

金属構造によるsub-THz電磁波の超集光の試み

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-29 キーワード (Ja): キーワード (En): sub-THz, V-groove, focusing, imaging, spectroscopy 作成者: 森川, 治, 山本, 晃司, 谷, 正彦, 栗原, 一嘉, 衆島, 史欣, 藤田, 正実, 萩行, 正憲, YAMAMOTO, Kohji, TANI, Masahiko, KURIHARA, Kazuyoshi, KUWASHIMA, Fumiyoshi, FUJITA, Masami, HANGYO, Masanori メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15053/0000000180

【論文】

金属構造によるsub-THz電磁波の超集光の試み

森川 治¹ 山本 晃司² 谷 正彦³ 栗原 一嘉⁴
栞島 史欣⁵ 藤田 正実⁶ 萩行 正憲⁷Approach to Superfocusing of Sub-THz Radiation
Using a Metal StructureOsamu Morikawa¹, Kohji Yamamoto², Masahiko Tani³, Kazuyoshi Kurihara⁴,
Fumiyoshi Kuwashima⁵, Masami Fujita⁶, and Masanori Hangyo⁷

Abstract

We investigate a focusing property of a sub-THz radiation with a V-groove, a kind of parallel plate waveguide in which both metal plates and spacing are tapered, by the knife edge method and spectroscopic measurement of transmission through a metal aperture with a diameter of 2 mm. We find that the V-groove reduces the beam-waist width of the sub-THz radiation polarized perpendicular to the metal surface and increases the aperture transmission in low frequency region below 0.22 THz.

Keywords: sub-THz, V-groove, focusing, imaging, spectroscopy

1 はじめに

周波数が1THz (10^{12} Hz) 前後の周波数の電磁波はテラヘルツ (THz) 電磁波と呼ばれる^{1),2),3)}。THz域には分子の振動や分子の回転、分子間の振動などによる吸収が現れるため、吸収スペクトルの周波数、強度、形状から物質の同定や成分分析が可能で^{4),5)}、ソフトモードなどの相転移現象の解明にも有効である。また、この領域の電磁波は電波的な物質透過性を有する最短波長領域で、波長が0.3mm周辺であることから0.3mm程度の分解能で非金属物質の透視イメージングが可能である^{6),7)}。しかし、このような電磁波は電子回路にとっては周波数が高すぎ、レーザやフォトダイオードのような光学装置にとっては周波数あるいはエネルギーが低すぎるため以前は安価・高出力の発生装置、安価・高感度の検出装置が存在しなかった。上記のような応用が可能となったのは、光パラメトリック発振器、光差周波発生、量子カスケードレーザなど量子光学的光源^{8),9),10)}や光伝導アンテナ、電気光学効果検出器^{1),3)}などが開発されたことによ

る。

中でも光伝導アンテナとフェムト秒パルスレーザを用いた送受信システムはTHz電磁波の振幅情報のみならず位相情報も得られるので、分光システムとして利用されている。また、信号対雑音比(SN比)も高いので、イメージングにも応用されている(THz-TDS)^{1),2),3)}。しかし、フェムト秒パルスレーザは数百万円する高価な装置なのでシステムのコストを押し上げてしまう。

そこで著者らはフェムト秒レーザの代わりに安価な市販マルチモード半導体レーザを用いたシステムを提案した(MLD-TDS)¹¹⁾。このシステムは安価ではあるがスペクトル範囲が0.5THz以下(波長0.6mm以上)の比較的低周波(長波長)域に限られる。そのため電磁波を集光してもあまりビーム径を小さくはできない。このことは、このシステムをイメージングや分光測定に応用する際に問題となる。イメージングでは放物面鏡などで電磁波ビームを集光し、集光点に板状の試料をさしこむ。信号を記録しながら板を走

Received November 15, 2013

¹ 海上保安大学校 morikawa@jcg.ac.jp

² 福井大学 kohji@fir.u-fukui.ac.jp

³ 福井大学 tani@fir.u-fukui.ac.jp

⁴ 福井大学 kuri@u-fukui.ac.jp

⁵ 福井工業大学 kuwashima@fukui-ut.ac.jp

⁶ 海上保安大学校 fujita@jcg.ac.jp

⁷ 大阪大学 hangyo@ile.osaka-u.ac.jp

査することによって透過位置を走査し、画像を再構成する。このとき集光ビームの径が大きいと像がぼやけてしまう。また分光測定用の試料が微量であれば試料サイズに合わせて電磁波を集光する必要が生じるので、やはり集光径を小さくすることが望ましい。そこで本研究では金属構造物を用いて集光を補助し、集光ビーム径を回折限界より小さくすることを試みた。この回折限界を超えた集光を、以下では「超集光」と呼ぶこととする。

2 金属構造を用いた超集光の試み

金属構造を用いて電磁波を集光する試みとしては、方形導波管の幅・高さにテーパをつけた構造、つまりホーンアンテナの例がある¹²⁾。しかし、このような構造ではカットオフが生じてしまうために低周波成分の伝送特性は著しく落ちてしまう。これに対し、導波管の幅と高さの両方ではなく高さだけを絞り込むことにより水平の線状に集光し、イメージングに応用したとの報告がある^{13), 14)}。線状の電磁波ビームで試料を様々な角度で走査し、CT スキャンで用いられるようなアルゴリズム(filtered-back-projection 法)を用いて画像を再構成している。しかしこの手法は微量試料の分光には応用しづらい。

それらの問題を解決する構造として、平行板導波路の金属板幅と間隙の両方にテーパをつけた構造が取り上げられている。Klein らはピラミッド形の高抵抗 Si の頂上を切り落とし、2面に金属膜を形成することで上述のような構造を達成し、80GHz(波長 3.75mm)の電磁波で分解能 17 μ m の反射イメージングを達成している¹⁵⁾。そこでは平行板導波路だけでなく Si が電磁波を閉じ込める効果も用いて高分解能を実現しているが、集光した先端においても Si から電磁波が出にくいために透過型には適さないことや、Si 中で定在波が生じるために分光にも適さないという問題がある。導体板の間を空気としたテーパつき平行板導波路については電磁波の電場の測定により、導波路内の電磁波の分布形状や電磁波の導波路への閉じ込めの様子が報告されている^{16), 17) 18)}。しかし測定には導波路の近傍に検出器を置く、または金属針を近付けた際に散乱される電磁波を検出するなど、導波路近傍の電場強度の分布の測定に限られている。このため、導波路から出て伝搬する電磁波成分の検出を用いた、透過型イメージングや微量試料測定に適したデータではない。

本研究では、イメージングや微量試料分光への応用を念頭に、電磁波ビームの集光の様子を調べた。つまりテーパつき平行板導波路から出て自由空間を伝搬した電磁波を測定しながら集光点付近にさまざま

な操作を施した時の反応を観察した。なお、平行板導波路の金属板幅と間隙の両方にテーパをつけた構造を著者らは「V 溝」と呼んでいる。平行板導波路に近い構造なのに「V 溝」と称するのは、以前は板幅が一定の構造を扱っており、その場合は金属の塊に刻んだテーパつきの溝と同じ形だったからである。測定には MLD-TDS を使用している。MLD-TDS は光混合や Gunn 発振器などの単色電磁波システムと比較すると広いスペクトル領域の測定が一度にできるとの利点がある。MLD-TDS よりもパルスレーザを用いた THz-TDS の方が高い SN、高い周波数域までの測定が可能である。しかし、MLD-TDS でもまずまずの SN が得られることや構造体の大きさを相似形のまま大きくすれば低周波でも等価な情報が得られることから、低コストな MLD-TDS を使用した。

3 実験

電磁波の集光の様子を調べるため、2種類の測定を行った。まずナイフエッジ測定により電磁波の集光位置での強度分布を調べた。次に直径 2mm の金属アパーチャの透過率測定を行った。測定は図 1 に示すような配置で行った。電圧印加した電磁波放射用光伝導アンテナに BLD 光を照射し、電磁波を発生させた。この電磁波を放物面鏡で平行化してからワイヤグリッド偏光子(WGP)に通し、放物面鏡で集光した。集光点にナイフエッジ測定用のアルミ箔パターンや透過スペクトル確認用のアパーチャを配置し、V 溝はそのすぐ上流に配置した。アルミ箔パターンやアパーチャを通過後の電磁波は放物面鏡で平行化した

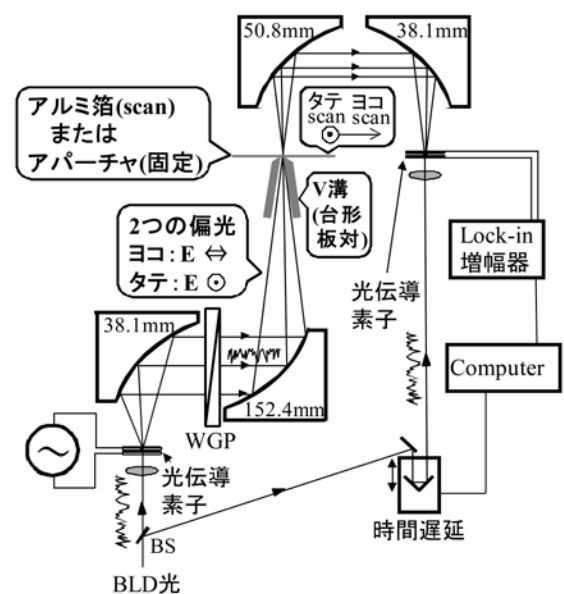


図 1 実験配置図。図中の長さは放物面鏡の焦点距離を表す。

後、さらに放物面鏡で検出用光伝導アンテナに集光した。光伝導アンテナは放射用も検出用もスパイラル型を使用したので円偏光電磁波の送受信が可能である。これに対し、途中に WGP を入れることにより、図 1 中に示すような「タテ偏光」または「ヨコ偏光」を取り出して使用した。V 溝は平行平板導波路(PPWG)を若干変形させたものととらえることができるので、ヨコ偏光に対しては周波数 0 まで導波する。ヨコ偏光は電場ベクトルが金属板の内表面に垂直になるので低周波(長波長)であっても境界条件を満足できるからである。これに対し、タテ偏光に対しては低周波成分を伝送することができない(カットオフ)。タテ偏光では電場ベクトルが金属板の内表面に平行になるので金属表面では電場が 0 でなければならないからである。つまり、金属表面で電場が 0 という電磁波が導波されている場合、金属表面に垂直な方向には金属板間隔を半波長の整数倍とする定在波状の電場分布が存在するが、特定の周波数(カットオフ周波数)以下の低周波(長波長)の場合はこの条件を満足できないからである。

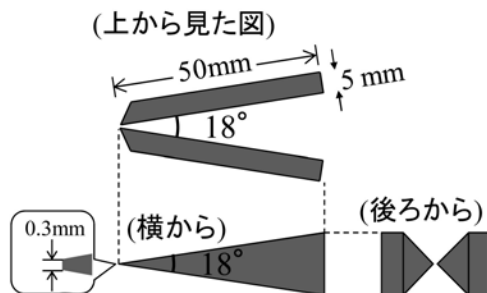


図2 V 溝の形状等。厚さ 5mm のアルミ板 2 枚を用いて構成した。

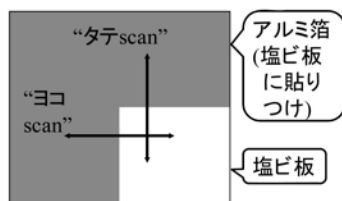


図3 ナイフエッジ測定に用いたアルミ箔パターン。
L 字形のアルミ箔を塩ビ(塩化ビニル)の板に貼り付け、保護のためセロテープを貼った。

図 2 に使用した V 溝の部品と配置図を示す。厚さ 5mm、長さ 50mm のアルミ板を、18 度のテーパが出るように加工した。先端の幅は 0.3mm とした。この 2 枚の台形の板を、間隔にテーパ(18°)がつくように向かい合わせに配置し、「導体板の幅にも間隔にもテーパのついた導波路(V 溝)」を構成した(図 2)。先端での板幅と間隔はどちらも 0 ではないとはいえ小さく、V 溝の入口では板の幅も間隔もほぼ $2 \times \{50 \tan 9^\circ\} =$

16mm である。板のテーパも間隔のテーパも 18° なので、V 溝の入口から先端に向かうにつれ、板の幅も間隔もほぼ同じ割合で減少し、板幅と間隔の比はどの部分もほぼ 1 : 1 となる。なお、角度を 18° としたのは集光に用いた放物面鏡の立体角をカバーするためである。集光には直径 50mm、焦点距離 152.4mm の放物面鏡を用いたので、焦点から見た放物面鏡の見込み角は約 18° である。

図 3 にナイフエッジ測定に用いたアルミ箔パターンを示す。図 3 の灰色部分に示すような L 字形形状のアルミ箔を厚さ 0.5mm の塩ビ(塩化ビニル)の板に貼りつけ、保護のためセロテープ(厚さ 35μm)を貼った。灰色の部分は塩ビ板にアルミ箔、さらにその上にセロテープという状態である。これに対し、右下の白い部分は塩ビ板に直接セロテープが貼ってある。測定の際には V 溝の先端がアルミ箔パターンに軽く触れるようにしておいた。このアルミ箔の水平(鉛直)方向のエッジをタテ(ヨコ)方向に scan して集光した電磁波ビームをアルミ箔で遮ってゆき、ビームサイズの測定をした。塩ビとセロテープの板は電磁波を良く通すのに対しアルミ箔の電磁波透過率は 0 である。このため電磁波ビームをアルミ箔で遮ってゆくとき、もしも電磁波ビーム径がごく小さいなら電磁波強度は急激に減少するし、ビーム径が大きいなら電磁波強度は緩やかに減少する。

ナイフエッジ測定の際には、まずアルミ箔パターンのうち塩化ビニル板のみの部分を電磁波が透過するようにしておき、時間遅延を走査して時間波形を得た。その後、信号の大きさが極大となるように時間遅延の位置を調整してからアルミ箔パターンを図 1、図 3 中の「タテ scan」または「横 scan」の方向に走査し、信号強度の変化を観察した。V 溝の先端間隔を変えたり V 溝そのものを取り外したりし、図 1 中に示すタテ偏光・ヨコ偏光に対して測定した。

アパーチャ透過測定をする際にはアルミ箔パターンをアパーチャに取り換えた状態(アパーチャは走査なし)で時間遅延を走査し、得られた時間波形を Fourier 変換してスペクトルを得た。アパーチャは厚さ 1.0mm のアルミ板に直径 2.0mm の穴をあけて作製した。アパーチャや V 溝の組み合わせを変え、図 1 中に示すタテ偏光・ヨコ偏光に対して測定した。

ナイフエッジ測定は電磁波の強度分布の直接的な測定法である。しかし、時間遅延を固定したまま測定するので、さまざまな周波数成分からの寄与を分離できないという問題が生じる。アルミ箔パターンを走査する際、アルミ箔を動かすごとに時間遅延を走査すれば周波数成分の寄与を分離できるはずではあるが、測定時間が膨大となってしまう。これに対し、

金属板は電磁波を全く通さないで、集光電磁波を金属板の穴(アパーチャ)に透過させると、電磁波ビームのうちアパーチャに重なる部分は透過し、アパーチャより外の部分は遮られる。よって電磁波の集光径がアパーチャの大きさ以下であればアパーチャ透過は 100%になるはずである。逆に集光径がアパーチャの大きさよりも大きければ、はみ出す部分は金属板で遮られるのでアパーチャ透過は 100%よりも小さくなるはずである。時間遅延を走査してアパーチャの透過スペクトルを得ることにより、さまざまな周波数成分の集光径がアパーチャ径に対して大きいのか小さいのかの目安を得ることができる。

4 実験結果および考察

ナイフエッジ測定により、V溝で導波されるヨコ偏光に関してはビームの集光位置での幅がV溝の挿入により減少することが確認された。アパーチャ透過のスペクトル測定からは、低周波域での透過の増強が見られ、V溝の電磁波集束効果が確認された。

4.1 ナイフエッジ測定

ナイフエッジ測定のためにまず時間波形の測定を行った。V溝を設置しておき、電磁波がアルミ箔パターンの塩ビ部分を透過するようにした配置で測定した。図4はV溝の先端間隔を1.0mmとした場合の測定結果である。時間波形にみられる信号ピークのうち図4の矢印で示すような最も細いピークと最も太いピークに時間遅延を固定した状態でアルミ箔パターンをヨコまたはタテscanした。

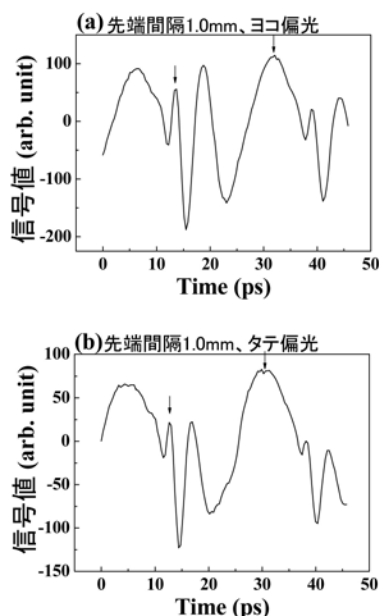


図 4 時間波形の様子。ナイフエッジ測定では矢印で示す細いピークまたは太いピークの位置に時間遅延を固定したままアルミ箔パターンを走査した。

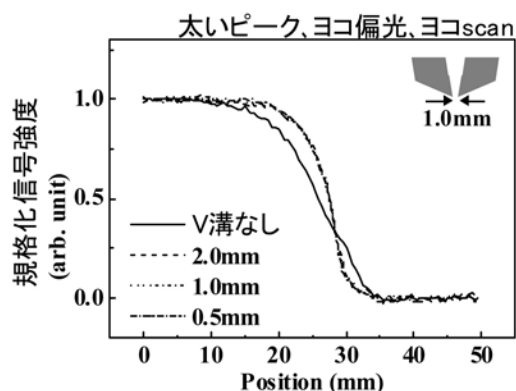


図 5 図 4 の太いピークを用いたナイフエッジ測定の結果。ヨコ偏光・ヨコ scan の結果を示す。挿入図は先端間隔を 1.0mm にした時の V 溝の先端の様子(横軸と縮尺を合わせた)。V 溝の先端間隔は 0.5~2.0mm と変化させた(実線以外はほとんど重なっている)。偏光と scan 方向についてはこの組み合わせ以外には有為な差は出なかった。

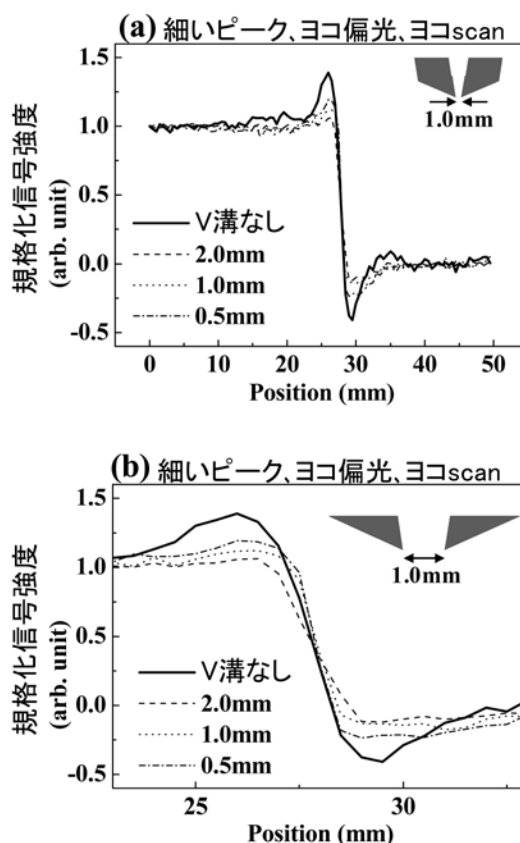


図 6 図 4 の細いピークを用いたナイフエッジ測定結果の(a)全体図と(b)拡大図。ヨコ偏光・ヨコ scan の結果を示す。挿入図は先端間隔を 1.0mm にした時の V 溝の先端の様子を示す(横軸と縮尺を合わせた)。V 溝の先端間隔は 0.5~2.0mm と変化させた。偏光と scan 方向についてはこの組み合わせ以外には有為な差は出なかった。

図5、図6にナイフエッジ測定の結果を示す。ヨコ偏光の電磁波を用い、図4(a)の太いピーク及び細いピークの矢印位置に時間遅延を固定し、信号をモニターしながらアルミ箔パターンをヨコ方向に走査した場合の結果が図5および図6である。

図5、図6を比較すると、太いピークを使用した図5の方が緩やかな変化をしている、つまりビーム径が太いことがわかる。このことは図4の太いピーク、つまりなだらかな構造には周期の長い、周波数の低い成分が主として寄与していると考えると理解できる。反対に、細いピーク、つまり急峻な構造には周期の短い、周波数の高い成分が主として寄与していると考えると理解できる。

図5によると、太いピークを用いた場合にはV溝を挿入することにより信号の減少が急峻になる、つまりビーム径が絞られることがわかる。しかし、V溝の先端間隔を0.5-2.0mmの範囲で変化させてもビーム径はほとんど変化せず、ビーム径は2.0mmよりもかなり大きな値になっている(図5の破線、点線、一点鎖線)。このことから、電磁波ビームはV溝の間から大きくもれだしているものと推察される。図4の太いピークのもとになるような低周波成分は、V溝の存在によりある程度は集束性が向上するが、V溝の先端に達する前に台形板の間から電磁波がもれだしてしまうと考えられるので、先端間隔を少々変えてもビーム径にはあまり影響しないと解釈できる。

なお、ヨコ偏光・ヨコscan以外(ヨコ偏光・タテscanの場合やタテ偏光の場合)の測定データでは、V溝の有無や先端間隔の変化に対して信号の減少の急峻さに差がみられず、V溝による電磁波集光の改善を確認できなかった。これらのことから低周波成分についてはV溝の集束効果(電磁波の導波)があるのはヨコ偏光の場合のビームのヨコ幅のみであることがわかる。タテ方向、つまり金属板が存在しない方向に対しては、V溝に導波されるヨコ偏光の場合でも電磁波を閉じ込める効果がほとんどなく、大きくもれだしてしまうものと考えられる。

図6によると、細いピークを用いた場合には、特にV溝なしのデータ(実線)において「信号の減少直前の増加」と「信号の減少直後のdip」が観察された(以下、オーバーシュートと呼ぶ)。ビームを遮っていく場合のナイフエッジ測定データは信号減少の傾きがビームの強度密度を表すので、単調減少でないデータはビーム強度密度に負の部分が存在するという、直観に反する状況を示しているように見える。しかし、さまざまな周波数成分が信号に寄与していることを考慮すれば、単調減少でないデータやオーバーシュートが生じ得ることを説明できる。MLD-TDSの信

号には様々な周波数成分が含まれているので、図4のような時間波形はさまざまな周期の正弦波形の和であるとみなすことができる。簡単のため、時間波形が高周波と低周波の2つの周波数成分だけを含む場合を考える(図7)。時間遅延の位置を動かすと2つの

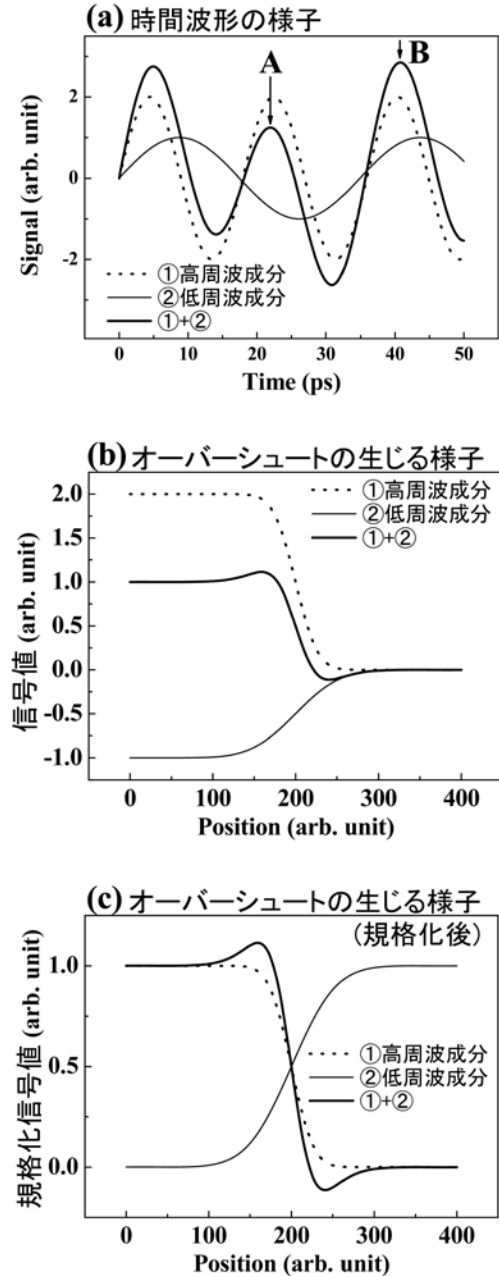


図7 オーバーシュートの生じる様子の模式図。(a) 時間遅延走査による信号波形、(b)(c)アルミ箔パターン走査によるナイフエッジ測定結果。図(b)、(c)の右半分ではアルミ箔により信号がなくなり、左半分で観測される信号に2つの成分があり、高周波成分が段差の鋭い正の寄与(①)、低周波成分が段差の緩やかな負の寄与(②)をしているものとする。低周波成分の振幅の方が小さい場合、両者が合わさったもの(①+②)にはオーバーシュートが観察される。

周波数成分の値はそれぞれ変化するが、高周波成分が振幅の大きな正の寄与、低周波成分が振幅の小さな負の寄与をして信号の合計値が正であるという位置に時間遅延を固定したとする[例えば図 7(a)の A 点]。ナイフエッジ測定をすると、高周波成分は急峻な正の信号[図 7(b)、図 7(c)の点線]、低周波成分は緩やかな負の信号[図 7(b)、図 7(c)の細い実線]の寄与をする。測定データ上ではこれらが重なるので、図 7(b)、図 7(c)の太い実線のようなオーバーシュートを含んだデータが生じる。図 4 の時間波形の細いピーク的位置では、たまたまこのような状況であるため、ナイフエッジ測定をすると図 6 のようにオーバーシュートが生じたものと推察できる。図 6 の 4 本すべての曲線でオーバーシュートが生じているのは、V 溝の挿入やその先端間隔を変化させても高周波成分と低周波成分の符号や振幅の大小関係が入れ替わるほどの変化が生じないと仮定すれば理解できる。図 6 の 4 本の曲線でオーバーシュートの大きさが異なるのは、V 溝の挿入やその先端間隔を変化させることにより各周波数成分の振幅比が変化したことが原因であると仮定すれば理解できる。なお、図 7(c)のように曲線を規格化して比較すると、オーバーシュートを含む信号は元の高周波信号[図 7(c)の点線]よりもさらに曲線の傾きが急になることがわかる。これに対し、図 5 のようにオーバーシュートの生じていない場合もある。このような場合には、オーバーシュートの生じる条件(高周波成分と低周波成分が反対符号の寄与かつ高周波成分の方が絶対値が大)が満たされていないものとすれば理解できる。図 7(a)の B 点がそのような場合の一例である。

図 6(b)によると、まず V 溝ありの場合の 3 つのデータ(破線、点線、一点鎖線)については、先端間隔を狭めていくにつれ、曲線の傾きが急峻になっていくことがわかる。さらに、信号値に変化が生じる領域の幅は V 溝の先端間隔(0.5-2.0mm)と同程度であることから、ほとんど先端まで電磁波が導波され、先端間隔が狭いほどビームのヨコ幅は狭くなっていると考えられる。これに対し、V 溝なしのデータ(実線)の信号値に変化が生じる領域での傾きは先端間隔 1.0mm の場合(点線)と同程度である。しかし、V 溝なしのデータ(実線)には顕著なオーバーシュートが見られることと図 7(c)での結果を考えあわせると、V 溝なしのデータからオーバーシュートの影響を除去すると傾きはもっと緩やかになると考えられる。V 溝ありの場合の 3 つのデータにも若干はオーバーシュートが見られるため確実な議論はできないものの、図 4 の細いピークに対応する高周波成分については V 溝の挿入によりビームのヨコ幅は狭くなり、V 溝の先端間隔が

狭いほどビームのヨコ幅は狭くなっていることが示唆される。なお、細いピークの場合もヨコ偏光・ヨコ scan 以外では、ヨコ偏光・タテ scan の場合には信号の減少の急峻さに差がなく、タテ偏光を用いた場合は図 6 よりもさらに大きなオーバーシュートが生じて急峻さの比較が不可能となり、V 溝による電磁波集光の改善を確認できなかった。これらのことから、電磁波の高周波成分は V 溝の先端付近まで導波されているものの、低周波成分の場合と同様、ビームのヨコ幅を細める効果しか確認できなかった。タテ方向、つまり金属板が存在しない方向に対しては電磁波を閉じ込める効果がほとんどなく、もれだしてしまうものと考えられる。また、時間遅延固定位置は低周波成分が多い場所を避け、オーバーシュートを避けるべきであることがわかった。

今回の測定ではアルミ箔によるアルミ箔パターンを用いたが、アルミ箔は金属である。このため、アルミ箔と V 溝と近付くと金属が向かい合わせにおかれたことになり、伝送線路と似たような構造ともいえる。また向かい合わせにおかれた金属の間隔が一樣でないという点で、ダイポールアンテナに似たような構造ともいえる。従って V 溝にそって伝搬してきた電磁波が意図しない方向に伝搬したり放射され、ナイフエッジ法による空間分解能評価に影響を与えてしまっている可能性も否定できない。このことから非金属アルミ箔パターンを用いた確認作業も必要と考えられる。

4.2 アパーチャ透過測定

図 8 に直径 2.0mm のアパーチャを透過した電磁波のスペクトルを示す。点線はアパーチャのみの場合、実線はアパーチャに先端間隔 1.0mm の V 溝を加えた場合を示す。MLD-TDS のスペクトル形状については、シングルモード光ファイバやスペイシャルフィルタを用いない場合は離散的で細いスペクトル線が存在するだけであると報告されている^{11), 19), 20)}。離散スペクトルは時間領域の信号波形が周期的な形状をすることに対応する。今回の測定ではシングルモード光ファイバやスペイシャルフィルタを用いていないにもかかわらず、スペクトル形状は連続的である(図 8)。この原因は、周期的な時間波形のうち 1 周期をやや超える長さの信号しか測定しておらずスペクトル中のデータ点間隔がスペクトル線の間隔程度にまで広がってしまったことと、時間波形に合わせて長さの短い窓関数を使用したことである。その結果、急峻なスペクトル構造は測定不可能である。しかし、今回の実験配置には共振器など急峻なスペクトル構造が生じるような金属構造はないので、さほど

悪影響は生じないものと推察される。

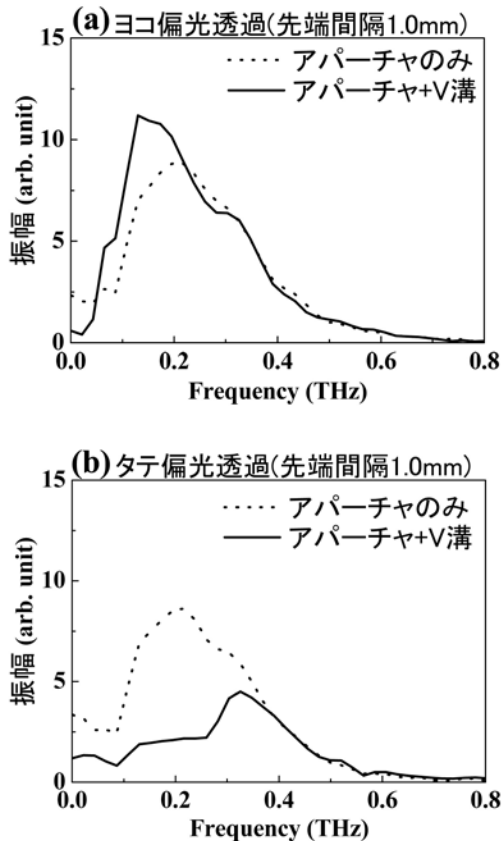


図8 アパーチャを透過した電磁波スペクトルに対するV溝の有無の影響。(a)ヨコ偏光の場合と(b)タテ偏光の場合。

図 8(a)のようにヨコ偏光の電磁波を用いた場合、V溝を加えることにより 0.22 THz 以下の低周波成分が増加していることがわかる。これは低周波成分については放物面鏡で集光した電磁波を直接アパーチャにあてるよりも V 溝を通してから当てた方がビーム径は小さくなって透過が向上すること、つまり V 溝による集光の改善を示している。このことは、V 溝の挿入により時間波形の太いピークに対応する電磁波ビームのヨコ幅が減少との結果(図 5)にも矛盾はない。時間波形の細いピークに対応する電磁波ビームのヨコ幅が減少との結果(図 6)についても、低周波成分の細いピークへの若干の寄与が考えられるので、この成分によりビーム幅が狭くなったと解釈することができる。

ここで、0.22THz 以上の電磁波の集光に対して V 溝がおよぼす影響について考える。図 9(a)はアパーチャの有無と V 溝の有無により生じるスペクトルの変化(ヨコ偏光)を示したものである。「V 溝のみ」「何もし」の場合のスペクトルには 0.065THz の位置に dip が見えているが原因は不明である。おそらく、周期的に続く信号のごく一部分を取り出し、Fourier 変換の

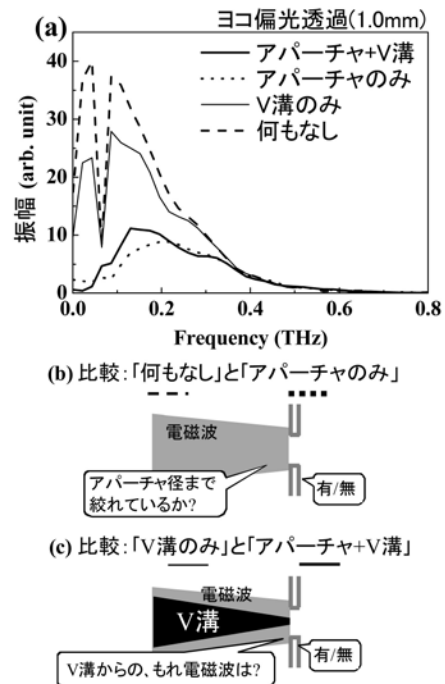


図 9 (a)アパーチャの有無と V 溝の有無により生じるスペクトルの変化(ヨコ偏光)。(b)、(c)スペクトルの比較に対応する状況(横から見た図)。

際に窓関数をかけていることが原因と考えられる。以下、この dip 以外の部分について考える。まず、「何もし」と「V 溝のみ」のスペクトルは 0.22THz 以上の範囲では大差ないことから[図 9(a)]、V 溝を入れたことによる挿入損はあまり生じていないことがわかる。また「何もし」と「アパーチャのみ」を比較してみると、0.22-0.36THz ではアパーチャを入れた方が最大 50%程度、信号が弱く、0.36THz 以上ではほとんど差がない[図 9(a)]。ここでアパーチャを入れたことによる信号減少は、ビーム径がアパーチャ径よりも大きいことから生じると推察される[図 9(b)]。0.36THz 以上ではビーム径はアパーチャ径よりも絞られているものと推察される。次に「V 溝のみ」と「アパーチャ+V 溝」を比較してみると 0.22-0.36THz ではアパーチャを入れた方が最大 40%程度、信号が弱く、0.36THz 以上ではほとんど差がない[図 9(a)]。ここでもアパーチャを入れたことによる信号減少は、やはりビーム径がアパーチャ径よりも大きいことから生じると推察される[図 9(c)]。つまり、0.22-0.36THz の範囲では V 溝がある場合もない場合もアパーチャによる信号減少は大差ない(最大 50%もしくは最大 40%)。よって、0.22-0.36THz の範囲では V 溝による電磁波の集光効果はあまりないものと考えられる。つまり、0.22-0.36THz では V 溝には挿入損はないが集光効果もなく(集光効果は 0.22THz 以下の低周波域だけ)、0.36THz 以上では V 溝を用いなくても電磁波が集光されていると考えられる。V 溝の内部から見て上下

方向には金属板がなく自由空間につながっているもので、ここから電磁波のもれだしが生じているものと想像される。4.1 節の結果とあわせると、0.22THz 以下の低周波成分は V 溝からは大きくもれだすものの、ある程度集光効果が存在し、0.22-0.36THz の成分はもれだしがあるが集光効果は存在せず、0.36THz 以上の高周波成分はもれだしも集光効果も存在しないと想像される。

導体平板を向かい合わせた構造の導波路については、間隙をせまく、幅を広くした方が自由空間とのインピーダンスミスマッチが大きくなり^{18), 21)}、電磁波のエネルギーの間隙部分への閉じ込めが大きくなり^{16), 17)}、放射損が小さくなること²²⁾が報告されている。今回のような実験についても、板幅に対して間隙を小さくすることによってもれ放射の低減と集光性の向上が期待できる。

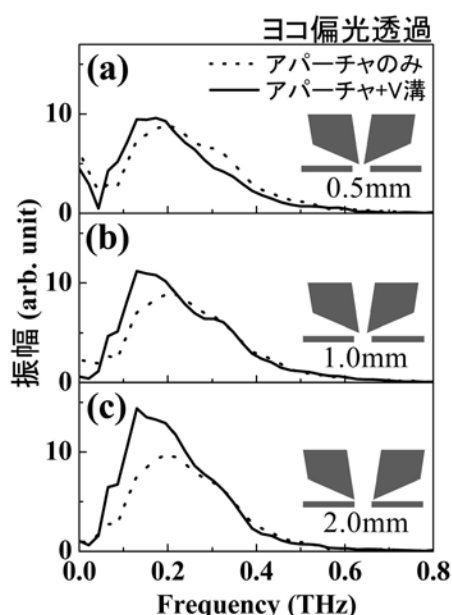


図10 アパーチャを透過した電磁波スペクトルに対する V 溝の先端間隔の影響。(a)先端間隔 0.5mm、(b)1.0mm、(c)2.0mm。挿入図は V 溝の先端とアパーチャの断面の様子を示す。

図 8(b)のように、タテ偏光の電磁波を用いた場合は V 溝を加えることにより 0.38 THz 以下の低周波成分が減少していることがわかる。これはタテ偏光についてはカットオフ周波数以下の電磁波は導波されないことが原因と考えられる。これに対し、0.38 THz 以上の高周波成分については V 溝があってもなくてもスペクトル強度に差はない。この原因としては上述のように 0.36 THz 以上では波長が短いために V 溝を用いなくても電磁波はアパーチャ径程度まで集光されることが原因であると考えられる。

図 10 にアパーチャ透過に対する V 溝の先端間隔の影響を示す。点線はアパーチャのみの場合、実線はアパーチャに V 溝を加えた場合のスペクトルであり、先端間隔は 0.5mm、1.0mm、2.0mm と変化させた。偏光はヨコ偏光、つまり低周波のカットオフがなく図 8(a)で V 溝による集光の改善の見られた偏光である[図 10(b)は図 8(a)に一致]。これによると、V 溝によるアパーチャ透過の改善効果は先端間隔がアパーチャの直径に一致する 2.0mm の場合が最高であるという、直観的に理解しやすい結果が得られた。また図 9 に示されているようにアパーチャを外した場合に「何もしない」「V 溝のみ」のスペクトルを比較すると 0.28THz 以下の低周波で V 溝の挿入損が生じているのがわかった。図は掲載していないが、先端間隔が小さいほど挿入損は大きくなるのが観察された。このことから、先端間隔が小さいほど低周波が減少するという図 10 の結果は低周波の挿入損の違いで理解できる。この結果から、微量試料を金属アパーチャの開口部に充てんして V 溝で集光して分光測定するような場合には、V 溝の先端間隔はアパーチャ径に合わせるべきであることがわかる。

5 今後の実験

以上の結果から、ヨコ偏光において限定的ではあるものの V 溝により電磁波の集光幅が低減できること、アパーチャ透過を改善できること(先端間隔はアパーチャ径にあわせるべき)、タテ偏光では導波は生じずカットオフだけが影響することに基づいて理解できることが確認できた。集光効率を改善するためには電磁波の V 溝からのもれだしの抑制が重要である。またナイフエッジ法による集光効率の評価の課題としてオーバーシュートが障害であること、金属部分(アルミ箔)による反射の影響の確認の必要性が挙げられる。

よって今後はヨコ偏光の測定のみを用いて実験を行う。まずは測定環境の改善(オーバーシュートの抑制、使用するアルミ箔パターンの非金属化)が必要である。V 溝からの電磁波のもれ出しが最大の課題なので、V 溝の板幅や間隔等のパラメータ変化させ、効果を検証する。図 9 に示すように V 溝の挿入損はさほど大きくないので(0.2THz で約 10%、0.1THz で約 20%)、もれ出しの抑制により約 0.06-0.36THz の範囲で、最大で約 6 倍程度のアパーチャ透過の改善が期待できる。

6 まとめ

MLD-TDS の電磁波の集光改善のため、V 溝(台形の板を間隙にテーパをつけて向かい合わせた構造)

を試した。V 溝に導波される偏光(ヨコ偏光)、導波されない偏光(タテ偏光)を用い、ナイフエッジ法とアパーチャを透過する電磁波のスペクトル測定により集光改善を評価した。その結果、タテ偏光ではナイフエッジ測定によると集光効果は生じず、透過スペクトル測定によると低周波で電磁波強度が下がるだけであった(カットオフの効果と思われる)。ヨコ偏光については、ナイフエッジ測定により限定的であるもののビームの幅の低減が観察され、透過スペクトル測定により低周波でのアパーチャ透過の改善が観察された。アパーチャ透過改善の効果は V 溝の先端幅をアパーチャ径に一致させた場合が最高であった。集光効率をさらに改善するには、V 溝からの電磁波のもれだしの抑制が必要であることがわかった。これらのことを踏まえ、今後の方針を検討した。

本研究は福井大学遠赤外領域開発研究センター共同研究(課題番号 H25 FIRD021B)として行われた。

参考文献

- 1) 阪井清美、応用物理 **77** (2008), 946.
- 2) 萩行正憲、谷 正彦、長島 健、応用物理 **74** (2005), 709.
- 3) 萩行正憲、応用物理 **81** (2012), 271.
- 4) 深澤亮一、応用物理 **79** (2010), 312.
- 5) 北岸、応用物理 **81** (2012), 312.
- 6) 川瀬晃道、応用物理 **77** (2008), 1445.
- 7) 福永、高妻、神庭、応用物理 **81** (2012), 329.
- 8) 伊藤弘昌、応用物理 **79** (2010), 524.
- 9) 寶迫 巖、応用物理 **79** (2010), 191.
- 10) 川瀬、応用物理 **81** (2012), 304.
- 11) O. Morikawa, M. Tonouchi, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett. **76** (2000), 1519.
- 12) D. Armand, H. Taniguchi, Y. Kadoya, T. Tanaka, and K. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **102**, (2013) 141115.
- 13) T. Nozokido, J. Bae, and K. Mizuno, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **49**, (2001) 491.
- 14) J. Bae, T. Okamoto, T. Fujii, K. Mizuno, and T. Nozokido, Appl. Phys. Lett. **71**, (1997) 3581.
- 15) N. Klein, P. Lahl, U. Poppe, F. Kadlec and P. Kužel, J. Appl. Phys. **98**, (2005) 014910.
- 16) H. Zhan, R. Mendis, and D. M. Mittleman, Opt. Express **18**, (2010) 9643.
- 17) H. Zhan, R. Mendis, and D. M. Mittleman, J. Opt. Soc. Am. B **28**, (2011) 558.
- 18) K. Iwaszczuk, A. Andryieuski, A. Lavrinenko, X.-C. Zhang, and P. U. Jepsen, Opt. Express **20**, (2012) 8344.
- 19) O. Morikawa, M. Fujita, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett. **85**, (2004) 881.
- 20) O. Morikawa, M. Fujita, K. Takano, and M. Hangyo, J. Appl. Phys. **110**, (2011) 063107.
- 21) M. Mbonye, R. Mendis, and D. M. Mittleman, Appl. Phys. Lett. **100**, (2012) 111120.
- 22) R. Mueckstein, M. Navarro-Cia, and O. Mitrofanov, Appl. Phys. Lett. **102**, (2013) 141103.