

Influence of metal surface roughness on the phase velocity of terahertz waves propagating in parallel plate waveguides

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 竹嶋, 大貴, 左近, 知也, 都築, 聡, 楠田, 佑司, 松井, 多志, 西澤, 誠治, 古屋, 岳, 桑島, 史欣, 栗原, 一嘉, 山本, 晃司, 谷, 正彦, Takeshima, Daiki, Sakon, Tomoya, Tsuzuki, Satoshi, Kusuda, Yuji, Matsui, Futoshi, Furuya, Takashi, Kuwashima, Fumiyoshi, Kurihara, Kazuyoshi, Nishizawa, Seizi, Yamamoto, Kohji, Tani, Masahiko メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/8031

平行平板導波路構造を用いたテラヘルツ波の位相速度依存性
Influence of metal surface roughness on the phase velocity of terahertz
waves propagating in parallel plate waveguides

竹嶋大貴¹、左近知也¹、都築聡¹、楠田佑司²、松井多志³、西澤誠治¹、古屋岳⁴、
桑島史欣⁵、栗原一嘉⁶、山本晃司¹、谷正彦¹
*Daiki Takeshima¹, Tomoya Sakon¹, Satoshi Tsuzuki¹, Yuji Kusuda², Futoshi Matsui³,
Takashi Furuya⁴, Fumiyoshi Kuwashima⁵, Kazuyoshi Kurihara⁶, Seizi Nishizawa¹,
Kohji Yamamoto¹ and Masahiko Tani¹*

¹ 福井大学遠赤外領域開発研究センター

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

² フクオカラシ

²*Fukuoka Rashi co. Ltd
Sabae 916-0047, Japan*

³ ふくい工業支援センター

³*Fukui Industrial Support Center
Sakai 910-0296, Japan*

⁴ 福井大学工学部

⁴*Faculty of Engineering, University of Fukui
Fukui 910-8507, Japan*

⁵ 福井工業大学電気電子情報工学科

⁵*Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Fukui University of Technology
Fukui 910-8505, Japan*

⁶ 福井大学教育地域科学部

⁶*Faculty of Education and Regional Studies, University of Fukui
Fukui 910-8507, Japan*

Abstract

This work presents evidence of phase velocity dependence on metal surface roughness for terahertz (THz) waves propagating in a parallel plate metal waveguide having a sub-wavelength gap. This suggests possible way to control the phase velocity and the propagation direction of guided THz waves by varying the surface roughness of the parallel plates.

1. はじめに

光伝導アンテナ等を用いたテラヘルツ波時間領域分光法(Terahertz Time - Domain Spectroscopy, 以下 THz - TDS)は生体分子や半導体等の試料分光への応用が期待されている。テラヘルツ波(THz 波)を用いて試料の分光やイメージングを行う際には、THz 波を任意に制御可能な事が望ましい。従って、現在安価かつ簡便に THz 波の位相速度を制御可能な素子開発のが期待されている。

本研究室ではこれまでに THz 波を波長サイズ以下に集束する事が可能な超集束効果の研究を行い、超集束効果が達成可能な素子として平行平板付金属 V 溝導波路構造を提案、実証してきた。この研究により THz 波が超集束することにより、THz 波を比較的良好に透過させ、THz 波のエネルギー密度あるいは電界強度が増大し、高強度な THz 波が得られることを確認している。[1] 今回、平行平板導波路内の金属表面粗さが、透過する THz 波の位相速度の遅れに影響している可能性が見出された。本研究では金属導波路内の THz 波位相速度の制御を目的として、透過する THz 波位相速度の金属表面粗さ依存性の評価を行った。また、表面粗さに依存した位相速度を評価し、位相速度の変化が金属の有効誘電率に由来するものであることを明らかにした。

2. テラヘルツ波時間領域分光法

本研究は、金属導波路の評価にテラヘルツ時間領域分光法を用いて行った。THz - TDS とは、THz パルス波をサンプルに入射し、サンプルを透過した後のパルス波の時間領域波形を計測し、その時間波形をフーリエ変換することによって振幅と位相のスペクトルを得る分光法である。得られたスペクトルを解析することによって、誘電率や屈折率の周波数依存性などのサンプルの光学的な性質を知ることが出来る[2]。本研究で用いた THz-TDS 装置の概要図を図 1 に示す。この装置は主に、光源となるフェムト秒パルスレーザー、THz 波を発生・検出するための半導体素子である光伝導アンテナ、光路長を変調し時間遅延を走査する機械式遅延ステージで構成されている。本研究は、発生側、検出側ともにダイポール型の光伝導アンテナを用いた。光源であるフェムト秒レーザーから出射された光パルスが偏光ビームスプリッター (PBS) でポンプ光とプローブ光に分けられる。発生側の光伝導アンテナにバイアス電圧がかかった状態でポンプ光が入射すると光伝導電流パルスが流れ、電流の時間変化に比例した電磁波が双極子放射として放射される。放射された THz パルス波は、平板ミラーと楕円ミラーを組み合わせた光学系によって、検出側の光伝導アンテナに入射される。一方、プローブ光は機械式遅延ステージを経て検出側の光伝導アンテナに入射する。プローブ光は機械式遅延ステージによって光路長変化が与えられ、プローブ光と THz パルス波が光伝導アンテナに入射するタイミングがずれていき、それぞれのプローブ光のタイミングにおける THz パルス波の振幅に対応した信号をロックインアンプで検出する。このようにして得られた信号を同一の時間軸にプロットすると THz パルス波の時間波形を得ることが出来る。THz 波の時間波形をフーリエ変換することで、周波数ごとの振幅と位相の情報を得ることが出来る。

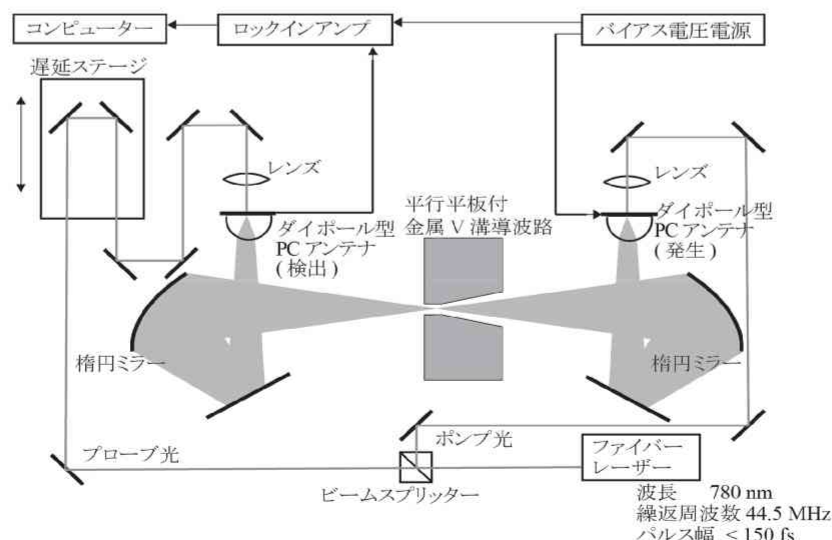


図1 本研究で用いた THz-TDS の光学系

本研究では、THz-TDS 装置の THz 波ビームが絞られる位置に平行平板付金属 V 溝導波路を挿入し、挿入しない場合(自由空間中)を参照波形としてその透過率および位相差スペクトルを測定した。

3. THz 波の超集束効果と位相速度制御の原理

3.1. 平行平板付金属 V 溝導波路構造を用いた THz 波の超集束効果の原理

3.1.1. 超集束効果とは

本研究において超集束とは回折限界を超えた小さな空間に電磁波を集束させることを指す。通常回折限界は波長サイズ程度で決定され、通常の光学素子で THz 波を集束しても波長サイズ以下に集束させることは出来ない。一般には幅がゼロになる極限でも伝搬モードが存在することを超集束と呼ぶ。我々は、回折限界よりも小さな空間に伝搬モードの電磁波が閉じ込められることをもって狭義の超集束としている。超集束を実現するための構造として、我々のグループでは金属 V 溝導波路(図 2)を採用している。この導波路は波長に比べて緩やかに小さくなる構造をしていないが、前述したような超集束モードが存在する。

3.1.2. 平行平板付金属 V 溝導波路構造

測定には、金属表面粗さが異なる長さ5 mmの金属平行平板導波路を使用している。また、自由空間からのTHz波の結合には金属V溝導波路を用いている。金属V溝を取り付けることで、比較的反射ロスが少なき状態でTHz波を集光できる利点がある。金属V溝の開口角は20度で、集光されたTHz波が全て金属V溝導波路に入射するようにしている。また、厚さ10 μm のシムをスペーサとして平行平板導波路の左右端に挟みこむことによって、平行平板導波路の幅を全て10 μm 程度に制御している。シムの素材はタングステンである。は金属表面粗さを変えて、平行平板導波路部でのTHz波伝搬特性を評価する。

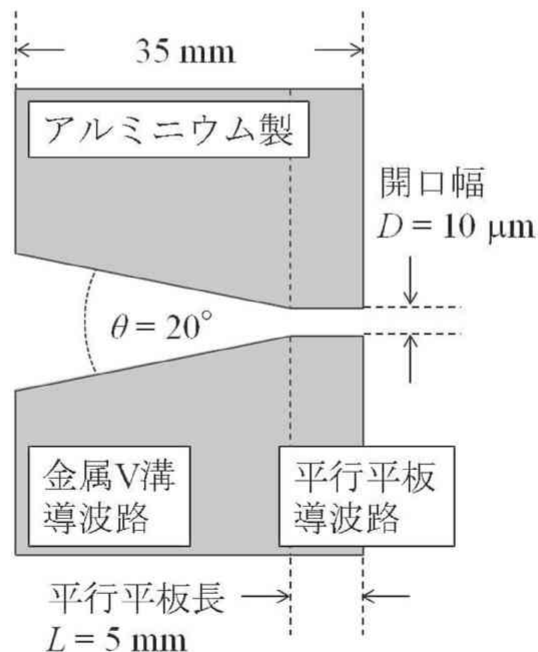


図2 平行平板付き金属V溝導波路

3.1.3. 超集束効果の原理

金属表面に沿って電磁波が伝搬するとき、自由電子の集団振動（プラズマ振動）が金属の表面近傍で起こっている[3]。この集団振動も電磁波と一緒に金属表面を伝搬することから、金属表面を伝搬する電磁波は表面プラズモンと呼ばれる。平行平板付金属 V 溝導波路に電磁波を入射させると、電磁波はプラズマ振動との連成波となり、本来、電磁波の回折限界で通れない狭い空間でも電磁波が透過できるようになる。

3.1.4. Spoof-Surface Plasmon とは

Spoof-Surface Plasmon とは、金属表面に微小な周期構造（円柱や三角柱、穴等）を作り実効的な誘電率が下がる事によって、金属中への電場のしみ込みを増加させ、表面プラズモンを表面近傍に局在させた擬似的な表面モードである。表面構造の幾何学パラメータ（穴の大きさや深さ）を変えることにより、表面プラズモンの制御が可能である。我々の研究では、表面粗さを平均化された表面構造として扱う事で製作コストの低減を行った。表面粗さの定義として JIS B0601:2001 の R_z を用いた。

4. 実験結果

4.1. 時間波形と透過率

はじめに我々は、表面粗さの異なる平行平板(金属導波路 B の方が粗い)の結合した平行平板付金属 V 溝導波路構造を用いて THz-TDS で測定を行った(図 3)。この結果から明らかに表面粗さが粗い方が時間波形が遅れていることがわかる。このことから表面粗さを機械的に研磨し、 $1\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $11\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ に制御した。

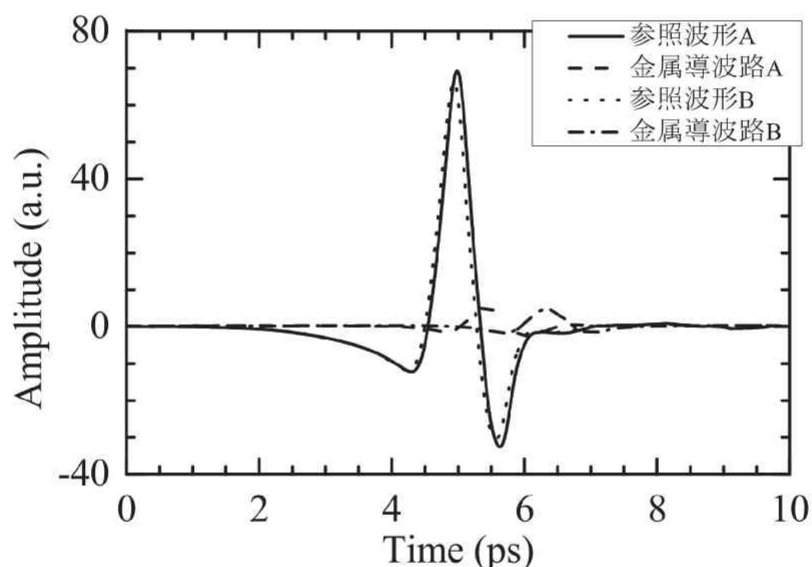


図 3 表面粗さの異なる平行平板導波路を用いた場合の時間波形

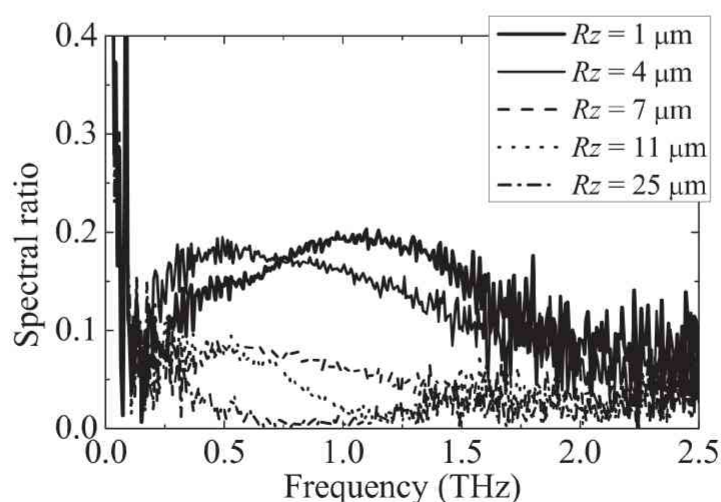


図4 金属平行平板付き金属V溝導波路の振幅透過率

平行平板付金属V溝導波路構造を透過した振幅の参照波に対するスペクトル比，すなわち各波形の振幅透過率は

$$\text{振幅透過率} = \frac{\text{振幅(Sample)}}{\text{振幅(Reference)}} \quad (1)$$

で与えられる。上式により計算される振幅透過率を図4に示す。

図4から，表面粗さに応じて透過率の変化がみられる。表面が粗いほど低周波数成分の透過率が大きくなる傾向がみられる。また， $R_z = 25 \mu\text{m}$ の場合には 0.5 THz よりも高周波数側の透過がほとんど見られない。この原因としては，低周波数すなわち長波長側の THz 波の方が粗い表面構造を無視できる（伝搬長が長い）からであると考えられる。

4.2. 位相シフト

図4から金属平行平板導波路付き金属V溝導波路を透過したTHz波（Sample波）がReference波に比べて時間遅延を起こしていることが分かる。このことは各周波数成分において位相シフトが起きていることを示している。

各表面粗さにおける位相シフトスペクトルを図5に示す。ただし，平行平板導波路部の表面粗さによる位相シフトのみを見るために，表面が最も滑らかな $R_z = 1 \mu\text{m}$ の位相シフトをReferenceとする。表面粗さによって位相シフト量が異なることが分かる。

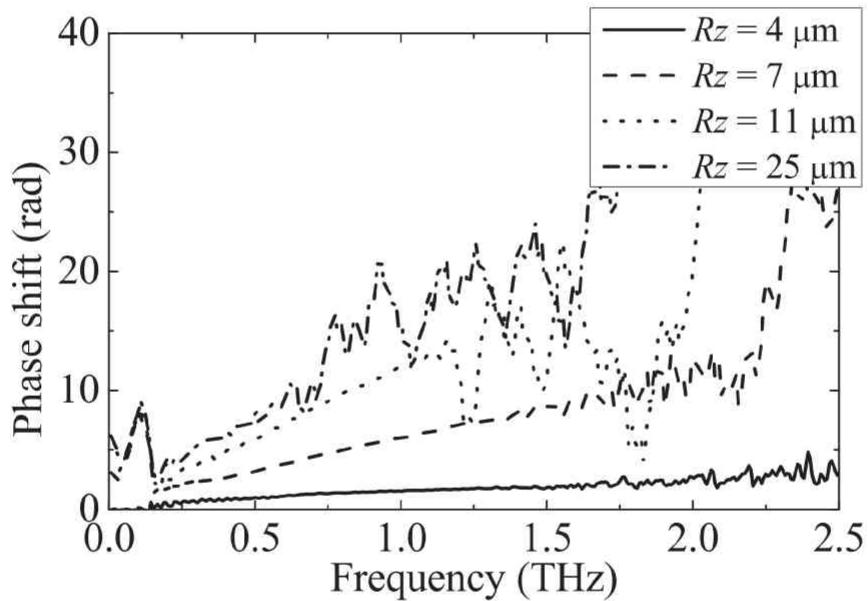


図5 金属平行平板導波路付き金属V溝導波路の位相シフト

4.3. THz位相速度の金属表面粗さ依存性

z 軸方向に進む平面波を表す式 $Ae^{-i(\omega t - kz)}$ (A : 振幅, k : 波数) において伝搬による位相変化は kz に対応しており，これを $kz = \varphi$ とおくと，その位相シフトは

$$k(z_2 - z_1) = \Delta\varphi = k\Delta L = \frac{2\pi(n-1)\Delta L}{\lambda_0} = \frac{(n-1)\omega\Delta L}{c} \quad (2)$$

と表すことが出来る。ここで ΔL は平行平板の長さの差を， $n-1$ は平行平板導波路部での実効的屈折率 n と自由空間の屈折率の差を， λ_0 は真空中での波長を， ω は角周波数を， c は光速 ($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$) をそれぞれ表している。これを変形すると，屈折率差を表す式

$$n-1 = \frac{\Delta\varphi}{\omega \cdot \Delta L / c} \quad (3)$$

を得る。この式を用いて求めた屈折率を図6に示す。

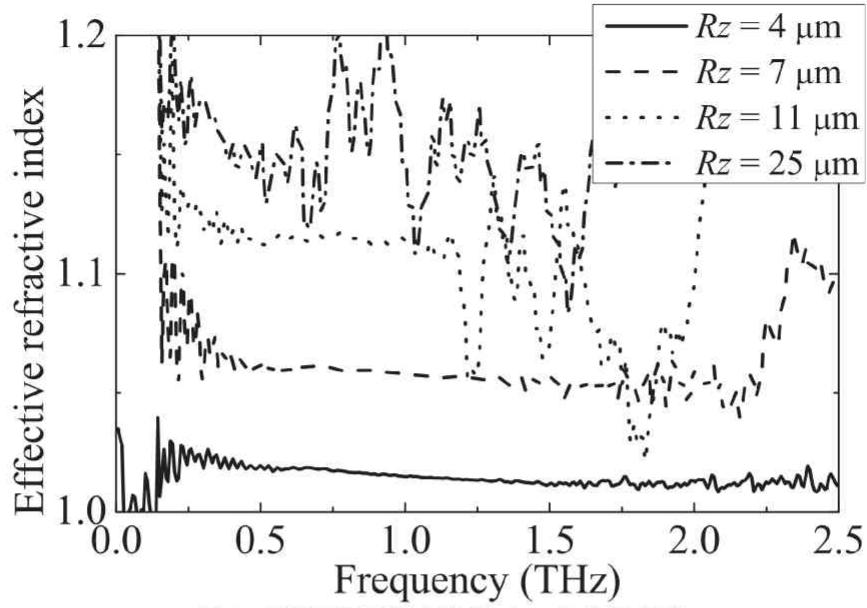


図6 平行平板導波路部での有効屈折率

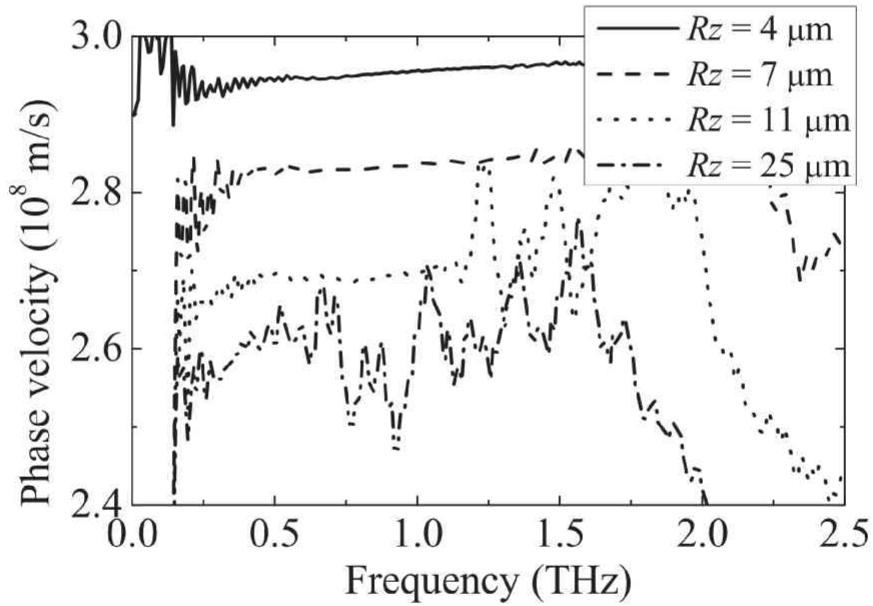


図7 平行平板導波路内での位相速度の周波数依存性

表面粗さに応じてTHz波に対する金属導波路表面の有効屈折率が変化していることが分かる。さらに、求めた屈折率から $v_p = c / n$ を用いてTHz波の位相速度の周波数依存性を求めたものを図7に示す。表面粗さによってTHz波位相速度が変化していることが分かる。

4.4. 有効誘電率の金属表面粗さ依存性

$v_p = \omega / k_{gsp}$ から波数 k_{gsp} の周波数依存性（波数分散）を計算したものを図8に示す。波数 k_{gsp} から有効誘電率（比誘電率）を求めたものを図9に示す。また、ローレンツ・ドルーデモデル

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_f(\omega) + i\varepsilon_{ib}(\omega) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma_0)} + i\varepsilon_{ib}(\omega) \quad (4)$$

の実部

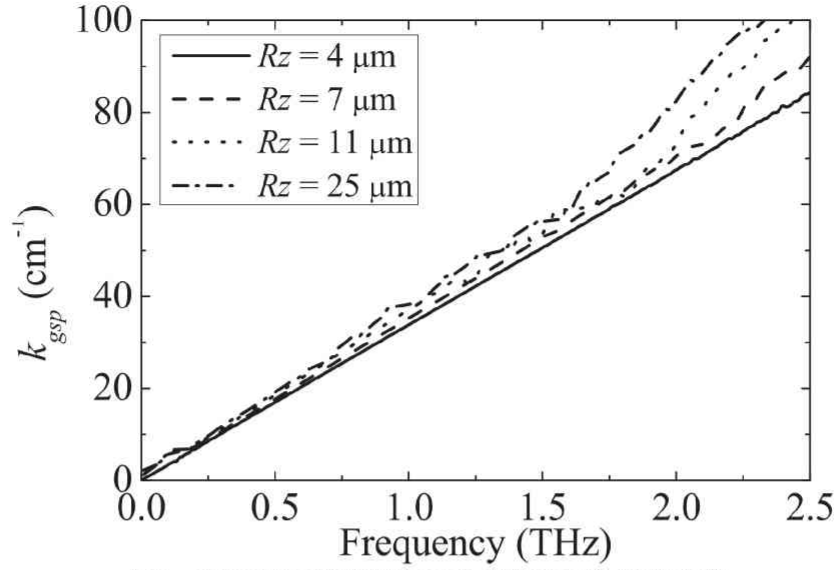


図8 平行平板導波路内での波数の周波数依存性

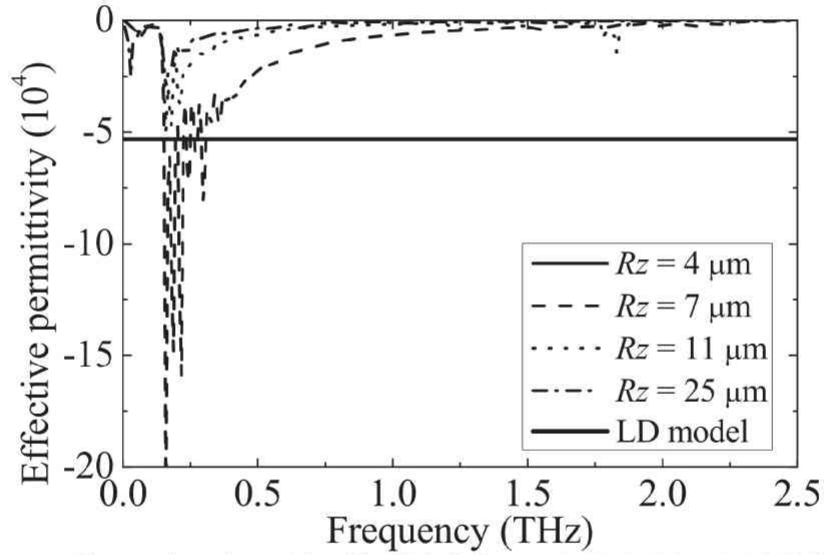


図9 THz波に対する金属平行平板導波路表面の有効誘電率の周波数依存性

$$\text{Re}\{\varepsilon_m(\omega)\} = 1 - \frac{\Omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma_0^2}, \quad \Omega_p = \sqrt{f_0} \omega_p \quad (5)$$

から計算されるバルク金属アルミニウムの誘電率の実部を図9に同時に示す。ここで、 $\varepsilon_m(\omega)$ はバルク金属の誘電率、 $\varepsilon_f(\omega)$ は自由電子による項、 $\varepsilon_b(\omega)$ はバンド間遷移による項、 Γ_0 は減衰定数、 f_0 は振動子強度を表す。プラズマ周波数 $\omega_p = 2.4 \times 10^{16}$ Hz (エネルギーに換算すると14.98 eV)、 $f_0 = 0.523$ 、 $\Gamma_0 = 0.047$ (1 eVの値)をそれぞれ用いた [4]。計算では、周波数は全てエネルギーに換算した値を代入している。表面粗さに応じてTHz波に対する金属導波路表面の有効誘電率が変化していることが分かる。

5. まとめ

本報告では、平行平板付金属V溝導波路を透過するTHz波位相速度の金属表面粗さ依存性を示した。平行平板部の金属表面粗さを変えることによって、透過するTHz波位相速度

に変化が見られた。最大で約10%の位相速度遅延が見られ、表面粗さによるTHz波位相速度制御は有効であると考えられる。このとき、位相制御素子として金属導波路をTHz分光に使用する場合、使用したい帯域によっては使用可能な表面粗さの値が変わると考えられる。また、平行平板導波路の表面粗さは通常の機械加工で制御可能であるため、比較的安価なTHz波位相制御素子の作製が可能である。

参考文献

- [1] 栗原一嘉、他、2012年春季応用物理学会学術講演会 17p-E8-2 (2012)
- [2] 谷 正彦：分子科学若手の会夏の学校 第1分科会「テラヘルツ電磁波の発生・検出とその応用」 (2005)
- [3] 岡本 隆之，梶川 浩太郎：「プラズモニクス」，講談社 (2010)
- [4] A. D. Rakic : "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices", Applied Optics, Vol. 37, No. 22 pp.5271-5283 (1 August, 1998)