

解説

超解像光リソグラフィ

福田 宏・岡崎 信次

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1989年12月28日受理)

Super-Resolution Optical Lithography

Hiroshi FUKUDA and Shinji OKAZAKI

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

1. はじめに

半導体集積回路 (LSI) の高集積化はとどまるところを知らないスピードで進んでいる。これは回路パターンの微細化 (一世代≒3年ごとに0.7倍) を実現してきたリソグラフィ技術の進歩によるところが大きい。現在、LSI 製造に用いられているリソグラフィ技術には、原画パターンを縮小光学系を介して LSI 基板上に投影露光する縮小投影露光法が主に用いられている。高圧水銀ランプを光源とするこの方法により、最小線幅 $0.5\ \mu\text{m}$ 程度の LSI が実現される見通しである。一方、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターン形成には電子線または X 線を用いたリソグラフィが用いられるものと考えられてきたが、このレベルでも量産性、技術の蓄積度等の理由から光リソグラフィに対する期待が依然大きい。

ここでは、この光の波長と同程度または波長以下のパターン形成を可能とする技術として、最近半導体リソグラフィの分野で注目されている位相シフト法について解説する。位相シフト法は、光学において超解像と呼ばれる現象のリソグラフィへの応用である。リソグラフィにおいては超解像の特徴である空間周波数伝達特性の向上だけでなく、焦点深度の増大等いくつかの付随効果が大いなる意味をもつので、これらについても述べる。

2. 光を用いたリソグラフィの限界

一般に、縮小投影露光法を用いた光リソグラフィにおける理論解像限界 R と、その焦点深度 DOF は、レイリー限界として知られる次の式で表現される¹⁾。

$$R = k_1 \cdot \lambda / \text{NA} \quad (1)$$

$$\text{DOF} = k_2 \cdot \lambda / \text{NA}^2 \quad (2)$$

解像度向上のため、露光光は高圧水銀ランプの g 線 (波長 $436\ \text{nm}$)、i 線 (同 $365\ \text{nm}$) からエキシマレーザー (同 $248\ \text{nm}$: KrF) へと短波長化が、また、NA は 0.2 から 0.6 近く (g 線の場合) へと高 NA 化が進められている²⁾。これに伴い、(2) 式よりわかるように焦点深度は急激に減少しつつある。一方、LSI 表面の凹凸 (高集積化に伴って素子構造の立体化が進んでいる)、基板自体の傾き、マスクの投影面の像面わん曲等により、マスクの投影面と被投影面である LSI 表面の間には $\pm 0.5 \sim 1\ \mu\text{m}$ 程度のズレが生じる。その結果、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターンを形成しようとしたときこのズレの量が焦点深度を越えてしまい、LSI チップの全面にマスクパターンを転写するのが困難になる。このような状況において、「LSI 製造に必要な一定の焦点深度を確保する」という付加条件のもとでは、実用的な解像限界を (1) 式のレイリー限界で表すのが必ずしも適当でなくなりつつある³⁾。代表的な二つの波長の光による解像限界の NA 依存性を図 1 に示す。点線で示したのが (1) 式のレイリー限界、実線で示したのが上述の付加条件のもとでの解像限界である。焦点深度を考慮した実用的な解像限界は、必ずしも高 NA 化・短波長化によって向上せず、従来の光リソグラフィには限界があることがわかる^{4,5)}。

このような限界を超えるためには、光学像そのものの手を加えるのが最も根本的かつ有効であり、これを実現するための新しい光学像形成方法として、位相シフト法^{6,7)} と FLEX 法⁸⁾ が提案されている。ここでは、超解像光リソグラフィとして位相シフト法について解説する。

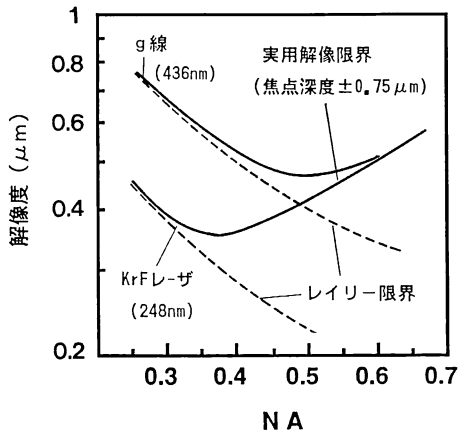


図 1 解像度と NA の関係 (像コントラスト 70% を解像限界と仮定)

3. 位相シフトマスクによる光リソグラフィ

隣接する二つの開口部間の解像限界が、開口部の片方に位相板を設けることによって向上することは知られていた¹⁾。この現象を光リソグラフィに応用したのが位相シフト法で、1982年、IBMのLevenson等によってその効果が実証された⁶⁾。位相シフトマスクを用いた光リソグラフィの原理と効果を図2に示す。マスク上で隣あう一対の開口部の片方に透過光の位相を反転させる位相板(位相シフトと呼ぶ)を設けると、光の振幅は二つの開口部の境界で打ち消しあう。このため二つの開口部の中間での光強度は0となり、両者を明確に分離することができる。

位相シフトの材料としては PMMA 等のレジスト、

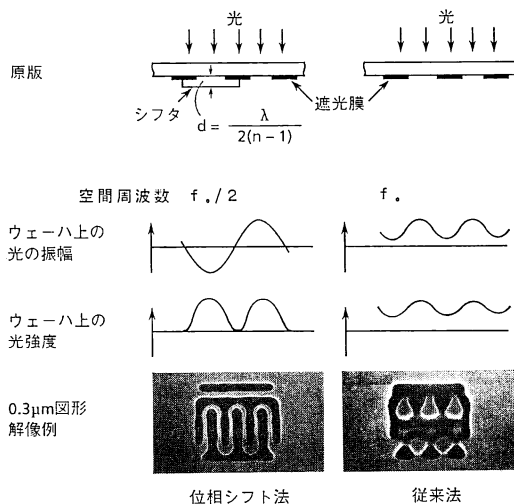


図 2 位相シフト法の原理と効果

SiO₂ 膜, SOG (スピン・オン・ガラス) 膜, 各種蒸着膜等, いろいろ考えられるが, 膜厚と屈折率が正確に制御可能でかつ, 耐久性および加工性にすぐれていることが必要である。

ところで, 超 LSI で必要となる微細パタンの形態は, いくつかのタイプに分類される。配線等で要求されるのは細かい周期の繰返し(縞)パターンであり, LSIの縦方向に積層されたさまざまな層と層の間を接続するために必要なのは微細な孔パターンである。そのほか, きわめて細い単独の線状パターン, 二つの島状パターン間のギャップを狭めること等が要求される。位相シフト法による解像度向上効果は, 周期的パターンとそれ以外のパタンの場合で本質的に異なる。そこで, 以下おのおのに対して別々に位相シフト法の効果を考えることにする。

4. 周期的パターンに対する位相シフト法の効果

4.1 正弦波状振幅物体に対する空間周波数特性

周期的な縞状パタンの一つごとに位相シフトを設けるのは, 位相シフト法の最も基本的な適用方法といえる。この方法による周期的パタンの解像度向上は, 光学系の空間周波数伝達特性の向上としてとらえることができる。そこで, 以下周期的な繰返しパターンをもつマスクを正弦波状振幅物体で近似して, その空間周波数伝達特性について考える(実際のマスクの透過振幅は矩形波でありその基本周波数より高次の空間周波数スペクトルを含んでいるが, ここで問題とするような微細パターンではその影響は実際上無視できる)。部分コヒーレントな照明下での正弦波状振幅物体の投影像の強度分布は, 次のようにして求めることができる⁹⁾。

従来, 透過型マスクおよび位相シフトマスクの振幅透過率 $a_T(x)$, $a_\phi(x)$, およびそのフーリエ変換 $\hat{a}_T(f)$, $\hat{a}_\phi(f)$ は, おおのこの次のような正弦波状振幅物体により近似される。ただし, 図2に示すように同一寸法の縞状パターンに対して従来マスクの正弦波状振幅透過率の空間周波数を f_0 とすると, 位相シフト法に対する正弦波の空間周波数は $f_0/2$ となる。

$$a_T(x) = 1 + \beta \cos(2\pi f_0 \cdot x) \\ \hat{a}_T(f) = \delta(f) + (\beta/2)[\delta(f-f_0) + \delta(f+f_0)] \quad (3)$$

$$a_\phi(x) = \cos(\pi f_0 \cdot x) \\ \hat{a}_\phi(f) = \delta(f-f_0/2) + \delta(f+f_0/2) \quad (4)$$

一方, 投影像の強度分布 I は, 一般に振幅透過率のフーリエ変換と透過クロス係数 T を用いて次のように表される¹⁰⁾。

$$I(x) = \left. \begin{aligned} & \iint T(f_1, f_2) \cdot \hat{a}(f_1) \cdot \hat{a}^*(f_2) \\ & \times \exp[2\pi i(f_1 - f_2) \cdot x] df_1 df_2 \\ & T(f_1, f_2) = \int \gamma(s) \cdot A(s + f_1) \cdot A^*(s + f_2) \\ & \times \exp[2\pi i \{(s + f_1)^2 - (s + f_2)^2\} \cdot \delta] ds \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $\gamma(s)$ は有効光源、 $A(s)$ は瞳面の透過振幅分布、 s は瞳面上の座標、 δ はデフォーカスである。

(3)式、または(4)式を(5)式に代入して計算すると、従来マスク、位相シフトマスクによる投影像の強度分布 I_T, I_ϕ はおのおの次のように求まる。

$$I_T(x) = T(0, 0) + (\beta^2/2)T(f, f) + \beta[T(f, 0) + T(0, f)] \cdot \cos(2\pi f \cdot x) + (\beta^2/2)T(f, -f) \cdot \cos(4\pi f \cdot x) \quad (6)$$

$$I_\phi(x) = 2 \cdot T(f/2, f/2) + 2 \cdot T(f/2, -f/2) \cdot \cos(2\pi f \cdot x) \quad (7)$$

すなわち、従来透過型マスクによる投影像の強度分布は、バイアス成分、基本周波数成分、倍高調波成分の和、また、位相シフトマスクのそれは、バイアス成分と基本周波数成分の和から成る。(6)、(7)式を用いて計算した光学像の像コントラストの、パターン周期 $w(=1/f)$ およびデフォーカス δ 依存性を図3に示す⁹⁾。従来法と位相シフト法、コヒーレンシの高い条件と低い条件のおのおのに対して計算した。ただし、パターン周期、デフォーカスの単位をおのおの $\lambda/NA, \lambda/NA^2$ で規格化した。

これにより、図の特性は λ, NA によらない。ここにコヒーレンスファクター σ は投影レンズの瞳上に投影された有効光源半径と瞳の半径の比で、 $\sigma=0$ は完全にコヒーレントな状態、 $\sigma \geq 1$ はインコヒーレントな状態に相当する。像コントラストは像の最大強度および最小強度の差を両者の和で割ったものである。

一般に、像コントラストはパターン周期 w が小さく、またデフォーカス δ が大きくなるにつれ低下するが、その様相は従来マスクと位相シフト法でかなり異なる。両者の相違は、照明がコヒーレントに近づくに従って著しくなる。すなわち、コヒーレンシの高い条件 ($\sigma=0.1$) において、従来マスクの像コントラストはパターン周期 $w < 1$ で急激に低下し、またデフォーカスが增大するに従い反転する。これに対して、位相シフト法では、 $w > 0.5$ において δ, w に依存しない。一樣かつ大きな像コントラストが得られることがわかる。これは、通常約半分の周期をもつパターンが、非常に大きな焦点深度をもって得られることを示している。また、コヒーレンシが下がるにつれ、両者の差は消滅していくことがわかる。したがって、単純に繰返しパタンの像形成という観点から見れば位相シフト法におけるコヒーレンシはできる限り大きいほうが好ましい。正弦波状振幅物体に対する位相シフト法適用時の解像度向上効果と焦点深度向上効果を(6)、(7)式から考えると、入力位相振幅の空間周波数成分に0次の項がなく、したがって $T(f/2, -f/2)$ のみにより光学像が決定されていることがわかる。

なお、これと全く同じ効果を得る方法として、SFDL (spatial frequency doubling lithography) が提案されている¹¹⁾。この方法では光学系内部で0次の空間周波数スペクトルを遮断するため、マスク上の全てのパターンに対する0次スペクトルが消滅する。このため、さまざまなパターンが混在するLSIへの適合性は必ずしも明らかではない。

4.2 周期的パターンにおける解像限界向上効果

このような位相シフト法による結像特性の変化は、前に述べた光リソグラフィの限界に影響を及ぼす。そこで、LSI製造に必要な一定の焦点深度を満足する実用的な解像限界が位相シフト法によりどのように変化するかを調べた。位相シフト法における周期的パタンの解像限界のNA依存性を図4に示す。従来露光法との比較からわかるのは、

- ① 単純に解像度が40%程度向上すること、に加えて

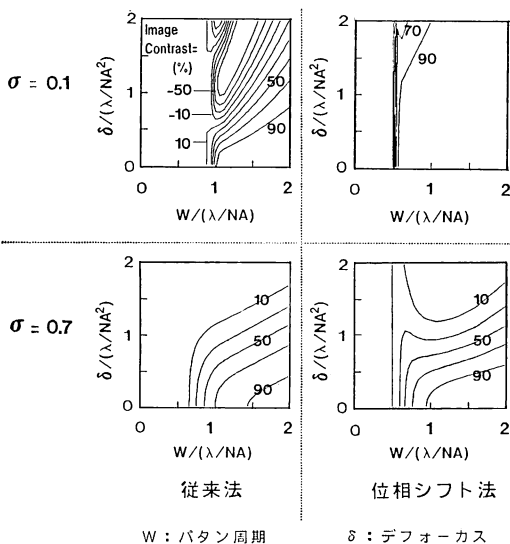


図3 像コントラストのパターン周期およびデフォーカス依存性

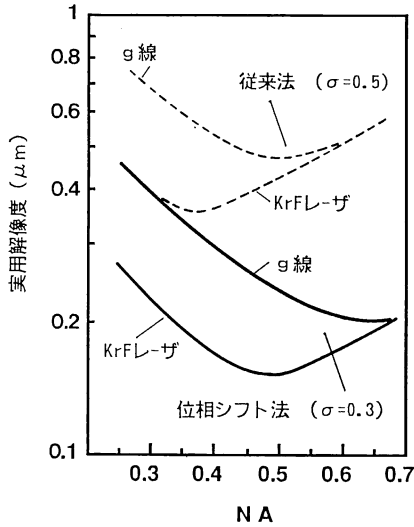


図 4 位相シフト法における実用解像度と NA の関係 (必要焦点深度 ±0.75 μm を仮定)

② 焦点深度の付帯条件を加えても、(1)式に従った (NA に反比例する) 解像限界が実用的に得られること、

である。②は、言うまでもなく位相シフト法により焦点深度が増大したことによる。すなわち、位相シフト法によればある与えられた光学系における空間周波数透過特性を向上することができるだけでなく、より短波長の光と高い NA をもつ光学系を用いた縮小投影露光が実用的なものとなり、光学技術の極限まで追及した光リソグラフィが可能となる^{4,5)}。

5. 位相シフト法におけるパターン間相互作用

以上、単純な正弦波状振幅物体の投影像における位相シフト法の効果を見てきたが、先に述べたように、実際の LSI パターンが単純な縞模様だけで構成されることはありえない。次に、より一般的なパターンに対する位相シフト法の適合性について簡単に述べる。

位相シフト法には正弦波状物体に対する光学系の遮断周波数を実効的に増大するほかに、より一般的なパターンへの応用として次の二つの効果が期待できる。

① 光学的近接効果の抑制

② 補助位相シフトによる像コントラストの向上

これらの効果について理解するため、いわゆる相互強度の概念¹²⁾を拡張した次のようなパターン間相互作用を導入するのが便利である。いま、遮光部中に透光部パターン A と透光部パターン B が存在したとする。おのおののパターンの透過位相振幅を $a_A(v)$, $a_B(v)$ とすると、マスクパタ

ンの透過位相振幅は $a_A(v) + a_B(v)$ で与えられる。これを (5) 式に代入すると、次のような投影像の光強度分布が得られる¹³⁾。

$$I = I_A + I_B + I_{AB} \tag{8}$$

ここに、 I_A, I_B, I_{AB} は、

$$I_A = \iint T(f_1, f_2) \cdot \hat{a}_A(f_2) \cdot \hat{a}_A^*(f_2) \times \exp [2\pi i(f_1 - f_2) \cdot x] df_1 df_2$$

$$I_B = \iint T(f_1, f_2) \cdot \hat{a}_B(f_1) \cdot \hat{a}_B^*(f_2) \times \exp [2\pi i(f_1 - f_2) \cdot x] df_1 df_2 \tag{9}$$

$$I_{AB} = \iint T(f_1, f_2) [\hat{a}_A(f_1) \hat{a}_B^*(f_2) + \hat{a}_B(f_1) \hat{a}_A^*(f_2)] \times \exp [2\pi i(f_1 - f_2) \cdot x] df_1 df_2$$

I_{AB} は二つのパターン間の相互作用を表す項で、パターン A, B の位相が同じか反対かによって符号が逆転する。 I_{AB} は A, B おおのこのパターンの役割によって異なる意味をもつことになる。以下、上に示した二つの効果①, ②に分けてパターン間相互作用を考える。なお、 I_{AB} は基本的に二つのパターンの干渉によって生じるのでコヒーレンシに依存し、以下に述べる I_{AB} の効果は一般にコヒーレンシを上げるほど強調される。

5.1 光学的近接効果の抑制

図 5 は、対向する一対のパターンをどこまで近づけることができるかについて調べたものである。遮光部中の二つの透光部パターン A, B (各線幅 $0.5 \lambda/NA$) が同位相の場合 (従来マスク) と逆位相の場合 (位相シフト法) に対して、A-B 間距離を変えて I_A, I_B, I_{AB} , および I を計算した。従来マスクでは、パターン間距離が狭まるにつれパターン間の光強度が急激に増大して、二つのパターンは一体化してしまう。一方、位相シフト法における相互作用項 I_{AB} は従来法のそれと符号が逆で、これにより

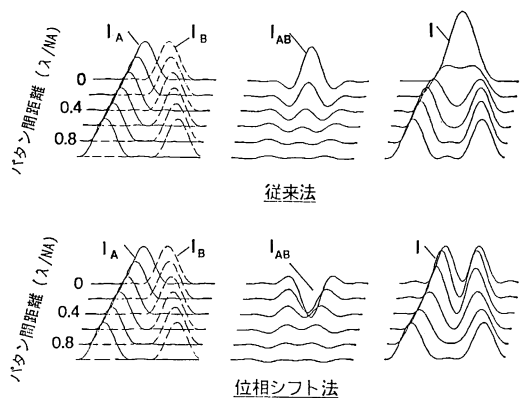


図 5 光学的近接効果のパターン間距離依存性 ($\sigma = 0.3$)

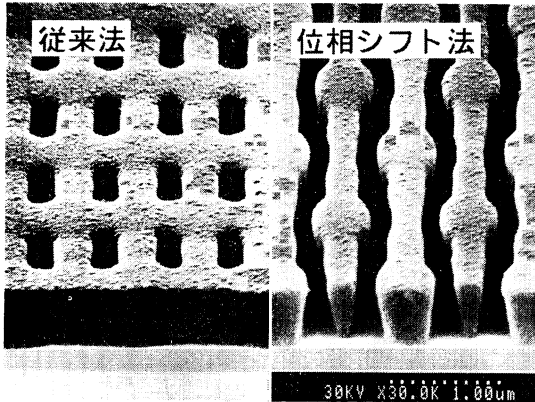


図6 位相シフト法によるパターン形成例 (KrF エキシマレーザ露光, NA: 0.42(ニコン), レジスト: SAL 601 (Shipley))

二つのパタンの境界の光強度が、A-B が接している場合でさえほとんどゼロに抑えられることがわかる。このように、位相シフト法を用いれば光学的近接効果は自己整合的に抑制される。

図6に実際の露光結果を示す。実験には KrF エキシマレーザ (波長 248 nm), NA 0.42 の光学系 (ニコン) を用いた。パターン間の最小距離は $0.175 \mu\text{m}$ である。従来マスクでは、配線 (ゲート) パタンの凸部が隣のパターンと完全に接続しているのに対して、位相シフト法を用いることにより両者を確実に分離することができた。

5.2 補助位相シフトの効果

孤立パタンの解像度を向上させるため、その周囲に解像限界以下の線幅の位相シフトを補助的に設ける試みがなされている^{7,14-16)}。しかし、補助シフトの効果を得るためにはその配置に最適化が必要なため、レイアウト上の大きな制約となる。また、パターンAを主パターン、パターンBを補助シフトパターンと考えたとき、主パターンの強度 I_A と比べて相互作用強度 I_{AB} を大きくできないこと、および I_{AB} 自体の空間周波数に限界があることから、繰返しパターンまたは対向する独立パターン間の場合のような大きな効果を得ることはむずかしい。なお、補助シフトパタンの概念を広げると、あらゆるパタンの外縁部に補助シフトを設けることが考えられる。実際、位相シフトパターンを遮光パターンと別個に形成せず、自己整合的なマスクプロセスによりこのような補助シフトを形成した例が報告されている¹⁶⁾。

これらの方法はマスクエッジにおける光強度分布の急峻性を向上させるためのもので、空間周波数の伝達特性はなんら変化しない。一方、前に示した L/S パタンの1本ごとに位相シフトを配置する位相シフト法の基本形

では、位相 0° のパタンの0次空間周波数成分と位相 180° のパタンの0次空間周波数成分が打ち消しあって、 ± 1 次以上の空間周波数成分のみが伝達される結果、レンズの高周波透過特性が実効的に2倍に向上する。これは、パターン間相互作用という面から見ると逆にきわめて特殊なケースであるといえる。

6. ま と め

以上、位相シフト法の原理と主な効果について簡単に説明した。位相シフト法は、繰返しパタンの周波数伝達特性を約2倍に向上し、しかも大きな焦点深度を可能とする。これにより、単に微細なパタンの形成が可能になるだけでなく、焦点深度に対する制約を超えた高NA化、短波長化を推進することが可能となる。しかし一方、位相シフト法は対象とするパターンによってその効果が異なる。このため、より一般的なLSI等のパターンにおける適合性については、まだまだ検討すべき課題が残されているといえよう。

また、ここでは述べなかったが、本方法をLSIプロセスに導入するためには、マスク構造の最適化、製造プロセス、欠陥検査および修正等のマスク技術、高コヒーレンシ光学系、レジストプロセスとのマッチング等を含む、トータルリソグラフィシステムとして捉えていく必要がある。

文 献

- 久保田広: 波動光学 (岩波書店, 東京, 1971).
- 安西 暁: 日経マイクロデバイス, 8月号 (1989) 103-107.
- M. Nakase: Proc. of SPIE's Symposium on Microlithography, 537 (1985) pp. 160-167.
- H. Fukuda, et al.: Proc. of SPIE's Symposium on Microlithography (1990) to be published.
- 福田 宏, ほか: 1989年秋季応用物理学会講演予稿集, 第2分冊 (1989) p. 515.
- M. D. Levenson, et al.: IEEE Trans. Electron Devices, ED-29 (1982) 1828-1836.
- T. Terasawa, et al.: Proc. of SPIE's Symposium on Microlithography, 1088 (1989) pp. 25-33.
- H. Fukuda, et al.: J. Vac. Sci. Technol. B, 7 (1989) 667-674.
- 山本公明, ほか: 応用物理, 44 (1975) 1266-1277.
- H. H. Hopkins: Proc. Roy. Soc. A, 217 (1953) 408.
- T. E. Jewell, et al.: Proc. of SPIE's Symposium on Microlithography, 1088 (1989) pp. 496-503.
- 小瀬輝次: フーリエ結像論, 光学技術シリーズ7 (共立出版, 東京, 1979) p. 49.
- 福田 宏, ほか: 1990年春季応用物理学会講演予稿集, 第2分冊 (1990) p. 475.
- 羽入 勇, ほか: 1989年秋季応用物理学会講演予稿集, 第2分冊 (1989) p. 515.
- 神保秀之, 山下吉雄: 1989年秋季応用物理学会講演予稿集, 第2分冊 (1989) p. 515.
- A. Nitayama, et al.: IEDM '89 Technical Digest (1989) pp. 57-60.