

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^{†††}

我々は既に、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することができる。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伴い、シリコンウェハ上に転写する LSI パターンの忠実性が低下する光近接効果（OPE: Optical Proximity Effect）を補正する、光近接効果補正（OPC: Optical Proximity Correction）が必要不可欠となっている¹⁾。従来の OPC では、最小単位の回路であるセルをレイア

ウトして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（チップ全面 OPC）を行っていた。しかし、現在、デバイスの微細化に伴う OPC 計算の複雑化のために、OPC に要する計算負荷（時間・マスクデータ量）が増加している。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、予め OPC が施されている Adjustable 領域と Fixed 領域の 2 つ

[†] 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
University of Tsukuba

^{††} 半導体 MIRAI プロジェクト 産業技術総合研究所
MIRAI-ASRC, AIST

^{†††} (株) 半導体先端テクノロジーズ
Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.

から成る。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。

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外部への領域を定めるものである。この提案により、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することができる。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。

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。さらに、既存の LSI チップに提案手法を適用した場合、計算時間を従来 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。

2. 光近接効果補正とその問題点

現在、主に用いられているモデルベース OPC³⁾では、OPE によって変動する露光パターンの形状や寸法を光学シミュレーションにより予測して、これを打ち消すための補正図形を作製する。この方法により、複雑な OPE に対応した緻密な補正を行うことができる。しかし、モデルベース OPC では、マスクを構成する全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、膨大な計算負荷がかかるという問題点がある。この計算負荷は、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。

3. 提案手法

3.1 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

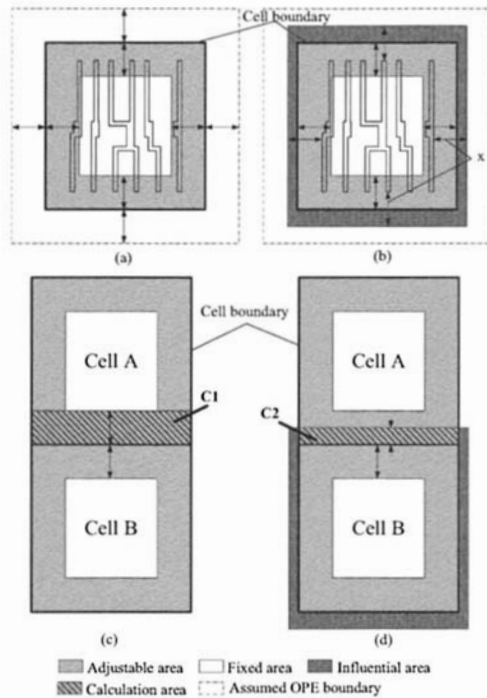


図 1 Influential 領域の概念
Fig. 1 Influential area.

に位置する (図 1-(b)).

OPE の伝播範囲と Influential 領域の概念について、図 1 を用いて説明する。図 1-(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 1-(b) が提案手法を表している。図 1 の (c) と (d) は、従来手法と提案手法による OPC 計算領域である。

従来手法では、セル外への OPE は、図 1-(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 1-(c) 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 1-(c) 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良い。そこで、本提案では、図 1-(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 1-(d) 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 1-(d) の “C2”)。そのため、計算領域を不要にした分だけ OPC 計算時間を短縮することが可能となる。

3.2 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 OPC 図形の再調整が必要となる。従来手法では、Adjustable 領域の全てを一度に計算するために、OPC 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局所的な領域に限定している。そこで、本論文では、OPC 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 OPC 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、例えば、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 OPC 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 OPC 図形を調整する。

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、Influential 領域の導入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、提案手法による OPC 図形の最適化調整実験を行った。次に、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。

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⁴⁾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: 16GB, 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 90nm ライブラリの回路の光学条件として波長 = 193nm, NA=0.7($k_1 = 0.32$)を想定した。実験では 130nm セルライブラリの回路を用いたので、プロセス定数 k_1 ¹⁾ を等しくするために、波長 = 193nm, 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。

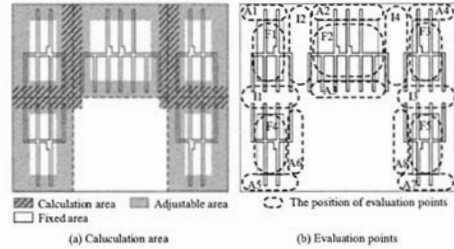


図 2 テストパターン
Fig. 2 Test pattern.

表 1 レイアウト前の線幅変動

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

	I1-I4	A1-A8	F1-F5	total
min	0.33	0.08	0.04	0.04
max	6.65	2.53	2.23	6.65
ave.	2.46	0.94	0.81	1.42

表 2 レイアウト後の線幅変動

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

	I1-I4	A1-A8	F1-F5	total
min	0.09	0.09	0.01	0.01
max	1.94	2.33	2.1	2.33
ave.	1.12	0.84	0.79	0.91

光学シミュレーションに用いるテストパターンは、(株) 半導体理工学研究中心 (STARC) が開発した 130nm セルライブラリを基に作製した。Adjustable OPCed cell の作製において、Influential 領域はパターン先端部からセルの外側へ、Adjustable 領域はセル境界からセルの内側へそれぞれ $1.62\lambda/NA$ の領域と設定した。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%⁵⁾ とした。

4.2 シミュレーション実験

本実験では、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 2 に示す。図 2-(a) の斜線部がテストパターンの計算領域を表し、図 2-(b) の点線部が評価領域を表す。図 2-(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-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のとする。この結果より、セル単体で予め

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わかる。

表 2 に、Adjustable 領域のうち、Influential 領域と重なった部分のみ (図 2 の斜線部) を最適化調整した後の各評価領域の線幅変動を示す。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 (1.94%) に補正されていることがわかる。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わかる。以上の結果より、提案手法により OPC 計算領域の削減と高精度な補正が実現できることがわかった。

4.3 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。以下、詳細を述べる。

既存のマスクパターンとして STARC より提供して頂いたプロセッサ (10mm×10mm) 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 1390 個で、セルの平均サイズは縦 2.52 μm ×横 3.02 μm である。これら全てのセルに対して 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、90nm 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 を基に、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 3 に示す。ただし、 $1.62 \times \lambda / NA$ は各 NA における OPE の伝播範囲を表す。OPC の計算時間は、計算領域の 2 乗に比例するので、表 3 の結果より、NA=0.7 での OPC 計算時間は、チップ全面 OPC と比べて約 1/10、従来手法

表 3 適応型 OPC における計算領域の大きさ

Table 3 Calculation area.

NA	$1.62\lambda/NA$	従来手法 (μm^2)	提案手法 (μm^2)
0.7	446.66	5769.82	3303.61
0.85	367.84	4912.82	2260.50
0.975	320.68	4367.05	1603.39

と比べて約 1/3.1 に削減可能であることがわかる。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わかる。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わかった。

5. おわりに

本論文では、OPC 計算時間の更なる短縮を目的として、OPE のセル外部への影響を考慮した Influential 領域を導入した適応型 OPC 手法を提案した。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。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から、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挙げられる。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挙げられる。

参 考 文 献

- 1) R. Weeks, Jr.: RESOLUTION ENHANCEMENT TECHNIQUES IN OPTICAL LITHOGRAPHY, SPIE PRESS (2001).
- 2) T. Matsunawa, H. Nosato, H. Sakanashi, M. Murakawa, N. Murata, T. Terasawa, T. Tanaka, N. Yoshioka, O. Suga and T. Higuchi: The novel approach for optical proximity correction using genetic algorithms, *Proc.SPIE*, Vol.5992, pp.541-549 (2005).
- 3) S. Miyama, L. Yamamoto and K. Koyama: 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).
- 4) 久保田 広: 波動光学, 岩波書店 (1979).
- 5) Semiconductor Industry Association: International Technology Roadmap for Semiconductors, Sematech Inc.(2005).