

Product Introduction

新製品紹介

半導体製造装置向け放射温度計 IT-470F-H

Infrared Thermometer for Semiconductor Production Equipment IT-470F-H

大須賀 直博

Naohiro OHSUGA

古川 泰生

Yasuo FURUKAWA

半導体製造装置のエッチング工程における温度測定に特化した放射温度計「IT-470F-H」を開発した。放射温度計のコアとなる赤外線センサーは、当社のMEMS技術を駆使して製作したものであり、従来機のセンサーに比べて感度・応答時間が向上した。この赤外線センサーの採用により、温度測定の再現性(繰り返し性)の値が0.1°C(対象物温度23°Cのとき)と従来機と比較して3分の1に大幅に性能が向上し、環境温度の過渡温度変化に対する指示値も安定した。

We developed an infrared thermometer "IT-470F-H" specialized for the dry etching equipment. The infrared sensor which is the core technology of the infrared thermometer is developed utilizing our original MEMS technology. Our MEMS infrared sensor has higher responsivity and shorter response time than the conventional sensor. With our MEMS sensor, the repeatability improves to 0.1°C which is one-third of the conventional one. Furthermore, the stability to transient change of ambient temperature improves very well.

はじめに

我々が2002年に初めて半導体製造装置向けの放射温度計を開発してから10年余りが経過した。半導体の製造に放射温度計が使われるようになった理由には、大きく3項目が挙げられる。①測定対象物(たとえばSiウエハ)が動体(回転や移動する物体)であること、②ケミカルドライエッチング工程において温度管理は品質を左右するための最重要項目の一つであること、③工程の多段化でウエハが高付加価値になり、歩留り向上のために全ウエハ、全工程の温度管理が必要となったことが挙げられる。最近では、後者2つが特に重要視され、放射温度計にはより高い再現性性能が求められるようになった。あわせて、半導体製造装置も多種多様に変化をし、他の制御機器との接続性を要求されるようになった。これらに応えるために新型の赤外線センサーを搭載して高精度、高い再現性を持つ温度測定を実現し、光デジタル出力だけではなく電流出力を追加したIT-470F-Hを開発するに至った。

放射温度計の原理

放射温度計は、測定対象物が放射している赤外線を検知し、温度に換算している。ここであらためて原理を説明する。熱の伝わり方には、伝導・対流・放射という3種類の形態がある(Figure 1)。

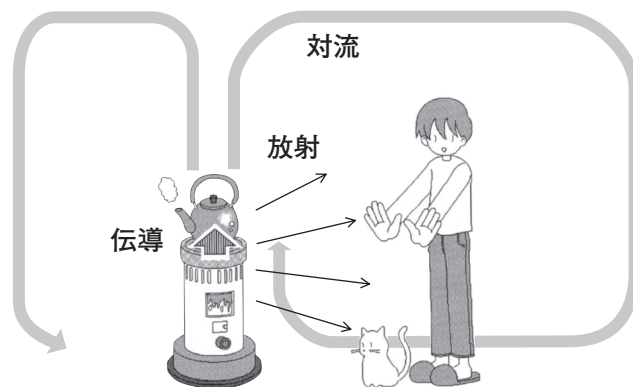


Figure 1 Heat transfer

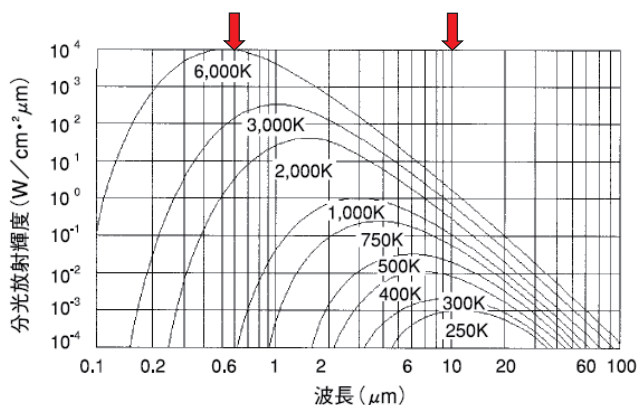


Figure 2 Relation between temperature and energy of object^[1]

伝導とは、互いに接触した温度の高い物体から低い物体へと熱エネルギーが移動することである。対流とは、水や空気などの流体が暖められると軽くなって上昇し、冷やされると重くなって下降することによって循環することである。この循環によって熱が伝えられる。放射とは、その物質が持つ熱エネルギーを電磁波(可視光線や赤外線など)という形態で周囲に放出する現象のことである。身の回りでは、たとえばストーブに手を近づけるだけで、直接手を触れなくても暖かく感じるが、これは手がストーブからの放射エネルギーを感じるからである。この場合は、手が赤外線センサーの役割をしていることになる。これと同じ原理で、物体から放射される赤外線エネルギー量を赤外線センサーが検知し、その赤外線の量から物体の温度を測定するのが放射温度計である。

Figure 2は、各温度における波長とエネルギー(分光放射輝度)の関係を表したものである。この特性はプランクの法則と呼ばれる公式によって表される。温度が高いほどエネルギーは大きく、分光放射輝度のピークは、短波長側にある。電磁波の波長は様々であり、紫外線は0.1~0.4 μm、可視光線は0.4~0.7 μm、赤外線は0.7 μm~100 μmとされている。Figure 2より温度6000 Kの太陽では、その波長は0.5 μm付近がピークであるが、温度300 K(27℃)付近の物体では10 μm付近がピークとなる。850 K以上あると色で温度が推測できるが、それ以下の場合では視覚で温度を推測することはできないので赤外線の放射を検出する赤外線センサーが必要となる。

当社の放射温度計ではサーモパイルと呼ばれる赤外線センサーを使用している。Figure 3にサーモパイルと放射温度計の構成を示す。熱電対は、材質の異なるA金属

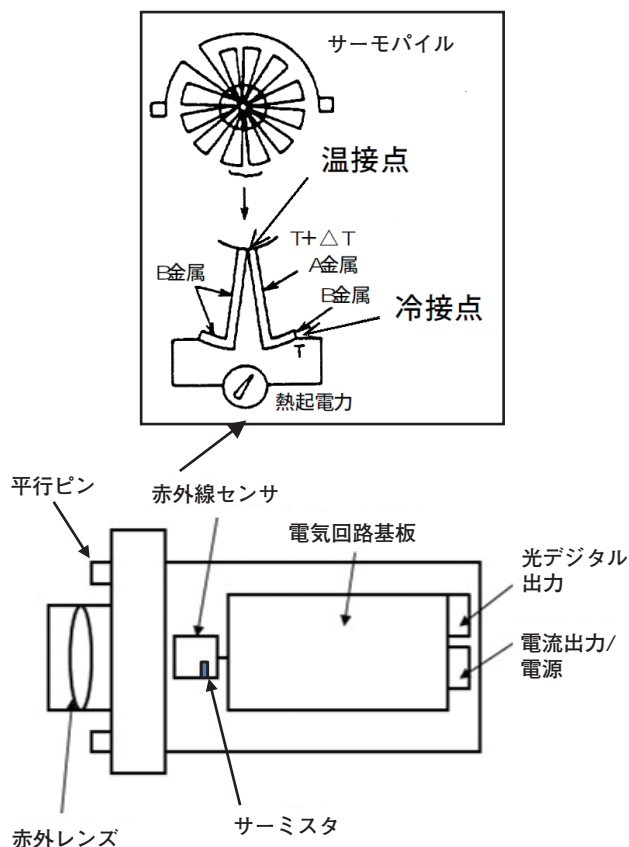


Figure 3 Thermopile and composition of Infrared Thermometer

とB金属で対の構成をしたものである。温接点と冷接点の間に温度差(ΔT)が発生すると、温度差に応じた熱起電力が発生する。サーモパイルは、微細な熱電対を多数直列につないだもの(熱電対列)である。Figure 3のサーモパイルの構造図に示すように、サーモパイルの温接点は中央部に集合する配置になっている。ゆえに、1本の熱電対を100本連ねれば100倍の出力が得られる。

物体を放射温度計で測定する場合、その物体から放射される赤外線のエネルギーは、レンズによってサーモパイルの温接点に集光され、数μV程度の微弱な電圧(熱起電力)が発生する。サーモパイルは、それ自体と測定対象物の温度差に相当する電圧を出力するが、測定対象物の温度を求めるためには、サーモパイル自体の温度を別途測定する必要がある。そこでサーモパイルに内蔵させているサーミスタで冷接点の温度(T)を補償する。サーモパイルの出力とサーミスタからの信号を読み取り、電気回路基板のCPUで演算することにより測定対象物の温度を算出する。なお、放射温度計は黒体炉と呼ばれる空洞を備えた装置で校正を行う。黒体炉は、設定温度に対してプ

ランクの法則に従った放射エネルギーを再現するよう作られている。次に、放射温度計の長所と短所を以下に記述する。

(長所)

- a) 接触させずに測定ができる。
 - ・間に遮るものがなければ、遠方の物でも測定ができる
 - ・測定対象物を傷つけたり汚したりしない
 - ・食品や人体などで使用することで、汚染や感染を予防でき、衛生的である
 - ・回転しているタイヤの表面温度など、動体の測定が可能
- b) 応答時間が速いため、瞬時に測定が可能
- c) 熱容量の小さな物であっても、相手の熱を奪わないために、正確に測定できる
- d) 表面が凸凹であっても測定が可能

(短所)

- a) 放射エネルギーや波長は物体の温度だけではなく表面状態、材質にも依存するので測定が難しい物質もある (例えば、光沢のある金属表面温度)
- b) 一般的に接触式温度計と比較して高精度が困難
- c) 表面温度は測定できるが、物体の内部の温度は測定できない
- d) 熱電対と比較して高価
- e) 測定位置がわかりにくい

以上のように、放射温度計は様々な分野に応用可能である。

IT-470F-Hの特長と仕様

Figure 4に放射温度計IT-470F-Hの外観を示す。採用し



Figure 4 Picture of "IT-470F-H"

た赤外線センサーは、当社のMEMS技術を駆使しSi基板上にセンサー構造と電気回路を形成することにより、従来センサーに比べて、感度は約1.7倍、応答時間は2.7倍に向上し、Si基板上に回路も組み込んだため熱安定性能も改善した。このことにより従来機に比べ、IT-470F-Hの再現性や周囲温度の過渡特性が向上した。また、本体の筐体が全て金属(アルミ合金)で形成されており、内部で発生した熱量を外部へ放熱しやすい構造となっている。逆に、外部からの熱影響を受けやすくなり、それが誤差の要因となりえるが、新型の赤外線センサーを搭載した結果、本機では従来機に比べて過渡特性を向上させることができた。

一般的に半導体製造装置であるケミカルドライエッチング装置の多くは、プラズマを用いる工程で高周波の電磁波が発生する。放射温度計の指示値がこれにより変動するのを防止するために筐体のアース構造の改良と、シールド材を入れる対策と電気回路を見直した。以上の対策を行った結果、Table 1に示す製品仕様の装置を開発することができた。尚、出力は従来機では光デジタル出力のみであったが、電流出力機能を追加したことにより汎用性が高まり、どちらかをユーザが選択して使うことを可能とした。

Table 1 Specifications of IT-470F-H

項目	仕様
測定温度範囲	-50~200℃
測定波長	8~14 μm
放射率補正設定	0.001~1.000の間で設定可能
測定精度 (光出力放射率1.000の時)	±4.0℃ (対象物温度 -50℃) ±0.8℃ (対象物温度 -20℃) ±0.6℃ (対象物温度 0℃) ±0.5℃ (対象物温度 23℃) ±0.4℃ (対象物温度 100℃以上)
再現性 (光出力放射率1.000の時)	0.7℃以下 (対象物温度 -50℃) 0.5℃以下 (対象物温度 23℃) 0.5℃以下 (対象物温度 200℃)
測定視野	φ8 mm以下 / 距離150 mm
出力	光デジタル出力, 電流出力4-20 mA
電源電圧	DC 24 V
消費電流	30 mA以下
外形寸法	55×44×96 mm
質量	300 g

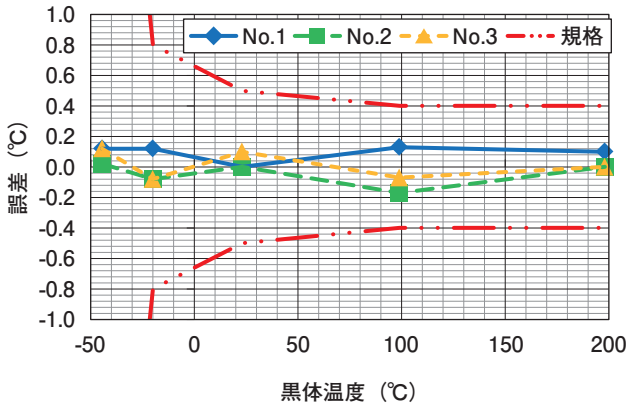


Figure 5 Accuracy of measurement

性能

温度測定精度

Figure 5に温度測定精度の評価結果を示す。横軸は温度の基準となる黒体炉の温度を、縦軸はIT-470F-Hの指示値から黒体炉の温度を引いた値つまり誤差を示す。結果は、 -50°C から 200°C の広範囲で高精度であることを示しており、様々な温度管理に対応できることがわかる。

再現性

Figure 6に再現性(繰り返し性)の評価を3台(No.1~3)で行った。まず、黒体炉の前にIT-470F-Hを設置し、本機と黒体炉の間に設けたシャッターを5秒間隔で10回開閉を繰り返した時、シャッター開のときの指示値を測定する。その10回分の標準偏差の2倍を再現性と定義した。従来機では、対象物温度 23°C において再現性が、約 0.3°C であったが、本機では約 0.1°C と、3分の1に低減でき、より安定した測定が可能となった。

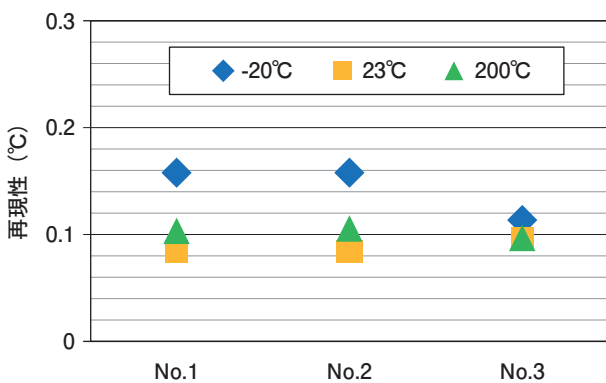


Figure 6 Repeatability

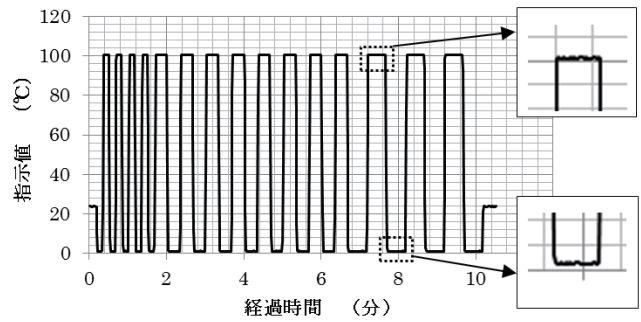


Figure 7 Stability

追従性

Figure 7に追従性評価をした結果を示す。追従性とは温度の異なる対象物を交互に測定したときの放射温度計の応答性をいう。室温から 1°C と 100°C の黒体炉を交互に測定した時の指示値を示す。一部を拡大したものをグラフの右側に示した。対象物の温度変化に対してすばやく応答しており、放射温度計の特徴である追従性がよいことがわかる。

周囲温度の過渡特性

Figure 8に周囲温度の過渡特性として、周囲温度を30分で 8°C の幅で上下させたときの対象物温度 100°C の場合の指示値の変化を示す。周囲温度の変化に対してIT-470F-Hは安定した指示値を示していることがわかる。半導体製造装置では加熱、冷却を繰り返すプロセスがあるが、この程度の変化においても安定した指示値を示すことがわかる。

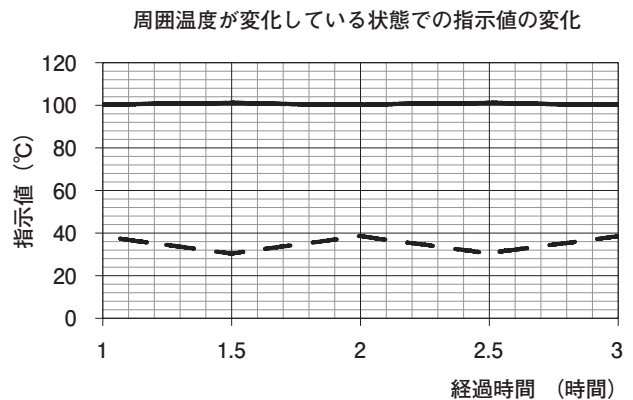


Figure 8 Transient characteristic of ambient temperature

測定視野

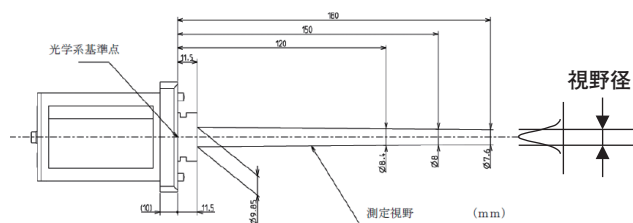


Figure 9 Target size

測定視野

Figure 9に測定視野を示す。放射温度計の測定エリアを示す視野径は、距離150 mmで $\phi 8$ mmである。視野径は入射エネルギーが90%以上の大きさに定義しているため、残り10%以下が視野径の外側に山の裾野のように広がっている(Figure 9右側の図)。100%に近い視野とするためには視野径の2倍程度の測定エリアが必要である。

おわりに

IT-470F-Hでは、高精度・高再現性を実現させた。これにより、半導体製造工程における温度管理には不可欠な計測器となった。半導体は、今後、さらに高度で多品種少量生産が進み、それに伴い放射温度計に対する要求も高まると考える。我々はそれに応えた新しい製品を次々に生み出し、今後の半導体産業の発展に貢献したい。

参考文献

- [1] 野村俊行, 早川 昇, *Readout*, 17, 66(1998)



大須賀 直博

Naohiro OHSUGA

株式会社 堀場製作所
先行開発センター



古川 泰生

Yasuo FURUKAWA

株式会社 堀場製作所
先行開発センター