

## 大型加速器と小型加速器

## 三菱電機の小型放射光装置

田中 博文\*

## Compact SR Ring of Mitsubishi Electric Corporation

Hirofumi TANAKA\*

## 1. はじめに

1980年代の後半になって、次世代の半導体の高集積化には放射光による転写技術（X線リソグラフィ技術）を開発する必要があるという気運が高まり、半導体工場に設置できる小型の放射光（SR）装置の開発が日本やイギリスで行なわれた。そして、日本で4台、イギリスで1台の超電導SR装置が開発された。当社は半導体事業、加速器事業の双方を手がける総合電機メーカーとしてSR装置の開発を行ない、1993年に装置を稼働させた。以降2005年3月に至るまでX線リソグラフィ研究の為に、SR装置の運転を継続してきた。そして装置開発と同程度に多くの労力とノウハウが必要な加速器の維持・管理技術を蓄積してきた。

リソグラフィとはマスク上に形成された回路パターンを半導体ウェハ上に塗布されたレジストと呼ばれる感光性樹脂上に投影し、感光部を化学変化させ、不溶部をパターンとして形成させるものである。半導体工場で量産に用いるためには、①スループットの確保、②パターン精度の2つが必要とされる。SR光源への要請は、光源として必要なビームスペックの確保に加え、①高稼働率、②SR光位置の再現性の2点が要求される。①の要請は、SR光供給停止が1日でも発生すると半導体製造がストップし多額の損失が生じることによる。②の要請は、半導体素子が完成するまでに1枚のウェハに対し数10回のリソグラフィ工程が必要であり、パターン最小寸法の3分の1以下の重ね合わせ精度を実現する為に必要なSR光の位置の再現性が要求されることによる。本論文では三菱電機のSR装置に関し紹介し、試作や長期運転で得られ

たいくつかの知見を紹介させていただく。

## 2. 全体システム

SR装置は、三菱電機先端技術総合研究所の「西部基礎研究棟」と呼ばれる6階建て研究棟の1階に建設された。この研究棟は1989年に竣工したものであり、SR装置開発は建屋建設と同時期に行なわれた。SR装置の構成を図1に示す<sup>1)</sup>。また基本パラメータを表1~3に示す。電子ビームは20 MeV線形加速器（ライナック）で予備加速され、1 GeVシンクロトロンで更に加速された後、600 MeV・蓄積リング（超電導小型SRリング）に蓄えられ、SR光を発生する。SR光はSRビームラインにより放射線遮蔽壁を隔てた隣室のクリーンルーム内に導かれる。2本のビームラインがX線リソグラフィ研究用、1本のビームラインが物性研究用に用いられている。

SR装置の全体システムを考える際、加速蓄積方式とするかフルエネルギー入射方式とするかが一つの大きな選択肢となる。前者は入射器を小型にできるが、

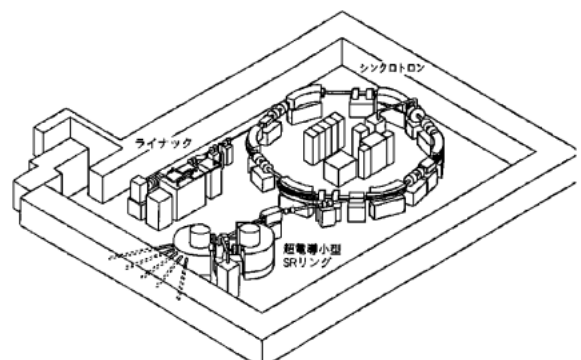


図1 三菱電機のSR装置

\* 三菱電機株式会社・先端技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R & D Center  
(E-mail: tanaka.hirofumi@wrc.melco.co.jp)

ビームの再入射を行なうときに偏向電磁石の磁場を変える必要がある。後者は入射器が大きくなるが、蓄積電流の減衰分を補給できるので、要求される強度のSR光を長期に連続して発生できる。また、蓄積リングにビームを入射するとき、加速蓄積方式では超電導電磁石の励磁運転が必要になるが、フルエネルギー入射方式では磁界は一定でよく、永久電流モードの運転が可能である。超電導偏向電磁石の故障可能性を最小化するには超電導コイルを永久電流モード運転するのが望ましい。また、液体ヘリウムの消費量低減や電気

表1 超電導SRリングの基本パラメータ

加速エネルギー	600 MeV
入射エネルギー	600 MeV
蓄積電流	430 mA
周長	9.2 m
偏向半径	0.593 m
偏向磁場強度	3.5 T
臨界波長	1.65 nm
加速周波数	130 MHz
ビーム寿命	5 時間 (400 mA)

表2 ブースタシンクロトロンの基本パラメータ

加速エネルギー	1 GeV
入射エネルギー	20 MeV
加速電流	60 mA
周長	34.6 m
偏向半径	2.23 m
偏向磁場強度	1.5 T
加速周波数	130 MHz
繰り返し	2 Hz

表3 線形加速器の基本パラメータ

加速エネルギー	20 MeV
電子銃エネルギー	100 keV
加速電流	100 mA
パルス幅	5 $\mu$ s
繰り返し	2 Hz
加速周波数	2.856 GHz

代節約にも寄与する。我々は当社のSR装置にフルエネルギー入射方式を採用した。

また、ブースタシンクロトロンの最高エネルギーを1 GeVにしたのは以下のような理由による。開発当時はX線波長が1 nm程度の放射光を用いたX線リソグラフィが最も早期に実用化すると考えられており、超電導偏向電磁石を用いたエネルギー600 MeV程度のシステムが最適であった。しかし、その次の世代でもX線リソグラフィを適用するには、より微細なパターンが切れる可能性がある波長0.5 nm程度のX線が必要になる可能性が高い。その場合、1 GeV程度で大電流蓄積が可能なSR装置が必要になる。この基本技術を確認することを狙いブースタシンクロトロンの最高エネルギーは1 GeVに設定し、且つ、加速蓄積運転が可能な設計にした。

### 3. 線形加速器とブースタシンクロトロン

線形加速器とブースタシンクロトロンの全景を図2に示す。図の左下側が20 MeV線形加速器、上側がブースタシンクロトロンである。線形加速器は当社内で既に技術的に確立していた定在波型のSバンド・ライナックを用いた。ブースタシンクロトロンでの加速ゲインを50倍に設定し、線形加速器の加速エネルギーは20 MeVに設定した。電子銃は100 keVのパルス電子銃を用いた。ブースタシンクロトロンは、FODOセルのコンベンショナルな磁石配置にした。ブースタシンクロトロンを用いて将来の産業用SR装置の実現に必要な技術課題の研究を行った。具体的には、①ビーム位置モニタ(BPM)の測定誤差が軌道歪み(COD)補正に与える影響<sup>2)</sup>、②低エネルギー入射時のC型偏向電磁石の残留磁場がビーム加速に与える影響<sup>3)</sup>、③電磁石電源の大きな電流リップルが加

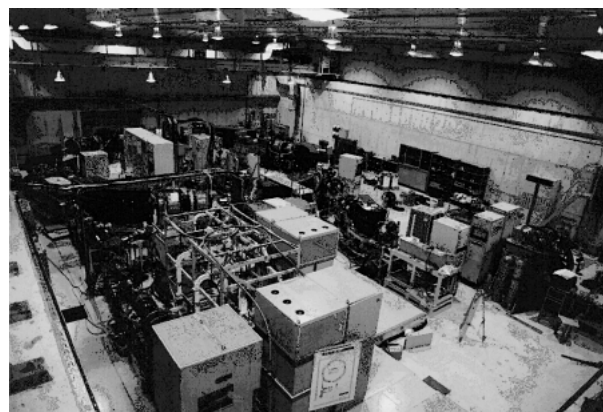


図2 20 MeV線形加速器(左下)と1 GeVブースタシンクロトロン(上)

速ビームに与える影響<sup>4)</sup>に関する研究を行ない、産業用装置として要求される機能を満足する必要最低限の装置スペックを定量化した。

#### 4. 超電導 SR リング

超電導 SR リングの全景を図3に、また平面構成を図4に示す。直線部からの入射が容易である、180度超電導偏向電磁石を2個用いたレーストラック形状の磁石配置とした<sup>5)</sup>。図3で180度偏向電磁石の上に見えるのが液体ヘリウムを貯蔵するタンク、下部が鉄の磁気遮蔽体である。産業用装置としてできるだけ小型化するために以下の様な工夫をした。

- (1) 超電導偏向電磁石を用い、3.5 T という高磁場でビームを偏向して軌道曲率半径を 0.593 m に抑えた。
- (2) 従来のリングではビーム集束のために直線部の集束電磁石が4個(2対)必要であったが、4極磁界を偏向電磁石に持たせ、直線部の集束電磁石

の数を2個(1対)に減らした。

- (3) キッカ<sup>6)</sup>、セプタム<sup>7)</sup>などのビーム入射用電磁石を大出力化し、ビーム進行方向の必要スペースを縮小した。

超電導 SR リングの要素部品の中で最も開発要素が大きかったのが超電導偏向電磁石<sup>8)</sup>である。開発した超電導偏向電磁石の特長は以下のとおりである。

- (1) 断熱構造を強化し、液体ヘリウムの消費を抑える設計にした。液体ヘリウム消費量は偏向電磁石2台で毎時2.5リッターである。これは小型SRリング用超電導偏向電磁石のヘリウム消費量としては世界最小であり、これによって大型のヘリウム液化機を不要にした。
- (2) 小型SRリング用として世界で始めて永久電流方式の運転に成功した。この方式では電流減衰率が少ない(毎時 $2 \times 10^{-11}$ 以下)ので、最初に電流を注入した後では電源を切り離して運転することができる。このように省電力、高安定という超電導の利点を最大限生かすことができ、永久磁石と同様の取り扱いやすさを実現した。超電導偏向電磁石の永久電流運転の最長連続時間と累計時間は、それぞれ、2.1万時間と10万時間に達する。
- (3) ビーム通過位置では強い磁界を発生するが磁気遮蔽をすることで、外部への漏洩磁界を低減した。リングから3m離れば地磁気並みの漏洩磁界になる様に抑えてあるため、例えば超電導SRリング近くでSR光利用が可能である。

以上のように、この超電導偏向電磁石は取り扱いが容易で本格的な産業利用が可能なスペックが実現できた。

SRリングのビームは広がりを持っているため、ビームが通過する広い領域で高精度の磁界を発生する必要がある。この様な磁界を形成するために巻線(コ



図3 超電導 SR リング

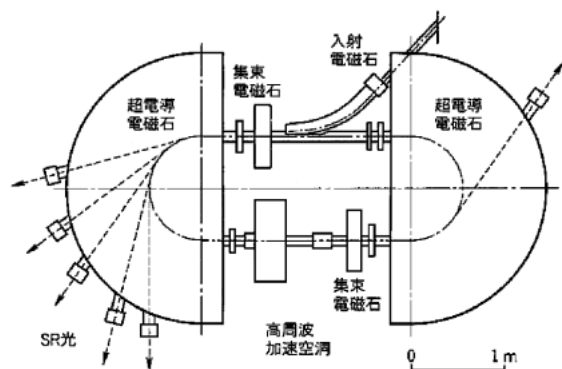


図4 超電導 SR リングの平面図

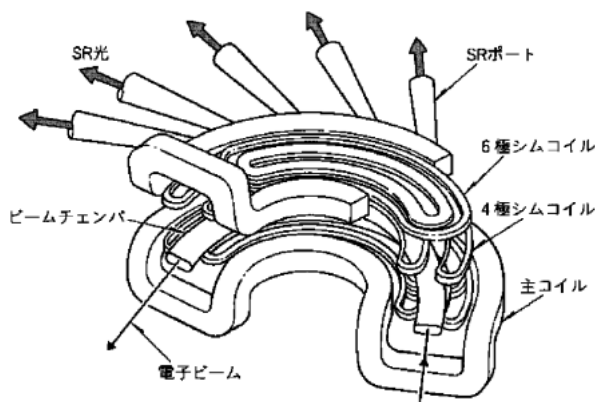


図5 超電導偏向電磁石のコイル形状

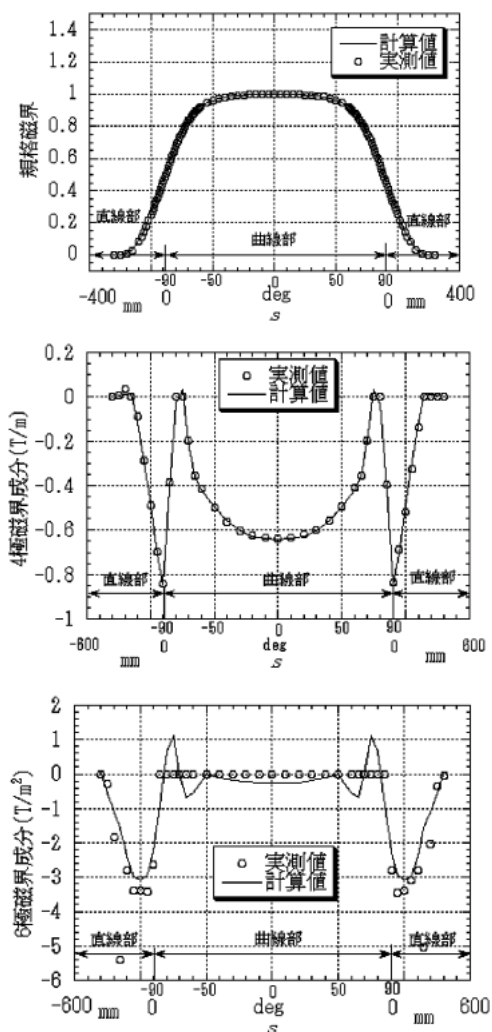


図6 超電導偏向電磁石の磁場分布 (上：2極成分，中：4極成分，下：6極成分)

イル)の形状は複雑になる。図5に超電導偏向電磁石のコイル形状を示す。偏向用の2極磁界を発生する主コイルのほか、磁界補正用の4極、及び、6極シムコイルを配している。また、端部の磁界を整形するために主コイルは端部を跳ね上げている。このような複雑な巻線形状のモデル化には、磁気飽和した鉄の近傍の磁界を精度良く計算できる2スカラーポテンシャル法を採用する3次元磁界解析コードTOSCAを用いた。また、真空ダクトの中の磁界を精度良く測定する磁場測定装置を開発し、実測値と磁場計算値が良く一致していることを確認した。図6に磁場計算と磁場測定を比較した結果<sup>9)</sup>を示す。2極成分のみでなく、4極成分、6極成分も磁界計算と磁場測定結果は良く一致していることがわかる。

超電導SRリングのビーム・シミュレーションを行なうには従来と異なるシミュレーション手法<sup>10)</sup>が必

要になる。それは下記の理由による。

- (1) 従来の円形加速器のシミュレーションでは、偏向電磁石の曲率半径 $\rho$ が振動の振幅 $x$ より十分大きいとして近似を行っていた( $x/\rho$ の高次の項を切り捨てていた)。しかしながら $\rho$ の小さい小型リングではその近似は適切でない。
- (2) 従来の円形加速器のシミュレーションでは、偏向磁界はビーム進行方向( $s$ )に均一であるとしていた。また、 $s$ 方向の磁場成分 $B_s$ を考慮することが近似的にしかできなかった。しかし、超電導偏向電磁石は図6に示す様に非常に広い領域に漏洩磁場が存在し磁場分布( $B_y$ )が不均一であり、かつ $B_s$ も大きいのでそれらの影響を考慮する必要がある。

そこで、トラッキングに数値積分法を適用し、複雑な3次元磁界を正確に考慮でき、且つ、近似なしの運動方程式で計算を行なう手法を考案し、設計に用いた。また、偏向磁界がビーム進行方向に不均一であるので、偏向電磁石内の平衡軌道は円弧から大きくずれ、また直線部にも漏洩磁界が存在するので直線部の平衡軌道は直線でない。平衡軌道の理想軌道(偏向電磁石内は円弧、直線部は直線の軌道)からのずれは最大8mm強<sup>11)</sup>となる。超電導SRリングでは直線部の4極電磁石、入射電磁石、RF加速空洞等の機器、偏向部のSRビームラインやX線ミラー等は、理想軌道ではなく、3次元磁界を考慮して導出された平衡軌道の上にアライメントを行なった。3次元磁界を考慮して計算したパラメータは非常に良く実測と一致しており、超電導偏向電磁石や集束電磁石のパラメータはビーム調整以前に計算で決めた初期パラメータから一切変更していない<sup>12)</sup>。

## 5. 阪神大震災と地震復旧

1995年1月17日の阪神大震災では震度6(推定)の揺れにより被害を受けた。隣接する建物が建て替えるほどの激しい揺れであったが、地震後に初めてSR装置を見たときの印象は、各機器が整然と並んでおり、被害は小さそうな印象であった。しかし、詳しく調べるとベローズを中心とする真空ダクトの破損や、磁石の位置ずれ(最大100mm程度)等がわかり、かなりの機器の補修や磁石の再アライメントが必要であった。最も驚いたのは永久電流モードで運転していた超電導偏向電磁石が地震後も正常状態で定格磁界を発生していたことである。図7に、超電導偏向電磁石のコイルに装備されているクエンチ検出器の地震発生時のコイル電圧波形を示す。クエンチ検出器は超

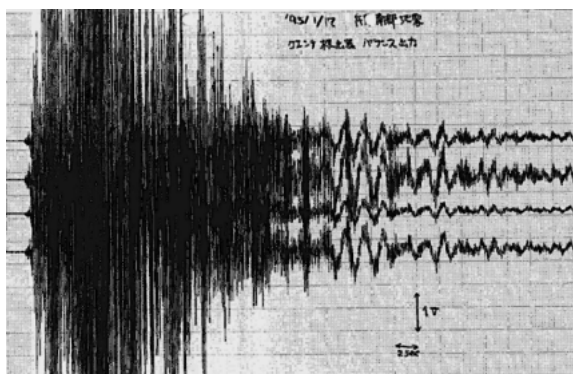


図7 阪神大震災時の超電導偏向電磁石のクエンチ検出器出力（横軸：2秒/1 div，縦軸：0.67 V/1 div）

電導コイルの一部がクエンチした時の発熱でコイルが焼けない様に、強制的にコイル全体をクエンチさせる装置であり4台設置している。コイルの異常電圧として出力1V以上が1秒間継続した時に強制クエンチ装置を作動させる設計になっている。図の様に、地震発生時に電圧波形は大きく振り切れて振動している。これは地震の揺れで超電導コイルがコイルサポートをバネとして振動していることに相当していると考えられる。阪神大震災の振動周波数1.5 Hzに、コイルの固有振動数の8 Hzが重畳された電圧波形となっていると考えられる。地震時の電圧出力は1Vよりかなり大きかったが、一秒間以上の継続はなく、強制クエンチ装置は作動しなかった。地震直後に建屋全体が停電したが、超電導偏向電磁石は永久電流モードで運転しているので地震後も定格磁場で運転を継続することができた。なお、震度3の別の地震が発生した時のクエンチ検出器の最大電圧は0.9V程度であった。超電導偏向電磁石は建物が崩壊する程度の揺れを受けても安定に稼働しており、その完成度の高さが伺える。また10年以上の長期運転の結果と併せると、超電導偏向電磁石を用いたSR装置は十分産業用装置として使用可能であると考えている。

地震復旧作業で最も難しかったのは超電導偏向電磁石内のビーム真空ダクトの破損復旧であった。超電導偏向電磁石内の真空ダクトの修繕は鉄シールドを取り外さないと作業できない位置関係にあり、2.5トンクレーンしかない現地での作業は難しく、通常の修繕方法では超電導偏向電磁石を製造工場に持ち帰る必要があった。その場合、実験再開が遅れ、且つ、多大な修繕費用が発生する。いろいろ検討した結果、鉄シールドにドリルで大きな穴をあけ、そこから真空ダクトを取り出し、補修を行なうという案が小寺から提案された。そして、3日間の徹夜作業の末無事に破損した真

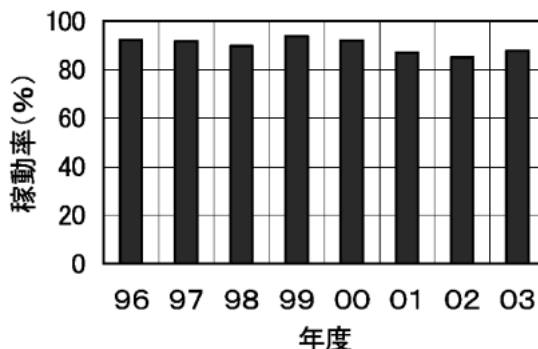


図8 SR装置の年間の稼働率

空ダクトを取り外すことに成功した。また、偏向電磁石内のビーム周回軌道の外側にNEGポンプセルを電車の様に連結してビームアップソーバの上下に配置してあるが、一部が脱落してSRビームラインを塞ぐという事態が発生していた。これに対し、2m程度のマジックハンドを直線部側から超電導偏向電磁石内に挿入し、内視鏡を見ながらNEGポンプを正規の位置に戻すという超人的な作業が行なわれ無事に復旧させることができた。この様に多くの関係者の熱意とアイデアにより、地震2ヶ月後の1995年3月にはSR装置の運転が再開できた。

## 6. SR装置の定常運転

1993年のSR光利用開始以降、SR装置の運転・維持・管理は加速器を専門としない2名の専属スタッフにより行なわれた。毎朝の朝礼でその日のSR装置の運転スケジュールが決定され、1日2回から4回程度のビーム入射が行なわれた。専属スタッフのみで対応出来ないビーム不安定性や、装置故障が発生した時には、装置の開発者が呼ばれ対応した。装置開発者は他の業務を行ないながら、SR装置の維持・管理を支援した。図8に1996年度から2003年度までのSR装置の年間稼働率を示す。稼働率とはX線リソグラフィ実験を計画していた時間に対する実際にSR光を供給できた時間の割合で定義している。2000時間/年程度の運転を行なう中で90%以上の稼働率を実現することができた。初期にはパルス電磁石等の加速器本体部でいくつかのトラブルが発生したが、その後のトラブルは、サイラトロンやTWTアンプの寿命、コンデンサーやトランジスタの劣化、冷却水チラーの故障といった、寿命がある部品や周辺設備の故障が大部分を占めるようになった。半導体の量産工場へSR装置を導入する場合には、消耗部品の交換頻度を上げることによって上記の故障要因は殆どなくすることができると

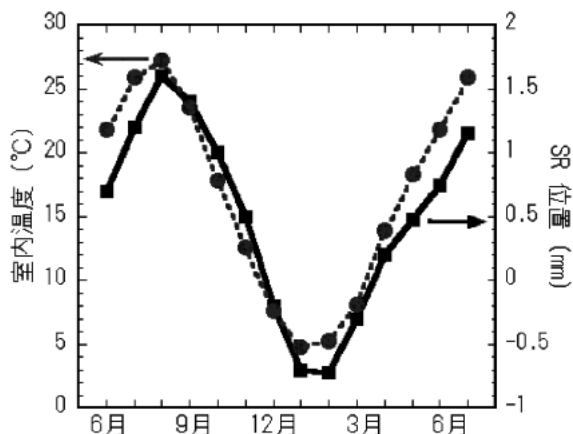


図9 加速器室内温度とビームラインでのSR光位置の関係 (96年から97年)

考えている。

日々のSR装置のビーム運転調整では、ビーム入射調整とSR光位置補正の2点が行なわれる。ブースタシンクロトロンは入射時の偏向電磁石の磁場強度が低く、室温や冷却水の温度変化の影響で入射条件がかなり変化する。この入射条件の変化は、1年での変化、1日での変化、5分程度での変化の3つに大別できる。最初の2つが主として室温の変化、3つめが冷却水のフィードバック制御に起因する変化である。定常運転を開始した頃はこれらのパラメータ変化が原因で、春と秋の気温が大きく変化する時期にビーム入射に時間を要することがあったが、佐々木、細見ら専属スタッフの日々の運転データ蓄積により、序々に改善されていった。

X線リソグラフィー実験からの要請でSR光位置は光源から7.5 m程度離れたSRビームライン上のX線ミラー位置で10  $\mu\text{m}$ 程度の位置再現性が要求された。SR光位置の変動は電子ビーム位置の変動と比べて大きく、電子ビーム位置モニタ (BPM) を用いて上記値に押さえ込むことは難しい。よって、SR光位置を高精度に測定しビームにフィードバック補正を行なうシステムを構築した<sup>13)</sup>。図9にCOD補正前のビームラインでのSR光位置 (光源からの距離7.5 m) と加速器室内温度との関係を示す。図からわかるように、SR光位置は加速器室内温度と強い相関があることがわかる。我々はBPMを用いてCODを0.1 mm程度に抑え、その後SR位置モニタを用いてSR光位置を10  $\mu\text{m}$ 以下に補正してSR光を供給している。図10にSR露光により作成したDRAMのメモリーセル部と周辺回路部の写真<sup>14)</sup>を示す。

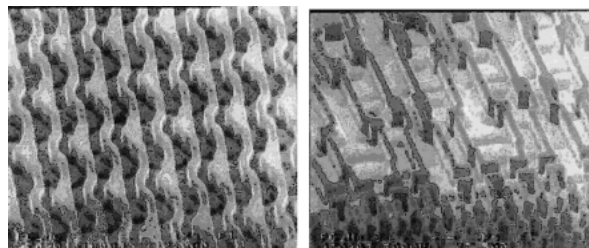


図10 SR露光したDRAMのメモリーセル部 (左) と周辺回路部 (右)

## 7. おわりに

現在の光リソグラフィーは光源1台と露光装置 (ステッパー) 1台で装置が構成されている。これをSR装置1台とステッパー複数台のシステムに変更するのは非常に大きな変更であり、現状の光リソグラフィーが限界になった時に実用化の可能性が出てくると考えている。光リソグラフィー技術は延命しており、次世代リソグラフィー技術の解像力は40 nm ハーフピッチ程度が必要になると予想されており、従来考えられていた100 nm ハーフピッチレベルより高解像力が要求されている。このレベルの解像力を実現させるにはフレネル回折で決まる解像限界を克服するため、より短波長のX線を用いる必要がある。その場合SR装置のエネルギーを600 MeVから1 GeV程度に上げる必要がある。我々は半導体工場への導入を想定した、20台のX線ステッパーを配置した1 GeVのSR装置システムの検討<sup>15)</sup>を完了しており、光源の導入準備はできている。また、短波長X線を用いるときの2次電子抑制等を考えた高解像度X線リソグラフィーの研究も進んでおり35 nmのハーフピッチが転写できる見通しが得られている<sup>16)</sup>。しかし、実用化にはX線マスクの無欠陥化などのインフラ整備が必要であり、業界全体でX線リソグラフィーを採用する流れが必要である。

半導体工場への小型放射光装置の導入は実現していないが、開発技術や運転・維持管理ノウハウはその後の粒子線がん治療装置や研究用加速器開発にいかされている。特に機器設計を行なう際には完成後の維持・管理まで考えた設計を心がけねばならないという教訓は、我々開発者の脳裏に刻まれている。なお、記載した三菱電機SR装置の開発や維持・管理には、参考文献に記載されている研究開発者以外にも多くの方々が関係しており、また、社外の多数の方々のご指導、ご協力を頂いたことを申し添えます。

## 参考文献

- 1) 中西, 奥田, 中村, 山田, 岩本: 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, p. 1080 (1991).
- 2) T. Nakanishi, T. Nakagawa and H. Tanaka: Effect of beam position measurement errors on closed orbit correction in a synchrotron, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 322, p. 146 (1992).
- 3) H. Tanaka and T. Nakanishi: Effect of a residual field of a C-Shaped Bending Magnet on a Beam in a Synchrotron, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 328, p. 402 (1992).
- 4) H. Tanaka and T. Nakanishi: Effect of Current Ripple of Power Supplies on an Electron Beam in the Synchrotron, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, p. 2025 (1995).
- 5) T. Nakanishi, S. Okuda, K. Ikegami, I. Koder, T. Matsuda, T. Nakagawa, S. Nakamura, S. Nakata, H. Tanaka, C. Tsukishima, S. Yamamoto, T. Yamada and M. Iwamoto: Design of a Compact Storage Ring for Industrial Research, *Review of Scientific Instruments*, 63(1), p770 (1992).
- 6) 築島, 中田: 蓄積リング用パルス電磁石の開発と真空ダクトによる発生磁界の遮蔽効果, 電気学会論文誌, 113-B, No. 8, p924 (1993).
- 7) 中田, 築島, 中西, 小寺, 水田: 一体成形方式によるセプトム電磁石の大出力化, 電気学会論文誌, 113-D, No. 7, p901 (1993).
- 8) S. Yamamoto, T. Kawaguchi, T. Matsuda, T. Takeuchi, I. Koder, T. Amano, M. Morita, S. Yokoyama, K. Shimohata, S. Nakamura, T. Yamada and M. Iwamoto: Superconducting Bending Magnets for Compact Synchrotron Radiation Source, *IEEE Transaction on Magnetics*, 3, p. 821 (1993).
- 9) 松田, 竹内, 守田, 山本, 小寺, 川口, 大石, 中村, 山田: 小型SRリング用超電導電磁石の磁界評価, 電気学会超電導応用研究会資料集, ASC-94-4 (1994).
- 10) H. Tanaka and T. Nakanishi: A beam tracking of a compact storage ring using superconducting bending magnets, *Review of Scientific Instruments*, 63 No. 1, p. 777 (1992).
- 11) H. Tanaka and T. Nakanishi: Studies of Beam Dynamics of a Compact Storage Ring Using Superconducting Bending Magnets, *Review of Scientific Instruments*, 66(2), p1971 (1995).
- 12) 田中, 中西, 松田, 竹内, 奥田: シンクロトロン放射光装置, 三菱電機技報, 68, No. 2, p. 136 (1994).
- 13) H. Tanaka and H. Shimano: Automatic Closed Orbit Error Correction System of a Compact Storage Ring for SR Lithography, *Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference*, p. 1905 (1996).
- 14) 炭谷, 私信.
- 15) H. Tanaka, T. Nakanishi, T. Fujimura and T. Matsuda: Design of a high intensity compact storage ring for X-ray lithography, *Proceedings of the 1st Symposium on Accelerator and Related Technology for Application*, p. 53 (1998).
- 16) K. Kise, H. Watanabe, K. Itoga, H. Sumitani and M. Amemiya: Improvement of resolution in x-ray lithography by reducing secondary electron blur, *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, p126 (2004).