

第3章

MEMS圧力センサ
製造工程

見本

相馬伸一

圧力センサのダイアフラムを例に挙げて、MEMS (micro electro mechanical systems) デバイスの製造工程を説明する。ここでは、とくにバルク・マイクロマシーニングという技術を取り上げる。薄膜形成、フォトリソグラフィ、ドライ・エッチング、ダイシング(切断)といったMEMSデバイスの製造工程について写真や図を示しながら紹介する。(編集部)

一般に、MEMSとは、半導体の微細加工技術を用いて、機械、電子、光、化学などの多様な機能を集積化したデバイスのことを言います。加工する素材はさまざまですが、代表的なものとしてはSi(シリコン)ウェハが挙げられます。LSIの製造の場合と同じ設備を使用して製造することができます。

MEMSにおける構造体の形成技術としては、表面マイクロマシーニングとバルク・マイクロマシーニングがあります。前者がSi基板などの表面上に積層構造物を形成するのに対して、後者は基板自体を加工して構造物を形成します。

MEMSデバイスが電気製品や自動車などに汎用的に搭載されるようになってから20年程度しか経っていません。その間、自動車のエンジンを制御する圧力センサ、エアバッグ・システムに使用されている加速度センサ、カー・ナビゲーションの方向を制御するジャイロ(角速度)センサなど、身近な製品にMEMSデバイスは応用されてきました。また、家電製品などにも使われつつあります。

さらに、最近では上記のようなセンサだけでなく、光通信部品や化学合成チップ(マイクロリアクタ)、分析チップ(μ -TAS: マイクロ化集積分析システム)など、新しい分野への応用・開発も盛んに行われています。

● 圧力センサの心臓部であるダイアフラム

図1にMEMS技術を応用した圧力センサを示します。圧力センサは、工業計測分野で使用されている発信器に搭載されており、おもに石油プラントや化学プラントの配管内の流量を計測します。

図1のセンサの圧力の検出方式は静電容量式と言います。PH(高圧側)から伝達される圧力とPL(低圧側)

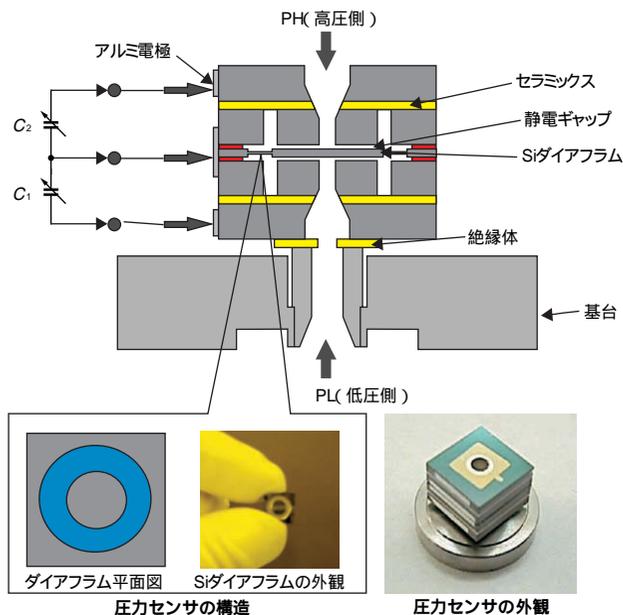


図1 静電容量式圧力センサ

PH(高圧側)から伝達される圧力とPL(低圧側)から伝達される圧力の差を、二つのコンデンサ(C_1 と C_2)の容量差によって検出する。

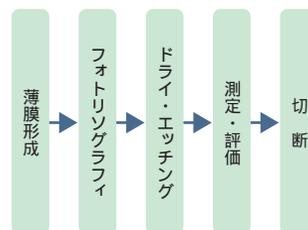


図2 工程フロー

ダイアフラムの製作のフローを示す。

から伝達される圧力の差を、二つのコンデンサ(C_1 と C_2)の容量差によって検出します。この圧力センサの心臓部は可動ダイアフラム(圧力を受けて変形する部分)であり、図2に示すフローで製作されます。

本章では、このダイアフラムを例にとり、基本的なMEMSの製造工程と製造設備について紹介します。写真や図を引用しながらわかりやすく解説していきます。なお、本ダイアフラムは前述のパルク・マイクロマシーニングで形成しています。本章によって、MEMSデバイスの製造工程について少しでもご理解いただければ幸いです。

1. 薄膜形成

Siウェハを加工する際、ほとんどの製品が「薄膜形成」の工程からスタートします。上述のダイアフラムも、最初の工程は薄膜形成です。ここで形成される薄膜は、後工程でドライ・エッチングする際のマスクとして利用されます。

薄膜形成にはさまざまな方法がありますが、ここでは電子ビーム(EB)蒸着によるAl(アルミニウム)膜の成膜と、抵抗加熱型酸化炉による酸化膜の形成を紹介します。

写真1
パッチ式電子ビーム蒸着機

電子ビーム蒸着機はチャンバと制御盤、電源で構成されている。制御盤ではチャンバ内の真空度、温度、プラネタの回転数などを制御したり、蒸着速度や膜厚をプログラムで入力できる。

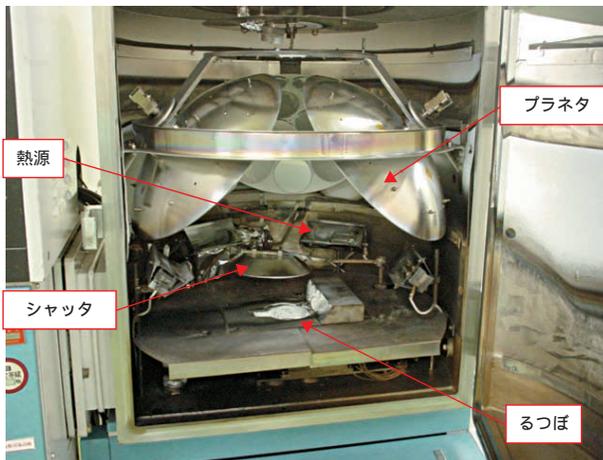
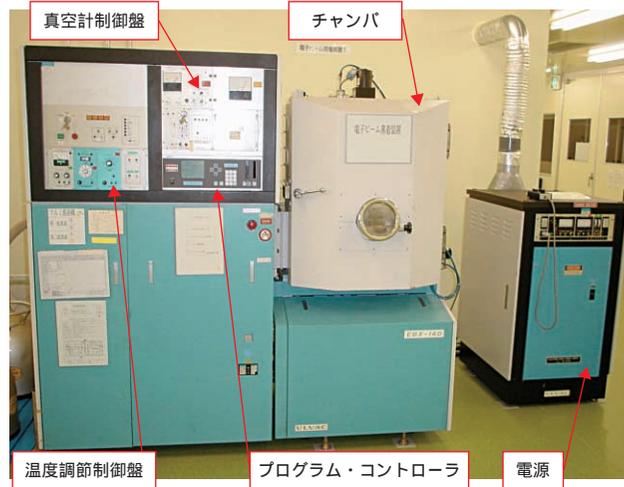


写真2 蒸着機チャンバ内部

電子ビーム蒸着機内は、熱源、蒸着する金属を入れたるつぼを搭載した水冷銅ハース、シャッタ、ウェハを公転させるプラネタで構成されている。

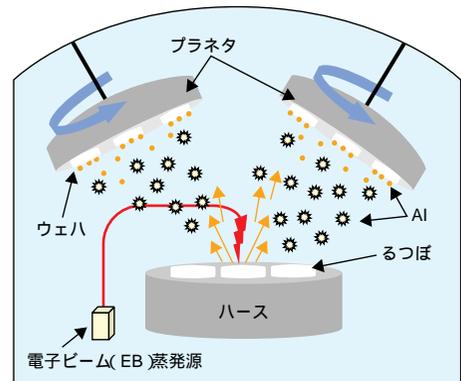


図3 蒸着機の概要図

高温、高真空の状態では、ハースの中のるつぼに入ったAlをEB源(電子銃)からの電子ビームで蒸発させ、プラネタにセットされたSiウェハ上にAlの薄膜が形成される。

● 電子ビームの衝撃を利用して蒸着させる

電子ビーム蒸着装置の外観を写真1に、チャンバ(ウェハを加工する際に真空度を保つための装置)の内部を写真2に示します。

電子ビーム蒸着による成膜の原理は次のとおりです(図3)。まず、水冷銅ハース(蒸着する金属を入れるるつぼが水冷却された受け台)に配置されたるつぼ(材料を溶かしてそれをためておき、結晶を成長させるための容器)に収められた蒸着源であるペレット状の金属(ここではAl)に加速電子エネルギーを集中させます。蒸着源をクラスタ状態(原子が数十個集合した状態)として蒸発させ、Siウェハ上に成膜します。

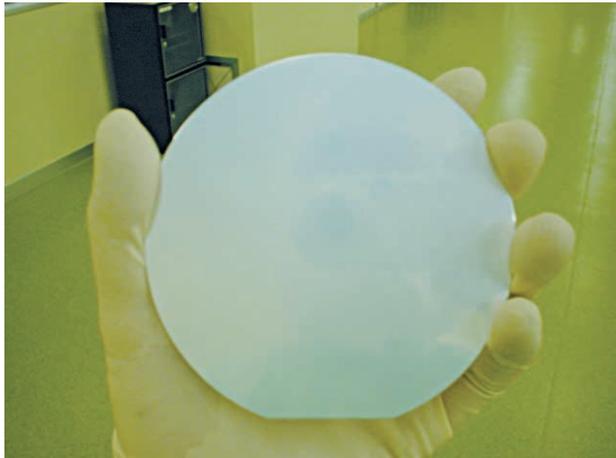


写真3

Al蒸着後のSiウェハ

写真のウェハのサイズは4インチ・Al膜厚は2 μ m程度。



写真4

抵抗加熱型酸化炉

制御盤では温度と時間などのプロファイルをプログラムできる。石英チューブに入れられたSiウェハはこのプログラムどおりに温度や時間が制御され、Si表面が酸化される。

実際の作業としては、Siウェハをプラネタという専用治具にセットしたチャンバを高温(200 程度)、高真空(10^{-3} Pa程度)状態にして蒸着します。高温にするのは、Siウェハに吸着されている水分を除去するためです。高真空にするのは、蒸発源とSiウェハの間のクラスタの移動を妨げないようにするためです。また、プラネタを公転させることにより、Siウェハに均一な厚みで成膜することができます。蒸着したSiウェハは**写真3**の状態になります。

● 熱酸化反応を利用してウェハ上に酸化膜を形成

抵抗加熱型酸化炉の外観を**写真4**に示します。Siウェハ(単結晶ウェハ)基板上に酸化膜(SiO_2)を作製する場合、さまざまな方法が存在します。ここでは熱酸化法(thermal oxidation)で SiO_2 薄膜を形成していますが、熱酸化法の中でも比較的厚い膜を形成できるスチーム酸化法(steam oxidation)を採用しています。

図4
抵抗加熱型酸化炉の概要図

石英製ポートにSiウェハを立てて、入れられた石英チューブの中に N_2 ガスをキャリアとして水蒸気を導入する。抵抗ヒータで1,000 程度の高温にすることで、Si表面が酸化されて酸化膜が形成される。

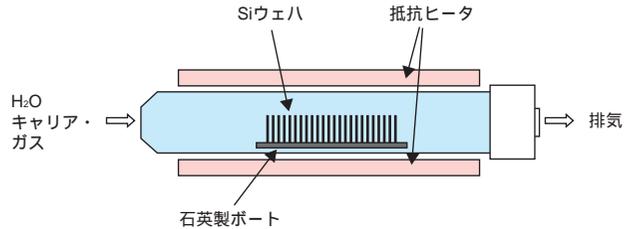


図4に、抵抗加熱型酸化炉の装置構成の概要図を示します。反応管は高純度の透明石英管で構成されています。Siウェハは高純度の石英製のポートに載せて挿入します。左側から酸化種(酸化反応に寄与する物質)である水蒸気(H_2O)が、流量(最大 1cm/s)を調整しながら導入されます。酸化時のSiウェハは、電気炉に入れて1,000 程度で保持します。原子構造などの成膜機構についてはここでは省略しますが、前述した条件でSiウェハ上に約 $1\mu\text{m}$ の SiO_2 薄膜を形成する場合、約8時間を要します。

2. フォトリソグラフィ

フォトリソグラフィとは、簡単に表現すれば、Siウェハにレジスト材(感光性樹脂)を塗布し(または、はり付け)、フォトマスクを介して紫外線でレジスト材を光分解させて、パターンを描写する方法です。圧力センサのダイアフラムは、レジスト液を塗布する方法で作製されています。ここでは、表1に示す工程に沿って説明していきましょう。

1) 前処理

レジスト材は有機溶媒に溶解されています。そのため、成膜後の清浄なSiウェハであっても、水酸基($-\text{OH}$)が吸着されていると、レジスト材を塗布したときにはじかれてしまいます。そこで疎水処理を行います。このときSiウェハに接着助剤のHMDS(ヘキサメチルジシラザン)を直接塗布する方法と、石英などの容器の中をHMDS雰囲気中に浸漬するペーパー法の二つがあります。疎水処理によって、Siウェハの表面は炭化水素基($-\text{CH}_3$)に置換され、疎水性を増加させることができます。

2) レジスト塗布

Siウェハ上にレジストを塗布するには回転法を用います。疎水処理したSiウェハの中心にレジスト液を一定量滴下し、写真5のスピンのコータでSiウェハを回転させ、薄く均一に塗布します。レジスト膜厚の制御は、レジスト液の粘度と回転数、時間で管理します。

3) プリベーク

レジスト液を塗布した後、レジスト液の溶媒を蒸発させます。一般にクリーン・オープンまたはホット・プレートといった加熱装置を使用しています。フォトリソグラフィでは、この工程がもっとも重要であり、次工程の露光の解像度に大きく影響します。プリベーク不足で溶媒が残留していればレジストの光感度は著しく低下し、ベーク温度が高過ぎると熱架橋が起こり、未露光不良が発生します。