

スロットアンテナ結合 GaAs ショットキーバリア
ダイオードのミクシング特性

**Mixing properties of slot-antenna coupled
thin-film Schottky barrier diode**

古屋 岳¹、内田貴司²、出原敏孝¹、安岡義純^{1,2}

T. Furuya¹, T. Uchida², T. Idehara¹, Y. Yasuoka^{1,2}

¹ 福井大学・遠赤外領域開発研究センター
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui
Fukui 910-8507, Japan

² 防衛大学校・電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, National Defense Academy of Japan
Knagawa 239-8686, Japan

Abstract

In order to obtain a detector and mixer with high sensitivity in the THz region, slot antenna coupled Schottky barrier diodes were fabricated, and harmonic mixing experiments were carried out in the 94GHz millimeter wave region. The data were then compared with the theoretical calculation. The good agreement between theoretical calculation and experiments provides strong evidence that the fabricated device works as a harmonic detector and mixer in the millimeter wave region.

1. はじめに

近年、電磁波の谷間とされてきた THz 領域においてジャイロトロンなどの高出力な光源が開発され、イメージングやリモートセンシングなどの様々な分野への応用が期待されている。一方、この領域の検出器としては、従来から量子型や熱型が用いられ、量子型としては Ge 半導体に Ga 等の不純物をドーピングした光導電型検出器などがあるが、この検出器は、熱型検出器に比べて応答速度は速いものの THz 帯では液体ヘリウム等による極低温への冷却が必要になる。熱型検出器にはボロメータや焦電型の検出器があるが、共に応答が遅く、パルス発振や発振周波数測定用としては適しない。

福井大学では、現在 THz 帯で発振可能なジャイロトロンの開発を行っており、発振実験における検出器として、また、発振周波数を精度良く測定するための検波器として、高感度で発振周波数に直接応答することのできる検出器の開発が求められている。

これらの要請を満たす検出器としては、THz 電磁波の周波数に対して直接応答する MOM ダイオード、ウォームキャリア、ショットキーバリアダイオード、超伝導ジョセフソン素子等一連のアンテナ結合素子があり、電磁波受信アンテナにはスロット、ボウタイ、スパイラルアンテナ等がある。本研究では、THz 帯で高感度が期待出来るショットキーバリアダイオードと防大で 28THz まで測定実績のある薄膜スロットアンテナの組み合わせたスロットアンテナ結合ショットキーバリアダイオードを取り上げた。

今回は、THz 帯で高感度な検出器を設計、開発するための基礎データ取得を目的として、94GHz に用素子を製作し、周波数混合実験を行った。

2. スロットアンテナ結合 GaAs ショットキーバリアダイオード

本研究で用いたアンテナ結合型ショットキーバリアダイオードの断面の概略図を Fig.1 に示す。n-GaAs 上に SiO₂ の絶縁層を介してオーミック電極を形成し、絶縁層に空けた 2 μm の微細穴を通してショットキーコンタクトを実現している。実験に使用した素子製作に関してはユピテル工業（株）の協力を得た。素子の製作過程は以下の通りである。

GaAs 基板上に n⁺-GaAs, n-GaAs を成長したウエハに、Au/Ge/Ni/Au のオーミック電極を電子ビーム蒸着。その後、リン酸により GaAs エピタキシャル層を基板までウエットエッチングし円形メサを作製する。次に、基板全体に絶縁膜である SiO₂ をスパッタ蒸着し、バッファードフッ酸によりオーミックコンタクトとショットキーコンタクトを得るための円形窓をエッチングした。その後、Ti/Pt/Au ショットキー電極を蒸着。全体に再び SiO₂ を蒸着し、絶縁層を形成。最後に、Au 電極を蒸着し、スロットアンテナ部のパターンニングを

行った。製作した素子のSEM写真を Fig.2 に示す。図中の黒色部がスロットアンテナであり、周辺部は金薄膜を用いたグランド面となっている。アンテナの中央にショットキー接合部が配置されている。

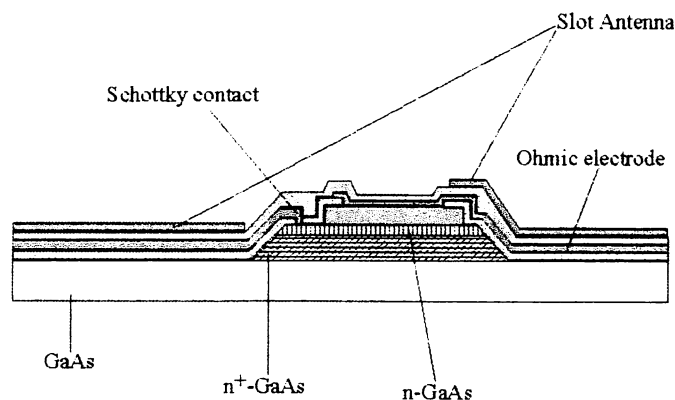


Fig.1 SBD 概略図

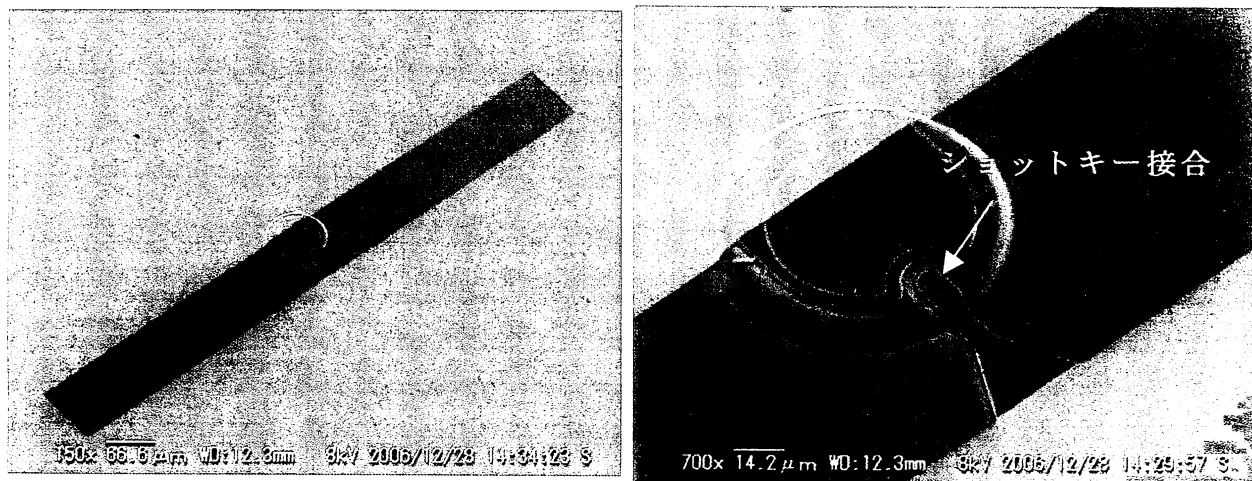


Fig.2 作製した素子のSEM写真 全体像とショットキー接合部

3. 偏波特性

まず初めに、製作した素子が電磁波をアンテナ受信していることを確認するため、偏波特性の測定を行なった。スロットアンテナでは E 面が矩形アンテナの短軸方向、H 面が長軸方向となる。照射する電磁波の電場方向とアンテナの E 面が一致したとき、検出効率が最大となり、直交時に検出効率は最小となる。また、検出電圧は電磁波の出力に比例し、スロットアンテナの E 面方向の成分のみが検出されるため、電場方向と E 面の成す角を θ とした場合、検出電圧は $\cos^2\theta$ に比例する。偏波特性の測定に用いた実験装置の概略図を Fig.3 に示す。

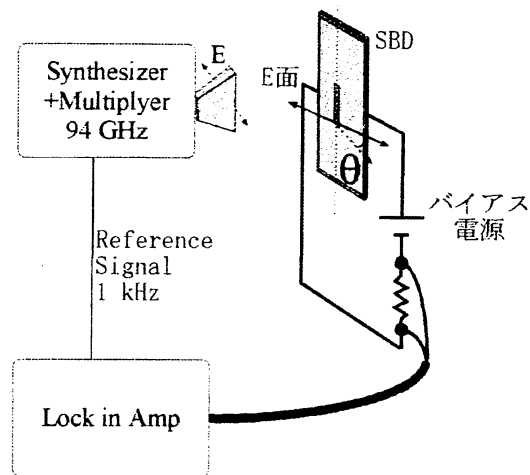


Fig.3 偏波特性測定装置概略図

マイクロ波源には発振周波数 94 GHz で 1kHz 90%に振幅変調したシンセサイザを使用し、SBD からの出力を検出用抵抗 10 k Ω を介してロックインアンプで測定した。アンテナの E 面と電場の成す角を θ とし、検出電圧の角度依存性の測定を行ない、検出電圧が最大となる $\theta = 0^\circ$ を基準に規格化を行なった。測定結果を Fig.4 に示す。図中に示した実線は $\cos^2\theta$ を表す。 $\cos^2\theta$ と実験値は良い一致を示し、作製した素子がスロットアンテナを介してマイクロ波を受信し、検出電圧を得ていることを確認した。

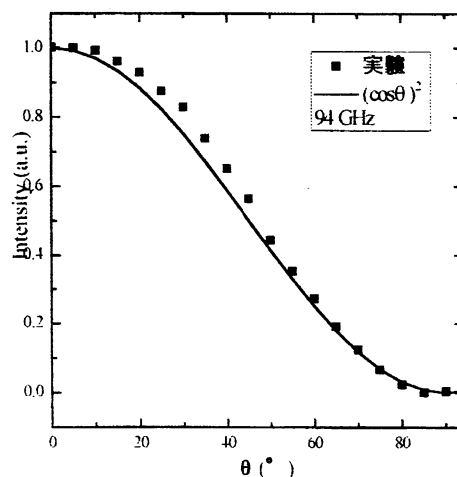


Fig.4 偏波特性実験結果

4. ハーモニックミクシングの原理

ショットキーバリアダイオードの I-V 特性を $I = g(v)$ で表し、検出素子にバイ

アス電圧 V_b , 信号波 $v_1 = V_1 \cos \omega_1 t$, LO 波 $v_2 = V_2 \cos \omega_2 t$ を与えたときのショットキーダイオードの出力電流は次式で表される。

$$I = g(V_b) + (V - V_b)g'(V_b) + \frac{1}{2}(V - V_b)^2 g''(V_b) + \frac{1}{3}(V - V_b)^3 g'''(V_b) + \dots \quad (1)$$

式中の V は $V = V_b + v_1 + v_2$ である。(1)式中において IF 信号にあたる $\cos(\omega_1 - n\omega_2)t$ の項を求めると、

$$\log \left(\overline{I(\omega_1 - n\omega_2)^2} \right) = \log V_1^2 + n \log V_2^2 + 2 \log \left(g_{v_b}^{(n+1)} \right) - \log \left[2(n! 2^n) \right] \quad (2)$$

となる。 n はハーモニック次数を表す。(2)式中の第 1,2 項は IF 信号が信号波の入射強度に比例、LO 信号強度の n 次に比例することを示している。また、3 項以下はショットキーバリアダイオードの非線形性による効果を表している。

5. Mixing 特性

ミクシング実験に用いた実験装置の概略図を Fig.3 に示す。94 GHz 固定のガン発振器を信号波に、周波数可変なシンセサイザー (HP83558A) LO 波に使用した。両発振源から放射された電磁波を直接スロットアンテナに照射し、IF 信号を検出用抵抗により取り出し、アンプで増幅後、スペクトラムアナライザーで IF スペクトルを直接観測した。

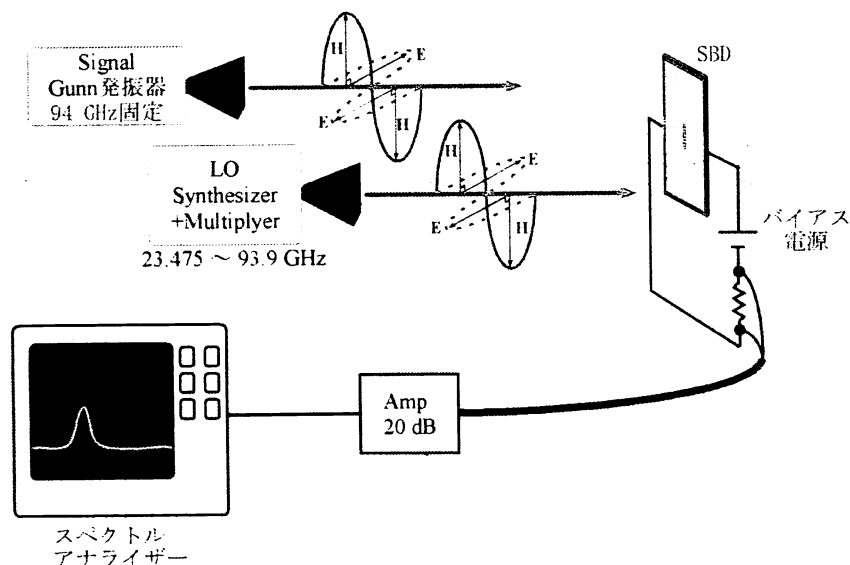


Fig.3 ハーモニックミクシング実験装置外略図

まず、IF 信号を確認するために基本波ミクシングを行なった。IF 信号は比較的観測が容易で、伝送ケーブルでの損失が少ない 100 MHz 程度とした。信号波

は 94.007 GHz 固定のため、基本波ミクシングでは LO 波は 93.9 GHz となる。IF 信号を確認後、順次ミクシング次数を上げ、IF 信号強度の変化を測定した。測定した 2 次の IF 信号スペクトルを Fig.4 に示す。

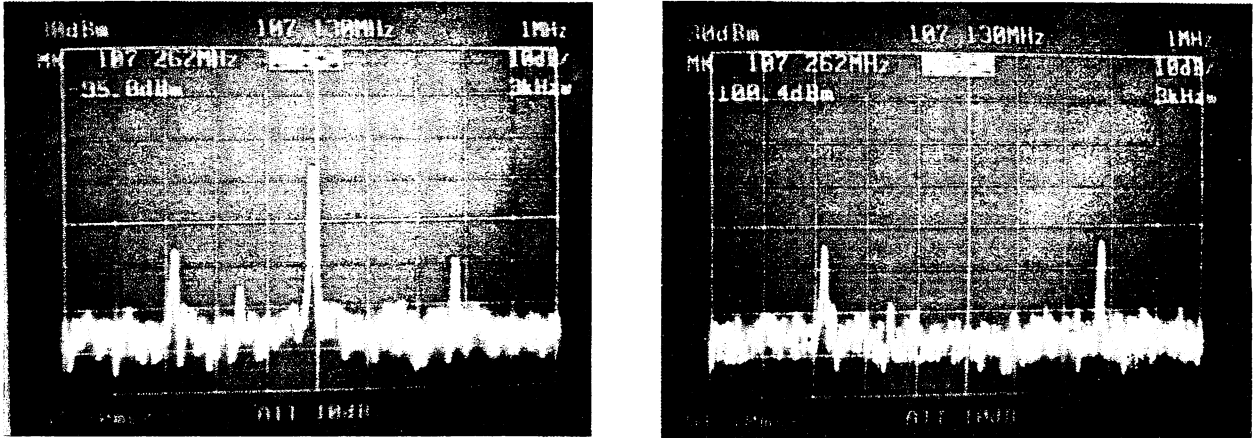


Fig.4 2次ハーモニックミクシングスペクトル (左図 LO: on, 右図 LO: off)

図に示した 2 次ミクシングの測定条件は以下の通りである。

信号波 94.007 GHz 出力 10 dBm

LO 波 45.95 GHz 出力 10 dBm

バイアス電圧 0.62 V

アンプ 20 dB

スペクトラムアナライザ 横軸:0.1MHz/div 縦軸:10 dBm/div

2 次のミクシングにおいて $|94.007 - 2 \times 45.95| = 0.107$ GHz (107 MHz) の信号が良好な S/N 比で観測された。Fig.4 の左図は信号波と LO 波を素子に照射したときの 100 MHz 付近のスペクトルを示し、右図は LO 波の発振を止めたときのスペクトルである。左右の図を比較すると、図中央のスペクトルが IF 信号であることが確認できる。また、周辺に見える複数のスペクトルは LO 信号に依存していないことから、IF 信号と関係のないノイズである。同様の実験を各ハーモニック次数について行った。ハーモニック次数に対する IF 信号強度を Fig.5 に示す。IF 強度の比較には、式(2)の右辺第 1,2 項の値が各次数で等しくなる条件で測定を行ない、基本波ミクシングの IF 信号を 0 dB として規格化を行った。

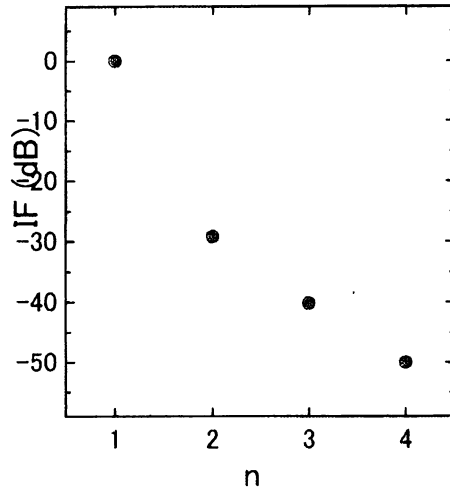


Fig.5 IF 強度のハーモニック次数依存性

縦軸に測定された IF 強度、横軸はハーモニック次数である。ミクシング次数が高くなるにつれ IF 信号の検出感度が急激に低下していることがわかる。本研究では 4 次ミクシングまで観測可能であった。次に、信号波を固定し、LO 波の出力に対する IF 信号の強度変化を測定した。2 次ミクシングにおける測定結果を Fig.6 に示す。

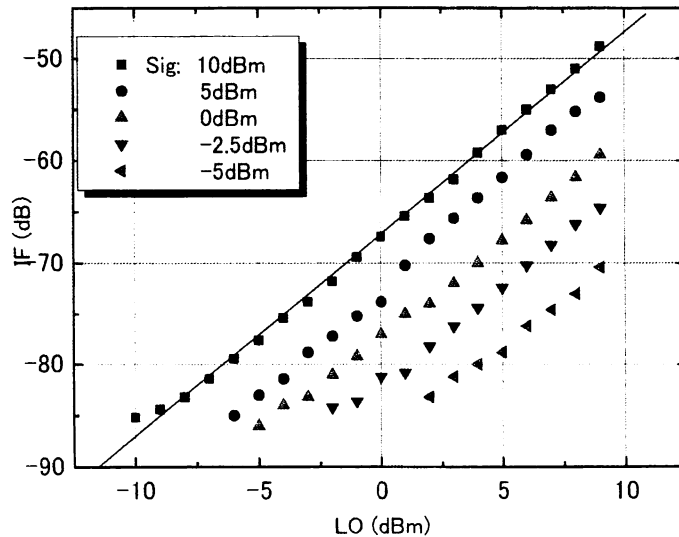


Fig.6 IF 強度の LO 波依存性

式(2)から IF 信号強度は LO 波の強度に比例し、その傾はハーモニック次数 n と一致することが期待される。図中に示した傾き 2 の実線に対し、実験データは

良い一致を示した。LO 強度が-7.5 dBm 以下では理論線と実験データにずれが生じているが、これは IF 信号強度が弱く、ノイズレベルに近いので測定が精度良く行なえなかった結果だと考えられる。次に各ハーモニック次数における IF 強度の LO 強度依存性を Fig.7 に示す。基本波、2 次、3 次のミクシングを比較すると、次数が上がるごとに LO 波に対する IF 強度の傾きが大きくなっている。また、図中の点線は各次数を傾きとした直線を表す。この結果からも式(2)の右辺第 2 項において次数 n が 1 次、2 次、3 次と変化することにより傾きが 1,2,3 と変化することが確認できた。IF 信号の LO 強度依存性の測定から、本研究で製作したスロットアンテナ結合型薄膜 SBD の IF 特性は理論値と良い一致を示すことを確認した。

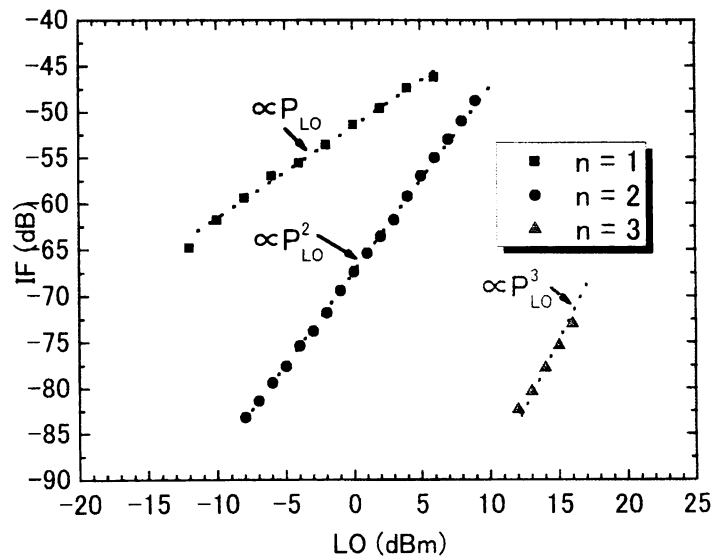


Fig.7 IF 強度の LO 強度依存性

6. 謝辞

本研究で使用したスロットアンテナ結合型薄膜ショットキーバリアダイオードの製作に協力して頂いたユピテル工業(株)に深く感謝いたします。