

最近の技術から

X線リソグラフィー

服部 秀三

名古屋大学工学部電子機械工学科 〒464 名古屋市千種区不老町

1. はじめに

X線リソグラフィー (XRL) は、1972年に提案¹⁾されて以来将来の微細図形転写の方法の一つとして盛んに研究されたが²⁾、シリコンデバイスの生産に必要なスループットが得られなかったために、バブルメモリー用以外には実用に供せられるに至らなかった。しかし、1~4 Mbit ダイナミック RAM 開発の時代を迎えるに至って、光リソグラフィーの限界が現実の問題となり、1レベル(5 μ ウエハ) 当り1分程度のスループットを考慮に入れたX線リソグラフィー技術が真剣に取り上げられることになった。一方電子線リソグラフィーは、高速データ転送に非常に経費がかかるという理由でウエハプロセスに用いるのは困難と考えられるに至った。表1は300 Mbit/sの高速電子線リソグラフィー装置³⁾と回転ターゲットX線リソグラフィー装置⁴⁾のスループットの比較をしたものである。注目すべきことは、X線リソグラフィーの場合はレジスト感度の向上にほぼ比例してスループットがあがる見込みがあるのに対して、電子線リソグラフィーの場合にはデータ転送速度によってそれが限界にきていることである。

2. X線源

X線源として、対陰極X線源、シンクロトロン放射X線源(SOR)、放電X線源が用いられる。対陰極X線源の場合XRLの解像度 Δ は半影ボケでまきり(図1)

$$\Delta = G\delta/L \quad (1)$$

で与えられる。 Δ を小さくするためには線源の大きさ δ を小さくする必要があるが、 δ を小さくできる限度は対陰極の冷却能力で定まる。冷却能力を考慮して回転対陰極⁴⁾、円錐状対陰極⁵⁾が用いられている。回転対陰極の場合、対陰極の熱容量を ρC_p (J/cm³·deg)、熱伝導率を κ (W/cm·deg)、半径を a (cm)、回転数を r (s⁻¹)、電子ビーム径を δ (cm)、電力を P (W) とすると温度上昇 θ (deg) は

$$\theta = 0.45(\kappa\rho C_p)^{-1/2}(ar\delta^3)^{-1/2}P \quad (2)$$

で与えられ、銅を用い $a=1.0$ 、 $r=100$ 、 $\delta=0.3$ 、 $P=25$ kW としたとき $\theta=410$ となる。円錐状対陰極は同じ有効 δ に対して冷却面積を4.8倍としたものが用いられている⁵⁾。円錐頂角の最適化は、電子ビーム斜入射による進入深さの減少、X線斜取出しによる対陰極内の自己吸収の増大、強度分布の一様性を考慮する。

X線照射強度 Φ は電力 P と露出時間 T に対して

$$\Phi = c(P/L^2) = s/T \quad (3)$$

の関係にあるから、スループット T/A は($A=D^2$)

$$T/A = (s/c)(L/D)^2 P^{-1} \quad (4)$$

となり、 L/D が照射強度分布の一様性の考慮から一定値になることを考慮すると、 L に無関係となる。式(1)を考えると L を大にして大きい面積を一括露出するほうが有利であるように思われる。しかし大きい D ではウエハの酸化プロセス等による内部位置ズレによる Δ の限度が大となるために、 Δ を最小にする最適の D が存在する。

SORは高価であるが10箇所以上X線の取出し箇所を設けることができることを考えると、生産コストとしては引合うという考え方がある⁶⁾。特性波長 λ_c (Å)は磁場 H (Koe)と加速電圧 E (GeV)との間に

$$\lambda_c = 187/(HE^2) \quad (5)$$

という関係がある⁷⁾。XRLに有効なエネルギーは1 keV以上(波長12.4 Å以下)であるからBe窓を用いて取り出される。図2は5 μ mのBe窓を通して取り出された、電流1A当り、波長帯域1eV当り、軌道面の放射角1 mrad当りの出力スペクトルである⁷⁾。

軌道面内の角分布は式(1)と同じ解像力を与えるが、軌道に垂直な面内の角分布は

$$\Delta\theta = 2m_0c^2/E = 1.022 \times 10^{-3}/E \text{ (GeV)} \quad (6)$$

で与えられきわめて小さい⁷⁾。表2は回転対陰極、円錐状対陰極、SORの各1例のXRLの特性の比較を示す。

3. レジスト技術

ネガレジストは、高分子が放射線架橋によってゲル化し、不溶化する性質を利用する。ポジレジストは高分子

表1 電子線, X線リソグラフィーの比較

	レジスト感度	照射強度	分解能	照射面積	データ速度	スループット (100cm ² 当り)		
						露出	位置合せ	合計
電子ビーム	d (C/cm ²) 10 ⁻⁶	I (A/cm ²) 300	Δ (μ m) 0.5	A (cm ²) 0.25	f (Mbit/s) 300	T_e (s) 133	T_{SR} (s) 35+100	T 268
X線	s (J/cm ²) 8.6×10^{-3}	Φ (W/cm ²) 2.4×10^{-3}	Δ (μ m) 0.5	A (cm ²) 4	—	T_e (s) 86	T_{SR} (s) 10	T 96

電子ビームの場合: $T_e=100/\Delta^2 f$, $d=I/f$, X線の場合: $T_e=100s/A\Phi$ である.

表2 各種 X線リソグラフィー装置の特性比較

X線源	波長 λ (Å)	線源距離 L (cm)	線源径 δ (cm)	ギャップ G (μ m)	解像度 Δ (μ m)	照射寸法 D (cm)	照射強度 Φ (mW/cm ²)	スループット T/A (s/cm ²)	ビーム電力 P (kW)	変換効率 c ($\times 10^{-6}$)
回転対陰極	7.1	12	0.3	20	0.5	2	2.5	0.86	20	18
円錐対陰極	4.4	50	0.3	40	0.24	7.5	0.048	3.2	4	30
S O R	5~15	—	—	—	<0.1	—	—	0.08	—	—

表3 代表的な X線レジストの特性

ネガレジスト	レジスト名	η (dl/g)	感度 (mJ/cm ²)		γ	ポジレジスト	レジスト名	感度 (mJ/cm ²) S_0	γ
			S^0	$S^{0.5}$					
	COP	0.47	59	185	1.0		PMMA	2,500	2
	DCPA	1.85	3.5	8.4	1.3		FBA	53	2.5

η : 粘性係数, $S^0, S^{0.5}$: 肩付き数字の規格化残膜率を与える露出量, S_0 : 現像完了を与える露出量.

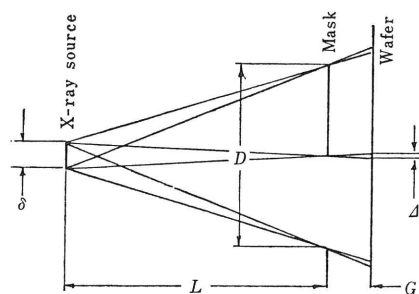
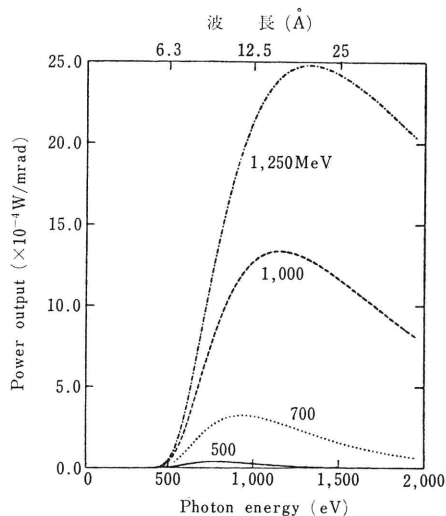


図1 XRLの半影ボケ解像度

の主鎖切断によって分子量が低下し、溶解速度が増加する性質を利用する。表3に代表的なレジストの特性を与える。ネガレジストは分子量を大きくすると感度は向上するが、規格化残膜率対露出量の常用対数で表わした感度特性の傾き γ は小さくなる。ポジレジストについては十分な感度を与えるものがない。

1~2 mJ/cm² の感度を与えるレジストが得られれば、円錐対陰極のX線源でも光リソグラフィーと同様のウェハ1枚当り1~2分のスループットが得られる。レジス

図2 5 μ m Be 窓付 SOR X線源の出カスペクトル

トの感度を高めるにはまず吸収係数を高くしレジストの有効厚さを小さくする必要がある。レジスト現像後のプロファイルを垂直にし、頭部を平坦化するために、2層レジスト、3層レジストが用いられる。架橋や主鎖切断

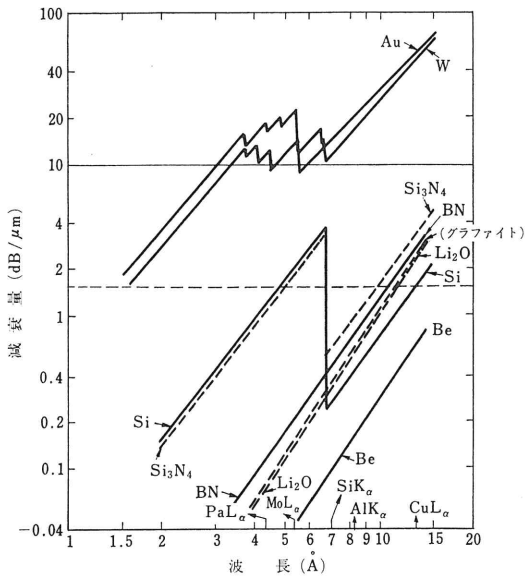


図3 マスク材料による X 線の減衰

以外の効果、放射線グラフト重合等を用いる試みがなされている。

4. マスク技術

X線波長の選択と関連させて基板材料と吸収材料とを選択する必要がある。図3は質量吸収係数 μ_m ⁸⁾ から

$$c \text{ (dB}/\mu\text{m)} = 0.43 \times 10^{-4} \rho \mu_m \quad (7)$$

を用いて計算された減衰率の波長による変化を示す。基板材料としては $c < 0.3 \text{ dB}$ ($5 \mu\text{m}$ の厚みでも 70% 透過する), 吸収材料としては $c > 10 \text{ dB}$ ($1 \mu\text{m}$ の厚みで 10:1 のコントラストを与える) であることが望ましい。

$\text{AlK}\alpha$ (8.3 \AA), $\text{SiK}\alpha$ (7.1 \AA) を用いる場合には, BN, ポリイミド, Si_3N_4 , Si, グラファイト等の材料が検討されている。 $\text{PaL}\alpha$ (4.3 \AA), $\text{MoL}\alpha$ (5.4 \AA) を用いる場合には BN, ポリイミド, グラファイトが検討されている。 Si, グラファイトの場合には, レーザー光によるアライメントを用いることができない。(BN)_xC_{1-x}の想定組成の安定な膜も得られて基板材料として有望視されている⁹⁾。 A_xB_y 化合物の μ_m を両元素の質量吸収係数 (μ_{mA} , μ_{mB}) と原子量 (Z_A , Z_B) から求めるには,

$$\mu_m = (x\mu_{mA} + Z_A + y\mu_{mB}Z_B) / (xZ_A + yZ_B) \quad (8)$$

を用いる。

5. アライメント技術

マスクとウェハを小さい間隔を保って位置合せをするには, 従来二重焦点光学系を用いた十字線自動位置合せ

法が用いられてきたが, X線マスクのパターン寸法の微細化に対応して, より高い精度のアライメント技術が必要とされる。このためには干渉モアレ法¹⁰⁾や二重フレネルレンズ焦点合せ法¹¹⁾が用いられている。

干渉モアレ法に用いられる格子のピッチを p とするとフレネル数 1 に対応する間隔 G_1 は

$$G_1 = p^2 / \lambda \quad (9)$$

に至るまで間隔 G を変化させるとモアレ信号の振幅は 1 周期変化する。 p を小さくして G に依存しない条件を用い, 2 組のモアレ信号の差を用いて検出精度を上げる方法¹²⁾が提案され, $0.01 \mu\text{m}$ の精度に達している。

6. おわりに

電子ビームリソグラフィについても, 一括転写や多重ビームによるデータ転送速度向上の余地がある。短波長レーザーを用いる解像度向上の努力がなされている。しかしながら SOR と小型 X線源を用いた XRL は次世代リソグラフィの中心的課題となるであろう。

文 献

- 1) D. L. Spears and H. I. Smith: X-Ray lithography—A new high resolution replication process. *Solid State Technol.*, July (1972) 21.
- 2) E. Spiller and R. Feder: X-Ray lithography. *X-Ray Optics*, ed. H. J. Qeisser (Springer, Berlin, 1977) p. 35.
- 3) J. C. Eidson, W. C. Hasse and R. K. Scudder: A precision high speed electron beam lithography system. *Hewlett Packard J.*, **32** (1981).
- 4) 通研シンポジウム資料 (1980).
- 5) A. Zacharias: X-Ray lithography for integrated circuit development and manufacturing. *IEEE Trans.*, **CHMT-5** (1982) 118.
- 6) J. R. Maldonado: Trends in X-ray lithography. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **333** (1982) 131.
- 7) W. D. Grobman: Synchrotron radiation X-ray lithography. *Hand Book on Synchrotron Radiation*, ed. E.-E. Kock (North Holland, 1983).
- 8) G. L. Clark: Fundamentals. *Handbook of X-Rays*, ed. E. F. Kaeble (McGraw-Hill, 1967) p. 1.
- 9) K. Montasser and S. Hattori: Transparent B-N-C-H compound thin film formed by plasma CVD. *Thin Solid Films* (to be publ.).
- 10) S. Austin, H. I. Smith and O. C. Flanders: Alignment of X-ray lithography masks using a new interferometric technique. *J. Vac. Sci. Technol.*, **15** (1978) 984.
- 11) M. Feldman and A. D. White: Application of zone plates to alignment in microlithography. *J. Vac. Sci. Technol.*, **19** (1981) 1224.
- 12) 服部秀三, 内田悦行, V. T. Chitnis: モアレ干渉法を用いた超精密位置決め技術. 昭和 59 年度精密機械学会春季大会講演論文集 (1983) p. 925.

(1984年2月4日受理)