



Title	円孔配列薄膜フィルターのテラヘルツ電磁波透過特性
Author(s)	長島, 健; 木村, 裕司; 萩行, 正憲
Citation	大阪大学低温センターだより. 2002, 119, p. 4-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3893
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

円孔配列薄膜フィルターの テラヘルツ電磁波透過特性

超伝導フォトニクス研究センター 長島 健、木村 裕司、萩行 正憲（内線4223）

E-mail: nagasima@rcsuper.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

電波と光の境界に位置するテラヘルツ領域（0.1～10THz）の研究は、1980年代にこの領域の時間領域分光法が開発^{1,2)}されてから急速に進歩した。テラヘルツ領域の時間領域分光法においては放射アンテナから放射された電磁波パルスの電磁波波形（振幅）を測定する。これが時間領域分光法の最大の特徴である。テラヘルツ時間領域分光法で用いられる光学素子（フィルターや偏光子など）は現状では従来の遠赤外領域で使用されていた素子が流用されることが多い。その中に本ノートでとりあげる、金属板あるいは薄膜に波長程度の周期をもつ穴配列をあけた金属メッシュフィルター（以降、フィルター）がある。この光学素子の周波数特性についてはこれまでに分散型分光器あるいはフーリエ分光器などを用いて詳細に調べられている。これら従来の分光法では電磁波の振幅の2乗の時間平均値を測定するが、時間領域分光法においてフィルターを使用する場合には周波数特性だけでなくその時間変化についても知ることができる。この種の金属薄膜フィルターは例えばパスバンドの透過率が1に近いなど非常に高効率である。金属によって空間が遮られているのにそのような透過率を示すのは一見奇妙な現象である。この現象について、周波数特性の時間分解測定によってパスバンド（あるいはストップバンド）の形成過程を明らかにすることにより、なんらかの知見が与えられると期待できる。そこで本ノートでは、金属薄膜フィルターのテラヘルツ透過電磁波波形を測定することにより、金属薄膜フィルターの周波数スペクトルの時間発展を調べた結果を報告する。さらに通常の金属ではなく、もっと変わった材料でフィルターを作れば従来のフィルターとは異なる種々の機能を附加できると期待される。そこで高温超伝導体薄膜で作製したフィルターの透過特性の温度依存性について調べた結果についても報告する。

2. テラヘルツ時間領域分光法

本研究で用いたテラヘルツ時間領域分光システムについて述べる。この分光法の最大の特徴は放射された電磁波の波形（振幅）を測定できる点にある。

光学系の概略図を図1に示す。モード同期 Ti:sapphire レーザから発振されたパルス幅80fs、中心周波数800nm、繰り返し周波数80MHzの光パルスはビームスプリッタによって2つに分けられる。一方は、放射アンテナに照射される。放射アンテナは低温成長 GaAs 薄膜の上に作製されたダイポール型光伝導スイッチと呼ばれるものである。放射アンテナのダイポールの中央に幅5 μm程度のギャップが設けられているが、そこに直流バイアスを印加しておく。ギャップ部分に光パルスを照射すると0.3～0.5ps

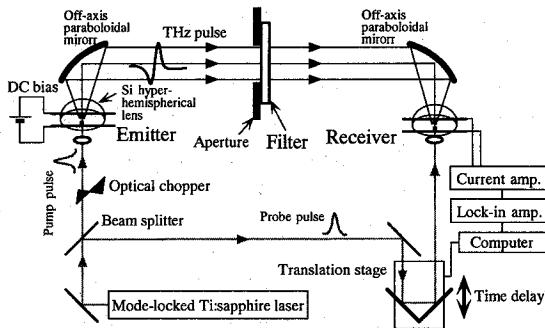


図 1 テラヘルツ時間領域分光法光学系の概略図

のギャップに電圧が誘起される。このとき受信アンテナ素子のギャップに光パルスが照射されると光キャリアが励起されスイッチが瞬間に「ON」になり、受信アンテナにはその瞬間に到達した電磁波パルスの電界に比例した電流が流れる。可動ステージを移動させて受信アンテナを励起するタイミングを変えながら、電流値を測定することにより、電磁波パルスの波形が測定される。

3. 金属薄膜フィルター

測定に使用した金属薄膜フィルターの外観を図 2 に示す。作製したフィルターは 3 種類であるが、いずれもガラス基板上の金薄膜（膜厚 $1 \mu\text{m}$ ）をフォトリソグラフィにより加工して作製した。図 2(a)に示したフィルターは金薄膜に穴を打ち抜いたタイプで、周期（格子間隔）を変えたフィルター 1 及び 2 を作製した。図 2(b)に示すフィルター 1R は、フィルター 1 及び 2 とは逆に金薄膜の円が配列した構造を持つ。円孔あるいは円形金薄膜はいずれも図 2(c)に示すように正三角形格子の頂点に配置されている。

テラヘルツ時間領域分光法を用いて、金属薄膜フィルターに垂直入射して透過したテラヘルツ電磁波パルスの波形 $t_f(t)$ を測定した。図 3 に各フィルターの透過電磁波波形 $t_f(t)$ を示す。図 3 には比較のためにガラス基板のみの透過電磁波波形 $t_r(t)$ も示している。ガラス基板のみの透過波形で最初に現れる負のピークにおける時刻を原点にとっている。

表 1 金属薄膜フィルターの仕様

	Diameter d (μm)	Spacing s (μm)	Thickness (μm)	Porosity
Filter 1	500	700	1	0.463
Filter 2	350	500	1	0.444
Filter 1R	500	700	1	0.537

程度の間スイッチが「ON」になり、瞬間に電流が流れる。電流が時間的に変動するとそのまわりに電磁波が放射される。これがテラヘルツ電磁波パルスである。他方の光パルスは可動ステージによって時間遅延を与えた後、放射アンテナと同様な構造のダイポール型光伝導スイッチに照射される。

放射アンテナから放射された電磁波パルスが受信アンテナに到達すると、受信アンテナ

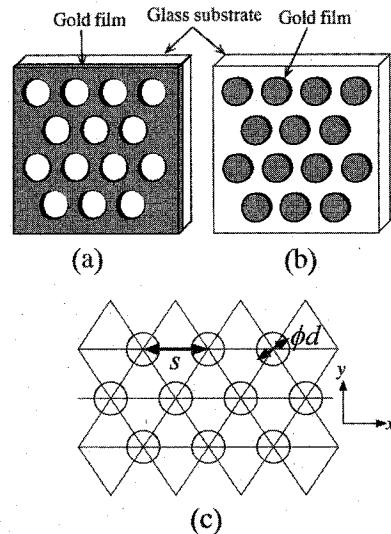


図 2 金属薄膜フィルターの概略図

図 3 で示した電磁波波形をフーリエ変換すると電磁波の電場振幅のスペクトルが得られる。フィルターの透過電磁波の電場振幅スペクトル $|T_f(\omega)|$ をガラス基板のみを透過した電磁波の電場振幅スペクトル $|T_r(\omega)|$ で除した規格化透過電

場振幅スペクトルを図4に示す。図4中の矢印で示すように、フィルター1と2はそれぞれ0.184THz及び0.247THzに透過率ピークがあり、フィルター1Rでは0.190THzに深いディップがある。フィルター1と1Rの規格化透過電場振幅スペクトルは互いに上下を逆にした形

状をしており、フィルター1で現れるピークの周波数とフィルター1Rで現れるディップの周波数はほぼ一致している。これらの周波数特性はすでに従来の遠赤外領域の研究で良く知られている^{3,4)}。例えば、ピークやディップの位置は穴の間隔の逆数の周波数程度の回折限界周波数よりも若干低い位置に生じることが知られているが、ここで作製したフィルターもそのような特性を示している。

ピークやディップがどのように形成されるかを考察するために、フィルターを透過した電磁波の周波数スペクトルがどのように時間発展するかを調べてみる。測定したフィルターを透過した電磁波の波形

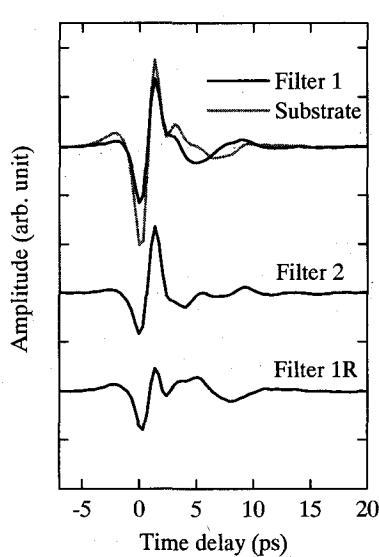


図3 金属フィルターを透過したテラヘルツ波パルスの電場振幅波形

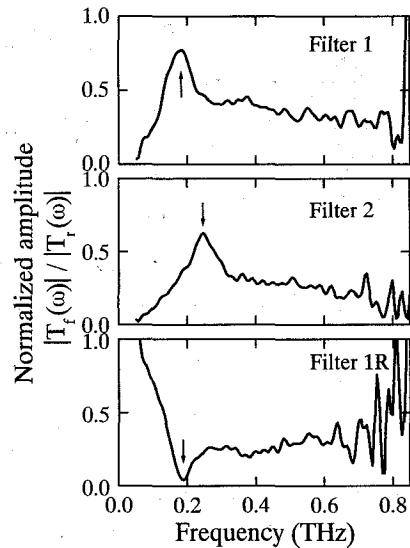


図4 金属薄膜フィルターの規格化透過電場振幅スペクトル

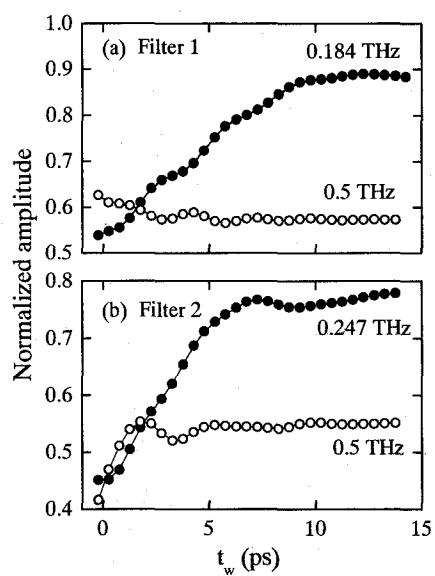


図5 透過率ピーク強度の時間発展

に適当なウインドウ関数をかけてフーリエ変換することにより、原点から時間 t_w の間に検出器に到達した電磁波の周波数スペクトルを導出できる。フィルター1及び2の特徴的な透過率ピークの強度を t_w の関数としてプロットすると図5のようになる。図5(a)のフィルター1についてみると $t_w = 0\text{ps}$ から t_w の増大とともにピーク周波数 0.184THz での強度は増大している。テラヘルツ電磁波パルスの大きな部分は含まれているのは $t_w \sim 2\text{ ps}$ までであるが、それ以降もピーク強度は増大を続け、 $t_w > 10\text{ps}$ では飽和の傾向を示している。このようにフィルターの特性であるピークはそれらが形成されるのに 10ps 程度の比較的長い時間を要する。フィルター2については飽和に要する時間が $t_w = 6\sim 7\text{ps}$ とフィルター1に比べ若干短くなっている。

フィルターの特性であるピークやディップが十分に成長

するのに比較的時間がかかるという事実は以下のように解釈できる。これは2次元配列誘電体球の電磁波透過特性を説明するために提案されたモデル⁵⁾に基づく。フィルター1あるいは2のような薄膜に穴があいた構造を例にとると、フィルターに入射した電磁波は波長程度の直径を持つフィルターの円孔によって散乱され、散乱波はさらに隣の穴によって散乱される。(散乱体が球の場合にはミー散乱と呼ばれる⁵⁾) このような過程を繰り返すうちに散乱波は互いに干渉する。そして散乱波のうち位相がそろった周波数成分が多く透過し、透過ピークを形成する。この干渉に要する時間がフィルター1の場合、 $t_w \sim 10\text{ps}$ となる。先に見たように、フィルター1よりも穴の間隔の小さなフィルター2ではピークが十分に成長するのに要する時間は6~7 ps程度と短くなっている。これは散乱体である穴の間隔が短いために散乱波が隣の穴に到達するまでに時間が短縮され、結果としてピークを形成するために必要な時間が短縮されているものと考えられる。以上の解釈は現状では可能性の範囲を越えないが、このように時間領域でスペクトルを解析することによりフィルター特性の発現についてより直感的な描像を得ることができる。

4. 超伝導薄膜フィルター

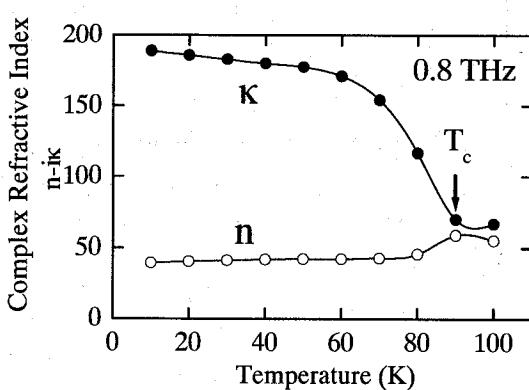


図6 YBCO薄膜の複素屈折率の温度変化
参考文献6)より引用

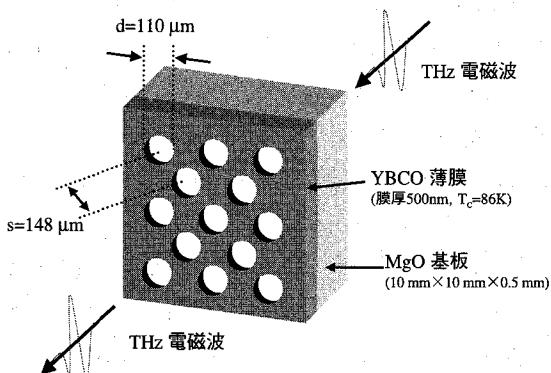


図7 超伝導体薄膜フィルターの概略図

上述のフィルターでは通常の金属を用いたが、もしフィルター材料の誘電率あるいは屈折率を変化させることで透過特性を制御できれば、フィルターに新たな機能を持たせることができる。その試みとして高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (以下、YBCO) の薄膜に周期穴配列を空けたフィルターを作製し、テラヘルツ波の透過特性を測定した。YBCOの複素屈折率は図6に示すように超伝導転移温度 T_c 以下で温度の下降とともに急激に変化する。今回用いた厚み500nmの薄膜の場合、テラヘルツ波の透過率は転移温度(86K)以下ではほぼゼロになる。

図7に作製したフィルターの概略図を、図8にその透過率スペクトルの温度変化を示す。従来のフィルター同様回折限界周波数よりわずかに低い周波数(0.75THz付近)に透過率ピークが観測される。ピークの大きさを温度の関数としてプロットすると複雑な振る舞いを示すことがわかる。透過率は低温で高く、温度の上昇とともに減少する。その後、転移温度付近で増大に転じる。透過率ピークの変化量は最大値の

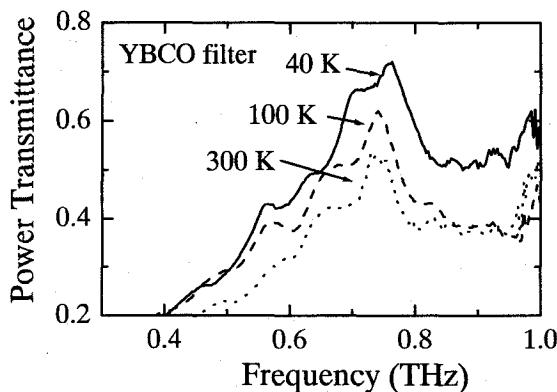


図8 超伝導薄膜フィルターの透過スペクトル

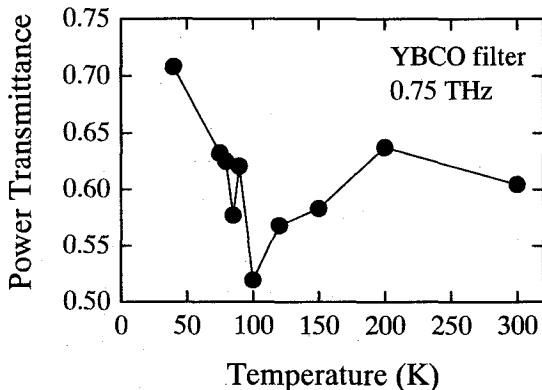


図9 超伝導薄膜フィルターの透過率ピークの温度変化

5.まとめ

金属薄膜及び超伝導薄膜を用いた円孔配列フィルターの透過特性について調べた。

金属薄膜フィルターの周波数スペクトルの時間発展を調べた結果、ピークやディップなどのフィルターの特性はテラヘルツ電磁波パルスが到達してから比較的長い時間をかけて形成されることがわかった。この事実からフィルター特性の発現についてより直感的な描像を得ることができた。本研究では試料は単純なフィルター構造であったが、同様な手法は近年注目を集めているフォトニック結晶にも適用することができ、フォトニックバンド形成について新たな知見をもたらすことが期待される。

超伝導薄膜フィルターの透過特性は温度とともに変化するが、その変化の大きさは超伝導体薄膜の複素屈折率の変化から期待されるよりも小さかった。このままではあまり役に立たないが、この種のフィルターの意外な特性的一面と言えなくもない。我々の研究室ではもう少し厚みのある同様な構造の金属フィルターの偏光特性について詳細に調べているが、旋光性があり波長板としての機能を持つなどの意外な性質を見いだしている。今後、これらの性質を利用してテラヘルツ帯の新しいデバイスが生まれることを期待する。

30%程度である。

この振る舞いは2流体モデルに基づいて以下のように解釈できる。十分低温では散乱を受けない超伝導キャリアが支配的に存在するので、電磁波がフィルターに到達して穴によって散乱される時、散乱波のエネルギーは吸収されることがない。このため散乱波の干渉によって生じる透過率ピークは大きな値を示す。温度の上昇とともに熱的に励起された常伝導キャリアが増加する。常伝導キャリアは電磁波のエネルギーを吸収するので、透過率ピークは温度の上昇とともに減少する。温度が転移温度以上になると超伝導キャリアが消滅し、一気に超伝導体薄膜の透過率が増大する。このため穴以外の薄膜部分を通して電磁波が透過するので透過率ピークの強度は増大する。このように透過率ピークの大きさが減少から増大に転じる温度は薄膜透過率の大きさと常伝導キャリアによる散乱波の吸収のバランスによって決まると考えられる。

6. 参考文献

- 1) D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith: Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 284.
- 2) M. van Exter, Ch. Fattinger, and D. Grischkowsky: Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 337.
- 3) M. S. Durschlag and T. A. DeTemple: Appl. Opt., **20** (1981) 1245.
- 4) C. C. Chen: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-21** (1973) 1.
- 5) K. Ohtaka, Y. Suda, S. Nagano, T. Ueta, A. Imada, T. Koda, J. S. Bae, K. Mizuno, S. Yano, and Y. Segawa: Phys. Rev. B, **61** (2000) 5267.
- 6) S. D. Brorson et al., J. Opt. Soc. Am. B, vol. 13, 1979 (1996).