SR 転写用ビームラインシステム

島野 裕樹*・一二三 敬**・糸賀 賢二*・尾崎 禎彦*

(受付1994年6月23日, 掲載決定1994年9月12日)

SR Lithography Beamline System

Hiroki SHIMANO, Takashi HIFUMI, Kenji ITOGA and Yoshihiko OZAKI

(Semiconductor Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp, 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661)

(Received June 23, 1994, Accepted September 12, 1994)

A high power X-ray delivery system consisting of a superconducting compact storage ring and a novel beamline is now in use for SR (synchrotron radiation) lithography research at Mitsubishi Electric. The double ellipsoidal focusing mirror optics of the beamline collects and condenses the horizontally diverging SR beam and transports it to the exposure station, a Karl Suss X-ray stepper. The beamline is kept at an ultrahigh vacuum level by the vacuum control system. Furthermore, the vacuum protection of the beamline ensures that a storage ring vacuum of at least 1.33×10^{-6} Pa is maintained, even when the beamline vacuum is broken down. We have also investigated the effects of the electron beam orbit change on the vacuum performance of the beamline.

1. はじめに

当社では、最小寸法が $0.15 \mu\text{m}$ 以下の半導体デバイス製造に必要な微細加工を実現する、シンクロトロン放射(SR)光を光源とするX線リソグラフィの開発を行っている。光源には、当社が開発した、レーストラック型の超電導小型SRリング¹⁾を用いている。SRリングは、ビームエネルギー600 MeVで現在、運転している。

ビームラインは、SR光からX線リソグラフィに最適な、 $0.6 \sim 1.2 \text{ nm}$ の波長帯域の露光X線を取り出し、X線ステッパーまで導くものである。筆者らは、X線リソグラフィのスループットを向上させるため、露光X線強度の増大を実現する集光光学系のビームラインを設計した²⁾。

1993年にSRリングの250 mAビーム蓄積に成功し、同年10月にビームラインシステムが完成した。SR光を

使って光軸調整³⁾を行なった後、X線ステッパーへの露光X線の供給を開始した。

本稿では、ビームライン光学系、真空システムの概要、光軸調整後のビームラインの光学、真空特性について記述する。さらにSRリング内の電子ビーム軌道の変化が引き起こすビームライン特性の変化について試験した。ここでは、特に真空特性に関して報告する。

2. ビームライン光学系及び光学特性

ビームライン光学系をFig. 1に示す。2枚の回転楕円体ミラーで構成する集光光学系によって、水平方向に大きな発散角をもって放射するSR光のうち 2° の発散角を取り込み、一旦、第1段ミラーの焦点に集光し、さらに第2段ミラーから7000 mm離れた焦点に集光することによって、光軸に対し最大約 0.17° の傾きを持つX線ビームにし、ビームライン末端部の真空窓、厚さ $20 \mu\text{m}$ のベリリウム膜を通して、X線ステッパーに露光X線を導く。露光面上には、水平方向の幅25 mmの帯繞の照射領域が形成される。X線ステッパーでは、X線マスクウエハを一体にし、露光X線に対して垂直方向に走査することによって、 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ の露光領

* 三菱電機(株)半導体基礎研究所 (〒661 兵庫県尼崎市塚口本町8丁目1番1号)

** 現在、(株)ソルテック (〒300-42 茨城県つくば市和台16番1)

Fig. 1 Schematic diagram of the beamline optics.

Fig. 2 Ellipsoidal mirror.

域を得るが、露光強度の均一性は、光線追跡計算から9.5%と見積られた。

開発した回転楕円体ミラーの外観写真をFig. 2に示す。SiO₂基板を切削加工し、Pt膜を100 nm蒸着したもので、基板形状精度 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 、表面粗度 $0.5 \text{ nm} \cdot \text{rms}$ に仕上がっている。有効反射面のサイズは、第1段ミラーでは幅83 mm×長さ349 mm、第2段ミラーでは幅42 mm×長さ332 mmである。各ミラーは、SR光照射に伴う熱負荷による反射面形状の変化を抑えるため水冷式ステージ上に設置され、さらに6軸ゴニオメータによって姿勢、位置が制御される。

光軸調整は、SR光を通して実施した。第1段ミラーの焦点、その1 m下流の位置、さらにベリリウム窓の外に蛍光板モニターを設置し、SRビーム形状が、光線

追跡計算による設計値に一致するように、6軸ゴニオメータによるミラーの位置及び姿勢の調整を行なった。

Fig. 3に光軸調整後のSRビーム形状を示す。焦点位置でビーム型4 mm程度に集光され、ベリリウム窓透過後には水平方向に約25 mm程度の帯状のSRビームに成形されていることがわかる。

3. 真空システム

ビームラインの真空排気システムをFig. 4に示す。全系を4つのブロック：BS（ビームシャッター）、MC1（第1段ミラーチャンバー）、ADL（衝撃波遅延管）、MC2（第2段ミラーチャンバー）に分割している。図中でTGPはチタンゲッターポンプ、IPはスパッタイオンポンプ、TPはターボ分子ポンプ、RPはオイルフリーの粗引きポンプ、MVはマニュアルゲートバルブ、PVはニューマティックバルブで、その中、PV1～PV4が各ブロックを仕切っている、FCVは高速遮断バルブ、VSはコールドカソードタイプの真空計をそれぞれ意味している。図には示していないが、MC2とベリリウム窓の間の位置に質量分析計（QMS）を設置した。

各ポンプの排気容量、位置は、蓄積電流220 mAのSR光をビームラインに通した状態において、SRリングとの境界のBSにおいては、SRリングの真空度に影響を与えないレベルの $1.33 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 、MC1, 2においては、ミラーのPt蒸着面に対する残留分子による汚染防止から $1.33 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ の到達真空度になるように設計した。

(a)

(b)

Fig. 3 Fluorescence images of the SR beam, (a) at the focal point and (b) after Be window.

Fig. 4 Vacuum system of the beamline.

Fig. 5 Pressures over the beamline and stored beam current throughout 24 hours.

Fig. 5 に転写実験を実施した日の各ブロックの真空度及び蓄積電流の軌跡を示す。ここで on-beam 状態での BS 部分の真空度は、MC1 部分と殆ど同じ真空度を示したので図には示していない。SR 光が BS 部分の真空ダ

クトに照射して放出する光脱離ガスが予想以上に大きいためと考えている。SR 光を通さない状態で、真空度は 2×10^{-6} Pa 以下に保たれ、蓄積電流 100 mA による SR 光が通った状態では MC1 部分は 5×10^{-6} Pa, MC2 部分は 3.5×10^{-6} Pa に達した。SR リングにビームを再入射するときは、一旦、BS を閉じ、SR 光を遮断するので一時的に真空度はよくなっている。

ビームラインの真空度は保持は、各ブロックの真空度を真空計 (VS1~VS4) によってモニタし、設定してある 4 種類の規定値に従って、バルブ及びポンプをシーケンサコントローラで制御して行なう。例えば PV1~PV4 の各バルブに対して、両側のブロックのうちいずれか一方の真空度が規定値を越えた場合、自動的に閉じられる。さらに下流側のバルブあるいは、FCV の状態が閉になると自動的に閉じられる。また、バルブに SR 光が照射されると熱負荷による損傷を受けるので、バルブが閉じる時は、BS が自動的に閉じるようにロ

Fig. 6 Beamline control system.

ジックが組まれている。

各ブロック内のターボヘッドバルブ PV5～PV7 は、ブロック内真空度が規定値を越えて時、あるいは TP または RP が停止すると自動的に閉じられる。

シーケンスコントローラの上位に VAX コンピュータが位置し、Fig. 6 に示すように SR リング/ビームライン/X 線ステッパー間の協調制御を行なっている。ビームラインのポンプ、バルブの状態、各ブロックの真空度、さらに第 1 段ミラーの上流側に設置してある、光電子放出型 X 線位置検出器⁹⁾による SR 光位置データを VAX がモニタしている。さらに SR リングの状態信号、蓄積電流をモニタし、SR リングへのビーム入射が開始される際、リングからの BS 閉要求を受けると BS を閉じるインタロック機能がある。X 線ステッパーに対してはリングの蓄積状態、BS の開状態を確認して露光許可信号が送られるようになっている。図には示していないが、リングからの蓄積電流データを光ファイバーを介して、直接 X 線ステッパーに送られ、露光時間制御に使われている。

また、DEC ネットを介してリングの制御用コンピュータから SR リング内に設置されている BPM（電子ビーム位置モニタ）データを読み込み、電子ビームの軌道計算によって、光源点における電子ビーム軌道の位置、角度変化を見積ることもできるようになっている。

真空破壊からのリングへの真空保護システムは、ADL と動作応答時間 20 ms の FCV によって構成されている⁶⁾。MC2 下流に設置した FCV トリガセンサが、例えば、ベリリウム窓の破壊等による圧力上昇を検知し、FCV へ閉動作のトリガ信号を送る。ADL は、真空破壊によって発生する衝撃波の電波速度を遅延させ、SR リングへの流入気体量を抑えるものである。

MC1-MC2 間で FCV, PV1, 2 を設置した残りの空間、即ち長さ 1600 mm におさまる制約条件のもとで、真空破壊時でもリング内の真空度が 1.33×10^{-6} Pa 以下

に保持できる遅延効率を実現するように ADL の最適設計をした。得られた ADL は、径 400 mm、中に収めるバップルは 6 枚、各バップルの開口サイズは 50×20 mm² のものである。

4. 真空特性

第 1, 第 2 段ミラー及びベリリウム窓は SR 光の照射を受けると光脱離ガスを放出し、MC1, 2 及び MC2 下流の真空度を劣化させる。特にミラーチャンバー内の真空劣化は、ミラー面を汚染させ、反射率低下の原因となる。そこで蓄積電流を徐々に上げ、ミラー、ベリリウム面の光脱離エイジングを実施した。Fig. 7 に積算電流ドーズ量 (mA·hr) に対するミラーチャンバー内の蓄積電流で規格化した圧力 (Pa/mA) の変位を示す。図中にはリングに蓄積した初期電流値の変位も示してある。ところで、リングのダクト材料である SUS, アルミ合金、無酸素銅に対する SR 光による光脱離は、よく調べられており、光脱離係数或は規格化圧力の変化が積算電流ドーズ量の負のべき乗に比例していると知られている。例えば、SUS, アルミ合金に対しては、約 -1 乗^{7,8)}、無酸素銅に対しては約 -0.5 乗⁹⁾ の比例関係が示されている。ミラーの Pt 蒸着面に対しても同じような関係があると仮定すると、Fig. 7 において積算電流ドーズ量が 300 mA·hr、初期蓄積電流値が 20 mA を越えた地点から第 1, 第 2 段ミラーとも光脱離エイジングが支配的な真空の枯れが進行して行き、その光脱離係数は積算電流ドーズ量の約 -0.7 乗に比例していると見積もった。残留ガスの組成比を QMS から求めると、水素 85%, 水 6%, 1 酸化炭素 5%, 2 酸化炭素 3% であった。

転写実験に使用できる蓄積電流値が次第に増大していったが、BS を開いて SR 光を通した瞬間に圧力上昇による真空バルブへのインタロックが作動し、ビームライ

Fig. 7 Normalized pressures of the mirror chambers versus integrated beam current dose.

Fig. 8 Normalized pressure change of the beamline versus vertical change of the electron beam orbit.

ンに SR 光を導くことができなくなることがしばしば発生した。その原因として電子ビーム軌道が変化したことによってミラー表面上の SR 光の照射領域の位置が変化したと考えた。即ち、光脱離エイジングが充分行なわれていない領域が、SR 光の照射を受けるようになり、光脱離ガス放出が急激に増大するためと考えた。そこで、SR リングに設置してあるステアリング電磁石を励磁して、電子ビーム軌道を水平方向に、或は垂直方向に変化させ、その時の MC1, MC2 の圧力変化を調べた。

水平方向の軌道変化に対しては圧力変化は殆ど見られなかったが、垂直方向の軌道変化に対しては、Fig. 8 に示すような圧力変化が見られた。但し、MC2 ブロックのターボヘッドバルブ PV7 が閉の状態で行ったので MC2 のベース圧力が高くなっている。図中の横軸は、ステアリング電磁石の励磁電流値に対する光源点における軌道変化 dY を示し、軌道計算から見積ったものである。MC1, MC2 ともプラスの軌道変化に対しては同じような圧力上昇が見られ、SR 光のミラー面への照射領域の位置が変化するためと考える。ところが、マイナスの軌道変化に対しては MC2 で大きな圧力上昇が見られた。光線追跡計算の結果、ビーム軌道を垂直方向にマイナスの変化をさせると第 1 段ミラーによる SR 光の集光位置が設計値よりも下流側に移動することによって、Fig. 9 に示すように第 2 段ミラー面上 SR 光の照射領域の位置が変化するだけでなく、照射領域の広がりが増えれば、吸収熱量も増大していることがわかった。したがって、この方向への軌道変化によってミラーへの熱負荷の増大によるガス放出が加わった MC2 の圧力上昇が大きくなったと予想できる。また、図中には示さなかったが、ビーム軌道のプラス方向の変位においては第 1 段ミラーの集光位置が上流側に移動するために逆に第 2

Fig. 9 Absorbed SR energy density contours in the 2nd mirror, (a) without electron beam orbit change, (b) with -1.5 mm of vertical change of the electron beam orbit. Position of illumination area in (b) shifts downstream from that in (a).

段ミラー面上の SR 光の照射領域の広がり、むしろ吸収熱量が低下することがわかった。垂直方向のビーム軌道変化を ± 0.5 mm 以内に制御すれば、大きな圧力上昇を抑えることができることがわかった。

ベリリウム窓付近の圧力変化は MC1, MC2 程に顕著には現れなかった。ベリリウム窓上の SR 光の照射領域の位置変化が、ミラー面上に比べ、はるかに小さいからであると考えられる。以上のことは光線追跡計算からも予想できた。

5. まとめ

SR 光を集光し、露光 X 線を増大して X 線ステッパーに導く光学系を持つビームラインを完成された。このシステムは SR 転写の高スループット化を実現するものである。SR ビーム形状を蛍光板モニターで観測した結果、ほぼ設計通りの集光光学特性を実現していることがわかった。一方、真空システムには、真空破壊時からの SR リング及びビームライン真空排気機器の保護、SR

光照射から真空バルブ系の保護、真空度の保持等の機能を持たせた。さらに、転写実験が円滑に行なえるようにSRリング/ビームライン/X線ステッパの協調制御を行っている。SR光が直接、照射されるミラー面、ベリリウム窓の上流の露光シャッタの光脱離エイジングを実施した。その結果、現在、リングの蓄積電流100 mA以上のSR光をビームラインに導くことができるようになった。リング内の電子ビーム軌道変化が、ビームラインの真空度を劣化させることがわかった。その原因として、SR光の照射領域の位置変化、集光特性の変化によるミラー面へのSR光の熱負荷の増大が寄与していることがわかった。

〔文 献〕

- 1) 中西哲也, 山田忠利, 奥田壮一郎, 岩本雅民, 中村史朗: シンクロトロン放射光装置の研究試作, 三菱電機技報, 65, No 11 (1991) 1080.
- 2) H. Shimano, T. Hifumi, Y. Ozaki: Design Optimization of Synchrotron Radiation Lithography Beamline for a Compact Storage Ring, Jpn. J. Appl. Phys., 31 (1992) 4185.
- 3) 島野裕樹, 浅野和夫, 尾崎禎彦: SR ビームラインの光軸調整, 第41回応用物理学会春季講演会予稿集, (1994) 555.
- 4) H. Suzuki, Sunao Koderu, H. Shimano: Development of Off-Axis Ellipsoidal Mirrors, Proceeding of the 7th International Precision Engineering Seminar (1993).
- 5) T. Mitsuhashi, A. Ueda, T. Katsura: Rev. Sci. Instrum. 63 (1992) 534.
- 6) 一二三敬, 尾崎禎彦, 幸丸正樹: SR ビームライン用真空保護システムの開発 (2), 第53回応用物理学会秋季講演会予稿集, (1992) 480.
- 7) 淡路直樹, 小平政宣, 岸本 健, 大野守史, 土館裕幸: 真空 34 (1991) 752.
- 8) 百瀬 丘, O. Grobner, 堀越源一, 石丸 肇, 金沢健一, 小林正典, 水野 元, 成島勝也, 渡辺宏美: 真空 27 (1984) 126.
- 9) J. Nishino, M. Kawakami, T. Yanagisawa, K. Okada: J. Vac. Sci. Technol B8 (1990) 1514.