



ステッパ光学系における超解像技術の比較

田 辺 容 由

日本電気光エレクトロニクス研究所 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1991年11月21日受付, 1992年3月4日受理)

Comparison of Super-Resolution Techniques in the Optical System of Steppers

Hiroyoshi TANABE

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216

(Received November 21, 1991; Accepted March 4, 1992)

There are three super-resolution techniques in the optical system of steppers: annular illumination, super-resolution filters, and phase shift masks. We compare these techniques based on Fourier optics. Both annular illumination and super-resolution filters improve the resolving power, because they suppress the background zero-frequency component of light intensity distributions. However, super-resolution filters slightly deteriorate the contrast as they enhance the undesirable double-frequency component. The resolving power of phase-shift masks is the largest of all, but we have to differ largely the minimum line width of unperiodic patterns from that of periodic patterns. This is unnecessary for annular illumination. We show that annular illumination enhances the resolving power at most 30 percents.

1. はじめに

半導体集積回路の集積度が増加するにつれ、より微細な回路パターンを加工するリソグラフィ技術が要求されてきている。現在、最小線幅 $0.8 \mu\text{m}$ である 4 Mbit DRAM (dynamic random access memory) の製造には、高圧水銀ランプの g 線 (波長 $0.436 \mu\text{m}$) を光源とする縮小投影露光装置 (ステッパ) が用いられている。次世代 16 MDRAM の最小線幅は $0.5 \mu\text{m}$ となり、g 線の波長とほぼ同程度となる。このため、光の回折および干渉により解像が困難になる。解像力を向上させるため、16 MDRAM ではより短波長である水銀ランプの i 線 (波長 $0.365 \mu\text{m}$) が用いられる。

さらに次の世代の 64 MDRAM では $0.3 \mu\text{m}$ 、その次の世代の 256 MDRAM では $0.2 \mu\text{m}$ のパターンを加工する技術が必要となる。通常の露光方法では光源の波長以下のパターンは解像できないので、64 MDRAM では KrF エキシマレーザー (波長 $0.248 \mu\text{m}$)、256 MDRAM

では ArF エキシマレーザー (波長 $0.193 \mu\text{m}$) あるいは X 線が露光用光源の候補となっている。しかし、これらの露光方法を実用化するためには、レーザー光源の安定化、レジスト特性の改善、ArF 露光用光学系の開発、X 線露光用マスクの開発など解決すべき問題が数多く残されている。256 MDRAM に対しては、電子線によるリソグラフィも候補に上っている。電子線は解像力が非常に大きく微細加工に適しているが、DRAM の大量生産に用いるためには、スループットを飛躍的に高める技術的なブレイクスルーが必要とされている。

現状では 64 MDRAM 以降のリソグラフィには技術的な問題が多く、どの方法が実用化されるかは確立されていない。このような状況において、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超解像技術が近年注目されている。ステッパの超解像技術には輪帯照明¹⁻⁵⁾、超解像フィルタ⁶⁾、位相シフトマスク⁷⁻¹¹⁾の3種類、およびこれらの組み合わせ^{12,13)}が考えられる。ここ数年來、位相シフトマスクが活発に研究されてきてい

るが、最近では輪帯照明や超解像フィルタのステッパへの応用も検討されつつある。本論文ではこれらの超解像技術をリソグラフィへ応用する際の利点、問題点を検討する。

第2章ではフーリエ結像論に基づき3種類の超解像技術の比較を行う。第3章では特に輪帯照明を取り上げ、輪帯照明を用いる場合のステップ光学系の開口数、コヒーレンス因子の最適値を求める。第4章にまとめを述べる。

2. 超解像技術の比較

最初にステップ光学系の簡単な説明をする。Fig. 1に概略を示す。水銀ランプ、エキシマレーザー等の光源を出た光は空間的に不均一な強度分布をしている。ビームコンプレッサにより一度ホモジナイザ(フライアイレンズ)手前に集光された光はホモジナイザを通過することにより強度分布が均一になる。ホモジナイザの射出端面は均一な強度分布で有限の大きさを持つ二次光源とみなすことができる。

ステップ光学系では、焦点はずれ位置での倍率誤差を消すために両側テレセントリック系を採用している。この場合、レチクルおよびウェファの両方で主光線は光軸に平行となる(Fig. 1参照)。二次光源の任意の点から発した光は照明レンズにより平行光となりレチクルを照

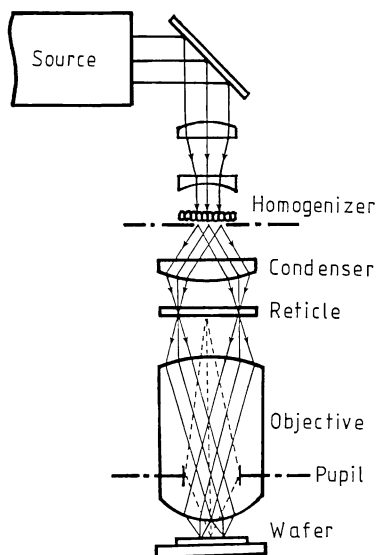


Fig. 1 A schematic illustration of the optical system of steppers, showing an illumination system (a source, a homogenizer, and a condenser lens), a reticle, an objective, and a wafer held on a stage.

らし、結像レンズの瞳面上で結像する。この二次光源の瞳面上の像は有効光源と呼ばれている。

レチクル透過光は結像レンズによりフーリエ変換され、瞳面上に変換像が生じる。フーリエ変換像の高周波数成分は有効光源および瞳が有限な大きさを持つためけられてしまい結像に寄与しない。ウェファ上の像は瞳面上のフーリエ変換像を逆フーリエ変換したものとなる。以上の内容を数式で表すとウェファ上の像の光強度分布 $I(\mathbf{v})$ は次のように書ける¹⁴⁾。

$$I(\mathbf{v}) = \iint T(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) \hat{i}(\mathbf{f}_1) \hat{i}^*(\mathbf{f}_2) \times \exp[-2\pi i(\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2)\mathbf{v}] d\mathbf{f}_1 d\mathbf{f}_2. \quad (1)$$

ここで $\hat{i}(\mathbf{f})$ はレチクル振幅透過率のフーリエ変換を表す。 $T(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2)$ は相互透過係数と呼ばれる量であり、有効光源の強度分布 $S(\mathbf{s})$ および瞳関数 $P(\mathbf{f})$ を用いて次のように書ける。

$$T(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) = \iint S(\mathbf{s}) P(\mathbf{s} + \mathbf{f}_1) P^*(\mathbf{s} + \mathbf{f}_2) \times \exp[\pi i \{(\mathbf{s} + \mathbf{f}_1)^2 - (\mathbf{s} + \mathbf{f}_2)^2\}] \delta(\mathbf{s}) d\mathbf{s}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中に現れるウェファ上の座標 \mathbf{v} およびデフォーカス δ は正規化されていて、実座標 \mathbf{V} および実際のデフォーカス Δ とは次の関係式で結ばれている。

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} \times \frac{\lambda}{NA}, \quad (3)$$

$$\Delta = \delta \times \frac{\lambda}{NA^2}. \quad (4)$$

ここで λ は光の波長、 NA は結像レンズの開口数を表す。

ウェファ上の光強度は有効光源の強度分布 S 、瞳関数 P 、およびレチクル振幅透過率 t の3種類の物理量で決定される。これに対応して超解像技術には輪帯照明、超解像フィルタ、位相シフトマスクの3種類が考えられる。以下これら3種類の超解像技術について検討する。

2.1 輪帯照明と超解像フィルタの比較

解像力の比較のため、開口部と遮光部の周期的な繰り返しパターンを考える。開口部と遮光部の線幅は同一の値 w を取るものとする。レチクルの振幅透過率 t は通常マスクでは

$$t(x, y) = \begin{cases} 1 & (2n-1/2)w \leq x \leq (2n+1/2)w \\ 0 & (2n+1/2)w \leq x \leq (2n+3/2)w \end{cases} \quad (5)$$

となる。ここで n は任意の整数を表す。式(5)をフーリエ変換すると

$$\hat{t}(f_x, f_y) = \left[\frac{1}{2} \delta(f_x) + \frac{1}{\pi} \{ \delta(f_x + f) + \delta(f_x - f) \} \right] \times \delta(f_y), \quad (6)$$

となる。寄与の小さい高周波数成分は無視している。基本周波数 f と線幅 w の間には次の関係が成り立つ。

$$f = \frac{1}{2w}. \quad (7)$$

像の光強度分布は式(6)を式(1)に代入して次のように簡単に求められる。

$$I(v) = \frac{1}{4}T(0,0) + \frac{2}{\pi^2}T(f, f) + \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} T(f, 0) \cos(2\pi f v) + \frac{2}{\pi^2}T(f, -f) \cos(4\pi f v), \quad (8)$$

$$f = (f, 0). \quad (9)$$

第1項と第2項は位置に依存しないバックグラウンド成分、第3項は基本周波数成分、第4項は倍周波数成分を表す。超解像で問題となる解像限界近傍の空間周波数では第2項は第1項に比べずっと小さくなる。像のコントラストは主に第1項と第3項とで決定される。解像力を向上させるためには第3項の第1項に対する比を大きくする工夫が必要となる。第4項の倍周波数成分は像を劣化させる原因となるため小さくすることが望まれる。

相互透過係数 $T(f_1, f_2)$ は式(2)で定義されているが、特にデフォーカス $\delta=0$ とすると簡単になり

$$T(f_1, f_2) = \int S(s)P(s+f_1)P^*(s+f_2)ds \quad (10)$$

のように有効光源 S と瞳 P との重なり積分で表される。それゆえ、有効光源あるいは瞳を変形すると相互透過係数、ひいては光強度分布が影響を受ける。

光源の形を輪帯状にすると $T(0,0)$ は通常光源に比べ小さくなる (Fig. 2 参照, 斜線部が積分範囲を示す)。

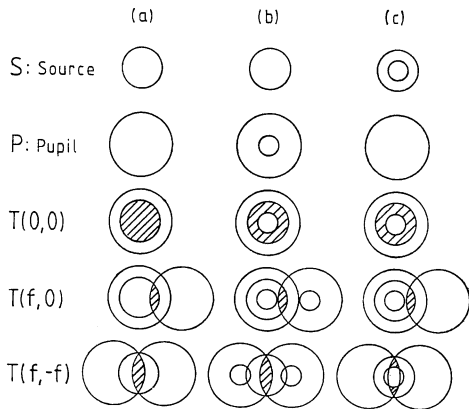


Fig. 2 Comparison of (a) the conventional method, (b) the super-resolution filter, and (c) the annular illumination. The sizes of hatched areas correspond to the values of $T(f_1, f_2)$ in Eq. (10).

一方、 $T(f, 0)$ は空間周波数 f が十分大きければ変わらない。このため解像力が向上する。この照明方法は輪帯照明と呼ばれている^{1-5,12,13}。光学顕微鏡で良く用いられる暗視野照明は輪帯照明の一種であり、輪帯状の有効光源の内径を瞳の直径より大きくして直接光が像面に入らないようにしたものである。

同様に、中心部を黒くしたフィルタを瞳面上に置いて瞳の中心を暗くすると $T(f, 0)$ と $T(0,0)$ との比が従来法に比べ大きくなり解像力が向上する。このようなフィルタは超解像フィルタと呼ばれている⁶。

倍周波数成分の生じる原因は $T(f, -f)$ にある。Fig. 2 より明らかなように、空間周波数 f が大きいとき超解像フィルタの倍周波数成分は輪帯照明に比べ大きくなる。このため超解像フィルタの解像力向上効果は輪帯照明に比べると劣る。

以下、定量的な議論をするため Fig. 3 に示すような4種類の照明およびフィルタを考える。従来法、輪帯照明、超解像フィルタおよび二重焦点フィルタ^{15,16}の比較をする。二重焦点フィルタは瞳関数を中心部と周辺部の両方で小さくしたものである。このため、このフィルタは超解像とアボダイゼーション⁶の両方の効果を持っている。Fig. 2 からすぐわかるように、二重焦点フィルタは超解像フィルタに比べ倍周波数成分の原因となる $T(f, -f)$ が小さくなる。

Fig. 4 に合焦点位置とデフォーカス $\delta=1$ の位置での光強度分布を示す。合焦点位置では Fig. 3 に示した4種類の方法に大きな差は見られないが、デフォーカスした場合、従来法に比べ他の3種類の方法のコントラスト

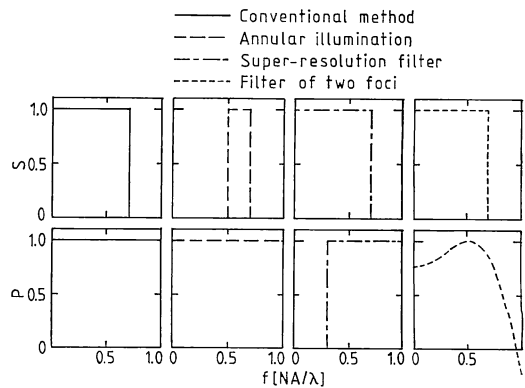


Fig. 3 The normalized intensities of effective sources S s and the transmittances of pupils P s for various methods as functions of normalized spatial frequency f . We assume that the filter of two-foci has the following transmittance: $P(f) = \cos(0.8\pi f^2 - 2/9\pi)$.

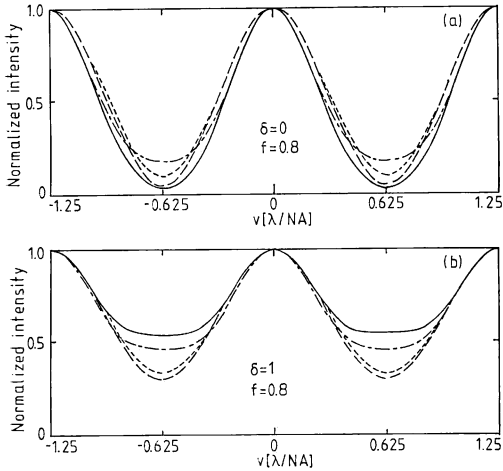


Fig. 4 Normalized intensities on the wafer. The curves are as in Fig. 3. We assume the coherence factor $\sigma=0.7$ and the spatial frequency $f=0.8 NA/\lambda$. The normalized defocus $\delta=0$ for (a) and 1 for (b).

が改善している。改善の度合いは輪帯照明および二重焦点フィルタが同程度で超解像フィルタはこれらに比べると小さい。

光強度分布の空間周波数成分を調べるため、次の2種類の特性関数 $M1$, $M2$ を定義する¹⁾。

$$M1 = \frac{\text{Re } T(\mathbf{f}, \mathbf{0})}{T(\mathbf{0}, \mathbf{0})}, \tag{11}$$

$$M2 = \frac{T(\mathbf{f}, -\mathbf{f})}{T(\mathbf{0}, \mathbf{0})}. \tag{12}$$

部分コヒーレント結像系ではしばしば $M1$ が光学系のMTFとされ重要視されるが、実際には $M2$ の影響も無視できない。 $M1$ が基本周波数成分の空間周波数特性を表すのに対し、 $M2$ は倍周波数成分の空間周波数特性を表している。**Fig. 5** と **Fig. 6** にそれぞれ $M1$ および $M2$ の計算結果を示す。輪帯照明を用いると合焦点位置では $f > 1$ において、デフォーカス位置では $f > 0.5$ において $M1$ は従来法に比べ大きくなる。 $M2$ は従来法に比べ常に小さい。それゆえ、高周波数領域でコントラストが大幅に改善される。一方、超解像フィルタの場合 $M1$ は輪帯照明同様に高周波数領域で大きくなるが、 $M2$ も同時に大きくなるため総合的な解像力向上効果は輪帯照明よりも劣る。

二重焦点フィルタを用いた場合、 $M1$ は合焦点位置では従来法に比べ小さいが、デフォーカス位置では $f > 0.5$ で従来法より大きくなる。これは二重焦点フィルタが焦点深度を深くする効果を持っているためであ

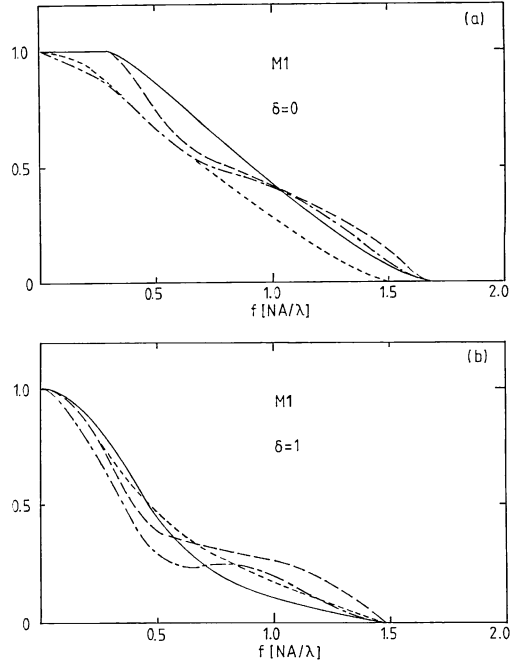


Fig. 5 Characteristic functions $M1$ defined by Eq. (11). The curves are as in Fig. 3. The coherence factor $\sigma=0.7$.

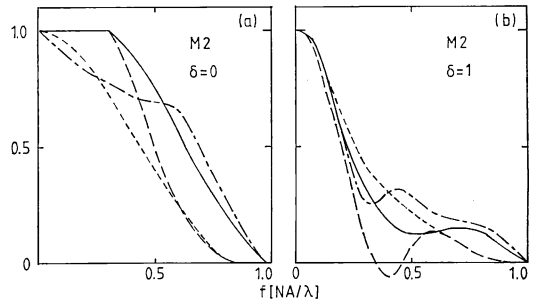


Fig. 6 Characteristic functions $M2$ defined by Eq. (12). The curves are as in Fig. 3. The coherence factor $\sigma=0.7$.

る^{15,16)}。また、 $M2$ は高周波数領域で従来法より小さくなるのでコントラストが大幅に改善する。

二重焦点フィルタは輪帯照明とほぼ同等の解像力向上効果を持っている。しかし、構造の単純さ、ステップ内への設置の容易さ等を考慮すると輪帯照明の方がより実用的であると考えられる。

2.2 輪帯照明と位相シフトマスクの比較

位相シフトマスクの原理を **Fig. 7** に示す。ここでは最も解像力向上効果の大きいレベンソン型位相シフトマスクを考える。レベンソン型位相シフトマスクでは、レチクル上の隣接開口部の片方にシフト材 (SiO_2 など) を

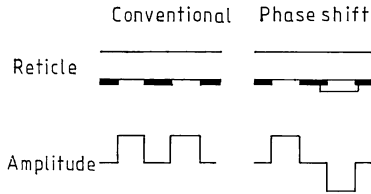


Fig. 7 The reticle structures and the transmission amplitudes of the conventional and phase-shift masks.

付着させ、シフタを透過する光の位相を 180° ずらしている。

開口部と遮光部の線幅が等しい繰り返しパターンの場合、通常マスクの振幅透過率が式(5)で与えられるのに対し、レベンソン型位相シフトマスクでは

$$\begin{aligned}
 t(x, y) &= 1 & (4n - 1/2)w \leq x \leq (4n + 1/2)w \\
 &= 0 & (2n + 1/2)w \leq x \leq (2n + 3/2)w \\
 &= -1 & (4n + 3/2)w \leq x \leq (4n + 5/2)w
 \end{aligned} \quad (13)$$

となる。式(13)をフーリエ変換して最低次の項のみを取り出すと

$$t(f_x, f_y) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[\delta\left(f_x + \frac{f}{2}\right) + \delta\left(f_x - \frac{f}{2}\right) \right] \cdot \delta(f_y) \quad (14)$$

となる。式(6)と式(14)を比較するとレベンソン型位相シフトマスクには空間周波数の 0 次成分 $\delta(f_x)$ が存在しないことがわかる。像のコントラストを下げる主要原因である 0 次成分が存在しないため、レベンソン型位相シフトマスクを用いると解像力が格段に向上する。

具体的に数値計算を行った結果を **Fig. 8** に示す。デフォーカス $\delta=0$ とおき、有効光源と瞳の半径の比を表すコヒーレンス因子 σ は通常マスクに対しては 0.6、レベンソン型位相シフトマスクに対しては 0.3 とした。こ

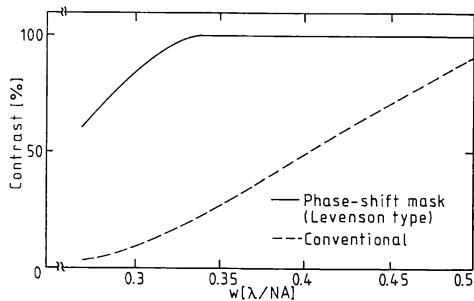


Fig. 8 The contrasts of line and space patterns as functions of the line width w . We assume the defocus $\delta=0$. The coherence factor σ is set to be 0.3 for the phase-shift mask and 0.6 for the conventional mask, respectively.

のようにした理由はレベンソン型位相シフトマスクの場合、 σ の小さい方が解像力がより向上することが知られているからである⁸⁾。

レベンソン型位相シフトマスクを用いると解像力は向上するが、適用可能なマスクパターンは制限される。レベンソン型位相シフトマスクでは隣接した開口部の位相差が 180° とならなければならない。Fig. 9 に示すように、DRAM のメモリセルのような周期的パターンに対しては、各開口部の位相シフト量を 0°, 180°, 0°, 180° と定めることにより、隣接開口部の位相差を常に 180° とすることが可能である。この場合、隣接開口部の線幅が等しくないため空間周波数の 0 次成分は完全には消えていない。しかし、通常法に比べ 0 次成分はずっと小さくなるため、レベンソン型位相シフトマスクを用いると解像力が向上する。

これに対し、周辺回路のような非周期的パターンでは、例えば Fig. 9 のようなパターンの場合、シフタをどのように配置してもすべての隣接開口部の位相差を 180° とすることが不可能である。それゆえ、このようなパターンに対してはレベンソン型位相シフトマスクを適用することはできない。

近年、この欠点を克服して解像力を確保しつつパターン自由度を広げるため、レベンソン型とは異なるさまざまな方式の位相シフトマスク⁹⁻¹¹⁾が提案され実験的検証がなされている。しかし、マスクの構造はレベンソン型より複雑になるため実用化するには多くの困難が伴うと予想される。

レベンソン型位相シフトマスクが非周期的パターンに対しては適用不可能な場合がある理由を上述述べた。輪帯照明は隣接開口部の位相差を考えなくても良いため任意のパターンに対して有効であるように思われるが、実はそうではない。例えば、次のように非常に小さな孤立した穴

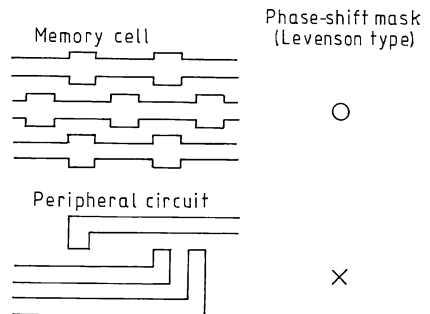


Fig. 9 Examples of the DRAM memory cell and peripheral circuit patterns.

$$t(x, y) = \delta(x)\delta(y) \quad (15)$$

を考慮することにする。このフーリエ変換は

$$i(f_x, f_y) = 1 \quad (16)$$

となる。このため $i(\mathbf{f})$ は \mathbf{f} に依存しない定数となる。

これを式(1)に代入して、さらに

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}' - s, \quad (17)$$

$$\mathbf{f}_2 = \mathbf{f}' - s. \quad (18)$$

と変数変換した後まとめると

$$I(\mathbf{v}) = \int S(\mathbf{s}) d\mathbf{s} \left| \int P(\mathbf{f}') \exp[\pi i(\mathbf{f}'^2 \delta - 2\mathbf{f}' \cdot \mathbf{v})] d\mathbf{f}' \right|^2 \quad (19)$$

となる。それゆえ、有効光源をいくら変形しても光強度分布はその大きさが変わるだけで形は変わらない。この場合でも、光強度分布の形は瞳関数に依存するので瞳フィルタリング¹⁶⁾を用いれば超解像効果を得ることができる。例として孤立した小さな穴を考えたが、同様なことが孤立した細い線についてもいえる。

先に述べたように、DRAM の場合メモリセル部は周期的パターンだが周辺回路部は非周期的パターンとなる。このため、位相シフトマスクあるいは輪帯照明を用いる場合、解像力の向上しない周辺回路部の最小線幅をメモリセル部の最小線幅より太くする必要はある。通常、周辺回路部の最小線幅はメモリセル部の最小線幅より太くなっているが、その差をあまり大きくすることはできない。

位相シフトマスクとコヒーレンス因子の小さなステップを用いればメモリセル部の最小線幅を非常に小さくできる。例えば、Fig. 10 よりわかるように $\sigma = 0.4$ で位相シフトマスクを用いると、焦点深度 $\pm 0.5\lambda/NA^2$ (コ

ントラスト 60%) がとれる最小線幅は $0.3\lambda/NA$ となる。しかし、この場合位相シフト法を用いることのできない周辺回路部の最小線幅は $0.6\lambda/NA$ とメモリセル部の2倍になってしまう。

従来法の解像力は σ の大きい方が良いので、2種類の最小線幅の差を縮めるために σ を大きくすると、今度は逆に位相シフト法の効果が薄れてしまう。 $\sigma = 0.7$ では位相シフト法と従来法の差はほとんどなく最小線幅はどちらも $0.5\lambda/NA$ 程度になってしまう。

一方、輪帯照明は σ が大きくても解像力向上効果が大きい。輪帯照明の $\sigma = 0.7$ での最小線幅は $0.43\lambda/NA$ ほどになり 15% 程度の実効解像力向上が見込まれる。これを σ を小さくした場合の位相シフトマスクに比べると解像力向上効果は小さいが、メモリセル部と周辺回路部の最小線幅を大きく変える必要がないので、回路のデザインはずっと容易になると考えられる。

3. 輪帯照明における開口数とコヒーレンス因子の最適化

前章の議論より輪帯照明を用いると光学系の解像力が向上することがわかった。ステップ光学系の場合、レジストの膜厚や半導体素子の立体構造のため焦点深度も重要な要素となり、一定の焦点深度を確保した上での実効解像力が問題となる。本章では定量的な数値計算により輪帯照明を用いた場合に最も実効解像力が向上する開口数 NA とコヒーレンス因子 σ の値を求める。

先に述べたようにコヒーレンス因子 σ は有効光源と瞳の半径の比で定義されている。正規化座標を用いると瞳の半径は 1、有効光源の半径は σ となる。すると通常照明の場合、瞳関数 $P(\mathbf{f})$ および有効光源の強度分布 $S(\mathbf{s})$ は次のように表される。

$$P(\mathbf{f}) = \begin{cases} 0 & |\mathbf{f}| \leq 1 \\ 1 & 1 \leq |\mathbf{f}| \end{cases} \quad (20)$$

$$S(\mathbf{s}) = \begin{cases} 1 & |\mathbf{s}| \leq \sigma \\ 0 & \sigma \leq |\mathbf{s}| \end{cases} \quad (21)$$

光源の強度は 1 に規格化しておいた。輪帯照明の場合、光源の半径に対する中心暗部の半径の比を a とすると有効光源の強度分布は次のように変形される。

$$S(\mathbf{s}) = \begin{cases} 0 & |\mathbf{s}| \leq \sigma a \\ 1 & \sigma a \leq |\mathbf{s}| \leq \sigma \\ 0 & \sigma \leq |\mathbf{s}| \end{cases} \quad (22)$$

パラメータ a の動く範囲は

$$0 \leq a \leq 1 \quad (23)$$

であり、特に $a = 0$ の場合には中心暗部が存在しない

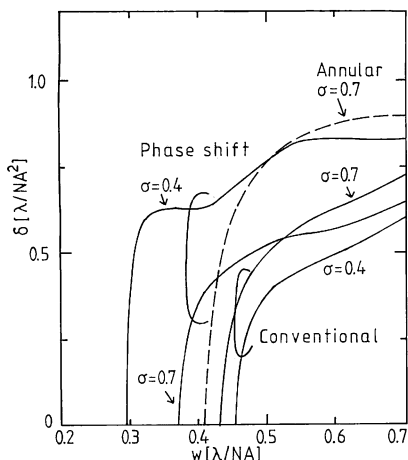


Fig. 10 The defocus δ where the contrast of line and space patterns is 60 percents.

め通常照明と同一となる。式(20)と式(22)を式(2)に代入して輪帯照明に対する相互透過係数 $T(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2)$ が計算できる。マスクパターンが開口部と遮光部の周期的な繰り返しの場合の像のコントラスト C を開口部中心での光強度 $I(0)$ と遮光部中心での光強度 $I(\mathbf{w})$, $\mathbf{w}=(w, 0)$, の両者を用いて次のように定義する。

$$C = \frac{I(0) - I(\mathbf{w})}{I(0) + I(\mathbf{w})} \quad (24)$$

式(8)を式(24)に代入するとコントラストは相互透過係数を用いて次のように書ける。

$$C = \frac{8/\pi \operatorname{Re} T(\mathbf{f}, 0)}{T(0, 0) + 8/\pi^2 [T(\mathbf{f}, \mathbf{f}) + T(\mathbf{f}, -\mathbf{f})]} \quad (25)$$

相互透過係数は式(2)のような二重積分なので容易に数値計算が実行できる。

現像後にレジストが解像するためには、レジストの性質にもよるが、光強度のコントラストとして通常60%以上必要とされている。それゆえ、線幅 w (空間周波数 f とは式(7)により一対一対応している) のときの焦点深度 d は、式(25)のコントラストが60%となるようなデフォーカスを δ (60%) とすると

$$d = 2\delta(60\%) \quad (26)$$

となる。正規化座標を用いているため、式(25)は NA には直接依存しないが、 σ および a には依存している。パラメータ a を固定して σ を動かすと焦点深度 d の最大値が求まる。このときの σ の値が σ の最適値となる。 σ として最適値を選んだ場合の線幅 w と焦点深度 d との関係を図 11 に示す。輪帯照明により中心暗部の大きさを大きくすると焦点深度が増加することがわかる。

以上の計算でコヒーレンス因子 σ の最適値が求められ

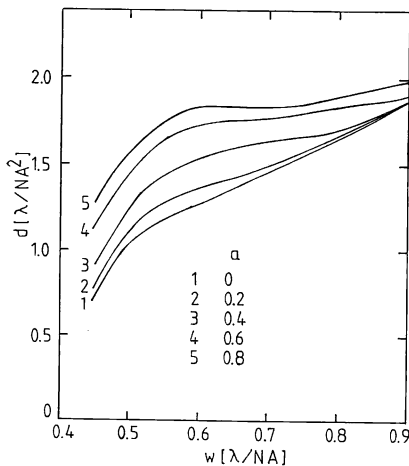


Fig. 11 Depths of focus of several annular illuminations as functions of the line width w .

たので、次に開口数 NA の最適化を行う。これまで正規化座標を用いてきたため、 NA は式に直接現れてはこなかった。ここで座標を実座標に戻しておくとき実際の線幅 W と焦点深度 D は次のようになる。

$$W = w \frac{\lambda}{NA}, \quad (27)$$

$$D = d \frac{\lambda}{NA^2}. \quad (28)$$

リソグラフィにおいては、プロセス上解像力とともに一定の焦点深度を確保する必要がある。そこで焦点深度 D を定数と考えると、式(27)および式(28)は次のように書き直される。

$$W = \frac{w}{\sqrt{d}} \sqrt{\lambda D}, \quad (29)$$

$$NA = \sqrt{d} \sqrt{\lambda / D}. \quad (30)$$

正規化座標を用いた場合の w と d との関係は Fig. 11 により与えられているので、これを式(29)に代入して λ/NA で規格化したときの線幅 w と $\sqrt{\lambda D}$ で規格化したときの線幅 W との関係が求められる (Fig. 12)。この図における W の最小値が必要な焦点深度 D を確保した条件における解像可能な最小線幅 W_0 となる。このときの開口数 NA は式(30)により与えられ、これが NA の最適値となる。

Fig. 13 はパラメータ a を変えた場合の解像可能な最小線幅 W_0 , および開口数 NA とコヒーレンス因子 σ の最適値を示したものである。光源の中心暗部の大きさを大きくすると最小線幅は単調に減少して、 $a=1$ では $a=0$ の場合に比べて約 3/4 倍になっている。解像力は最小線幅の逆数なので約 30% 解像力が向上することになる。このとき必要な NA は増加し、 σ は逆に減少する。

Table 1 には焦点深度 $D=1.6 \mu\text{m}$ とした場合の i

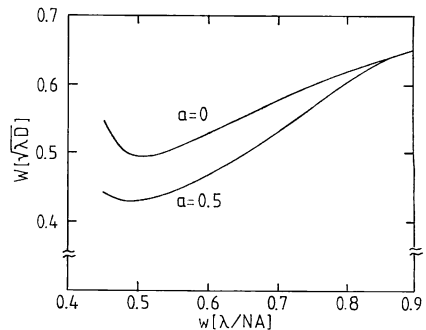


Fig. 12 The relation of W and w . They both represent the line width but have different normalizations $\sqrt{\lambda D}$ and λ/NA , respectively.

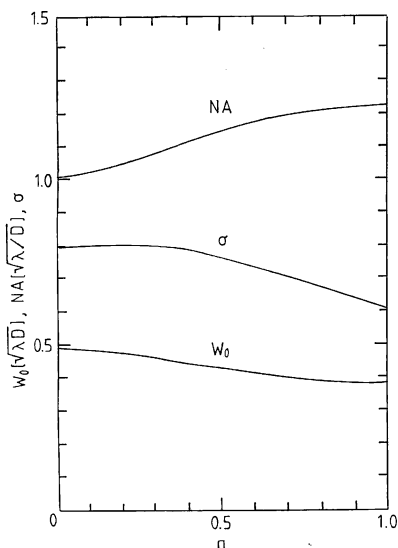


Fig. 13 The effective resolution W_0 and the corresponding optimum values of NA and σ as functions of α .

Table 1 Effective resolution W_0 and optimum values of NA and σ for i-line, KrF or ArF excimer laser illumination.

	α	W_0 (μm)	NA	σ
i-line	0	0.38	0.49	0.8
	0.2	0.37	0.50	0.8
	0.4	0.34	0.53	0.78
	0.6	0.32	0.57	0.74
	0.8	0.30	0.58	0.7
	0.95	0.29	0.59	0.65
KrF	0	0.31	0.40	0.8
	0.2	0.30	0.41	0.8
	0.4	0.28	0.44	0.78
	0.6	0.26	0.47	0.74
	0.8	0.25	0.48	0.7
	0.95	0.24	0.49	0.65
ArF	0	0.27	0.35	0.8
	0.2	0.27	0.36	0.8
	0.4	0.25	0.39	0.78
	0.6	0.23	0.41	0.74
	0.8	0.22	0.42	0.7
	0.95	0.21	0.43	0.65

線, KrF, および ArF エキシマレーザー光源に対する W_0 , NA , および σ の値を具体的に示した。輪帯照明を用いることにより, i 線を光源として用いても $0.3 \mu\text{m}$ のパターンを解像できる可能性がある。式(29)より明ら

かなように焦点深度 D を固定すると線幅は $\lambda^{1/2}$ に比例する。短波長化することにより最小線幅は減少するがその効果は $\lambda^{1/2}$ にしか比例せず, 通常照明では ArF エキシマレーザーを光源としても $0.27 \mu\text{m}$ までしか解像できない。輪帯照明を用いることにより $0.2 \mu\text{m}$ 近傍まで解像可能となり, 256 MDRAM 用のリソグラフィとしての可能性が出てくる。このとき必要な開口数はそれ程大きくなく $NA=0.4$ 程度でよい。

以上の議論はプロセスに必要な焦点深度を $1.6 \mu\text{m}$ と仮定したので, 多層レジスト等の新プロセスを用いて必要な焦点深度を小さくできるならば結論は全く異なってくる。式(29)よりわかるように, 必要な焦点深度 D を小さくすると最小線幅は $D^{1/2}$ に比例して小さくなる。

4. ま と め

i 線ステッパの解像力は通常の露光方法では 16 MDRAM で限界となるため, 64 MDRAM 以降のリソグラフィが現在模索されている。それらの中の一つの可能性として3種類の超解像技術を今回検討した。

超解像フィルタと輪帯照明とは両者とも相互透過係数の周波数依存性を変え, 光強度分布の高周波数成分を強調するという同一の超解像原理に基づいている。しかし, 超解像フィルタの場合, 倍周波数成分が原因となり解像力はあまり向上しない。より複雑な構造の二重焦点フィルタを用いると輪帯照明と同程度の解像力向上効果が得られる。

レベンソン型位相シフトマスクは非常に解像力向上効果が大きく, i 線光源でも $0.2 \sim 0.25 \mu\text{m}$ サイズの周期的パターンを解像可能である。しかし, レベンソン型位相シフトマスクは適用可能なマスクパターンに制限がある。コヒーレンス因子を下げれば位相シフト法を適用可能なメモリセル部の解像力が増加する反面, 適用不可能な周辺回路部の解像力が減少する。このため, メモリセル部と周辺回路部の最小線幅を大きく異なったものにする必要がある。

輪帯照明を用いると解像力を従来法に比べ最大約 30% 向上可能である。それゆえ, i 線ステッパでも 64 MDRAM で必要とされる最小線幅 $0.3 \mu\text{m}$ を解像できる可能性がある。最近, 数件の実験報告²⁻⁵⁾がなされ解像力向上効果が確認されている。

超解像は光学では古くから知られている現象であるが, リソグラフィへの応用は検討が始まってから日が浅い。今後さらに多くの研究がなされることが期待される。

本研究を進めるにあたり、議論していただいた当所の岸田俊二、小椋行夫、川上威氏に感謝いたします。Fig. 1は川上氏に提供していただきました。

文 献

- 1) 山本公明, 一岡芳樹, 鈴木達朗: “部分的コヒーレント照明下における Defocus 光学系の結像特性”, 応用物理, **44** (1975) 1266-1277.
- 2) D. L. Fehrs, H. B. Lovering and R. T. Scruton: “Illumination modification of an optical aligner,” KTI Microelectronics Seminar (1989) pp. 217-230.
- 3) 浅井 了, 羽入 勇, 彦坂康己: “解像力向上のための光源形状の検討”, 秋季応物予稿集 (1991) p. 600.
- 4) 加門和也, 藤原啓司, 永田一志, 宮本照雄, 名井康人, 田中正明: “変形光源を用いた縮小投影露光法”, 秋季応物予稿集 (1991) p. 600.
- 5) 田辺容由, 東内圭一郎, 小椋行夫, 岸田俊二: “超解像リソグラフィ”, 秋季応物予稿集 (1991) p. 601.
- 6) 辻内順平: 光学技術ハンドブック, 久保田他編 (朝倉書店, 1968) p. 172.
- 7) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson: “Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask,” IEEE Trans. Electron. Devices, **29** (1982) 1828-1836.
- 8) 福田 宏, 岡崎信次: “超解像光リソグラフィー”, 光学, **19** (1990) 290-294.
- 9) 橋本耕治, 佐藤 隆, 柴田 剛, 重光文明, 仁田山晃寛, 中瀬 真: “セルフアライン形成されたシフトをもつ新位相シフトマスク”, 春季応物予稿集 (1990) p. 474.
- 10) 渡辺尚志, 戸所義博, 井上森雄, 平井義彦, 松岡晃次, 野村 登: “透過型位相シフトマスク”, 秋季応物予稿集 (1990) p. 490; “多段型位相シフターによるパターン形成”, 同上 (1990) p. 491.
- 11) H. Tanabe: “Three-phase photomask,” J. Photopolym. Sci. Technol., **4** (1991) 125-126.
- 12) 松尾誠太郎, 竹内良巨, 小松一彦, 為近恵美, 三村義昭, 原田勝征: “斜入射照明を用いた投影露光法”, 秋季応物予稿集 (1991) p. 602.
- 13) 野口 稔, 見坊行雄: “共役型空間フィルタによるステッパの解像度向上”, 秋季応物予稿集 (1991) p. 603.
- 14) 伊藤徳久: “ステッパの光学”, 光技術コンタクト, **27** (1989) 762-771; **28** (1990) 59-67; **28** (1990) 165-175.
- 15) J. Tsujiuchi: “Correction of optical images by compensation of aberration and by spatial frequency filtering,” Progr. Opt., **2** (1963) 131-180.
- 16) 福田 宏, 寺澤恒男: “光学的フィルタリングによる焦点深度と解像度の改善”, 春季応物予稿集 (1991) p. 534.