

ドップラー効果を用いたテラヘルツ波発生固体デバイスの研究 (051406002)

Research on the Doppler effect solid-state devices for generation of terahertz waves

研究代表者

裴 鐘石 名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻

Jongsuck Bae Departments of Engineering Physics, Electronics and Mechanics, Nagoya Institute of Technology

研究分担者

榊原 久仁男[†] 石川 亮^{††}

Kunio Sakakibara[†] Ryo Ishikawa^{††}

[†]名古屋工業大学工学研究科情報工学専攻 ^{††}電気通信大学電気通信学部

[†]Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

^{††}Department of Information and Communication Engineering, The University of Electro-Communications

研究期間 平成 17 年度～平成 20 年度

概要

本研究は、高出力テラヘルツ波発生を可能にする新たな固体デバイスとして、半導体表面を高速移動する光励起電子-正孔プラズマ境界におけるコヒーレント電磁波散乱現象を利用したドップラーシフト型周波数変換デバイスの研究開発を行うことを目的としている。本研究を通して、シリコン基板上に製作されたスロット線路を伝搬するマイクロ波を 0.1THz を越えるテラヘルツ波への周波数増倍に成功し、ドップラー効果を用いた周波数変換原理が固体デバイスに適用可能であることを世界に先駆けて実験的に立証した。

Abstract

This research project aims to develop high power terahertz solid-state sources that make use of coherent scattering of electromagnetic waves from a moving boundary of electron-hole plasma in a transmission line on a photo-excited semiconductor substrate. In the project, Doppler frequency conversion from microwaves to terahertz waves has been experimentally demonstrated for the first time using a slotline on a silicon substrate. The experimental results have clearly indicated that the Doppler effect can be employed to explain the operation principle of not only electron beam devices, but also solid state devices.

1. まえがき

高速移動境界面でのコヒーレントな電磁波散乱時に起きるドップラー効果は、高い周波数増倍率を高効率かつ広帯域で実現可能にする有用な周波数増倍法である。この方式は、従来自由電子レーザー等の電子ビームデバイスで用いられ、固体デバイスに適用されることはなかった。

本研究課題は、高速移動境界面として光励起電子-正孔プラズマを用いることでドップラー効果を小さな固体デバイス (図 1 参照) 上で実現し、従来の固体デバイスが持つ周波数制限を越えたテラヘルツ帯で動作する新たな周波数変換固体デバイス開発を目的として実施された。

2. 研究内容及び成果

従来、理論のみであったドップラー効果周波数変換固体デバイスに関する研究は、その動作原理の実験的検証が最優先課題であった。そこで、比較的实验が容易な 40GHz から 110GHz までの低周波テラヘルツ帯で最初の動作検証実験を実施した。

まず、周波数変換デバイスとして、厚さ 150 μm のシリコンオンインシュレータ (SOI) 上に長さ 40mm、幅 145 μm のスロット線路を設計・製作した。入力周波数は、9GHz から 18GHz のマイクロ波とし、周波数増倍率を約 3 から 6 となるように、波長 532nm、パルス幅 33psec の Nd:YAG レーザー光の波面を傾斜させ、SOI スロット線路に照射した (図 1 参照)。精密な波面傾斜を行う光遅延回路には、高い光遅延率が得られる光ファイバーアレイとレーザーの入射角度を変えることで波面傾斜角度を可変

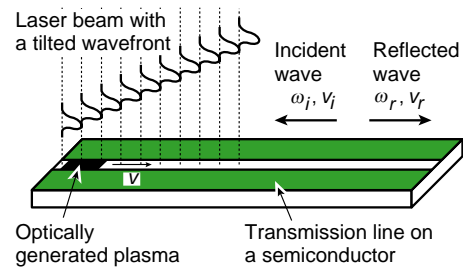


図 1 ドップラー効果周波数変換固体デバイスの原理図

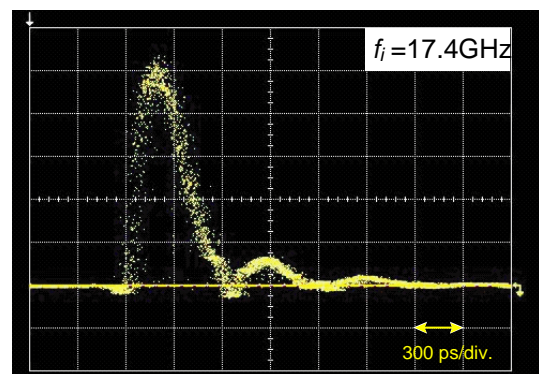


図 2 代表的な周波数変換出力波形

できる多段鏡回路をそれぞれ採用し、用いた。

図 2 は、多段鏡光遅延回路による周波数変換器からの代

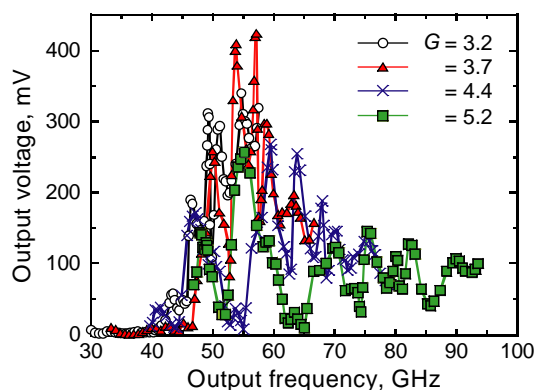


図3 周波数変換デバイスの出力特性

表的な出力波形である。出力周波数は 90GHz、周波数増倍率は約 5.2 倍である。図 3 は、測定した出力パルスのピーク電圧を、周波数増倍率 G を変化させて測定した結果である。周期的な出力電圧の強いディップは、入力マイクロ波回路がもつ周波数特性によるものである。出力電圧は周波数 55GHz でピークを持ち、周波数が増加するにつれ、長さ 40mm の SOI スロット線路および金属導波管出力回路での伝搬損失のため、その振幅が減少する特性を持つことが分かる。同様に、光ファイバーアレイ遅延回路を用いた実験を行い、最大周波数増倍率 5.7 倍、最高出力周波数 103GHz を達成した。

上で述べた周波数増倍実験を通して、次の重要な知見、成果を得た。①ドップラー効果固体デバイスが実現可能であることを明確に立証した。②プラズマ境界速度一周波数増倍率の関係が理論とほぼ一致し、プラズマ境界速度を調節することで任意の増倍率が得られる。③ドップラー効果デバイスの大きな特徴である広帯域出力特性を実験的に確認した。④レーザーパルス幅により決定されるプラズマ境界の密度分布が周波数変換効率へ与える影響を、実験結果と理論とを照合を通して検討し、動作周波数に対し要求される励起レーザーの仕様を明らかにした。更に、実際の周波数変換デバイス製作で必要となる入力回路一周波数変換部ー出力回路の効率的な結合方式に関する知見を得、本デバイス設計理論構築のための基本データを得た。

次に、低周波テラヘルツ帯における実験結果とその理論解析結果を基礎として、0.3THz 以上のテラヘルツ帯で動作するドップラー効果周波数変換デバイスの開発を行った。図 4 に、設計・製作した周波数変換デバイスを示す。基板は厚さ 40 μ m の半絶縁性 GaAs 半導体、線路は 2 層構造を持つ線路幅、金属線幅ともに 30 μ m のコプレーナストリップ (CPS) 線路である。出力部は、カットオフ周波数が 268GHz の出力金属導波管とインピーダンス整合をとるためのテーパー (写真右側) が取り付けられている。このデバイスは、直流電圧を CPS 線路に沿って、交互に加え、線路部に交替静電場を発生させ、これを高速移動する光励起プラズマ境界で散乱させることによりテラヘルツ波へと変換するものであり、本研究課題を通して全く新たに提案・開発されたデバイス構造である。

現在まで、テラヘルツ帯時間領域分光法を用いて、テラヘルツ波の 3.5 波長分に相当する 7 つの絶縁された CPS 線路部分とその線路間をつなぐ接続用線路の伝搬特性を実測した。その結果より、テラヘルツ波の伝搬速度および損失、直流バイアス電圧に対するテラヘルツ波パルスの出力振幅特性を明らかにした。その結果、本デバイス構造を用いて、0.3THz を越えるコヒーレントなテラヘルツ波発生が可能との結論を得た。

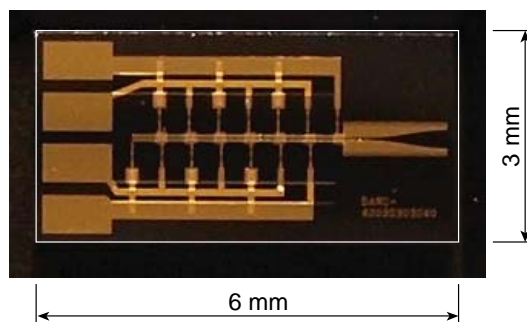


図4 開発したテラヘルツ帯周波数変換デバイスの写真

3. むすび

本研究を通して、マイクロ波からテラヘルツ波への周波数変換実験に世界に先駆けて成功し、本デバイス方式が実現可能で、かつ広帯域な周波数増倍法であることを立証した。その実験結果とテラヘルツ波伝搬特性に関する理論および実験的な知見に基づき、入力波源として交替静電場を用いる新たなドップラー効果デバイス構造を提案し、テラヘルツ帯における基礎特性評価を通して、その有用性を明らかにした。これらの研究成果は、ドップラー効果を動作原理とする新たな固体デバイス創成とコヒーレント高出力テラヘルツ波発生固体デバイス開発への端緒となるものである。

【誌上发表リスト】

- [1] J. Bae, Y. J. Xian, S. Yamada, and R. Ishikawa, "Doppler frequency up conversion of electromagnetic waves in a slotline on an optically excited silicon substrate," *Applied Physics Letters*, Vol. 94 No. 9 pp. 091120_1-3 (2 March 2009)
- [2] J. Bae, Y. J. Xian, and S. Yamada, "Experimental Demonstration of the Doppler Frequency Conversion in a Slot Line", *Conf. Proc. the 38th European Microwave Conference*, Amsterdam, Netherlands, pp. 385-388 (29 Oct. 2008)
- [3] K. Matsugatani, K. Sakakibara, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Broadband Planar Antenna Combining Monopole Element with Electromagnetic Bandgap," *IEICE Trans. on Electronics*, Vol.E91-C, No.11, pp.1778-1785, (November 2008)

【申請特許リスト】

- [1] J. Bae, *Frequency Conversion Using Optical Excitation Surface Plasma and Its Method*, 大韓民国, 2005年8月5日
- [2] J. Bae, *Frequency Conversion Using Optical Excitation Surface Plasma and Its Method*, ヨーロッパ, 2005年7月27日
- [3] J. Bae, *Frequency Conversion Using Optical Excitation Surface Plasma and Its Method*, 中国, 2005年9月2日

【登録特許リスト】

- [1] J. Bae, *Frequency Conversion Using Optical Excitation Surface Plasma and Its Method*, 米国, 2005年8月5日, 2007年6月26日, Patent No. 7236293 B2.
- [2] 裴鐘石, *光励起表面プラズマを用いた周波数変換装置及び方法*, 日本, 2003年2月10日, 2008年2月8日, 特許第 4077331 号

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://bae.web.nitech.ac.jp/>