

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400528

研究課題名(和文) 周期的に固体プラズマを配置したサブミリ波帯サーキュレータに関する研究

研究課題名(英文) Submillimeter-wave circulator utilizing periodically loaded solid-state plasma

研究代表者

淀川 信一 (YODOKAWA, Shinichi)

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号：90282160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：固体プラズマ材料として動作するn-InSb薄板を用いたサブミリ波サーキュレータを構成し、526 GHzサブミリ波帯の動作についてFDTD解析により検討を行った。その結果、n-InSbの電子密度が $1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、厚さが17  $\mu\text{m}$ 、円形薄板の直径が285  $\mu\text{m}$ 、印加磁界が0.78 Tの場合、挿入損失0.76 dBで、非可逆性28.2 dBが得られ、サーキュレータとして素子への応用が十分期待できる特性が得られた。また、74.5 GHzのミリ波で実験した結果、電磁波を循環的に伝送するサーキュレータの基本的特性が得られた。

研究成果の概要(英文)：The power distribution characteristics of 526 GHz submillimeter waves in a Y junction circulator loaded with a thin disk of n-InSb as a solid-state plasma have been theoretically analyzed by the FDTD method. It was shown that, by applying an external magnetic field B perpendicular to the InSb disk, a non-reciprocity takes place in the power distribution of the transmitted waves. These results indicate the possibility of using our Y junction waveguide in circulator of submillimeter-wave frequency range.

研究分野：電磁波工学

キーワード：サブミリ波 固体プラズマ サーキュレータ InSb FDTD解析

1. 研究開始当初の背景

サブミリ波・THz 波帯の研究は、以前から盛んに行われており、発生や検出などの基礎技術や、イメージング技術などの応用技術は現在発展しつつある。しかし、研究の多くは上記基礎的研究と応用研究が主であり、各種基本回路素子のような、基礎技術と応用製品を結びつける領域の研究は立ち遅れている。本研究課題では、サブミリ波帯で動作する回路素子を提案し、それは、多くの応用製品の小型化、低価格化に貢献し、サブミリ波帯・THz 波領域製品の普及を促進するものと考えられる。

2. 研究の目的

電磁波を循環的に伝搬させるフェライトを用いたサーキュレータは送受信アンテナの信号分離などのマイクロ波通信回路で非常に多く使われている。本研究はフェライトが使用周波数限界となるサブミリ波帯領域で動作するサーキュレータを実現することを目的とする。基本回路素子として磁界を印加したプラズマ材料を利用すること、またそれを周期的に配置することで、特性を変化させることに特徴を持つ。サブミリ波帯で動作するサーキュレータは、将来のサブミリ波・THz 波帯の多くの応用装置の発展に寄与することが期待できる。

3. 研究の方法

研究方法の概要は以下のとおりである。

- (1) 固体プラズマのパラメータやその構造の伝搬特性について、古典的な数値解析及び FDTD 法を利用したシミュレーション解析により詳細に検討し、設計指針を明らかにする。
- (2) 素子の作製方法や、実験を行うための実験装置および測定方法を検討する。
- (3) 試作した素子のサブミリ波伝搬特性を実験により確認し、サブミリ波帯で動作するサーキュレータを提案する。
- (4) 複数の固体プラズマを周期的に構成する場合の配置や形状について、FDTD 解析を用いたシミュレーションにより検討する。

4. 研究成果

図 1 に示すような、3 開口 Y 型サーキュレータの円筒空洞の中央にプラズマとして動作する n-InSb を挿入した構造について FDTD 解析を行った。

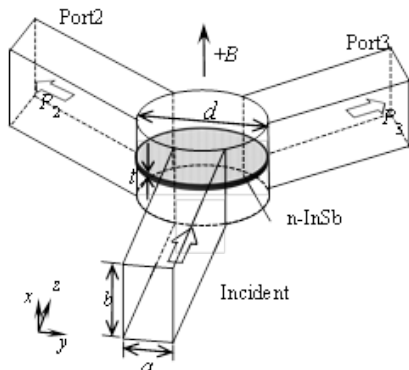


図 1 FDTD 解析構造

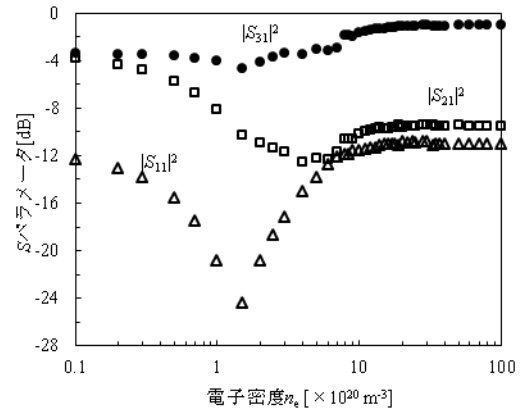


図 2 Sパラメータの電子密度依存性

ポート 1 から 526 GHz のサブミリ波を入射した場合の S パラメータの電子密度  $n_e$  依存性の FDTD 解析結果を図 2 に示す。なお、n-InSb は、電子移動度  $\mu_e = 50.0 \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 、厚さ  $t = 10 \text{ }\mu\text{m}$ 、直径  $d = 285 \text{ }\mu\text{m}$  で、円筒空洞は高さ  $b = 600 \text{ }\mu\text{m}$  とした。ポート 3 への透過電力  $|S_{31}|^2$  は、ポート 2 への透過電力  $|S_{21}|^2$  より大きく、両者の間で最大で 9 dB 程度の差（非可逆性）が生じた。これは、ポート 1 から入射した場合はポート 3 へ出力し、ポート 3 から入射した場合はポート 2 へ出力する特性を表し、サーキュレータの基本動作が実現されていることを示している。

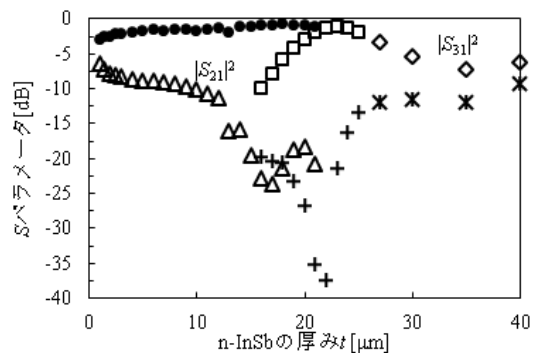


図 3 Sパラメータの n-InSb の厚さ依存性

固体プラズマ (n-InSb) の厚さ  $d$  を変化した場合の S パラメータを図 3 に示す。ここで  $n_e = 1.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  とした。厚さ  $d$  を  $1 \text{ }\mu\text{m}$  から増加させると、 $|S_{31}|^2$  と  $|S_{21}|^2$  の差（非可逆性）が徐々に増加し、 $d = 17 \text{ }\mu\text{m}$  で非可逆性は最大 23 dB となり、素子として十分利用できる特性が得られた。なお、 $d = 16 \text{ }\mu\text{m}$  以上の範囲で複数の結果が表示されているが、それは高次モードの伝搬が生じ、複数の最適値が存在したためである。

以上の解析結果を確認するために、ミリ波帯での実験を試みた。周波数が 1 桁下がることは、プラズマの電子密度も 1 桁下がる。また、試料の寸法が 10 倍程度大きくなり、作製精度の問題も低下する。図 4 に、周波数 74.5 GHz での実験結果を示す。ここで n-InSb は、 $n_e = 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $\mu_e = 22.0 \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 、厚さ

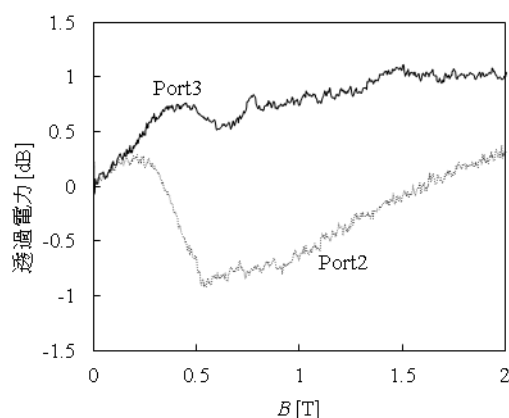


図4 ミリ波帯での実験結果

$t = 55 \mu\text{m}$ , 直径  $d = 1.8 \text{ mm}$  で, 円筒空洞は高さ  $b = 3.0 \text{ mm}$  とした. 各ポートへの透過電力はポート2と3で異なり  $0.5 \text{ T}$  程度で  $1.5 \text{ dB}$  程度の差が生じた. これは, 磁界を印加することで, ポート1からポート3へ, また構造の対称性からポート3からポート2へ電磁波が循環的に出力される特性を示し, サーキュレータの基本的な特性が得られたことを示している. 但し, 各ポート間の電力差は小さく, 素子として十分な値は得られていない.

一方で, 伝搬方向に対し平行方向に周期的にプラズマを配置した場合, サブミリ波伝搬の周波数特性が大きく変化することが FDTD 解析で示された. それにより, 周期構造のプラズマを付加することで, 周波数特性を可変とする, すなわち広帯域で動作するサーキュレータとして動作する結果が示された.

#### 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)

[雑誌論文](計 5 件)

Toru Kurabayashi, Hayato Shuhama, Shinichi Yodokawa, Satoru Kosaka: "Identification of cellulosic fibers and determination of their blend ratio using terahertz spectroscopy", *Infrared Physics & Technology*, 査読有, 80 (2017) 153-157.

Takeori Tanno, Junya Asari, Shinichi Yodokawa, and Toru Kurabayashi: "Terahertz spectroscopic study on order-disorder phase transition of nonadecane", *Chemical Physics*, 査読有, 461 (2015) 25-28.

米田 皓大, 淀川 信一, 倉林 徹, "固体プラズマ薄板を挿入した導波管の  $526 \text{ GHz}$  サブミリ波偏向特性", *電子情報通信学会論文誌 C*, 査読有, J97-C 巻, 12 号 (2014), pp. 511-518.

Takeori Tanno, Stevanus Arnold, Junya Asari, Shinichi Yodokawa, Toru Kurabayashi: "Analytical method for studying terahertz vibrations in a stearic acid single crystal", *Infrared Physics & Technology*, 査読有, 67 (2014) 427-431.

米田皓大, 淀川信一, 高坂諭, 倉林徹, "固体プラズマ薄板を挿入した導波管の  $526 \text{ GHz}$  サブミリ波偏向特性", *秋田大学工学資源学部研究報告*, 査読有, 35 号 (2014), 39 - 46 頁.

[学会発表](計 17 件)

Toru Kurabayashi, Shunsuke Masuyama, Hayato Shuhama, and Shinichi Yodokawa, "An Effective Application of Terahertz Spectroscopy for Identifying Fabric Fibers" EMM Meeting on Terahertz 2017 Energy Materials Nanotechnology, Hawaii (USA), p. 089 (2017.4.4).

Toru Kurabayashi, Hayato Shuhama, Shunsuke Masuyama, and Shinichi Yodokawa, "Terahertz Spectroscopy for Textile Fibers" BIT 's 5th Annual Conference of AnalytiX-2017, Fukuoka (Japan), p. 089 (2017.3.22).

辻 春樹, 淀川 信一, 倉林 徹, "磁場を印加した固体プラズマ表面のサブミリ波非可逆反射特性", *日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会講演予稿集*, 秋田大学(秋田市) 36-37(2017.3.9).

庄司 壮一, 淀川 信一, 倉林 徹, "固体プラズマを用いたサブミリ波帯サーキュレータ", 第 72 回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学(仙台), 2pB03 (2016.12.2).

茂木 徹, 淀川 信一, 高坂 諭, 倉林 徹, "固体プラズマを挿入したサブミリ波帯特性可変方向性結合器", *電気関係学会東北支部連合大会講演論文集*, 東北工業大学(仙台市), p.2D09 (2016.8.31).

Toru Kurabayashi, Kyohei Konishi, Shinichi Yodokawa, and Satoru Kosaka, "Reflection Spectroscopy on Solutions of Biological Materials in Millimeter Wave Frequency", *The 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2015*, Hong Kong (China), 3133966 (2015.8.24).

Yang Chengchen, Shinya Suzuki, Toru Kurabayashi, Shinichi Yodokawa, and Satoru Kousaka, "Terahertz spectroscopic analysis using a metallic hole array",

The 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2015, Hong Kong (China), 3133814 (2015.8.24) .

Chengchen Yang, Toru Kurabayashi, Shinichi Yodokawa, and Satoru Kousaka, " Analysis and measurement for Metamaterial sensing at THz range " , (1) Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, sendai (Japan), p.2B12 (2016.8.31) .

庄司 壮一, 淀川 信一, 倉林 徹, " 固体プラズマ円板を挿入した方形導波管のサブミリ波放射特性 " , 電子情報通信学会総合大会講演論文集 , 立命館大学 (草津市) , p. 57(2015.3.10) .

淀川 信一, マイヴァントゥエン, 倉林 徹 , " 周期的に固体プラズマ棒を装荷した導波管のサブミリ波伝搬特性 " , 電子情報通信学会総合大会講演論文集 , 立命館大学 (草津市) , p. 58(2015.3.10) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ee.akita-u.ac.jp/~kairo/index.htm>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

淀川 信一 (YODOKAWA, Shinichi)  
秋田大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号： 90282160

### (2)研究分担者

倉林 徹 (KURABAYASHI Toru)  
秋田大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号： 90195537

### (3)連携研究者

### (4)研究協力者