

459



# SOR 用たて形 X 線ステッパの開発\*

石	原		直**	宇	根	篤	暢**	金	井	宗	統**
鈴	木	雅	則**	福	田		眞**	小	俣	富士	夫**

A Vertical X-ray Stepper for SOR Lithography

Sunao Ishihara, Atsunobu Une, Munenori Kanai, Masanori Suzuki, Makoto Fukuda and Fujio Omata

A vertical X-ray stepper for SOR lithography has been developed. The stepper exposes wafers in a normal atmosphere to vertically-scanned SOR with continuous alignment control during exposure. The key devices of the stepper are a vertical X-Y stage and an optical-heterodyne alignment system. The X-Y stage uses air-lubricated components, including air bearing lead screws, linear sliders and radial/thrust bearings. The optical-heterodyne alignment system detects the displacement between the mask and wafer gratings with precision of 8.3 nm. Several exposure experiments proved that the alignment capability is better than  $\pm 0.1 \,\mu$ m for a  $3\sigma$ -value.

Key words: SOR, X-ray lithography, X-ray stepper, air bearing, X-Y stage, opticalheterodyne interferometry

# 1. 緒 言

シンクロトロン放射光 (Synchrotron Orbital Radiation, 以下 SOR 光という) は,高輝度,高い指向 性,高安定性,選択可能な広いスペクトルなどの特徴 を有し,X線リソグラフィ用光源として極めて有用 である<sup>1)</sup>. 解像性については,適性露光波長の選択と 狭い露光ギャップの設定によりクオータミクロン以下 のパタンを容易に形成でき,高輝度故に高いスルー プットを期待できる.

このような微細領域のリソグラフィにおいては、微 小なパタン幅に応じた極めて厳しいパタンの重ね合わ せ精度が要求される。例えば、重ね合わせ精度±0.1 µm を達成しようとすると、X線マスクの電子線描画 誤差や製造プロセスにおける位置ひずみ、ウエハのプ ロセスひずみ、マスクとウエハの機械的位置合わせ誤 差などの許容値は、数 nm~数十 nm となる<sup>2</sup>. 特に マスクとウエハの機械的位置合わせは最も支配的な要 因であり、高精度露光装置の開発が重要な課題であ る.

露光装置はウエハをステップ移動させながらパタン

を順次転写していくので、X線ステッパと呼ばれる. また、SOR 光は水平方向に放射されるので、マスク とウエハを鉛直平面に沿って保持・位置決めするたて 形機構となる. このようなたて形 X線ステッパは、 内外の研究機関で実験用に試作されているが<sup>3)~5)</sup>、ク オータミクロン領域で実用できる精度を有する装置の 実現には至っていない.

このため,たて形の高速・高精度 XY ステージ,多 軸の微動機構,マスク・ウエハ相対位置の高精度検出 法などの研究を進め,SOR 用の高精度 X 線ステッパ を開発した<sup>6)</sup>.本論文は,開発した SOR 用たて形 X 線ステッパの構成と性能評価の結果について述べる.

#### 2. 露光システムの設計

露光装置の基本性能は解像力,重ね合わせ精度,及 びスルーブットである.これらの性能を決める設計要 因として,露光波長の選択,露光ギャップ,フィール ドサイズなどがある.また,SOR露光特有の機能と して,露光領域の縦方向拡大,および露光雰囲気の選 択があり,ビームラインと露光装置で機能分担がなさ れる.次々世代の半導体集積回路製造への適用をねら いとする SOR 露光システムの主な目標仕様を表1に 示す.基本性能は,解像力0.2 μm,重ね合わせ精 度±0.1 μm,可能な限り高いスループットの確保で あり,これらは以下の検討結果に基づいて定めた.

 <sup>\*</sup> 原稿受付 平成2年7月27日.1989年度精密工学会秋季 大会学術講演会(平成元年11月6日および7日)にて発 売

<sup>\*\*</sup> 正 会 員 日本電信電話(株)LSI研究所 (厚木市森の里若 宮 3-1)

Resolution	0.2 μm
Alignment accuracy	$\pm 0.1 \mu{ m m}$
Wavelength	0.7-1 nm ( $\lambda_{\rm p} = 0.8$ nm)
Exposure gap	30-50 μm
Field size	up to 30 mm×30 mm
	X-ray vertical scan with mirror
Exposure environment	Normal atmosphere
Wafer size	φ 4, 6 inch

 Table 1
 Main specifications of the SOR exposure system



**Fig. 1** Resolution estimation of SOR lithography Fresnel diffraction limit is an experimental equation, where constant A is defined as residual pattern section area is 50%. See reference 7)

解像力:従来の点光源からの発散 X 線を用いる場 合には半影ぼけにより解像力が制限されていたが, SOR 露光では半影ぼけは無視できる程度に小さくな り,マスク吸収体エッジにおけるフレネル回折が解像 力の支配要因となる.解像力 w は,マスク・ウエハ間 のギャップgと露光に寄与する X 線の波長 λ によ り,

# $w = A(g\lambda/2)^{\alpha}$

で表される. ここに, A はレジストの特性などで決 まる定数,  $\alpha$  は理論値 0.5 である. 図1 は露光ギャッ プをパラメータに露光波長と解像力の関係を示したも ので, 長波長側は露光実験により求めたフレネル回折 の実験式<sup>7)</sup>, 短波長側はレジスト中での光電子の飛程 で表している. いま, 0.7~1 nm の波長を用いると き, 解像力 0.2  $\mu$ m を得るためには, 露光ギャップは 50  $\mu$ m 以下が必要であり, 転写パタンのプロファイ ルまで考慮すると 30  $\mu$ m 以下が望ましい.

**重ね合わせ精度とスループット**:半導体チップサイズの拡大動向とスループット確保の点からはフィールドサイズを大きくとるシステムが好ましいが,重ね合わせ精度上は厳しいものとなる.すなわち,重ね合わ





せ精度とスループットはフィールドサイズをパラメー タとしてトレードオフの関係にある.ウエハ当たりの 達成可能な処理時間から求めたスループット,および 支配的な位置ずれ誤差要因の割り振り値<sup>21</sup>から求めた 達成可能な重ね合わせ精度を図2に示し,計算に用い た各種要因の値を列挙する.図からわかるように要求 する重ね合わせ精度に応じて適用可能なフィールドサ イズが決まり,これによりスループットが支配され る.本システムでは、フィールドサイズを可変とし, 目標重ね合わせ精度±0.1 μm に対応して最大 30 mm 角まで露光可能とした.

**露光領域拡大**:SOR 光は水平面内に強い指向性を 持って放射されるため,露光領域の縦方向拡大が必要 である.方法としては,SOR 光の走査,マスク・ウェ ハの一体走査が考えられる.前者は,マスク・ウェハ を静止状態で露光でき,露光中アライメントサーボが 容易であるが,縦方向にランアウト(マスクへのX 線入射角で決まる転写パタンの外方向への位置シフ ト)が生じる分ギャップ制御が重要となる.後者はラ ンアウトや露光強度の均一性の点では有利であるが, 露光中のアライメント監視が難しく,機構も複雑と なって装置が大形化する.本システムでは位置合わせ 精度を重視して,前者のSOR 光走査方式を採用し



Fig. 3 Configuration of SOR lithography system

た.

**露光雰囲気**:マスクとウエハを真空中に置いて露光 すると、X線マスクにSOR光照射による温度上昇が 生じ、熱ひずみによって位置ずれが発生する.このた め、熱媒体としてのガス雰囲気での露光が必須であ る<sup>6)</sup>.X線の減衰を最小限に押さえるには、減圧ヘリ ウム中露光方式が最も好ましいが、装置の操作性や機 構設計の自由度の点で難しさがある.本システムでは 装置性能を重視し、大気中露光方式を選択した.

設計した SOR 露光システムの構成を図3に示す. SOR 光を SOR リングから露光装置に導くビームラインには2枚のX線ミラーが導入されている<sup>9)</sup>.第1ミラーは水平方向の広い角度の SOR 光を反射してウエハ上のX線強度を高めるための集光ミラーであり, 反射による短波長カットの役割も持つ.第2ミラーは、水平方向に平行光束を作り出すとともに、微小な 揺動により SOR 光を縦方向に走査する.第2ミラー下流の Be 窓までは超高真空,その下流マスク裏面の取出し窓までは1気圧 He であり,マス

クとウエハは大気中に配置される.

3. X 線ステッパの設計と試作

## 3.1 装置の構成

X線ステッパの基本機能はウエハの ステップ移動,およびマスク・ウエハ間 のギャップ設定を含む位置合わせであ る.装置構成上の基本要素として,高精 度の位置決めステージ,マスク・ウエハ 相対位置の高精度検出機構を開発し,こ れらを組み合わせて SOR 用 X線ステッ パを設計,試作した.装置の構成を図4 に示す.大別して,ウエハの位置決めを 行うウエハユニット,マスクの位置調整 やマーク位置検出を行うマスクユニッ ト,およびウエハオートローダから構成される.

ウエハユニットはたて形 XY ステージとその上 に搭載されたマスク微小回転機構から成る. XY ス テージはウエハのステップ移動, アライメント, 搭 載された静電容量式変位計のマスク面やウエハ面上 の走査等に用い, その走り面は, ギャップ設定の基 準となる.

マスクユニットは、マスク微動機構、プリアライ メント光学系、ファインアライメント光学系から構 成する.マスク微動機構は、露光ギャップ設定のた めのマスクのあおりと回転位置の補正に用いる.プ リアライメント光学系は、自動供給されたウエハを ファインアライメントで検出可能な範囲内に自動位置 決めするための検出光学系である.ファインアライメ ント光学系は、露光領域の周辺に配置された4組の位 置合わせ用回折格子に対応する後述の光へテロダイン 干渉光学系4チャネルである.SOR 光の大気中取出 しにおいて減衰を小さくするため、光学系はHe 雰囲 気中に SOR 光を遮らないよう配置し、露光中位置合 わせサーボを可能としている.

ウエハローダには、ウエハを粗く位置決めするオリ エンテーション機構、たて形ウエハホルダにウエハを 供給するための縦横変換機構などが付いている.ウエ ハは、ウエハユニット全体がウエハローダ前面に移動 することにより自動供給される.

装置の動作シーケンスおよび装置各部の仕様を表2 に示す.装置は、マスク装着とXYステージ走り面 に対する平行出し後、ウエハ供給、プリアライメン ト、ウエハステップ移動、ファインアライメント、露 光の順序で計算機で制御される.



Fig. 4 Schematic of the vertical X-ray stepper

Sequence	Mask stage	Wafer stage	Position sensor		
Mask leveling	Mask tilting z1, z2, z3 0.1 μm/±150 μm	(Vertical linear)	Capacitance sensor $0.1 \ \mu m/\pm 50 \ \mu m$		
Wafer pre-alignment	_	Wafer rotation heta 1 $\mu$ rad/ $\pm$ 30 mrad	Pre-alignment scope 0.1 μm/±50 μm		
Wafer stepping			Laser interferometer 5 nm/200 mm		
Alignment	Mask rotation heta 1 $\mu$ rad/ $\pm$ 1 mrad	vertical linear x, y 5 nm/200 mm	Optical-heterodyne interferometry $8.3 \text{ nm}/\pm 1.5 \mu\text{m}$ (grating pitch=6 $\mu$ m)		

 Table 2
 Operation sequence and devices with specifications showing function, axis name, and precision/stroke



Fig. 5 Positioning characteristics of the X-Y stage with 50 nm step displacement

# 3.2 たて形 XY ステージ

たて形 XY ステージは,直進/回転の案内・支持部, 駆動部のすべての部分にセラミック多孔質絞りを用い た空気軸受を適用し,運動精度を高めるとともに,主 要部品にアルミナセラミックを用いて軽量化を図っ た.図4に示すように,逆T字形をしたX軸エアス ライダ(約18kg)の縦軸でY軸エアスライダ(約 10kg)を案内し,Z方向は磁石の吸引力とエアパッ ドの浮上力をパランスさせて純鉄製イケール面で一面 案内する.送り系はセラミック製空気静圧送りねじ<sup>10)</sup> であり,長ストロークから微動まで本 XY ステージ で位置決めを行う.また,たて形ステージであるため 定張力ばねによる重力補償機構を付与している.

静電容量式変位計を用いて測定した微小ステップ送 り(50 nm)の特性を図5に示す.定力外乱が原因と 考えられるステップ移動時のオーバシュート,位置決 め中の±7~8 nm 程度の位置変動が観測される.図6 に示す静電容量式変位計とレーザ干渉計の変位出力の 比較からわかるように,レーザ干渉計には大気の揺ら ぎ等に起因する変動があり,その出力で制御している ために位置決めが変動する. 図7に静 電容量式変位計で測定した XY ス テージの繰返し位置決め精度を示す. 位置決め点の変動は 3σ値で約±15 nm である. 最終的な位置合わせは後 述の光へテロダイン干渉式位置検出系 の信号を用いるので, このステップ位 置決め精度は装置として十分な値であ る.

## 3.3 微動機構

マスク及びウエハ微動機構の構成を 図8に示す.X線マスクは、平面度 を損なうことのないようマスクステー ジ上3点に配置した永久磁石で点接触

吸着する.マスクステージは,マスクに2方向の並 進とあおりを与える3組の2方向駆動軸と面内微小 回転軸を有し,いずれもひずみゲージによるヒステリ シス補正付き圧電素子とレバー式変位拡大機構(倍率 5)を組み合わせて構成している.一方,ウェハはウ エハステージ上の膜シール付きピン支持形チャックに 真空吸着し,平面度を矯正する.ウェハステージに は,インチワームで駆動される面内回転軸とエ7 チューブによる2方向上下動機構を組み込んでいる.

図9に差動トランス式変位計で測定したマスクス テージ各軸のフルストローク移動特性,図10に微小 ステップ送り特性を示す. 圧電素子に特有のヒステリ シスは約2.5%,チルト機構特有の軸間干渉は約-40









Fig. 8 Multi-axis micropositioning mechanism



Fig. 9 Mask stage positioning characteristics

dBであり,精度,ストロークともに仕様値(表2) を満足している.

3.4 プリアライメント位置検出系

図11にプリアライメント光学系の構成を示す.半 導体レーザのビームをコリメータレンズと対物レンズ



Fig. 10 Micro-step positioning characteristics of tilting and rotation axes

- 65 -



Fig. 11 Optical system for water pre-alignment



H:68µm/div V:1V/div (a) Detector output (b) Differential signal Fig. 12 Detection signal of the pre-alignment system

を通してウエハの周辺3点に配置された回折格子1次 回折方向から入射する.ビームスポットはウエハ上で 550×190 µmの楕円である.0次方向の回折光は対物 レンズと拡大レンズにより8倍の拡大像となり,4分 割ディテクタに投影される.このような1次回折方向 入射光学系により,半導体レーザへの戻り光や正反射 によるノイズを低減でき,S/N比の高い検出信号が 得られる.

図12に100×100 µmの回折格子をレーザビームス ポット内で短径方向に走査したときの検出信号を示 す.2分割ディテクタの各々で得られる回折強度信号 を重ね合わせると、同図(a)のように分割ディテク タの境界領域で交差する信号となる.これらの差をと ることにより、同図(b)のようなゼロクロス検出信

> 号が得られる.検出範囲は±250  $\mu$ m以上あ り,検出感度は約20 nmが得られている.図 13 に本検出系によるウエハの位置決め再現性 を示す.  $3\sigma$ 値で*XY*方向とも±0.4  $\mu$ m,回 転方向±7  $\mu$ rad であり,これはプリアライメ ントへの要求精度±1.5  $\mu$ m(ファインアライ メント回折格子ピッチの±1/4)を満たしてい る.

3.5 光ヘテロダイン干渉式位置検出系

マスク・ウエハの相対変位検出は、位置検出



464

system

感度が極めて高いことはもちろん,検出精度が,露光 層ごとに変化するウエハ表面状態,マスク・ウエハ間 のギャップ変動などに影響されないことが重要であ る.そこで,従来の画像エッジを利用する方法に比べ て高い検出分解能を期待できる光の回折・干渉を利用 し,かつ,変位を位相情報として得ることのできる光 ヘテロダイン干渉式位置検出法を開発した<sup>11)</sup>.

光ヘテロダイン干渉式位置検出方式は、周波数のわ ずかに異なるレーザ光をマスクとウエハ上に設けた回 折格子に対称な2方向から入射し、回折格子面の法線 方向への回折光が相互に干渉して生成するビート信号 の位相情報を回折格子の横方向変位計測に利用する. マスクおよびウエハの回折格子からのビート信号の位 相を各々検出し、両者の差を求めると、回折格子の ピッチを p、相互の位置ずれを x とした時、位相差  $\Delta \phi$  は

 $\Delta \phi = \frac{2\pi \cdot x}{p/2}$ 

で表され、周期的で位置ずれに比例する検出信号を得る. 図14 に、光ヘテロダイン干渉位置検出系の構成 と回折格子の配置、および検出される光ヘテロダイン 干渉ビート信号を示す.マスク回折格子は窒化シリコ ン薄膜上に形成した Ta のパタン、ウエハ回折格子は シリコンに刻んだ段差である.ピッチ 6 µm の回折格 子を用い、図のような正弦波信号の位相差を分解能

1°で検出する.上式より位置検出感度は8.3 nmとなる.本方式の最大の特徴は位置検出 感度が極めて高いことである.ほかに,対称 光学系なのでギャップ変動に影響されない, 同一の光路を進む2ビームの位相差を検出す るので大気の揺らぎの影響を受けない,位相 検出なのでウエハ表面反射率変化の影響が小 さい等の特徴がある.

#### 3.6 位置決め/位置合わせ制御

以上述べた機構を用いてウエハを、ローダ



Fig. 14 Optical-heterodyne mark detection system and detected beat signals

での機械的押付け、ホルダへのチャック後のプリアラ イメント位置検出系とレーザ干渉計による位置決め、 露光位置での光へテロダイン検出信号による位置合わ せ制御という順番で、ミリメートル領域からナノメー トル領域に順次位置決めする.

図15にXYステージに関する位置決め制御系をプ ロック図で示す.位置決め制御は、ねじ軸に取り付け たタコメータジェネレータからの信号による速度制御 (大移動),目標位置近傍でのレーザ干渉計差分信号に よる位置制御(±10 µm の範囲),光ヘテロダイン検 出信号による位置決め制御(マスクとの位置合わせ) を順次切り替える.図16はそれぞれの制御モードに おけるたて形XYステージの動作特性である.図16 (a)に示すように20 mm のステップ位置決めに要す る時間は約0.5秒,同図(b)に示すようにその後の XY 位置合わせの所要時間は、比較的大きな位置すれ



Fig. 15 Block diagram of the X-Y stage positioning control system

--- 66 ---



Fig. 16 Positioning control waveforms of the X-Y stage

1µmの場合で約0.5秒である.また、レーザ干渉計 から光ヘテロダイン検出信号への切替え時には約100 msの両信号同時フィードバック時間を設けて切替え の安定化を図っているが、鉛直Y軸には重力補償の アンバランスによる波形の乱れが観測される.なお、 ここで示したほかに、XY位置合わせに先だって光へ テロダイン信号とマスク回転機構による マスク回転ずれ補正を行っている.

# 4. 性能評価

# 4.1 位置合わせ精度

装置の位置合わせ性能は露光実験により評価した. 位置合わせ用の回折格子を 形成したシリコンウエハ上にレジストを 塗布し, これに本X線ステッパを用い て転写したパタンの位置をウエハ上で光 波干渉式座標測定機を用いて測定するこ とで位置合わせ精度を求めた. 露光 フィールドサイズは8mm角, 測定点は フィールド 内9点 で, 18 および19 フィールドである.

図17(a)は、あらかじめフォトス テッパにより下層パタンが焼き付けられ ているウエハに本装置で上層パタンを位 置合わせした後露光し、下層パタンに対 する上層パタンの位置合わせ精度を求め た結果である.この場合の位置ずれ誤差 には、マスク誤差、フォトステッパの誤 差などすべての誤差要因が含まれるの で、露光フィールド内の測定点ごとの位 置ずれ平均値に対する位置ずれデータの分散を 求め、装置の位置合わせ再現性とした、 $3\sigma$ 値 は約 $\pm 0.1 \mu m$ であった、

図 17 (b) は、上記のようなマスク誤差等の 露光装置以外の誤差要因を除去するため、同一 のマスクを用い、回折格子マークの位置合わせ 点を1ビッチずらせた2層を重ねて露光して、 転写されたパタンの相対位置を測定することに より求めた位置合わせ精度である.これは、 SOR 露光と SOR 露光間の重ね合わせ精度を示 すもので、純粋に装置自身の機械精度を表して いる.図のように位置合わせ精度は、位置ずれ の平均値 50 nm 以下,ばらつき約±80 nm (30 値)以下と良好であった.

# 4.2 テストデバイスの露光実験

本装置のプロセス適用性確認を目的に, 微細 なパタンを有するテストデバイスの露光工程に本ス テッパを適用した. 図18 は,本X線ステッパを用い た SOR 露光を5層に適用して製作した0.2 µm 級の 微細パタンを含む MOS リングオシレータ回路であ る<sup>12)</sup>.この結果,回路の正常動作が確認され,本装置 のフィージビリティを確認することができた.但し,



(a) Alignment repeatability to photo-printed layers





<u>-67</u>



Fig. 18 An SEM photograph of a test device fabricated by SOR lithography using the vertical X-ray stepper

本露光実験における位置合わせ精度は写真から観察されるように前記装置性能よりは悪くなっており,今後,実際のLSI製造プロセスに適用した場合の精度 維持について検討する必要があることを示している.

## 5. 結 言

SOR 露光を将来の超微細なパタン転写に適用可能 とするため,高精度位置合わせ性能を有するたて形の X線ステッパを開発した.得られた結果は以下のと おりである.

- (1) 露光装置高性能化にとって最も重要な要素技術として,空気静圧送りねじを用いるたて形 XY ステージ,および回折格子をマークとする光へテ ロダイン干渉位置検出法を開発した.
- (2) これら要素技術を組み合わせて SOR 用 X 線 ステッパを試作し,露光実験により性能を評価し た結果,位置合わせ精度±0.1 μm (3σ 値)が得 られた.
- (3) 以上により,開発した技術はクオータミクロン領域に適用可能なX線ステッパ構成技術として有用な性能を有していることを明らかにした.

今後は、実際のLSI製造プロセス等への適用を進め、プロセス適用性を評価すると共に、装置の信頼性の向上を図っていく予定である.

## 参考文献

- 例えば、A. Heuberger: X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B6(1), Jan./Feb. (1988) 107.
- S. Ishihara, T. Kitayama and H. Yoshihara: X-ray Lithography for Quarter-Micron Structures, Extended Abstract of 1st Micro Process Conf., Tokyo, (1988) 72.
- J. P. Silverman et al.: Fabrication of Fully Scaled 0.5μm n-type Metal-oxide Semiconductor Test Devices using Synchrotron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B6(6), Nov./Dec. (1988) 2147.
- E. Kouno, Y. Tanaka, J. Iwata, Y. Tasai and E. Kakimoto: An X-ray Stepper for Synchrotron Radiation Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B6(6), Nov./ Dec. (1988) 2135.
- 5) E. Cullmann, K. Cooper and W. Vach : An X-ray Stepper for Production Lithography, SPIE, **773**, (1987) 2.
- S. Ishihara, M. Kanai, A. Une and M. Suzuki: A Vertical Stepper for Synchrotron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B7(6), Nov./Dec. (1989) 1652.
- M. Suzuki, T. Kaneko and Y. Saitoh : Replicated Resist Pattern Resolution with Synchrotron Orbital Radiation, J. Vac. Sci. Technol., B7(1), Jan./Feb. (1989) 47.
- T. Kaneko, M. Suzuki, A. Ozawa and T. Ohkubo: Measurement of Mask Temperature Rise and Distortion in SR Lithography, Extended Abstract of the 17th Conf. on SSDM, Tokyo, (1985) 353.
- 9) T. Kaneko, S. Itabashi, Y. Saitoh, H. Yoshihara and T. Kitayama: A Beamline and Its Components for SR Lithography, JJAP Series 3, Proc. 1989 Int. Symp. on Micro Process Conf., (1989) 116.
- 10) 金井宗統,石原 直:セラミック製空気静圧送りねじの 開発,精密工学会誌,56,12 (1990) 2201.
- M. Suzuki and A. Une: An Optical-heterodyne Alignment Technique for Quater-micron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B7(6), (1989) 1971.
- 12) A. Yoshikawa, T. Horiuchi, K. Deguchi, M. Miyake, E. Yamamoto, Y. Sakakibara and T. Kitayama: Synchrotron Radiation Lithography Applied to Fabrication of Deep-Submicron NMOS Devices at All Exposure Levels, Microelectronic Engg., 11, (1990) 233.