

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05723

研究課題名(和文) 固体プラズマを利用したサブミリ波帯特性可変フィルタに関する研究

研究課題名(英文) Submillimeter-Wave Tunable Filters Utilizing Solid-State Plasma

研究代表者

淀川 信一 (Yodokawa, Shinichi)

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：90282160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000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薄板を挿入した空洞共振器を構成し、500 GHzサブミリ波帯での動作について古典的な理論解析とFDTDシミュレーション解析により検討を行った。その結果、プラズマのパラメータや寸法を適切に選ぶことにより、制御可能なサブミリ波帯のフィルタとして動作することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブミリ波は、次々世代さらにはその先の通信技術で利用が期待されているが、基本技術の開発は立ち遅れている。その一つにフィルタが挙げられるが、簡単な構造の特性可変のフィルタは、将来のサブミリ波やテラヘルツ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。

研究成果の概要(英文)：Propagation characteristics of 500 GHz submillimeter-wave frequency range in a cavity resonator loaded with a thin slab of n-InSb as a solid-state plasma are investigated on the basis of classical theory and by simulation using the finite-difference time-domain (FDTD) method, and their dependences on the magnetic field strength and the plasma density were studied. It was clearly shown that, with an appropriate combination of parameters, this configuration acts as an electrically controllable submillimeter-wave filter.

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 特性可変フィルタ テラヘルツ波 InSb 伝搬特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

サブミリ波帯の研究は基礎、応用ともに盛んに行われているが、両者をつなぎ、より発展していくために必要な、その周波数帯で利用可能な伝送線路や各種回路素子の開発は立ち後れている。特に、通信などの各種応用装置に必要な非可逆回路素子や、能動素子、フィルタなどの受動素子は今後の発展に欠かせないと思われる。研究代表者らのグループは、以前からミリ波、サブミリ波帯の非可逆素子や伝搬特性可変の伝送線路に固体プラズマを利用することで実現できることを報告している⁽¹⁾。受動回路素子に固体プラズマを付加することで、サブミリ波帯で動作する特性可変の回路素子を実現できる可能性がある。固体プラズマを空洞共振器に利用することで、サブミリ波帯で動作する特性可変の共振器が可能となりフィルタ特性が制御しうることに思い至った。

2. 研究の目的

空洞共振器は、共振器の寸法で決まる共振周波数付近でのみ電磁波が透過する特性を持つが、一般にこの特性は共振器作製時に決定される。特性を可変にするためには、寸法を変化させることで可能であるが、これには可動部が必要であり、そのため高速での変化は困難でまた耐久性も短くなる。本研究は空洞共振器内部に固体プラズマとして動作する n-InSb 薄板を挿入することで、管内波長を印加横磁界により変化させ、共振周波数を可変となることを確認することを目的とする。その場合、可動部は不要となり、比較的高速で変化できまた耐久性も大幅に向上する。

サブミリ波帯で動作する特性可変のフィルタは、将来のサブミリ波やテラヘルツ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) 固体プラズマの電子密度や厚み(導波管の高さ方向に対する方向の長さ)などのパラメータとその周波数特性について、古典的な数値解析手法を使用して詳細に検討する。
- (2) 空洞共振器の寸法及び固体プラズマの配置方法を FDTD (Finite Difference Time Domain) 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。
- (3) 設計した構造に対し、磁界を印加した場合の周波数特性の変化を FDTD 解析により検討する。
- (4) 設計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特性可変のフィルタを提案する。
- (5) 複数の共振器を多段または多分岐として、特性の改善や新たな動作について検討する。

4. 研究成果

図1に、古典的な解析方法を使用した理論解析構造を示す。伝搬方向を z 方向とし、 y 方向は無限の二次元構造である。この場合は、固体プラズマの重要なパラメータである電子密度 n と、導波管の高さ 0.10 mm に対する厚み b を検討した。印加する静磁界は伝搬方向に対し垂直横方向で y 方向を正とした。解析より伝搬定数を求め、減衰が比較的小さくまた変化が少ないことを条件として、伝搬波長が大きく変化するすなわち位相定数 β が大きく変化することを目標とした。

図2に、プラズマの電子密度 $n = 2.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ の場合の印加磁界をパラメータとした位相定数 β の周波数依存性を示す。一般の伝送線路の β は周波数に比例する一つの直線となるが、固体プラズマを上下に挿入した伝送線路の β は印加磁界の増加に伴い周波数全体に渡り増加することがわかる。これは、プラズマが磁界を印加しない場合は金属的にふるまうが、磁界を増加することにより誘電体の性質が現れるため、磁界を非常に大きくした場合は InSb の格子の比誘電率 $\epsilon_r = 16$ の特性に近づくことによる。ここで、例えば共振器の寸法を調整し、 $\beta_0 = 15.1 \text{ mm}^{-1}$ で共振するようにしたとすると、磁界を $B = 0 \sim 1 \text{ T}$ とすることで、共振周波数が 560 GHz から 490 GHz まで約 70 GHz 変化すると予想される。この結果より、導波管上下に固体プラズマ薄板を挿入した三層構造導波管で空洞共振器を満たすことで、印加磁界を増加させることにより共振周波数を低磁界側にシフトできる可能性が示された。

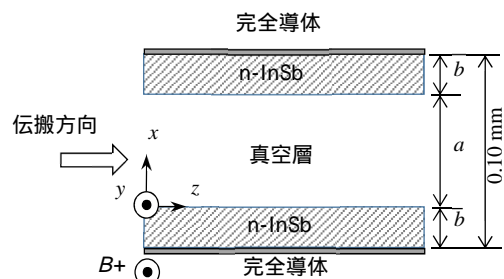


図1 理論解析構造

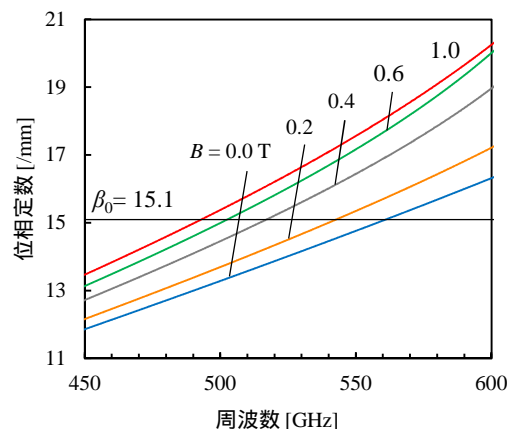


図2 理論解析結果(位相定数 β)

図3にFDTD解析構造を示す。y方向は一樣とした二次元解析構造で、図1で示した伝送線路を特定の寸法に設定し、両端には中央部に間隙を開けた金属板を設置した構造である。導体板の厚みや間隙の寸法は、共振がなるべく鋭く、また透過電力が大きいように調整した。プラズマの電子密度 $n = 2.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ の場合の印加磁界をパラメータとした電力透過係数の周波数依存性を示す。構造は、共振器長 $l = \text{mm}$ 、InSbの厚さ $b = \text{mm}$ 、真空領域の高さ $a = \text{mm}$ とした。 $B = 0$ では 570 GHz で透過電力が最大となった。磁界を増加させると、電力の最大値は徐々に低磁界側にシフトして $B = 1 \text{ T}$ では 490 GHz となった。この結果は理論解析の傾向とよく一致し、予想した共振周波数の変化により透過電力の最大値が変化していると考えられる。以上の結果から、空洞共振器にプラズマを挿入した3層構造導波管に横磁界を印加することで、中心周波数を大きく制御できるサブミリ波帯の特性可変のフィルタの可能性が示された。

実際に共振特性の変化を測定するために、ここでは広帯域のサブミリ波源が必要となるが、ここでは光源として 526 GHz の光励起サブミリ波レーザを使用するため、単一周波数の磁界依存性について検討を行った⁽²⁾。また、共振器長は $3/2\lambda$ の共振を想定し $l = 0.60 \text{ mm}$ とし、共振器を構成する共振器両端の導体壁を取り外し、InSbの厚みを $b = 0.050 \text{ mm}$ と厚くすることで共振器を構成した。実験結果を $n = 4.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ の場合のFDTD解析結果とともに示す。磁界依存性は解析結果と実験結果で定性的に一致した。これより、上記伝送線路は印加磁界により特性が変化することが示された。しかし、この変化が共振器の共振特性によるものかは明確に示すには至らなかった。今後は、単一周波数の実験で共振特性の変化を説明する手法の検討や、広帯域の光源での測定が課題となった。また、ミリ波帯での実験を想定した、三次元FDTD解析や実験についても検討も進めている⁽³⁾。

参考文献

- (1) Shinichi Yodokawa, Satoru Kosaka and Tetsuo Obunai:
 “Nonreciprocal Propagation Characteristics of 526 GHz Submillimeter-Wave in Transversely Magnetized Two-Layer Parallel-Plate Waveguide Containing p-InSb Slab,”
 Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40, pp. 307-313(2001).
- (2) 淀川信一, 足立匠, 倉林徹: 「固体プラズマを挿入した空洞共振器型フィルタのサブミリ波伝搬特性」, 平成29年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2D07(2017) .
- (3) 石川裕都, 淀川信一, 倉林徹: 「固体プラズマを挿入した空洞共振器型フィルタのミリ波伝搬特性」, 令和元年応用物理学会東北支部第74回学術講演会, p.3aB04(2019) .

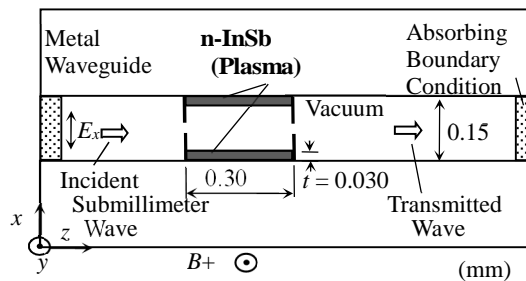
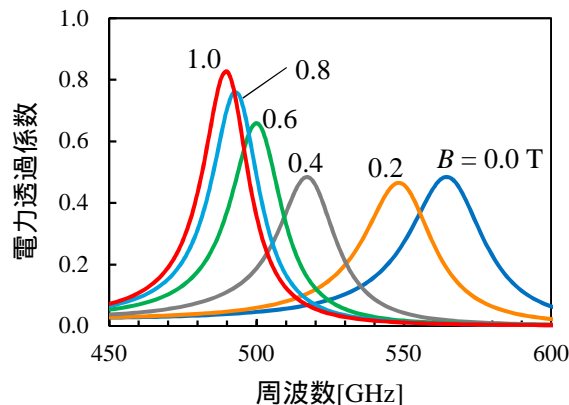


図3 FDTD解析構造



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田村 涼, 高橋 俊也, 淀川 信一, 倉林 徹	4. 巻 1
2. 論文標題 固体プラズマを用いた周期金属構造を持つ漏れ波アンテナのサブミリ波及びミリ波放射特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 8-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michinobu Hayase, Shinichi Yodokawa, Toru Kurabayashi, Emi Adachib, Takenori Tanno	4. 巻 532
2. 論文標題 Simulated disordered-to-ordered phase transition of nonadecane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physicsjournal	6. 最初と最後の頁 110697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田村 涼, 高橋 俊也, 淀川 信一, 倉林 徹	4. 巻 J103-C
2. 論文標題 固体プラズマを用いた周期金属構造を持つ漏れ波アンテナのサブミリ波及びミリ波放射特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 8-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michinobu Hayase, Shinichi Yodokawa, Toru Kurabayashi, Emi Adachi, Takenori Tanno	4. 巻 532
2. 論文標題 Simulated disordered-to-ordered phase transition of nonadecane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 110697-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋山涼介, 倉林徹, 淀川信一	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 光学的手法による固体プラズマ材料の物性測定に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 498-505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 主濱勇人, 倉林徹, 淀川信一, 高坂諭, 越高潤哉	4. 巻 67
2. 論文標題 テラヘルツ波帯スペクトルの多変量解析による糖の識別	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 BUNSEKI KAGAKU, The Japan Society for Analytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 565-569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋山涼介, 倉林徹, 淀川信一	4. 巻 12
2. 論文標題 光学的手法による固体プラズマ材料の物性測定に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 498-505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SHUHAMA Hayato, KURABAYASHI Toru, YODOKAWA Shinichi, KOSAKA Satoru, KOSHITAKA Junya	4. 巻 67
2. 論文標題 Identification of Monosaccharides by Terahertz Spectral Analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 BUNSEKI KAGAKU	6. 最初と最後の頁 565 ~ 569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.67.565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toru Kurabayashi, Hayato Shuhama, Shinichi Yodokawa, Satoru Kosaka	4. 巻 80
2. 論文標題 Identification of cellulosic fibers and determination of their blend ratio using terahertz spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Infrared Physics & Technology	6. 最初と最後の頁 153-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 石川裕都, 淀川信一, 倉林徹
2. 発表標題 固体プラズマを挿入した空洞共振器型フィルタのミリ波伝搬特性
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第74回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島田凌, 淀川信一, 倉林徹, 安達恵美, 丹野剛紀
2. 発表標題 4-ニトロ安息香酸メチル単結晶のテラヘルツ帯振動の異方性
3. 学会等名 第28回有機結晶シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧智帆, 倉林徹, 淀川信一
2. 発表標題 Sensitivity of THz spectroscopy with Metallic Hole Array as metamaterial
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤京太郎, 倉林徹, 淀川信一
2. 発表標題 Measurement of Electrical Properties of Solid Plasma Materials by Terahertz Reflection Spectroscop
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水陽人, 鈴木耕也, 倉林徹, 淀川信一, 越高潤哉
2. 発表標題 Study on improvement of detection sensitivity of biological substances using electromagnetic wave
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早瀬仁文暢, 淀川信一, 倉林徹, 安達恵美, 丹野剛紀
2. 発表標題 柔粘性結晶ノナデカンにおける分子の回転挙動
3. 学会等名 ホスト-ゲスト・超分子化学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi, Koya Suzuki, Akito Shimizu and Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 Electromagnetic-Wave Reflection Spectroscopy on Biological Solutions Using Impedance-Matched Dielectric Layer at the Solution Interface
3. 学会等名 International conference on analytical and bioanalytical methods (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水陽人, 鈴木耕也, 倉林徹, 淀川信一, 越高潤哉
2. 発表標題 Study on improvement of detection sensitivity of biological substances using electromagnetic wave
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会 student session
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧智帆, 倉林徹, 淀川信一
2. 発表標題 Sensitivity of THz spectroscopy with Metallic Hole Array as metamaterial
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会 student session
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤京太郎, 倉林徹, 淀川信一
2. 発表標題 Measurement of Electrical Properties of Solid Plasma Materials by Terahertz Reflection Spectroscop
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会 student session
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早瀬仁文暢, 淀川信一, 倉林徹, 安達恵美, 丹野剛紀
2. 発表標題 柔粘性結晶ノナデカンにおける分子の回転挙動
3. 学会等名 ホスト-ゲスト・超分子化学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi, Koya Suzuki, Akito Shimizu and Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 Electromagnetic-Wave Reflection Spectroscopy on Biological Solutions Using Impedance-Matched Dielectric Layer at the Solution Interface
3. 学会等名 International conference on analytical and bioanalytical methods
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi, Koya Suzuki, Akito Shimizu and Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 Electromagnetic-Wave Reflection Spectroscopy on Biological Solutions Using Impedance-Matched Dielectric Layer at the Solution Interface
3. 学会等名 Abstract book of International conference on analytical and bioanalytical methods
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi, Kyohei Konishi, Shunsuke Masuyama, Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 An Effective Application Of THz Spectroscopy For Identifying Fabric Fibers And Their QualityEvaluation
3. 学会等名 The 43th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Michinobu Hayase, Shinichi Yodokawa, Toru Kurabayashi, Takenori Tanno
2. 発表標題 A study of order-disorder phase transition of nonadecane using computer simulation
3. 学会等名 化学系学協会東北大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐野巧, 倉林徹, 村岡幹夫, 淀川信一
2. 発表標題 マイクロ・ナノ構造による電磁波の吸収特性に関する研究
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相馬貴彰, 淀川信一, 倉林徹
2. 発表標題 固体プラズマを挿入した導波管のミリ波放射特性
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水陽人, 倉林徹, 淀川信一, 越高潤哉, 高坂諭
2. 発表標題 電磁波を用いた生体関連物質の検出向上に関する研究
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木耕也, 清水陽人, 倉林徹, 淀川信一
2. 発表標題 Reflection Spectroscopy for Biological Solution by Using Millimeter Wave
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増山俊輔, 倉林徹, 淀川信一, 越高潤哉
2. 発表標題 テラヘルツ分光分析による繊維種識別に関する研究
3. 学会等名 第65回 日本シルク学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kurabayashi, K. Suzuki, Y. Aoki and S. Yodokawa
2. 発表標題 THz Reflection Spectroscopy on Biological Solutions using Impedance-matched Dielectric Layer at the Interface
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi, Shunsuke Masuyama, Hayato Shuhama, and Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 An Effective Application of Terahertz Spectroscopy for Identifying Fabric Fibers
3. 学会等名 EMM Meeting on Terahertz 2017 Energy Materials Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toru Kurabayashi*, Hayato Shuhama, Shunsuke Masuyama, and Shinichi Yodokawa
2. 発表標題 Terahertz Spectroscopy for Textile Fibers
3. 学会等名 BIT's 5th Annual Conference of AnalytiX-2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻春樹, 淀川信一, 倉林徹
2. 発表標題 横方向に磁界を印加した固体プラズマ薄板のサブミリ波非可逆反射特性
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第72回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茂木徹, 淀川信一, 倉林徹
2. 発表標題 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
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第72回学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

秋田大学大学院理工学研究科 数理・電気電子情報学専攻 電気電子工学コース 倉林研究室 http://www.ee.akita-u.ac.jp/~kairo/index.htm

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	倉林 徹 (Kurabayashi Toru) (90195537)	秋田大学・理工学研究科・教授 (11401)	