プロセスの種々 (いろいろ) (2)

前田 龍太郎*

Fabrication Processes (2)

Ryutaro MAEDA*

*独立行政法人産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門 (〒300-0044 茨城県つくば市並木1-2)

*Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Namiki 1-2, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-0044)

1. ドライエッチング

ドライエッチングについて述べます。ドライエッチングではフッ素系のガスをプラズマ化してエッチングを行います。化学的な作用を伴うために化学的イオンエッチング RIE (Reactive Ion Etching) とも呼ばれます。多くのエッチング装置ではモードにより等方性と異方性のエッチングを行うことができます。エッチングガスとしては主に SF_6 , CF_4 , CHF_3 が使用され、この順番でエッチング速度が小さくなります。加工の等方性の度合いもこの順番で低くなります。CH基の存在が多いほどフルオロカーボンの度合いが増えて、側壁を保護するために、垂直方向のみに加工が進行しやすいからです。

極端に異方性が高く、深さ方向がエッチング開口幅に対して大きい加工 (高アスペクト比加工) を行うエッチングを DRIE (Deep Reactive Ion Etching) と呼びます。このような DRIE の装置ではプラズマのエネルギーをあげるために、ICP (Ion Coupled Plasma) と呼ばれる誘導結合型のプラズマ源を用います。またマスクのエッチング選択比をあげるために、 SF_6 による RIE → エッチングされた面を C_4F_8 膜で保護 → Ar イオンで底面の C_4F_8 膜だけ除去 → SF_6 による RIE … という工程を繰り返します。この方法は BOSCH プロセス

と呼ばれており、市販の DRIE 装置はほとんどこのプロセスを用いています。実際にはわずかに横方向にもエッチングされるため、エッチングの繰り返しの間に段差が壁面に形成されます。一般のエッチングではフォトリソが選択比として数十あるためにマスク材として十分です。ウエハ貫通など長時間の RIE を行う場合は選択比が 200 程度とれるシリコン酸化膜を利用します。

2. サーフェスマイクロマシニング

これまでエッチングとして主にシリコン基板全体を除去するバルクマイクロマシニングを念頭に置いて解説しましたが、ここではサーフェスマイクロマシニングに特有の犠牲層の形成と除去を中心に述べます。図1にサーフェスマイクロマシニングとバルクエッチングによる片持ち梁形成の基本プロセスを示します。サーフェスマイクロマシニングではあらかじめ犠牲層を成膜、パターニングし、その上にマイクロ構造体となる材料を形成します。その後、犠牲層だけをウェットあるいはドライエッチングで選択除去し、最後に可動の自立構造が形成できます。この自立膜を電力や、電磁力などにより駆動し、微小なアクチュエータとして利用できます。

図1. バルクエッチングによる方法と、犠牲層エッチングによる片持ち梁の製作

3. パッケージング

MEMSデバイスも電子デバイス同様にパッケージを行って完成となります。電子デバイスと異なるのは、必ずしも薄利多売でなく、多品種少量であることと、可動部を有することがあります。このためパッケージのコストは製品全体のかなりの割合（時に数十%以上）となることもあり、MEMSのビジネス化にとって最も重要な問題となっています。ビジネス化のためには、MEMSのパッケージングにおいてはウエハレベル接合と電気配線が重要です。また光MEMSにおいては光導路と光ファイバの接続、流体を扱うMEMSでは流体の接続（要するに水の細かい配管）が重要です。すべてを解説することは困難ですので、ここでは主に話題となる接合、電気配線などについて簡単な解説を行います。

4. ウエハレベルパッケージの重要性

通常の半導体デバイスではデバイスをダイシングソーで切り離し、必要な配線をワイヤボンダーで配線した後に樹脂で包み込んでパッケージします。多量生産の半導体チップについては、これで問題はないのですが少量多品種のMEMSでは以下の問題があります。

- MEMSでは同一ウエハ上に複数種類のデバイスを乗せる場合も多く（マルチチップ）、デバイスごとの別個のパッケージ工程を入れるとコストがアップする
- MEMSは可動部を有するのでダイシングソーで切断するのは避けたい

そこでMEMSではいったんウエハレベルでボンディングにより蓋をして（デバイス封止）配線を行った後に切断し、パッケージする方法（ウエハレベルパッケージ）が有望視されています。MEMSで主に用いられる封止のためのウエハレベル接合法には、以下の陽極接合、直接接合、接着剤などがあります。以下にウエハレベルの接合法、電極

フィードスルーの作成法について解説します。

5. ウエハレベル接合

5.1 陽極接合 (Anodic bonding)

本手法はシリコンとパイレックスガラスの接合に用いられます。原理は図2に示すように Na^+ イオンなどの可動イオンを含むガラスとシリコンを加熱し、高電圧を付加します。電源の陰極にはガラス中の Na^+ イオンが引き寄せられ、反対側には負の電荷をもった空孔が引き寄せられます。シリコン側の界面には正孔が引き寄せられ、界面を通して電気2重層が形成されることにより接合が達成されます。

シリコンとパイレックスガラスは熱膨張係数がほとんど同じなので、高温で接合して冷却しても熱応力による破壊は起こりません。陽極接合は真空中で行うと真空封止ができます。応用によってはシリコンとパイレックスガラスをアライナにより、位置あわせする必要があります。

5.2 シリコン直接接合 (Silicon direct bonding or fusion bonding)

図3のようにシリコン表面に化学処理を施し、水酸基を

図2. 陽極接合の原理図

図3. シリコン直接接合の原理

形成します。200℃以下で熱処理し、水素結合を利用して接着します。その後高温に加熱し、接合を完成させます。利点は完全な接合が達成されることで、欠点はプロセスが1000度以上の高温になることです。マイクロマシニングしたウエハを接合し、シリコン内にキャビティを作成したりする場合にも用いられます。この場合ウエハ同士のアライメントが必要になります。アライメントはマスクアライナと同じ機構を用います。

5.3 その他の接合

このほか接着剤を用いる方法、ロウ付け、水ガラス接合、拡散接合のような手法が用いられています。接着剤は簡便である接着剤自身が微細な溝をふさいだりすること、耐熱温度があまり高くないことが問題です。

6. 封止したデバイスからの電気配線のとりだし

シリコンの上に形成したデバイスにガラスなどで蓋をし、ダイシングソーなどで分離した後、電極をつける必要があります。これにはガラスに孔をあけ、シリコン上の電極パッドに電氣的な接続を行います。ガラスに微細な孔をあ

ける手法には、電解放電加工、サンドブラスト法がありますが、孔の径を数百ミクロン以下とするのは困難です。レーザ法が微細な孔には有望ですが、ガラスが損傷してオーバーハングになり、電氣的接続不良を起こす場合があります。反応性ドライエッチ法が最も微細な孔をあけられる可能性があるものの、エッチング速度が大きくないことやコストがかかることが課題です。

7. これからもちょっとMEMSをウォッチしたい人に

以上長々とプロセスの解説を行いました。これで何となくMEMSに関わるための予備知識が備わったと思います。あとは皆さんがいろいろ応用を考えたり、こんな材料や加工法がMEMSで使えないかといった提案を行っていただければいいと思います。さらに知識を高めたり、実際の体験を行えるように、筆者の所属する組織や、他の大学等研究機関で実習を含む講習や、共同研究に対して、門戸を開いています。ちょっとMEMSをかじってみて、さらなるビジネスにつながるきっかけにいただけると幸いです。

(2007.2.14・受理)