電波透過性輻射断熱材の光学特性

木 町 良 弘, 道 上 修

NTT 境界領域研究所 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1992 年 12 月 16 日受理)

Infrared Characteristics of Dielectric Thermal Radiation Insulators for Microwave Transmission

Yoshi-hiro KIMACHI and Osamu MICHIKAMI

NTT Interdisciplinary Research Laboratories, 162 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki 319-11

(Received December 16, 1992)

Synopsis :

Non-metallic thermal insulators are investigated in order to replace "metallic super insulations" as radiation shields for cryo-cooling systems of superconducting devices, which emit and/or receive microwave radiation, such as antennas. As candidates, layered refractive wafers and multi-layered thin film filters are demonstrated. Layered Germanium wafers with spacings indicate that the total infrared reflectance increases with the number of wafers, but gradually saturates because of the slight infrared absorption of Germanium. Thermal insulation experiments show that the reflection efficiency, η , assuming black body radiation is incident, correlates well with experimental thermal insulation efficiencies. On this basis, infrared reflection characteristics are obtained for a variety of filters of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m/\text{Si}$. Infrared spectra of these filters have demonstrated that single band filters have a η -maximum of $\sim 72\%$, and that extended filters composed of double band filters lead to a reflection efficiency of $\sim 82\%$.

1. はじめに

近年, 転移温度が液体窒素温度よりも高い酸化物超伝導体が発見され, 超伝導材料の応用研究がますます盛んになっている。実用部品への応用の一つとして, マイクロ波通信用アンテナ^{1~6)}が挙げられる。これは超伝導材料が転移点以下の温度で金属材料より低い高周波表面抵抗を有する^{7,8)}ことを利用して素子の小型化, 高性能化を図るものである。従来のアンテナ素子は金属材料で構成され, 常温で用いられる。これに対し, 超伝導アンテナはクライオスタットを用いて転移温度以下に冷却する必要がある。

冷却, 断熱系には電波透過が可能な非金属製クライオスタットを用いる。同時に, 通常, 真空断熱部に用いるアルミ箔を含むスーパーインシュレーションも用いることができない。さらに, 非金属デュワー表面の熱輻射率は金属に比較して 2 桁近く大きい。これらの理由から, スーパーインシュレーションを用いない非

金属製クライオスタットでは, 金属製クライオスタットに比較して輻射熱流入が著しく増大する。したがって, 電波を低損失で透過し, なおかつ輻射熱流入を阻止する誘電体断熱材の実現が不可欠である。

本報では, 電波透過が可能な誘電体輻射断熱材について検討した。具体的には,

- (1) 高屈折率材料の高表面反射率を利用した板材積層型断熱材
- (2) 高屈折率材料と低屈折率材料を交互に積層した多層膜による赤外域反射干渉フィルター

の二種類の断熱材について赤外域での光学反射特性, および断熱特性を検討したので結果を報告する。

2. 実 験

2.1 光学反射特性

室温側デュワー内壁からの輻射が黒体輻射エネルギー分布を持つと仮定すれば, Wien の変位則から, 最大エネルギー波長は約 $10\ \mu\text{m}$ であり, 数 μm ~ 数十 μm

の波長領域でエネルギー分布を持つ。したがって、電波を透過する誘電体断熱材は、この波長領域で赤外吸収が少ないことが要求される。そこで高屈折率材料として Ge (屈折率⁹⁾~4.0), 低屈折率材料としては BaF₂ (屈折率⁹⁾~1.4) を用いることとした。これらの材料を赤外領域の光学材料として用いる場合の波長限界は Ge: 1.8~15 μm , BaF₂: 0.15~13 μm 程度である (いずれも、厚さ 2 mm の材料で外部透過率 10 % となるカットオフ波長¹⁰⁾を示す)。

高屈折率基板積層型断熱材としては Ge の 2 インチ径ウエファー (0.5 mm 厚) を用いた。

多層膜は 0.25 mm 厚、12 mm² の Si 基板上に BaF₂ 薄膜と Ge 薄膜を電子ビーム蒸着法により交互に積層して形成した。蒸着室の到達真空度は $\sim 5 \times 10^{-8}$ Torr, 蒸着中も 5×10^{-7} Torr を越えなかった。電子銃の加速電圧は 4 kV, エミッション電流は Ge の場合 150 mA, BaF₂ の場合 40 mA 程度であった。蒸着速度は Ge で約 2 $\text{\AA}/\text{s}$, BaF₂ で約 10 $\text{\AA}/\text{s}$ であった。蒸着膜厚制御は水晶振動子膜厚計を用いて行った。この際、測定膜厚は触針式膜厚計を用いた段差測定により、あらかじめ校正した。

輻射反射効率を評価するため、各断熱材の赤外領域における光学反射スペクトルを赤外分光 (FTIR) により測定した。用いた装置は PERKIN-ELMER 社 1800 型である。反射スペクトルは入射角 6.5° で測定し、Au ミラーによる参照スペクトルとの比により反射率を求めた。スペクトルの波数分解能は 2 cm^{-1} , 測定波数域は 4,000~450 cm^{-1} (波長: 2.5~22.2 μm) である。また、さらに長波長域のフィルターについては遠赤外分光 (FIR) 装置を使用した。この場合の測定波数域は 4,000~150 cm^{-1} (波長: 2.5~66.7 μm) であった。各フィルターについて反射特性を測定した後、得られたスペクトルから輻射反射効率を計算した。この際、入射放射線としては室温黒体放射を仮定した。

多層膜赤外フィルターの作製に先立ち、フィルターの設計膜厚を決定するため、実際に形成した薄膜の屈折率を赤外反射干渉パターンから求めた。具体的には、ガラス基板上に形成した既知膜厚の薄膜について反射干渉パターンを測定し、赤外領域の平均的な屈折率を求めた。反射特性のモデル計算にはこの実験的に求めた屈折率を用いた。

2.2 断熱特性

高屈折率基板積層型断熱材の断熱特性を測定した。測定は GFRP 製の二重デュワーを用いた液体窒素貯

留試験により行った。デュワーはガラス繊維、およびエポキシ樹脂を用いて含浸法により積層して作製した。内槽の内径は 60 mm^φ, 内深は 120 mm (内容積約 340 ml) である。真空断熱部は 2×10^{-4} Torr 程度まで排気した。

本報の実験では、非金属輻射断熱材の断熱特性を明らかにするため、便宜的に一部にスーパーインシュレーション材を用いた。スーパーインシュレーションには 20 μm 厚のアルミ蒸着ポリエステルフィルムを用い、50 μm 厚の紙スペーサーを介して自然充填状態で 16 層設けた。さらに、底部のスーパーインシュレーションに 2 インチの開口部を設けた上で 2 インチ径 Ge ウエファーを 0.5 mm のスペーシングで積層して設置した。スペーサーとしては $2 \times 4 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 程度のテフロンチップを用いた。

内外槽を上部フランジ部でアルミ製フランジにより固定した後、10 mm 厚 SUS フランジを装着した。デュワー内部には 1 mm 厚アルミ製輻射シールド板を約 3 mm の間隔で 8 層設けた。液体窒素貯留試験はいったん内槽を液体窒素で満たした後、残留量が底部約 141 ml (深度 5 cm) となった時間を開始点として、この液体窒素が枯渇して内槽底部が温度上昇し始めるまでの時間から平均熱流入量として求めた。

基板設置部分にスーパーインシュレーションを設けた場合と Ge 基板の積層を設けた場合についてそれぞれ平均熱流入量を求めた。ここでは、断熱材を変えても輻射以外の熱流入は常に一定であると仮定し、さらにスーパーインシュレーションを施した場合には 2 インチ径部分の輻射断熱効率が 100 %, 何も設置せず内槽デュワー表面を露出させた場合の効率を 0 % として Ge 基板の輻射断熱性を評価した。

3. 結果と考察

3.1 高屈折率基板積層型輻射断熱材

0.5 mm 厚の Ge ウエファーを約 0.5 mm のスペーシングで複数枚重ね、反射スペクトルを測定¹¹⁾した。結果を Fig.1 に示す。波数 (=1/波長) 2,400 cm^{-1} 付近の吸収は測定雰囲気中の CO₂ による吸収である。高波数 (短波長) 側の反射率は層数の増加とともに増加する一方、1,800 cm^{-1} 以下の領域で Ge が内部吸収を持つため、反射率の増加が飽和している。内部吸収がほとんどない領域、例えば波数 1,000 cm^{-1} における 1 枚のウエファーによる反射率は約 53 % である。これは Ge、および空気の屈折率をそれぞれ 4.0, 1.0

Fig. 1 IR reflection spectra for layered Germanium wafers with 0.5 mm spacings.

とした場合に Fresnel の法則から計算される反射率 0.529 と良く一致する。 n 枚のウェファァーをスペーシングを置いて積層した場合の総反射率 R_n は (1 a), (1 b) 式の漸化式で与えられる。

$$R_{n+1} = R_n + \frac{2R}{1+R}(1-R_n)^2 \quad (1a)$$

$$R_1 = \frac{2R}{1+R} \quad (1b)$$

ここに R は、空気、および Ge の屈折率を n_L, n_H とした場合、(2) 式に与えられる (空気/Ge) 界面の Fresnel 反射率である。

$$R = \left(\frac{n_L - n_H}{n_L + n_H} \right)^2 \quad (2)$$

また、得られた反射特性から、測定波長域での平均反射率 R_{av} 、および入射放射線として黒体放射エネルギー分布 $E(\lambda)$ を仮定した場合の輻射反射効率 η を式 (3), および (4) のように定義することとする。

$$R_{av} = \int_{2.5}^{22.2} R(\lambda) d\lambda / \int_{2.5}^{22.2} d\lambda \quad (3)$$

$$\eta = \int_{2.5}^{22.2} E(\lambda) R(\lambda) d\lambda / \int_{2.5}^{22.2} E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Fig. 1 に得られた Ge 積層型断熱材の反射特性から、(3), (4) 式を用いて平均反射率 R_{av} 、および黒体放射反射効率 η を計算した結果を Fig. 2 に示す。図には式 (1 a), (1 b), (2) を用いて計算した光学反射率 (無吸収を仮定) をあわせて示している。三者がほとんど一致するのは Fig. 1 に得られた反射特性が測定波長域でほぼ平坦であるためである。層数が増加するにつれて平均反射率 R_{av} が計算値より低下するのは長波長域での Ge の内部吸収による。一方、輻射反射

Fig. 2 Calculated reflectance, experimental radiation reflection efficiency, η , and experimental average reflectance vs. number of Germanium wafers.

効率 η は入射線として仮定した黒体放射が約 $10 \mu\text{m}$ 波長で最大エネルギーを有し、これを中心とした両波長域で比較的速やかに減衰するため、 R_{av} より高く現われる。これらの結果から、高屈折率基板積層型輻射断熱材では、積層数の増加とともに R_{av} , η が増加するが、やや飽和する傾向にあることがわかる。

次に高屈折率基板積層型輻射断熱材の断熱特性を調べた。結果を Fig. 3 に示す。測定の概要を図中の挿入図に示す。グラフ縦軸の断熱効率は、Ge 基板設置部にスーパーインシュレーションを設置した場合の断熱効率を 100%, 何も設置しない場合を効率 0% として求めた。断熱効率の積層数依存性は Fig. 2 で示した光学反射率、あるいは黒体放射断熱効率と同様の傾向を示し、積層数の増加とともに向上していくが徐々に飽和の傾向にあることがわかる。

Fig. 1 で示した光学反射特性から評価した輻射反射効率 η と Fig. 3 で示した断熱特性の関係を明らかにするため、これらの相関を Fig. 4 にプロットした。この結果から、 η と実際の断熱効率はほぼ直線的な相関を持つことがわかる。実際の断熱効率が、輻射反射効率 η と完全には一致しない原因は以下のように推定される。 η を算出する際、入射する放射として黒体放射エネルギー分布を仮定しており、実際に FRP 外槽内壁から放出される放射エネルギー分布が黒体放射分布からずれている可能性があること、真空断熱部の残留ガスによる対流熱伝達量がスーパーインシュレーションの場合と、Ge ウェファァーを用いた場合とで異なる可能性があることなどが考えられる。

Fig. 3 Thermal insulation efficiency of Germanium wafers obtained from setup of inserted figure.

長波長域まで赤外吸収が少なく屈折率の高い Ge, Si などは半導体であるため、総反射率を増加させるために積層数を増加することはクライオスタットの電波透過性¹²⁾を劣化させる。このため、電波透過性が高く、単一の基板でさらに反射効率を向上できる可能性のある多層膜輻射断熱材を作製し、赤外反射特性について検討したので、この結果について次に述べる。

3.2 誘電体多層膜輻射断熱材

基板上に高屈折率、および低屈折率材料の交互積層膜を形成する光学反射干渉フィルターでは表面、および各界面からの反射光を同位相とすることで特定波長を中心とした特定領域の反射率をほぼ 100 % とすることができる。光学干渉フィルターでは、多層膜を構成する各薄膜の屈折率を n 、物理厚さを d とするとき、 $(4nd)$ が反射帯域の中心波長となる。したがって、各層の光学厚さを $2.5 \mu\text{m}$ とすれば、最大エネルギー波長約 $10 \mu\text{m}$ である室温黒体輻射に対する最も効率的な単一反射帯域フィルターとなると推定される。本節ではこの原理にしたがって輻射に対する反射フィルターを形成し、室温黒体輻射に対する反射効率を評価した。

$(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m$ 多層膜/Si 基板の構成の反射フィルターの作製に先立って、実際に形成される Ge, BaF_2 薄膜の屈折率を求めた。十分厚い基板上に形成した物理厚さ d の光学薄膜に対して入射角 θ で入射した波長 λ (波数 $k=1/\lambda$) の輻射に対する反射率 $R(k)$ は干渉強度計算¹³⁾から、

$$R(k) = \frac{4n_t^2 n_s}{n_t^2(1+n_s)^2 - (1-n_t^2)(n_t^2 - n_s^2) \sin^2\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (5a)$$

Fig. 4 Correlation between thermal insulation efficiency and radiation reflection efficiency, η .

Fig. 5 IR reflection spectrum for $5 \mu\text{m}$ -band filter of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^2/\text{Si}$ with calculated spectrum.

$$\sigma = 4\pi n_t d k \quad (5b)$$

の形に表される。ただし、 n_t , n_s はそれぞれ薄膜、および基板の屈折率である。したがって、厚さ d が既知の単層薄膜の反射スペクトル (反射率 R の波数 k 依存性) を求めれば薄膜材料の屈折率 n_t が求められる。ガラス基板上に形成した Ge, および BaF_2 薄膜の反射スペクトルを求め、その反射干渉パターンから、 $n_{\text{Ge}}=4.35$, $n_{\text{BaF}_2}=1.49$ が得られた。これらの屈折率はいずれも $2\sim 10 \mu\text{m}$ 波長域での屈折率文献値⁹⁾ (Ge : $4.10\sim 4.00$, BaF_2 : $1.46\sim 1.40$) と約 6 % 以内の誤差で一致した。本実験では多層膜の膜厚決定、および反射強度計算にこの実験的に求めた屈折率を用い

Fig. 6 IR reflection spectrum for 10 μm -band filter of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)_2/\text{Si}$ (open circles) with normalized black body radiation energy distribution at RT (thin line). Thick line demonstrates non-reflected radiation energy.

た。

3.2.1 単一反射帯域フィルター

単一の反射帯域を有する多層膜フィルター $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)_2/\text{Si}$ 基板の反射特性を調べた。5 μm 帯域フィルターの結果を Fig. 5 に示す。作製した試料の反射スペクトルには測定室中の雰囲気ガスの擾乱（レファレンススペクトルと本スペクトル測定時の雰囲気ガス濃度の差異による擾乱）による成分が重畳して現われるが、断熱材は真空雰囲気中で使用するため、無視することができる。2,400 cm^{-1} 付近のディップは CO_2 、1,600 cm^{-1} 付近の乱れは水分によるものである。図には 5 μm フィルター反射特性の計算¹³⁾の結果を同時に示す。測定した反射特性と計算結果はほぼ一致していることがわかる。実際の反射材では有限厚さ 2.5 mm の基板を用いているため、基板下面からの反射も無視できない。したがって、基板が有限厚さを持ち、基板上下面の平行度が完全であるとして反射特性を計算した。この結果、基板上下面からの反射光の干渉で反射特性は非常に大きくばらついたためスムージングを行ったものを示している。計算結果の反射特性が、特に低反射率となる領域で幅を持つ結果となっているのはこの干渉効果によるものである。

Fig. 6 に 10 μm 帯域フィルターの反射特性（図中○印）を示す。1,000 cm^{-1} (10 μm) 域の 1 次反射帯に加えて、3,000 cm^{-1} 域に高次の反射帯も現われている。高次反射帯は 1 次反射帯に比較して肩が鈍化しており、両反射帯の中間に現われるリップル状のパター

Fig. 7 IR reflection spectra for 10 μm -band filters of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m/\text{Si}$.

ンは非対称である。これらの原因は作製した多層膜の各膜厚が厳密には所定の膜厚に合致していないためである。一方、800~900 cm^{-1} の反射域の肩の鈍化は多層膜内部で入射光が多重反射する際の赤外内部吸収のためである。この領域では Ge はほとんど吸収を持たない⁹⁾ため、 BaF_2 層の吸収によるものと考えられる。図には示さないが、Si 基板面側の反射特性は Fig. 6 の結果とほぼ同様の特性を示すが、赤外光が反射膜に到達する前に Si 基板中を透過し、反射されてからもさらに Si 基板中を透過するため、反射域内部で Si 基板内部吸収がおき、1,100 cm^{-1} 付近に 10 % 程度の吸収ピークが見られた。Fig. 6 には 10 μm フィルターの反射特性とともに規格化した黒体輻射エネルギー分布（図中細線）とこれがフィルターに入射したと仮定した場合に透過、あるいはフィルターに吸収される輻射のエネルギー分布（図中太線）を示す。入射輻射線のうち最もエネルギーの高い 1,000 cm^{-1} を中心とする領域は良く反射されるものの、両脇の波数帯域でなお無視できない輻射エネルギーが透過、あるいは吸収されることがわかる。

単一フィルターの輻射断熱効率の限界を明らかにするため、中心波長 10 μm のフィルター $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m/\text{Si}$ について断熱効率 η の積層数 m 依存性を調べた。常温黒体輻射エネルギー分布は約 1,000 cm^{-1} (10 μm) で最大強度を持つため、単一反射帯域フィルターの場合、反射中心波数を 10 μm 程度にした場合に最大の断熱効率となることが予想される。 $m=1, 2, 3, 4$ の場合について反射スペクトルを測定した。 $m=1, 2, 4$ の場合の反射特性を Fig. 7 に示す。これらの結果か

Table 1 Efficiency, η dependence on layer number, m for 10 μm -band filter of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m/\text{Si}$.

Layer number, m	Efficiency, η [%]
1	70.6
2	71.7
3	69.0
4	69.1

Fig. 8 IR reflection spectrum for double band (10 μm -, and 5 μm -band) filter of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^2/\text{Si}/(\text{BaF}_2/\text{Ge})^2$ (open circles). Also shown are 10 μm -band (thin line) and 5 μm -band (thick line) filters.

ら、式(4)を用いて輻射断熱効率 η を求めた結果をTable 1に示す。積層数 m の増加とともに反射スペクトルのパターンが大きく変化しているにもかかわらず、断熱効率 η はスペクトルの変化ほど大きく変化しない。反射域の反射率が増加する一方で反射帯域幅が減少するためである。これらの結果から、単一フィルターでは最も輻射反射効率が良いと思われる10 μm 帯域フィルターで最大72%程度の効率が得られた。この効率は3.2.1節で述べたGe基板断熱材の1層の場合の反射効率約53%に比較すると大きく向上した。さらに、異なる反射帯域フィルターを積層することにより反射帯域を広帯域化し輻射反射効率の向上を図る。

3.2.2 複合反射帯域フィルター

ここでは二種類の複合化、すなわち、

(i) 基板の両面に異なる単一フィルターを形成する方法(両面型)

(ii) 基板の片面に異なる単一フィルターを連続的に

Fig. 9 IR reflection spectrum for double band (10 μm -, and 5 μm -band) filter of $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^2/(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^2/\text{Si}$ (open circles). Also shown are 10 μm -band (thin line) and 5 μm -band (thick line) filters.

積層する方法(片面型)

を検討する。

まず、(i)の構成の複合フィルターについて述べる。 $L=(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^2$ とすると、構造は $L_1/\text{Si}/L_2$ である。Fig. 8に $L_1=10\mu\text{m}$ フィルター、 $L_2=5\mu\text{m}$ フィルターとした場合について、10 μm フィルター側の反射特性(図中○印)を示す。また、図には5 μm フィルター(太線)、および10 μm フィルター(細線)の反射特性を同時に示す。裏面に設けた5 μm フィルターによって10 μm フィルターの1次、および高次反射域の中間波数領域(1,500~2,500 cm^{-1} 域)の反射率が向上し、反射帯域が広帯域化していることがわかる。このフィルターについて輻射断熱効率 η を求めた結果、74.3%と10 μm 帯域単一フィルターより向上した。

次に、(ii)の構成のフィルターについて述べる。構造は $L_2/L_1/\text{Si}$ である。Fig. 9に $L_1=5\mu\text{m}$ フィルター、 $L_2=10\mu\text{m}$ フィルターの場合について反射特性を示す。図には10 μm フィルター(細線)、および5 μm フィルター(太線)の結果を同時に示した。5 μm フィルターによって10 μm フィルターの両反射域の中間波数領域の反射率が向上していることがわかる。両面型の場合(Fig. 8)に比較して中間波数領域での切れ込みが深くなっていること、10 μm 域、3 μm 域の反射域に弱いディップを生じていること等を除くと両面型の場合の結果とほぼ同等の結果となった。次に

Fig. 10 (a) IR reflection spectrum for double band (10 μm - and 15 μm -band) filter (open circles). Also shown are 10 μm -band (thick line) and 15 μm -band (thin line) filters. (b) Double band filter shown in (a) with normalized black body radiation (thin line). Thick line demonstrates non-reflected radiation.

$L_1=15\ \mu\text{m}$ フィルター, $L_2=10\ \mu\text{m}$ フィルター (いずれも $m=2$) の場合の反射特性を Fig. 10(a) に示す。図には 10 μm 域フィルター (太線), および 15 μm フィルター (細線) の反射特性を同時に示す。積層化した結果, 反射域での反射率は向上し, 500 cm^{-1} 付近の反射率も向上したものの, 600 cm^{-1} 付近に鋭いディップを生じた。このディップは Fig. 9 (10 μm /5 μm フィルター/Si 基板) の結果から予想されるよりも深い。これは, 多層膜内部で多重反射する際に膜内部で赤外吸収がおきたためと推定される。このフィルター

Table 2 Radiation reflection efficiency, η of multi-layered infrared filters. Wavelengths divided by double slashes correspond to the wavelength of each filter of double band filters. (GB) represents (Ge/BaF₂).

Layered structure	Center wavelength [μm]	Efficiency, η [%]
Single band filters :		
(GB) ² /Si	5	48.3
(GB) ² /Si	10	71.7
(GB) ² /Si	20	64.3
Double band filters :		
(GB) ² /Si/(GB) ²	10//5	74.3
(GB) ² /(GB) ² /Si	10//5	75.0
(GB) ² /(GB) ² /Si	10//15	81.6
(GB) ¹ /(GB) ¹ /Si	12//7	75.6
(GB) ² /(GB) ² /Si	12//7	81.8

の輻射断熱効率 η は 81.6 % となった。これらの結果から, 10 μm フィルターを中心として高波数側, 低波数側両方に補助的なフィルターを付加することによって, さらに高い輻射断熱効率を得ることができるものと考えられる。

Fig. 10(b) に Fig. 10(a) のフィルターに対して黒体輻射を入射した場合の透過・吸収される輻射のエネルギー分布を示す。Fig. 6 に示した 10 μm フィルターの結果と比較すると, 10 μm 反射帯域の両端で反射率が改善された結果, 吸収・透過する輻射エネルギーが減少していることがわかる。

3.2.3 赤外輻射断熱効率

以上に (Ge/BaF₂)^m 多層膜輻射断熱材の赤外域における光学反射特性の例を示した。これまでに作製したフィルターの構成と輻射反射効率 η をまとめて Table 2 に示す。単一反射帯域のフィルターでは, 最も反射効率が高いと考えられる 10 μm 帯域フィルターで 72 % 程度の η が得られた。さらに, 異なる反射帯域フィルターを複合化することにより, 効率 η が向上できることがわかる。12 μm 帯域と 7 μm 帯域フィルターを積層した複合フィルターでも Fig. 10 に示した 10 μm , 15 μm 複合帯域フィルターと同程度の効率 η が得られた。複合フィルターにおいて各々のフィルターは $m=1$ よりも $m=2$ のほうが高い効率 η が得られた。今後, フィルター構成の最適化などによりさらに効率 η が向上できるものと考えられる。

4. ま と め

アンテナなどの超伝導デバイスの冷却系に不可欠な電波透過型輻射断熱材の指針を示し、基本検討の結果を示した。Ge 基板を空隙において積層した高屈折率基板積層型断熱材では、積層数の増加とともに光学反射率は増加するが、基板赤外吸収のために徐々に飽和する。また、断熱特性を調べた結果、入射する輻射として黒体輻射を仮定した輻射反射効率 η が実際の断熱効率とほぼ一致することを示した。これをもとに、1枚の反射材でさらに断熱効率を向上できる可能性の有る(高屈折率/低屈折率材料)交互多層膜による赤外域光学フィルターの輻射断熱材としての適用性を検討した。Si 基板上に形成した $(\text{Ge}/\text{BaF}_2)^m$ 系フィルターについて検討した結果、単一帯域フィルターでは72%程度の η に留まるものの、二種類の帯域フィルターを積層した複合フィルターにより、約82%の η を得ることができた。多層膜構成の最適化により、さらに断熱効率が向上できるものと思われる。

電子ビーム蒸着についてご協力いただいたNTT光エレクトロニクス研究所 疋田 真主任研究員、FIR測定についてご協力いただいた同基礎研究所 藤木道也主幹研究員に深く感謝いたします。また、本研究を通じ、貴重な意見をいただいた同境界領域研究所 越本泰弘主幹研究員、石井 修主幹研究員に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) S. K. Khamas, M. J. Mehler, T. S. M. Maclean, C. E. Gough, N. M. Alford and M. A. Harmer: *Electron Lett.* **24** (1988) 460
- 2) R. J. Dinger, D. R. Bowling and A. M. Martin: *IEEE Trans. MTT-39* (1991) 1498
- 3) K. Itoh, O. Ishii, Y. Koshimoto and K. Cho: *IEICE Trans. Jpn.* **E75-C** (1992) 246
- 4) K. Itoh, O. Ishii, Y. Koshimoto and K. Cho: *IEICE Trans. Electron* **E-75 C**, No. 2(1992) 246
- 5) K. Itoh, O. Ishii, O. Nagai, N. Suzuki, Y. Kimachi and O. Michikami: *J. Supercond.* **5** (1992) 485
- 6) O. Ishii, Y. Yamada, K. Kagoshima, K. Itoh and Y. Kimachi: *Proc. ISAP '92* (1992) 1005
- 7) O. Ishii, Y. Kimachi, K. Itoh, T. Konaka, M. Sato and U. Mizutani: *Proc. ISS '91* (1991); *Advances in Superconductivity IV*, Springer-Verlag, Tokyo (1992) 938
- 8) 大嶋重利, 河野 仁, 奥山克郎, 澤谷邦男, 野口啓介: *低温工学* **27** (1992) 408
- 9) W. G. Driscoll: *Handbook of Optics*, Optical Society of America, McGraw-Hill, New York (1978) 7-71, 77
- 10) H. L. Hackforth: 赤外線工学, 近代科学社 (1963) 118
- 11) 木町良弘, 道上 修: 1992年電子情報通信学会秋季大会予稿 **C-369**
- 12) 木町良弘, 鈴木尚文, 伊藤圭一郎, 道上 修: 信学技報 SCE, CPM 投稿中
- 13) 草川 徹: レンズ光学—理論と実用プログラム, 東海大学出版会 (1988) 273