

i 線位相シフトマスク検査装置

Inspection Machine for i-line Phase Shift Mask

大橋 勝樹
K. Oohashi

藤原 剛
T. Fujiwara

山根 武
T. Yamane

i 線ステツパで露光波長 ($0.365\mu\text{m}$) 以下の $0.35\sim 0.30\mu\text{m}$ のパターンを製作するために、位相シフトマスクが開発されている。このマスクでは、パターンを位相シフタで形成し、光の干渉を利用して微細パターンを露光する。位相シフタは透過率と位相量が重要で、かつ波長により特性が大きく変わる。そこで、これらを露光波長で検査する i 線位相シフトマスク検査装置を開発した。透過率はガラスの透過率との比較で測定し、その測定再現性は $\pm 0.05\%$ である。位相量測定は生物の内部構造を明瞭(りょう)に可視化できる透過型微分干渉顕微鏡の原理を応用して行い、位相量を高精度に得るために縞(しま)走差干渉法を用いた。測定再現性は ± 1 度で、膜厚に換算すると $\pm 0.8\text{nm}$ に相当する。

The phase shift mask has been developed to produce patterns with a minimum size of 0.35 to $0.30\mu\text{m}$. This size is smaller than the printed light source i-line of the Hg lamp, which has a wavelength of $0.365\mu\text{m}$. In this mask, the pattern is made up of the phase shifter, and the minute image is formed by this shifter using optical interference. The transmittance and the phase quantity of the shifter are very important, and its properties are closely connected to the light source wavelength.

We have therefore developed an inspection machine for the i-line phase shift mask. This machine measures the transmittance in order to make a comparison between the transmitted intensity of quartz and the shifter. The repeatability is $\pm 0.05\%$. We measured the phase shift quantity applying the principle of the differential interference microscope, and used the fringe scanning interference method to obtain high accuracy. The repeatability is ± 1 degree, corresponding to the thickness accuracy of the phase shift film of $\pm 0.8\text{nm}$.

1 まえがき

半導体の大容量化とともにその素子はますます微細化しており、まもなく市場に登場する 64 M ビット DRAM の最小線幅は $0.35\sim 0.30\mu\text{m}$ と言われている。ウェーハに転写できるパターンの最小線幅は、投影レンズの開口数に反比例し、露光光源の波長に比例する。そのため露光装置のレンズの高開口数化と、光源を Hg ランプの g 線 ($0.436\mu\text{m}$) から i 線 ($0.365\mu\text{m}$) へと短波長化を行い、高集積大容量化に対応してきた。

しかし、64 M ビット DRAM などの最先端の半導体では、露光波長以下の最小線幅が必要になってきたため、これらのほかに二つの微細パターン製造技術が開発されている。一つは露光用マスクの照明方法で、詳細は省略するが変形照明法と呼ばれている。もう一方はマスク技術で、従来の透過と遮光だけのマスクに代わる光の干渉を利用した位相シフトマスクである。

位相シフトマスクは高解像度だが、位相シフタの透過率と位相量およびこれらの面内均一性が重要で、これらの検査が従来の欠陥検査⁽¹⁾に加えて新たに必要になった。そこで、これらを検査するために、図 1 に示すような i 線位相シフトマスク検査装置 OFS-i を開発した。

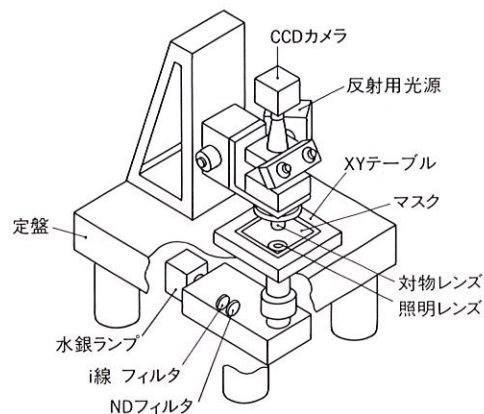


図 1. i 線位相シフトマスク検査装置 OFS-i の構成 Hg ランプの i 線 (波長 $0.365\mu\text{m}$) を用いて i 線位相シフトマスクの透過率と位相シフト量を検査する。

Schematic of i-line phase mask inspection machine

2 位相シフトマスク

従来のマスクでは、パターンが細くなると隣り合う開口から出た光どうしが互いに干渉して、パターンが解像できなくなる。これに対して位相シフトマスクでは、光の位相を逆に利用して微細なパターンを転写できる。

開口の半分が他方に対して 180 度位相がずれていると、その回折像（レンズによる像も同様）には位相段差の境界に鋭い暗線が現れる⁽²⁾。このような現象を利用した位相シフトマスクの原理は、1982 年レベンソンらにより最初に提案された。その後、補助パターン型、エッジ強調型、シフトエッジ利用型、ハーフトーン型の数タイプが提案されている⁽³⁾。ここでは詳細は省略するが、それぞれ特徴があり適用できるパターンにも違いがある。

このうちハーフトーン型は、従来の遮光部分を透過率 5~20 % で位相量が 180 度になるような半透明膜に代えたマスクである。このマスクは解像度向上効果はレベンソン型などに比べて低いが、次の 3 点の長所をもち、もっとも実用化が早いと予想されている。①適用できないパターンは特にない。②パターン配置に従来と同一の CAD (Computer Aided Design) が使用できる。③欠陥検査および修正が従来技術の延長上で対応できる。ただし、ハーフトーン型の位相シフトは透過率と位相量の組合せの最適解が存在するため、位相シフト量だけでなく透過率の検査も必要である。

3 i 線位相シフトマスク検査装置 OFS-i

前述のとおりハーフトーン型の位相シフトマスクでは、位相シフトの透過率と位相量およびそれらの面内均一性が重要で、これらの検査装置が強く要望されている。

そこで、われわれは図 1 に示した i 線位相シフトマスク検査装置 OFS-i を開発した⁽⁴⁾。ステップと同じ条件で検査するため、照明光は超高圧 Hg ランプから干渉フィルタを用いて取り出した i 線である。これをマスクに照明し、CCD (電荷結合素子) カメラでその像を撮像する。このカメラは、微弱な紫外光を高感度に検出する紫外線対応冷却 CCD である。

なお、この装置はマスク 1 枚当たり数点を検査する目的で開発した。パターンの局所的な透過率および位相の変化は、パターン欠陥として従来の欠陥検査装置で検出する。この装置の仕様を表 1 に示す。以下ではそれぞれの機能についてその測定原理および結果を述べる。

3.1 透過率検査

透過率検査は、パターン製作前に、全面ハーフトーン膜のマスクに対して行う。最初にマスクと同一厚さの石英ガラス板の透過強度を測定し、次にハーフトーンマスクの透

過強度を測定し、両者の比から透過率を算出する。

ハーフトーン膜の透過率およびその面内均一性の規準は、半導体メーカにより異なるようであるが、透過率はおおむね 5~20 % 程度である。われわれは必要な透過率に対して、許容範囲をその 1/10、検査ではさらにその 1/5 の繰返し測定精度が必要と考えた。そこで、この検査装置の透過率測定仕様は、透過率 5 % のハーフトーン膜の場合、繰返し測定精度はその 1/50 で 0.1 % (±0.05 %) とした。この測定精度は、ガラスの透過強度に対してその 1/2,000 を測定する必要があり、きわめて高精度なものである。

透過率検査機能の評価として、ハーフトーン型の位相シフトマスクをサンプルとして次の二つを行った。

第一は透過率測定機として一般的な分光光度計との透過率測定値の比較である。測定は 4 枚のマスクの合計 11 点について行った。結果を表 2 に示す。両者はよく一致し、その差は最大 0.1 %、平均 0.04 % だった。この差の一因は両者の測定方法に違いがあるためと考えられる。分光光度計は直径約 10 mm の領域の平均透過率を測定するのに対し、OFS-i は数 μm 角の領域の平均透過率を測定している。言い替えば、OFS-i は面内分解能が高い透過率測定ができる。

第二は同一点の繰返し測定精度である。おのおのの測定点の日間差を知るために、3 日間で合計 9 回測定した。結果を表 3 に示す。繰返し再現性については、ばらつき (最大-最小) が 4 点ともすべて仕様の ±0.05 % 以内に入り、透過率測定が安定にできていることが確認できた。

表 2. 分光光度計との透過率の比較

Comparison of transmittance with spectroscope

サンプル No.	分光計 (%)	OFS-i (%)	差 (%)
1	4.44	4.46	0.02
2	4.50	4.44	-0.06
3	4.47	4.52	0.05
4	4.44	4.53	0.09
5	4.38	4.44	0.06
6	5.04	5.08	0.04
7	4.71	4.76	0.05
8	4.53	4.59	0.06
9	4.34	4.44	0.10
10	5.11	5.16	0.05
11	4.93	4.94	0.01

表 3. 透過率測定繰返し再現性

Transmittance measurement repeatability

測定点	平均透過率 (%)	最大-最小 (%)
a	6.12	0.07
b	6.03	0.06
c	4.81	0.07
d	5.41	0.06

表 1. OFS-i の仕様 (検査機能と繰返し再現性)

Specifications of OFS-i (function and repeatability)

機能	繰返し再現性
透過率	±0.05 % (透過率 5 % のシフトのとき)
位相量	±1 度

3.2 位相量検査

位相シフト量の面内均一性の規準は、透過率同様半導体メーカーにより異なるようであるが、おおむね±5度程度と想定した。検査ではその1/5の繰返し測定精度が必要と考え、この検査装置の位相量測定繰返し再現性の仕様は±1度とした。これを膜厚に換算すると、わずか±0.8 nmで、非常に高精度な測定が必要である。

位相量検査はパターン製作後に行い、位相量の測定は、透過型の微分干渉顕微鏡の原理を応用して行う。この顕微鏡は生物の内部構造を明瞭に可視化でき、組織中の屈折率が不均一な部分や、厚さの変化が透過強度の違いとして得られる。

位相測定光学系を図2示す。ランプからの出射光から偏光子により直線偏光を得る。これをノマルスキープリズムと呼ばれる偏光プリズムと呼ばれる偏光プリズムで二つの偏光(光の進行方向から見て縦と横)に分ける。そして両者をコンデンサレンズでマスクに照明すると、わずかに横ずれ(シアリング)した二つの照明エリアができる。マスクからの透過光を対物レンズでノマルスキープリズムに集め、二つの照明光を重ね合わせる。そして検光子を通過させると両者は干渉し、CCDカメラ上にマスクのシアリング干渉像が得られる。

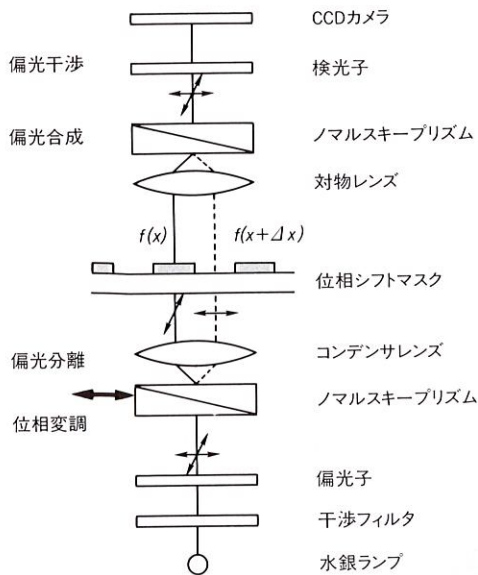


図2. 位相測定光学系 生物顕微鏡の原理を応用し、ノマルスキープリズムを用いたシアリング干渉光学計で位相シフト量を測定する。

Optical system for measuring phase

図3に CCD カメラ(冷却型)で撮像した干渉像を強度に応じて色付けして示す。中心強度が高く周辺ほど強度が低いのは照明むらである。強度が高くオレンジ色に色付けされた所がガラス部分で、強度が低い所がシフト部分である。両者の境界はガラスと位相シフトとの干渉部分で、ほかの

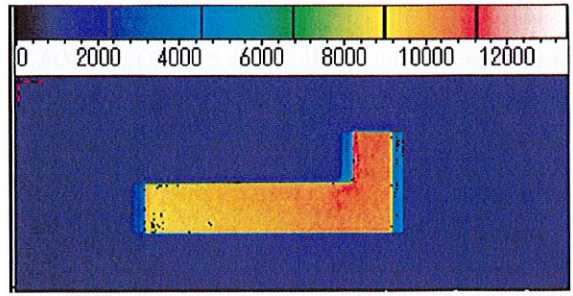


図3. CCDカメラで撮像した位相シフトマスクのシアリング干渉像 オレンジに色付けされた強度の強い部分がガラス、暗い部分がハーフトーン位相シフトで、その境界部分が両者が干渉した部分。

Shearing interferogram of phase shift mask by CCD camera

部分とは強度が大きく異なる。

ガラスどうしまたは位相シフトどうしの干渉光強度は、

$$I_1 = a_1 + b_1 \cos \alpha \quad (1)$$

ガラスと位相シフトとの干渉光強度は、

$$I_2 = a_2 + b_2 \cos(\alpha + \phi) \quad (2)$$

と表すことができる。 a_1, a_2 は平均強度、 b_1, b_2 はコントラストを表す。 α はマスクを照明している二つの偏光間の位相差で、 ϕ が位相シフトの位相量である。 a_1 と a_2, b_1 と b_2 がそれぞれ同一であれば、干渉光強度 I_1 と I_2 の比較だけで位相 ϕ は特定できる。しかし、ガラスと位相シフトの透過強度は大きく異なり、かつ照明の強度分布もあるため、 a_1 と a_2 は異なり、 b_1 と b_2 も異なる。また、強度の時間変動があり a_1, a_2, b_1, b_2 ともに変動するため、 I_1 と I_2 の比較だけでは高精度な位相量測定は困難である。

そこで、位相量の測定にはフーリエ変換理論を基本原理とする縞走差干渉法⁽⁵⁾を用いた。詳細は参考文献にゆずるが、ここでは原理を簡単に述べる。式(1)、(2)の偏光間の位相差 α を意図的に変化させる(これを位相変調と呼ぶ)と、図4に示すように位相差 α に対して干渉光強度 I_1, I_2 は正弦波状に変化する。図中 I_1, I_2 は式(1)、(2)に対応する。この二つの正弦波の位相差が測定すべき位相シフト量 ϕ である。フーリエ変換の理論に基づき、正弦変動する I_1, I_2 の初期位相をそれぞれ算出し、両者の差を取ることで位相量 ϕ を算出する。

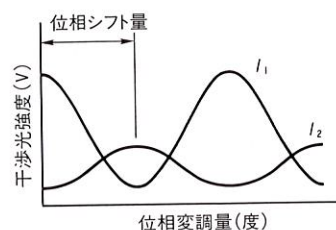


図4. 位相変調による位相検出 干渉光の位相を意図的に変調して干渉強度を正弦変動させ、位相を求める。

Phase detection by phase modulation

実際には次のように行う。図2で、ノマルスキープリズムを光軸と垂直な方向に移動させると、式(1)、(2)の偏光間の位相差 α がプリズム移動量に比例して変化する。位相差 α が360度変化する量を4等分して、一定間隔でステップ的にプリズムを移動させ、そのつど干渉像をCCDカメラで撮像し、強度をコンピュータに取り込む。そして、ガラスどうしの干渉部分およびガラスと位相シフトとの干渉部分の強度から上述の位相検出法で位相シフト量を算出する。

位相測定機能の評価は次の2点で行った。

第一は、OFS-iで測定した位相量と、触針式形状測定機で測定した位相シフトの厚さから換算した位相量との比較である。測定対象は、前章で述べたシフトエッジ利用型の位相シフトマスクである。ハーフトーン型の位相シフトは、半透明膜の屈折率がマスクごとに異なるが、シフトエッジ利用型の位相シフトは、材質が石英で屈折率が一定のため、シフトの厚さから位相量がわかる。

測定したシフトは9個で、それぞれ厚さが異なる(ただし、そのうち二つはほぼ同じ厚さ)。使用した形状測定機はアルファステップで、測定分解能は約5nmである。両者の比較を図5に示す。両者はほぼ一致し、OFS-iはシフト位相を測定できていることが確認できた。わずかに相違があるが、その原因はアルファステップの分解能にあると考えられる。5nmは位相に換算すると6度以上で、アルファステップの精度はOFS-iをはるかに下回る。

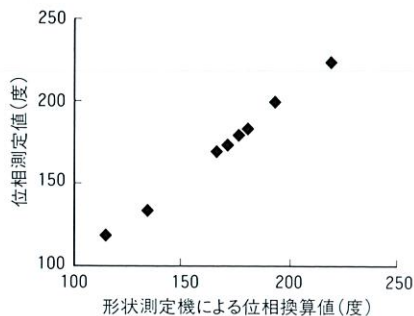


図5. 触針式形状測定機による位相換算値との比較 触針式形状測定機の分解能が低いため、両者にわずかな相違があるがほぼ一致した。
Comparison with converted phase value by stylus profiler

第二は、ハーフトーン型位相シフトマスクの位相量の繰返し測定再現性である。短期と長期の繰返し再現性を評価した。前者では連続5回測定を行い、後者では8日間で合計10回測定した。結果を表4に示す。前者のばらつき(最大-最小)は0.5度以内であった。後者のばらつきは2.1度で仕様の2度とほぼ同等であった。なお、測定した位相シ

フトの透過率は約5%と低い。そのためシフトエッジ利用型では、干渉信号のコントラストがハーフトーン型に比べて大幅に増大し、位相測定繰返し再現性も向上する。

表4. ハーフトーン型位相シフトの位相測定繰返し再現性
Phase measurement repeatability

評価項目	平均値(度)	最大-最小(度)
短期再現性	172.66	0.48
長期再現性	172.49	2.10

4 あとがき

露光波長以下の微細パターンを製作する技術として、位相シフトマスクという新しいマスクが開発されている。そして、このマスク開発で強く要望されている位相シフトの透過率と位相量を検査するために開発したOFS-iを紹介した。透過率を繰返し再現性±0.05%で、位相シフト量を±1度で測定する機能をもつ高精度な検査装置である。

今後は256MビットDRAMをターゲットとしたエキシマレーザーステップ用位相シフトマスク検査装置が必要になってくると思われる。

文 献

- (1) 井上 広, 他: サブミクロン対応パターン欠陥検査装置の開発, 第7回「外観検査の自動化」ワークショップ, pp.109-112 (1995)
- (2) 久保田広: 波動光学, p.286, 岩波書店 (1971)
- (3) 桑原 理: 特集: リソグラフィ技術の最先端(1), マスク技術, O plus E, 182, pp.92-98 (1995)
- (4) 藤原 剛, 他: 紫外光によるマスク位相・マスク像質測定, 第41回春期応用物理学会予稿集, p.533 (1994)
- (5) 武田光夫: サブプリング干渉計測基礎論, 光学, 13, 1, pp.55-65 (1984)



大橋 勝樹 Katsuki Oohashi

生産技術研究所生産システム技術研究部研究主務。
半導体検査装置の研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Manufacturing Engineering Research Center



藤原 剛 Takeshi Fujiwara

生産技術研究所生産システム技術研究部。
半導体検査装置の研究・開発に従事。日本光学会, レーザ学会会員。
Manufacturing Engineering Research Center



山根 武 Takeshi Yamane

半導体生産技術推進センター半導体プロセス技術第二部。
半導体用フォトマスクの評価技術開発に従事。応用物理学会会員。
Semiconductor Manufacturing Engineering Div.