サファイア隔膜真空計の開発と製品の特長

吉 川 康 秀^{*1}

Development of Sapphire Based Capacitance Vacuum Gauge and Feature of Product

Yasuhide YOSHIKAWA^{*1}

^{*1}CP Development Department of Advanced Automation Company of Azbil Corporation,
1-12-2 Kawana, Fujisawa-shi, Kanagawa, 251-8522, Japan

(Received July 6, 2016, Accepted August 1, 2016)

Using single-crystal sapphire as the sensor material, we have developed the Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge, which is high-precision, highly-reliable, and intended to be used mainly in semiconductor manufacturing processes. Single-crystal sapphire possesses extremely high corrosion resistance and heat resistance, and also possesses excellent mechanical characteristics. The gauge provides high precision even in harsh environments such as corrosive atmospheres or high temperatures, allowing us to succeed in realizing a long-term stable vacuum measurement. We have also developed high-precision measurement with high linearity and high tolerance for temperature changes, by means of signal processing using microprocessor based control.

1. はじめに

産業界の様々な生産工程において真空を用いた加工処理が使用されている。なかでも電子デバイスの半導体製造工程では薄膜形成やエッチングのために多様化された真空プロセスが使用されており、プロセスの真空度が品質に影響するため精密な圧力計測が要求される。その電子デバイス製造装置内の圧力計測に使用されるのが隔膜真空計である。半導体製造工程は日々進化しており、より高い耐食性と耐熱性が要求される苛酷な環境での正確な真空計測が必要になってきている。そのため当社では独自に耐食性、耐熱性に優れた人工サファイアを用いたデバイスの実現を目指し、サファイア微細加工技術開発に取り組み、サファイア隔膜真空計の商品化に成功したので紹介する¹⁾。

2. サファイア隔膜真空計の概要

主な仕様を以下に記す。

圧力レンジ：0-13.332 Pa abs～0-133.32 kPa abs

自己加熱温度：自己加熱なしおよび45℃～280℃

精度：0.25%Reading～0.5%Reading

Fig. 1 に開発した製品の外観を示す。

3. サファイアセンサチップ及びパッケージ構造

一般的にサファイアといえば、宝石の“ブルーサファイア”が良く知られているが、これは不純物が含まれることにより自然界の中で生成されたものである。当社がセンサチップに採用したのは、人工的に製造された不純物を含まない酸化アルミニウム (Al_2O_3) の単結晶である無色透明のサファイアである。サファイアは耐酸性、耐アルカリ性に優れ、高温使用にも耐えられる優れた材料であり、シリコンと同様に単結晶であることから機械的特性にも優れており、過酷な環境で

Fig. 1 Products overview.

使用される圧力センサには最適な材料である。

しかしながら丈夫である材料ということは、その反面加工することが非常に難しい材料であることを意味する。そのため圧力センサとして実用化することは困難であった。しかし当社ではサファイアをエッチングする技術や、耐食性や耐熱性を落とさずにサファイア同士、およびサファイアと金属を直接接合する技術を開発することに成功した。そのため実用レベルの製品を開発することができた。

3.1 サファイアセンサチップ

Fig. 2 にサファイアセンサチップの外観を、**Fig. 3** にその模式断面図を示す。圧力の検出方式は静電容量式である。サファイアセンサ素子は、圧力に応じて撓み変形するダイアフラムとコンデンサを形成するためのキャビティを有する台座部からなり、どちらもサファイアを構成材料としている。キャビティはドライエッチングで形成され、ダイアフラムと台座部はサファイア同士の直接接合で接合されている。**Fig. 4** にサファイア同士の接合部の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。界面の区別がつかないほどきれいに接合されていることがわかる。これにより耐食性、耐熱性を落とさない接合が実現できている。ダイアフラムと台座部には対向電極に

^{*1} アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニー
CP 開発部 (〒251-8522 神奈川県藤沢市川名 1-12-2)

Fig. 2 Sapphire sensor chip.

Fig. 3 Cross section of sensor chip.

Fig. 4 TEM image of sapphire direct bonding.

よって2つのキャパシタが構成されている。一つはダイアフラムの中央に位置し圧力によるダイアフラムの変化に応じて静電容量が変化する感圧キャパシタ、もう一つはダイアフラムの端に位置している参照キャパシタである。感圧キャパシタと参照キャパシタの両方を計測し演算することにより誤差の少ない圧力計測が実現できる²⁾。

3.2 パッケージ構造

Fig. 5 にパッケージ構造の模式断面図を示す。センサチップは機械的ストレスを軽減するため、一旦チップと同じ材料のサファイア円板で受けて、さらにその円板を金属薄板を介して金属筐体に接続している。サファイアセンサチップは

Fig. 5 Cross section of package.

Fig. 6 TEM image of Saphire to metal bonding.

高い耐食性を実現できているがパッケージで耐食性が悪くなると製品としては意味がない。よって当社ではサファイアと金属の介在物のない接合技術を開発した。Fig. 6 にその接合部の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。界面の各々の材料がきれいに拡散されて接合されていることがわかる。これにより耐食性、耐熱性を落とさない接合が実現できている³⁾。

3.3 検出回路

開発したセンサチップはフルスケール圧力印加によって1pF 程度の微小容量変化しか発生しない。よって製品要求性能を満たすためには $\pm 0.1\text{fF}$ 以内の容量変化を正確に計測する回路が必要となる。またセンサはヒータにより高温に加熱されているため、検出回路をセンサ近傍には配置できない。そのためセンサと回路の距離が離れた状態でノイズや寄生容量の影響を受けずにそれを実現する必要がある。

Fig. 7 に検出回路ブロック図を示す。センサから出力される信号に対してアナログ回路でノイズ成分や寄生容量の影響をキャンセルし、その出力をA/D コンバータでデジタル信号に変換しマイクロプロセッサに入力している。マイクロプロセッサでは多項式演算により温度補正や直線性補正を実施することにより高精度を実現している。

Fig. 7 Circuit block diagram.

Fig. 8 Cross section of ALD model package.

4. 原子層堆積法向けモデル

近年、LSIの高集積化などに伴い半導体製造プロセスにおいて、膜厚制御性や段差被覆性などに優れる原子層堆積法(Atomic Layer Deposition : ALD)が注目されている。この成膜プロセスでは、被覆性に優れる反面、プロセス圧力の計測に用いられる隔膜真空計内部にも成膜され、センサ出力がシフトしてしまうという問題がある。当社ではこのような課題を解決すべく、三つの技術的工夫を積み重ねたセンサ構造を設計し、ALD成膜プロセスに適用してもシフトが大幅に低減できるモデルを開発した^{4,5)}。

Fig. 8にパッケージ構造の模式断面図を示す。

4.1 ダイアフラム形状の改良

膜が堆積された状態でもダイアフラムの撓み量が変化しな

いように、ダイアフラムの中央部分をわずかに薄くし、薄い部分と厚い部分の撓みを相殺させる構造を形成した。この構造により均一に成膜された場合のゼロ点のずれを低減している。

4.2 堆積場所のコントロール

成膜材料によってはダイアフラム上に膜が均一に堆積せず、ダイアフラム形状を工夫しても撓みが不均一となり、ゼロ点のずれが抑えられない場合がある。この課題解決のためにダイアフラムを覆うサファイア円板に膜応力によるダイアフラムの撓みがバランスしやすい場所へ成膜されるような流路を形成した。この構造により不均一に成膜された場合でもゼロ点のずれを低減している。

4.3 流路の制限

ダイアフラム形状の改良や堆積場所のコントロールの対策を実施してもダイアフラム上に不要な膜が堆積することに変わりはない。そのことにより長期的には測定感度や測定精度が低下してしまう。そのため流路を微細にしてガスの流れを粘性流ではなく分子流にすることにより、活性なガスを壁にぶつかりやすくして消滅させ、不活性なガスのみが感圧ダイアフラムまで到達できるようにするバッフル構造を開発した。希薄流体シミュレーションにより反応性ガスが活性度を保ったままこのバッフル構造を通過できる確率は約0.03%であり、通過できるガスはほぼ不活性ガスのみとなることが確認できた。またこのトラップ構造は4000本もの微細な通り道を設けたもので、応答性への影響も最小限にした。

5. おわりに

極めて耐食性が高く機械的特性に優れた人工サファイアを使用し、最新のマイクロマシニング製造技術ならびに電子回路技術を適用することにより、高精度、高安定、高耐食性のサファイア隔膜真空計を製品化できた。現在、より低圧レンジの製品や工業用高速通信規格に対応した製品を開発中である。今後はさらに高いユーザー価値を提供するため、より良い製品を開発していきたい。

〔文 献〕

- 1) Y. Yoshikawa, H. Harada, J. Ichihara, M. Nagata and T. Yamaguchi: azbil Technical Review, **52** (2011) 34.
- 2) M. Soeda, T. Kataoka, Y. Ishikura, S. Kimura, T. Masuda, Y. Yoshikawa and M. Nagata: *IEEE Sensors*, Florida, 2002, 1-II, 950.
- 3) M. Sekine, T. Ishihara, N. Sashinami and T. Tani: azbil Technical Review, **52** (2011) 28.
- 4) T. Ishihara, M. Sekine and T. Tochigi: azbil Technical Review, **55** (2014) 62.
- 5) T. Ishihara, T. Tochigi, J. Yoshinaga and Y. Yoshikawa: *JSAP Autumn Meeting*, Sapporo, 2014, 75th, 01-115.