

平成27年度革新的ものづくり産業創出連携促進事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「ミニマル多層薄膜形成イオンビームスパッタ装置の開発」

研究成果等報告書

平成28年3月

委託者 九州経済産業局

委託先 公益財団法人九州先端科学技術研究所

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とします。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- ・ I : システムの超小型化
 - I-1 超小型イオンビーム銃の開発
 - I-2 超小型ガス貯蔵容器の開発
 - I-3 システムレイアウトの最適化
- ・ II : プロセス時間の最短化
 - II-1 高精度・高速ガス流量制御システムの開発
 - II-2 高精度・高速安定化電源の開発
 - II-3 自動ロードロック・試料搬送機構の開発
 - II-4 冷却機構付き基板ホルダーの開発
- ・ III 多品種薄膜の作製
 - III-1 回転型ターゲット取り付け機構の開発
 - III-2 精密駆動型コンダクタンス制御バルブの開発
 - III-3 可動式シャッター機構の開発
 - III-4 イオンビーム回転・駆動機構の開発
 - III-5 基板回転機構の開発

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的

半導体 IC の製造プロセスにおいて、これまではコスト削減の観点から、大規模工場（メガファブ）での大量生産が主流であったが、近年、電子機器の高機能化と消費者のニーズの多様化に対応した多品種少量生産プロセスの半導体デバイス生産システム（ミニマルファブシステム）が提案され、低コストな革新的デバイス製造プロセスとして大いに注目されている。

本研究では、絶縁膜から超伝導体薄膜や磁性多層膜など、あらゆる種類の機能性薄膜の作製が可能な成膜技術として注目されているイオンビームスパッタ装置のミニファブ化を実現する。図1に示すとおり、イオンビームスパッタ装置では、従来のスパッタ法と異なり、プラズマを形成する領域とターゲットをスパッタする領域が空間的に分離されており、スパッタ成膜時のチャンバー真空度を高真空領域から低真空領域まで、自在に調整可能である。これにより、側面などにもスパッタ膜を堆積させる等方性スパッタから、指向性の高い異方性スパッタなど、ニーズに合わせた成膜を一つの装置で対応可能になる。更に、ミニマルファブ化により、真空機器の小型・軽量化が成され、単一イオンガンで6種類の異なる材料の成膜が可能となるシステムを構築し、各種機能性薄膜、及び多層薄膜の作製を単一装置で実現可能となる。また、本システムの開発により、3次元半導体 IC の製造のための最重要技術の一つである『バリアメタル/シード層』の作製に適用可能な多層薄膜作製技術が実現される。

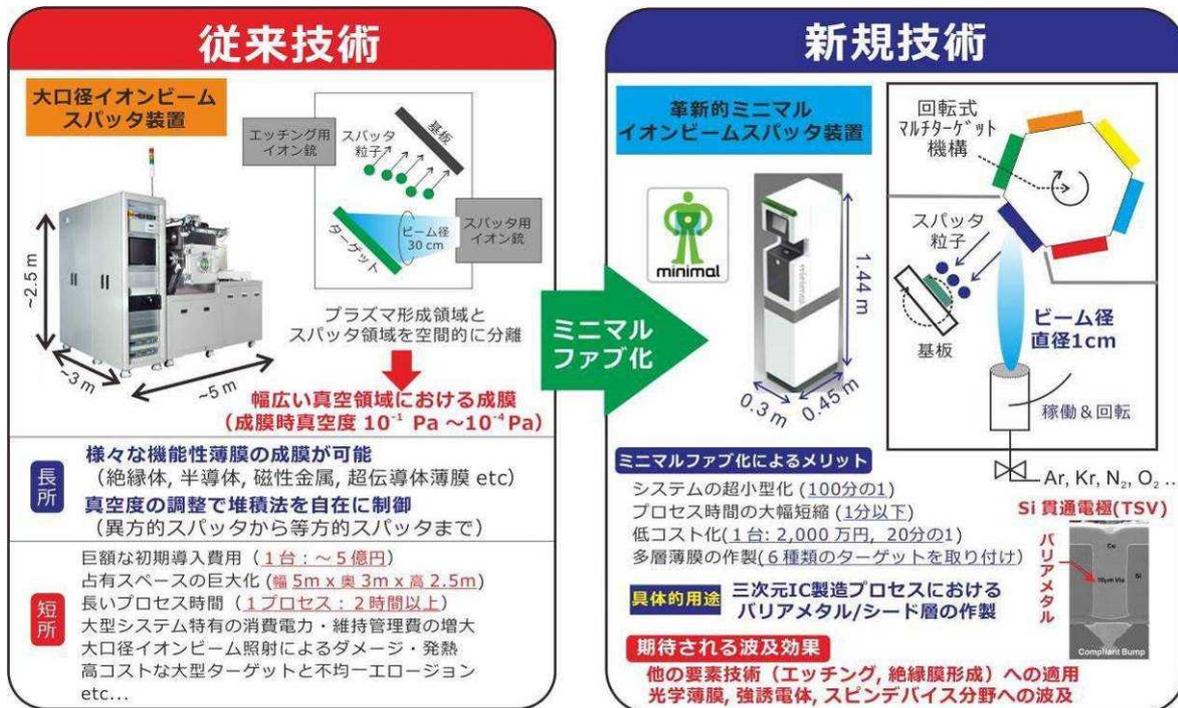


図1 イオンビーム装置のミニマルファブ化により期待される効果

1-1-2 研究開発の目標

半導体産業では電子機器の小型化・高性能化に伴う三次元実装や少量多品種生産のニーズが高まりつつあり、特に医療・介護等の新成長戦略分野ではその傾向が高いと考えられる。本提案では、LSI 三次元実装方法としてのTSV（シリコン貫通電極）貫通穴への側壁膜形成用イオンビームスパッタ装置に関するものであり、装置の超小型化及び加工時間の大幅短縮化（ミニマルファブ対応）、並びに連続多層膜形成技術の確立を図るものである。

本テーマの戦略の概略を図2に示す。上記技術を高度化するための装置開発を行うに当たり、システムの超小型化、プロセス時間の最短化、多品種薄膜の作製での課題分析を行い、テーマを設定する。

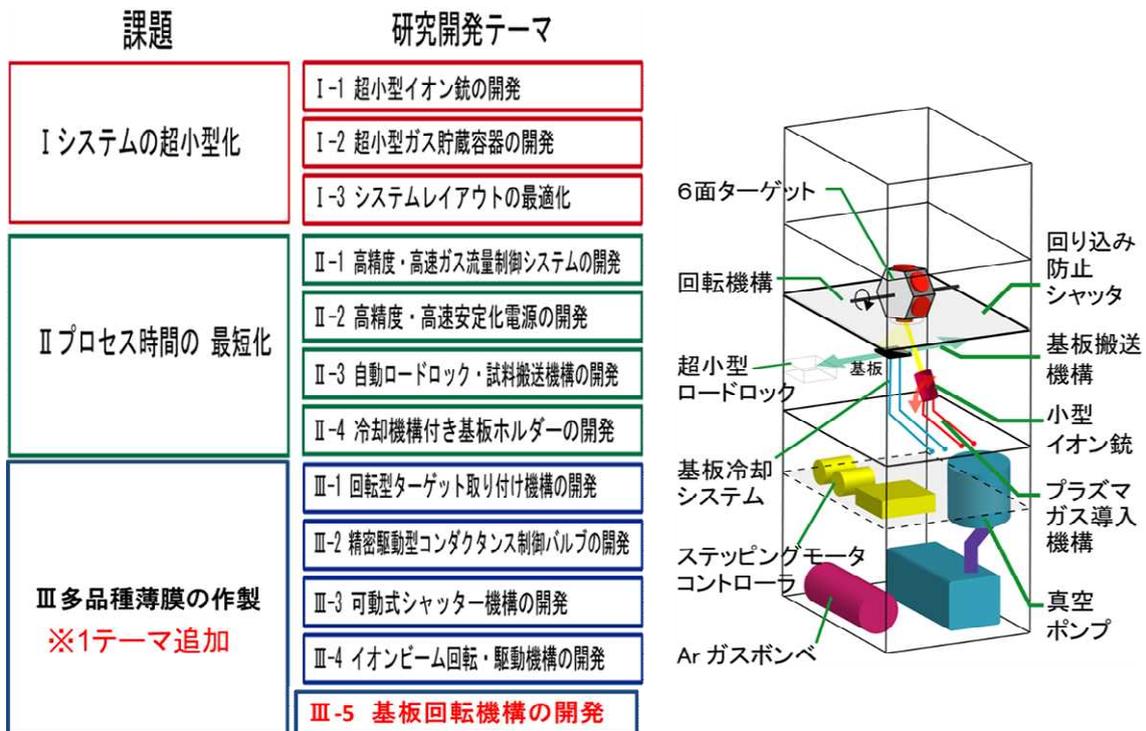
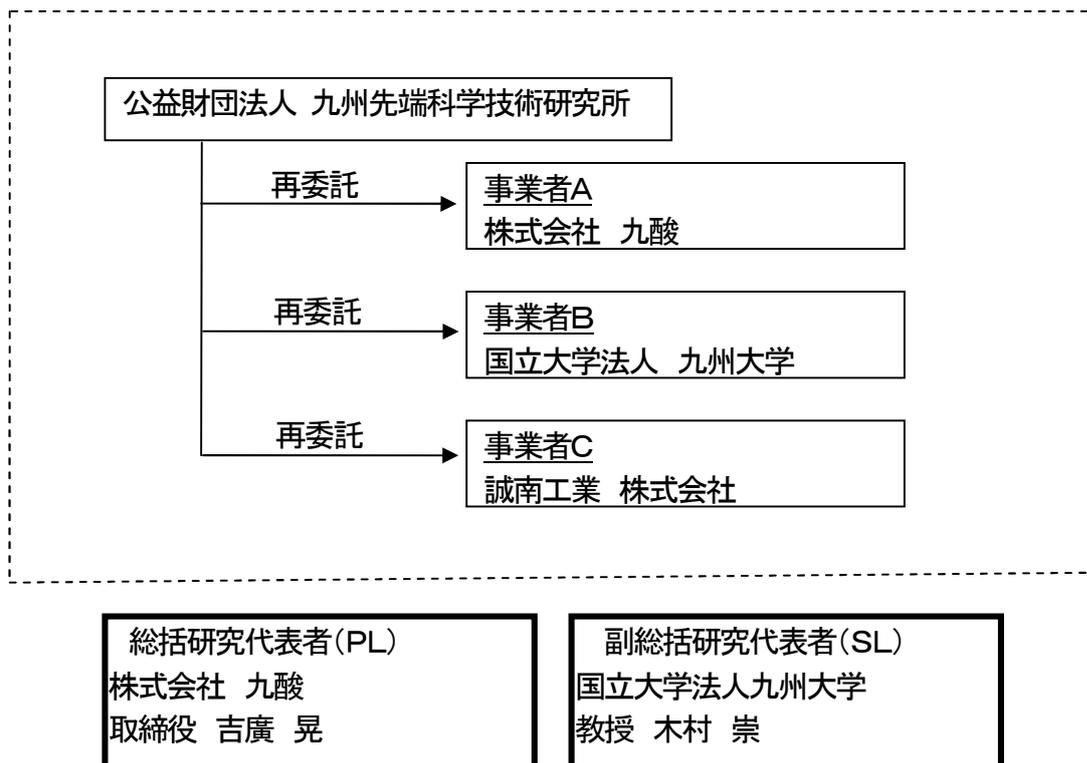


図2 研究課題と具体的な研究開発テーマリスト、及び開発装置の概念図

1-2 研究体制



1-3 当該研究開発の連絡窓口

所属 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先
株式会社 九酸	代表取締役社長 有吉 慶祐	①〒822-0033 福岡県直方市上新入1677-28 ②後藤 比呂志 ③0949-22-5555 ④0949-23-2307 ⑤gotou@Q-SAN.co.jp

第2章 本論

I システムの超小型化

I-1 超小型イオン銃の開発

I-1-1 目標

ミニマルファブ規格に適用可能で、ビーム径 1cm の超小型イオンビームを開発する。ここで、加速電圧は 0.3~1.0kV の範囲で調整可能とし、ビーム電流は最大 10mA 得られるものとする。

I-1-2 実施内容

イオンビーム方式の各種特徴を精査し、超小型化に適したビーム形成方式を選定、更に同方式のイオンビームの内部構造を調べ、超小型イオンビーム実現のための課題を探索した。

1. イオンビーム生成方式の最適化

超小型イオン銃の開発に当たり、小型化に最適なイオンビーム生成方式の探索を行った。イオンビーム形成方式として、一般的に良く用いられているのは以下の3種類に大別できる。

(1) 電子サイクロトロン共鳴方式 (ECR 方式)

電子サイクロトロン共鳴現象を利用してプラズマを生成し、コイルや磁石などの力によってプラズマを閉じ込めイオンビームを生成する方式である。フィラメントなどの消耗品が無い為、メンテナンスコストが低減する。更に、酸素など活性ガスでもプラズマが形成可能であるため、様々なプロセスに対応できる。しかし、マイクロ波を生成するための電源が大型になると共に、グリッドや磁石などにより、マイクロ波のマッチング条件がズレ、最終的に調整が困難になるなどの問題がある。いずれにせよ、電源の大型化が本研究の目的であるミニマル化に支障をきたすため、ECR 型は適した方法ではないと考えられる。

(2) ホローカソード方式

中空陰極内部より放電用作動ガスであるアルゴンガスを放出し、この不活性ガスであるアルゴンガスをイオン化し、イオンビームを形成する方式である。一見、構造が簡単なため、小型化に適しているように思えるが、イオン電流量の制限、加速電圧やグリッド電圧の制限、ガス圧の制限などがあり、更にビームの収束性も良い方では無い為、本研究において目的としている超小型イオン銃に適した方法ではないと考えられる。

(3) カウフマン方式

高温加熱されたフィラメントから出てカソードへ向かう熱電子を、不活性ガスに衝突させてプラズマを形成し、イオンビームを生成する方式である。フィラメントが消耗するため、一定の使用時間毎に交換が必要であり、更に反応性ガスを使ったイオンビームの形成が困難である。しかし、グリッドやアクセレータなどのビームの最適化条件が電氣的に制御可能であることに加え、低電圧でも大電流のイオンビームを取り出すことが可能である。また、既に 3cm 径のイオンビームも規格品として販売されているため、更なる小型化への拡張も、比較的容易にできると考えられ、本方式が今回の装置に最も適したイオンビーム形成方式と考えられる。

2. 超小型イオン銃の小型化に向けた課題探索

カウフマン方式を最適なイオンビーム形成方式に採用することにしたが、ミニマル筐体に収まる小型化を行うために、既存の小型イオンソースを用いて、更なる小型化への課題

探索を行った。

表1 イオンビーム3種類の比較表

種類	長所	短所
1.ECR型	メンテナンスフリー	大型(電源、本体) 高額
2.ホローカソード型	単純構造	起動時間が長い 収束性が悪い 柔軟性が悪
3.カウフマン型	小型 ビーム収束性が良い	フィラメントの劣化

カウフマン方式では、均一に開口した二枚のグリッドを用いて、イオンビームの指向性を調整することが可能である。更に、グリッド全体の形状を湾曲させ、よりビーム径の小さいイオンビームを形成することができる。

図に、Veeco 社製のカウフマン型イオンビームにおける4つのグリッドタイプを示す。FLAT-Collimated は、収束性は比較的良く、また、均一性もそれなりに良い。次に、DISHED-CONVERGENT は、収束性が最も高いが、均一性が少し劣る。FLAT-Divergent, DISHED-Divergent は、どちらも均一性は良いが、収束性が悪く本研究の目的から外れる。

そこで、FLAT 型と DISHED 型のどちらかを候補とすべきであるが、本研究では、試料サイズがハーフインチと極めて小さいのと、ターゲットサイズも小さくしているのを考慮して、ビーム径が最も細くなる DISHED 型を選定することにした。

3. ミニマル対応の超小型イオン銃の試作

カウフマン型イオンビームを基に、ミニマル対応の超小型イオン銃の試作を設計した。設計時には、イオンソースのガスライン、コネクタなどがチャンバー内でケーブリングを行い易いように、ハード部分をなくし、通常イオンソースの下側から配線が出るものを横側から出ている物にし、ミニマルの筐体内に収める際の場所の制約を減らすことで、省スペースに対応した、超小型のイオン銃の試作を行った。

4. イオンビームスパッタ粒子発生機構(カウフマン型)を用いた実験

ミニマル対応の超小型イオン銃の試作には時間がかかるため、イオンビームスパッタ粒子発生機構(カウフマン型)を用いて、効率的なビーム電流の取り出しが可能な超小型イオン銃への開発課題を探索した。従来のビーム径3cmのイオン銃を用いた実験により、効率的に電流を取り出すための Ar 流量やビーム電圧、Accelerator 電圧などを探索すると共に、各種電圧におけるビームの収束性などを評価した。

収束型のグリッドへと改良を行うことでビーム収束性が向上することが分かった。また低加速時(500V 以下)の際にはビーム電流の収束性が悪くなることが確認されているが、イオンビームスパッタでは、500V~600V での成膜により、高品質なスパッタ膜が得られる。

これらを考慮し小型なカウフマン型イオン銃を試作し、収束型グリッドによる、イオンビームの改善が開発課題となることが模索された。次年度には試作のミニマル型イオン銃の性能を評価し、収束型グリッドを改良や、3層にするなどの改善が必要と考えられる。

5. 超小型イオン銃の単体動作にて性能確認

超小型イオン銃の組込まれた試作機を利用し目標である、ビーム径が 1 cm、加速電圧が 0.1~1.2 kV、ビーム電流が 0~10 mA の間で調整可能であることを確認した。

一方で、ミニマル基本体の準備作業も順調に進み、イオン銃をミニマル基本体中に設置することが可能となったため、ミニマル装置内でのイオン銃の仕様確認が可能となった。ここで、ビーム電流の強度調整を簡便に行うためのタッチパネルシステムを開発し、その操作性についても確認した。

図に、最小電圧と最大電圧の代表的な条件下でイオンビームを発生させた際のパネル画面の動作写真を示す。各目標値とほぼ同じ値が出力されており、安定して動作しているのが確認できる。

イオンビームサイズは、ターゲットにできるビーム照射跡から評価した。図は、イオンビームを 100 分照射することで、Cu ターゲット上にできた照射痕の写真である。図に示すように、ビーム痕は真円に近い形状であり、更にはその直径は 10 mm 以下であるのが確認できる。これにより、実際に成膜室内で形成されているビーム径が目標値である 1cm(10 mm) の大きさで、ターゲットに照射できていることが確認できた。

6. 超小型イオン銃の動作確認

H27 年度は、当該イオン銃をミニマル本体に設置するため、外観や仕様を最適化させ、イオンビームの設置を完了した。その後、ミニマル装置内において、当該イオン銃がビーム径：1cm、加速電圧 0.3 kV ~ 1kV、最大ビーム電流 10mA の最終目標仕様を満たすことを確認した。

試作時にはチャンバー内にイオンビームが収納できることは確認していたが、配管・配線の組み入れが完了していなかった。そのため、今年度はそれらのガス配管や、配線を組み入れ、ミニマル装置内でのイオンビームの動作を確認した。

ガス配管は成膜室内への設置のため、不純物ガスの発生や真空漏れ等が無い様にハード配管を利用した。また、複数の電源を制御するための多数配線の省配線化を行った。ここで、成膜室内の配線経路は装置の稼働、ならびに成膜室のベーキング処理などを考慮した位置取りにした。



イオン銃の性能

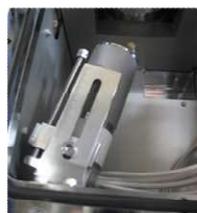
ビーム径：1cm

加速電圧：0.1-1.0kV

ビーム電流：0-10mA (定常使用10mA)

九州大学(九酸)にて
性能確認済み

達成率：100%



装置に設置された
ミニマルイオン銃



図3 ミニマルイオン銃の仕様と設置・使用例

I-2 超小型ガス貯蔵容器の開発

I-2-1 目標

Ar などの高圧ガス充填容器の超小型、及び配管の最短化を行い、全体のサイズが 70mm × 70mm × 40 mm 以下となるガス導入機構を開発する。ここで、容器には、20 回以上のプロセスが可能となる高圧ガスが充填されているものとする。

I-2-2 実施内容

1. 高圧ガス貯蔵容器の選定

目標のサイズ(70mm × 70mm × 40 mm 以下)を満たす高圧ガス容器を実現するために、既存の小型ガス容器を。その結果、ミニガスカートリッジと呼ばれる容器が目的を満たす容器として候補になることが分かった。当該容器は耐圧 30MPa であり、材質に深絞り用冷間圧延鋼板を使用しており、99.999%以上の高純度アルゴンガスを充填できる。従って、十分、目的のプロセスを実施できると考えられる。そこで、九酸が有している同程度の小型高圧ガス貯蔵容器と九州大学に既存のスパッタ装置を組み合わせ、充填ガスとプロセス時間の関係を実験的に考察した。



図4 ミニガスカートリッジ

(出典：<http://www.ntg.co.jp/products/minigas.php>)

表2 各種ミニガスカートリッジのサイズ

番号	1	2	3	4	5
全長(L)	64.0	82.5	138	134	130
胴径(φ)	18.6	18.6	30	40	40
内容量 (m l)	10	15	60	98	95

2. ミニガスカートリッジを用いた試験実験

図は、この実験で用いた実験装置の概観である。上面の ICF152 のフランジに、3 インチ径のスパッタカソードを取り付け、SiO₂ をスパッタするためのアルゴンガスを、1/4 インチの SUS パイプを介してスウェジロックで接続された小型ガス容器を用いて供給した。

小型ガス容器内には、ガス圧 1MPa になるように、九酸においてアルゴンガスを充填している。0.3 Pa 程度(5SCCM)の真空度となるようにガス流量計を調整し、スパッタを行った。その結果、30 分以上安定することが実験的に確認できた。本プロジェクトで開発する装置では、流量は 4SCCM 程度であるため、200 分程度のイオンビームの形成が可能であることが分かった。ミニマルファブでは、1 プロセス 1 分程度を目標にしているため、ガス放出時間は、最大でも 1 分であるため、200 回程度のプロセスが可能になる。

ここで、最終目標である 70mm × 70mm × 40 mm 以下に該当する 1 番の容器を使用した場合を考えると、内容量が 10CC、すなわち今回の容器の 1/7 程度となり、25 回程度使えることが分かり、目標にある 20 回以上のプロセスが、十分可能であることが確認できた。



図5 スパッタカソードを使ったガス流量実験

3. スプレー缶を適用したガス供給装置の設計、試作

前述のように、既製品のミニガスカートリッジを用いることで、目標である容器サイズ、プロセス回数が実現可能であることが確認できた。しかしながら、ミニガスカートリッジに充填された Ar ガスは需要が極めて少なく、受注生産となる。そのため、注文時には 10 万ロットでの発注が必要のため、ガスの導入に 1 億円規模の費用が必要になる

このようなプロセスがガスへの高額投資は大きな障壁となることが考えられ、当該装置を広く普及させるには、何らかの方法で解決する必要がある。そこで、プロセスガスの低価格化を目指すため、最少 6 本からの購入が可能なスプレー缶を用いたガス供給の可能性について、検討した。

表に示すように、Ar ガスのスプレー缶は、既存品として存在し、6 本で 2 万円以下、1 本当たり数千円となるため、著しい低コスト化が可能になる。純度は、ミニガスカートリッジに比べて劣るが、99.99 % と高い状態であり、インラインフィルタなどを導入することで、更なる高純度化が期待できるため、当該装置のプロセスガス供給に利用できる可能性が高いことが分かった。

純ガス及び2種混合ガス

#	成分ガス名 Component		化学式 Chemical Formula	純ガス Pure gases	2種混合ガス	
					N ₂	Ar
1	窒素	Nitrogen	N ₂	99.99%	—	×
2	酸素	Oxygen	O ₂	99.9%	○	×
3	アルゴン	Argon	Ar	99.99%	○	×
4	ヘリウム	Helium	He	99.99%	○	×
5	水素	Hydrogen	H ₂	99.99%	○	△
6	一酸化炭素	Carbon monoxide	CO	×	○	△
7	二酸化炭素	Carbon dioxide	CO ₂	99.9%	○	○
8	メタン	Methane	CH ₄	99.9%	○	△
9	n-ブタン	n-Butane	n-C ₄ H ₁₀	×	○	△
10	精製空気	Refinement Air	Ar	大気組成	×	—

※上記以外にも、ネオン、エタン、プロパン、ブタンなども取り扱っております。
※2種混合ガスについては、別途ご確認ください。

スプレー缶 Spray Can



内容積 Volume	充填圧力[MPa] Filling Pressure	用途 Application	発注最小単位[本] Minimum Order
0.6	0.8	自動車排気ガステスト用 検知器校正用	6 or 10 or 12

図6 スプレー缶種類とサイズ

(出典 : <http://www.tn-specialtygases.jp/catalog/spray/index.html>)

4. プラズマガス導入装置の試作

前述のように、高圧ガス貯蔵容器として、ミニガスカートリッジとスプレー缶の両方を検討していくことになった為、今回開発するプラズマガス導入装置は、両方の容器が取り付け可能な物を開発することにした。図に、今回作製したプラズマガス導入装置を示す。この写真に置いては、アルゴンのスプレー缶を接続している。ここで、スプレー缶の交換の為に、機密性を保った状態で、工具などを一切使わず簡易に脱着できる機構を新たに開発した。これは、ミニマルファブが想定しているユーザーへの普及に向けて、大変意義深い技術であると考えている。スプレー缶のサイズは、ミニガスカートリッジよりも大きいですが、プラズマガス導入機構全体としては、十分想定のサイズに収まり、更に、インラインフィルタやピュリファイアなどを取り付けるスペースも十分確保することができた。



図7 プラズマガス導入機構

XLF-M 0.01 μ m対応小型テフロンメンブラン

■仕様

最高使用圧力:	0.98MPa(9.8kgf/cm ² G)
最大使用差圧:	0.3MPa(3kgf/cm ²)×
最大許容逆圧:	0.1MPa(1kgf/cm ²)
最高使用温度:	130℃
有効濾過面積:	12cm ²
Heリークレート:	1×10 ⁻⁹ atm・cc/sec以下
均一粒子除去率:	0.01 μ m 99.999999%以上 0.05 μ m 99.999999%以上 0.10 μ m 99.999999%以上

材質: ボディ: SUS316L
内面処理: 特殊電解研磨仕上げ
エレメント: PTFEメンブラン
同上支持体: PFA



図8 インラインフィルタの例

(出典: <http://www.japan-pionics.co.jp/product/etc/index.html>)

5. 超小型ガス貯蔵容器のミニマル多層膜形成イオンビームスパッタ装置への組み込み
当初予定では、前年度、誠南工業にて試作した超小型ガス貯蔵容器を、そのままミニマル基本体内の上部に設置することを検討していたが、更なる省スペース化、及びガス容器交換作業の簡便化を検討し、図に示すように、背面から容易にアクセスができる位置に変更し、更に流量制御器などの位置の最適化も行った。

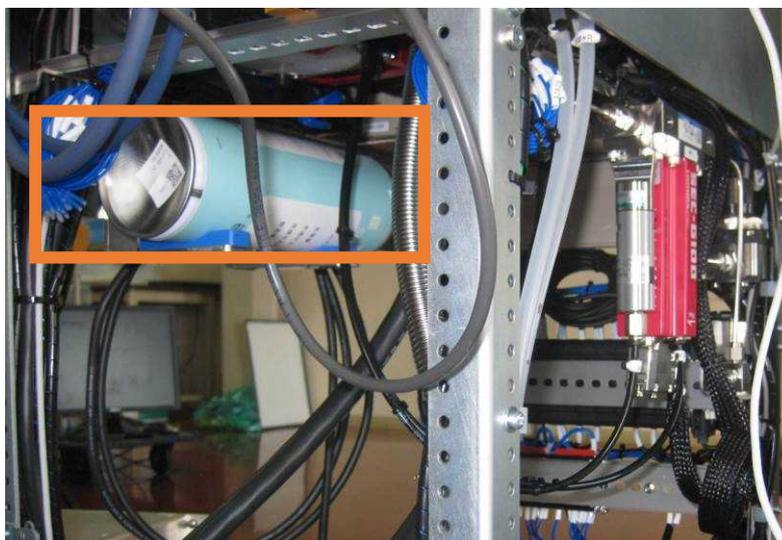


図9 配管・取付位置を最適化し組み込み

6. 超小型ガス貯蔵容器のイオンビームスパッタプロセス確認について

前年度までに、イオンビームスパッタ粒子発生機構を用いて、ガス容器の交換無く、100分以上の使用は問題ないことの確認できていたが、本年度は、実際にミニマル基本体に組み込んだ状態で、イオンビームスパッタプロセスの回数について評価した。

ミニマルでは、1プロセス1分が最終目標であり、本装置に置いても、通常用いるガス流量 2SCCM にて、100分以上ガスを流し続けることが可能であることを確認した。更に、設置場所の最適化により、ガス容器交換作業に関しても約5分程度でできることから、貯蔵容器に関連する目標が達成できたことを確認した。

今回の実験では、真空排気量が最大化で行った実験であるが、当該装置には、ターボ分子ポンプ直上に、コンダクタンスバルブを設けており、更なるガス量の節約が可能になると期待される。

7. 超小型ガス貯蔵容器スプレー缶を適用したガス供給装置の純度による問題点の検証

今回、汎用性とコスト削減の観点から、スプレー缶を採用したが、その仕様の関係上、ガス純度を犠牲にしている。今回、検討している装置は、後工程での利用であるため、金属電極や絶縁層などのスパッタには問題無いと考えているが、より広範な利用、装置性能の向上には、ステンレス容器の利用も視野に入れており、次年度以降、スパッタ膜のガス純度依存性などを評価する予定である。そのため、純度確認の為、図6に示すように、配管内に3方弁を取り付けることで、スプレー缶からの供給と、通常のガスボンベからの供給との比較が安易にできる構造にしている。



図10 超小型ガス貯蔵容器(スプレー缶)と純度

8. ガスラインの変更 (高純度ガス・取り付けポート)

しかしながら、一方で、純度に関しては、上記のスプレー缶は、99.99%の純度であるため、頑丈な容器に充填された高純度ガスで成膜した場合に比べて当該成膜装置で作製した金属薄膜は、高純度ガスで作製した場合と比べて劣るのは否めない。そこで、今回設置したガス導入機構の一部分に、図のように、三方弁を取り付け、標準仕様のスプレー缶の取り付け以外に、必要に応じて、高純度ガスを接続できるラインを設けた。このラインは、スウェジロックでの取り付けが可能のため、ミニガスカートリッジなどの小型容器から、従来のガスボンベのどちらも取り付け可能である。これにより、99.9999%のガスを取り付けてCu薄膜を成膜したところ、図のように、スプレー缶の容器と比べて膜品質の改善を確認した。

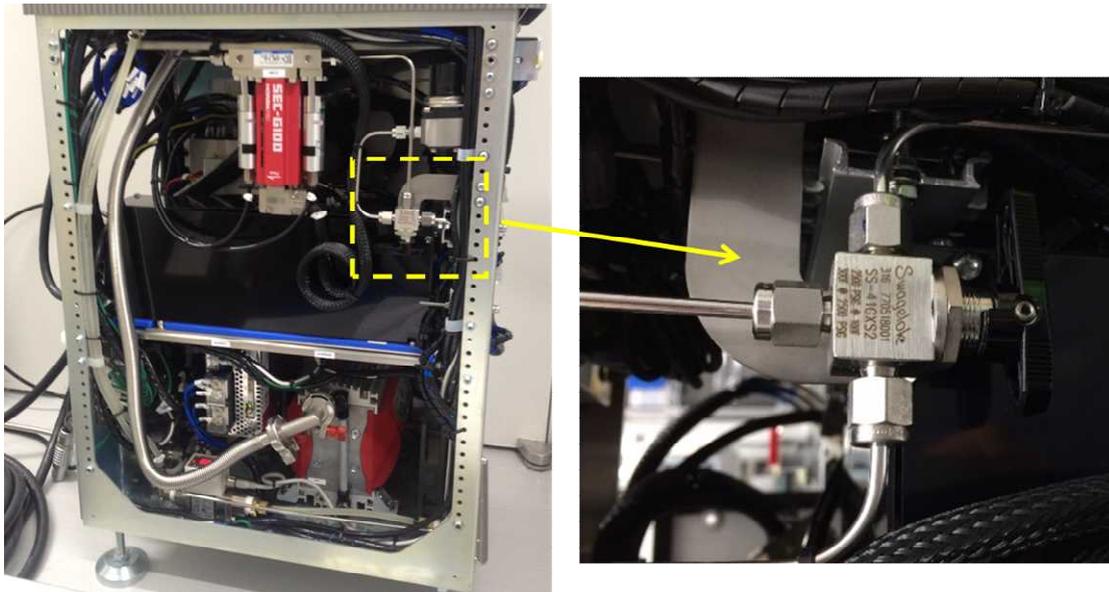


図1.1 ミニマル装置内のガスライン選択用の三方弁

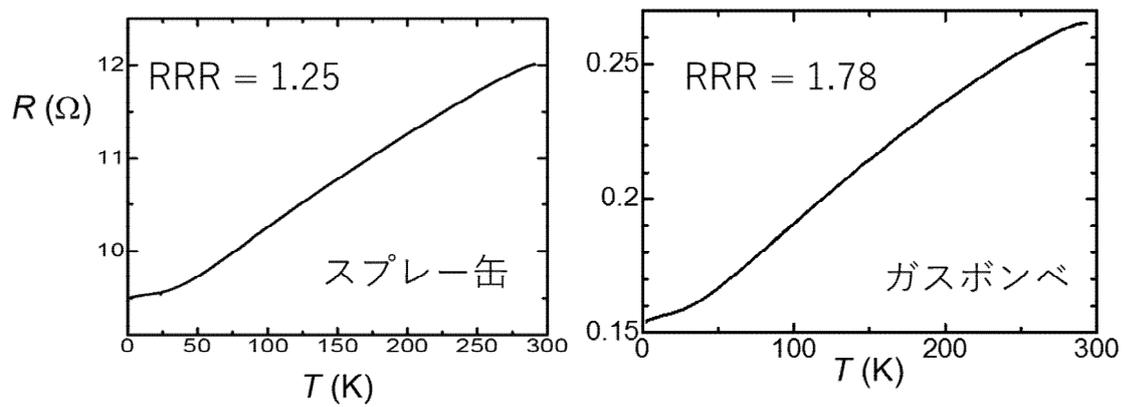


図1.2 スプレー缶とガスボンベからアルゴンガスで作製したCu 薄膜の電気抵抗の温度依存性

I-3 システムレイアウトの最適化

I-3-1 目標

イオンビームも含めた各種真空機器、真空排気系などのレイアウトを最適化し、ミニマルファブ規格（幅 0.3m, 奥行 0.4m, 高さ 1.44m）に準ずるシステムの省スペース化を実現する。

I-3-2 実施内容

1. システム全体の設計

開発した装置をミニマルファブシステムに準ずる装置として認定されるためには、装置全体のサイズが極めて重要である。具体的には、装置全体の大きさを、幅 0.3m, 奥行 0.45m, 高さ 1.44m のフレームに納める必要がある。そこで、各セグメントで用いる部品を選定し、正確な図面を作製した。図面の一部を以下に示す。

図から明確であるが、真空排気系からプロセスガス、そして冷却水など、全てをミニマルファブの規格サイズ内のフレームに収納できているのが確認できる。

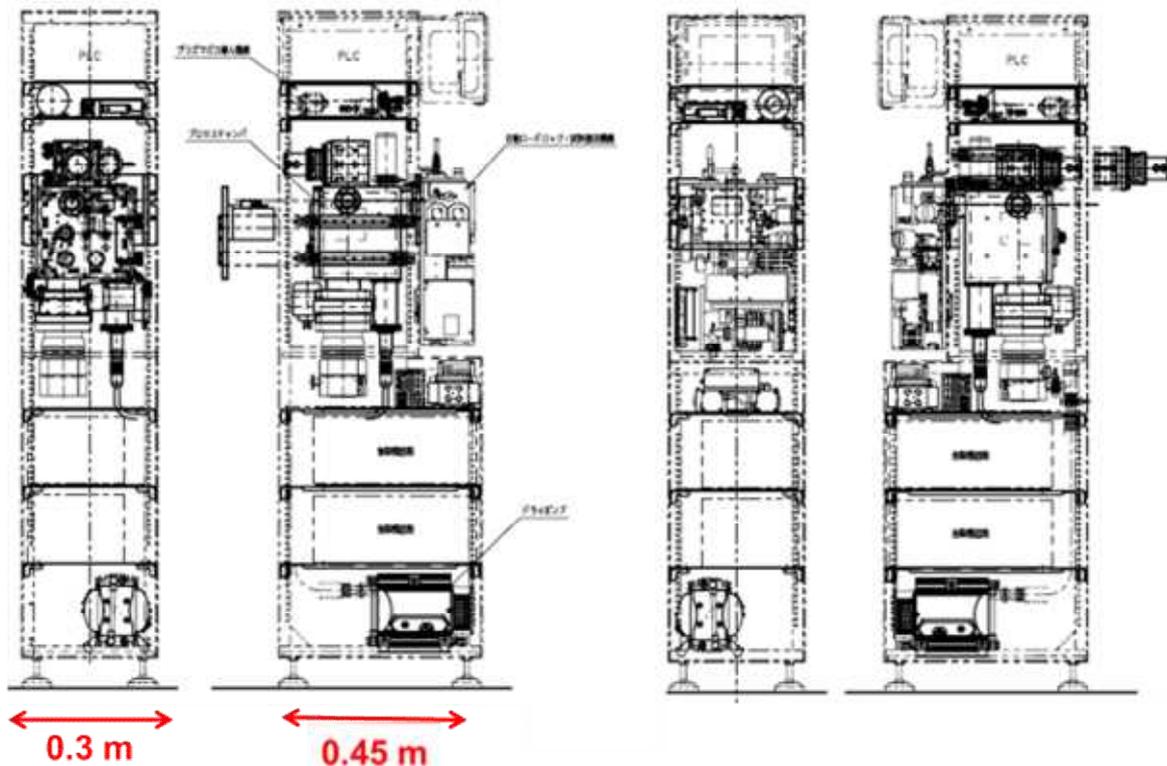


図13 図面上での設計確認

本装置の心臓部に対応するイオンビームスパッタ装置であるが、チャンバー内には、超小型イオン銃を配置し、更にその対面には、6種類のターゲットが取り付け可能なターゲットホルダーが設置されている。更に、その下には、ミニマルファブ規格であるハーフインチ基板の試料がマウントできる試料ホルダーが配置され、ターゲットホルダー、試料ホルダー共に冷却機構、及び電動駆動機構を有している。また、これらのレイアウトは、イオン銃のフィラメント交換、ターゲット材料交換など、メンテナンスを考慮した設計になっている。ここで、イオンビームとターゲットホルダー、及び基板ホルダーの位置関係は、ターゲットのエロージョン、膜質、成膜レート、回り込み、スペースなどを考慮して選定した。イオンビームと基板の角度を広くとると、チャンバーサイズが大きくなってしまいう事に加え、実効ビーム径が大きくなり、ターゲットサイズの増大、ムラのある薄膜堆

積など、様々な問題が発生するため、鋭角な位置関係となるようにイオンビームと基板水冷機構がくるように配置した。この他、試料室には、フルレンジで測定可能な真空計、リークバルブ、予備ポートなどが設置され、ガスの影響の少ないキャパシタンスマンオメーターの追加や、基板受け渡し時に静電チャックを利用など、将来的に拡張できる設計とした。更に、到達真空度を考慮しチャンバー部分にベーキングヒーターも取り付けられている。

試料室は、ターボポンプとダイアフラムポンプにより真空引きされており、ターボポンプ直上には、コンダクタンスが制御可能な電動バタフライバルブが取り付けられている。試料ホルダーは、試料交換を迅速に行うためのロードロック室との接続が、容易に拡張できる構造になっている。ここで、ロードロック室は、ミニマルファブ規格により PLAD と呼ばれるサイズ・位置が決まった専用の機構を用いることが決められており、それに準じた設計としている。これらの設計において、大きな問題は見当たらなかった。

装置上面には、前述のプラズマガス発生機構を設置し、また、制御器の直流電源やパネルなどへの電源供給ラインなどの設備を設置する。また、装置下面には、イオン銃電源の為のスペース、その他、バルブ関係のコントローラなどを収納する。

2. 仮筐体製作

最後に今年度の試作を仮の筐体に取り付け、全体のレイアウトを確認した。



図14 仮筐体での製作

3. 最終装置収納

イオンビーム電源も含めた全レイアウトを最適化し、ミニマルファブ規格（幅 0.3m, 奥行 0.4m, 高さ 1.44m）に準ずるシステムの省スペース化を実現した。具体的には、前年度までの設計を引き継ぎながら、本年度のレイアウトについては主に、Ⅱ-2 にて新たに開発を行った高精度・高速安定電源とⅢ-5 にて行った基板回転機構の組込みを主に実施した。その結果、最終的に、目標サイズである幅 0.3m, 奥行 0.4m, 高さ 1.44m のミニマルファブ規格に準ずるシステムの省スペース化を完了させた。



写真 主構成機器のみ取付 写真 構成部品・配線時 写真 省配線 写真 パネル取付時

図15 最終装置の全体図

II プロセス時間の最短化

II-1 高精度・高速ガス流量制御システムの開発

II-1-1 目標

$10^0 \sim 10^{-2}$ Pa の広範囲な真空度で安定したイオンビームを瞬時(30 秒以内)に形成するために、0.05 SCCM 以下の精度で高速に流量調整が可能なガス流量制御装置を開発する。

II-1-2 実施内容

1. 流量制御計の選定

ミニマルファブ装置に取り付け可能な省スペースのガス流量制御計を探索したところ、堀場製作所が他のミニマル装置向けに製造しているガス流量計(SEC-G100)が存在することが判明した。この流量制御器は、通常の流量制御器と比べ、サイズが約 3/4 程度であるが、市販品では世界最小である。また、流量は、0.1 SCCM 刻みで制御可能であり、また、繰り返し精度は最大流量 15SCCM の $\pm 0.2\%$ 、すなわち ± 0.03 SCCM である。この流量制御計をモニタした真空度を検出しながらフィードバック制御することで、高精度のガス圧制御を行う。

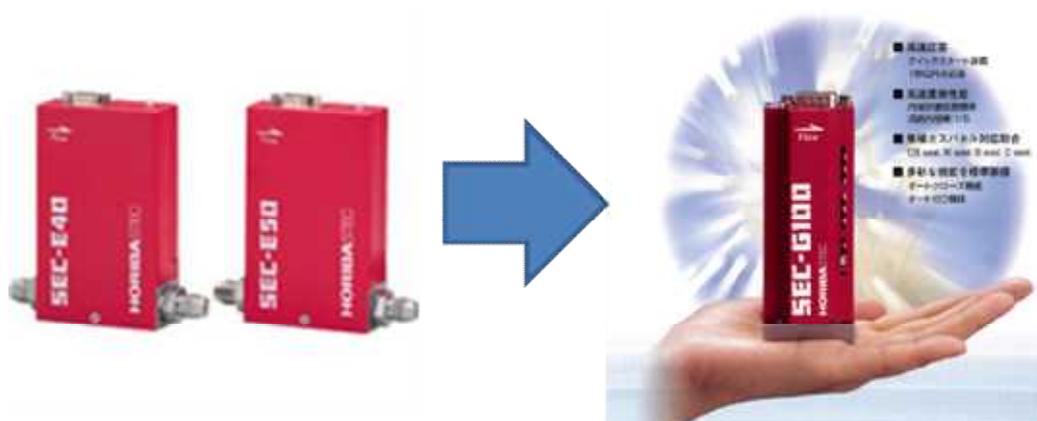


図16 流量計の選定
(出典：堀場エステック カタログ)

表3 流量計の比較表

	通常使用している流量計	今回の流量計
繰り返し精度	$\pm 0.2\%F.S$	$\pm 0.2\%F.S$
サイズ	150.8×44×159	130.62×39×118

3. 最適圧力調整範囲の決定

真空度の短時間の制御を実現する上で、最初に必要なのが、圧力範囲の決定である。当初の予定では、通常のイオンビームスパッタ装置の仕様を参考に算出していたため、圧力調整範囲を $10^{-1} \sim 10^{-4}$ Pa としていた。

しかしながら、本ミニマルスパッタ装置はコンパクトであり、T-S 間距離も非常に小さいことから、平均自由行程などを参考に、再度、適切な圧力範囲を算出したところ、 $10^0 \sim 10^{-2}$ Pa の範囲内での圧力調整が適切であることが確認できた。

ここで、スパッタ粒子の平均自由行程は、以下の式を用いて算出した。

平均自由行程 $l = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p \sigma^2 P}$ σ : 分子の直径
 P : 圧力

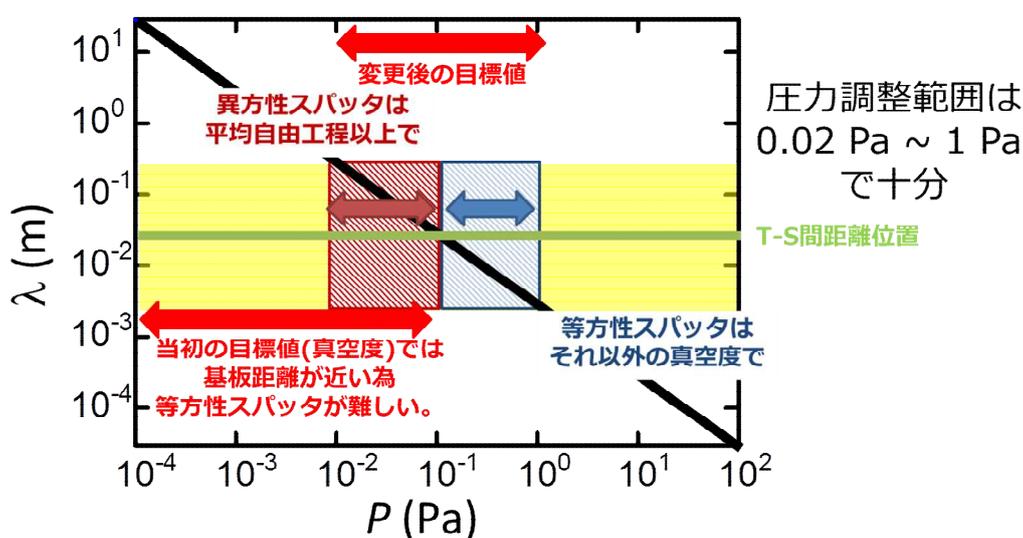


図 19 圧力調整範囲と平均自由行程

4. 真空安定度の確認

上記で得られた圧力範囲の調整可能性をミニマル基本体において確認したところ、図 10 に示すように、Ar 流量により調整したところ、図 10 に示すように、0.02 Pa から 0.6 Pa まで、制御できているのが確認できる。先に述べた調整範囲の上限値が 1Pa であるため、この制御では不十分のように思われるが、これは、先にも少し述べたコンダクタンスバルブの利用により解決できる。図 11 に示すように、コンダクタンスバルブの開閉度 (APC) に応じて、真空度が広範囲で調整できているのが確認できており、更に、ガス圧も 10 秒程度で安定化することから、目標値は、十分達成されたと考えられる。

5. イオンビームの瞬間的安定動作の確認

前年度までに、当該イオン銃からイオンビーム発生が、外部電源等を用いて、瞬間的に安定する(5秒程度)ことを確認していたが、今回は、実際のミニマルファブ装置内にて同様にビームが瞬間的に安定動作することを確認した。後に述べる新規開発電源を用いても、問題なく、イオンビームが瞬間的(7秒以内)に安定動作領域に入ることを確認した。

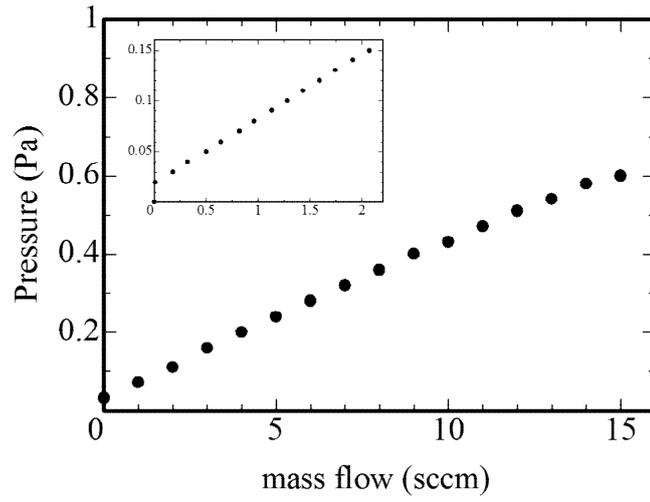


図20 Ar 流量計による圧力調整

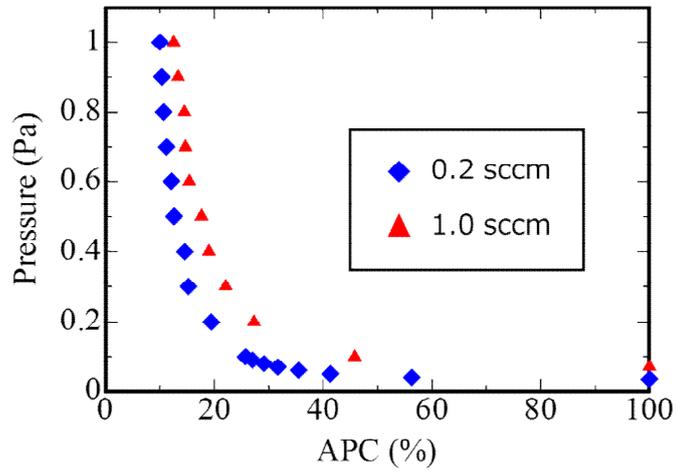


図21 コンダクタンスバルブでの圧力調整



図22 イオンビームの形成確認

II-2 高精度・高速安定化電源の開発

II-2-1 目標

加速電圧(0.3~1.0kV)、ビーム電流(1mA~10mA)の範囲のイオンビームが出力可能で、且つ瞬時(30秒以内)にビームの安定化が可能なミニマルファブ規格のイオンビーム用高圧直流電源を開発する。

II-2-2 実施内容

1. 電源設置スペースの検討

イオンビーム電源は、1kV以上の高圧を発生させるため、非常に大型になる傾向があり、本研究課題でも、電源の小型化は大きな課題の一つである。I-3で設計したように、ミニマルイオンビームスパッタ装置全体のレイアウトから考えて、イオンビーム電源に使用できる空きスペースはD340×W200×H140程度である。一方で、従来のイオン銃電源のサイズはD19インチ(482)×W18インチ(457)×H5.25インチ(133)であり、高さは同等程度であるが、奥行は一回り小さく、幅はおよそ半分のサイズにする必要があり、このままでは、ミニマル装置への収納は到底無理である。しかし、従来のイオン銃電源は、ビーム径12cmまで対応が可能なものであり、最大のビーム電流も300mAまで対応できる構成になっている非常に大容量のものであり、もし、今回のような超小型イオン銃に特化した電源を設計すれば、小型化は可能になると考えられる。そこで、カウフマン・イオン銃の機構を精査し、独自の小型イオン銃電源の設計をすることにした。

カウフマン型イオン銃の内部構造である。イオンビームを制御するパラメータとして、

- ①フィラメント電源
- ②アノード電源
- ③イオンビーム電源
- ④加速器グリッド電源
- ⑤ニュートラライザー電源

の5つの独立な電源が必要となることがわかった。

ここで、各電源の典型的な値に関して、3cmイオン銃を用いて調べたその条件下で、ビーム電流10mA~30mAのイオンビームが約2秒で安定することが分かった。これらから、ビーム径が小さいイオンビームを実現する上で、特殊な電源が必要なのは、③と④の高圧電源である。しかしビーム電流がそれ程、大きく無い為、小型化が可能であると考えている。具体的には、電子顕微鏡の検出器などで用いられている小型の高圧電源が、仕様を満たすことが確認できており、次年度以降は、これらを調達し、小型電源の試作を行っていく。



図2-3 従来型DCイオン銃電源

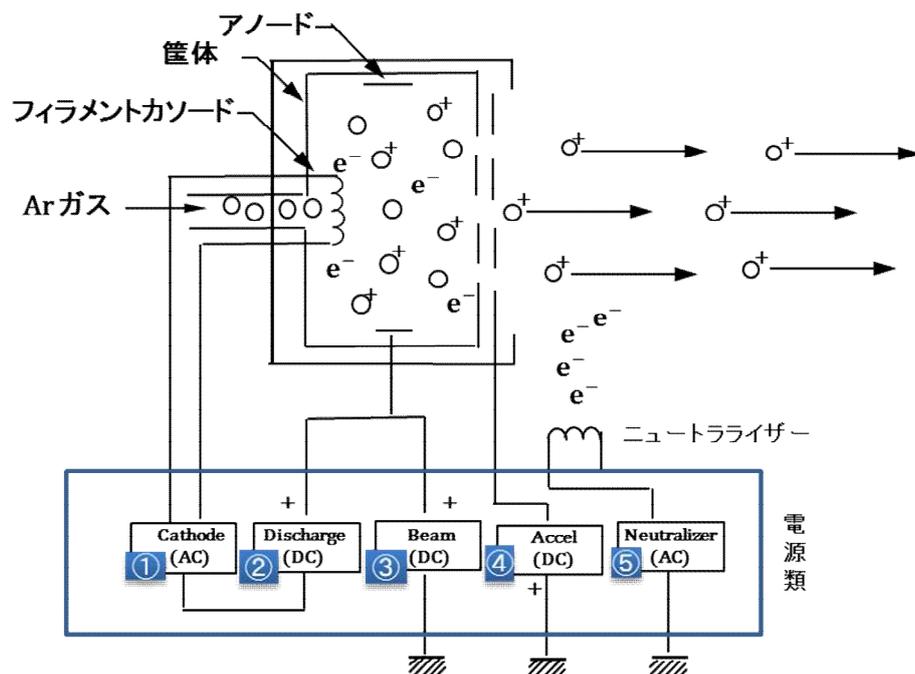


図 2 4 DC イオン銃電源の内部構造

2. 電源の小型化に向けて

前述したが、本項目は、小型イオン銃の開発と密接にリンクしている。既に、イオンビームは、ミニマル装置内に設置されており、更に前述したように、目標値内でのイオン銃の動作も確認している。ここでは、動作安定性について報告するが、前述のガス圧内において、5秒程度でイオンビームが安定することを確認しており、試作電源が十分に機能することを確認した。

しかしながら、現電源をそのままミニマル基本体に設置することは困難であり、省スペース化は必須である。現在、基本体側には、電源設置ように、スペースを確保しており、そのサイズに縮小するのが、一番の課題であった。

3. イオンビーム電源の省スペース化

昨年度までに図面上のイオンビーム電源を含む省スペース化を実現していた、本年度は実際の筐体に組み込むために、実際に各電気機器の配置などを考慮しながら、3D 図面上で電源の配置場所を最適化し、最終設置位置を決定した。

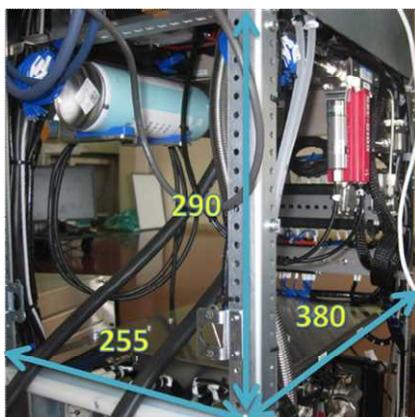


図 2 5 電源スペース

4. 超小型イオンビーム用電源の開発

高圧で比較的大きな出力を有するイオン銃電源を、前述のミニマル筐体内における残りのスペースに設置する必要があったため、本作業は困難を極めた。実際に幾つかの電源企業にも相談したが、開発費用の関係もあり、協力を得られなかった。そのため、ほぼ、自助努力にて、開発する必要があった。既存の汎用イオン銃電源の内部を精査し、改良を重ねることで、ようやく回路構成の考案が完了し、動作を確認した。

電源部は5つの領域で構成される。更にそれらの筐体を、電氣的に接続する必要があるため、電源の小型化に加えて、配線の小型化などが困難を極めた。各回路のスペックダウンを行い、最終的に、ミニマルイオン銃に最適な動作範囲で、安定した動作ができるような仕様で設計している。これにより、最終的には電源サイズ幅 230×奥行 375×高さ 80(mm)程度の大きさの電源の開発に成功した。

5. 超小型イオンビーム用電源の組み込み

ミニマル筐体内に電源用に確保されたスペースは、決してスマートな領域ではなく、また、各種電源には配線も必要であるため、超小型イオンビーム用電源を筐体内に組み込むためのレイアウトも再考した。高圧電源の絶縁性能を保持しつつ、配線等がスムーズにいく機器配置を行う必要があったので、他の制御系の設置位置や配線の取り回しなどの変更を行った。その結果、無事に超小型イオンビーム用電源をミニマル筐体内に組み込むことに成功した。

II-3 自動ロードロック・試料搬送機構の開発

II-3-1 目標

ロードロック室 (PLAD) に搬入された 0.5 インチサイズの試料を、全自動かつ短時間(10秒以内)で、高真空成膜室に搬送する機構を開発する。

II-3-2 実施内容

自動ロードロック・試料搬送機構の取り付けに関しては、ミニマル規格に準ずる必要があるため、正規品として販売している PLAD システムを購入し、ミニマル基本体に組み込んだ。幸い誠南工業は、PLAD システムの使用実績があるため、イオンビーム関連の配線・配管などが、搬送経路と干渉しないようなレイアウト等を工夫するなど、十分なノウハウを活用することで、滞りなく設置することができた。

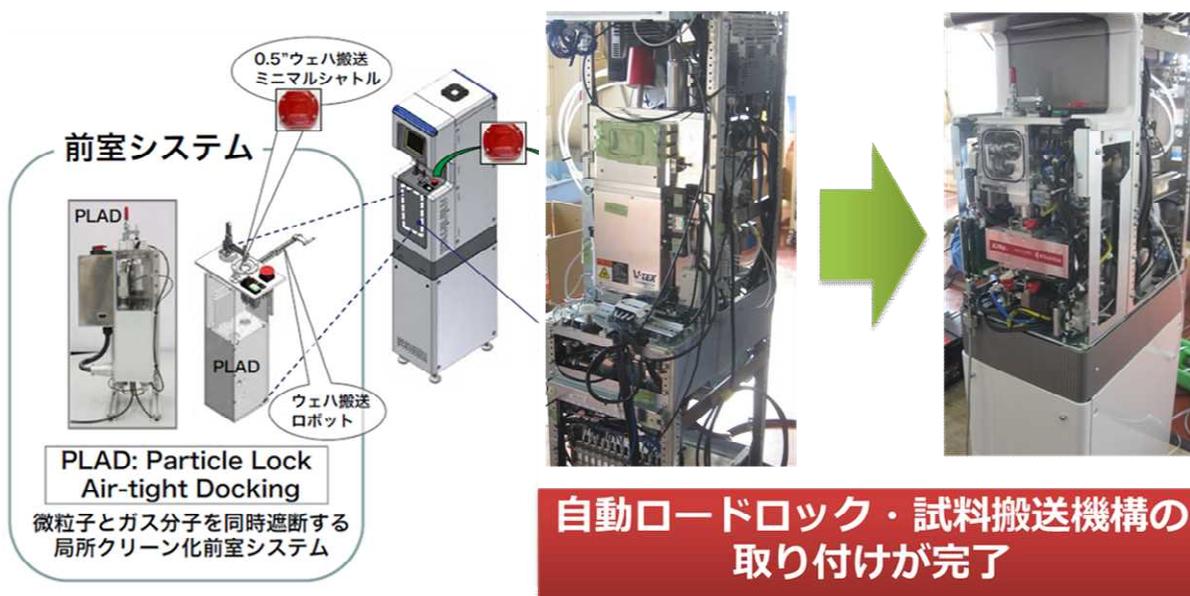


図26 PLADの設置

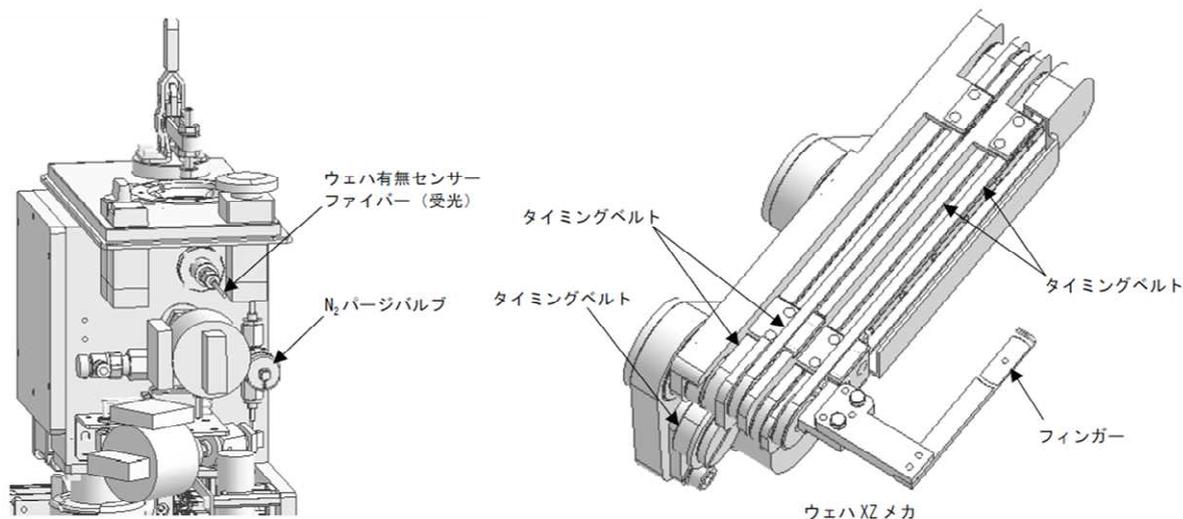


図27 PLADの内部

II-4 冷却機構付き基板ホルダーの開発:

II-4-1 目標

ハーフインチ基板が取り付け可能で、成膜時の基板温度の上昇を 60 度以下に抑制し、成膜直後 1 分以内で、基板温度を 40 度以下とする冷却機構を開発する。

II-4-2 実施内容

1. 基板ホルダーの設計

通常、真空機器・装置製作者が作製している基板ホルダーは加熱するタイプが多く、且つ試料サイズやホルダー全体のサイズが大きいものである。しかし、今回はミニマルファブ用で、スペースが限定され、試料サイズもハーフインチであるため、かなりの工夫が必要である。幸いにも、プロジェクトグループの誠南工業は、ミニマルスパッタ装置の開発実績があり、そこでハーフインチサイズのマルチ試料ステージを作製した実績を有している。本研究では、そのホルダーを高度化することで、イオンビームスパッタ装置用の基板ホルダーを設計することにした。

今回のホルダーを製作するに際し、新たに考慮しなくてはならない機能は以下である。

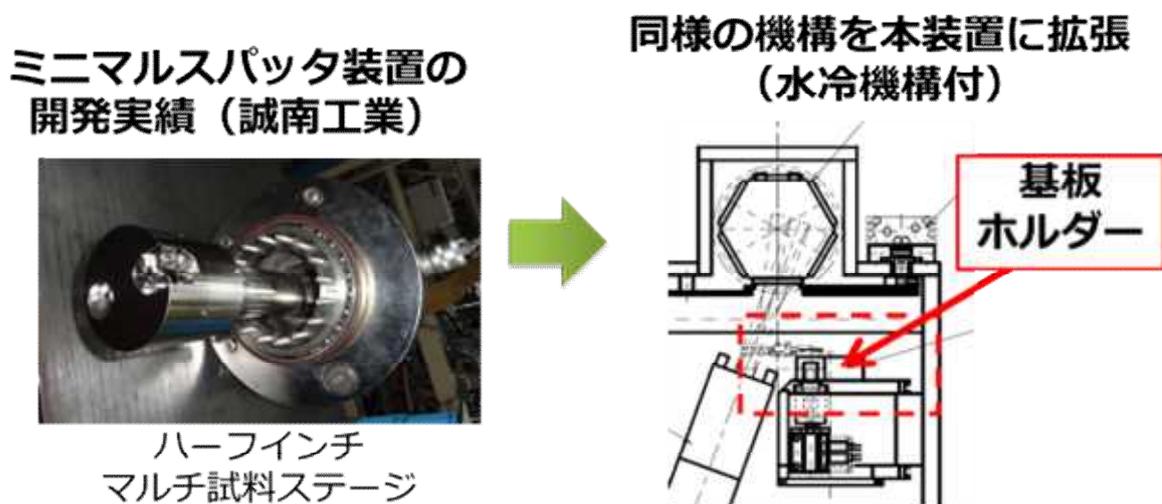


図 28 基板ホルダーの設計

(1) ホルダーの設置位置・サイズ

また、ホルダー全体のサイズや設置位置に関しては、イオンビームやターゲットホルダーなど、システム全体として、制約があるため、I-3 で開発した図面に基づいて決定した。取り分け、イオンソースと試料ホルダーとの距離を極限に縮める必要があるため、ミニマルスパッタ装置におけるホルダーと比べて、より緻密な設計が必要になった。

(2) 水冷機構の追加

前述のミニマルスパッタ用試料ステージには水冷機構を設けていないため、今回のホルダーにて、新しく水冷機構の設計を行った。水冷部は O リングを利用して真空部とシールし、ステージ部分が効率よく冷却されるように、熱伝導率の高いアルミの材質で基板ステージを作製し、また、ステージの厚さを極限まで薄くするなどの工夫を加えた。

(3) 試料受け渡し構造の導入

受け渡し部分にはテーパ加工し試料を落とし込める様な形状にし、試料下に空気がたまり真空度に影響が出ないように、逃がし口をつけた。

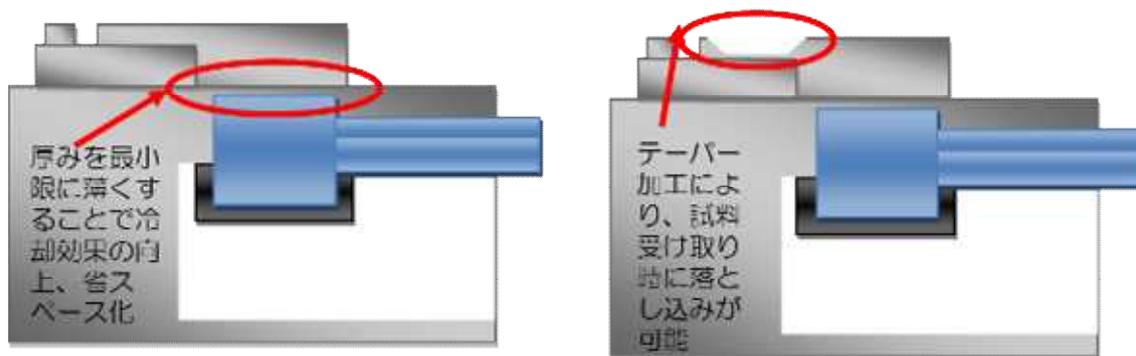


図29 冷却機構付き基板ホルダーの開発

2. 基板ホルダーの試作

上記を設計方針を踏まえて、基板ホルダーを試作した。



図30 ミニマルスパッタ装置用とミニマルイオンビームスパッタの基板ホルダ

3. 基板ホルダーの冷却性能確認

H25 年度に試作した冷却機構付き基板ホルダーが、成膜時の基板温度の上昇を 60 度以下に抑制し、成膜直後 1 分以内で、基板温度を 40 度以下という最終仕様を単体評価試験で満すことを確認した。

成膜時の温度上昇を防ぐには、イオンビームやターゲットからの距離を大きくするのが効果的であるが、成膜レートが低下してしまう。そこで、温度上昇を防ぐために、水冷機構を導入した。前述したように、本装置は、自動搬送機構を有するため、試料交換位置を設定する必要があるが、交換位置のままでは、ターゲットやイオンビームとの距離が近くなるため、成膜時にステージを移動させるための駆動機構を設ける必要がある。このような冷却可能な駆動機構をミニマルのような狭いスペースに収納するのは、かなりの困難を極めたが、水冷機構の先端部に昇降機構を取り付けることにより解決した。

冷却能力の評価に関しては、不可逆性のサーモラベル(40 度, 50 度, 60 度)を用いて行った。具体的には、サーモラベルを基板表面に貼り付け、1 分間のスパッタによる最大到達温度の評価を行った。図に成膜前後のサーモラベルの変色状況を示す。冷却水無しでは、すべてのサーモラベルが変色しており、基板温度が 60 度以上になっているのが確認

できるが、冷却水を流すことで、60度以下に発熱が抑えられているのが確認できる。これにより、当初目標の60度以下での成膜は達成されたと考えられるが、今後、出力を増大させたり、スパッタ時間を増大させた際には、60度を超えてしまう可能性がある。ここで、装置内部の構造を詳しく見てみると、温度上昇の主たる原因は、スパッタ粒子ではなく、イオン銃からの輻射熱であることが判明した。この影響は、図のように、遮蔽板を設けることで、回避できるため、現在、その設置を検討している。この遮蔽板と冷却機構により、成膜時の温度上昇は、殆ど無視できると期待される。

冷却水なし

冷却水あり



図3-1 スパッタによる温度変化

4. レイアウト最適化による冷却性能の向上

ここでは、実際の完成版のミニマル装置を使って、もう一度、実際のミニマルイオンビーム多層膜作製システムを用いて、実際に、試作した基板ホルダーが、要請されている①ハーフインチ基板が取り付け可能、②成膜時の基板温度の上昇を60度以下に抑制、③成膜直後1分以内で基板温度が40度以下の項目を達成していることを確認した。

特に、昨年度の時点では、温度上昇の主たる原因は、スパッタ粒子ではなく、イオン銃からの輻射熱であることが判明したため、輻射熱が直接、試料表面に当たらないように少しレイアウトを変更して、再度、成膜時の基板温度の上昇を60度以下に抑制し、成膜直後1分以内で、基板温度を40度以下が実現されるかを確認した。図に実験結果を示すが、2分間の成膜において、40度に到達していないことがわかり、熱による効果が極めて小さいことを確認した。

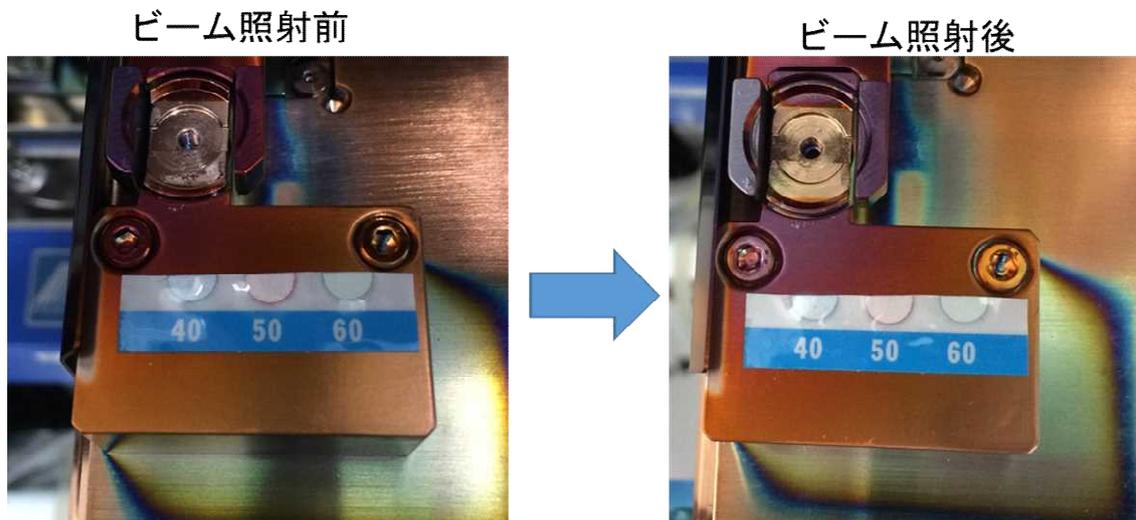


図3-2 冷却機構付き基盤ホルダーの性能

III 多品種薄膜の作製

III-1 回転型ターゲット取り付け機構の開発

III-1-1 目標

面内1インチ程度の不定形状のターゲットを6種類取り付け可能で、角度精度が1度以下の回転機構を有するマルチターゲット取り付け機構を開発する。ここで、ホルダーには、イオンビームの照射面を電動で回転させることで所望の材料を自動選択可能で、成膜時も周辺の温度が60度以下となる冷却機構が備わっているものとする。

III-1-2 実施内容

1. ターゲットサイズ・形状の検討

6面ターゲットホルダーの全体のサイズを検討するにあたり、まず取り付けるターゲットのサイズや形状を検討した。I-1で開発する超小型イオン銃では、ビーム径が1cmであるため、それを基準にターゲットサイズを決定するが、ビームの拡がりなどがあるため、設置可能なターゲットホルダーのサイズなどを考慮して、最大直径30mmすることにした。また、最終目標にある不特定形状のターゲットの取付を可能にするため、ホルダーには、□30サイズのバックングプレートを取り付け可能にした。これにより、不特定形状のターゲットをプレート上にボンディングすることで取り付けが可能になる。更に、丸型ターゲット取り付けの際に、取付部分に高さを持たせ、横からの回り込みを低減を試みた。

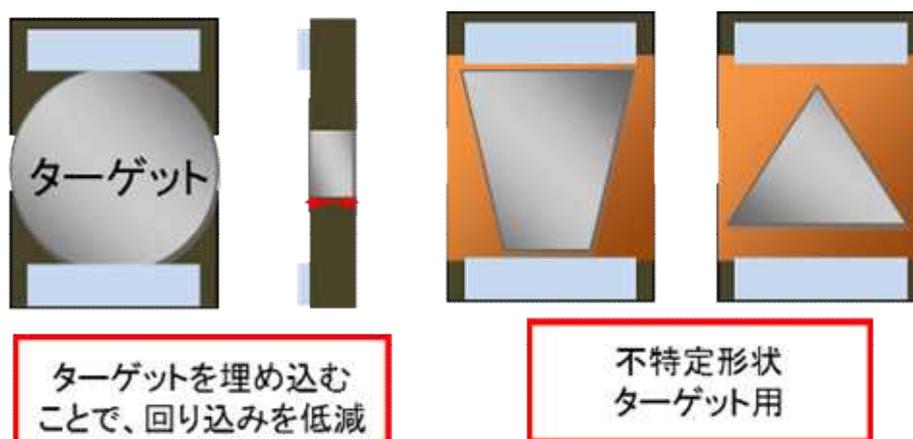


図33 6面ターゲットの工夫点

2. ターゲットホルダーの設計と試作

開発するターゲットホルダーでは、6種類のターゲットが取り付けられた6面体を回転させるための駆動機構に加え、イオンビーム照射中においても、周辺温度が60度以下を保つために、ターゲットホルダーに水冷機構を導入する必要がある。回転しながらの水冷には、それなりの工夫が必要であるが、回転機構にステッピングモータを利用し、Oリングシールにより真空をシール、更に水冷部にはオイルシールを利用することで、これらの課題を克服することにした。

更に、頻繁に行う可能性があるターゲット交換などに関しては、簡便性を最優先するため、ホルダーごとスライドできる引き出し方式を考案して対応することにした。

図に最終的に試作まで完了したホルダーの写真を示す。



図3 4 試作した6面ターゲット

3. 回転型ターゲット取り付け機構の動作確認

本項目の具体的な実験内容として、角度精度に関しては、ステッピングモーターの精度から考えると、十分、満足していると考えられる。ここでは、100回程度、ターゲット回転機構を動作させ、オフセットやバックスラッシュなどによる角度ずれが無いかを目視により確認した。一方、周辺温度に関しては、前の実験と同様に不可逆型のサーモラベルを用いて評価した。図16に示すように、ターゲット周辺にラベルを貼り付け、1分間のイオンビームスパッタを行った。照射後の写真を図に示す。40度のラベルも含めて、一切の変色が確認されず、冷却機構が極めて有効に機能していることが実証された。

また、ターゲットサイズは、直径30mmを基本サイズとし、それ以下のサイズでも、適切に固定すれば、柔軟に取り付け可能である。実際に、希少価値の高い不定形なサイズのSi基板ターゲットを用いて実験したところ、無事に成膜されることを確認した。

4. 各種ターゲットを用いた成膜実験

本回転型ターゲット取り付け機構を用いてSi/SiO₂基板上への、各種ターゲットを用いた蒸着とSiO₂基板上へのCu及びAlターゲットを用いた蒸着を行った。ここで蒸着レートを算出した結果、各種ターゲットにおいて、10nm/min程度の成膜レートを確認した。特筆すべきは、本システムでは、金属から、半導体、絶縁体など、あらゆる機能性材料の固形ターゲットを成膜が可能である点である。各種ターゲットの成膜レートも比較的高く、メガファブ型のイオンビームスパッタ装置に比べて格段に低出力であるが、2倍程度の成膜ができている点は驚くべき点であり、このことは、ミニマルファブが功を奏したことを示す結果である。また、各種ターゲットの種類は真空中で変更可能であり、様々な機能性薄膜、多層膜が作製可能であることは、本装置を活用したミニマルファブ構想の大きな発展を期待させる。

III-2 精密駆動型コンダクタンス制御バルブの開発

III-2-1 目標

$10^0 \sim 10^2$ Pa の範囲で成膜時の真空度を一定に保ち、安定したイオンビームが形成可能なコンダクタンス制御バルブを開発する。

III-2-2 実施内容

1. 自動真空度制御システムの設計

自動真空度制御システムを設計するにあたり、ターボ分子ポンプの直上に、電動式のバタフライバルブを導入して、設定真空度と測定真空度の差をバルブの開閉量に反映させる制御システムを構成することにした。従来のバタフライバルブではミニマル管体内にとって空間占有領域が大きすぎるため、真空バルブメーカーと打ち合わせしながら、最終的に、以下の ICF114 サイズのバタフライバルブを選定した

当該バルブは、これまでのバタフライバルブと異なり、制御部の体積が 1/3 以下になっており、ミニマルファブを構成するに辺り、非常に適している。

更に、従来の電動式バタフライバルブでは、バルブの開閉度を調整するモーターのフィードバック制御ができないが、今回は、研究目標を達成するため、PLD 制御が可能となる仕様に変更した。

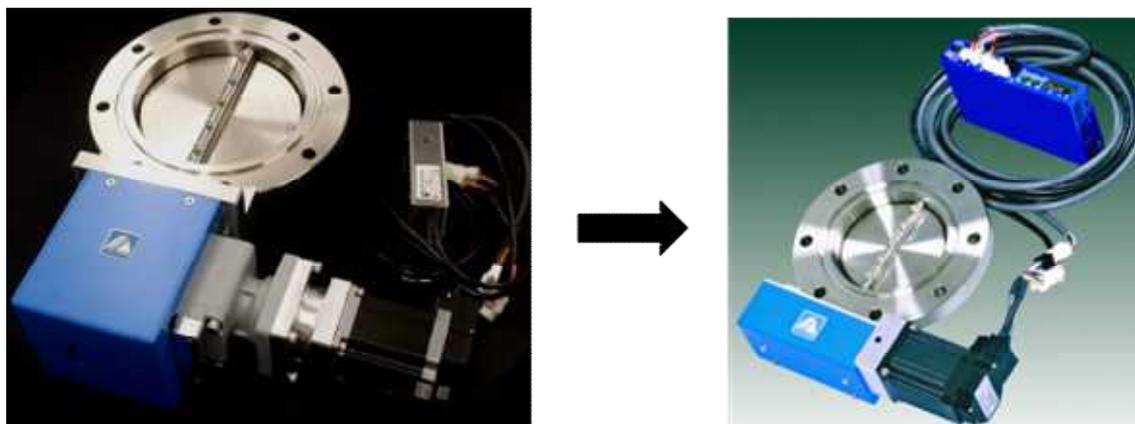


図 35 電動式バタフライバルブの開発
(出典：フジテクノロジー カタログ)

2. 真空計について

前述したように、本自動制御システムは真空計からの値を基にバタフライバルブのモーターを制御する方式である。しかし、今回採用するフルレンジゲージは、ガスの影響を受けやすく、正確な値を測定できるかに不安が残る。そこで、特に Ar ガス導入時の領域で、精度良い真空度測定が可能なキャパシタンスゲージも取り付けることが出来るように、I-3 システムレイアウトの最適化時に設計をおこなった。

3. 真空度と薄膜堆積機構の相関について

前述の成膜時ガス圧・及びバルブ開閉度の制御により、 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ Pa 真空度でのイオンビームスパッタが可能となる。一般に低真空下では、スパッタ粒子の平均自由行程が短い為、薄膜の堆積が等方的となり、カバレッジの良い成膜が可能である。また、高真空下は、平均自由行程が長くなり、指向性の良い成膜が可能である。ここでは、既存の設備を用いて、真空度と薄膜堆積過程の相関に関して、実験的に調べた。

真空度真空度が高い場合、指向性の良い異方性スパッタ、また、真空度の低下と共に、スパッタ堆積過程が等方向的になり、所望の薄膜堆積が可能になることを確認した。

4. 精密駆動型コンダクタンス制御バルブの開発

本項目に関しても既に前年度までに確認した内容であるが、完全に立ち上がったシステムにおいて、もう一度、コンダクタンスバルブを制御して、 $10^0\text{Pa} \sim 10^2\text{Pa}$ の範囲で成膜時の真空度を一定に保ち、安定したイオンビーム形成が可能となることを確認した。

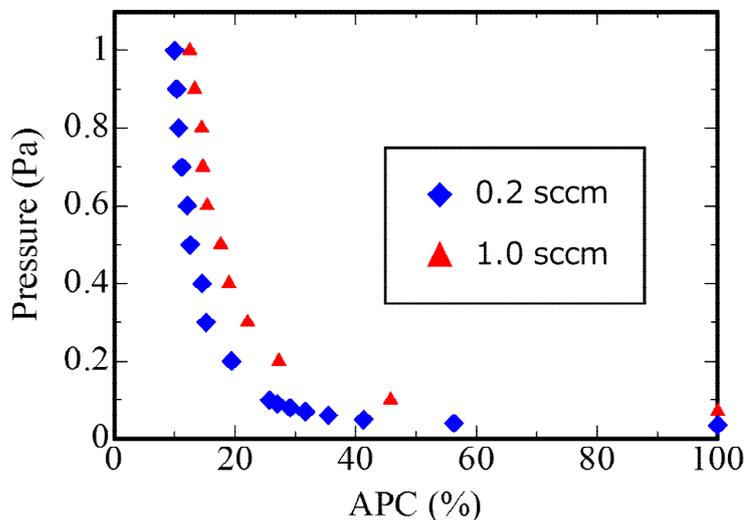


図36 コンダクタンスバルブ制御によるプロセス圧力の制御

5. 真空度と成膜過程の相関関係

本内容に関しては、特段の目標を定めていないが、本装置を販売促進するうえで、イオンビームスパッタの特徴である幅広い圧力領域での成膜実施例をデモンストレーションすることは、極めて重要である。そこで、当該装置を用いて、高真空領域(10^{-2}Pa)でのスパッタ、及び低真空(1Pa)でのスパッタを実施した。

試料は、ネガ型の電子線レジストをドット形状にパターンニングしたもので、このドットに2つの条件でCuを10minイオンビームスパッタすることで、薄膜堆積過程を調べた。図に、従来装置を用いた場合、ミニマルを用いた場合の実験結果を示す。どちらの場合においても、高真空では、指向性のよいスパッタのため、側壁にはスパッタされておらず、一方で、低真空では、当方的な粒子のスパッタのため、カバレッジの良いスパッタが確認できる。10 min 間で、この程度の側壁への堆積が得られることは、特筆すべき事項であり、今後、三次元半導体の作製に欠かすことのできない有望な技術になりえると期待される。

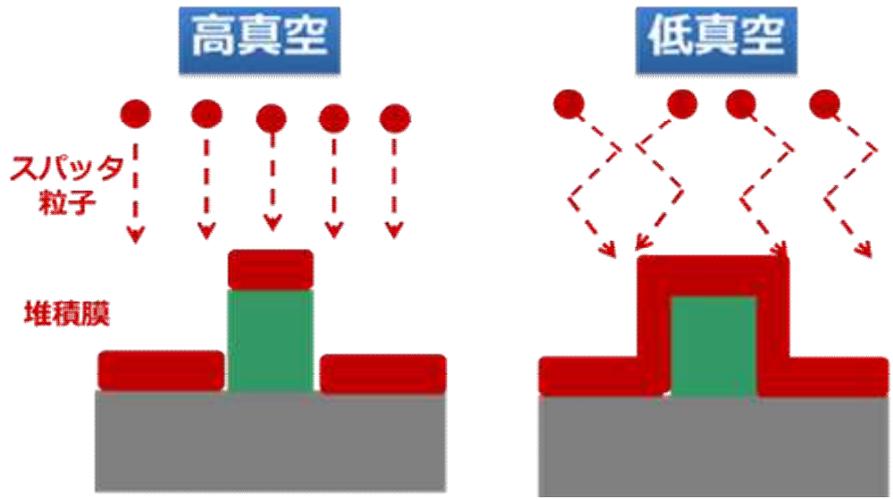


図37 等方性スパッタと異方性スパッタ

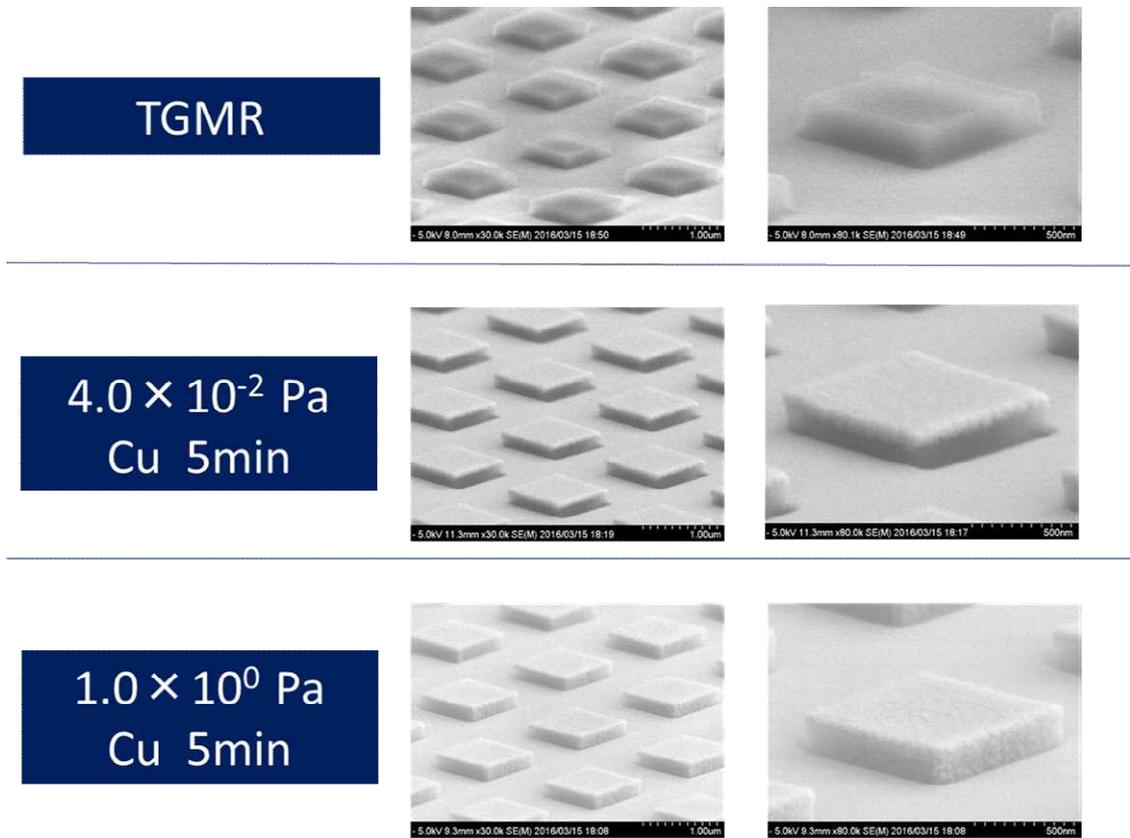


図38 圧力制御での薄膜推積過程 (ミニマルファブ装置で作製した場合)

III-3 可動式シャッター機構の開発

III-3-1 目標

III-1 で開発するターゲット回転機構周辺に電動駆動するアルミ製の制御板を設け、ターゲット-シャッター間の隙間を 1mm 以下まで低減することで、特定のターゲットを成膜している際、他のターゲットの表面にスパッタ粒子が蒸着される回り込み問題を防止する機構を開発する。

III-3-2 実施内容

1. スパッタ粒子の回り込み問題とその防止策

6面体のターゲットホルダーを使用することで、同一チャンバー内にて多層膜の形成が可能になる。しかし、通常のイオンビームスパッタ装置と同様、スパッタされた粒子が、他のターゲット表面を汚染する回り込み効果が生じるため、本現象を上手く回避しなければ、品質の良い多層膜が形成されない。本研究開発項目はイオンビームスパッタ装置での重要な課題である。

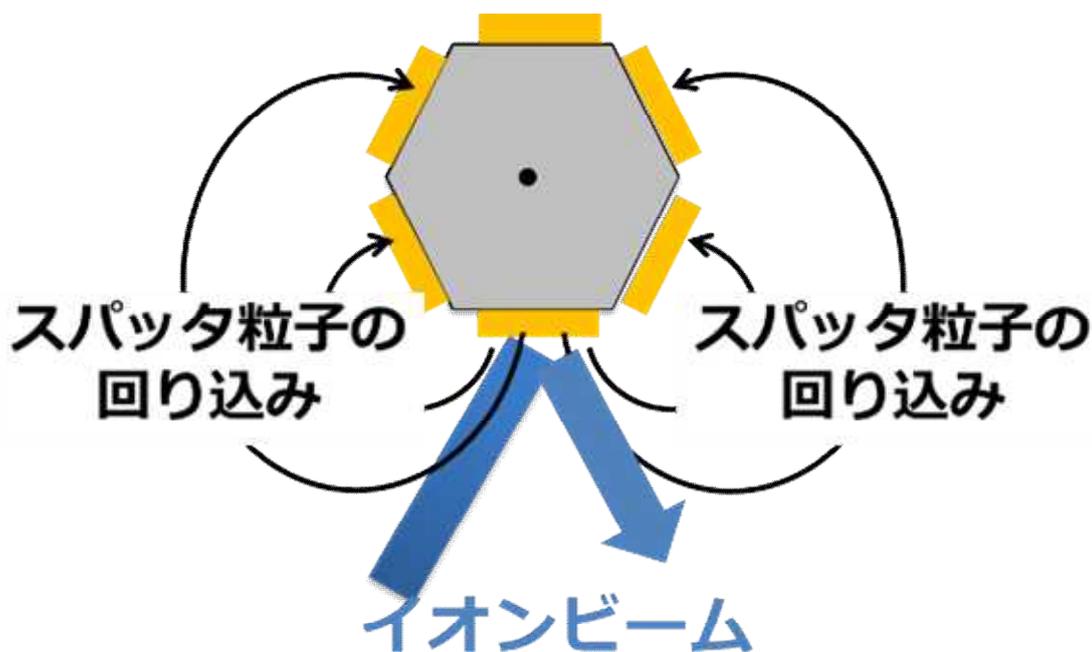


図39 スパッタ粒子の回り込み問題

そこで、本課題を解決するために、図に示すような電動駆動する可動式アルミ製シャッターの検討を行った。装置全体のレイアウトやミニマルファブの省スペース化が重要であるが、可動式シャッターを設置するには、シャッター駆動のための空間をチャンバー内に確保することが必要である。本機構を取り込んだ方法でも、図面レベルで対応が可能であることが確認できたが、余分な真空内スペースができてしまい、真空度の低下の可能性も問題と考えられるや、駆動系制御のための大気側スペースの確保や連続運転時のリスク要因など、様々な課題が懸念され、他の方法による回り込み防止策も検討すべきということになった。

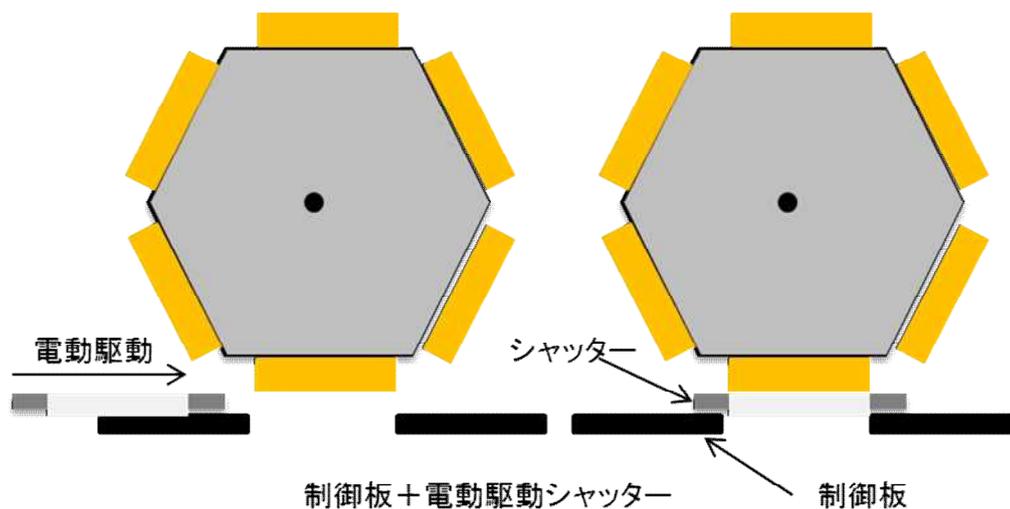


図40 制御板と電動駆動シャッター

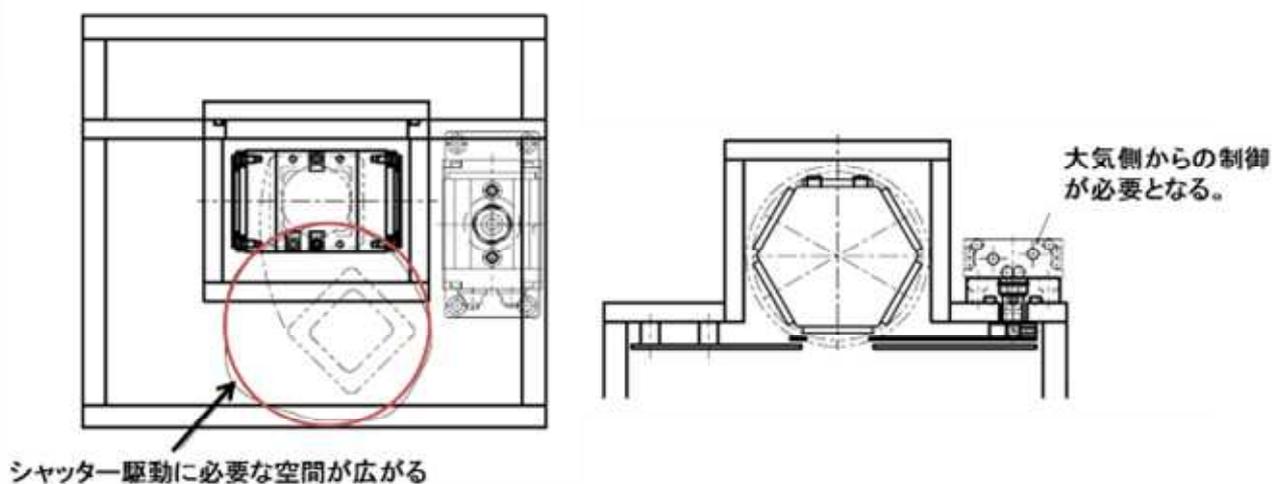


図41 制御板と電動駆動シャッターの設計

そこで新たに、ターゲット-シャッター間の隙間を 1mm 以下まで低減し、且つ無駄なスペースを最小限に抑えるための代替案として、図に示すような、アルミ板で構成される円筒上の可動式回り込み防止板を考案した。これによりアルミの駆動式と同等の隙間になり、回り込み防止効果が期待され、更にスペース的にも殆ど無駄の無い有効な手法であると考えられ、推進委員会などでも議論し、円筒型の回り込み防止機構が、最終目標であるミニマルファブを実現するのに最適な手法であると決定し、試作することにした。

可動式回り込み防止板

回転して、開口部を選択することでエロージョンを防止

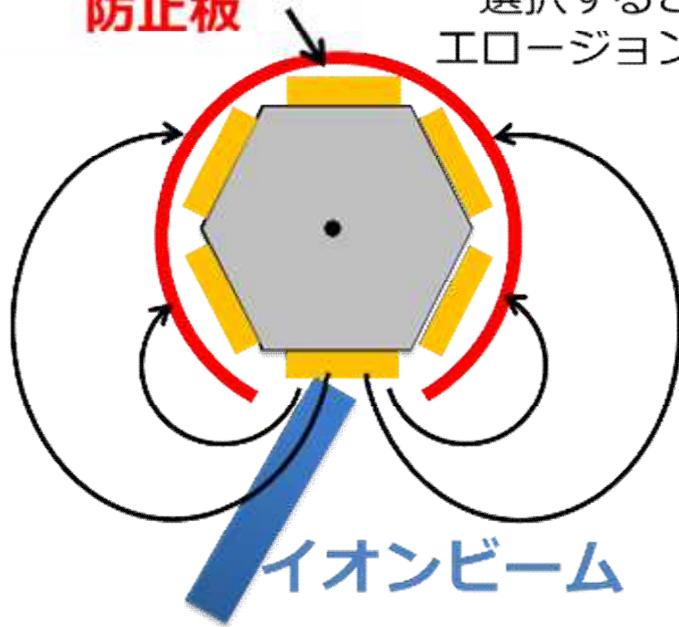


図4 2 回り込み防止板による回り込み防止

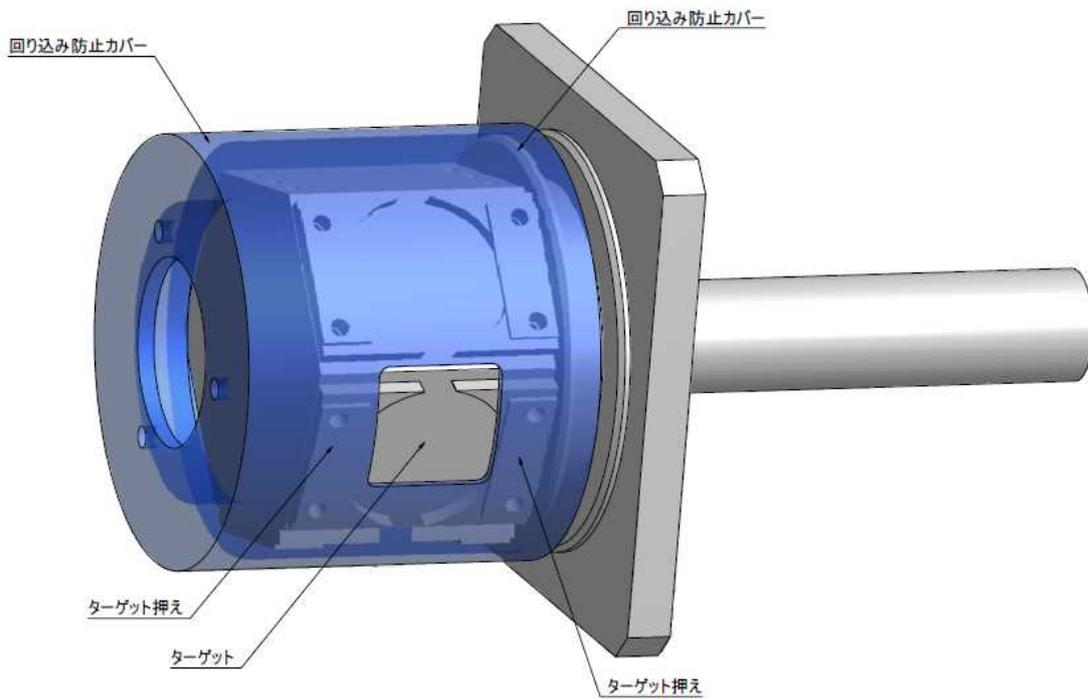


図4 3 回り込み防止板を使用した6面ターゲット

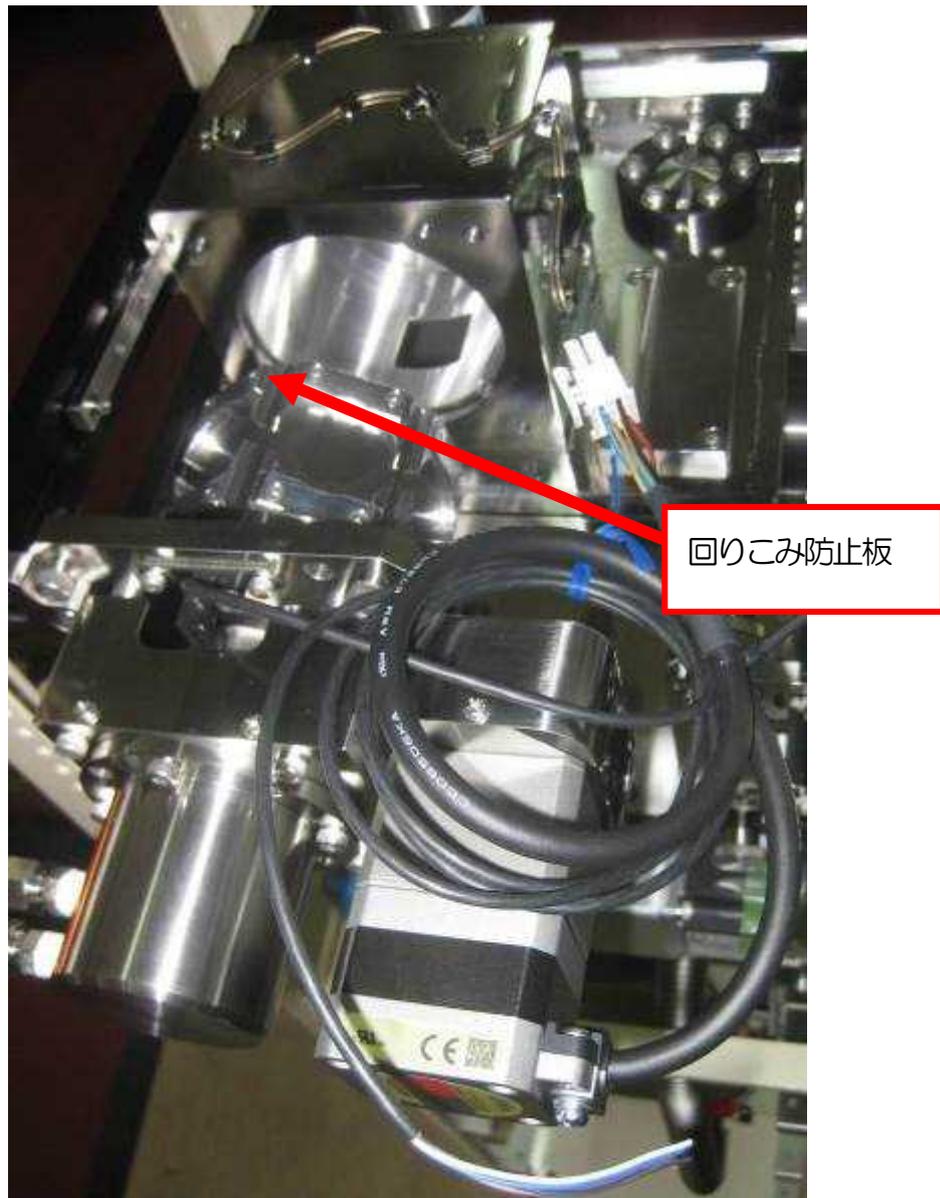


図4 4 回り込み防止板をつかった試作品

2. 回り込み防止版の性能確認

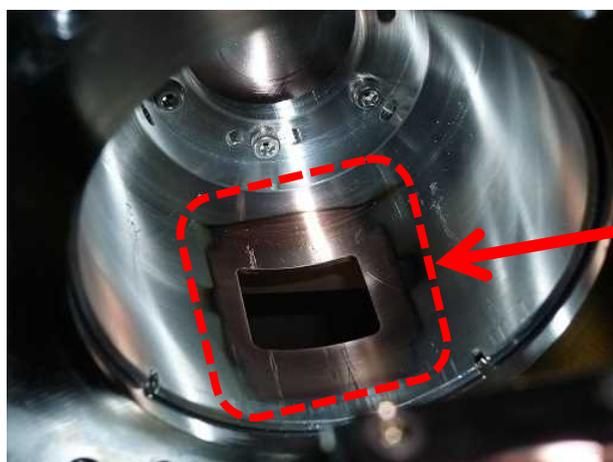
回り込み防止版によって、スパッタ粒子の回り込み現象を防止し、ターゲットにコンタミネーションなどが生じないことを確認した。

すでに円筒型の防止版を考案し、設計した。本年度は当該防止版を試作し、先に述べた回転型ターゲット取り付け機構と組み合わせて、ミニマル基本体に組み込んだ。この組み合わせでは、図に示すように、ターゲットが回転している間においても、遮蔽板とターゲット部との隙間が 1mm 以下になるようにことを確認しており、目標値を実現できているのが確認できる。



図4 5 回り込み防止版による、1 mm 以下の隙間

次に、隙間が 1mm 以下の際に、実際に回り込みが防止されているかを確認した。テスト用のガラス基板を他のターゲット部分に取り付けて 100 分以上のスパッタを実施した所、テスト用のガラス基板には目視にて、変色がないことを確認した。また、回り込み防止板内部を見ると、図の写真の様に、再付着が生じる領域は、30 mm²以下の一部の領域に限定されており、他のターゲットへの回り込みが目視では確認できないことがわかった。



限定された汚染
領域
(< 30 mm)

図4 6 100 分以上のスパッタを実施した後の防止板内側

Ⅲ-4 イオンビーム回転・駆動機構の開発

Ⅲ-4-1 目標

イオンビームをマウントするステージに駆動・回転機構を設け、イオンビーム-ターゲット間の距離が±2.5cm 変化（位置精度 10 ミクロン）し、ビーム方向が±15 度（角度精度 1 度）回転可能なイオンビーム設置機構をターゲット-イオンビーム間の距離調整による成膜レートの制御や損傷を最小限に抑えた成膜を実現する。

Ⅲ-4-2 実施内容

1. イオンビーム回転・駆動機構の設計

イオンビームは前項にあったように、ビーム源からの距離や加速電圧、ビーム電流などによって収束性が変わる為、更にはターゲットの材質などによって、ビームの最適な収束条件が変化する。更には、スパッタによるターゲットの消耗などにより、局所的にターゲットが消耗するなどの問題が生じる。従って、常に最適な条件でイオンビームスパッタできるように、ビーム照射位置やビーム-ターゲット間の間隔などが調整できる機構を設けるのが、装置性能を向上させるために有効である。そこで、イオンビームが回転・移動する機構を設けることにした。

まずは、イオンビームの回転に関して設計をおこなったところ、ビームが連続的に回転するために、それなりの空間を確保する必要があり、周辺装置との接触しないように設計するには、チャンバーサイズをそれなりに大きくする必要性が出てきた。一方で、Ⅲ-1 で設計したターゲットホルダーは、回転角度を自在に調整できるため、ターゲット上のビーム照射位置を制御可能であることを利用し、また、ビーム源の直線駆動機構と組み合わせることで、目的とするエロージョン防止のイオンビーム照射、または、成膜レート制御のためのビームターゲット間距離制御によっても、イオンビーム照射が可能になると考えられるため、図面レベルでの設計を行った。

その結果、イオンビームの駆動範囲をターゲット-イオンソース間 60mm を基準としマイナス方向に 20mm プラス方向に 20mm の調整が可能にし、更に、ターゲットホルダーを回転させ、且つ、前述の回り込み防止用の円筒板にも、回転機構を設け、開口部を、ターゲットに合わせて調整することで、より制御性の高いビーム照射位置調整機構を設けることが可能であることが分かった。本手法は、前述のビーム自体を回転させる手法と比べて、格段に省スペース化が可能のため、推進委員会などで議論した結果、ターゲット回転+イオン銃直線駆動機構を採用することにした。また、それに伴い、より精度の高いターゲット回転機構、及び防止板回転機構を設けることにした。

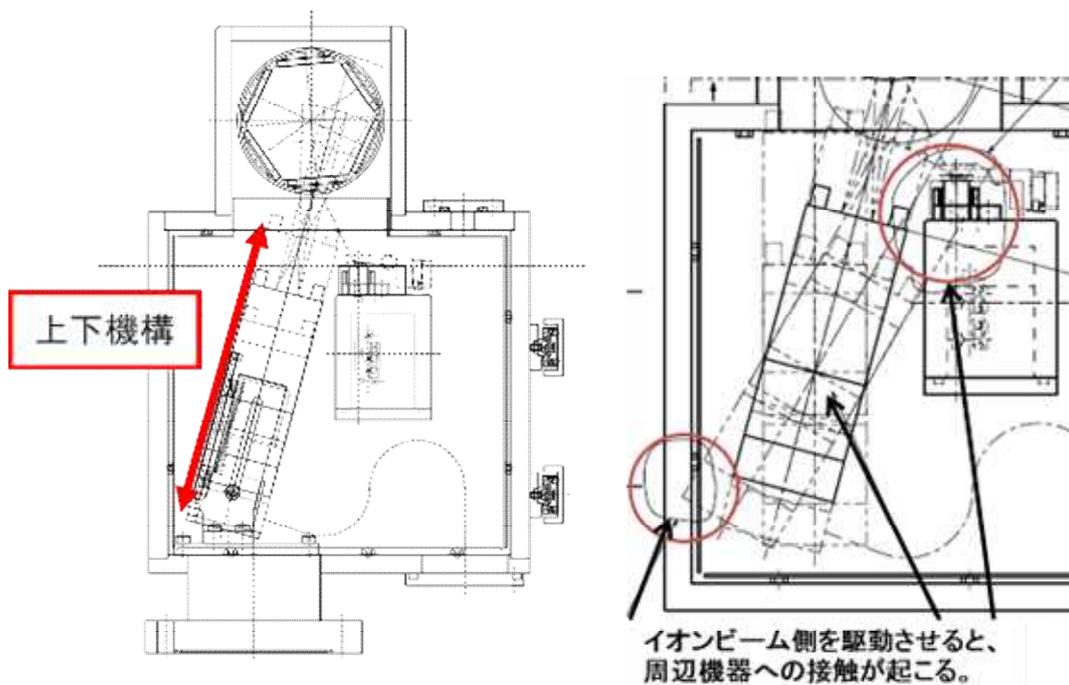


図4-7 イオンビーム駆動機構・回転機構の設計

2. 試作品の性能確認

前述の方針に基づき、機器を設計し、最終的に、図に示すようなイオンビーム取り付け機構の上下調整機構を、チャンバー内部に設けた。

イオンビームの取り付け部に、 $\pm 2.5\text{cm}$ 距離線形移動可能なステージを設置し、イオン銃とターゲット間の距離を調整できるように設定した。これにより、成膜レートを調整できると期待される。実際に、イオン銃の距離が遠い場合と、近い場合において、スパッタを行ったところ、成膜レートに2倍以上の差があり、本機構は十分に機能していると考えられる。より詳細な距離とスパッタレートとの相関は、次年度に実施する。更に、もう一つの目的であったイオンビーム照射位置調整によるターゲットのエロージョン防止に関しては、ターゲットホルダー側を任意の位置に電動回転させることによってビーム照射位置の調整を行い、エロージョンを回避できることを確認した。

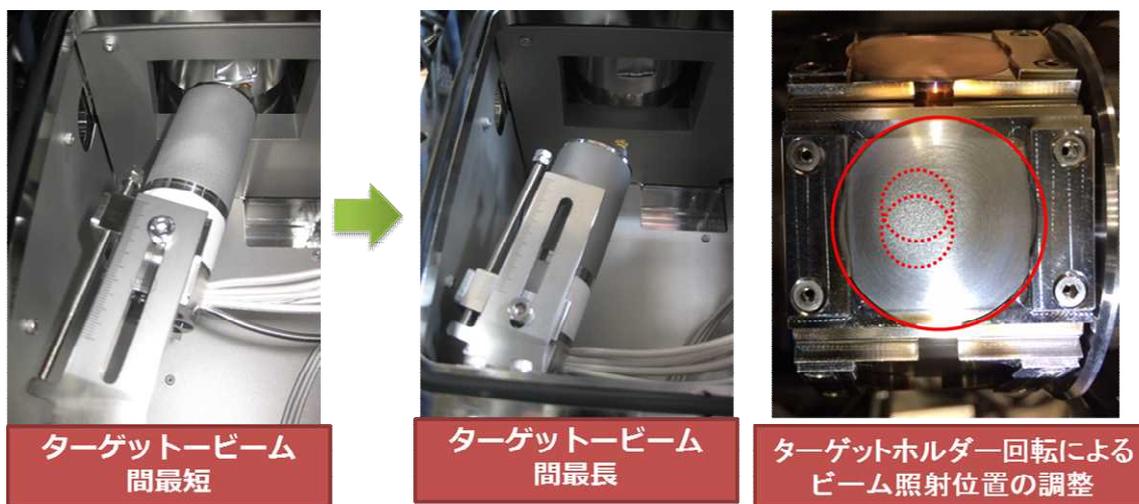


図4-8 イオンビーム回転・駆動機構の最終性能

Ⅲ-5 基板回転機構の開発

Ⅲ-5-1 目標

ミニマル多層薄膜形成イオンビームスパッタ装置内で利用可能な 5rpm 以上の基板回転機構を開発する。ただし、基板ホルダーに冷却機構は備わっていないものとする。

Ⅲ-5-2 実施内容

1. 基板回転機構の開発

H27 年度の新たな課題として、側壁への薄膜堆積の均一化を実現するために、基板回転機構が必要となった。そこで、新たな目標値としてミニマル多層薄膜形成イオンビームスパッタ装置内で利用可能な 5rpm 以上の基板回転機構を開発した。ここで、基板回転機構のステージは、自動搬送に対応する必要があるため、回転できるだけでなく、位置決め精度にも要求があった。これらは原理的には対応可能であるが、前述したように、装置のスペースが限られているため、様々な制約が生じたが、様々な試行錯誤により、現状のチャンバサイズ・形状を変更する事なく、排気、搬送、イオンビーム源、その他チャンバ内部品とも干渉が無い基盤回転機構の制作に成功した。ここで、コストアップになると将来価格的に不利になるので出来るだけ市販に出ている小型の機器選定を行う事により低コストしつつ小型化に成功した点は特筆すべき事項である。

2. 基板回転機構を用いた成膜テスト

上記にて開発した基板回転機構を用いて、ハーフインチ基板に成膜テストを行った。試料は5分間イオンビームスパッタにて成膜したCu 薄膜で、膜厚は約 50nm である。試料、全体の膜厚分布を光学式膜厚計を用いて評価したところ、ほぼ全域で、50 nm 程度の膜厚を得ることができた。ここで、±1nm 程度の分布が観測されているが、これは、計測器の誤差と考えており、実際は、ほぼ均一にきれいなCu 薄膜が形成されていると考えられる。

最終章 全体総括

最終的な成果

I-1 超小型イオンビーム銃の開発

H27 年度までに、当該装置の最適化を完了させ、ビーム径：1cm、 加速電圧：0.3 ～ 1kV、 最大ビーム電流：10mA を満たす超小型ミニマルイオン銃の開発を完了した。

I-2 超小型ガス貯蔵容器の開発

H27 年度までに、九州大学にて前年度に検討した小型容器を用いてスパッタ成膜された薄膜の膜質を評価し、性能、コスト、メンテナンスなどあらゆる面からの要求を満たす超小型ガス貯蔵容器の開発を完了した。

I-3 システムレイアウトの最適化

H27 年度までに、誠南工業にてイオンビーム電源も含めた全レイアウトを最適化し、ミニマルファブ規格（幅 0.3m、奥行き 0.4m、高さ 1.44m）に準ずるシステムの省スペース化を実現した。

II-1 高精度・高速ガス流量制御システムの開発

H27 年度までに、当該装置を用いて $10^0 \sim 10^{-2}$ Pa の広範囲な真空度が瞬時(30 秒以内)に安定することを確認し、高精度・高速ガス流量制御システムの開発を完了した。

II-2 高精度・高速安定化電源の開発

H27 年度までに、誠南工業にて開発した電源を実際にミニマル基本体に組み込み、全ての装置をミニマル規格に組み込んだミニマルイオンビームスパッタ装置を完成させた。

II-3 自動ロードロック・試料搬送機構の開発

H27 年度までに、ミニマルファブ規格の試料シャトル形状に合わせ、容積を最小限に抑えた超小型ロードロック室から成膜室に全自動かつ短時間で試料を搬送する機構の開発を完了した。

II-4 冷却機構付き基板ホルダーの開発

H27 年度までに、同ホルダーを高度化し、成膜時の基板温度の上昇を 60 度以下に抑制、更に成膜直後 1 分以内で基板温度を 40 度以下とする基板冷却機構の開発を完了した。

III-1 回転型ターゲット取り付け機構の開発

H27 年度までに、全体としての動作確認を行い、九州大学・九酸にて最終仕様と TSV 用のバリア膜・シード層に必要な材料の取付性能の確認を行った。

III-2 精密駆動型コンダクタンス制御バルブの開発

H27 年度までに、九州大学が主体となり、当該装置での所望のプロセスによる再現性を確認し、自動で薄膜堆積過程の制御が可能な高性能ミニマルイオンビームスパッタ装置を完成させた。

III-3 可動式シャッター機構の開発

H27 年度までに得られた知見をもとに、最適な回り込み防止機構を採用したミニマルファブイオンビームスパッタ装置を完成させた。

III-4 イオンビーム回転・駆動機構の開発

H27 年度までに得られた知見をもとに再検討を行い、コスト、性能、制御性などあらゆる面を考慮して最善な制御機構を有するミニマルファブイオンビームスパッタ装置を完成させた。

III-5 基板回転機構の開発

H27 年度の新たな課題として、側壁への成膜を均一化するための基板回転機構が必要となった。そこで、新たな目標値としてミニマル多層薄膜形成イオンビームスパッタ装置内で利用可能な 5rpm 以上の基板回転機構を開発した。ただし、基板ホルダーに冷却機構は備わっていない。