

Influential領域を導入した適応型光近接効果補正技術の提案

松 縄 哲 明[†] 野 里 博 和^{††} 坂 無 英 徳^{††}
 村 川 正 宏^{††} 高 橋 栄 一^{††} 寺 澤 恒 男^{†††}
 田 中 稔 彦^{†††} 須 賀 治^{†††} 樋 口 哲 也^{†,††}

我々はすでに、光リソグラフィにおけるマスク製造コストの削減を目指し、適応型光近接効果補正（適応型 OPC）技術を提案している。本論文では、適応型 OPC 技術の計算時間をより削減するために、新たに Influential 領域を提案する。Influential 領域とは、マスクパターンを構成するセル内部のパターン情報によって定義される領域で、セル内部のパターンに対応する光近接効果の領域を定めるものである。この技術により、従来の適応型 OPC では一律に定めていた光近接効果領域を厳密に指定することで、計算が必要な領域を低減させることができる。この結果、従来の適応型 OPC 手法と比べて OPC 計算時間を削減することが可能となる。既存の LSI パターンに提案手法を適用した検証実験の結果、計算時間の大幅な削減が可能となる見通しを得た。

Adaptive Optical Proximity Correction Utilizing Influential Area

TETSUAKI MATSUNAWA,[†] HIROKAZU NOSATO,^{††}
 HIDENORI SAKANASHI,^{††} MASAHIRO MURAKAWA,^{††}
 EIICHI TAKAHASHI,^{††} TSUNEO TERASAWA,^{†††} TOSHIHIKO TANAKA,^{†††}
 OSAMU SUGA^{†††} and TETSUYA HIGUCHI^{†,††}

This paper proposes a new approach to optical proximity correction (OPC) utilizing an influential area to achieve optimal OPC feature generation for the full-chip area at fast operational speeds. We have demonstrated the adaptive OPC technique using an optimization method after layout design. The influential area is an area defined by pattern information for a cell constituting a mask pattern. This determines the area of the optical proximity effect (OPE), which corresponds to the cell pattern. The proposed method can reduce the calculation area by strictly defining the OPE area for conventional adaptive OPC methods. Accordingly, the proposed method can reduce OPC calculation times compared to conventional adaptive OPC techniques. The effectiveness of this approach in terms of both reduced times for accurate simulations and repeated modification of OPCed features is demonstrated through computational experiments.

1. はじめに

半導体産業では、デバイスの高集積化にともない、シリコンウェハ上にマスクパターンを転写する光リソグラフィの解像度を向上させるための技術が必要となっている。なかでも、マスクの補正パターンを生成する光近接効果補正（OPC：Optical Proximity

Correction）技術が重要視されている。この理由は、半導体デバイスの微細化が進むにつれて光近接効果（OPE：Optical Proximity Effect）が顕著になるからである。OPE は、マスクパターンによる回折光のうち、低次成分しかウェハ上に到達できないことにより、ウェハに転写される投影像の忠実性が維持できなくなる現象である。そのため、投影像の最小寸法（180 nm）が露光波長（248 nm）以下となった 180 nm 世代以降の光リソグラフィにおいて、OPC は必要不可欠となっている。

これまでの OPC 手法は、チップ全面 OPC と呼ばれ、セルと呼ばれる最小単位の回路をレイアウトすることでマスクパターンを構成した後、マスク全面に対して OPC 図形生成の計算を行っていた。しかしなが

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba

^{††} 産業技術総合研究所半導体 MIRAI プロジェクト
MIRAI-ASRC, National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST)

^{†††} 株式会社半導体先端テクノロジーズ
Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.

ら、現在、デバイスの微細化にともない OPC 計算が複雑化していることから、チップ全面 OPC に要する計算負荷（マスクデータ量・時間）が増大している。これがマスクコストを引き上げる要因の 1 つであり、半導体産業では深刻な問題となっている。

この問題を解決するために、我々は以前、新たな OPC 手法として適応型光近接効果補正（適応型 OPC）技術を提案した^{1),2)}。この技術は、チップ全面 OPC 計算を行わずに OPE の補正を実現することを目標として、Adjustable OPCed cell を導入したことに最大の特徴がある。Adjustable OPCed cell は、あらかじめ OPC が施されている Adjustable 領域と Fixed 領域の 2 つからなる。Adjustable 領域はセルの周辺部に位置し、レイアウト後に OPC 量を調整することができる領域である。一方、Fixed 領域はセルの中心部に位置し、OPC 量を変えない領域である。Fixed 領域の OPC 量が固定であるのは、セルの中心部は隣接セルからの OPE を受けにくいからである。Adjustable OPCed cell を用いることにより、セルレイアウト後に、OPC 計算をセル周辺部（Adjustable 領域）に限って行うので、チップ全面 OPC と比べて計算量の大幅な削減が可能となった。

しかし、上述した適応型 OPC 手法では、Adjustable 領域内のすべての OPC 図形を最適化していたため、不要な計算が多かった。たとえば、LSI チップによっては、セル間に隙間があるレイアウトも多く存在するため、Adjustable 領域内でも隣接セルからの OPE を無視できる箇所が存在する。つまり、隣接セルによる OPE の影響範囲を厳密に考慮することで、Adjustable 領域のすべてを計算する必要がなくなる。そこで、本論文では、セル外部に対する OPE の影響範囲を規定した Influential 領域の概念を新たに提案し、Adjustable 領域中の計算領域を削減することで、計算時間のさらなる短縮が可能であることを示す。

具体的には、セル内部のパターンによる OPE がセル外部へ影響を与える範囲として Influential 領域を定義し、OPC 図形の最適化計算を Influential 領域と Adjustable 領域が重なった領域内に限定する。これにより、Adjustable 領域において、OPC 図形の最適化が必要な領域を削減できることから、OPC 計算時間の大幅な短縮が期待できる。さらに、計算領域の限定により局所的な領域の最適化が可能となったため、本論文では OPC 図形の最適化に局所探索手法を導入した。これにより、最適化の収束速度の大幅な向上が期待できる。

検証実験の結果、OPC 計算領域を削減しても高精

度な補正が可能であることを示した。また、Influential 領域と局所探索手法の組合せにより調整時間を高速化できる見通しを得た。さらに、既存の LSI チップに提案手法を適用した場合、計算時間をチップ全面 OPC 手法の約 1/10 に、以前の適応型 OPC 手法²⁾の約 1/3.1 に短縮できる見通しを得た。

以下、2 章では従来の OPC 手法の問題点について説明し、3 章でそれらの問題点を解決するための提案手法について述べる。4 章では、OPC 図形の調整実験から、提案する Influential 領域の効果を示し、既存の LSI チップのデータを用いて本手法の有効性を検証する。最後に、5 章で今後の課題について議論し、結論を述べる。

2. 光近接効果補正とその問題

半導体製造に用いられる光リソグラフィでは、露光光源からの光をマスクパターンに照射することで、マスクパターンをシリコンウェハ上に転写する。具体的には、マスクパターンによって回折された光を、レンズを介してウェハ上に集光させることで露光パターンを形成する。しかしながら、半導体デバイスの微細化にともない、露光パターンの最小ピッチの半分（hp: half pitch）が露光波長以下になると、回折角が大きくなることにより、マスクパターンによって回折された光のうち、低次の成分しかレンズを通過することができなくなる。その結果、ウェハ上に到達できる回折光の次数が低下し、露光パターンの忠実性が低下する。以上の現象を光近接効果（OPE）と呼ぶ。OPE は、350 nm 世代（hp 350 nm、露光波長 248 nm）の光リソグラフィでは大きな問題ではなかったが、現在の主流である 90 nm 世代（hp 90 nm、露光波長 193 nm）以降の光リソグラフィでは深刻な問題として認識されている。

光近接効果補正（OPC）は、OPE を予測し、これに対応してマスクパターンの寸法や形状を補正することで、マスクパターンのウェハへの転写精度を高める技術である。この補正手法は、主にルールベース OPC³⁾とモデルベース OPC⁴⁾に分類できる。

ルールベース OPC は、隣接するパターンの寸法や距離に応じて補正図形の寸法や形状を定めるルールテーブルを作製し、これに従ってマスクパターンを補正する。この方法には、計算速度が速いという利点があるが、半導体デバイスの微細化が進むと補正精度が急激に悪化するという問題点がある。

モデルベース OPC は、OPE によって変動する露光パターンの寸法や形状を光学シミュレーションによ

り予測し、これを打ち消すための補正図形を作製する。この方法は、ルールベース OPC よりも緻密な補正が可能だが、マスクを構成するすべてのパターンに対して補正計算を行う（チップ全面 OPC）ために、膨大な計算負荷（時間、マスクデータ量）がかかるという問題点がある。以上のような計算負荷は、半導体デバイスの微細化とともに増加しており、マスクコストを引き上げる深刻な要因の 1 つとなっている。

チップ全面のモデルベース OPC の問題点を解決するための手段として、cell-wise OPC が提案されている^{5),6)}。cell-wise OPC の特徴は、レイアウト設計の前段階でセルごとに OPC を適用することでチップ全面 OPC を不要とし、OPC の計算時間とマスクデータ量を削減することである。しかし、OPE は隣接セルの影響を受けることや、セルの隣接環境はレイアウトの後まで決定できないことから、cell-wise OPC では高精度な補正が困難と考えられる。

3. 提案手法

本章では、上述した問題点、すなわち OPC 計算時間の増大とセルレイアウト後の精度低下を解決するためのアプローチとして、適応型 OPC 技術^{1),2)}をもとに提案する OPC 手法について述べる。まず適応型 OPC 技術の概要を説明した後、本論文で提案する Influential 領域の概要と、これを導入した Adjustable OPCed cell の構成を述べる。次に、提案手法を用いた適応型 OPC 手法について説明し、最後に OPC 図形の最適化調整方法について述べる。

3.1 適応型光近接効果補正技術

適応型 OPC 技術は、OPC の計算領域を削減することで処理時間を大幅に短縮するために、次の 2 つの特徴を持つ。1 つは、レイアウト設計に、Adjustable 領域と Fixed 領域を持つ Adjustable OPCed cell を導入したことである。この 2 つの領域にはあらかじめ OPC が適用されている。2 つ目は、セルレイアウト後に、隣接セルによる OPE に合わせて Adjustable 領域の OPC 図形を最適化調整することである。

Adjustable 領域は、セルの周辺部に位置し、調整可能な OPC 図形を含む領域である。これにより、隣接セルから受ける OPE を補正することができる。

一方、Fixed 領域は隣接セルによる OPE の影響が少ないセルの中心部に位置し、OPC 図形が固定された領域である。そのため、レイアウト後に OPC 図形を調整する必要がない。図 1 に、従来のチップ全面 OPC 手法と比較した、レイアウト後のセルの OPC 計算領域を示す。灰色部が OPC の計算領域、白色部

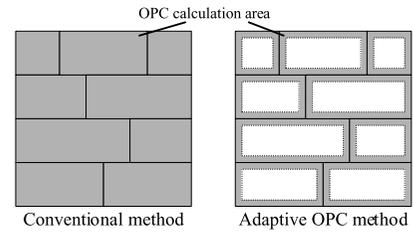


図 1 適応型 OPC 技術の特徴
Fig. 1 Adaptive OPC method.

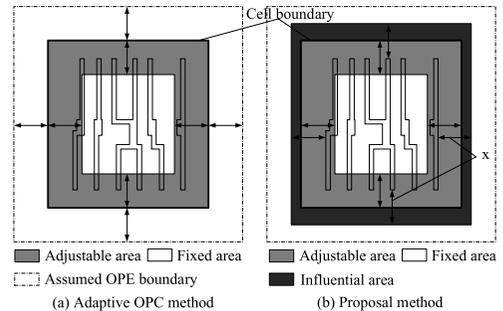


図 2 Influential 領域の概念
Fig. 2 Influential area.

が計算不要の領域を示している。

このように、適応型 OPC 技術では、OPC の計算領域が各セルの周辺部に限られるため、処理時間の大幅な削減が期待できる。しかし、この手法では Adjustable 領域中のすべての OPC 図形を最適化していたため、不要な計算が多かった。たとえば、マスクパターンにおいて、セルの配置密度が疎の場合はセル間に隙間が存在する。このような領域では、OPE の影響が少ないため、Adjustable 領域中であっても最適化調整を行わずに済む。したがって、OPE の影響範囲を精密に定めることができれば、計算不要の領域を特定することができる。そこで、本論文では、計算領域の削減を可能にする Influential 領域を提案する。

3.2 Influential 領域の概念

本論文では、計算領域を削減することを目的として、隣接セルによる OPE の影響を精密に定めた Influential 領域を提案する。具体的には、Influential 領域とはセル内部のパターンによる OPE がセル外部へ伝播する範囲を示すものである。この領域は、セル外周部に位置する（図 2(b)）。

OPE の伝播範囲と Influential 領域の概念について、図 2 と図 3 を用いて説明する。図 2(a) は適応型 OPC 手法²⁾（以下、従来手法）における OPE の伝播範囲を表し、図 2(b) が提案手法を表している。図 3 は、従来手法と提案手法による OPC 計算領域である。

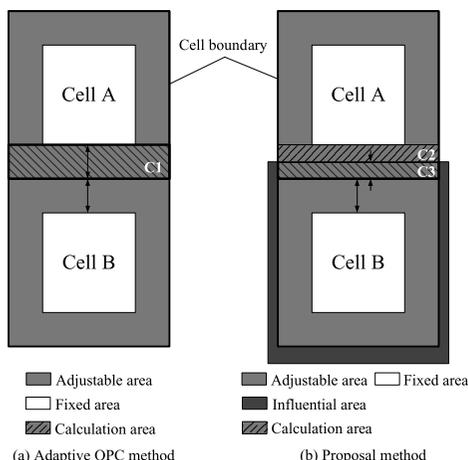
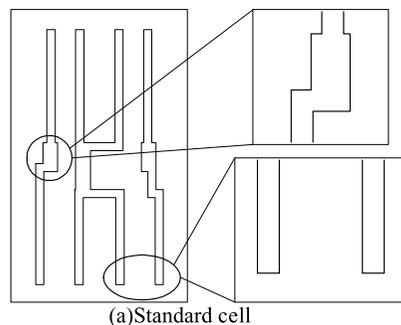


図 3 従来手法と本手法の計算領域
Fig. 3 Calculation area.

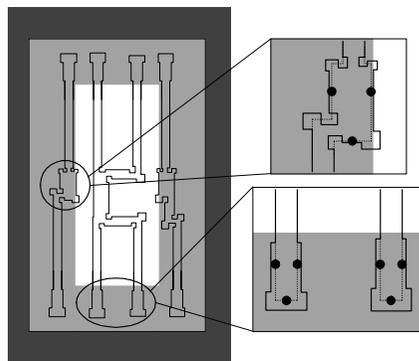
従来手法では、セル外への OPE は、図 2 (a) の点線で示すように、セルの境界から Adjustable 領域と等しい幅だけ伝播すると定義していた。そのため、図 3 (a) のように、セル B から OPE を受けるセル A では、レイアウト後の OPC 計算領域は図 3 (a) の “C1” で示す部分となっていた。しかし、OPE はセル内部のパターンによって発生する現象であるため、OPE の伝播範囲を求めるには、厳密には、セルの境界からではなくセル内のパターンの端からの距離を考慮すればよい。そこで、本提案では、図 2 (b) の x のように、OPE がセル外部へ伝播する領域の幅を、セルの境界からではなく、セル内部で最も外側にあるパターンの端からの距離と定義する。そして、この距離で示される領域のうち、セル外周部に位置する領域を Influential 領域とする。したがって、図 3 (b) のように、セル B から OPE を受けるセル A では、OPC 計算を行うのはセル B の Influential 領域とセル A の Adjustable 領域が重なった部分だけで済む (図 3 (b) の “C3”)。そのため、図 3 (b) の “C2” の領域は計算不要となり、その分だけ OPC 計算時間を短縮することが可能となる。

3.3 Influential 領域を導入した Adjustable OPCed cell の構成

Adjustable OPCed cell は、次の 5 つの要素から構成される。すなわち、(1) セルを定義する設計パターン、(2) Influential 領域、(3) Adjustable 領域、(4) Fixed 領域、(5) 最適化で用いる評価点である。図 4 に通常のセルと Adjustable OPCed cell の例を示す。図 4 (a) は通常のセルで、これは設計パターンのみで構成されている。図 4 (b) は Adjustable OPCed cell である。Adjustable OPCed cell は、図 4 (a) の設計パターンに OPC を適用した後、セルの外周部を



(a) Standard cell



Influential area Adjustable area
Fixed area Evaluation point
(b) Adjustable OPCed cell

図 4 Adjustable OPCed cell
Fig. 4 Adjustable OPCed cell.

Influential 領域、セルの内周部を Adjustable 領域、セルの中心部を Fixed 領域と定義することによって作製される。

本論文では、OPE の伝播範囲を $1.62\lambda/NA$ として定義し²⁾、Influential 領域の幅はセル内のパターンの端から $1.62\lambda/NA$ 、Adjustable 領域の幅はセルの境界から $1.62\lambda/NA$ 、残りを Fixed 領域と定義した。Adjustable 領域の OPC 図形を Adjustable 図形、Fixed 領域の OPC 図形を Fixed 図形と呼ぶ。図 4 (b) の網掛け部が Influential 領域、灰色部が Adjustable 領域、白色部が Fixed 領域を表す。また、図 4 (b) の黒点は評価点を示しており、これは、設計パターン上で、コンタクト部や拡散層上の配線部等、高精度な OPC が求められる箇所に設定する。評価点では、OPC 図形の効果を検証するために、光学シミュレーションによる投影像と設計パターンのずれの割合を誤差として測定する。適応型 OPC 技術では、最適化手法によって、Adjustable 図形部分を誤差が最小となるように調整する。

3.4 提案手法を用いた光近接効果補正

提案手法を用いた光近接効果補正は、次の 5 つの手

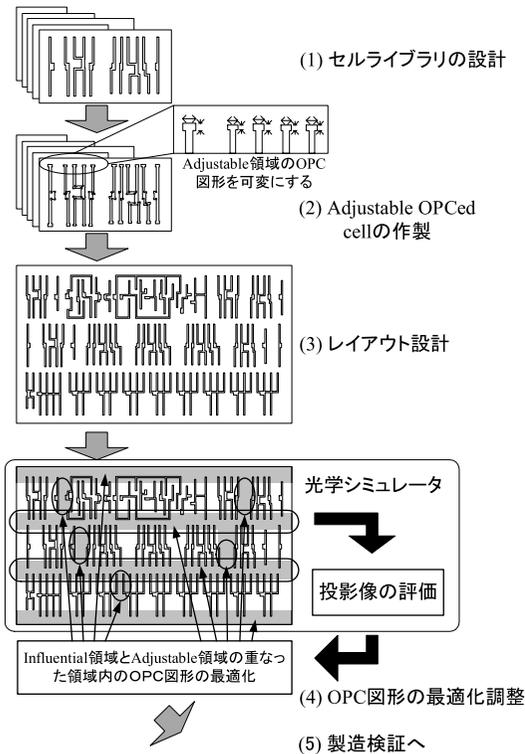


図 5 提案手法を用いた適応型 OPC
Fig. 5 The flowchart of proposed OPC method.

順で行う(図 5 参照)。(1)セルライブラリの設計, (2) Adjustable OPCed cellの作製, (3) レイアウト設計, (4) OPC 図形の最適化調整, (5) 製造検証. 以下, 各手順について説明する.

- (1) セルライブラリの設計
LSI チップのレイアウト設計で用いるセルライブラリを設計する.
- (2) Adjustable OPCed cellの作製
各セルにあらかじめ OPC 処理を施し, セルの外周部を Influential 領域, セルの内周部を Adjustable 領域, セルの中心部を Fixed 領域とし, Adjustable 領域内の OPC 図形を調整可能な Adjustable 図形とする.
- (3) レイアウト設計
デザインルールに従い, Adjustable OPCed cell をレイアウトしてマスクパターンを作製する.
- (4) OPC 図形の最適化調整
Adjustable OPCed cell のレイアウトを行うと, 各セルの周辺部では, 隣接セルによる OPE の影響を受けることから, 各セルの Adjustable 図形の調整を行う.

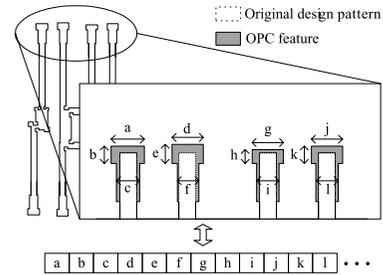


図 6 Adjustable 図形のコード化
Fig. 6 Coding.

- (5) 製造検証
回路性能の検証後, レイアウトデータをマスク製造のためのデータへ変換する.

3.5 OPC 図形の最適化調整

Adjustable OPCed cell をレイアウトすると, 各セルの周辺部では, 隣接セルによる OPE の影響を受けるために, 各セルの Adjustable 図形の再調整が必要となる. 従来手法では, Adjustable 領域のすべてを一度に計算するために, Adjustable 図形の調整に大域的探索に優れた遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いた²⁾. 一方, 本論文では, Influential 領域の導入により計算領域を限定しているために, 局所的な領域の最適化が可能となった. そこで, 本論文では, Adjustable 図形の調整に GA ではなく簡便な局所探索手法を導入した. 具体的な調整手順は, まず Adjustable 図形の形状や寸法を最適化手法の調整変数として扱うためにコード化する. 次に, 光学シミュレーションによりマスクパターンの投影像を計算し, たとえば, 設計パターンに対して投影像が部分的に膨らんでいたらその分 Adjustable 図形を細らせ, 逆に細っていたらその分を太らせる. これらの手順を繰り返すことで, 光学シミュレーションによる投影像が設計パターンに近づくように Adjustable 図形を調整する. 以下では, Adjustable 図形のコード化と最適化調整方法の詳細について説明する.

3.5.1 Adjustable 図形のコード化

コード化では, Adjustable 図形の形状を決める変数を, 調整箇所と同じ数で構成される一次元配列で表現する. 図 6 にコード化の例として, Adjustable 図形の調整箇所と, この調整箇所に対応した, 最適化における一次元配列を示す. 図のように, 一次元配列は調整箇所である Adjustable 図形の多角形の辺 (図 6 の a, b, d, e, g, h, j, k), および多角形の線幅 (図 6 の c, f, i, l) を示し, 実数値で表現される.

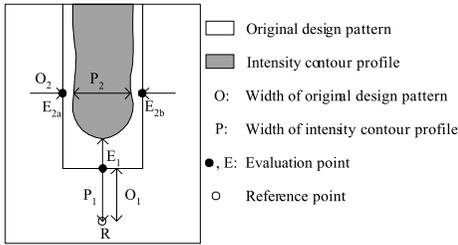


図 7 投影像の測定例

Fig. 7 Measurement of intensity contour profile.

3.5.2 最適化調整方法

Adjustable 図形の調整では、はじめに次元配列により定まった設計パターンの投影像を計算する。次に、複数の評価点において、投影像の寸法 P と設計パターンの寸法 O のずれの割合を誤差 F として次式で計算する。

$$F_i = (O_i - P_i)/O_i \quad (1)$$

ここで、 i は評価点を表す。

式 (1) を用いた Adjustable 図形の調整は、パターンの先端部とそれ以外の部分では方法が異なる。これを図 7 を用いて説明する。投影像の先端部を調整する場合は、設計パターンの外部で、評価点を含む線分の垂線上に設けた参照点を用いる。たとえば、図 7 では参照点 R から評価点 E_1 までの距離を設計パターンの寸法 O_1 、投影像の先端までの距離を投影像の寸法 P_1 として、 $F_1 > 0$ なら Adjustable 図形を細らせ、逆に $F_1 < 0$ なら Adjustable 図形を太らせる。一方、先端部以外の部分 (P_2) を調整する場合には、線分上の 2 つの評価点を用いる。たとえば、図 7 では 2 つの評価点 E_{2a} 、 E_{2b} の間の距離を設計パターンの寸法 O_2 、 E_{2a} と E_{2b} を結ぶ線上における投影像の幅を投影像の寸法 P_2 として、 $F_2 > 0$ なら Adjustable 図形を太らせ、逆に $F_2 < 0$ なら Adjustable 図形を細らせる。

4. 検証実験

本章では、提案手法の有効性を検証するために行った実験と考察について述べる。まず実験 1 において、提案手法による計算領域の削減が OPE の補正精度に与える影響を検証するために、提案手法により OPC 図形の最適化調整を行った。次に実験 2 において、導入した局所探索手法の有効性を検証するために、GA を用いた探索手法との比較実験を行った。最後に、既存のマスクパターンに提案手法を適用した場合に得られる効果として、削減可能な計算時間について考察した。以下、はじめに光学シミュレーションの実験条件

について述べ、次に実験 1, 2 について説明し、考察を述べる。

4.1 実験条件

光学シミュレーションには、部分コヒーレント結像理論⁷⁾をもとに作製した光学シミュレータを用いた。計算機の性能は、CPU : Opteron244, Memory : 16 GB, OS : Red Hat Linux である。光学シミュレーションでは、現在主流となっている 90 nm ライブラリの回路の光学条件として波長 = 193 nm, NA = 0.7 ($k_1 = 0.32$) を想定した。実験では 130 nm セルライブラリの回路を用いたので、プロセス定数 k_1 ⁸⁾ を等しくするために、波長 = 193 nm, NA = 0.48 としてシミュレーションを行った。また、その他の光学条件は、輪帯照明 (σ (外径/内径) = 0.85/0.55), 位相シフトマスク (透過率 6%) と設定した。

光学シミュレーションに用いるテストパターンは、(株)半導体理工学研究センター (STARC) が開発した 130 nm セルライブラリをもとに作製した。Adjustable OPCed cell の作製において、Influential 領域はパターンの先端からセルの外側へ、Adjustable 領域はセル境界からセルの内側へそれぞれ $1.62\lambda/\text{NA}$ の領域と設定した。セル内部においては、Adjustable 領域以外を Fixed 領域に設定した。また、評価点はウェハ上の投影像の寸法を確保するために、Adjustable 領域内では設計パターンの先端部に、Fixed 領域内では設計パターンの中心部に設定した。なお、各セルの OPC の補正精度目標は ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) で定められている 3%⁹⁾ とした。

4.2 実験 1

本提案では、Influential 領域の導入により計算領域を削減することができる。しかし、OPC 計算領域の削減は、隣接セルによる OPE の計算量の低減を意味することから、OPE の補正精度の低下を招く可能性が考えられる。そこで、本実験では、光学シミュレーション実験により、OPE の補正精度を検証した。具体的には、作製したテストパターンを用いて、Influential 領域と Adjustable 領域の重なった領域における OPC 図形のみを補正することで、OPE の高精度な補正が可能であるかを検証した。

作製したセルをレイアウトしたテストパターンを図 8 に示す。図 8(a) の斜線部がテストパターンの計算領域を表し、図 8(b) の点線部が評価領域を表す。ここで、評価領域は複数の評価点が含まれる領域を表す。図 8(b) の I1 ~ I4 は Influential 領域内の評価領域、A1 ~ A8 は Adjustable 領域内の評価領域、F1 ~

表 1 レイアウト直後の線幅変動

Table 1 Rate of change in intensity contour profile (%).

	I1	I2	I3	I4	A1	A2	A3	A4	A5
min	1.27	0.35	1.25	0.33	0.50	0.43	0.08	0.5	0.08
max	4.92	6.65	4.98	6.65	2.33	1.66	2.53	2.32	0.37
ave.	2.48	2.41	2.46	2.44	1.43	0.94	0.97	1.43	0.24
	A6	A7	A8	F1	F2	F3	F4	F5	total
min	0.20	0.10	0.19	0.04	0.19	0.04	0.25	0.26	0.04
max	2.04	0.34	2.04	0.45	2.23	0.49	2.07	2.07	6.65
ave.	1.09	0.23	1.09	0.23	1.09	0.28	1.01	1.01	1.42

表 2 OPC 図形最適化調整後の線幅変動

Table 2 Rate of change in intensity contour profile (%).

	I1	I2	I3	I4	A1	A2	A3	A4	A5
min	0.51	0.09	0.56	0.13	0.49	0.43	0.09	0.5	0.08
max	1.81	1.94	1.76	1.91	2.33	1.66	1.86	2.32	0.37
ave.	1.18	1.21	1.17	1.07	1.43	0.94	0.74	1.43	0.24
	A6	A7	A8	F1	F2	F3	F4	F5	total
min	0.43	0.1	0.41	0.01	0.16	0.02	0.37	0.36	0.01
max	1.68	0.34	1.69	0.46	2.1	0.45	2.07	2.07	2.33
ave.	0.84	0.24	0.84	0.18	1.08	0.26	1.02	1.03	0.91

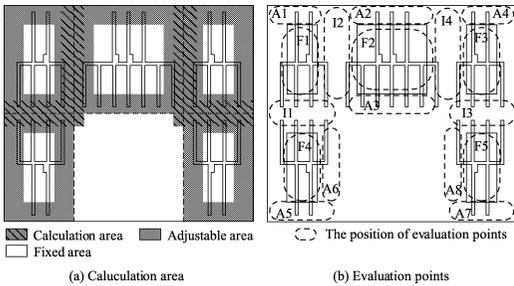


図 8 テストパターン

Fig.8 Test pattern.

F5 は Fixed 領域内の評価領域を表す．表 1 に，レイアウト直後の各評価領域における線幅変動の最大値と最小値および平均値を示す．なお，線幅変動は，投影像が設計パターン幅に対してどの程度変動したかを誤差で表したもとする．表 1 における誤差の最小・最大・平均値はそれぞれ 0.04%，6.65%，1.42%である．この結果より，セル単体であらかじめ OPC 図形を 3%以内に調整しても，レイアウトによって最大 2 倍以上（6.65%）の誤差が発生することが分かる．

表 2 に，Adjustable 領域のうち，Influential 領域と重なった部分のみ（図 8 の斜線部）を最適化調整した結果を示す．この結果より，Influential 領域と Adjustable 領域の重なった領域だけの OPC 図形の最適化調整で，表 1 に示した最大 6.65%の誤差が 3%以下に補正されていることが分かる（表 2）．さらに，表 1 と表 2 の A1～A8 および F1～F5 の比較より，最適化調整は Adjustable 領域の一部（OPC 図形の最適化

表 3 評価回数と収束時間の関係

Table 3 Alignment results for the experiments.

探索手法	評価回数	収束時間
局所探索	5	40 (min)
GA	146	19.5 (hour)

調整を行わない部分）と Fixed 領域にはほとんど影響を与えていないことから，Influential 領域の定義が有効であることが分かる．以上の結果から，提案手法により OPC 計算領域を削減しても高精度な補正が実現できることが分かった．

4.3 実験 2

本提案で導入した局所探索手法の有効性を検証するために，GA を用いた探索手法との比較実験を行った．シミュレーション条件は実験 1 と同様に，波長 = 193 nm，NA = 0.48，輪帯照明 (σ (外径/内径) = 0.85/0.55)，位相シフトマスク（透過率 6%）と設定した．また，実験 1 と同様に，テストパターンは図 8 を用い，目標とする補正精度は設計パターンの 3%以内とした．GA の染色体の長さは 55，初期個体数は 110 個で，世代交代には MGG (Minimal Generation Gap)¹⁰⁾ モデルを，遺伝的操作には平均 0，分散 3 (nm) の正規乱数型突然変異¹¹⁾ を用いた．

表 3 に，局所探索手法と GA における調整結果を示す．なお，評価回数と収束時間は誤差が 3%以下に調整されるまでの値である．表 3 より，GA を用いた調整を基準とすると，本提案で導入した局所探索手法により約 29 倍の高速化が図れていることが分かる．これは，Influential 領域の導入により計算領域を限定

表 4 適応型 OPC における計算領域の大きさ
Table 4 Calculation area.

NA	$1.62\lambda/NA$	従来手法 (μm^2)	提案手法 (μm^2)
0.7	446.66	5,769.82	3,303.61
0.85	367.84	4,912.82	2,260.50
0.975	320.68	4,367.05	1,603.39

した結果、調整変数間の依存関係が弱まったために実現できたと考えられる。つまり、本論文で提案した Influential 領域と局所探索手法により、最適化調整の大幅な高速化を実現した。

4.4 考 察

本節では、実用化に向けた考察として、提案手法を既存のマスクパターンに適用した場合に得られる効果として削減可能な計算時間について検討した。まず既存のマスクパターン内で用いられているセルに対して、Influential 領域、Adjustable 領域、Fixed 領域を設定した。次に、特定の光学条件下における各セルの Influential 領域の幅を求め、Adjustable 領域と Influential 領域の重なる領域を算出することで削減可能な計算領域を検討した。さらに、次世代の光リソグラフィに対する提案手法の有効性の考察として、光学条件とマスクパターンのサイズを変更した場合に削減可能な計算領域について検討した。以下、詳細を述べる。

既存のマスクパターンとして STARC より提供していただいたプロセッサ (10 mm × 10 mm) の設計データを用いた。チップ内から 100 μm × 100 μm の領域を切り出し、この領域で以下のような検証を行った。なお、選択した領域中の総セル数は 1,390 個で、セルの平均サイズは縦 2.52 μm × 横 3.02 μm である。これらすべてのセルに対して Influential 領域と Adjustable 領域を設定し、OPE の補正計算が必要な領域を求めた。なお、NA の値は、90 nm ルールにおける光学条件を想定して設定した。具体的には、 k_1 値をもとに、NA = 0.7 ($k_1 = 0.32$)、NA = 0.85 ($k_1 = 0.4$)、NA = 0.975 ($k_1 = 0.45$) の 3 つに設定した。NA = 0.7 は一般的な光学条件、NA = 0.85、NA = 0.975 は液浸技術を用いた高解像のリソグラフィを想定している。

NA を変化させた場合の、従来の適応型 OPC 手法と提案手法による計算領域を表 4 に示す。ただし、 $1.62 \times \lambda/NA$ は OPE の伝播範囲を表す²⁾。表 4 は計算領域の値であり、これらの領域に対する計算時間は、領域の 2 乗に比例する。したがって、NA = 0.7 での OPC 計算時間は、チップ全面 OPC (100 × 100 μm^2) と比べて約 1/10、従来手法と比べて約 1/3.1 に削減可能であることが分かる。また、NA = 0.85 での OPC

計算時間はチップ全面 OPC の約 1/22、従来手法の約 1/4.7 に、NA = 0.975 での計算時間は、チップ全面 OPC の約 1/44、従来手法の約 1/7.4 に削減可能であることが分かる。これらの結果より、本手法は高 NA のリソグラフィにおいてより効果を発揮することが分かる。

しかし、微細化が進むと、本手法による計算時間の大幅な削減が困難になる可能性がある。具体的には、微細化にともないセルサイズが縮小すると、セル内部への OPE の影響範囲が大きくなり、Adjustable 領域が支配的になってくる。そのため、Fixed 領域、つまり計算不要の領域が小さくなり、本手法の効果が薄れる可能性がある。一方、次世代以降、たとえば 45 nm 世代における光リソグラフィでは、液浸技術の向上により NA が 1.3 となることが予測される¹²⁾。このような高 NA による光リソグラフィでは、本手法で用いる OPE の伝播範囲 ($1.62\lambda/NA$) も小さくなることから、提案手法は十分対応できると考えられる。そこで、45 nm 世代の光リソグラフィに本手法を適用した場合の計算時間の削減について試算してみた。以下に詳細を示す。

45 nm 世代でのセルサイズが単純シュリンクで 90 nm 世代の 1/2 (45/90) になると仮定する。上述した既存マスクパターンをシュリンクすると、計算領域は 50 μm × 50 μm 、セルの平均サイズは縦 1.26 μm × 横 1.51 μm となる。NA = 1.3 より、 $1.62 \times \lambda/NA = 241$ (nm) となることから、本手法を用いた場合の計算領域は 934.17 (μm^2) となる。したがって、計算領域は 50 μm × 50 μm の約 1/2.7 に低減させることができる。計算時間は計算領域の 2 乗に比例するため、約 1/7.3 に削減できる見込みがある。

以上の考察から、提案手法の導入により、適応型 OPC 手法は次世代以降の OPC 技術にも十分適用できると考えられる。

5. おわりに

本論文では、OPC 計算時間のさらなる短縮を目的として、OPE のセル外部部への影響を考慮した Influential 領域を導入した適応型 OPC 技術を提案した。そして、提案手法を用いたテストパターンの光学シミュレーション実験から、OPC 計算領域を削減しても高精度な補正が可能であることを示した。また、従来手法との比較実験より、最適化調整の収束速度を大幅に向上させることに成功した。さらに、既存のマスクパターンに本手法を適用した検証実験の結果、本手法を用いることで OPC 計算時間を大幅に削減できる可能

性を示した。

今後の課題としては、実用化に向けて、大規模な回路に本手法を適用した場合の計算時間の削減効率の検証があげられる。また、複雑な回路に対する局所探索手法の有効性の検証があげられる。

謝辞 本研究は NEDO から委託されて実施した。また、本研究を進めるにあたり、STARC よりパターンデータの提供をいただいた。ここに記して謝意を表す。さらに、日頃ご指導いただいている産業技術総合研究所次世代半導体研究センターの廣瀬全孝センター長に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Matsunawa, T., Nosato, H., Sakanashi, H., Murakawa, M., Murata, N., Terasawa, T., Tanaka, T., Suga, O. and Higuchi, T.: The novel approach for optical proximity correction using genetic algorithms, *Proc. SPIE*, Vol.5992, pp.541-549 (2005).
- 2) 松縄哲明, 野里博和, 坂無英徳, 村川正宏, 村田信治, 寺澤恒男, 田中稔彦, 須賀 治, 樋口哲也: レイアウト設計後の最適化による光近接効果補正技術の提案, *電気学会論文誌 C*, Vol.127, No.1, pp.1-9 (2007).
- 3) Otto, O.W., Garofali, J.G., Low, K.K., Yuan, C.M., Henderson, R.C., Pierrat, C., Kostelak, R.L., Vaidya, S. and Vasudev, P.K.: Automated optical proximity correction — A rules-based approach, *Proc. SPIE*, Vol.2197, pp.278-293 (1994).
- 4) Miyama, S., Yamamoto, L. and Koyama, K.: Large-area optical proximity correction with a combination of rule-based and simulation-based methods, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35, pp.6370-6373 (1996).
- 5) Gupta, P., Heng, F.L. and Lavin, M.: Merits of cellwise model-based opc, *Proc. SPIE*, Vol.5379, pp.182-189 (2004).
- 6) Wang, X., Pilloff, M., Tang, H. and Wu, C.: Exploiting hierarchical structure to enhance cell-based ret with localized opc reconfiguration, *Proc. SPIE*, Vol.5756, pp.361-367 (2005).
- 7) 久保田広: *波動光学*, 岩波書店 (1979).
- 8) Weeks, J.R.: *RESOLUTION ENHANCEMENT TECHNIQUES IN OPTICAL LITHOGRAPHY*, SPIE PRESS (2001).
- 9) Semiconductor Industry Association: *International Technology Roadmap for Semiconductors*, Sematech Inc. (2005).
- 10) Satoh, H., Yamamura, M. and Kobayashi, S.: Minimal generation gap model for gas considering both exploration and exploitation, *Proc. 4th*

International Conference on Soft Computing, pp.494-497 (1997).

- 11) Schwefel, H.P.: *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons Inc. (1995).
- 12) 技術研究組合超先端電子技術開発機構: 45 nm hp システム LSI 用設計・描画・検査最適化技術への先導研究, 委託業務成果報告書, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006).
(平成 18 年 11 月 21 日受付)
(平成 18 年 12 月 21 日採録)



松縄 哲明

1980 年生。2005 年東海大学大学院工学研究科光工学専攻博士前期課程修了。同年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程入学。現在に至る。進化型光学システム, 適応型光近接効果補正技術に関する研究に従事。



野里 博和

1975 年生。2003 年東邦大学大学院理学研究科情報科学専攻博士課程修了。理学博士。同年日本学術振興会特別研究員(産業技術総合研究所学振特別研究員)。2006 年産業技術総合研究所産総研特別研究員。現在に至る。遺伝的アルゴリズム, 進化型光学システム, 適応型光近接効果補正技術に関する研究に従事。



坂無 英徳

1996 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。1996 ~ 1998 年日本学術振興会特別研究員。1998 年電子技術総合研究所(現, 産業技術総合研究所)入所。進化的計算理論および進化型ハードウェア, データ圧縮, 半導体の製造時調整技術, 救急医療ならびに電動車いす遠隔支援システム開発等に関する研究に従事。博士(工学)。



村川 正宏

1972年生。1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所（現、産業技術総合研究所）入所。現在、次世代半導体研究センター主任研究員。東邦大学連携大学院助教授兼任。遺伝的アルゴリズム、進化型ハードウェア、強化学習の研究に従事。第2回進化システム国際会議最優秀論文賞、平成12年度つくば奨励賞、電気学会ミレニアム最優秀論文賞受賞。



高橋 栄一（正会員）

1993年東京大学大学院博士課程修了。同年電子技術総合研究所（現、産業技術総合研究所）入所。並列・実時間処理、適応型デジタル回路構成法、ネットワークセキュリティシステムの研究に従事。東邦大学連携大学院教授兼任。電子情報通信学会、IEEE各会員。工学博士。



寺澤 恒男

1953年生。1979年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年（株）日立製作所入社。同社中央研究所にて、主として光リソグラフィ技術の研究開発に従事。2001年8月に技術研究組合超先端電子技術開発機構（ASET）に出向。2006年4月より（株）半導体先端テクノロジーズ（Selete）に出向。EUVLマスク関連技術の研究開発に従事。主管研究員。博士（工学）。



田中 稔彦

1956年生。1981年東京農工大学大学院工学研究科修士課程修了。同年（株）日立製作所入社。同社中央研究所にて光リソグラフィの研究開発に従事。i線リソグラフィ、位相シフト露光技術、化学増幅系レジストプロセス等の開発を手がける。1990年から92年にかけて、（株）ソルテック筑波研究所にてX線リソグラフィの開発に従事。2003年に（株）ルネサステクノロジに籍を移し、2004年から2006年3月まで半導体MIRAIプロジェクトにてリソグラフィ関連計測技術を開発。現在、（株）半導体先端テクノロジーズにてEUVリソグラフィ技術開発に従事。グループリーダー。博士（工学）。



須賀 治

1954年生。1980年東京都立大学大学院機械工学研究科修了。同年（株）日立製作所中央研究所入社。主として電子ビームリソグラフィ技術の研究・開発に従事。その後、エルピーダメモリ（株）、（株）先端SoC基盤技術開発等での光リソグラフィおよび光マスクの技術開発を経て現在、（株）半導体先端テクノロジーズのEUVLマスク開発に従事。プログラムマネージャ。



樋口 哲也

1982年慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。1983年電子技術総合研究所入所。1990～1991年カーネギーメロン大学客員研究員。現在、産業技術総合研究所次世代半導体研究センター主幹研究員。筑波大学連携大学院教授兼任。進化型ハードウェア、遺伝的アルゴリズムの研究に従事。第25回市村学術賞、電気学会ミレニアム最優秀論文賞等受賞。電子情報通信学会会員。