

フォーカス 26 <第 2 4 回> : 成果事例クローズアップ (シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援)  
**磁場分布可変型及び回転型対向スパッタによる薄膜作製**

神港精機 (株) 小松永治  
 山口大学大学院理工学研究科 諸橋信一



上左：神港精機 (株) 小松永治  
 上右：山口大学大学院理工学研究科 諸橋信一

**1. はじめに**

神港精機株式会社は、ハイテク社会を支える機器装置メーカーとして安定した品質、高度な機能、環境への配慮など多様化するユーザーニーズに応えられる最先端の機器装置の開発、特に真空機器装置ではプラズマ技術、薄膜形成技術、熱処理技術を核とした製品開発を行ってきた。常にものづくりへの情熱とこだわりを大切に、革新的な「ものづくり」に挑戦し、特に、軽量化、コスト低減化、フレキシブル化などの次世代の要求に対応出来る低ダメージのスパッタ技術を求めてきた。

山口大学大学院理工学研究科諸橋研究室では、民間会社研究所在職の時代も含めて一貫して、スパッタによる超伝導トンネル接合の作製及びそのための薄膜工学関連の研究開発に従事してきた。我国で初めて、金属系超伝導体 Nb を用いた Nb/AlO<sub>x</sub>-Al/Nb 超伝導トンネル接合の作製に成功した。この実績を基に、超伝導トンネル接合作製のみならず、低ダメージを必要とする多層薄膜構造を有する電子デバイス作製の実現を図るために、低ダメージ・高スループット・高プラズマ密度・多元・省エネ・コンパクトを特徴とする、「回転型多元対向スパッタ」、「磁場分布可変型対向スパッタ」を考案した。

\* 問い合わせ：  
 シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援  
 山口大学 産学公連携・イノベーション推進機構  
 〒 755-8611  
 山口県宇部市常盤台 2-16-1  
 電話：0836-85-9950  
 E-mail: nanotech@yamaguchi-u.ac.jp

神港精機株式会社と山口大学諸橋研究室では、これらの新機能をもつ対向スパッタを用いて薄膜作製を行い、装置性能の実証を進めている。本報では、このうち、「磁場分布可変型対向スパッタ」の装置特徴と、その実施例として Nb 超伝導薄膜作製について述べる。

**2. 研究背景**

薄膜作製方式の中でスパッタは、厚さが 1nm 程度のトンネルバリアを電子などのトンネル効果で動作する強磁性トンネル接合や超伝導トンネル接合、表示ディスプレイ、太陽電池など、多層薄膜構造をもつ電子デバイス等に広範囲に使用されている [1]。近年、クリーンエネルギーとしての太陽電池及び薄型化の展開を図っている表示ディスプレイ素子等は、硬くて重いガラス基板上から、軽量化、コスト低減化、フレキシブル化などの要求により、有機フィルム基板上に多層構造の電子素子を作製することが求められてきている [2]。

これらトンネル効果を利用する素子及び、フィルムベースエレクトロニクス・ディスプレイ用途のような多層薄膜構造をもつ素子作製のためには、薄膜作製中に熱に弱い基板そのものにダメージを与えないことと、各層の界面にもダメージを与えないクリアな界面を形成できる、いわゆる低温スパッタ技術が求められている [3][4]。

従来型対向スパッタは、そのカソード構造から基板表面には  $\gamma$  電子が入射しにくく、低ダメージ性を特徴とする [5]。しかし、広く用いられているマグネトロンスパッタと比較して、a) コンパクト性、b) スループット性、を高める検討が必要であった。

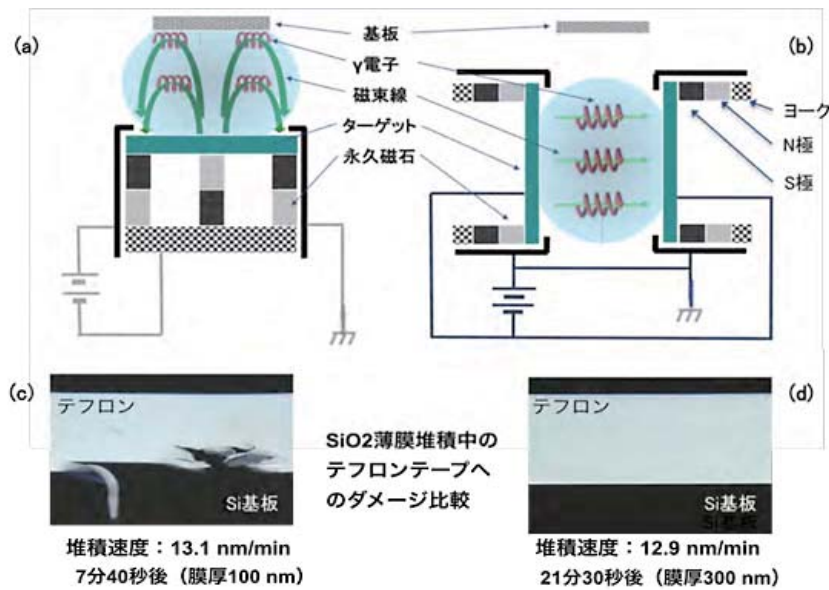


図1 マグネトロンスパッタと従来型対向スパッタのイメージ図とダメージ比較  
 (a) マグネトロンスパッタのイメージ, (b) 従来型対向スパッタのイメージ  
 (c) マグネトロンスパッタによるSiO<sub>2</sub> 薄膜堆積ダメージ, (d) 従来型対向スパッタによるSiO<sub>2</sub> 薄膜堆積

### 3. 対向スパッタの高性能・高機能化の検討

#### 3.1 マグネトロンスパッタと従来型対向スパッタ比較

マグネトロンスパッタと従来型対向スパッタを用いて、シリコン (Si) 基板にテフロンテープを巻き付けて、その上にSiO<sub>2</sub> 薄膜をほぼ同じ堆積速度 (~ 13.0nm/min) で堆積したときの、テフロンテープへのダメージの違いを図1に示す [6]。マグネトロンスパッタでは、スパッタ開始から7分40秒後にはテフロンテープにダメージがみられた (図1 (c) 参照)。これに対して、従来型対向スパッタでは、21分30秒後でもテフロンテープは堆積前と同じ形状を保持していた (図1 (d) 参照)。図1 (a), (b) の装置イメージ図が示すように、ターゲットと基板が向き合う通常のマグネトロンスパッタでは、その構造上、イオン衝撃でターゲット表面から放出された電子 ( $\gamma$  電子) 及び反跳アルゴンイオンが基板にも入射する確率が高い。これらの高いエネルギーをもつ粒子が基板表面に入射することで、堆積する薄膜構造にダメージを与えてしまう。これに対して、図1 (b) の装置イメージで示された従来型対向スパッタでは、正対するターゲット間で反対磁極になるように磁石がターゲット直下に置かれているために、正対するターゲット間に  $\gamma$  電子及びそれによって起こされるプラズマを閉じこめておくことができるために、基板表面には  $\gamma$  電子が入射しにくく、堆積する薄膜にダメージを与えにくい [5]。図1 (c), (d) に示すテフロンテープへのダメージの違いは、これらカソード構造の違いを反映していると考えられる。

#### 3.2 回転型多元対向スパッタ

単層薄膜作製用1元スパッタなら、従来型1元対向スパッタのカソード容積の大きさはあまり問題にはならないが、多層薄膜を連続成膜する多元スパッタでは、この構造で多対並列に並ぶ配置を取るために、カソード全体の容積増大に伴うチャンバーと真空ポンプの大型化で、装置のインシヤルコストとランニングコストの両面にわたって、省エネ・コンパクト性という観点から不利になる。対向スパッタの低ダメージ性という特徴を持ちながらコンパクト性を実現するために考案したのが、回転型対向スパッタである [6][7]。4元スパッタを想定した場合のイメージ図を図2に示す。それぞれのカソードボックス内の磁石は閉じた磁気回路を形成し、正対するカソードボックスの対向面の磁石は反対磁極になっている。正対するカソードボックスを回転することでコンパクトな多元スパッタが可能となる。

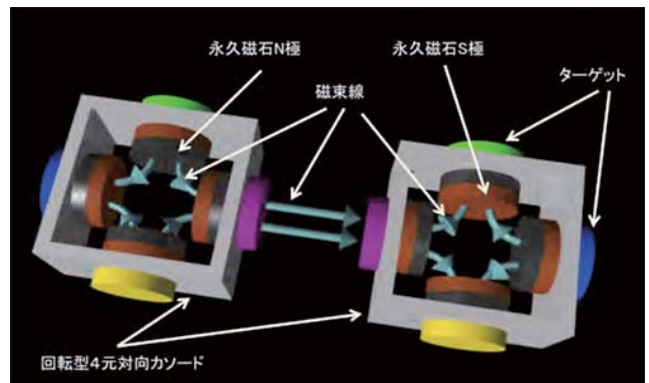


図2 回転型対向スパッタのカソードイメージ

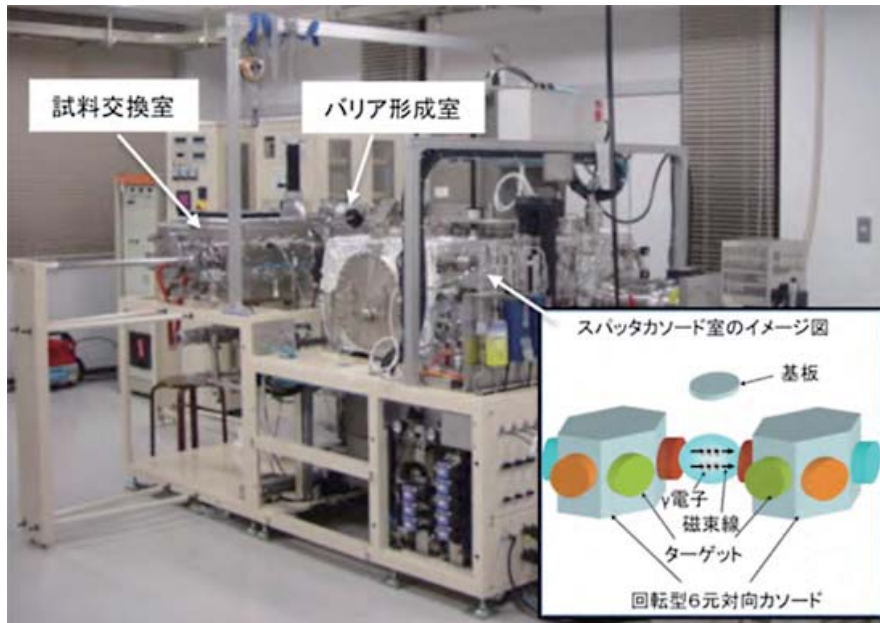


図3 平成17, 18年度経済産業省地域新生コンソーシアム「有機EL電極・保護膜形成用新型低温スパッタ装置の開発 (研究代表者: 山口大学 諸橋信一)」で製作した回転型6元対向スパッタ装置

図3に平成17,18年度経済産業省地域新生コンソーシアム採択プロジェクトで製作した回転型6元対向スパッタを示す[8]. 内挿図は設置した6元カソードのイメージ図を示す. 6元全体のカソード容積が, 従来型対向スパッタで6元スパッタを構成したときの約1/3以下と見積もられ, 省エネ・コンパクト性という観点から有利になる.

### 3.3 磁場分布可変型対向スパッタ

低ダメージ性を満足させながら, 高速堆積化によるスループット性の向上を実現するために考案したのが, 図4に示す磁場分布可変型対向スパッタである[9][10]. 真空を破らずに磁場発生機構で対向ターゲット間の磁場分

布を変化させて, 1つのカソードで磁場分布の異なった状態でスパッタできる, すなわちスパッタ方式の自由度を増加させることができる, という特徴をもつ. 1つのカソードで1つのスパッタ方式という従来概念を打ち破る考えである. 図4ではスパッタ方式を変化させる磁場発生機構として, 可動磁石を用いた場合のカソード断面を示しているが, このほかに可動ヨーク[10], 或いは電磁石でも可能である.

外側の円筒形状の磁石は通常の対向スパッタでも備わっている磁石である. 対向する円筒磁石は反対磁極になっており, 図では左側ターゲット直下に接している円筒磁石の極性がN磁極で, 右側ターゲット直下に接している円筒磁石の極性がS磁極で図示してある. 真ん中の

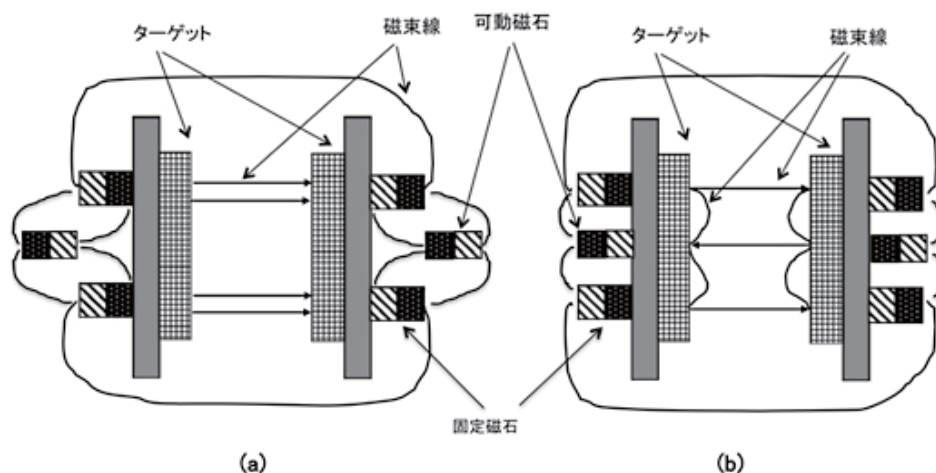


図4 磁場分布可変型対向スパッタの対向ターゲット間磁場分布イメージ図  
(a) 可動磁石がターゲットから最も遠い位置にあるときの磁場分布イメージ  
(b) 可動磁石がターゲットに最も近い位置にあるときの磁場分布イメージ

棒磁石が可動磁石で、同じターゲット直下では円筒磁石と可動棒磁石は反対磁極になっている。この磁石配置により、(1) 対向する円筒磁石による対向ターゲット間での磁場分布、(2) 対向する可動棒磁石による円筒磁石とは逆向きの、対向ターゲット間での磁場分布、(3) それぞれの片面のターゲット直下の円筒磁石と可動棒磁石によるマグネトロンスパッタのようなN磁極からS磁極にむかう磁場分布、を形成することになる。可動磁石の位置によって、真空を破らずに対向するターゲット間の(1)、(2)、(3)の磁場分布を変化させることができる。図4(a)では(1)の磁場分布が強い場合を、図4(b)では(1)の磁場分布に(2)と(3)の磁場分布が強く上乘された場合、の磁場分布を模式的に示している。可動磁石の位置で上乘せる(2)、(3)の磁場分布を連続的に変化・制御することができる。

ターゲット(直径90mm Φ)に高融点金属ニオブ(純度3N)を用いて、Ar圧力0.7Pa一定、RF印加電力1kW一定、ターゲット-基板間距離10cm一定で、ニオブ薄膜の堆積速度及び基板温度の可動磁石距離依存性を調べた。シリコン基板上にカプトンテープを貼り付け、その下にサーモラベルヒーターを貼り付け、膜厚と基板温度

を同時測定した。堆積速度は膜厚/スパッタ時間(2分間一定)で算出した。基板温度は基板水冷無の状態での温度である。可動磁石のターゲット側先端がターゲット裏面に最も接近したときを原点として、可動距離99mmの範囲で可動磁石を移動させた。図5(a)は図4(a)で示した磁場分布状態に対応し、通常に対向スパッタと同じようなプラズマ放電状態が観測された。図5(b)は図4(b)で示した磁束分布状態に対応し、対向する2つのターゲット面直上にマグネトロンスパッタでみられるようなリング状のエロージョンエリアのプラズマ放電状態が観測された。これらは、可動磁石の移動で、磁場分布(1)、(2)、(3)からなる磁場分布が対向ターゲット間で変化することによる。堆積速度は50.3nm/minから11.0nm/minまで約5倍、基板温度は110℃から40℃まで変化した(図6参照)[11][12]。可動距離ゼロのマグネトロンの磁場分布が最も強い位置で堆積速度、基板温度とも最大だった。マグネトロンの磁場分布の影響が小さくなる領域で、堆積速度、基板温度とも小さくなった。対向ターゲット間の磁場分布変化で、プラズマ間の電子密度、Arガスのイオン化密度、スパッタ粒子のエネルギー変化がおき、ニオブ堆積速度とそれに伴う基板温度に変化が生じたと考えられる。

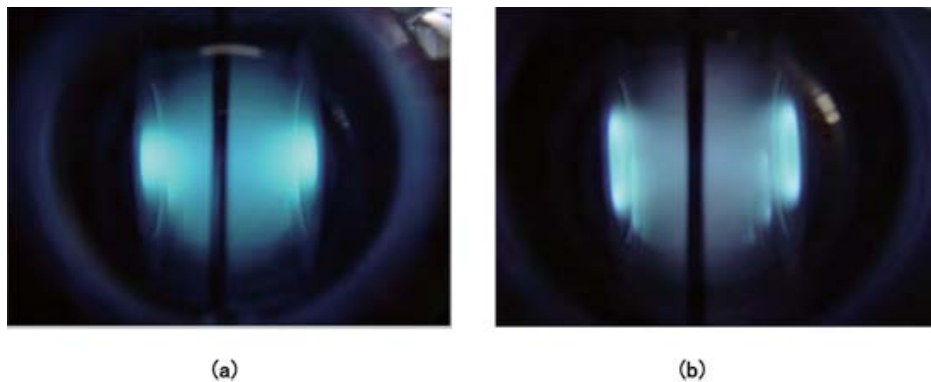


図5 磁場分布可変型対向スパッタでのNb薄膜作製時の放電プラズマ状態  
(a) 可変磁石がターゲットから最も遠い位置にあるとき (b) 可変磁石がターゲットに最も近い位置にあるとき

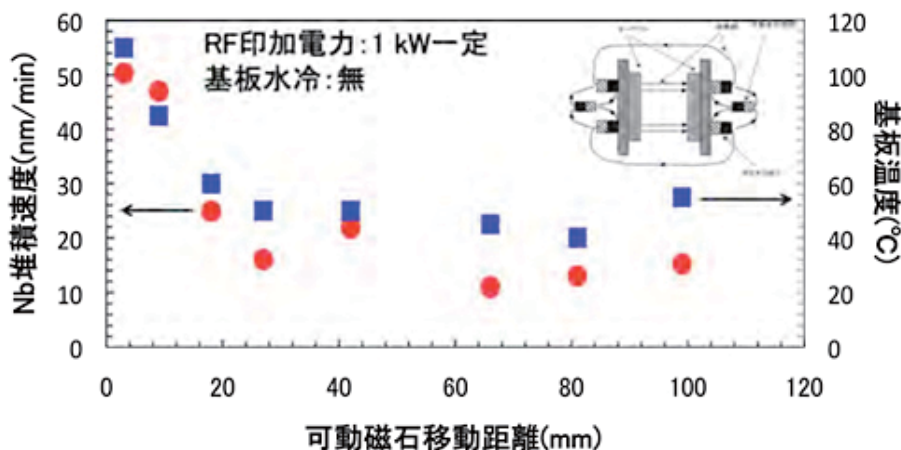


図6 磁場分布可変型対向スパッタによるNb薄膜の堆積速度及び基板温度の可動磁石移動距離依存性

## 4. まとめ

可動磁石機構により対向ターゲット間の磁場分布を変化させてスパッタできる新しい磁場分布可変型対向スパッタ装置を開発した。対向ターゲット間の磁場分布を変えるだけで、高融点金属ニオブ薄膜の堆積速度を約5倍変化させることができた。この対向スパッタは1つのカソードで、1) 大気側で容易に対向ターゲット間磁場分布可変でき、それに対応するプラズマ放電状態の形成、2) 低ダメージ性のプラズマ放電状態と高スループット性のプラズマ放電状態を実現、3) 低ダメージ性のプラズマ放電状態で初期成長層を堆積し、次に高スループット性のプラズマ放電状態で残りの層を堆積する、或いは材料に適した磁場分布で薄膜を堆積する、という新規薄膜作製方法、の高機能・高性能化が期待できる。更には、4) 既に発表している回転型多元対向スパッタと組み合わせることで多層薄膜構造の電子デバイス作製への展開が期待できる。

## 謝辞

本報告の一部は山口大学大学院理工学研究科諸橋研究室において、文部科学省の「ナノテクノロジー・ネットワーク」委託事業の一貫として行われました。関係各位に深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] S. Morohashi and S. Hasuo: J. Appl. Phys., 61, (1987) 4835
- [2] F.Kessler, D. Herrmann and M. Powalla: Thin Solid Films., 480 - 481, (2005) 491
- [3] S. Takasawa, S. Ukishima, N. Tani and S. Ishibashi: ULVAC TECHNICAL JOURNAL, 64, (2006) 18
- [4] S. Morohashi, M. Ikuta, T. Miyoshi, D. Matsumoto, S. Ariyoshi, M. Ukibe, M. Ohkubo and H. Matsuo: IEEE Trans. Applied Superconductivity., 15 (2005) 98
- [5] S. Ono and M. Naoe: Suppl. Trans. JIM., 29 (1988) 57
- [6] JPN Patent, Pat. No. 3936970 (発明者：山口大学 諸橋信一)
- [7] S. Morohashi: Shinku., 113 (2007) 14
- [8] 平成 17,18 年度経済産業省地域新生コンソーシアム「有機 EL 電極・保護膜形成用新型低温スパッタ装置の開発 (研究代表者：山口大学 諸橋信一)」
- [9] PCT/JP2008/058621, PCT/JP2009/058976 の 2 件の国際出願 (発明者：山口大学 諸橋信一)
- [10] S. Morohashi: J. Vac. Soc. Jpn., 128 (2010) 26
- [11] プレス発表：日刊工業新聞 2010 年 (平成 22 年) 11 月 12 日 Business & Technology 面掲載
- [12] S. Morohashi, Y. Matsumoto, K. Tanaka, K. Usui and E. Komatsu: J. Vac. Soc. Jpn., 54 (2011) 掲載予定

(山口大学大学院理工学研究科 諸橋信一)