

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：12101
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2011～2012
課題番号：23760323
研究課題名（和文）周波数完全再利用を可能とするミリ波高能率偏波共用導波管アンテナの開発
研究課題名（英文）Research of dual-polarized waveguide antenna with high efficiency for full-frequency re-use
研究代表者
鈴木 健仁（SUZUKI TAKEHITO）
茨城大学・工学部・助教
研究者番号：60550506

## 研究成果の概要（和文）：

リッジ導波管は導波管内に設けたリッジ(棟)の効果で広帯域化を実現できる。さらにエッジスロット導波管アンテナと組み合わせて、偏波共用アンテナとしても用いることができる。スペクトル領域のグリーン関数を用いてリッジ導波管の固有値解析を行い、各モードの遮断周波数を求めた。有限要素法と比較した結果、よく一致していることを確認した。さらに、リッジ導波管スロットアンテナの解析法を発展させ、モードマッチング法により 0.1 THz から 2.9 THz で  $10^{-6}$  乗以下の高消光比を保ちながら、高透過率なテラヘルツ波帯ワイヤグリッドを設計した。テラヘルツ波帯の偏波制御に用いることができる。

## 研究成果の概要（英文）：

The ridged waveguide antenna can realize a broadband structure due to the effect of the ridge in the waveguide. A dual-polarized antenna can be constructed from a ridged waveguide slot antenna and an edge slot waveguide antenna. Cutoff frequencies of a ridged waveguide are calculated by eigenvalue analysis using the spectral domain Green's function. The results coincide well with HFSS results. The terahertz wire-grid polarizer with high extinction ratio less than  $10^{-6}$  and high transmittance from 0.1 to 2.9 THz is also designed for the control of the polarized wave by mode-matching method.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ・導波管スロットアンテナ・リッジ導波管・スペクトル領域法・ワイヤグリッド・モードマッチング法

## 1. 研究開始当初の背景

ミリ波帯、テラヘルツ波帯などの高周波数帯での効率的な電波利用技術なくしては、電波資源の枯渇は避けられない。ミリ波帯での偏波分離による偏波分割複信(PDD:Polarization Division Duplex)は、時分割複信(TDD:Time Division Duplex)や周波数分割複信(FDD:Frequency Division Duplex)など従来方式の2倍(完全再利用)の周波数効率が可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、偏波共用アンテナに用いるリッジ導波管の研究に取り組んだ。図1に示すリッジ導波管スロットアンテナ[1]-[7]は導波管内部に設けたリッジ(棟)の効果で広帯域化を実現できる。また、エッジスロット導波管アンテナ[8]と組み合わせ、偏波共用アンテナを構成することも可能である。

現在までに、研究代表者らはスペクトル領域法解析(S2DS Method)[9][10]を用いて、多素

子を有する導波管スロットアンテナの解析・設計を進めている。汎用の電磁界シミュレータ等では素子数が増えるにつれ、解析は可能でも、繰り返し補正の伴う精密設計が困難なためである。

本研究では、特に効率的な設計のための Fortran 解析プログラムの構築を進めた。具体的には、スペクトル領域のグリーン関数を用いてリッジ導波管の固有値解析を行い、各モードの遮断周波数を求めた。アレー解析での入力モードとスロットのアドミタンスの導出に用いることができる。

さらに、リッジ導波管スロットアンテナの解析法を発展させ、モードマッチング法により 0.1 THz から 2.9 THz で  $10^{-6}$  乗以下の高消光比を保ちながら、高透過率なテラヘルツ波帯ワイヤグリッドを設計した。テラヘルツ波帯の偏波制御に用いることができる。このように物理に重きを置く解析・設計の研究を進めることで、拡張構造の開拓にもつながる。

### 3. 研究の方法

図 1 は管軸(z 軸)に対して、断面が一樣構造である。図 2 に解析モデルを示す。等価定理で規範領域に分割する。 $\tilde{\mathbf{M}}_{a1}(k_z)$ 、 $\tilde{\mathbf{M}}_{a2}(k_z)$  はそれぞれリッジ導波管内部の開口面 1 と 2 での磁流を表し、以下のように表せる。

$$\tilde{\mathbf{M}}_{a1}(k_z) = \sum_q \tilde{f}_q(k_z) \tilde{\mathbf{m}}_q^{a1}(k_z) \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_{a2}(k_z) = \sum_s \tilde{g}_s(k_z) \tilde{\mathbf{m}}_s^{a2}(k_z) \quad (2)$$

$\tilde{\mathbf{m}}_p^{a1}(k_z)$  と  $\tilde{\mathbf{m}}_s^{a2}(k_z)$  は磁流の基底関数を表し、 $\tilde{f}_q(k_z)$  と  $\tilde{g}_s(k_z)$  は未知数である。

スペクトル領域のグリーン関数を用いて以下の式(3)のような積分方程式を立てる。

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y}_{11}^I(k_z) + \tilde{I}_{11}^H(k_z) & \tilde{Y}_{12}^I(k_z) \\ \tilde{Y}_{21}^I(k_z) & \tilde{Y}_{22}^I(k_z) + \tilde{Y}_{22}^{III}(k_z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_q(k_z) \\ \tilde{g}_r(k_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(4)のように行列式が 0 となる波数  $k_z$  より、遮断周波数を導出できる。それぞれの行列式は以下の式(4)~(10)の通りである。

$$\det \begin{bmatrix} Y_{11}^I(k_z) + I_{11}^H(k_z) & Y_{12}^I(k_z) \\ Y_{21}^I(k_z) & Y_{22}^I(k_z) + Y_{22}^{III}(k_z) \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$\tilde{Y}_{11}^I(k_z) = \int \int_{a1a1} \tilde{m}_p^{a1}(k_z) \tilde{G}^I(k_z) \tilde{m}_q^{a1}(k_z) dx_s dx_o \quad (5)$$

$$\tilde{Y}_{11}^H(k_z) = \int \int_{a1a1} \tilde{m}_p^{a1}(k_z) \tilde{G}^H(k_z) \tilde{m}_q^{a1}(k_z) dx_s dx_o \quad (6)$$

$$\tilde{Y}_{12}^I(k_z) = \int \int_{a1a2} \tilde{m}_p^{a1}(k_z) \tilde{G}^I(k_z) \tilde{m}_t^{a2}(k_z) dx_s dx_o \quad (7)$$

$$\tilde{Y}_{21}^I(k_z) = \int \int_{a2a1} \tilde{m}_s^{a2}(k_z) \tilde{G}^I(k_z) \tilde{m}_q^{a1}(k_z) dx_s dx_o \quad (8)$$

$$\tilde{Y}_{22}^I(k_z) = \int \int_{a2a2} \tilde{m}_s^{a2}(k_z) \tilde{G}^I(k_z) \tilde{m}_t^{a2}(k_z) dx_s dx_o \quad (9)$$

$$\tilde{Y}_{22}^H(k_z) = \int \int_{a2a2} \tilde{m}_s^{a2}(k_z) \tilde{G}^{III}(k_z) \tilde{m}_t^{a2}(k_z) dx_s dx_o \quad (10)$$

アドミタンス  $Y$  の上付き文字は用いるグリーン関数の領域を、下付き文字は開口面磁流の番号を表す。

### 4. 研究成果

(1) リッジ導波管スロットアンテナの解析

表 1 に 7 個目までのモードの遮断周波数の解析結果を示す。有限要素法と比較した結果、最大で 0.029 GHz の誤差はあるが、よく一致していることを確認した。基本モードの遮断周波数は、今後、アレー解析を行う際に必要となる入力モードとスロットのアドミタンスの導出に用いる。

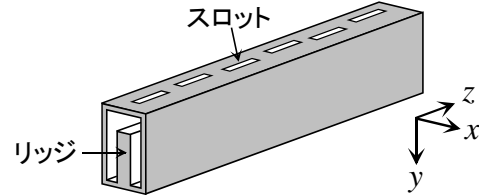


図 1 リッジ導波管スロットアンテナ

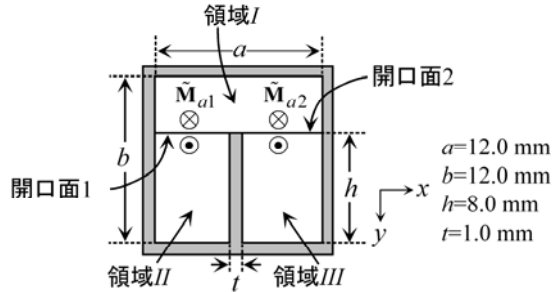


図 2 解析モデルと解析パラメータ

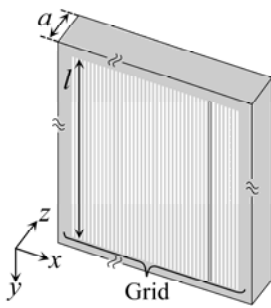
表 1 遮断周波数

モード	スペクトル領域法 グリーン関数 (GHz)	有限要素法 (GHz)
1	6.182	6.211
2	12.30	12.30
3	15.77	15.80
4	24.92	24.93
5	25.77	25.77
6	26.23	26.23
7	28.35	28.36

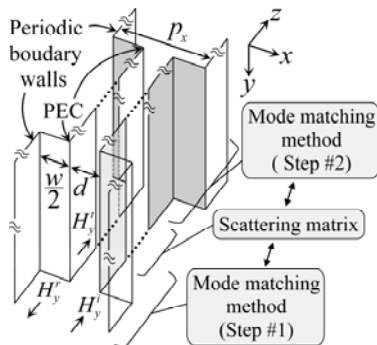
(2) テラヘルツ波帯ワイヤグリッドの設計

① 研究の背景

現在、テラヘルツ波帯技術の急速な発展とともに高機能な光学素子の充実が求められている。偏光子として動作するワイヤグリッドでも、金属厚みによる阻止特性への影響[11]、シリコン基板上へのマイクロオーダーのアルミ構造の作製[12]、ナノインプリントでの作製[13]、 $10^{-6}$ の高消光比を有する設計[14]など積極的な研究が進められている。本研究では、現象の理解、及び最適設計に向け、パラメータの繰り返し補正に耐えられる高速かつ高精度なモードマッチング法[15][16]を用いてテラヘルツ波帯ワイヤグリッドを解析した。この解析法を用いて、0.1 から 2.9 THz で  $10^{-6}$  乗以下の高消光比を保ちながら、高透過率なテラヘルツ波帯ワイヤグリッドを設計した。



(a) 全体構造



(b) 周期モデル

図3 テラヘルツ波帯ワイヤグリッド

② モードマッチング法による解析

図3(a)にワイヤグリッドを示す。構造は波長に対して十分大きく、 $x$ 軸は周期構造、 $y$ 軸方向は無限一様構造である。図3(b)のように外部に周期境界壁を仮想し、一本分抜き出した2次元解析モデルとして表現できる。

金属壁と周期境界壁の1つ目のステップ構造をモードマッチング法で解析し、図3(b)のように距離  $a$  で散乱行列を接続する。入射波

はTMモードである。磁界  $\mathbf{H}$  の入射波、反射波、透過波はそれぞれ

$$H_y^i = \exp(-jk_0 z) \quad (11)$$

$$H_y^r = \sum_{m=0}^{\infty} A_m I_m \exp(+jk_m z) \quad (12)$$

$$H_y^t = \left( \sum_{n=1}^{\infty} B_n I_n + \sum_{l=0}^{\infty} C_l I_l \right) \exp(-jk_l z) \quad (13)$$

とおける。ここで、 $I_m$ 、 $I_n$ 、 $I_l$ は基底関数を表し、 $I_m = \cos(m\pi x/d)$ 、 $I_n = \sin(2n\pi x/p_x)$ 、 $I_l = \cos(2l\pi x/p_x)$ と表せる。さらに  $k_m = \sqrt{k_0^2 - (m\pi/d)^2}$ 、 $k_n = \sqrt{k_0^2 - (2n\pi/p_x)^2}$ 、 $k_l = \sqrt{k_0^2 - (2l\pi/p_x)^2}$ である。 $A_m$ 、 $B_n$ 、 $C_l$ は励振係数を表す。電界  $\mathbf{E}$ は磁界  $\mathbf{H}$ より一意に決まる。開口面上で電界と磁界の境界条件を立てる。境界条件に、3種類の基底関数を重み付けのためそれぞれ掛け、境界面上で積分し、行列式を導出する。この行列式を解くことで、励振係数が求まる。1つ目のステップ構造散乱行列は励振係数より導出できる。2つ目の散乱行列と距離  $a$  で接続し、図3(a)の全体構造でのTMモードを入射した際の透過、反射特性が求まる。TEモードの伝搬定数[17]を考慮し、消光比も求まる。

③ モードマッチング法による設計

表2に設計パラメータを示す。図4に金属の厚み  $w$  を変化させた場合の透過特性と消光比を示す。 $w=20 \mu\text{m}$  とすることで、0.1~2.9 THz で消光比は  $10^{-6}$  以下を保ちつつ透過量 87%以上を設計できる。 $w=50 \mu\text{m}$  とすると、消光比は  $10^{-6}$  以下を保つが、2.99 THz で透過量がほぼ0 (Wood's anomaly、Scan blindness)となる。

④ 基礎検討のための試作

図3の構造に向け、まずは解析・設計法のテラヘルツ波帯での有効性を確認するため基礎検討として図5のような構造を試作した。テラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマー上に平行平板を配置し、ワイヤグリッドを構成している。表3に試作パラメータを示す。本実験結果は2013年9月にドイツで開催される国際会議 IRMMW-THz 2013にて発表予定[5-②]である。

⑤ まとめ

テラヘルツ波帯ワイヤグリッドをモードマッチング法により解析し、TMモードの透過特性と消光比を求めた。今後、設計したワイヤグリッドの作製に取り組み、実験による動作確認とモードマッチング法によるテラヘルツ波帯での設計の有効性を確認する。

また本試作に向け、テラヘルツ波帯での解

析・設計法の有効性を確認するため、シクロオレフィンポリマー上に平行平板を配置したワイヤーグリッドを試作した。

表 2 設計パラメータ

$d$	50 $\mu\text{m}$	$a$	1.0 mm	$l$	18 mm
-----	------------------	-----	--------	-----	-------

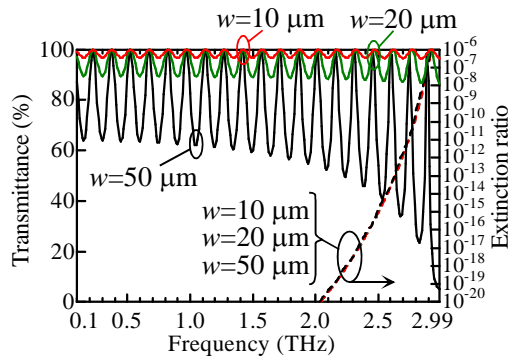
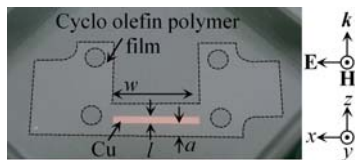
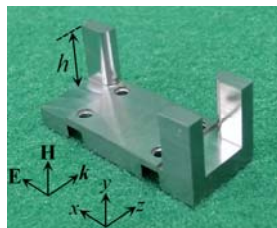


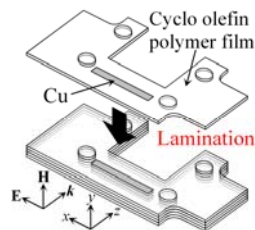
図 4 透過量と消光比



(a) 1 構成要素



(b) 積層土台



(c) 積層

図 5 シクロオレフィンポリマー上に試作した平行平板によるテラヘルツ波帯ワイヤーグリッド

表 3 試作パラメータ

$l$	1.0 mm	$w$	12.0 mm
$a$	2.0 mm	$h$	10.4 mm

## 参考文献

- [1] S. B. Cohn, Proc. IRE, vol. 35, pp. 783-788, Aug. 1947.
- [2] J. P. Montgomery, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-19, no. 6, pp. 547-555, Jun. 1971.
- [3] Y. Utsumi, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33, no. 2, pp. 111-120, Feb. 1985.
- [4] A. S. Omar, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, no. 6, pp. 944-952, Jun. 1991.
- [5] W. Sun, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 41, no. 11, pp. 1965-1971, Nov. 1993.
- [6] K. Garb, et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 42, no. 6, pp. 833-839, Jun. 1994.
- [7] S. Amari, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 44, no. 12, pp. 2256-2264, Dec. 1996.
- [8] J. C. Young, et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 3, pp. 812-819, Mar. 2007.
- [9] J. Hirokawa, et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 42, no. 9, pp. 1243-1248, Sept. 1994.
- [10] T. Suzuki, et al., IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 1, pp. 150-158, Jan. 2009.
- [11] T. Fujii et al., The 70th Autumn Meeting, 2009; The Japan Society of Applied Physics and Related Societies (in Japanese), 8p-M-17, Sep. 2009.
- [12] I. Yamada, et al., Opt. Lett. vol. 34, no. 3, pp. 274-276, Feb. 2009.
- [13] K. Takano, et al., Opt. Lett. vol. 36, no. 14, pp. 2665-2667, July 2011.
- [14] Y. Kishi, et al., IRMMW-THz 2013, Sep. 2013. (accepted)
- [15] H. J. Eom, *Electromagnetic Wave Theory for Boundary-Value Problems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, sec. 7, pp. 162-164, 2004.
- [16] T. Suzuki, et al., IEICE Trans. Commun. vol. E92-B, no. 1, pp. 150-158, Jan. 2009.
- [17] L. Josefsson, IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 41, no. 7, pp. 845-850, Jul. 1993.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 岸 湧大, 御田 護, 高野 恵介, 萩行 正憲, 鈴木 健仁, “モードマッチング法による  $10^{-6}$  以下の高消光比と高透過特性を両立するテラヘルツ波帯ワイヤーグリッドの設計,” 2013 年秋季 第 74 回 応用物理学関

- 係連合講演会, 同志社大学, Sep., 2013.
- ② Yudai Kishi, Masaya Nagai, John C. Young, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, Takehito Suzuki, “Terahertz Wire-Grid Polarizer of Laminated Parallel Plates Fabricated on Cyclo Olefin Polymer Films for High Extinction Ratio less than 10<sup>-6</sup>,” IRMMW-THz 2013, Mainz, Sep., 1-6, 2013.(accepted)
  - ③ Takehito Suzuki and John C. Young, “Eigenvalue Analysis of a Ridged Waveguide Using a Spectral Domain Green's Functions,” IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Chicago, Illinois, USA, July 8-14, 2012.
  - ④ 鈴木 健仁, ジョン ヤング, “スペクトル領域グリーン関数を用いたリッジ導波管の固有値解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-88, 北海道大学, Sep., 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://suzuki-lab.ee.ibaraki.ac.jp/>

受賞

- ① 財団法人 宇部興産学術振興財団 第 53 回学術奨励賞 (鈴木 健仁) (2013/6/4)
- ② 電気学会東京支部 学術奨励賞 (指導学生 岸 湧大) (2013/3/26)
- ③ 第 9 回リバネス研究費 若手スタートアップ賞 (指導学生 今野 拓矢) (2011/12/26)
- ④ 第 10 回度船井研究奨励賞 (鈴木 健仁) (2011/5/28)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健仁(SUZUKI TAKEHITO)

茨城大学・工学部・助教

研究者番号:60550506