

# 解説

## ステッパー用光学系

牛田 一雄

(株)ニコン光学本部第二光学部第二光学課 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1990年11月7日受理)

### Projection Optics for Optical Steppers

Kazuo USHIDA

Optical Designing Department, NIKON Corporation,  
1-6-3, Nishi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

#### 1. はじめに

IC 製造用露光装置のなかで、現在最も重要な地位にあるのがステッパーである。Eビーム等を使用すれば、光を使って露光するステッパーよりも微細なパターンが得られるが、効率という点でステッパーとは比較にならない。そのため、製造コストが死命を制する量産現場においては、転写されるパターンサイズがサブミクロンの領域に入った現在でも、ステッパーが使われている。露光装置に要求される解像力を、メモリーを例にとりて考えてみると、1990年9月現在、4 MDRAM の量産化が一段落し、16 MDRAM の試作および量産試作が始まっていることから、 $0.7\ \mu\text{m}$  から  $0.5\ \mu\text{m}$  へと要求が微細化してきている。ここでいう解像力  $0.7\ \mu\text{m}$  とは、 $0.7\ \mu\text{m}$  の幅をもつラインとスペースが並んでいるピッチ  $1.4\ \mu\text{m}$  の縞模様が転写可能であることを指す。ステッパーの露光波長としては、超高圧水銀灯の g 線 ( $436\ \text{nm}$ ) が最も歴史が古く、現在でも量産用主力として使われているが、解像力と焦点深度を両立させたいがため、より短波長である i 線 ( $365\ \text{nm}$ ) が今後の主力になると予想される。また、将来さらに微細化が進んだときのために、KrF ( $248\ \text{nm}$ )、ArF ( $193\ \text{nm}$ ) 等のエキシマレーザーを光源としたステッパーの開発も急がれている。i 線までのステッパー用結像光学系としては、1/5 倍の縮小倍率をもつ屈折系が主流であったが、エキシマレーザー、とくに  $193\ \text{nm}$  に対しては屈折光学系のみならず、反射系または反射屈折混合型等の可能性も考慮すべきである。ここではステッパー用光学系の現状と将来予想

を、おもに投影光学系の観点から、実験データ等を通じて解説する。

#### 2. ステッパー光学系の概要

図1にステッパー投影光学系の概要を示す。超高圧水銀灯の光源像を楕円ミラーで結像し、照明均一性を得るためのインテグレータを経由して、コンデンサーレンズにてレチクル面を照明する。照明光学系がレチクル面を照らすときの N.A. は、投影光学系の結像性能に大きな影響をもつ。照明系の N.A. と投影レンズのレチクル側 N.A. の比で定義される  $\sigma$  は、結像性能を論ずる上で重要なパラメータである。

$$\sigma = \frac{\text{照明系 N.A.}}{\text{投影レンズレチクル側 N.A.}}$$

$\sigma$  値=0~1 のときの空間周波数とコントラストの関係を図2に示す<sup>1)</sup>。通常ステッパーの解像度と焦点深度は、

$$\text{解像度} = k_1 \frac{\lambda}{\text{N.A.}} \quad (1)$$

$$\text{焦点深度} = k_2 \frac{\lambda}{\text{N.A.}^2} \quad (2)$$

で表される。本来は、レジスト(感光剤)の性能や光学系の  $\sigma$  値にも左右されるはずであるが、式に入っていないファクターについては  $k_1$ ,  $k_2$  の比例定数を経験則から決定することにより、間接的に反映している。解像度を決定する(1)式における  $k_1$  の値は、量産工場においては  $0.7\sim 0.8$ 、研究所あるいはパイロットラインで  $0.6$  前後といわれているが、これは実プロセスで最低限必要な焦点深度を確保できることを前提とした値であ

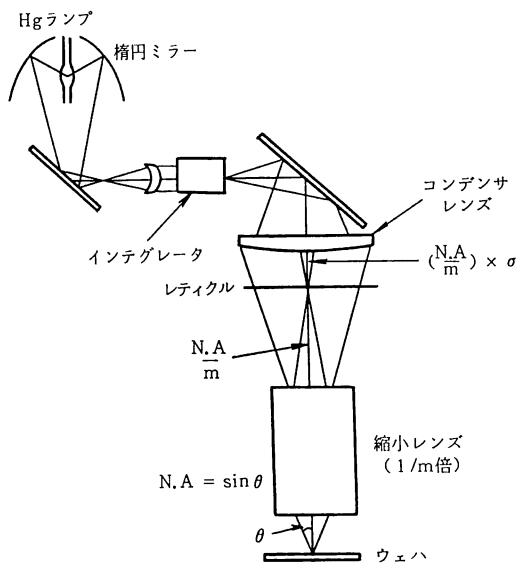


図1 ステッパー投影光学系の概要

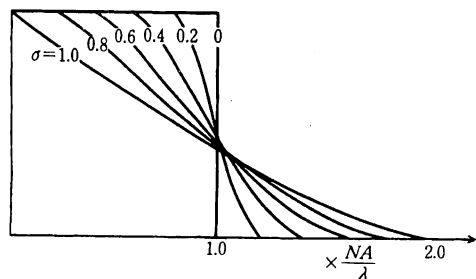


図2 σ値とOTF

り、ベストフォーカスでの限界解像度を示すものではない。図2において  $k_1=0.8$  は、 $0.625 \times (\lambda/N.A.)$  に相当する。ステッパー照明系の  $\sigma$  値は0.5前後のものが多いが、 $k_1=0.8$  に相当する空間周波数のコントラストに対して比較的に有利な条件となっている。

次に最新のステッパーの光学系スペック例を5年前のものとの比較で示す。

	最新 (1990年)	5年前 (1985年)
露光波長	g線 (436 nm)	g線 (436 nm)
N.A.	0.60	0.35
$\sigma$	0.50	0.50
解像度 ( $k_1=0.8$ )	$0.60 \mu\text{m L/S}$	$1.0 \mu\text{m L/S}$
露光領域	$20 \times 20 \text{ mm}^2$	$15 \times 15 \text{ mm}^2$
倍率誤差	$\pm 0.07 \mu\text{m}$	$\pm 0.20 \mu\text{m}$
照度均一性 (ウェハ上)	$\pm 1.5\%$ 以下	$\pm 2.5\%$ 以下

波長, N.A.,  $\sigma$  値等の解像度や焦点深度を決定する光学パラメータは当然であるが、それ以外でも倍率誤差と照度均一性がステッパーの性能として重要視される。倍率誤差は、結像位置と理想格子点のずれを  $\Delta x, \Delta y$  で表示するのが普通である。倍率誤差を重視する理由は、IC 製造工程でのステッパーの使われ方を考えれば明らかである。メモリー等の製造の際、多色刷りの版画のごとく、約 10~30 回の重ね露光を行うが、1枚のウェハを1台のステッパーで重ね露光をするのではなく、多数のステッパーを混用するのが一般的である。そのため、倍率 (ディストーションを含む) がステッパー同士で異なると、重ね露光のときに像の位置がずれてしまい、良好な結果が得られなくなる。一方、照度均一性はレジストパターンの寸法精度を確保する上で必要な項目である。一般に 10% の照度変化に対し、レジスト上のライン幅寸法は、 $k_1=0.8$  付近のパターンで見ると  $0.05 \mu\text{m}$  程度変化する。寸法精度はパターンの  $\pm 10\%$  以内に抑える必要があるため、パターンが微細化されるにともない照度均一性に対する要求も厳しくなる。

### 3. 超高圧水銀灯を光源とするステッパー

ステッパーの誕生以来、最も多く使われてきた露光光源は、超高圧水銀灯の g 線である。屈折系に用いる光学硝子の吸収は、硝種によっても異なるが、普通 400 nm 以下の波長に対して急激に増大する。図3に光学硝子の透過率特性の例を示す。g 線の波長に対しては、十分透過率のある光学硝子が容易に得られる。それに対して i 線では、通常の光学硝子では吸収が大きすぎるため、硝種が限定され、かつ製法にも気を配る必要がある。硝材に吸収がある場合に発生する問題点は、投影光学系の透過率が低いことから装置としてのスループット (単位時間内に露光可能なウェハ枚数) が低くなるだけでない

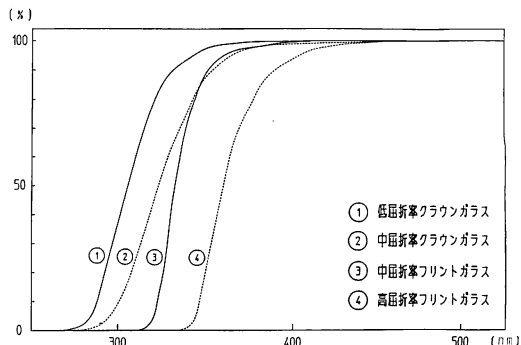


図3 光学ガラスの透過率特性の例

く、レンズ温度上昇によるフォーカスずれ、倍率変動、結像性能の劣化等が考えられる。フォーカスずれと倍率変動については、さまざまな対策が考えられているが、レンズ室内の空気圧をコントロールして、フォーカスと倍率を制御する方法や、特定のレンズを上下に動かす方法等が代表的である。ただし、これらの方法で救えるのは、硝材の吸収がある限度以下の場合であり、吸収が大きすぎると結像性能自体が劣化してしまう。解像度と焦点深度の点で、露光波長は短いほど有利であるが、硝材選択の自由度から  $g$  線が使いやすい。したがって最近までは、露光波長を  $g$  線に固定したまま、N.A. を高くすることで解像度を向上させてきた。しかし、 $g$  線の N.A. も 0.60 のものが登場し、焦点深度を考慮すると、これ以上高 N.A. 化しても、実用上の益はないと考えられる。ステッパーで実用的に必要な最低限の焦点深度は、次の要因で決まる。

1. レジスト (感光剤) 下地の段差
2. ウェハーフラットネス
3. オートフォーカス精度
4. 投影レンズの露光面内焦点均一性

1. の下地の段差は、IC の製造法にも依存するが、一般的に  $1\mu\text{m}$  程度はある。段差はレジストにおおわれるため、実効的には  $0.6\mu\text{m}$  分の焦点深度を消費することになる (レジスト屈折率=1.70 前後)。ウェハーフラットネスは、精度のよいものでも、全面で  $2\sim 3\mu\text{m}$  のうねりをもつ。フォーカスは、各ショットごとに露光領域の中心で合わせるのが一般的で、その場合ウェハーフラットネスのため発生するショット内でのデフォーカス量は  $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$  程度である。最新のステッパーでは、このデフォーカス量を減らすために、レンズ焦点面とウェハーフラットネスの傾斜を露光ごとに補正する (ウェハーフラットネスを傾ける) 機能が付いており、ウェハーフラットネスの影響を  $0.5\mu\text{m}$  以下に抑えられるようになった。その他、オートフォーカス精度が  $\pm 0.15\mu\text{m}$ 、レンズの焦点均一性を  $0.5\mu\text{m}$  とすると、合計  $1.9\mu\text{m}$  となり、これが最低限必要な焦点深度である。ここでいうレンズの焦点均一性とは、露光面内の各点におけるベストフォーカスの最大最小の差であり、像面湾曲、非点収差、片ぼけ等を全て含んでいる。

パターンの微細化が進み、焦点深度が確保できなくなると、よりコストのかかる多層レジストプロセスを採用するか、露光波長を短くし、光学系の深度を増大させるかの選択になる。図4に単層と多層のレジストプロセスの比較を示す。多層レジストでは、光が反応する部分が

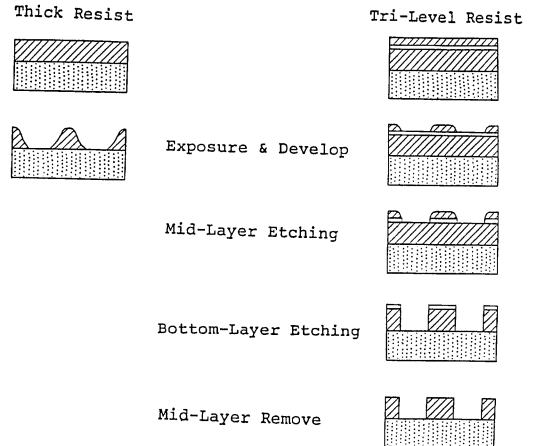


図4 単層レジストと多層レジストプロセス

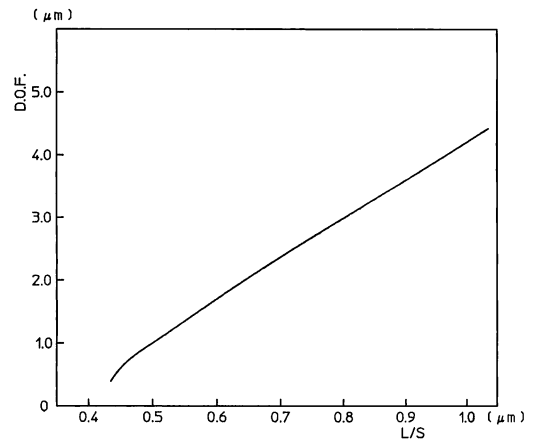


図5  $g$  線 N.A.=0.54 レンズの焦点深度特性

うすく、また下地段差の影響もない。トータル IC 製造コストを考えるとプロセスコストのウェイトが高いため、ステッパーの短波長化が問題なく進んでいる間は、多層レジストの出番は少ないとの意見が多い。

図5に N.A.=0.54 の  $g$  線レンズで露光した場合の、パターンサイズと焦点深度の関係の一例を示す。焦点深度  $1.9\mu\text{m}$  が得られるパターンサイズの限界は、 $0.6\sim 0.65\mu\text{m}$  程度である。投影レンズの N.A. をさらに上げても、 $0.5\mu\text{m}$  以下のパターンに対しての結像性能は向上するが、 $0.6\mu\text{m}$  パターンでの焦点深度が増すことは期待できない。したがって、デザインルール  $0.5\mu\text{m}$  といわれる 16 MDRAM<sup>2)</sup> の量産試作が始まっている現在、より波長の短い  $i$  線 ( $365\text{nm}$ ) を露光波長とするステッパーに対する関心度が高まっている。

$i$  線レンズ用硝材は、透過率の点から高屈折率、高分散のものが得にくく、 $i$  線レンズの設計はその分困難で

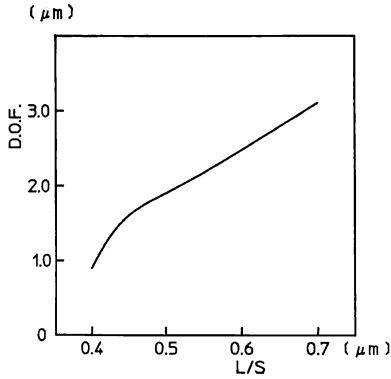


図 6 i 線 N. A.=0.50 レンズの焦点深度特性

あった。しかし、設計技術の進歩と新硝材の開発により、最近になって i 線でも高 N. A., 広フィールドの投影レンズが設計可能になっている。また、i 線に適合するレジストの性能も、ここ 1~2 年で急速に改善され、現時点では g 線用レジストと同等の性能が得られている。

図 6 に N. A.=0.5 の i 線ステッパーで焼き付けを行った場合の、パターンサイズと焦点深度の関係の一例を示す。0.5 μm のパターンに着目すると、焦点深度は 2 μm 弱であり、実用面からの要請である 1.9 μm とほぼ一致する。図 6 の実験に使用したレジストは、現在の i 線レジストのなかでは最高水準の性能を有しているが、試作レベルではさらに一歩進んだレジストも完成していることから、16 MDRAM 量産時までは、0.5 μm パターンに対し実用上最低限の焦点深度が確保できるようになるであろう。したがって 0.5 μm デザインルールまでは、超高圧水銀灯を光源とする従来型ステッパーで対応可能と考えられる。その先の 0.35 μm (64 MDRAM) となると、位相シフト法、多層レジスト等<sup>3)</sup>を採用するか、さらに露光波長を短くするかのどちらか(または両方)が必要である。

i 線よりさらに短波長となると、光学硝子が透過率の点で使用不可となり、石英、蛍石等でレンズを構成することになる。高分散の屈折材がないため、色収差の補正が困難で、超高圧水銀灯にバンドパス干渉フィルターを組み合わせる方式では、スペクトルの半値幅が広すぎて使えない。i 線の次は、エキシマレーザーを光源としたステッパーになると考えられているのはそのためである。

#### 4. エキシマレーザーステッパー

エキシマレーザーの波長は、使用する混合ガスの種類により決まるが(表 1 参照)、ステッパーの光源用とし

表 1 エキシマレーザーの波長

	F	Cl	Br
Xe	351 nm	308 nm	282 nm
Kr	249	222	
Ar	193	175	
F	153		

表 2 KrF 狭帯化エキシマレーザーの性能例

中心波長	248.4 nm
波長安定性	±0.5 pm
スペクトル幅 (FWHM)	<3 pm
ビーム発散角	1~4 mrad
平均出力パワー	4 W
パルスエネルギー安定性	±20% 以内
発振周波数	最大 400 Hz

て注目されるのは、KrF エキシマレーザー (248 nm) と ArF エキシマレーザー (193 nm) である。とくに KrF の場合、石英または蛍石を使えば、十分な透過率が確保され、また ArF のように空气中で O<sub>3</sub> を発生させ O<sub>3</sub> がエキシマ光を吸収することもないため<sup>4)</sup>、従来の g 線や i 線と比較してとくに困難はない(非色消タイプの場合)。KrF エキシマの場合、スペクトル幅は通常 0.5 nm~1.0 nm 程度であるが、投影レンズに非色消タイプを採用する場合、波長幅を 0.005 nm 以下に狭帯化して使用する。

ステッパー用に開発された狭帯化エキシマレーザーについてはいくつか報告がされている<sup>5-11)</sup>。インジェクションロック方式(注入同期方式)では出力は高いがコヒーレンスが高く、信頼性にも問題があり、ステッパーには不向きである。エタロン、プリズム、グレーティング等の狭帯化素子を用いる方式は、おのおの一長一短があるが、現時点で使用可能なものが得られている。非色消タイプの投影レンズと狭帯化レーザーの組合せで問題になるのは、エキシマレーザーの波長安定性をどう確保するかと、レーザー光の可干渉性が高くなることから発生するスペックルに対する対策をどうするか<sup>12)</sup>の 2 点である<sup>12)</sup>。現時点での狭帯化エキシマレーザーの性能例を表 2 に示す<sup>12)</sup>。

スペックル対策については、スキヤニング方式がよく用いられる。図 7 にエキシマレーザーステッパーの照明光学系の概略図を示す。フライアイレンズの直前にあるミラーを上下左右に傾けることにより、エキシマレーザーのパルスごとにフライアイ出口の輝点位置を移動させ、平均化によってスペックルの影響を低減している。

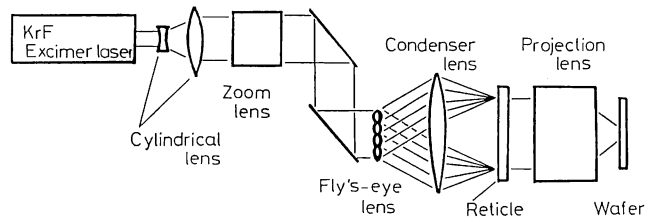


図7 エキシマステッパー照明光学系の例

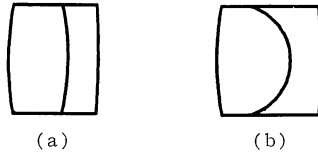


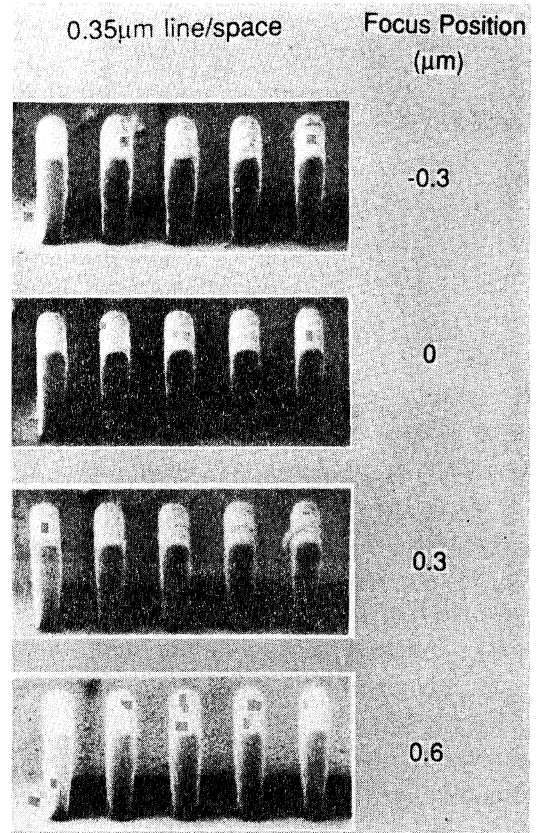
図8 通常の色消レンズ (a) と石英・蛍石の色消レンズ (b)

一方、色消レンズを採用すれば、以上のようなわずらわしさから解放される代わりに、投影レンズの設計、製造は困難である。図8 (a)は、よく使われるフリントガラス (LF5) と石英を組み合わせ、色消しレンズを設計した例である。図8 (b)は、石英と蛍石の組合せで設計した場合であるが、分散の差が少ないため、各レンズ要素の  $f$  が極端に短くなっていることがわかる。

エキシマレーザー用色消しレンズが困難である理由は、各レンズ要素の  $f$  が短くなるため、N.A.、フィールドサイズ等のスペックを上げにくい点と、偏心精度等の公差に対してきわめて敏感な系となり、製造がむずかしい点にある。接着が可能であれば、接合レンズとしての  $f$  は長くなり公差上有利になるが、248 nm以下の波長領域に使用できる接着剤は現在のところ存在しない。

KrF エキシマレーザーを光源とするステッパーは、すでに商品化されているが、その多くは非色消投影レンズを使い、狭帯化されたレーザー光で露光するタイプである。将来的には、狭帯化レーザーの安定性向上およびメンテナンス性改善が万一予定どおりにならなかった場合に、色消タイプが出現する可能性がある。図9にKrF エキシマレーザーステッパーで焼き付けられた、 $0.35 \mu\text{m}$  L/S パターンの断面 SEM 写真を示す。

KrF の次は、真空紫外域である ArF エキシマレーザーを使うことになるが、蛍石が使えなくなるため、色消レンズを作るためには、他の屈折材料を探さなければならない。また、非色消タイプを採用するにしても、この波長領域では分散が急激に大きくなっているため、狭帯化に対する要求が、非常に厳しくなる。ArF エキシマ

図9 KrF エキシマレーザーステッパーで得られた  $0.35 \mu\text{m}$  L/S レジスト像

レーザーステッパーについては、まだ研究がスタートした段階ではっきりしていないが、色収差の問題を軽減する、またはなくすために、反射系あるいは反射屈折混合系が採用されるかもしれない。

193 nm のリソグラフィに関しては、露光装置の開発だけでなく、感光剤の改良をどうするかという問題も残っており、今後の研究、開発の成果が期待される。193 nm まで短波長化が進めば、光でクォーターマイクロン (256 MDRAM) までカバーできる可能性が出てくると考えられ、7~8年前の予測“光学式ステッパーの限界は  $1 \mu\text{m}$  までであり、その先はX線やEビーム等の新

しい方式が採用される”から考えると、光がずいぶん健闘しているといえよう。

### 文 献

- 1) 鶴田匡夫: 応用光学 II (培風館, 東京, 1990) pp. 279-282.
- 2) 重松和政: “総論 0.5  $\mu\text{m}$  リソグラフィ技術”, *Semiconductor World*, **7** (1990) 140-144.
- 3) 岡崎信次: “光リソグラフィの高解像度化技術”, *Semiconductor World*, **7** (1990) 145-150.
- 4) M. Sasago: “Trend of half-micron lithography”, *SEMICON/OSAKA Technology Seminary, Proc.* (1989) pp. 11-19.
- 5) 江浦 隆: “露光ステッパー用エキシマレーザ”, *三菱電機技報*, **63** (1989) 273.
- 6) T. A. Znotins, *et al.*: “The design of excimer lasers for use in microlithography,” *Proc. SPIE*, **922** (1988) 454-460.
- 7) P. Oesterlin, *et al.*: “Advanced lithography excimer system: Absolute wavelength adjustment. Five watt average power,” *Proc. SPIE*, **1088** (1989) 404-406.
- 8) R. L. Sandstrom, *et al.*: “Krypton fluoride excimer laser for microlithography,” *Proc. SPIE*, **1088** (1989) 407-411.
- 9) R. K. Brimacombe, *et al.*: “Performance characteristics of a narrow band Industrial excimer laser,” *Proc. SPIE*, **1088** (1989) 416-422.
- 10) K. Saito, *et al.*: “Wavelength stability of KrF excimer laser,” *Proc. 2nd Microprocess Conference*, (Kobe, 1989) pp. 34-35.
- 11) Y. Shimada, *et al.*: “Pressure controlled wavelength stabilization of a KrF excimer laser with narrowed bandwidth,” *Proc. 2nd Microprocess Conference* (Kobe, 1989) pp. 30-31.
- 12) Y. Ichihara, S. Kawata, I. Hikima, M. Hamatani, Y. Kudoh and A. Tanimoto: “Illumination system of an excimer laser stepper,” *Proc. SPIE*, **1138** (1989) 137-143.
- 13) P. Lokai, U. Rebhan, P. Oesterlin, H.-J. Kahlert and D. Basting: “High rep.-rate KrF lithography excimer laser with narrow bandwidth below 2pm,” *Proc. SPIE*, **1264** (1990) 496-504.