

# 最近の技術から

## ステッパー用投影光学系

牛田 一 雄

(株)ニコン光学部第四光学課 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

### 1. ま え が き

縮小投影型露光装置 (通称ステッパー) は、高解像力と高スループットをあわせ持っていることから、現在 VLSI 生産における主力露光機となっている。5 年ほど前には、光学式ステッパーで焼き付けられるパターンは、 $1\mu\text{m}$  が限度であると考えられていたが、投影レンズとレジストプロセス等の進歩により、現在では  $0.8\mu\text{m}$  あるいはそれ以下のデザインルールが可能になってきている。次世代のステッパーとして期待されているエキシマステッパーが実用になれば、 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$  のデザインルールも夢ではなくなると考えられる。本稿では、ステッパー用投影レンズの現状と将来、とくにエキシマステッパー用レンズの展望について解説する。

### 2. g 線および i 線用投影レンズ

現在使用されているステッパーの多くは、超高圧水銀灯の g 線 ( $435.8\text{nm}$ ) を露光波長としており、 $0.8\sim 1.0\mu\text{m}$  の解像力を有する (図 1 参照)。ここでいう解像力とは、実用になる最小のパターン寸法であり、通常は  $1:1$  のラインとスペースで構成される縞模様のラインまたはスペースの幅で定義される。投影レンズの解像力は、使われるレジストにも依存するので、光学的なパラメータのみでは決められないが、一応の目安として次の経験式がよく使われる。

$$\text{解像力} (\mu\text{m}) = k \cdot [\lambda (\mu\text{m}) / \text{NA}]$$

ただし、量産レベル  $k=0.8$ 、研究レベル  $k=0.6$ 、

$\lambda$ : 露光波長

露光波長として、g 線が主力で使われてきた理由は、光学硝子の大半において g 線より短い波長の光の透過率が急激に悪くなるためである。投影レンズ内で露光波長の吸収があると、ウェハ上への照度が低下して、スループットが下がるだけでなく、レンズの熱膨長による変形や硝子の屈折率変化をひき起こし、投影レンズの結像性能が劣化する。

IC の集積度が上がるに従って、ステッパーに要求さ

れる解像力も微細化してきたが、これまでは露光波長を変えずに NA を大きくすることで対応してきた。たとえば、5 年前と現在では、ともに g 線の  $1/5$  倍レンズが主力であるが、仕様は次のように変わってきている。

	NA	露光領域	波長	$\sigma$	解像力
昭和 58 年	0.30	$15 \times 15^\circ \text{mm}$	g 線	0.5	$1.2\mu\text{m}$
昭和 63 年	0.45	$15 \times 15^\circ \text{mm}$	g 線	0.5	$0.75\mu\text{m}$

昭和 58 年当時は、64 k DRAM の量産初期の頃で、デザインルールは  $2\sim 3\mu\text{m}$  であった。レンズの解像力からすると、かなり余裕のあるレベルであった。63 年現在は、256 k DRAM 量産から、1 M DRAM 量産への過渡期であり、デザインルールも  $1.0\sim 1.5\mu\text{m}$  と厳しくなっている。この先、4 M DRAM ( $0.8\mu\text{m}$ )、さらに 16 M DRAM ( $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ ) と進んでいくなかで、g 線のまま NA を上げて対応するべきか i 線に移行すべきか議論のわかれるところであるが、一般的には 4 M DRAM までは g 線で対応できると見られている。

超高圧水銀灯を露光光源とするステッパーの実用限界は  $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$  であり、その先はエキシマステッパーの時代と考えられているが、その限界といわれる  $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$  の領域では、実用焦点深度をいかに確保するかが大きな問題となるであろう。そうすると、パターンサイズが同じであれば、光学的な深度が 2 割 g 線より深い i 線に魅力が出てくる。i 線用レンズを作る上での最大の障害は、光学硝子の吸収であったが、最近では透過率の良いものが開発され、信頼性の高い i 線レンズが製作可能になっている。また、i 線用レジストの進歩も著しいものがあり、かなり良いものが出てきている。i 線ステッパーが本格的に使われるか否かは、レジストプロセスの今後の進歩に左右されると考えられる。

### 3. エキシマステッパー用投影レンズ

エキシマレーザーは、最近急速に注目を集め始めたフォトリソグラフィ用短波長光源である。混合ガスの種類により、さまざまな波長の発振が可能であるが、代表的なものとしては、XeCl エキシマレーザー ( $\lambda=308\text{nm}$ )、KrF エキシマレーザー ( $\lambda=248\text{nm}$ )、ArF エキシ

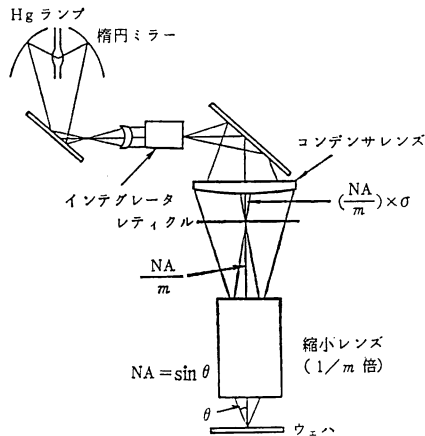


図1 ステッパー光学系システム図

マレーザ(λ=193 nm)等がある。これらの波長域では、通常の光学硝子が透過率の関係で使用不能となる。使用可能な光学材料は、合成石英と螢石等の一部の結晶材料に限定される。XeCl エキシマレーザと KrF エキシマレーザの波長域では、使用できる光学材料に違いがないため、波長が短い KrF レーザのほうが、より高解像力を狙えるという点で有利である。真空紫外域ともいえる ArF レーザの波長域においては光学材料がさらに限定され、露光波長の酸素による吸収も起こるため、レンズの製造が困難であるだけでなく、ステッパーの装置全体も大がかりになると考えられる。以上のような点に加え、レーザのパワー、効率、寿命、そしてレジスト等の点から、KrF レーザが現在のところ最も注目されている。

エキシマレーザのスペクトル幅は、0.5~1.0 nm 程度であるが、インジェクションロック方式、エタロン方式、グレーティング方式等により、波長幅を 0.003~0.008 nm 程度にまで狭帯化することが可能である。波長幅を狭くするメリットは投影レンズの色消しが不要になることである。KrF レーザの波長域で使用できる光学材料の分散の差は、g線、i線の投影レンズで使用されている光学硝子の分散の差と比べると非常に小さいため、色消しをする上ではきわめて不利である。しかもこの波長域では、レンズを接合する接着剤がないため、貼り合せレンズを作ることができない。貼り合せレンズが可能ならば、凸レンズと凹レンズのおおののパワーは強いが、合成としては比較的弱く、また、空気に触れている面数も少なくなるため、面精度公差や偏心公差の点ではるかに有利である。しかし現状ではそれが期待で

きない。また、色消しのため石英と組み合わせられることの多い螢石は非常にもろく、しかも熱膨張率も大きいため、高精度に研磨することがむずかしい等の不利な点を抱えている。レーザの波長幅が十分に狭帯化されると、色消しをする必要がなくなるので、単一種類の材料を用いたレンズ設計が可能となり、レンズを製造する上でははるかに有利である。

一方、レーザの波長幅を狭帯化することによるデメリットは、レーザの可干渉性が良くなり過ぎる点にある。可干渉性が良くなり過ぎると、結像面にスペックルが生じ、結像性能に大きな影響を与える。そのため、装置に何らかの工夫をして、可干渉性を低減させる必要が生じる。また、狭帯化されたエキシマレーザとクロマトレンズ(色消しがされていないレンズ)の組合せでは、レーザ波長の変動により焦点位置も変動するという問題がある。エキシマレーザはパルスレーザであるが、パルスごとの波長変動はいうまでもなく、長期的な波長の変動も極力小さくしなければならない。

以上をまとめると、エキシマステッパーには大きく分けて、色消しレンズと広帯レーザの組合せと、非色消しレンズと狭帯化レーザの組合せが考えられる。前者では、今まで以上の高精度レンズ製造技術が必要となり、後者では完成度の高いレーザの波長安定化および狭帯化技術が不可欠となる。どちらが本命かは、意見の分かれるところであるが、エキシマステッパーが次世代の主力装置となることは間違いないと考えられる。現在の問題点は、決して解決できないというものではなく、地道な努力により必ず解消すると考える。

## 文 献

- 1) 大木裕史：“高性能光学系の設計と評価”，応用物理学会第13回冬期講習会テキスト(1987)。
- 2) V. Pol, J.H. Bennewitz, G.C. Esher, M. Feldman, V.A. Firtion, T.E. Jewell, B.E. Willcomb and J.T. Clemens: “Excimer laser-based lithography: a deep ultraviolet wafer stepper,” Proc. SPIE, **633** (1986) 6.
- 3) 田中裕之, 重松和政, 柳田公雄：“エキシマレーザ・リソグラフィその問題点と今後の展望”, SEMICON NEWS, 4月号(1988) 69.
- 4) 梶山, ほか：“エキシマ・レーザステッパー用狭帯域エキシマレーザ技術の現状と展望”, SEMICON NEWS, 12月号(1987) 54.
- 5) “0.5 μm 時代を担うエキシマレーザ・リソグラフィ”, 日経マイクロデバイス, No. 20 (1987) 57.
- 6) M. Kameyama and K. Ushida: “Excimer laser stepper for submicron lithography,” Proc. SPIE, **774** (1987) 147.

(1988年4月23日受理)