

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04598

研究課題名(和文) 金属テーパ導波路におけるプラズモン超集束の数理解析と応用：テラヘルツ波への展開

研究課題名(英文) Mathematical analysis of plasmonic superfocusing in the metallic tapered waveguides and its application: Development into terahertz region

研究代表者

栗原 一嘉 (Kurihara, Kazuyoshi)

福井大学・学術研究院教育・人文社会系部門(教員養成)・教授

研究者番号：20270704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：光領域で確立したプラズモニクスの考え方をテラヘルツ波領域に拡張し、テラヘルツ波に特有なプラズモニクスの理論と実験を展開した。理論面では、金属V溝テーパ導波路構造の超集束モードの近似解析解を求めた。また、平行平板付き金属V溝テーパ導波路に対して、透過特性や電場増強度を計算する枠組みを確立した。実験面では、電気光学アンテナと名付けた、非線形光学結晶を挟んだ平行平板付き金属V溝テーパ導波路を試作した。

研究成果の概要(英文)：The fundamental concept of plasmonics established in the optical region has been expanded into the terahertz waves' region, and plasmonic theories and experiments characteristic of the terahertz waves' region have been developed. In terms of theories, we have found approximate analytic solutions of superfocusing modes in metallic V-grooved tapered waveguides for the terahertz waves' region. In addition, we have established calculation schemes for transmission characteristics and electric field enhancement in the metallic V-grooved tapered waveguide coupled to the parallel plate waveguide. In terms of experiments, we have made a prototype of the metallic V-grooved tapered waveguide coupled to the parallel plate waveguide containing a nonlinear optical crystal inside, named as electro-optic antenna.

研究分野：ナノ・マイクロ科学

キーワード：プラズモン 超集束 テラヘルツ波 導波路 電場増強 準変数分離 数理解析

1. 研究開始当初の背景

(1) プラズモニクスは、21世紀に入ってから誕生した新しい光学である。従来の光学では、回折限界寸法以下の伝搬モードを消極的にしか扱わなかったのに対して、プラズモニクスでは、金属中のプラズマ状態にある自由電子を基礎として、金属誘電体界面を伝搬する回折限界寸法以下のモードを積極的に扱う。プラズモニクスは、金属誘電率を負値で近似できる光領域で最初に確立された。負の誘電率では、金属テーパ構造先端において、回折限界を超えた電場集中-超集束-が理論的に可能なことが簡単に示せたからである(引用文献①)。そこから、理論と実験の体系化が急速に進展してプラズモニクスが誕生した。

(2) 研究開始当初の段階では、プラズモニクスの考え方を、テラヘルツ波領域に適用することは希であった。理由を想像するに、テラヘルツ波領域では、金属を完全導体として扱うマイクロ波技術の考え方で実験事実を十分説明できることが1つである。もう一つは、テラヘルツ波領域では、金属誘電率が実部より虚部が大きい値であり、理論的に扱うのが困難という現実的な理由からである。

(3) 金属テーパ構造のプラズモニクス理論に関して、研究代表者は数理解析的に扱う新しい方法-準変数分離法-を提案している(引用文献②)。研究開始当初の段階では、この準変数分離法を光領域の金属テーパ構造に適用したものであった。しかし、テラヘルツ波技術が急速に普及するに連れて、金属テーパ構造を使った実験がテラヘルツ波領域で実施されるようになっており、準変数分離による数理解析法をテラヘルツ波領域へ拡張する必要性に迫られていた。

2. 研究の目的

(1) 光領域で確立したプラズモニクスの考え方をテラヘルツ波領域に拡張し、テラヘルツ波に特有なプラズモニクスを理論と実験で明らかにすることが本研究の目的である。

(2) 具体的には、理論面では、テラヘルツ波領域では、金属を完全導体として近似的に扱うマイクロ波技術の理論で議論されることが今でも多く、プラズモニクスの考え方を導入されると、どのように修正されかを明らかにする。実験面では、テラヘルツ波領域にプラズモニクスの考え方を導入された結果、どのようなデバイスが可能になるかを提案する。

3. 研究の方法

(1) 金属 V 溝テーパ導波路構造は、準変数分離による数理解析法を用いてテラヘルツ波領域のプラズモニクスを議論する上で、理論と実験の両面から最適な形状である。理論面からの理由は、テラヘルツ波領域でプラズモン超集束が生じる最も単純な構造であり、数

学的な取扱いが最も簡単である。一方、実験面からの理由は、実験的に生成が簡単な直線偏光のテラヘルツ波に対してプラズモン超集束が起こる構造であることが1つ。もう一つは、非線形光学結晶を挟み込んだ平行平板導波路を金属 V 溝テーパ導波路に接続して新しいタイプのアンテナ-電気光学アンテナ-を実現できることにある。

(2) 図1に、金属 V 溝テーパ導波路構造の解析モデルを示す。図1のプラズモン超集束モードについては、引用文献②で議論されている。ここでは、要点を記す。

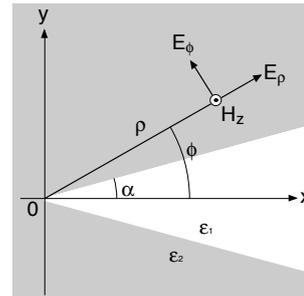


図1 金属 V 溝テーパ導波路構造の幾何学配置。
ε₁とε₂は、誘電体と金属の誘電率である。

テーパ先端へ伝搬する表面プラズモンは TM モードであり、磁場ベクトルは、図1の紙面に垂直な1成分で記述できる。円柱座標系における磁場 $H_z(\rho, \phi)$ に対する波動方程式は

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial H_z(\rho, \phi)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_z(\rho, \phi)}{\partial \phi^2} + \epsilon_j \frac{\omega^2}{c^2} H_z(\rho, \phi) = 0 \quad (1)$$

で書き表せる。この解として、準変数分離した解

$$H_z(\rho, \phi) = R(\rho)Q(\phi, \rho) \quad (2)$$

を仮定し、金属 V 溝構造の先端と無限遠での考察後、摂動法を適用すると、0次の統一された動径方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} R_u^{(0)}(\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} R_u^{(0)}(\rho) + \left(k_p^2 + \frac{\zeta_u^{(0)}(\rho)}{\rho^2} \right) R_u^{(0)}(\rho) = 0 \quad (3)$$

と0次の角度方程式

$$\frac{\partial^2 Q^{(0)}(\phi, \rho)}{\partial \phi^2} - \{\eta_j(\rho)\}^2 Q^{(0)}(\phi, \rho) = 0 \quad (4)$$

が得られる。ここで、

$$\eta_j(\rho) = \sqrt{\beta_j^2 \rho^2 + \zeta_u^{(0)}(\rho)} \quad (5)$$

$$\beta_j = \sqrt{k_p^2 - \epsilon_j k_0^2} \quad (6)$$

$$k_p = k_0 \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2)} \quad (7)$$

である。式(7)の k_p は、平面型表面プラズモンの波数である。ここで注目すべきは、式(3)や式(5)に登場する、0次の統一された分離不変量 $\zeta_u^{(0)}(\rho)$ である。この分離不変量は、準変数分離法で初めて登場する関数であり、通常の変数分離法では分離定数となるものである。 $\zeta_u^{(0)}(\rho)$ を決定するためには、角度 $\phi = \alpha$ における金属誘電体界面での電場連続性

$$\frac{1}{\epsilon_1} \lim_{\phi \rightarrow \alpha-0} Q^{(0)}(\phi, \rho) = \frac{1}{\epsilon_2} \lim_{\phi \rightarrow \alpha+0} Q^{(0)}(\phi, \rho) \quad (8)$$

から導かれる境界条件

$$\tanh\{\alpha\eta_1(\rho)\} + \frac{\eta_2(\rho)}{\eta_1(\rho)} = 0 \quad (9)$$

を使う。プラズモン超集束モードを求めるためには、式(9)の $\zeta_u^{(0)}(\rho)$ を数値的に解くだけでは不十分であり、近似解析解を求める必要がある。困難は、金属誘電率 ϵ_2 が、実部に比べて虚部が大きく、しかも、絶対値が大きい点にある。例えば、1THzのアルミニウムでは、 $\epsilon_2 = (-3.2 \times 67i) \times 10^4$ である。なお、図3では、この金属誘電率を使って計算している。

4. 研究成果

金属V溝テーパ導波路に関連した本研究を通して、テラヘルツ波領域のプラズモニクスについて、主な本研究成果を下記3点にまとめる。2点は理論についてであり、1点は実験についてである。

(1)金属V溝テーパ導波路のプラズモン超集束モードについて、テラヘルツ波領域で求めた。0次の統一された分離不変量 $\zeta_u^{(0)}(\rho)$ は、

$$\zeta_u^{(0)}(\rho) \approx \frac{\beta_1}{\alpha} \rho \quad (\rho \ll 1/\alpha|\beta_1|) \quad (10)$$

と近似できることが分かった。式(10)を式(3)と式(4)に代入することにより、0次の統一された動径関数

$$R_u^{(0)}(\rho) = (\rho k_0 \sqrt{\epsilon_1})^{-1/2} H_{-1/2}^{(2)}\left(-\frac{\beta_1/k_0 \sqrt{\epsilon_1}}{2\alpha}, \rho k_0 \sqrt{\epsilon_1}\right) \quad (11)$$

および、0次の角度関数

$$Q^{(0)}(\phi, \rho) \approx \begin{cases} 1 + \rho\beta_1(\phi^2 - \alpha^2)/2\alpha & (0 \leq |\phi| \leq \alpha) \\ \exp[-\rho\beta_2(|\phi| - \alpha)] & (\alpha \leq |\phi| \leq \pi) \end{cases} \quad (12)$$

が得られる。これらより、プラズモン超集束モードの磁場が、

$$H_z(\rho, \phi) \approx R_u^{(0)}(\rho) Q^{(0)}(\phi, \rho) \quad (13)$$

と解析的に表記できる。完全導体極限($\epsilon_2 \rightarrow i\infty$)では、マイクロ波技術の理論と一致する。次に見るように、プラズモン超集束モードを使うと、完全導体近似との違いを議論できるようになる。

(2) 図2の平行平板付き金属V溝テーパ導波路に対して、透過特性や電場増強度を計算する枠組みを確立した。平行平板導波路と金属V溝テーパ導波路の表面プラズモンモードから接続点における各インピーダンスを評価して、透過率が求められる。透過率を平行

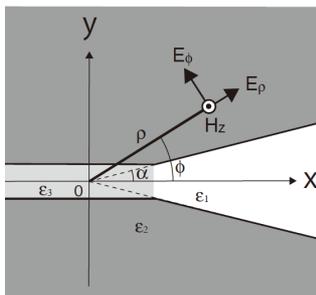


図2 平行平板付き金属V溝テーパ導波路構造の幾何学配置。ε₁とε₂とε₃は、それぞれ、テーパ内部の誘電率、金属の誘電率、平行平板内部の誘電率である。

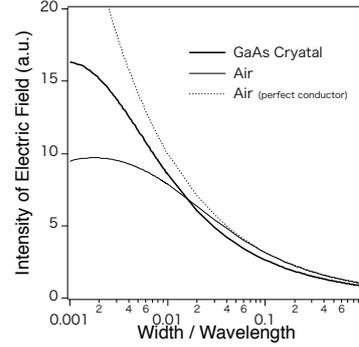


図3 電場増強度の平行平板導波路の間隔依存性. 平行平板導波路の内部がAir(空気)の場合とGaAs Crystal(ガリウムヒ素結晶)の場合を示している. Air(perfect conductor)は、平行平板導波路の内部がAir(空気)の場合であるが、金属を完全導体として計算している. なお、テーパ角 $2\alpha = 20^\circ$ を計算に用いた.

平板導波路の幅で割り、その平方根を取れば平行平板導波路内部の電場増強度が得られる。

図3は、テーパ方向からテラヘルツ波が入射した場合を考え、平行平板の間隔の関数として、平行平板内部の電場強度を計算した。注目すべきは、平行平板導波路の内部が同じ空気の場合でも、金属を完全導体として扱うか否かで、結果に明確な違いがあることである。間隔が小さい領域で大きな違いがある。これは、プラズモニクスの考え方をテラヘルツ波領域に適用して初めて可能になった議論である。

(3) 平行平板付き金属V溝テーパ導波路の平行平板部にGaAs結晶を挟み込むことで、電気光学アンテナ(雑誌論文②)を試作した。非線形光学過程により電気光学アンテナは機能するので、図3の太線(GaAs Crystal)で示された曲線を反映する特性を持つと推定される。テラヘルツ波の発生と検出の両方に使えば、光伝導アンテナを用いないテラヘルツ時間領域分光装置を実現できる。

<引用文献>

- ① Kh. V. Nerkarayan, Phys. Letter A, Vol. 237, 1997, Issue 1-2, pp.103-105.
- ② Kazuyoshi Kurihara *et al.*, J. Phys. A, Vol.41, 2008, 295401 (48pp).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① 栗原 一嘉, 栗島 史欣, 森川 治, 山本晃司, 谷 正彦, 金属V溝テーパ導波路によるTHz波プラズモン超集束の原理と応用—電子・電磁波複合系としてのTHz波表面プラズモンポラリトニー, レーザー研究、査読有, Vol. 45, 2017, pp.158-164.
- ② Ramon Delos Santos, Shinpei Ozawa, Valynn Mag-usara, Syougo Azuma, Anthony Tuico, Vernalyn Copa, Arnel Salvador, Kohji Yamamoto,

Armando Somintac, Kazuyoshi Kurihara, Hideaki Kitahara, Masahiko Tani, and Elmer Estacio, Cherenkov-phase-matched nonlinear optical detection and generation of terahertz radiation via GaAs with metal-coating, Optics Express, 査読有, Vol. 24, issue 22, 2016, pp.24980–24988,

<https://doi.org/10.1364/OE.24.024980>

- ③ Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, Kazuyoshi Kurihara, Masahiko Tani, Fumiyoshi Kuwashima, and Masahiko Hangyo, Sub-terahertz imaging using time-domain signals obtained with photoconductive spiral antennas, Journal of the Optical Society of America B, 査読有, Vol. 33, Issue 9, 2016, pp.1940–1948, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001940>
- ④ Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, Kazuyoshi Kurihara, Masahiko Tani, Fumiyoshi Kuwashima, and Masahiko Hangyo, Aperture transmission measurements for characterization of focusing of subterahertz radiation, Journal of the Optical Society of America B, 査読有, Vol. 33, Issue 7, 2016, pp.1456–1461, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001456>
- ⑤ 栗原 一嘉, 山本 晃司, 谷 正彦, 桑島史欣, 森川 治, 金属テーパー導波路の THz モード、テラヘルツテクノロジーフォーラム通信、査読無、第 14 巻、第 1 号、2016、pp. 2–5、http://www.terahertzjapan.com/newsltr_pdfs/tsushin_Vol14No1_p2_5.pdf

[学会発表] (計 17 件)

- ① 栗原 一嘉, 草間 究, 北原 英明, 谷 正彦, 田畑 寛明, 山本 晃司, 栗島 史欣, 森川 治, 電気光学アンテナを用いたテラヘルツ時間領域分光の開発：光学系の設計、2018 年 3 月、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、19a-P3-6.
- ② 草間 究, 栗原 一嘉, 谷 正彦, 山本 晃司, 栗島 史欣, 森川 治, 金属 V 溝テーパー導波路における透過率の計算、2017 年 9 月、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、6a-PA3-11.
- ③ 田畑 寛明, 北原 英明, 山本 晃司, 福井 一俊, 栗原 一嘉, 森川 治, 栗島 史欣, 谷 正彦, FDTD 法による金属テーパー構造導波路のテラヘルツ帯透過解析、2017 年 9 月、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、6a-PA3-10.
- ④ 森川 治, 山本 晃司, 栗原一嘉, 栗島 史欣, 谷 正彦, テーパーつき伝送線路による Sub-THz 電磁波の導波モードと集光補助、2017 年 9 月、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、6a-PA3-9.
- ⑤ Kazuyoshi Kurihara, Kiwamu Kusama, Fumiyoshi Kuwashima, Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, Hideaki Kitahara, and Masahiko Tani, Theoretical Considerations on Plasmonic Enhancement of THz Electric Field in

Parallel-Plate Waveguides Coupled to V-groove Tapered Waveguides, JSAP-OSA Joint Symposia 2017, Fukuoka, September 5-8, 2017, 6a-A410-9.

- ⑥ Kiwamu Kusama, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, Analysis of THz Plasmonic Superfocusing Mode in Metallic V-Groove Tapered Waveguides, The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2017), Fukui, June 18-21, 2017, PO3-24.
- ⑦ Fumiyoshi Kuwashima, Takuya Shirao, Yusuke Akamine, Kazuyuki Iwao, Manatsu Ooi, Naoya Sakaue, Takuro Sirasaki, Siori Gouda, Masahiko Tani, Kazuyoshi Kurihara, Kohji Yamamoto, Osamu Morikawa, Hideaki Kitahara, and Makoto Nakajima, Effects of Metal V-Grooved Waveguide Gap Width on High Efficient THz Waves Generations Using Laser Chaos and Super Focusing, The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2017), Fukui, June 18-21, 2017, PA2-2-4.
- ⑧ 栗原 一嘉, 草間 究, 山本 晃司, 栗島史欣, 森川 治, 谷 正彦, 金属 V 溝構造におけるテラヘルツ波の超集束：完全導体極限、2017 年 3 月、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、15p-P1-6.
- ⑨ Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, and Masahiko Tani, Characterization of Focusing of Sub-THz Radiation Using Insulator Aperture, The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2017 (IW-FIRST 2017) and the 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017), Fukui, March 7-9, 2017, P-8.
- ⑩ Kiwamu Kusama, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, Characteristics of THz plasmonic superfocusing in metallic V-groove tapered waveguides, The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2017 (IW-FIRST 2017) and the 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017), Fukui, March 7-9, 2017, P-29.
- ⑪ 栗原 一嘉, 草間 究, 山本 晃司, 栗島史欣, 森川 治, 谷 正彦, プラズモニック電界面扇形ホーン THz 波アンテナの理論考察、2017 年 1 月、第 14 回プラズモニクスシンポジウム.
- ⑫ 栗原 一嘉, 栗島 史欣, 森川 治, 山本 晃司, 谷 正彦, 金属 V 溝テーパー導波路を用いた THz 波の超集束、2017 年 1 月、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会。(招待講演)
- ⑬ 栗原 一嘉, 草間 究, 山本 晃司, 栗島

史欣、森川 治、谷 正彦、金属V溝構造におけるTHzプラズモン超集束の理論的考察、2016年12月、平成28年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、D08.

⑭栗原 一嘉、草間 究、山本 晃司、栗島史欣、森川 治、谷 正彦、金属V溝構造におけるTHz超集束の理論的検討、2016年11月、テラヘルツ科学の最先端III、P06.

⑮ Kazuyoshi Kurihara, Fumiyoshi Kuwashima, Osamu Morikawa, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, Plasmonic superfocusing modes of THz waves in metallic V-groove tapered waveguide considered by quasi-separation of variables, 41st International conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Copenhagen, Denmark, September 25-30, 2016, M5P.10.09.

⑯栗原 一嘉、草間 究、山本 晃司、栗島史欣、森川 治、谷 正彦、金属V溝構造におけるテラヘルツ波の超集束：動径方程式の近似解析解、2016年9月、第77回応用物理学会秋季学術講演会、16p-P1-14.

⑰栗原 一嘉、山本 晃司、栗島史欣、森川 治、谷 正彦、金属V溝構造におけるテラヘルツ波の超集束：境界条件の近似解析解、2016年3月、第63回応用物理学会春季学術講演会、21a-P6-8.

[その他]

ホームページ等

<http://t-profile.ad.u-fukui.ac.jp/profile/ja.4adc11fe0ca47b99520e17560c007669.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 一嘉 (KURIHARA, Kazuyoshi)
福井大学・学術研究院教育・人文社会系部門 (教員養成)・教授
研究者番号：20270704

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

山本 晃司 (YAMAMOTO, Kohji)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授
研究者番号：70432507

谷 正彦 (TANI, Masahiko)
福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授
研究者番号：00346181

栗島 史欣 (KUWASHIMA, Fumiyoshi)
福井工業大学・工学部・准教授
研究者番号：30342554

森川 治 (MORIKAWA, Osamu)
海上保安大学校 (海上海洋政策センター)・
海上海洋政策センター・教授
研究者番号：30559208