

放射温度計における測定波長の最適化による 雰囲気ガス吸収影響低減の評価

Evaluation of Infrared Thermometer for Reduction of Influence of Gas Absorption by
Optimization of Spectral Response

藤野 翔

FUJINO Sho

近年、半導体やフラットパネルディスプレイの製造プロセスにおいて、より高精度に温度を測定するニーズが増えており、非接触温度計である放射温度計の要求が高まっている。しかし、半導体の製造工程で高濃度の反応性ガス雰囲気での処理が行われるため、汎用的な放射温度計では反応性ガスによって赤外線が吸収され、正確に測定対象物の温度を測定できない。そこで、反応性ガスの吸収の少ない波長のみを透過させる光学フィルタを用いた放射温度計を開発した。これによって、反応性ガスの吸収によるガス濃度影響を大幅に低減することができ、測定対象物の温度をより正確に測定することを可能とした。

Recently high-accuracy temperature measurement becomes more important in semiconductor and flat panel display (FPD) manufacturing processes. Especially the demand for non-contact thermometer is increasing. However, semiconductor manufacturing equipment uses high concentration reactive gases. These gases make it difficult to measure the temperature with high accuracy and repeatability, because the reactive gases absorb the infrared rays. We have developed the infrared thermometer using an infrared filter through which infrared rays of the wavelength with low reactive gas absorption pass. The influence of the NH_3 gas absorption of the infrared thermometer can be significantly reduced. Furthermore, the temperature of the measuring object in the reactive gas can be measured more accurately.

はじめに

各種工業において、温度計測のニーズはますます高まっている。最近では半導体やフラットパネルディスプレイ (FPD) の製造プロセスでも、より高精度に温度を測定するニーズが増えており、特に非接触温度計の要求が高まっている。

非接触式温度計である放射温度計は、測定対象物から放射される赤外線を検出して温度を求めている。そのため、測定対象物から放射温度計までの距離の間の大気の影響を最小限にする必要から水分 (水蒸気: H_2O) やオゾン (O_3)、二酸化炭素 (CO_2) の吸収の少ない“大気の窓”と呼ばれる測定波長 (8~14 μm) を採用して、湿度変化や測定距離の変化による測定誤差を最小限にしている。

しかしながら、半導体の製造工程で用いられる熱処理装置等は高濃度の反応性ガス雰囲気での処理を行う必要から、これら反応性ガスの赤外線の吸収により、高精度の温度測定が困難になってきている。そこで、この問題を解決するために、反応性ガスの吸収の少ない波長帯のみ透過する光

学フィルタを用いたサーモパイルセンサを搭載した放射温度計を開発した。

本稿では、最初に放射温度計の測定原理を説明し、次に反応性ガスの赤外線吸収スペクトルから、測定波長の選定過程を説明する。最後に、既に販売している半導体製造装置向け放射温度計IT-470F-Hをベースに新規開発した放射温度計を用いて、実際のガス濃度の影響を評価したので紹介する。

原理

放射温度計は非接触で測定対象物の温度を測定できる。その原理は測定対象物から放射される赤外線を検出し、その赤外線のエネルギー量をプランクの放射則に基づき温度換算している。プランクの放射則とは、物体の温度と物体が放射する放射エネルギーの関係を示したものである (Figure 1)。身近な例では、熱せられた800℃程度の鉄板は赤い光を放ち、さらに温度が上がるにしたがって白いまぶしい光を放つ。一方、常温の物体の場合、可視光は放って

おらず、赤外線を放出しているため、目視ではわからないが、手を近づけると、その物体に触れる前に暖かさを感じる。放射温度計は目視では見えない赤外線のエネルギー量を検出し、その物体の温度を測定することができる。

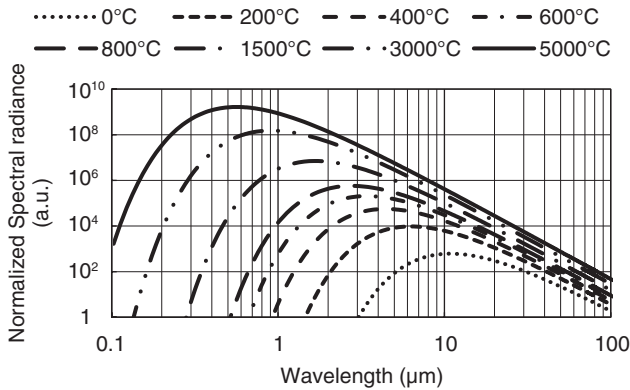


Figure 1 Planck's law (the relationship between the temperature of an object and the radiation energy emitted by the object)

$$I'(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

- $I'(\lambda, T)$: spectral radiation (J/(s · m² · sr · m))
- T : absolute temperature (K)
t(°C) = 273 + t (K)
- h : Planck constant (J · s)
- c : speed of light (m/s)
- λ : wavelength (m)
- k : Boltzmann constant (J/K) · m

測定波長

放射温度計を用いる際に重要な要素に測定波長がある。一般的に光学フィルタを組み込むことで放射温度計の測定波

長を限定している。

大気中に含まれる二酸化炭素(CO₂)や水蒸気(H₂O)等によって赤外線は吸収される。吸収される赤外線の波長はガス種ごとで異なり、そのガスの分子振動のモードでも吸収される波長は異なる。ガスによる赤外線の吸収率は、ランベルト・ベールの法則を用いて以下で表すことができる。

$$A = \frac{E}{E_0} = \exp\left(\frac{-K_A l P}{kT}\right) \dots\dots\dots (1)$$

A: 吸収率, E: ガス透過後のエネルギー, E₀: ガス透過前のエネルギー, K_A: 吸収係数(cm²/molecule), l: 光路長(cm), P: 圧力(Pa), k: ボルツマン定数(m²·kg/(s²·K)), T: ガスの温度(K)

この式からもわかるとおり、ガスの吸収率はその光路長、温度、圧力によって変わる。放射温度計の場合、光路長は放射温度計と測定対象物との距離となる。この距離はアプリケーションによって様々である。測定波長を誤ると、ガスの吸収によって、測定対象物の温度を正しく測定することはできない。具体的には、季節によって絶対湿度が変わった場合、指示値が変わってしまう。そのため、比較的ガスによる吸収が少ない波長帯で“大気の窓”と呼ばれる8~14 μmを測定波長とする放射温度計が一般的であることが多い。

反応性ガス雰囲気中の測定対象物の温度測定

半導体の製造工程で用いられる熱処理装置等は高濃度の反応性ガス雰囲気での処理を行う必要から、これら反応性ガ

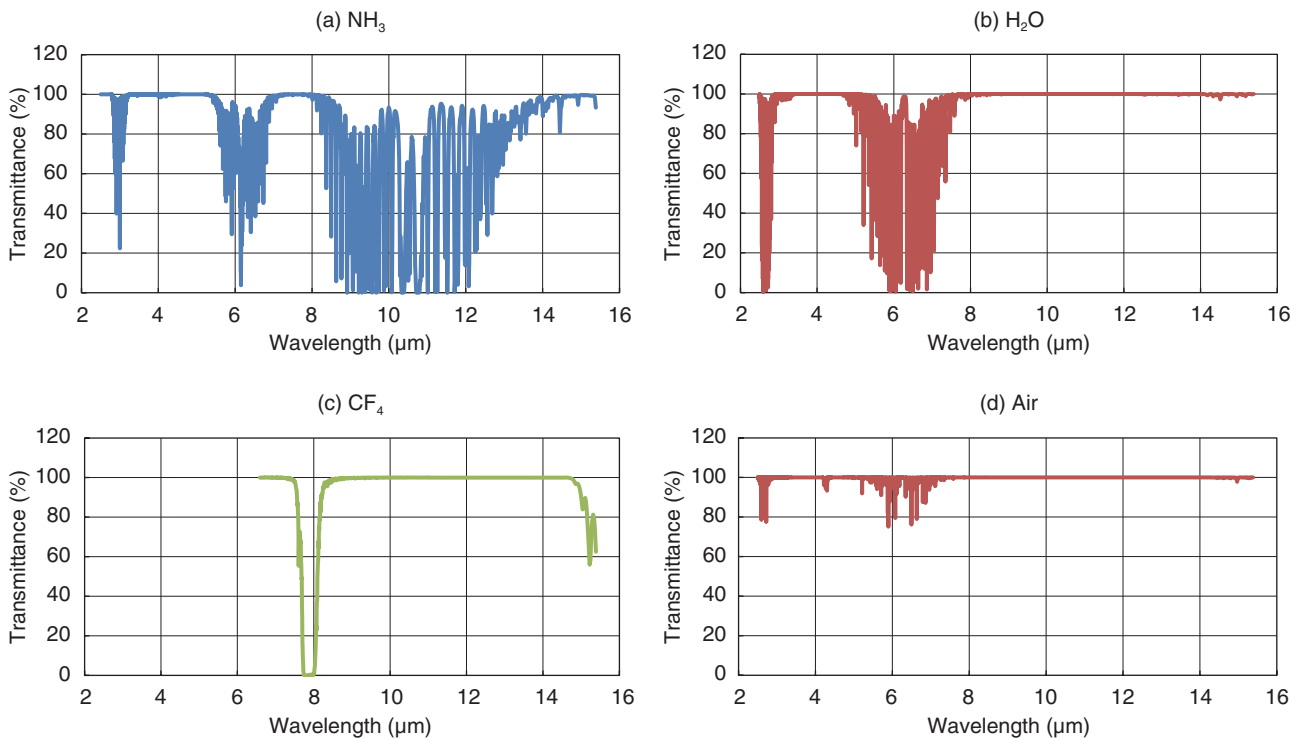


Figure 2 Transmission spectrums of representative reactive gas (1 atm, gas temperature 25°C, Optical path length 10 mm)

スの赤外線の吸収により、高精度の温度測定が困難になってきている。代表的な反応性ガスの透過スペクトルを **Figure 2** に示す。計算条件は、圧力1気圧、ガス温度25℃、光路長10 mm、各ガス濃度100%である。

これらの透過スペクトルから吸収ピークが比較的少ない波長帯を選択する必要がある。アンモニア (NH₃) ガスの場合、3.5~5 μm、7~8 μm に大きな吸収がなく、ガス影響を受けにくいと考える。また、水蒸気 (H₂O) の場合は、3.5~4.5 μm、8~14 μm が、四フッ化炭素 (CF₄) の場合は、9~14 μm がガス影響を受けにくいと考える。

プランクの放射則に基づく測定波長の選定

NH₃ガスは、半導体の製造工程の熱処理装置等でよく使用されているが、**Figure 2(a)** に示す通り、8~14 μm に吸収ピークが多数存在するため、一般的な大気の窓を使用した放射温度計での測定は困難である。NH₃ガスの吸収ピークが比較的少ない波長帯は3.5~5 μm と7~8 μm の2つ存在する。どちらの波長帯を選択するかは、ガスの吸収だけではなく、測定温度範囲や測定精度を考慮する必要がある。**Figure 3** に測定対象温度と波長の赤外線エネルギー量の関係を示す。波長帯は3.5~5 μm、7~8 μm の2つで比較した。8~14 μm は参考のため載せている。測定温度範囲や測定精度を考えると、赤外線エネルギー量を十分に確保した方が有利である。測定対象温度が0~200℃の範囲ではエネルギー量が大きな7~8 μm が有利であるが、200℃~1000℃の範囲では、3.5~5 μm の方が有利となる。しかしながら、3.5~5 μm は200℃以下では急激にエネルギー量が減っており、十分にエネルギー量を確保できない懸念がある。NH₃ガス雰囲気中の測定対象物の温度を測定する場合、0℃~1000℃の範囲で総合的にエネルギー量を確保するには、7~8 μm の方が有利であると考えられる。

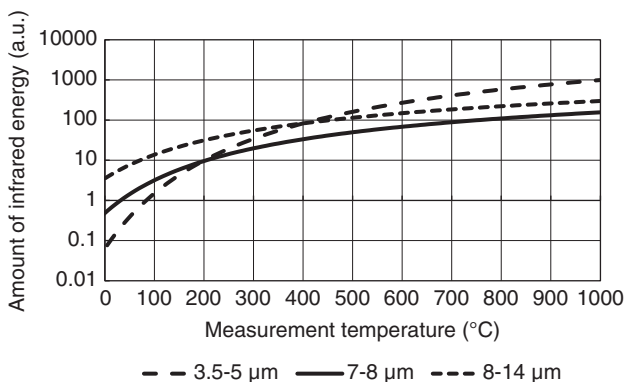


Figure 3 The relationship between the measurement temperature and the amount of infrared energy of each wavelength (Emissivity: 1.000)

アンモニアガス吸収影響を低減させた放射温度計

そこで、実際にNH₃ガスの吸収影響を低減させた放射温度

計を設計する。比較的吸収ピークが存在しない波長帯は、3.5~5 μm と7~8 μm があるが、前述したとおり、7~8 μm を使用する設計とし、既に販売している放射温度計IT-470F-H (**Figure 4**) をベースにて新規開発した。

次に、開発した放射温度計の評価を **Figure 5** に示す実験配置で行った。

反応性ガスによる放射温度計の指示値の変化を評価するため、ガス濃度の影響を調べた。濃度の異なるNH₃ガスを充填したガスセルを用意し、ガスセルを変えた際の放射温度計の指示値を測定した。ガスセルは1気圧、濃度0、15、50、100%の4種類を用意した。ガス濃度の希釈には不活性ガスである窒素 (N₂) を用いた。NH₃ガスを充填した部分の厚みは10 mm であり、光路長に相当する。ガスセルに用いた赤外窓は厚さ3 mm のフッ化カルシウムである。ガスセル、放射温度計の温度は常温で安定させている。ガス濃度0% (N₂ガス100%) のガスセルの指示値を基準とするため、ガス濃度0%において指示値が165℃となるように面熱源の温度を調整した。放射温度計は一般的な8~14 μm の光学フィルタを使用したものと7~8 μm の光学フィルタを用いたものを準備し、比較することでNH₃ガスの濃度の影響を調べた。



Figure 4 Infrared thermometer for semiconductor production equipment IT-470F-H

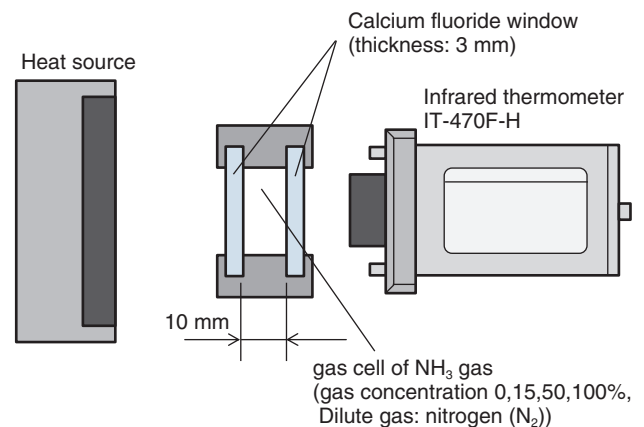


Figure 5 Experimental setup

アンモニアガス吸収影響を低減させた 実験結果

Figure 6に実験結果とガススペクトルから放射温度計の指示値を算出した結果を示す。8~14 μm は NH_3 ガス濃度が高くなるにしたがって、指示値が低下し、ガス濃度100%で指示値が20℃程度低下しているのに対して、7~8 μm は1℃以内の変動でほぼ一定であることがわかる。そして、計算結果とよく一致した。実験としては、光路長10 mmで測定を行ったため、7~8 μm では指示値の低下がほとんど見られなかった。一方、光路長が200 mmの場合、 NH_3 ガス濃度100%で8~14 μm では約65℃も低下するのに対して、7~8 μm では約5℃しか低下しないことが予想される。これは光路長が長くなることで7~8 μm 帯にも僅かながら吸収ピークが現れるからである。

以上のことから、反応性ガスである NH_3 の吸収ピークを避けて測定波長を選択することで、放射温度計のガス濃度影響を大幅に低減することができた。且つ、計算結果から光路長が長い場合の指示値を見積もることができた。

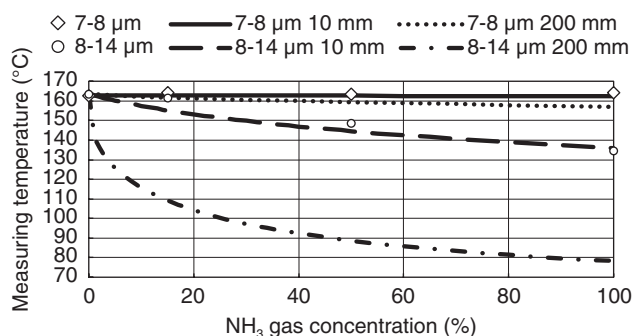


Figure 6 Influence of NH_3 gas absorption about difference of spectrum response
(plot: Experimental result, Dotted line: calculation result)

おわりに

反応性ガスの吸収の少ない波長のみを透過させる光学フィルタを用いた放射温度計を開発した。これによって、反応性ガスの吸収によるガス濃度影響を大幅に低減することができ、反応性ガス雰囲気中の測定対象物の温度をより正確に測定することを可能とした。半導体の製造工程に限らず、今後、多種多様なガス雰囲気中の温度測定のニーズも高まるであろう。我々は、光学フィルタやサーモパイルセンサを自社内で、開発・生産を行っている。そのため、新たなニーズに応えられる解決策を提案できると考えている。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

参考文献

- [1] 計測技術, 602, Vo.46, No.2, p.114, (2018)
- [2] 大須賀直博, 古川泰生, *Readout*, No.43, p.70, (2014)



藤野 翔

FUJINO Sho

株式会社 堀場製作所
開発本部 製品開発センター 化学・半導体開発部
Scientific & Semiconductor Instruments R&D Dept.
Product R&D Center
Research & Development Division
HORIBA, Ltd.