

産業用小型SOR装置の開発動向

New Compact Storage Rings for Industrial Application

江村 勝治*・高田 博史**
Katsuji Emura Hiroshi Takada

1. はじめに

大規模集積回路 (LSI) の集積度は年々確実に向上しており, 90年代中頃には64メガビットの時代が到来するものと予想されている. 64メガビット製作に必要とされる微細パターンの寸法はおよそ $0.4\mu\text{m}$ 以下と言われており, このような微細パターン形成技術としてX線リソグラフィーが有望視されている.

近年X線リソグラフィー光源としてシンクロトロン放射 (SOR: Synchrotron Orbital Radiation) が注目されている. シンクロトロン放射光 (以下, SOR光という) とは, 限りなく光連に近い高エネルギー電子が磁場中で運動するとき, 曲率中心に向かう力を受けて発生する電磁波のことを言い, そのスペクトルは赤外領域からX線領域にわたる連続スペクトルであり, 特にその主成分は真空紫外からX線領域である. 従来この領域には十分な強度を有する光源がなかったため, SOR光の実用化に伴い画期的な研究が続出してその有意性が広く認識された. そのため1970年代後半頃からSOR光利用専用の電子蓄積リングの建設が始められた. 例えば日本国内では, SOR-RING (東京大学物性研究所, 0.4GeV , 1975年完成), TERAS (電子技術総合研究所, 0.8GeV , 1981), フォトンファクトリー (高エネルギー物理学研究所, 2.5GeV , 1982), UVSOR (分子科学研究所, 0.6GeV , 1983) などがあり, 海外では英国ダズベリのSRS (2GeV , 1981), 西ドイツベルリンのBESSY (0.8GeV), アメリカブルックヘブンのNSLS (0.75GeV , 2.5GeV), ウィスコンシンのAladdin (1GeV) などがある. これらの装置の直径は10~数十メートル程度であり, 産業応用を考えた場合, 現実的な装置規模ではない. そのため製造ラインに組み込める規模でかつ経済性に優れた

小型SOR装置の開発に対し産業界において強い要求がある. それに伴い産業用小型SOR装置の開発が活発化している. そこで当該報告では産業用小型SOR装置について, 特に装置に要求される仕様ならびに装置の開発状況について解説する.

2. SORリソグラフィー光源の特性

SOR光を用いたリソグラフィーの研究は1975年頃西ドイツにおいて始められた. その後同じく西ドイツにおいてX線リソグラフィーを想定した電子蓄積リングが建設され, また日本においても電子技術総合研究所の電子蓄積リングTERASや, 高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリーにリソグラフィー専用のビームラインが建設されるなど, SORリソグラフィーの研究が活発化している.

この章ではリソグラフィーに要求される仕様を示し, それを満足する小型SOR装置の各種パラメータを示す.

2.1 リソグラフィーの概要

良く知られているように, リソグラフィーはエッチング (腐食銅版画) の作製法と基本的に同じであって, 光透過材でできた支持膜 (マスク支持台) の上に光吸収材 (マスク) を用いて2次元微細パターンを形成し, レジストと呼ばれる化学物質を塗布した試料 (ウェハ) と平行にマスクを配置し, そこに強力な光を照射するものである. ただし, ウェハに形成される微細加工の解像度は基本的に入射光の波長によって決定され, 一般に $0.5\mu\text{m}$ 以下の微細加工にはX線領域が用いられる.

2.2 小型SOR装置のパラメータ

リソグラフィーに要求される仕様と, それを満足するための小型SOR装置のパラメータについては, 高田ら¹⁾によって詳しく議論されている. それによれば, 分解能が $0.25\mu\text{m}$ クラスのリソグラフィー工程を想定したとき, 実用上要求される仕様として表1のよ

* 住友電気工業㈱大阪研究所電磁応用システム研究部
** " " 主任研究員

〒554 大阪市此花区島屋1-1-3

表1 SORリソグラフィーの要求仕様

分解能	0.25 μm
総合重ね合わせ精度	0.05 μm
半影ぼけ	0.025 μm
ウェハーサイズ	8インチ
露光面積(最大)	50mm×50mm
スループット	40枚ウェハー/ビームライン・時間以上

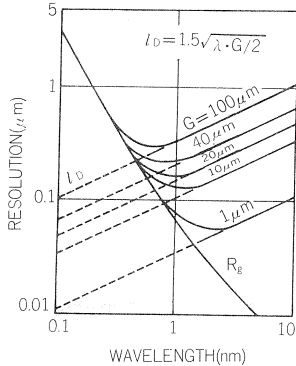


図-1 フレネル回折で決まる最小線幅IDと二次電子飛程RGのX線波長依存性

うに設定する。ここで使用する波長領域は、(1)分解能、(2)真空遮断窓(ベリリウム窓)の波長吸収特性により決められる。分解能を規定する要因としてはふたつあり、フレネル回折によるぼけとレジストからの二次電子の飛程によるぼけがある。これらの関係を図-1に示す²⁾。即ち最適なX線波長領域が存在する。これから、リソグラフィーに有効な波長領域として4~15Åを選んでいる。次に小型SOR装置に要求されるSOR光のパワー密度の計算を行うために、リソグラフィーシステムのパラメーターを表2のように設定した。この条件下では、50mm×50mmの露光面積あたり1.25Wの

表2 リソグラフィーシステムのパラメーター

Be窓の厚さ	15 μm
マスク基板材	Si ₃ N ₄
マスクの厚さ	2 μm
レジスト感度	100mJ/cm ²
有効波長領域	4~15Å
露光時間	2秒

表3 小型SOR装置のパラメーター

エネルギー	0.64GeV
偏向半径	0.48m
蓄積電流	220mA
ピーク波長	4.2Å
パワー密度	0.8mW/mAmrad

ワーが要求され、ビームライン長を7mとすれば175mW/mradになる。これを満足する超電導小型SOR装置のパラメーターは表3のようになると結論づけている。

2.3 大面積露光法

限りなく光速に近い電子からのSOR光は特殊相対性理論で説明される光行差のために極めて狭い角度の範囲内に分布される。その範囲とは電子の進行方向を軸とした頂角がほぼローレンツ因子の逆数程度の円錐内にあり、例えばエネルギーが600MeVにおいては、光源から10m離れた地点でも縦方向には±4mm程度にしかならない。このようにSOR光の露光範囲が狭いことから、ウェハ全体に露光できるように何らかの解決手段が必要である。その手段として、(1)光源の近くにミラーを置いて数mradの角度で振動させる方法

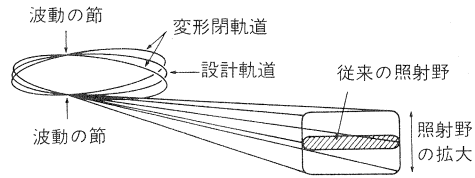


図-2 電子波動法の原理図

や、富増ら³⁾によって考案された(2)リング中の蓄積ビームを揺動させる電子波動法などがある。特に、電子波動法はビームライン中に可動部を導入する必要がないこと、ならびにミラーによるX線強度の低下も生じないことなどから、最も魅力のある方法である。図-2に電子波動法の原理図を示す。リング中の蓄積ビームに波動用電磁石を用いて水平方向に磁場を印加すると、電子の軌道は摂動を動けて定期的な波打ち、安定した波動の節ができる。この節の近傍から取り出されるSOR光を用いれば露光範囲が拡大できる。この方法は電子技術総合研究所の電子蓄積リングTERASにおいて初めて実験的検証が行われた⁴⁾。また電子技術総合研究所と住友電工が開発した産業用小型SOR装置NIJI-Iにおいても同様の実験が行われ、電子波動時における(1)蓄積ビームの変位および傾き角は実験結果と理論とがよく一致していること、ならびに(2)ベータトロン振動数の変位量(チューンシフト)は極めて小さくビームの安定条件を乱すことはないことを確認している⁵⁾。このように電子波動法は大面積露光ができる実用的な技術であることが証明されており、SORリソグラフィーシステムに導入されその効力を十分

に発揮できるものと期待されている。

3. 産業用小型SOR装置の研究課題

この章では装置を小型化する上で重要な研究課題について述べる。

3.1 大電流の蓄積

X線リソグラフィにおいて十分なスループットを得るためには200mA以上の電流を蓄積する必要がある。大電流蓄積を制限する現象としてはビーム寿命とビーム不安定性とがあり、ビーム寿命を長くしなおかつビーム不安定性を抑えることにより大電流蓄積が可能となる。まずビーム寿命について考察してみる。ビーム寿命は分類すると3種類あり、ビームと残留気体の相互作用による寿命、Touschek寿命、量子寿命である。ビームと残留気体の相互作用による寿命とは、真空チェンバー内の残留気体と電子ビームが衝突し、衝突した電子が軌道からはずれ真空チェンバーに衝突してビーム損失が生じたり、また残留気体の原子核により小角散乱を受けた電子が制動放射を放ちエネルギー損失してしまう現象である。ゆえにこの寿命を長くするには、真空チェンバー内を超高真空（ $\sim 10^{-10}$ Torr程度）に保つ必要がある。そのための具体的な対策としては、十分に大きい排気量の真空ポンプを用意し、真空チェンバーのコンダクタンスを考慮し適切な位置に配置すること、SOR光照射に伴うガス脱離の少ない真空チェンバーを製作することである。またビームが残留気体と衝突した結果生じるイオンがビームにトラップされてビームに種々の影響を及ぼす。この現象をイオントラッピングと言う。ウィスコンシン大学のリングAladdin (100MeV入射)ではイオントラッピングによってビーム寿命が極端に短くなり蓄積電流が制限された⁶⁾⁷⁾。この現象を回避する方法としては、蓄積ビームが作る静電ポテンシャルを打ち消すような外部電場を印加することによりイオンを除去する方法があり、他の方法 (rfクリアリング法、rfバスケットへのpartial filling法) に比べて最も直接的でなおかつ簡便であるためによく採用されている。次に、Touschek寿命とは電子ビーム内の電子-電子散乱により生ずる電子のエネルギー変化が、rf加速空洞により規定される電子の安定領域 (rfアクセプタンス) から逸脱することに起因するビーム寿命であって、産業用小型SOR装置のように低エネルギーで大電流を蓄積する場合にはビーム損失の主要原因であると考えられている。蓄積リングの中では電子は集群 (バンチ)

状態にあるが、Touschek効果はこのバンチ内での電子の多重散乱に起因していることから、Touschek効果の大きさはバンチサイズに依存する。NIJI-I (電総研-住友電工)では、低エネルギー領域においては縦方向バンチ結合不安定性によるバンチサイズ拡大によってTouschek寿命が長くなることを確認している。このようにビームサイズを増大するか、もしくはバンチ数を増加しバンチあたりの電子数を減少させるなどの方法を講じることにより、Touschek寿命を緩和することは可能である。次に、量子寿命とは電子からのSOR光放出が確率過程であるために、シンクロトン振動が確率的に大きくなり、その電子がrfバケットから逸脱するというものである。ただし、十分に長い量子寿命を得るためにはrf加速電圧を増加することで可能であり、産業用の小型装置ではあまり重要視されていない。

次に、大電流蓄積を制限するもうひとつの現象であるビーム不安定性について考察してみる。蓄積ビーム電流が大きくなると電子が作る電磁場が強くなり、例えば電子間どうしの直接的な相互作用や、真空槽やrf加速空洞に電子が誘起する電磁場を介した間接的な相互作用があらわれる。なんらかの要因により生じたビームの摂動がこれらの相互作用によって時間的に増大することをビーム不安定性という。ビーム不安定性はその発生メカニズムによって様々に分類することができるが、この中で産業用小型SOR装置で問題になるものに、バンチ結合不安定性とヘッドテイル不安定性がある。バンチ結合不安定性とは、rf加速空洞などのQ値の高い空洞に電子が誘起する減衰の遅い電磁場のため引き続いてその空洞を通る後続のバンチに作用して起こる不安定性である。このようなビーム不安定性は、バンチの電荷密度分布が平衡状態に比べずれたことに起因する波動であって、ビームにエネルギー広がりを持たせたり、電子の振動に非線形成分を持たせることで、波動が減衰し不安定性を抑制することができる。これらはプラズマ物理と同様にウラゾフ方程式を正しく扱うことで説明することができ、ランダウ減衰と呼ばれる。具体的にバンチ結合不安定性を抑制する方法としては、rf加速空洞に高調波成分を混入させる方法や、八極電磁石と呼ばれる非線形磁石を挿入する方法が採用されている。その他の方法としては、rf加速空洞にアンテナを入れ、電子によって誘起される電磁場のうち危険なモードを減衰させる方法がある。次に、ヘッドテイル不安定性とは、真空槽などQ値の低

い空洞にパンチの先頭部が誘起した電磁場によってパンチの後部に影響を及ぼし、色収差が0でなければパンチ形状がしだいに変形する不安定性である。この対策としては、色収差を補正することができる六極電磁石を挿入することである。またその他の方法として、ポンプ引き口など真空槽の各種ポート部にメッシュ状の金属板を入れて真空槽を平滑化することがよく行われている。

3.2 蓄積リングの小型化

常電導線材を用いた鉄芯電磁石では、鉄の磁化特性を利用して磁場を発生させるが、鉄の磁化飽和現象のためにその発生磁場は2テスラが限界である。一方超電導電磁石の場合には、その発生磁場は超電導線材の特性と電磁石の機械的性能によって制限される。加速器用超電導電磁石としては5テスラ程度のもので製作できる様である。偏向磁場強度が大きくなると偏向半径が小さくなり、装置全体を小型化することが可能である。このように超電導電磁石を用いて小型のSOR装置を開発する試みは1980年頃西ドイツのミュンヘン工科大学で開始された。この設計案をもとに西ドイツのBESSYにおいてCOSY-Iと呼ばれる単体超電導電磁石よりなる直径3mのリングの開発を行ったが技術的困難のため中止となり、その後COSY-IIと呼ばれる超電導レーストラック型のリングの開発に着手している。我が国においては、住友電工(NIJI-III)、NTT(Super-ALIS)、住友重機(AURORA)の3社が開発を行っている。

超電導電磁石には固有の開発課題があり、磁場分布の制御と冷却システムの開発が挙げられる。高い均一度の磁場分布は蓄積リング用偏向電磁石の最重要仕様であるが、鉄芯電磁石では磁化飽和領域以下であれば磁極内の磁場分布は磁極の加工精度でほとんど決まるため高均一度の磁場分布を出すことは比較的容易である。一方空芯の超電導電磁石の場合は磁場分布は巻線形状で決まるため高度な巻線技術が必要とされる。また電磁石端部での磁場分布は悪くなり、多極成分が多く含まれるようになる。よってリングの設計に従来用いていた線形近似法による電子軌道解析では不十分で、非線形効果を取り入れた解析が必要である。また鉄芯入り超電導電磁石では空芯超電導電磁石に比べて巻線技術は緩和され、また漏洩磁場の問題も緩和され、鉄による放射線遮蔽効果が期待できるなどのメリットがある。一方、鉄の磁化飽和現象のために励磁電流の変化に伴い磁場分布が変化するという問題がある。一般

に産業用小型SOR装置では低エネルギーで入射した後所定のエネルギーまで加速するため励磁電流は大きく変化し、これに伴う磁場分布の変化は大きな問題である。次に、冷却システムとしては、現在実用化されている超電導線材はニオブチタンであり超電導状態を保つためには液体ヘリウム(4.2~4.5K)に浸す必要がある。そこでクライオスタットと呼ばれる液体ヘリウム用容器の中に超電導コイルは納められる。従来は物性研究に供されるような小型のクライオスタットは開発され販売もされているが、産業用小型SOR装置用のクライオスタットは数百リットルもの液体ヘリウムを蓄ええる能力が必要であり、大型のクライオスタットの開発が必要である。

3.3 入射器の小型化

全リングシステムを小型化するためには、入射器の小型化が必要である。入射装置の加速電界には限度があり、小型化のためにはリングへ低エネルギーで入射する方法で対応することが一般的である。低エネルギー入射に関しては小型リングNIJI-Iで詳細に研究が行われた⁸⁾。実験では80MeVでの電子入射が可能であることを確認しており、さらに低エネルギーでも入射は可能としている。

入射用加速器としては、線形加速器(リニアック)、シンクロトロン、マイクロトロンがある。線形加速器の加速性能は10~15MeV/mであるので、例えば50MeV入射の場合には線形加速器の長さは3~5m程度で、蓄積リングと同程度の規模になる。シンクロトロンは出射ビームの質が良いという利点があるが装置規模が大きいため、産業用小型SOR装置の入射器としてはあまり用いられない。マイクロトロンは出射ビームの質も良く装置規模も小さいため、有望視されている。

4. 産業用小型SOR装置の開発動向

産業用小型SOR装置で現在まで提案されているものを表4⁹⁾に示す。これらの中からいくつかの装置について簡単に説明する。

(1)NIJI-I

電子技術総合研究所と住友電工が官民連帯共同研究で開発した直径4mの小型テストリングである。1984年より開発に着手し翌年完成し、今年春のシャットダウンまでの間、大電流蓄積、低エネルギー入射、電子波動法などの産業用小型SOR装置の開発に必要な不可欠なデータの収集を行った。具体的にはエネルギー

表4 産業用小型SOR装置の開発状況⁹⁾

国名	研究機関	リング名	方式*				平均半径 (軌道上) (m)	エネルギー (MeV)		偏向磁石		状況**
			常電導	超電導	フル入射	加速蓄積		入射	蓄積	磁場 (T)	個数	
日本	電総研 住友電工	NIJI-I	○			○	2.11	160	230	1.10	8	運転終了 稼動中 試運転
		NIJI-II	○			○			600	1.43	4	
		NIJI-III		○		○			620	4.14	4	
	N T T		○			○	8.4	15	800	1.4	8	稼動中 稼動中
				○		○	1.15	15	550	3.5	2	
	住友重機	AURORA		○		○	0.5	150	650	4.34	1	試運転
	石川島播磨	LUNA	○			○	3.74	45	800	1.33	4	試運転
東大物性研			○		○	1.41	100	1,000	4.0	2		
古河電工, 高エネ研			○	○		3.96	1,000	1,000	1.7	6		
西ドイツ	B E S S Y	COSY-II	○			○	1.53	50	600	4.5	2	開発中 開発中止
		COSY-I	○			○	0.38	0.1	560	5.0	1	
	ミュンヘン工大	Klein ERNA		○		○	0.29	8	430	5.0	1	
	カルスルーエ原子核研			○		○	4.28	150	1,440	4.0	4	
フランス	ネービック	MARS	○			○	2.75	10	800	1.7	4	
	パリ大学			○		○	0.29	10	432	4.75	1	
アメリカ	ブルックヘブン国立研			○		○	1.62	100	728	3.5	2	開発中
	I B M		○			○	2.87	100	1,000	1.8	6	
イギリス	Oxford Instruments			○		○					2	開発中
スウェーデン	スカンジトロニクス			○	○		1.74	680	680	4.0	2	

* : フル入射 : フルエネルギー入射 ** : 空欄は設計検討のみ
 (注) 状況の欄は現在の状況と多少異っているため書き換えた。

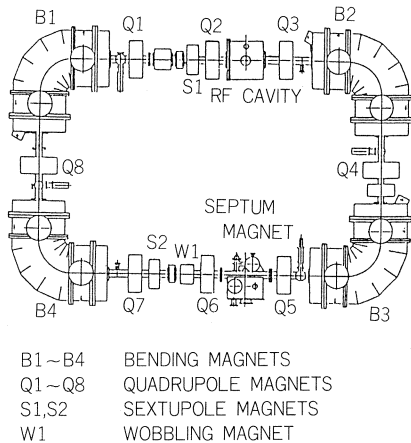


図-3 NIJI-IIIのレイアウト

160MeVで520mA以上もの大電流蓄積に成功し、また90MeVにおいても400mA以上蓄積できることを実証した。電子波動法の実験では上下波動振幅が1cm以上になってもビーム電流減衰への影響はないことを実証した⁵⁾。

(2)NIJI-II

NIJI-Iと同様に電子技術総合研究所と住友電工が開発しているリングで、常電導型の90度偏向電磁石と6台の収束四極電磁石より構成される。長直線部分を2本持っており、アンジュレーターを挿入し高輝度の

光(軟X線~可視光)を放つことができる。NIJI-IIは今年春より建設を開始し、今年8月3日初蓄積に成功した。今後は自由電子レーザーの研究やビームラインでの光CVDなどの物性研究を行う予定である。

(3)NIJI-III (図-3)

住友電工が新技術事業団より委託を受け開発中の超電導小型SOR装置である。電子技術総合研究所の富増らによって発明された電子波動法を用いて大面積露光を行う。90度偏向の超電導電磁石4台と収束用四極電磁石8台から構成されるリングで、今年2月から電子技術総合研究所に建設を開始した。リングシステムの調整のためまず常電導リングで電子入射蓄積を行い、その後順次超電導電磁石に置き換えていく。今年6月21日には常電導電磁石4台のリングで電子蓄積に成功し、9月27日には4台のうち1台を超電導電磁石に置き換えた状態でビームの蓄積に成功した。

(4)NTT

レーストラック型の超電導リング(Super-ALIS)で、今年2月に電子蓄積に成功している。入射方法は、15MeVライナックからの直接入射とブースターシンクロトロンを介しての入射と2通りある。ブースターシンクロトロンは単にブースター機能だけでなく、電子蓄積が可能であり、ラティスはチャスマン・グリーン型で低エミッタンスであり、挿入光源利用を考えている模様である。

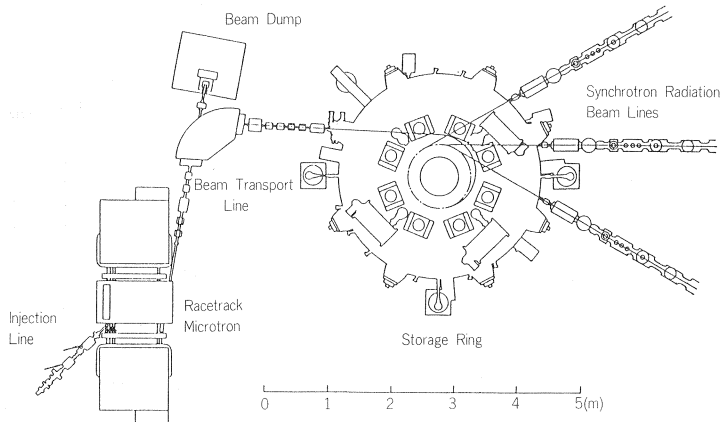


図-4 AURORAのレイアウト

(5)AURORA (図-4)

住友重機が開発中のリングで、他のリングとは異なり単体超電導電磁石からなる弱収れん型リングである。このような弱収れん型リングは以前西ドイツのBESS YがCOSY-Iと呼ばれるリングの開発に着手したことがあるが、技術的困難のため開発を中止した経緯がある。技術的困難のひとつに電子入射方法があるが、AURORAでは $1/2$ 共鳴入射法と呼ばれる入射方法を用いることで入射は可能であるとしている。

(6)LUNA

石川島播磨重工業が開発中の常電導リングである。90度偏向電磁石を4台用いた四角形のリングである。このように、産業用小型SOR装置の開発は多くの研究機関で活発に行われており、特に今年から来年にかけて完成する装置が多い。既にNIJI-IIIやSuper-ALISでは超電導電磁石を用いて電子蓄積に成功しており、近い将来小型SOR装置が実用化されるものと期待される。またリソグラフィ技術に関しては、基盤技術促進センターと民間13社で設立された株式会社ソルテックのリングが本年9月に完成し、近く本格的なSORリソグラフィ研究が開始される。ソルテックでは、高輝度SOR光源技術、大面積照射技術、アラ

イナ技術などの研究が行われ、その成果は工業所有権などの形で蓄積され、広く産業界に波及効果をおよぼすことが期待されている。

このように今年小型SOR装置の開発ならびにリソグラフィ技術の開発において重要な成果が得られることが期待でき、将来を占う上で重要な年である。

参考文献

- 1) 高田博史, 富増多喜夫; 小型電子波動リングの開発, 電気学会論文誌C, 108巻, 8号, (1988), 547~554
- 2) 阿刀田伸史, 伊藤順司; 電子通信学会技術研究報告, SS D85-103, (1985)
- 3) T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki and T. Mikado; IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-32, 5, p. 3403 (1985)
- 4) T. Tomimasu; Jpn. J. Appl. Phys., 26, 5, pp. 741-746 (1987)
- 5) 筒井康充, 岡崎徹, 高田博史; 昭和63年春季応用物理学会講演会, 31p-H-15 (1988)
- 6) Schwarzschild, Phys. Today 39 (3), 19 (1986)
- 7) E. M. Rowe, Nucl. Instrum. Method. B24/25, 414 (1987)
- 8) H. Takada et al., Rev. Sci. Instrum. 60 (7), July (1989)
- 9) 小貫英雄, 結石友宏, 電気学会論文誌D, Vol. 108 No. 9, (1988)

