高速化

部分コヒーレント結像式の表記には、相互透過係数 (Transmission Cross Coefficient; TCC) を用いた TCC 法に代表されるように関数表記が広く用いられている。本論文では、瞳シフト行列を用いた部分コヒーレント結像式 of 行列表記を新たに提案する。瞳シフト行列は、本論文の根幹をなすアイデアで、部分コヒーレント結像式を明示的に離散化することで導入される。以下、図 1 を用いて導入過程を説明する。

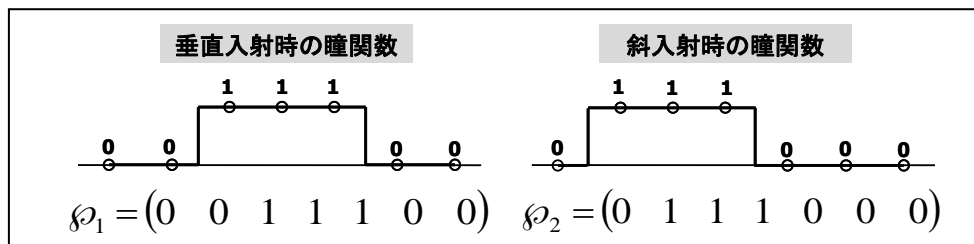


図 1: 瞳シフト行列の各行

部分コヒーレント光源を互いにインコヒーレントな N 点の点光源に分割し、それぞれの点光源の入射角度に応じて離散化した瞳関数をシフトする。 N 種類のシフトされた瞳関数を積層することで瞳シフト行列を得る。瞳シフト行列による光学像計算を本論文では **P-Decomposition** と呼ぶ。**P-Decomposition** は、関数を離散化する必要があるコンピューター計算と相性が良く高速計算向きである。従来は、計算速度の観点から、1 回の光学像計算には光源積分法、光学条件は変えず物体を変えて繰り返す光学像計算には **TCC** 行列の固有関数を用いる **TCC** 分解法と計算手法を切り替える必要があった。瞳シフト行列による光学像計算は、**TCC** 分解法と同じ精度で、どちらにも目的に対して従来よりも高速な光学像計算を実現する。例えば、近似を使わない場合に対して 10^{-4} のオーダーの精度で計算を行うと、光源積分法よりも約 10 倍高速で光学像計算可能である。計算時間の例を図 2 に示す。

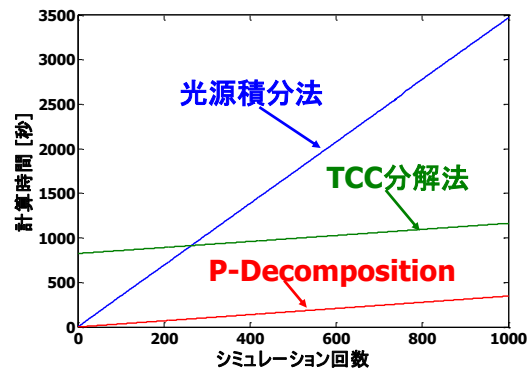


図 2: 光学条件を変更せず物体を変えて光学像計算を繰り返した時の計算時間の比較

瞳シフト行列は物理的にも重要である。なぜなら、瞳シフト行列の転置共役行列と瞳シフト行列の積が **TCC** 行列になるからである。この関係により、従来証明されていなかった **TCC** に関する複数の性質が明らかになる。まず、**TCC** 行列が **positive semi-definite** であることがわかる。加えて、**TCC** の固有値が非負で瞳シフト行列の固有値の 2 乗に一致し、**TCC** の固有関数は瞳シフト行列の固有関数と一致する。さらに、**TCC**、もしくは、瞳シフト行列の固有値と固有関数の数は、スカラー理論では光源内に分布する互いにインコヒーレントな点光源数 N に、偏光照明時は $3N$ に一致する。従来から **TCC** が部分コヒーレント結像という物理現象において支配的な役割を担うと考えられてきたが、その **TCC** を構成する瞳シフト行列が部分コヒーレント結像において **TCC** よりも原理的な役割を果たすことが明確になる。

行列表記による部分コヒーレント結像理論の構築

瞳シフト行列は、部分コヒーレント光源と瞳関数だけから導出される。部分コヒーレント結像では物体を考慮しないと光学像が計算できない。そこで、瞳シフト行列を用いた行列理論を発展させ、部分コヒーレント光源、物体、そして、瞳関数の効果を考慮した行列を導出し、部分コヒーレント光学系の特徴を全て含んだ包括的行列を導出する。照明光の入射角度に応じて回折光をシフトさせる場合と瞳関数をシフトさせる場合で 2 種類の包括的行列を得ることができる。それら 2 種類の行列を固有関数の点から比較することで、回折光をシフトさせることと瞳関数をシフトさせることは物理的に異なる意味をもつことを明らかにする。この結果は、両行列から得られる光学像は一致するが、部分コヒーレント結像による光学像は物理的に異なる 2 種類の正規化直交関数系で記述できることを示している。照明光の入射角度に応じて回折光をシフトさせることで得られる包括的行列は、部分コヒーレント結像系のコヒーレンス度の定量化に利用することができ、包括的行列のエントロピーがコヒーレンス度に対応していることを **van Cittert-Zernike** の定理から得られる複素コヒーレンス度との比較で明らかにする。エントロピーと複素コヒーレンス度の対応関係は図 3 に載せた。さらに、部分コヒーレント結像系におけるコヒーレンシー行列という新たな概念を提案し、コヒーレンシー行列と単位行列の差分行列の **Hilbert-Schmidt** 距離が部分コヒーレント光学系のコヒーレンス度に比例することを明らかにする。結果は図 4 のようになる。

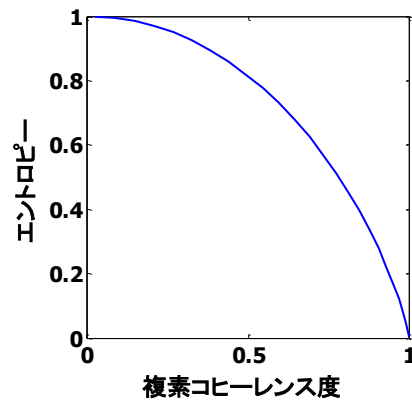


図 3: エン트로ピーと複素コヒーレンス度の対応関係

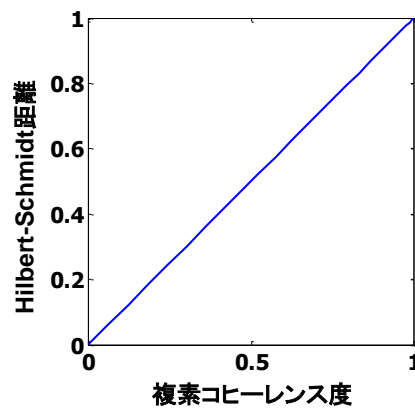


図 4: コヒーレンシー行列の Hilbert-Schmidt 距離と複素コヒーレンス度の関係

半導体露光装置における超解像手法の提案

部分コヒーレント結像による光学像は瞳シフト行列の固有関数で展開できる。同様に、部分コヒーレント結像において物体間の干渉を表す項も瞳シフト行列の固有関数で展開できる。瞳シフト行列の固有関数で展開された干渉項を解析すると、固有関数と物体を畳み込み積分した関数が部分コヒーレント結像における干渉を表すことが明らかになり、部分コヒーレント結像における任意のふたつのパターンがどのように干渉するのかを定式化することができる。この定式化により、部分コヒーレント結像の物体面において、ある点と干渉する場所、もしくは、干渉を打ち消す場所を求めることができる。以上のアイデアを原理として、部分コヒーレント結像系を採用している半導体露光装置による超解像方式を提案した。与えられた有効光源から露光すべき目標パターンと干渉する位置を求め、その位置に解像しない大きさの補助パターンを配置することで、回路パターンを露光するためのマスクデザインを最適化する超解像方法（2D-TCC 法）を提案する。100nm のコンタクトホールが疎密に配置された擬似 NOR FLASH メモリー用マスクパターンを 2D-TCC 法により最適化したところ、光源波長が 248nm、開口数が 0.86 の露光装置を用いてベストフォーカス時に全幅 260nm 以上の焦点深度で露光できた。さらに、通常マスクを用いたときよりも少ない露光量でパターンを解像することもできた。通常マスクと最適化されたマスクによる露光結果を図 5 に示す。実験結果はシミュレーション結果と良く一致した。

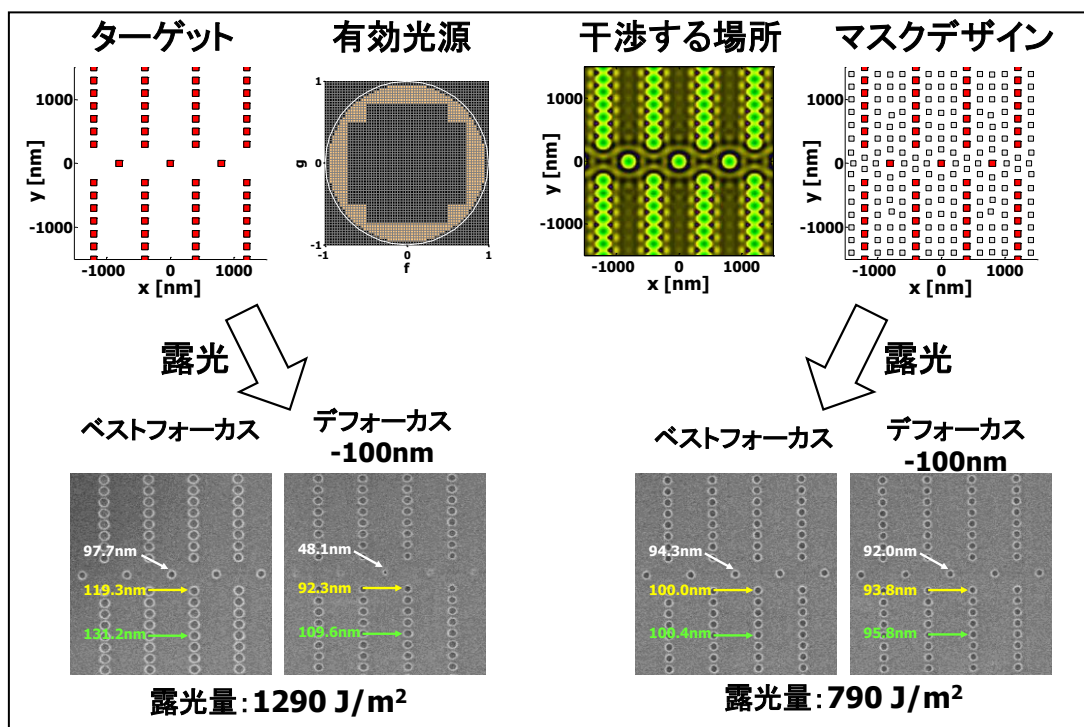


図 5: 通常マスクと 2D-TCC 法により最適化されたマスクによる露光結果の比較

まとめ

本論文で新たに提案した瞳シフト行列を用いて、どのような目的に対しても統一的に使用可能な高速部分コヒーレント結像計算方法 P-Decomposition を構築した。瞳シフト行列の概念を拡張することで部分コヒーレント結像系における光源、物体、そして、瞳関数の効果を全て含む包括行列を提案し、部分コヒーレント結像系のコヒーレンス度を定量化した。なお、コヒーレンス度の定量化には、従来から用いられているエントロピーのみならず、本論文で新たに提案した部分コヒーレント結像におけるコヒーレンシー行列を用いた。瞳シフト行列を用いれば、部分コヒーレント結像系の物体面において干渉する位置を導出することができ、その原理を半導体露光装置における微細パターン形成に応用し新規超解像方法 2D-TCC 法を提案した。2D-TCC 法の効果は実験で確認し、シミュレーション結果と良く一致した。瞳シフト行列をベースに考案された方式のシミュレーション結果と実験結果が良く一致したことにより、瞳シフト行列による部分コヒーレント結像理論の正当性を確認できた。