

# ArF エキシマレーザー光に対する石英の耐久性と結像性能への影響

高橋 和弘・橋口 英則

## Investigation of Compaction and Rarefaction of Fused Silica with ArF Laser Exposure and Their Effects on the Imaging Performance of Projection Optics for Stepper

Kazuhiro TAKAHASHI and Hidenori HASHIGUCHI

Fused silica is the most widely used lens material for ArF microlithography lenses. However, the fused silica has the characteristics of compaction and rarefaction, which are the phenomena of changing its refractive index. The refractive index change of fused silica depends on the energy density, number of laser pulses, pulse length and specific materials being tested. We estimate the influence of the compaction and the rarefaction to the imaging performance of projection optics for ArF stepper during long-term device manufacturing.

**Key words:** lithography, excimer, ArF, fused silica, compaction, rarefaction

石英ガラスは、半導体製造用露光装置の投影系レンズに使われている。この投影系レンズは一般に20~30枚のレンズから構成され、半導体の高い生産性を保証するため、常に安定した結像性能を維持しなければならない。しかし、長期的なArF（フッ化アルゴン）レーザーの照射下では、石英ガラスの屈折率が変化するため、結像性能への影響が懸念されている。その屈折率変化のモデルは、一般的に屈折率の増加と減少の2つの現象の和で表現され、石英ガラスによってそのバランスが異なる可能性がある。

本研究では、代表的なArF用石英ガラスに対して、露光装置の実際の使われ方に近いレーザーのエネルギー密度とパルス数でテストすることで屈折率の増減を観測し、そのモデル化を行った。そして、典型的なロジックとメモリーデバイスに対し、ArF露光装置が使用される代表的なレイヤーと照明条件、平均的なレジスト感度およびレチクル透過率から、約7年間使用後のレンズ性能を光学シミュレーションにより見積もった<sup>1,2)</sup>。

### 1. ArFレーザー照射による石英ガラスの屈折率変化

異なる製造プロセスで作製した3種類の石英ガラス（試料A, B, C）を50mm×25mm×100mmに加工し、ArFレーザー（4kHz）をパルス発光幅（ $t_{is}$ ）43.3ns, 18.5nsにおいて照度26 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ~276 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ の範囲で照射し、

2.5ビリオンパルスごとに40ビリオンパルスまで633nm干渉計を用いて透過波面を測定した。

試料A, B, Cにおいて、屈折率変化を縦軸にとり、積算されたエネルギーを横軸にとったグラフをそれぞれ図1, 図2, 図3に示す。これらの図から、試料Aは屈折率減少（compaction: コンパクション）材料、試料Bは屈折率増加材料（rarefaction: レアファクション）、試料Cは増加と減少のバランス材料になっていることがわかる。また、633nmでの実験値と、633nmでの干渉計データと193nm干渉計データの相関を利用して、193nmでの屈折率変化を求めるモデル式（1）の諸定数を得た。ただし、193nmにおける屈折率変化を $\Delta n$ 、減少比例係数を $k_1$ 、増加比例係数を $k_2$ 、エネルギー密度を $I$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )、パルス数を $N$ （ミリオンパルス）、減少べき乗係数を $a$ 、増加べき乗係数を $b$ 、パルス発光幅を $t_{is}$  (ns) とした<sup>1)</sup>。その結果を表1に示す。

$$\Delta n = k_1 (NI)^a + \left( k_2 \frac{NI^2}{t_{is}} \right)^b \quad (1)$$

### 2. 投影レンズの光学性能に及ぼす影響

長期的なArFレーザー照射による投影レンズの光学性能に及ぼす影響を見積もるために、典型的なロジックとメモリーデバイスに対し、ArF露光装置が使用されるレイ

キャノン(株)光学機器事業本部半導体機器第四開発センター (〒321-3292 宇都宮市清原工業団地 20-2)  
E-mail: takahashi.kazuhiro767@canon.co.jp

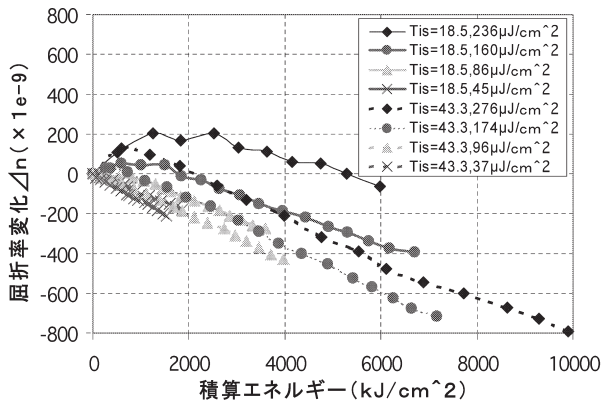


図1 試料 A の屈折率変化。

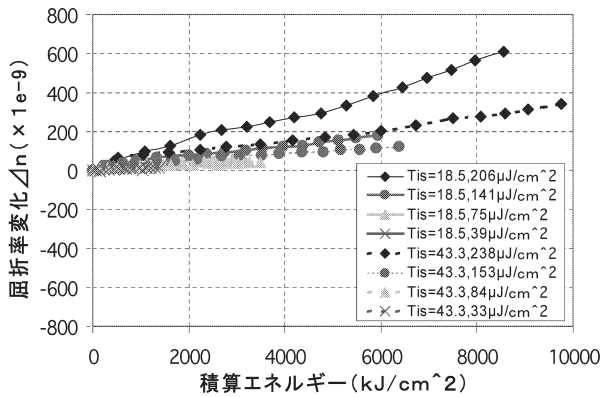


図2 試料 B の屈折率変化。

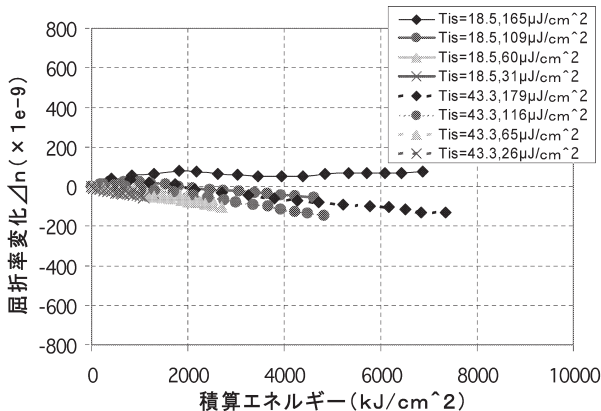


図3 試料 C の屈折率変化。

ヤーと、それに使用される照明条件と平均的なレジスト感度、およびレチクル透過率を仮定する。ここでは、約7年間使用後の光学性能を見積もる。1年間の使用パルス数を10ビリオンパルスとし、このうちのレンズに入射する有効パルス数を75%と仮定し、トータルで50ビリオンパルス照射後の変化を計算する。また、レーザーのパルス発光幅は、 $t_{is} = 50 \text{ ns}$ と設定した。

投影レンズの石英のすべてを試料 A, B, C の単一材で構

表1 モデル式の各パラメーター。

	試料 A	試料 B	試料 C
$k_1$	-0.182	0.0	-0.110
$a$	1.00	0.0	1.00
$k_2$	421	7.64	390
$b$	0.667	1.00	0.667

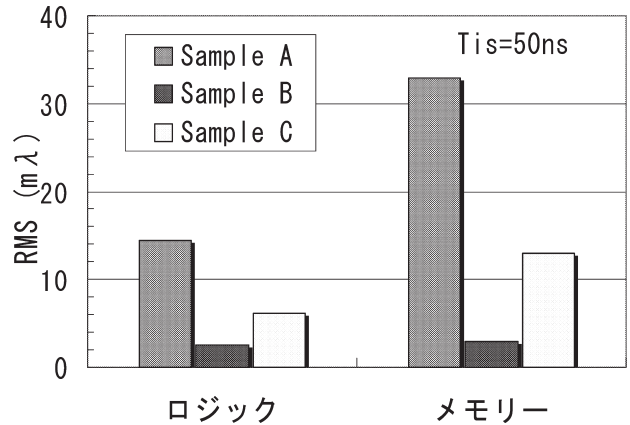


図4 波面収差の RMS (50 ns)。

成した場合について計算して、それぞれ屈折率減少材料、屈折率増加材料、バランス材料の差異を評価する。評価量は7年間の使用で変化する波面収差の RMS とした。結果を図4に示す。ロジックとメモリーの双方のデバイスに対して最も変化が少ないのが、試料 B の屈折率増加材料であり、最も変化が大きいのは試料 A の屈折率減少材料である。試料 B を例にとり、レイヤー別の変化量を比較した結果を図5に示す。ロジック系ではゲートレイヤーでの変化が最も大きい。また、メモリー系ではゲートとローカルメタルの工程での変化が大きい。これらのレイヤーで使用される照明光源の形状が、照明  $\sigma$  (照明光学系 NA/投影光学系 NA) が小さい照明方法 (スモール  $\sigma$ ) や、2つに分離された光源による斜入射照明方法 (二極照明) であり、かつ比較的レチクル透過率が高いことから、エネルギー密度が高いことが要因である。7年の使用において、厳しい条件で見積もったにもかかわらず、試料 B を使用した場合は、いずれのデバイスにおいても波面収差の変化が RMS で  $5 \text{ m}\lambda$  以下である。今回の見積もりは0次光のみで回折光を考慮していないことと、さらに高めのレチクル透過率を仮定していることから、実際の使用条件よりも厳しい見積もりとなっていることも踏まえると、実用上まったく問題ないレベルにあることがわかる。これに対して、試料 A のみ、あるいは試料 C のみでレンズを構成した場合は、今回の見積もりでは無視できない収差変化量が発生しており、使用条件によっては問題となる可能性がある。

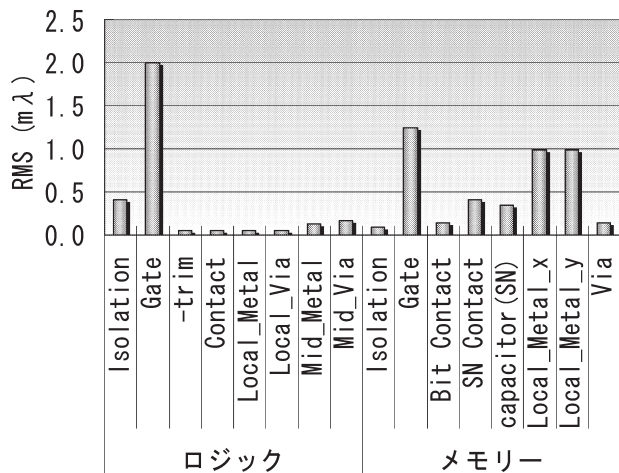


図5 レイヤー別の波面収差のRMS.

次に、レーザーのパルス発光幅の影響を調べるために、 $t_{fs}=20\text{ ns}$ の条件で、同様の波面収差変化を計算した結果を図6に示す。屈折率増加材料の試料Bに関しては若干数値が大きくなっているが、試料Cはほとんど差がなく、試料Aは改善している。これは屈折率変化の増加の項にパルス発光幅を分子に含んでいるため、屈折率増加材料の場合はパルス発光幅が長いほうが小さい変化で、逆に屈折率減少材料では、増加の項の変化が大きくなって屈折率変化をキャンセルできるため、パルス発光幅が小さいほうがよい結果となっている。

レーザー照射テストの結果から、モデル式を使って、石英ガラスの屈折率増加と減少による屈折率変化のパラメータを決定した。このパラメータとArF露光装置が実際にデバイス生産に使用される条件から、投影レンズの光

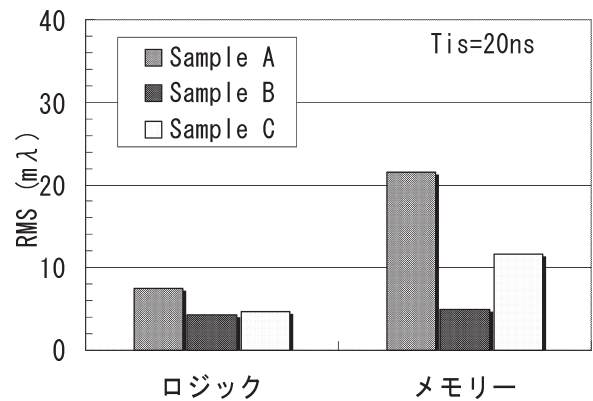


図6 波面収差のRMS (20 ns).

学性能変化予測をし、試料BレベルであればArF投影レンズの耐久性に関して問題ないことが判明した。また、今後パルス発光幅を伸ばすことによって、屈折率変化を抑えることができることから、屈折率増加傾向である石英が望ましい。

本研究の実験および計測は、Cymer, Inc.と共同で行っている。Mr. M. Algotsはじめ関係者のご協力に感謝いたします。

## 文 献

- 1) J. M. Algots *et al.*: "Compaction and rarefaction of fused silica with 193-nm excimer laser exposure," Proc. SPIE, **5040** (2003) 1639-1650.
- 2) J. M. Algots *et al.*: "Verification of compaction and rarefaction models for fused silica with 40 billion pulses of 193-nm excimer laser exposure and their effects on projection lens imaging performance," Proc. SPIE, **5377** (2004) 1815-1827.

(2004年10月12日受理)