

# Study on Superfocusing of Terahertz Waves in Metallic V-Groove Structure

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-11-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 都築, 聡, 竹嶋, 大貴, 木下, 徹也, 永瀬, 友大, 山本, 晃司, 栗原, 一嘉, 桑島, 史欣, 谷, 正彦, TSUZUKI, Satoshi, TAKESHIMA, Daiki, KINOSHITA, Tetsuya, NAGASE, Tomohiro, YAMAMOTO, Kohji, KURIHARA, Kazuyoshi, KUWASHIMA, Fumiyoshi, TANI, Masahiko メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10098/6904">http://hdl.handle.net/10098/6904</a>

金属 V 溝構造を用いたテラヘルツ波の超集束効果の研究

**Study on Superfocusing of Terahertz Waves in Metallic V-Groove Structures**

都築 聡<sup>1</sup>, 竹嶋 大貴<sup>1</sup>, 山本 晃司<sup>1</sup>, 栗原 一嘉<sup>2</sup>, 桑島 史欣<sup>2</sup>, 谷 正彦<sup>1</sup>

*Satoshi Tsuzuki<sup>1</sup>, Daiki Takeshima<sup>1</sup>, Tetsuya Kinoshita<sup>1</sup>, Tomohiro Nagase<sup>1</sup>,*

*Kohji Yamamoto<sup>1</sup>, Kazuyoshi Kurihara<sup>2</sup>, Fumiyooshi Kuwashima<sup>3</sup>, Masahiko Tani<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>福井大学遠赤外領域開発研究センター

<sup>1</sup>*Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui  
Fukui 910-8507, Japan*

<sup>2</sup>福井大学教育地域科学部

<sup>2</sup>*Faculty of Education and Regional Studies, University of Fukui  
Fukui 910-8507, Japan*

<sup>3</sup>福井工業大学電気電子情報工学科

<sup>3</sup>*Institute of Laser Department of Electrical, Electric and Computer Engineering,  
Fukui University of Technology, Fukui 910-8505, Japan*

**Abstract**

The focusing of THz waves onto sub-wavelength areas is a crucial issue both for THz spectroscopy of minute samples and for high-resolution THz-imaging. Recently, super-focusing phenomena of THz waves using tapered metallic waveguiding structures are being actively studied, both theoretically and experimentally. In this report, we present our experimental studies on the THz-wave super-focusing effect in a V-groove metallic structure having an opening angle of 20 degrees. Without using a Si focusing lens, a 20-micron bottom-width was shown to have a good THz transmission efficiency without significant waveform distortion and phase delay.

## 1. はじめに

テラヘルツ波のサブ波長領域への集束は、微小試料の測定や高解像のテラヘルツイメージングにとって重要である。しかし、通常の光学系で集光させても回折限界が存在し、電磁波を波長サイズ以下に絞ることができない。しかし、金属導波路構造における“超集束効果”を用いることでサブ波長領域までテラヘルツ波を小さく集束することができる。また超集束効果により、テラヘルツ波のエネルギー密度を増大させることができる。このため超集束効果を利用することで、微小試料の分光や、分光測定感度の向上が期待できる。

これまでテラヘルツ波を金属導波路中で波長以下の空間領域に超集束させるためには、平行平板導波路のモードを維持したままゆっくりと集束させる、いわゆる“断熱集束(adiabatic compression)”という概念に基づき、テーパー付金属導波路のテーパー角を小さくする必要があると考えられてきた。このためこれまでに報告されているテーパー付金属導波路構造[1]は、開口幅が小さく、自由空間のテラヘルツビームを金属構造に結合させるために、Si製のシリンドリカルレンズを用いており、結合損失が大きいという問題があった。最近 Kimら[2]は比較的大きなテーパー角を持ったテーパー付金属導波路構造を用い、金属開口へ直接テラヘルツビームを集束させることで、結合損失を大幅に低減し、かつ高いテラヘルツ波の透過率が得られることを示した。しかし、この報告ではなぜ断熱集束近似が成り立たない大きなテーパー角でも、効率的にテラヘルツ波をサブ波長領域に集束させることができるのかは、明らかにしていない。

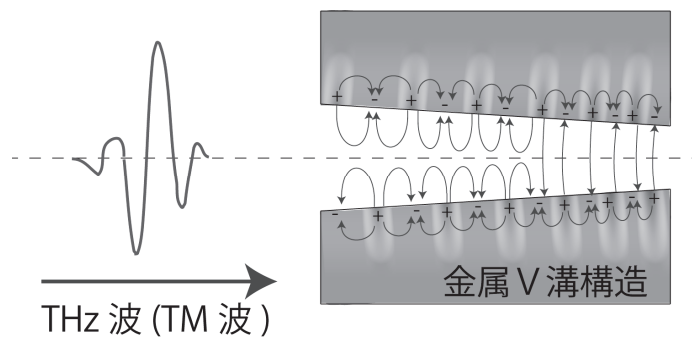
実験的な観点から金属テーパー構造を使えば光エネルギーをナノ寸法へ閉じ込められるというナノ集束の概念[3]が提出されて、プラズモニクスが世界的に認知されるようになった。しかし、電磁気学では、金属テーパー構造を直接的に扱う解析方法が無く、実際には、断熱近似と言って、楔なら平行平板というように代替的に議論していた為、超集束はテーパー角が非常に小さい角度(約0.1度以下)でしか生じないという誤解が蔓延していた。

このような状況下で、栗原は、新しい解析方法として、不完全に変数分離した解を仮定する準変数分離法を提案し、円錐において、テーパー角が比較的に大きい場合(10度程度)でも超集束が起きることを示した[4]。さらに、金属V溝や金属楔の構造でも、同様な事実を示した[5]。これらの論文は、光領域での議論であるが、テラヘルツ電磁波領域に拡張するのは、金属の誘電率の問題であり、理論の本質的な問題ではない。すなわち、直線偏光のテラヘルツ電磁波で、最も簡単に超集束を起こす構造を考えた場合、その構造が金属V溝であると言及するのがプラズモニクスの教える所である。

そこで本研究では、金属V溝構造へのテラヘルツビームの最適結合条件をより詳しく知るため、またV溝の先端幅に依存したテラヘルツ波の集束効率を調べるため、V溝の開き角20度の、片側金属V溝構造および両側金属V溝構造を試作し、そのテラヘルツ波透過特性を系統的に調べた。また分光応用のために、試料ホルダーとなる平行平板導波路部を中央に持つ、金属V溝構造を試作し、その特性も調べた。

## 2. 超集束効果とは

金属-誘電体界面(表面)をプラズモンが伝搬するとき、表面プラズモンにおける自由電子の集団振動が金属の表面近傍で起こる[6]。この集団振動が金属表面を伝播する。この金属面を図1のように向かい合わせ、テーパをつけた構造に電磁波(TM偏光)を入射させると、電磁波とプラズモンの連成波となり、本来、電磁波の回折限界で通れない先端幅でも



電磁波が透過できるようになる。また、狭い空間を透過するとき時間的に位相遅れが発生する。時間的な位相遅れと狭い空間に閉じ込めが可能であることから、電場が集中する。この現象を超集束効果と呼んでいる。本研究では、図1のような金属V溝型の導波路構造を用いて行った。

図1 電磁波が入射したときの金属表面のプラズモン

## 3. 実験方法

実験に用いた光学系概略図を図2に示す。集光系のテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)装置を用いて、ビームスポットが最も小さい場所に金属V溝構造の先端幅(V溝構造の最も狭い場所)に入るよう調整した。使用したレーザーはIMRA America社のフェムト秒ファイバーレーザー(モデルA-10-IS)で中心波長は780nm、パルス幅は100fs、繰り返し周波数は50MHzである。使用したV溝はアルミ製で、開き角は20°である。先端幅 $D$ は自由に変えることができる。先端に接続する平行平板部の長さが0mm(TPPWG00)、5mm(TPPWG05)、10mm(TPPWG10)の3種類についてそれぞれ調べた。

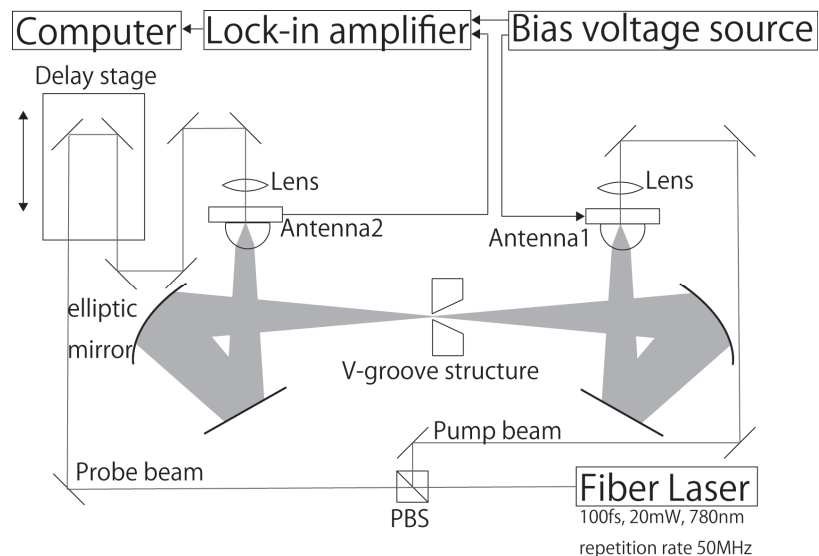


図2 光学系概略図

### 3. 結果と考察

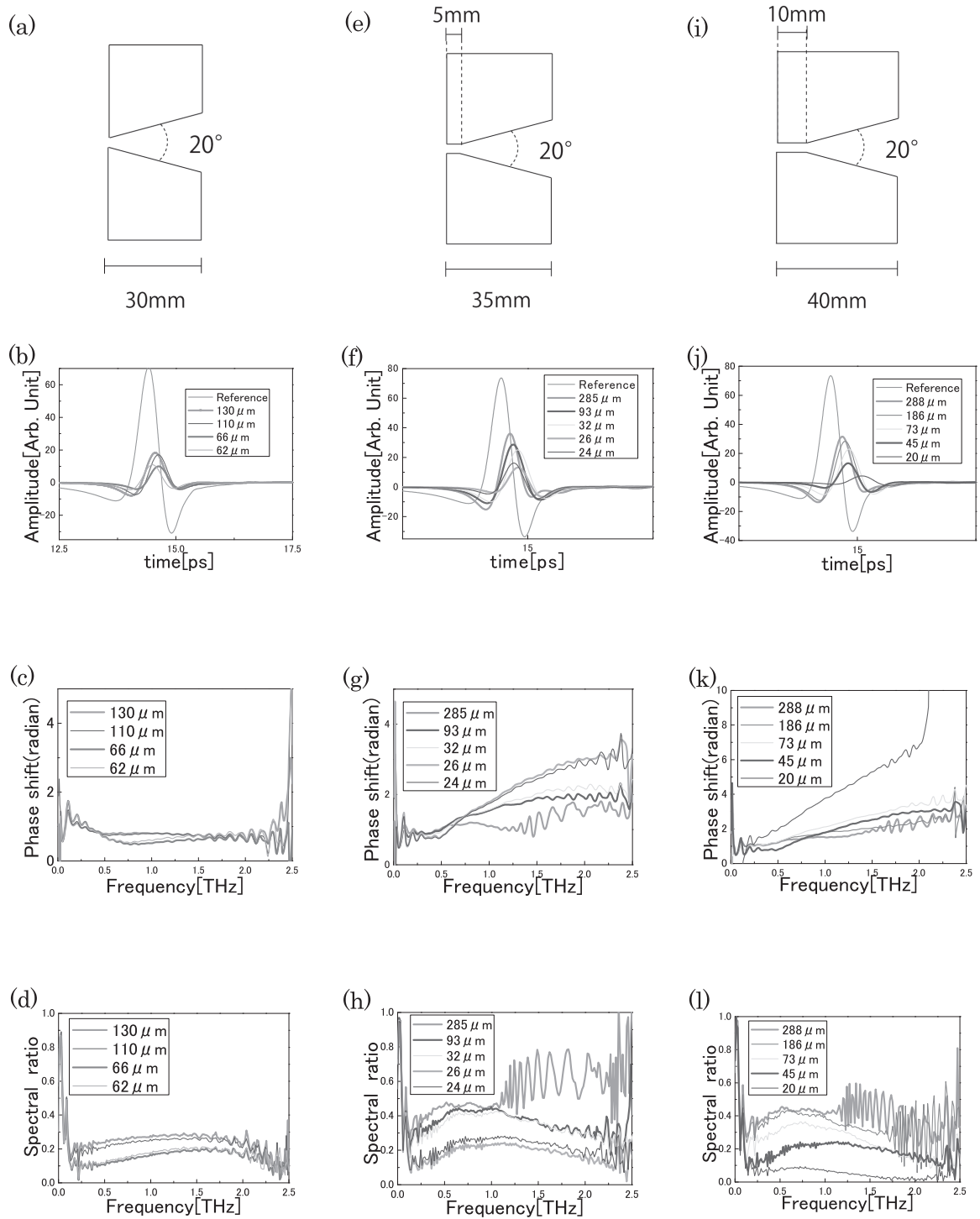


図 3 用いたV溝構造と実験結果，図 3(a)は用いたV溝構造である TPPWG00，図 3(b)は実験で得られた時間波形，図 3(b)をフーリエ変換して得られた位相遅れ，図(c)，と透過率スペクトル図 3(d)。TPPWG05 は図 3(e)-(h)，TPPWG10 は図 3(i)-(l)にそれぞれ対応する。

図 3 (a)は用いたV溝構造である TPPWG00 の概略図である。図 3(b)は実験で得られた時間波形, 図 3 (c)は図 3 (b)をフーリエ変換して得られた位相遅れ, 図 3 (d)は透過率スペクトルを示す。図 3 (e)-(h)は TPPWG05 構造に対して, 図 3 (i)-(l)は TPPWG10 の構造に対してそれぞれ対応したものを示す。図 3 (b), (f), (j)の時間波形を見ると, 平行平板長が長くなるほど時間遅れが大きくなってゆくの分かる。図 3 (c), (g), (k)の位相スペクトルを見ると, 平行平板長がゼロ (平行平板長が無い) の場合, 位相変化は周波数に対してほぼ一定であることが分かる。一方平行平板長が 5mm および 10mm の場合は, 先端幅が小さくなると位相遅れスペクトルの傾きが大きくなる。すなわち平行平板導波路部での位相速度は平行平板導波路幅が小さくなると自由空間での速度よりも遅くなる。一方, 興味深いことに金属V溝を伝搬する際には THz 波の位相は周波数に依存しない位相シフトが生じるが, その位相速度は自由空間の場合と同じであることが分かる。

図 3(d)(h)(j)の透過率スペクトルの結果を見ると周波数依存はあまり大きくなく, 先端幅が小さくなるほどスペクトル比が減少することが分かる。

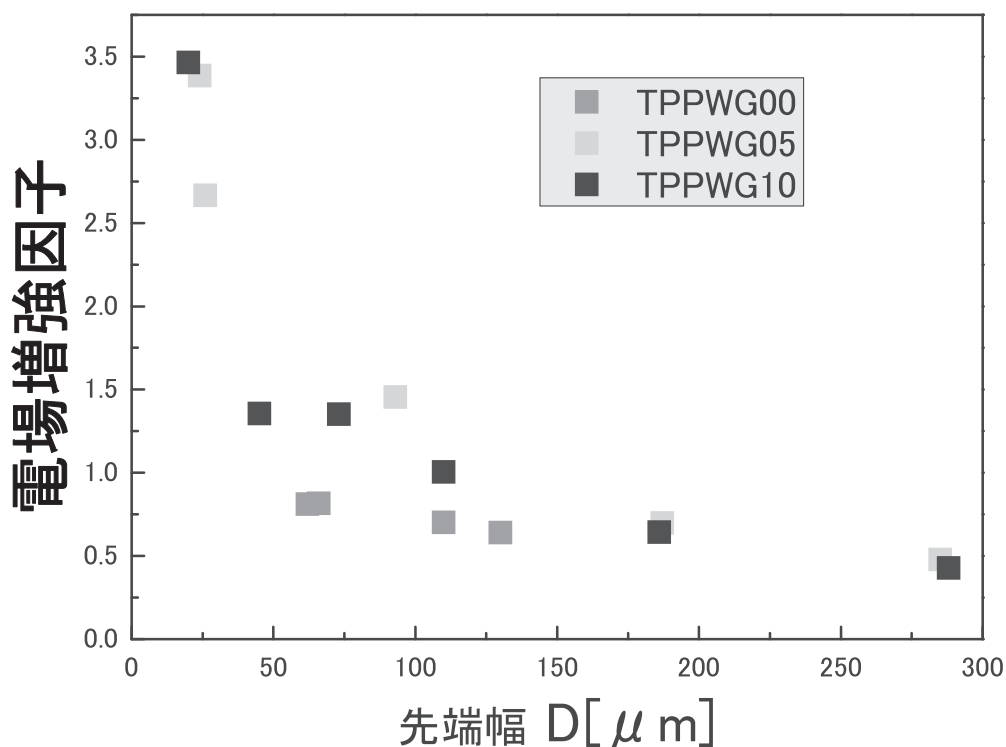


図 4 各V溝構造の電場増強因子の先端幅依存性

図 4 は 1THz におけるそれぞれの V 溝構造の先端幅 D に依存した電場増強因子を表わ

したものである。電場増強因子は、

$$\text{電場増強因子} = \frac{\text{振巾透過率}}{\text{先端幅}D / \lambda_{(1\text{THz})}} \quad (1)$$

で定義する。電場増強因子は波長と $\lambda$ と同じ先端幅 $D$ を減衰することなく透過した場合に1となる。自由空間では回折限界により、通常電場増強因子は1程度以上にはならないが、図4では最大で3.5もの値を得ていることから、超集束効果により電場増強がされていることが分かる。また、先端幅を小さくするにつれて急激な電場増強が確認できる。平行平板長依存性については、データ点のばらつきが大きいため、さらに多くの測定が必要である。

次に、TPPWG00, TPPWG05, TPPWG10 についての位相スペクトルより、屈折率 $n(\omega)$ を求める。距離 $\Delta L$ を伝搬したときの位相遅れを $\Delta\phi$ とすると、平行平板導波路の屈折率 $n(\omega)$ を次のように表わすことができる。

$$n(\omega) = 1 + \frac{\Delta\phi}{\omega\Delta L/c} \quad (2)$$

ここで $c$ は真空の光速である。V溝構造における位相変化の影響を除くために、TPPWG05とTPPWG10の位相スペクトルの差分を位相遅れ $\Delta\phi$ とし、 $n(\omega)$ を求める。先端幅 $D$ はTPPWG05とTPPWG10でできるだけ近い値をとった(それぞれ $93\mu\text{m}$ と $110\mu\text{m}$ )。 (2)式より計算した結果を図5に示す。

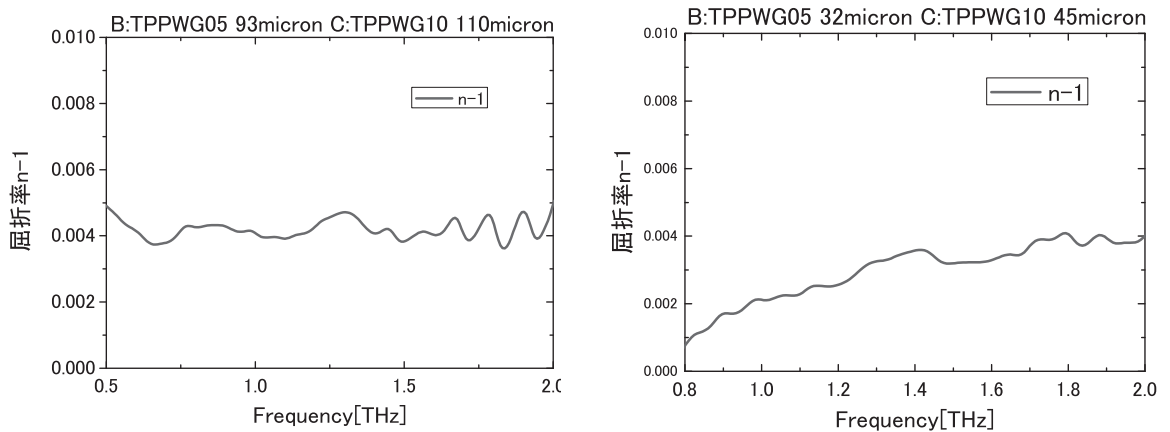


図5 TPPWG05とTPPWG10の平行平板導波路部の実効的屈折率。(a)TPPWG10の $D=110\mu\text{m}$ , およびTPPWG05の $D=93\mu\text{m}$ の場合の位相スペクトル差から計算した屈折率 $n(\omega)-1$ の値。(b)TPPWG10の $D=45\mu\text{m}$ , およびTPPWG05の $D=30\mu\text{m}$ の場合の位相スペクトル差から計算した屈折率 $n(\omega)-1$ の値。

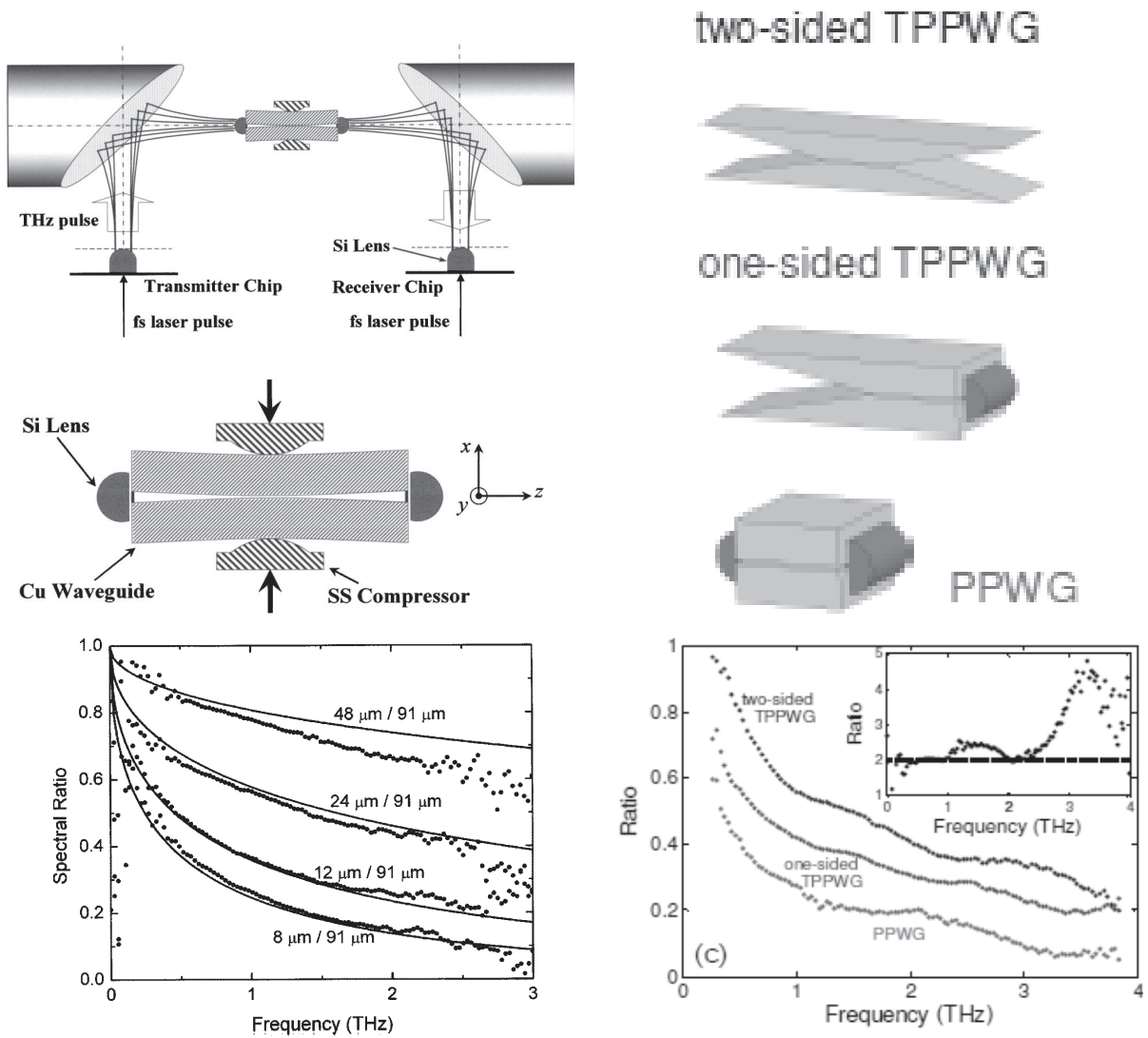


図 6 Grischkowsky ら[1]の実験概略図(a)と実験結果(c)と Kim ら[2] の実験に使用した形状 (b)と実験結果(d)

図 5(a)より, 平行平板導波路幅が  $100\mu\text{m}$  程度するとき, 屈折率  $n$  が 1 よりわずかに大きく, 約 1.004 の一定値となることが分かる。図 5(b)より, 平行平板導波路幅が  $40\mu\text{m}$  程度するとき, 屈折率  $n(\omega)$  がゼロ周波数から 1.4THz にかけて 1.0001 から単調に増加し, 1.4THz 以上の周波数で約 1.004 の一定値となることが分かる。屈折率がわずかに大きくなっているということは, テラヘルツ波の伝播速度が遅くなっていることを表わし, 時間的な位相遅れが起きていることを表わしている。

図 3 で得られた実験結果と先行研究の実験結果と比較する。Grischkowsky ら[1]は, 図 6(a)のような銅製の平行平板導波路を作成し, 中心部を圧縮することによってわずかに曲率をもたせた導波路の THz 波伝搬特性を調べた。導波路入射部が非常に狭いため, 両側に Si



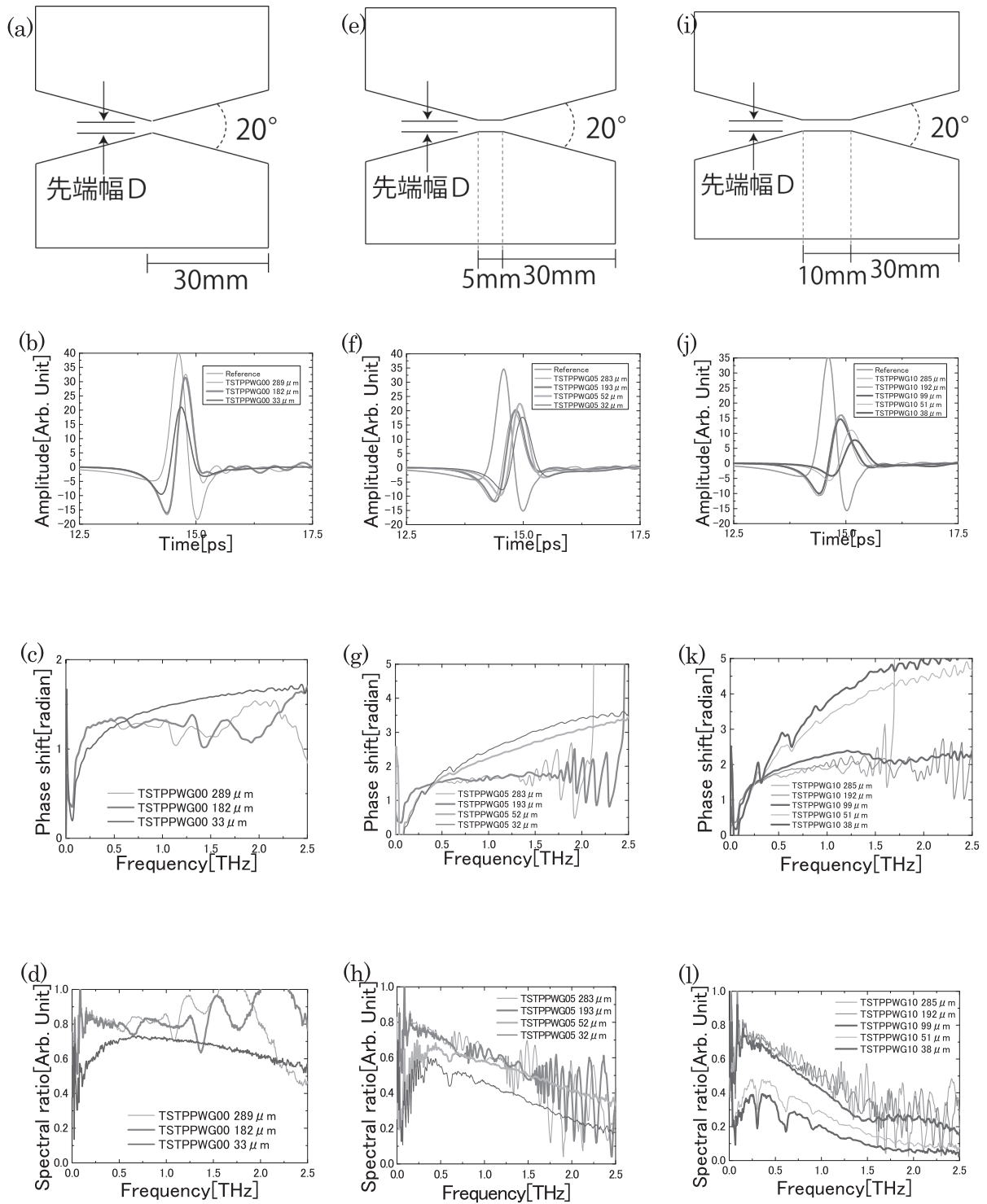


図 7 用いた両側V溝構造と実験結果，図 7(a)は用いたV溝構造である TSTPPWG00，図 7(b)は実験で得られた時間波形，図 7(b)をフーリエ変換して得られた位相遅れ図 7(c)，と透過率スペクトル図 7(d)。TSTPPWG05 は図 7(e)-(h)，TSTPPWG10 は図 7(i)-(l)に各々対応する。

製シリンドリカルレンズを使用している。本研究での結果は、Grischkowsky らの場合と比べて、開き角がはるかに大きいにもかかわらず、高い透過率を示した。また Kim ら [2] は、two-sided TPPWG(両側 V 溝構造), one sided TPPWG(V 溝構造), および PPWG(Si 製シリンドリカルレンズ付き平行平板)を測定している。Kim らは開き角 20 度の V 溝構造も調べているが、定性的には我々が得た結果と一致している。異なる点は Grischkowsky らや Kim らの結果では、周波数が高くなると透過率が低くなってゆくのにに対して、本研究の結果では、周波数が高くなると透過率も高くなってゆく傾向がみられることである。この違いは Kim らの場合のように V 溝の先端部で Si レンズを用いていないため、先端部から THz 波が再放射される際、回折による低周波成分の損失が大きくなっているためではないかと考えられる。このことを確かめるため、両側 V 溝構造を作成し、評価した。

図 7 (a)は用いた両側 V 溝構造 (中央に平行平板導波路なし) である TSTPPWG00 の概略図である。実験に用いた光学系は同じものを使用している。図 7 (b)は実験で得られた時間波形, 図 7 (b)をフーリエ変換して得られた位相遅れ(c), と透過率スペクトル(d)を示し, 図 7 (e)-(h)は中央に 5mm の平行平板導波路を持つ両側 V 溝構造である TSTPPWG05 について, 図 7 (i)-(l)は中央に 10mm の平行平板導波路を持つ両側 V 溝構造である TSTPPWG10 について, それぞれ対応したものを示す。図 7 (b), (f), (j)の時間波形を見ると, 平行平板長が長くなるほど波形の時間遅れが大きくなってゆくのかわかる。図 7 (c), (g), (k)の位相スペクトルには対応する変化が確認でき, 片側 V 溝構造の場合と同じ傾向を示している。

図 7 (d), (h), (l)の透過率スペクトルを見ると, 片側 V 溝構造の場合とは透過率の周波数依存性が異なることが分かる。すなわち片側 V 溝構造の透過率スペクトルは周波数依存が比較的小さかったのに対して, 両側 V 溝構造では, 低周波数の透過率が高く, 周波数が高くなるにつれて透過率が下がる傾向が見られる。この結果は Grischkowsky らや Kim らと結果と一致している。このことから, 片側 V 溝構造における低周波数の透過率は回折による拡がりによって検出される成分が減少した結果だと考えられる。

また注目すべき点は両側 V 溝構造では最小幅  $D$  が  $30\mu\text{m}$  程度の場合でも, 非常に高い透過率が得られていることである (平行平板導波路の無い TSTPPWG00 は最小幅  $D=33\mu\text{m}$  の場合で 1THz における振幅透過率約 70%)。

#### 4. まとめ

6 種類の金属 V 溝構造を用いて, 先端幅  $D$  および平行平板導波路長に依存した THz 波の透過率, 位相遅れ, 超集束による電場増強効果を系統的に測定した。先端幅  $D$  を小さくすることで透過率は減少するが, カットオフは示さず, 減少率もそれほど顕著ではない。このため電場増強効果は, 先端幅を小さくすると急激に大きくなった。先端幅

をさらに小さくすることによってより大きな電場増強効果が得られることが期待される。平行平板導波路における位相速度は自由空間の場合に対して、わずかに遅くなる（100 $\mu\text{m}$ 幅で0.4%程度）が、その周波数依存性は小さいことが分かった。

## 参考文献

- [1] J. Zhang and D. Grischkowsky, “Adiabatic compression of parallel-plate metal waveguides for sensitivity enhancement of waveguide THz time-domain spectroscopy,” *Appl. Phys. Lett.* **86**, 061109 (2005).
- [2] Sang-Hoon Kim, Eui Su Lee, Young Bin Ji, and Tae-In Jeon, “Improvement of THz coupling using a tapered parallel-plate waveguide,” *Opt. Express* **18** No.2 (2010) 1289.
- [3] Mark I. Stockman, “Nanofocusing of Optical Energy in Tapered Plasmonic Waveguides”, *Phys Rev. Lett.* **93** (2004) 137404
- [4] Kazuyoshi Kurihara, Junichi Takahara, Kazuhiro Yamamoto, Akira Otomo, “Identifying plasmonic modes in a circular paraboloidal geometry by quasi-separation of variables”, *J. Phys. A: Math. Theor.* **40** (2007) 185401
- [5] Kazuyoshi Kurihara, Kazuhiro Yamamoto, Junichi Takahara, “Superfocusing modes of surface plasmon polaritons in a wedge-shaped geometry obtained by quasi-separation of variables”, Akira Otomo, *J. Phys. A: Math. Theor.* **41** (2008) 295401
- [6] 岡本隆之, 梶川浩太郎 「プラズモニクス-基礎と応用」, p.4(2010年講談社)