

蛍光温度センサの開発

Development of a Fluorescence Temperature Sensor

株式会社 山武

衣笠 静一郎
Seiichiro Kinugasa

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー

加藤 淳之
Atsushi Kato

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー Norio Kikuchi

菊地 則雄

株式会社 山武

アドバンスオートメーションカンパニー Yusei Yanagawa

柳川 雄成

キーワード

蛍光寿命, 光ファイバ, 蛍光材料, 温度センサ

半導体ドライエッチング工程やマイクロ波による加熱工程など、高周波電磁場環境下での温度計測を目的とした、蛍光温度センサを開発したので報告する。蛍光温度センサが有する特長は、光が持つ電磁場無誘導性によって、高周波環境下でもセンサ信号が変調を受けないことにある。このため、マイクロ波が照射されている空間あるいは被処理物質の温度を、電磁ノイズを受けずに測定できる。今回、われわれが開発した蛍光温度センサの温度測定範囲、分解能およびマイクロ波オープン中での温度計測結果を報告する。

We have developed a fluorescence-based fiber optic sensor for monitoring temperatures in high-frequency electromagnetic fields, for use in processes such as semiconductor dry etching and microwave heating. Since light is unaffected by electromagnetic induction, the characteristics of the fluorescence temperature sensor include a stable sensor signal even in high-frequency environments. As a result, the sensor can measure the temperature of a space or processed material irradiated by microwaves without interference from electromagnetic noise. In this paper, the fluorescence temperature sensor's measurement range and resolution are reported, as well as the results of temperature readings taken in a microwave oven.

1. はじめに

マイクロ波による材料製造および乾燥工程では、誘電加熱を利用した局所的な加熱効果を利用することによって、反応時間あるいは乾燥時間の短縮を実現している。この効果は、投入するエネルギー総量の縮減を実現し、省エネルギーの効果を高めている。マイクロ波応用技術の開発を重点課題として位置づけた研究がすすめられ、いくつかの知見が得られている。

一方、半導体ウエハに加工される回路パターンでは、半導体素子の高密度化にともなって微細化が進行し、要求される加工寸法精度は、ますます厳しくなっている。たとえば、プラズマを用いて配線パターンを形成する、ドライエッチング工程がある。通常は、ウエハにバイアス電圧を印加して、電場でイオンを加速してウエハに引き込むことにより、異方性形状を実現している。ウエハ表面には入熱が発生するので、表面温度が上昇する。

このウエハ表面温度の上昇はエッチングによって形成される形状に影響する。反応生成物が被エッチング面に付着する。付着の度合がウエハ温度により変化する。したがって、処理中のウエハの温度管理ができていないと、面内で不均一なエッチング結果となり、歩留まりの低下につながる。

ウエハステージの温度を制御する必要性はあるが、エッチング中はマグネトロンから発生する電磁場の影響がある。エッチング中の表面温度計測システムが提案されているが、構造が複雑であるという問題がある。

マイクロ波による加熱プロセスや半導体ドライエッチングプロセスで必要とされる温度制御のために用いる温度センサとして、測温抵抗体や熱電対などの電気式センサは、適切ではない。電磁ノイズ対策を適切にとらなければ、センサ信号の変動、誘導加熱による破壊、他の電子機器に及ぼす影響が発生するからである。

代替される温度計測方法として、放射温度計が挙げら

れる。しかしながら、低温度領域では、被測温面からの放射量が極めて少なく、温度測定分解能が低下する欠点を有する。さらに、被測温面の状態が変わると放射率が変動するため、プロセス中の放射率モニターが必要である。

我々は、マイクロプロセス装置、あるいは、エッチング装置に装着する目的とした、蛍光温度センサを開発した。蛍光温度センサは、他の温度センサにはない特長を有する。蛍光温度センサでは、測温材料として用いる蛍光材料の温度依存性を利用している。開発した蛍光温度センサの動作原理と、性能を報告する。

2. 蛍光温度センサの動作原理

図1に、開発した蛍光温度センサを示す。蛍光温度センサは、励起光を発する励起光源と、励起光と蛍光を伝搬させる光ファイバと、雰囲気温度によって蛍光特性を変える蛍光材料と、蛍光を受光し蛍光強度を測定する蛍光測定器で構成される。

図2に、蛍光特性と蛍光材料の雰囲気温度の関係を示す。励起光源を点灯して励起光を蛍光材料に伝搬させると、蛍光材料から発生する蛍光強度は、時間が経過するに従って、強くなっていく。励起光源を消灯すると、蛍光強度は徐々に弱くなっていく（これを、消光という）。

蛍光の消光の速さは、蛍光材料の雰囲気温度によって変化する。消光の速さと蛍光材料の雰囲気温度の関係をあらかじめ求めておけば、実測定時に求めた消光速度から、蛍光材料の雰囲気温度を測定することができる。

励起光源を消灯した直後に、蛍光測定器で測定された蛍光強度を初期値として、所定の比率に蛍光強度が低下するまでの時間を求める。所定の比率にまで低下する時間を、蛍光寿命と呼ぶ。蛍光強度と蛍光寿命の関係を、式(1)で記述できる。

$$I(t) = I(0)\exp(-t/\tau) \quad (1)$$

t は、消灯直後からの経過時間、 $I(t)$ は時間 t 経過後の蛍光強度、 $I(0)$ は励起光消灯直後の蛍光強度、 τ は蛍光寿命を表わす。

図3に、蛍光寿命の温度依存性を示す。蛍光材料の雰囲気温度を、 -20°C から 350°C まで変化させた場合、蛍光寿命は 0.5ms ～ 4.3ms の間で一様に変化する。

蛍光温度センサの原理上の更なる特徴は、蛍光強度の相対変化率を使って蛍光寿命を導出することから派生する、蛍光強度の絶対値の影響を受けないことである。原理的に、励起光源の発光強度が瞬時変動しても、蛍光寿命は変わらない。

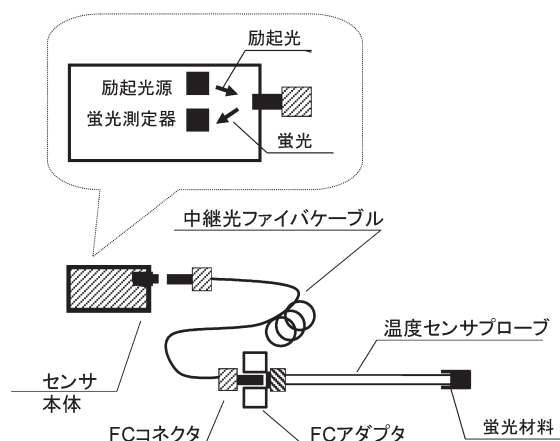


図1. 蛍光温度センサ

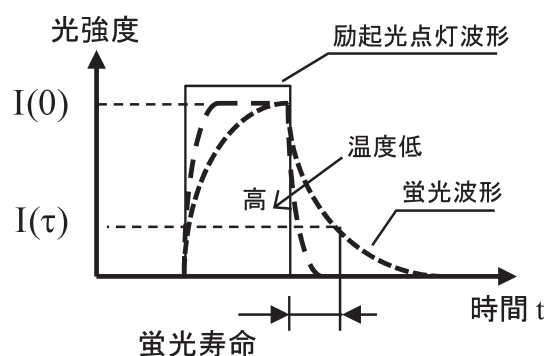


図2. 蛍光特性の温度依存性

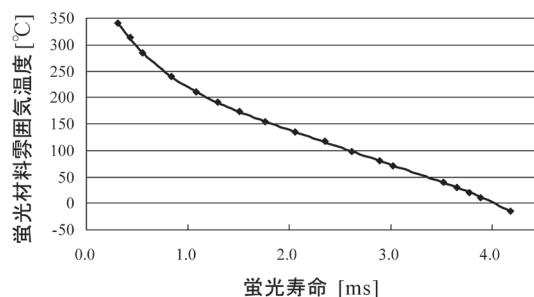


図3. 蛍光寿命の温度依存性

3. 蛍光温度センサの基本形態

開発した蛍光温度センサは、基本的に3つの部位に分けられる。

第1の部位は、センサ本体である。センサ本体には、励起光源、発光制御回路、光ファイバ結合部、蛍光測定器および出力機構を搭載した。光ファイバ結合器を用いて、光源から発する励起光を、光ファイバに結合する。励起光源として、発光ダイオードを用いた。発光制御回路から、発光ダイオードに電流を供給し、所定の周期で矩形波状に間欠駆動する。蛍光検出のための受光素子として、フォトダイオードを用いた。フォトダイオードからの光電流を電圧に変換して増幅し、蛍光寿命の導出に

用いる。測定結果を、出力機構を介して出力する。

光ファイバ結合部は、光通信などで用いられる FC 型アダプタを用いた。

第 2 の部位は、中継光ファイバケーブルである。温度センサは、使用中に破断される場合、あるいは経年変化する場合がある。温度センサの交換頻度は高いが、装置内部に設置された温度センサを、複雑な機構部から抜き取り、新規なものに交換することに、コストがかかる。そのため、中継光ファイバケーブルを用意して、装置組み立て時に組み込む。温度センサプローブに交換の必要性が生じて、光ファイバ全体を抜き取らずに、温度センサプローブの交換だけで済む。中継光ファイバケーブルの片側の端面はセンサ本体側に接続され、他方の端面は、被測定領域の近傍に配置される。温度センサプローブは耐環境性（耐熱性、耐食性）が求められるが、中継光ファイバケーブルに耐環境性を要求しなければ、簡易な形状にすることができる。

図 4 に、中継光ファイバケーブルの外観を示す。中継光ファイバケーブルを、装置内部の各機構部の隙間を利用して敷設するために、光ファイバの曲げ最小半径、加重を考慮する必要がある。

機械負荷が、中継光ファイバの素線に加わらないように、保護部材で周囲を覆う。図 4 の外観図では、ポリビニル系被覆チューブを利用している。被覆材料を、用途に応じて変えることができる。

第 3 の部位は、温度センサプローブである。温度センサプローブは、光コネクタと、光ファイバと、蛍光材料およびそれらを保護する保護部材で構成される。光コネクタから励起光を光ファイバに送り込み、光ファイバ中を伝搬させて蛍光材料を照射する。蛍光材料で励起された蛍光が、光ファイバを励起光とは逆方向に伝搬する。

温度測定に用いるときは、温度センサプローブを、被測定物体に接触させるか、あるいは空間中に露出する。これにより、被測定領域の雰囲気温度による蛍光寿命の変化を起こす。温度センサプローブの形状は、用途に応じて様々な形をとる。被覆の材料、長さおよび口径を、要求内容に応じて、変更することができる。実施例を、図 5 に示す。

中継光ファイバケーブルと温度センサプローブを、FC アダプタを用いて接続する。図 6 に、FC アダプタを示した。アダプタ内部では、光ファイバ端部同士が、互いに押し付け合い、常に接触している状態になっている。

今回開発した蛍光温度センサでは、中継光ファイバケーブルと温度センサプローブを分離しているが、中継光ファイバケーブルと、温度センサプローブには FC アダプタを介さずに、1 本の光ファイバ素線で構成することもできる。

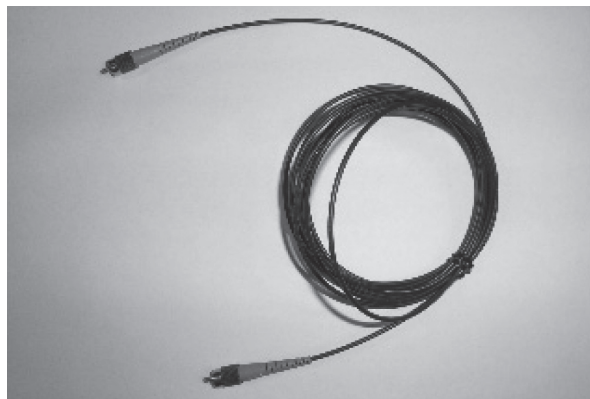


図 4. 中継光ファイバケーブル

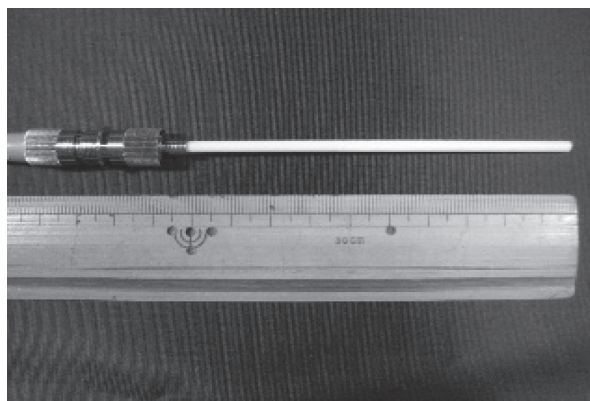


図 5. 温度センサプローブ

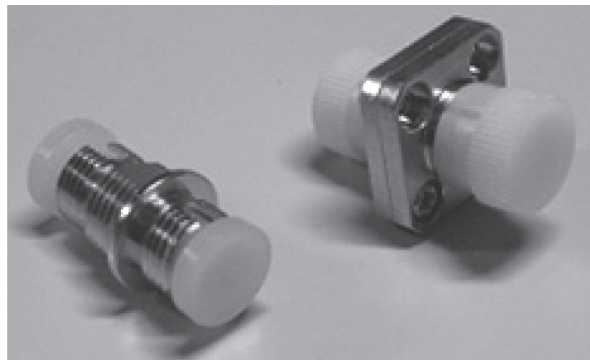


図 6. FC アダプタ

4. 蛍光温度センサの性能

開発した蛍光温度センサの性能を、表 1 に示す。センサ本体の温度測定範囲は、 -200°C から 350°C までである。しかし、実際の測定上限および下限温度は、温度センサプローブの構成材料の耐熱性を考慮して設定される。とくに、測定温度が高くなるほど、使用できる材料が少なくなる。

さらに、蛍光材料の雰囲気温度が高くなると、蛍光寿命が短くなる。このため、高温領域であるほど、蛍光強度を測定するサンプリングレートを高速化する必要がある。

表 1. 性能

部位	項目	性能指標
センサ 本体	測定温度範囲	-200~350℃
	分解能	0.1℃
	更新周期	10Hz (標準値)
	使用温度	0~50℃
	保管温度	-20~55℃
	アナログ出力	4-20mA 0-10V
	光源寿命	40000 時間
温度セン サプロ ーブ	形状	蛍光材料と光ファイ バの一体構成
	使用温度範囲	-40~150℃
		-40~250℃
-40~350℃		
中継光フ アイバケ ーブル	形状	単芯
	使用温度範囲	-30~80℃
	保管温度	-30~80℃

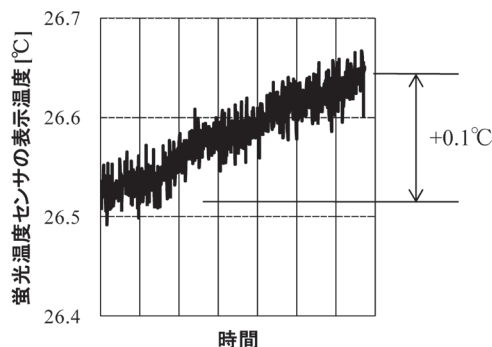
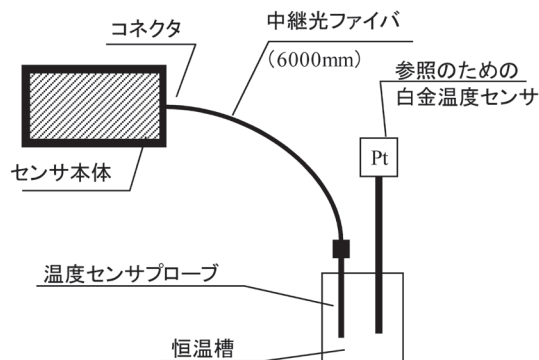


図 7. 微小温度変化時の表示温度変化

開発した蛍光温度センサの出力形式は、2つの形式から一方を選択できる。4-20mA 出力あるいは 0-10V 出力の選択が可能である。

蛍光温度センサを構成する部材の中で、最も劣化しやすい光源の寿命は 40000 時間である。光源の寿命は、発光強度が半分になる時間を定義することが多い。蛍光温度センサにおける光源の寿命は、蛍光寿命に影響を与え始めるまでの時間として定義されるべきである。加速試験を実施し、発光素子を 40000 時間 (5 年) 以上にわたり、使用できる結果を示した。

表示分解能は、0.1℃である。蛍光温度センサの温度センサプローブを恒温槽に設置して、密閉空間における自然温度変化を利用して、分解能を確かめた。図 7 に、測定系と測定結果を示す。参照のための白金温度センサを併設し、それぞれの温度センサが示す温度の変化を比較した。参照温度センサの表示温度が 0.1℃変化すると、蛍光温度センサの表示温度も 0.1℃だけ変化していることを確認した。

次に、加熱した物体の表面に、蛍光温度センサの温度センサプローブを接触させたときの応答性を調べた。蛍光材料中の発光点から蛍光を発するので、点計測となるが、発光点が出す蛍光強度は低い。十分な蛍光強度を獲得するために、一定の大きさの蛍光材料の集合体を必要とする。この蛍光材料の大きさが、応答性を決める要因であり、小さいほど良い。

図 8 に、加熱した物体の表面に、蛍光温度センサの温度センサプローブを接触させて得た、表示温度変動を示した。接触方法は、温度センサプローブを、断熱材で覆われた空間に挿入し、加熱体に垂直に接触させる方法である。蛍光温度センサプローブの表面を平面状に研磨し、加熱体の表面をも平面研磨した。

蛍光温度センサプローブと加熱体が接触する直前は、加熱体近傍の温度が暖められているので、わずかに表示温度が上昇する。

接触直前の表示温度と、接触後安定したときの表示温度の変化量のうち、63%相当だけ変化する時間を応答時間として定義する。接触する表面に、異物などが存在すると、接触面積が低くなって、温度センサプローブに加熱体から熱が伝わらない。表面を汚したときの参考値としての応答時間は、5.6 秒であった。一方、接触表面を清浄に保った場合、応答時間は 2 秒であった。

異物が介在することで、さらには、安定した後の表示温度に差が発生する。加熱体を 100℃に保った場合では、表面の清浄状態によっては、4.5℃の差が生じた。

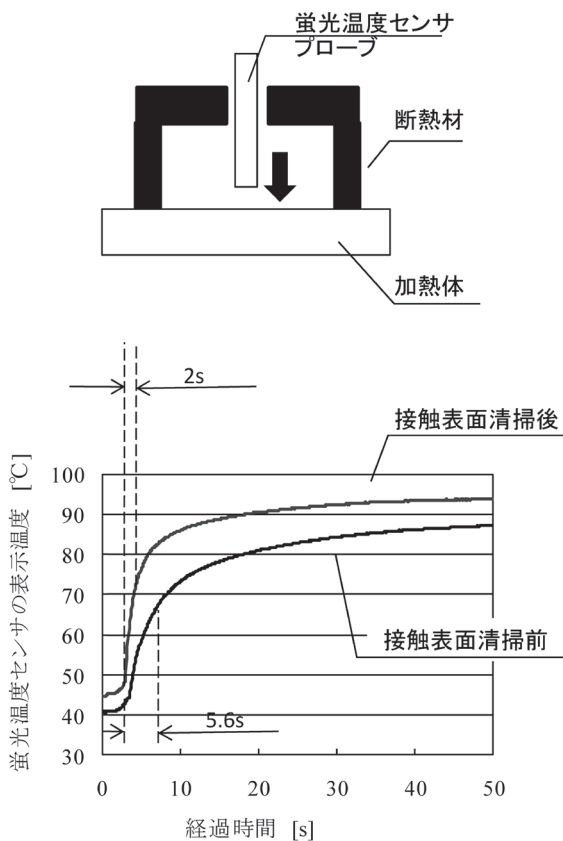


図 8. 応答性の評価

温度センサプローブを、グリースを熱伝達物質として用いて加熱体と接触させると、加熱体と温度センサプローブの物理的な接触面積が広がって、加熱体から蛍光材料への熱伝導を改善できる。これにより、上記数値(2秒)よりも、応答性を改善することができる。

蛍光温度センサの最大の特長は、高周波電磁場環境下でも電磁ノイズを受けずに温度を測定できることである。放射温度計とは異なり、低温度プロセスにも適用できることで、幅広いアプリケーションに用いることができる。

開発した蛍光温度センサの温度センサプローブに、マイクロ波を直接照射して表示温度の変化を調べた。

図 9 に、測定系を示す。開発した蛍光温度センサと、従来の電気式温度センサを束ねて、電子レンジに開口した挿入口から庫内に挿入した。庫内天井から約 70mm 程度挿入した。電気式センサとして、熱電対と白金温度センサを用いた。電気式センサをデータロガーに接続し、データロガーを介して連続的に温度を測定した。並行して、蛍光温度センサを連続的に用いた。

電子レンジは、家庭向け電子レンジである。パワーは 750W である。1 回あたりの稼働時間を 30 秒に制限した。

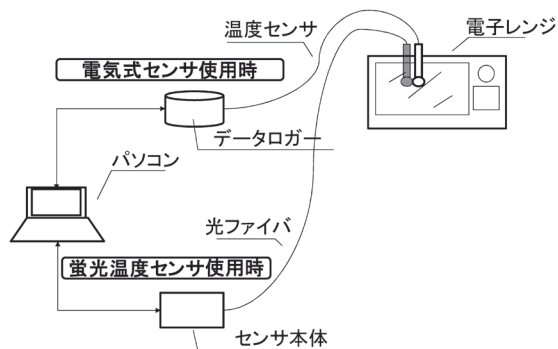


図 9. マイクロ波照射試験

図 10 に、熱電対と蛍光温度センサを同時に電子レンジの庫内に配置し、マイクロ波を照射して得た表示温度シフトを図示する。マイクロ波を照射すると、熱電対に誘導電流による発熱が生じることとデータロガーに電磁ノイズが伝わって、表示温度が異常値を示した。また、その異常値(波高値)の再現性がない。データロガー側の異常で測定できないこともあった。

蛍光温度センサは、誘電体で構成されているので、電磁誘導の影響を受けないが、電子レンジ中の空気が、庫内側壁からの熱あるいは水分子の加熱で温度が上昇して、表示温度が変化する。電子レンジの扉を開けて開放すると、表示温度は低下する。

蛍光温度センサは、電磁場環境下でも電磁ノイズの影響を受けることはないものの、蛍光材料と光ファイバを保護する保護材料が、誘電加熱で温められることで、表示温度がシフトすることはある。我々は、複数の被覆材料を用いて、マイクロ波照射による表示温度シフトを調べた。

図 11 を使って、マイクロ波照射による、被覆材質が異なる蛍光温度センサプローブを用いた時の、表示温度を比較した。

蛍光温度センサの温度センサプローブとして、3つのタイプを用いた。誘電損失が異なる2つの無機材料で保護された蛍光温度センサプローブ、高分子系材料で保護された蛍光温度センサプローブである。誘電損失が低い(無機材料 1) 蛍光温度センサプローブでの表示温度シフトが最も低かった。高分子系材料で蛍光温度センサプローブを保護した場合に比べて、無機材料で保護した温度センサプローブにおける表示温度シフトが小さかったのは、誘電損失が低くて誘電加熱が起きにくかったためであると考えられる。

表示温度のシフトが発生した理由として、マイクロ波による庫内空気そのもの(含まれる水分)が温められたことと、庫内の側壁の温度が上昇して、近傍の気体が温められ、庫内を循環しているためであると考えられる。

実際には、測定環境(水分、気体の流れなど)によって、マイクロ波照射後の温度変化量が異なると考えられる。温度制御のための温度センサとして用いる前に、表示温度シフトの大きさを把握しておくことが望ましい。

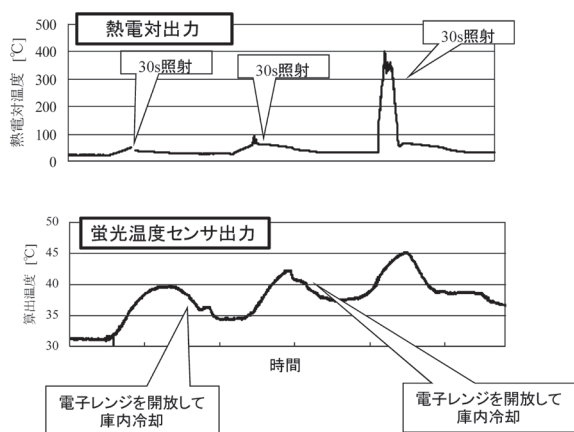


図 10. マイクロ波試験結果

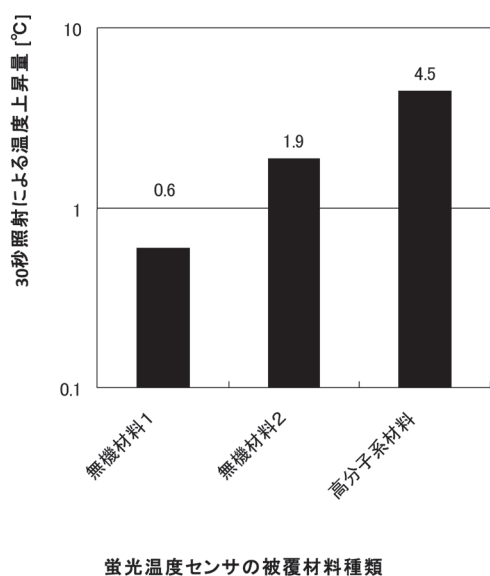


図 11. マイクロ波照射による表示温度シフト量

5. 蛍光温度センサのアプリケーション

蛍光温度センサは、電磁ノイズに無感であるという特色から、高周波プロセス中の温度制御を必要とする用途に用いることができる。想定できる応用例を、以下に掲げた。

半導体製造装置のプラズマ中の基板の温度測定、通電状態での集積回路の温度測定等に利用可能である。したがって、蛍光式温度センサおよび温度の測定方法は、半導体およびエレクトロニクス産業分野で利用可能である。

また、原油の2次および3次産出に用いる地中深くの蒸気の温度測定、および温度測定に基づくオイルパイプラインからの漏れ検知等、石油化学産業分野で利用可能である。

さらに、高電圧電力設備の保全等を目的とした、電力トランス巻線、高圧送電線、および発電器等の温度測定に利用可能である。

電子レンジ等で加熱中の食材の温度測定、マイクロ波を用いる殺菌装置又は乾燥装置の温度管理、高周波加熱を用いる木材、セラミックス、および繊維等の加熱装置、乾燥装置、および殺菌装置の温度管理に利用可能である。最近では、マイクロ波を用いた化学反応プロセス中での被処理物体の温度の測定に、用いられている。

さらに、超電導コイル、ハイパーサーミア装置やMRI装置の温度測定に利用可能である。

6. おわりに

蛍光温度センサは、高周波加熱プロセスにおける温度制御のための温度測定技術を具体化したものである。放射温度計とは異なって、低温度から高温まで幅広い範囲の温度測定を可能にする技術である。本稿では、商用利用が多い温度制御範囲を想定して開発した蛍光温度センサを紹介した。

高周波電磁場環境における温度計測を実現するだけでなく、自己発熱がない特性を利用して、低温度領域での正確な温度測定を実現すると考える。

蛍光温度センサの歴史は、他の方式のセンサと比べて新しい。しかし、特色がある温度センサである。応用する機会をみつめていきたい。

<参考文献>

- (1) K.T.V.Grattan and Z.Y.Zhang, “FiberOptic Fluorescence Thermometry,” Chapman & Hall (1995)
- (2) 衣笠, 秋季応用物理学会予稿集 (2010) 15a-ZL-7

<著者所属>

- | | |
|--------|---------------------------|
| 衣笠 静一郎 | 技術開発本部商品開発部 |
| 加藤 淳之 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 菊地 則雄 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 柳川 雄成 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |