淺井 空太,山本 一喜,小田 純平,菜嶋 茂喜,細田 誠 大阪市立大学大学院工学研究科

Enhancement of terahertz radiation from GaAs photoconductive antenna at high temperatures

K. Asai, K. Yamamoto, J. Oda, S. Nashima, and M. Hosoda Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, Osaka City University

We measured the terahertz (THz) radiation characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive antenna at high temperatures using femtosecond lasers. Results showed that the radiation power increased when the temperature was increased at 424 K it was more than 4 times larger than that at room temperature. We discuss the mechanism behind this increased THz radiation in relation to the trap-enhanced electric fields effect around the anode.

(Corresponding author) K. Asai: asai@a-phys.eng.osaka-cu.ac.jp

1. はじめに

レーザー励起によるテラヘルツ波(THz 波)放射技術の発生に伴い,様々な応用の可 能性が見えてきた.しかしながら,THz 波 が社会的に実際に応用されている例は未だ 少ない.THz 波の社会的応用の為に,更な る高強度化,広帯域化が求められている.

THz 波発生素子はいくつかあるが, 半導 体 光 伝 導 ア ン テ ナ (Photo conductive antenna, 以下 PCA)は,有力な放射素子 である. Katzenellenbogen 等は,半絶縁 性 GaAs(Semi-Insulating GaAs,以下 SI-GaAs)基板に作製したストリップライ ン型 PCA からの THz 波放射を報告してい る[1].印加電圧に対し,非線形的な放射強 度特性が見られることを示している.その 後,Ralph 等は,同じ PCA からの THz 波放射特性が電極間の照射位置によって 異なり,陽極付近を照射すると最も効率的 に THz 波が放射されることを報告してい る[2]. 彼らの報告は, 基板と電極接合部の ポテンシャル状態が THz 波放射特性に大 きく影響する事を示しており,より詳しく 調べることによって, 更なる放射強度の増 大を期待出来る.

これまでの PCA に関する報告において, 励起光強度や印加電圧に関する報告が多く [1,2],温度に関しては 80 K~280 K までの 低温特性だけで[3],高温領域での特性につ いては調べられていない.高温領域におけ る THz 波放射特性については,Nakajima 等の行った GaAs 表面電場からの THz 波放 射特性の報告があり,500 K の時の THz 波 放射強度が,常温と比べて 30 倍以上増大す る事を示している[4].彼らは,これは温度 上昇に伴う半導体表面電場の増大が起因し ている との見解を示している.その SI-GaAs の PCA においても,高温領域で 基板-電極間の接合部のポテンシャル状態 の変化に伴い,THz 波放射強度の増大が期 待されている.

そこで本研究では高温領域における PCA からの THz 波放射強度の特性につい て調べた.

2. 試料と実験方法

2.1 SI-GaAs 製の PCA アンテナの作製

本研究で用いた PCA の模式図を Fig. 1 に示す. 試料構造は, SI-GaAs 基板(厚さ: 350 µm)上に2 mm のギャップを有する Au の電極(膜厚:100 nm)を蒸着したものであ る. また放射特性の比較用として SI-GaAs 基板だけの試料も用意した.



Fig. 1 測定に用いた PCA の模式図.

2.2 高温測定用 PCA ホルダーの作製

2.1 で記した放射素子を, 自作した高温測 定用の PCA ホルダーに取り付け, 温度調整 を行えるようにした(Fig. 2).



Fig. 2 高温測定用の PCA ホルダーの写真.

ホルダーの材料には,熱伝導率の高い銅

を選択した.またホルダーにおける素子取 り付け部には透過測定用に穴を開けた.ホ ルダーの裏面には特注のシリコン製のラバ ーヒーターを取り付けた.ホルダー表面に は熱電対を取り付け,リアルタイムの素子 温度をモニター出来るようにした.ヒータ ーの耐熱温度が 470 K であったことから素 子の温度は約 430 K まで上昇させる事が出 来た.

2.3 THz 放射分光システム

2.2 のホルダーで保持した 2.1 の試料を, Fig. 3 に示す THz 波放射分光システムに導 入し,放射素子から放射されたテラヘルツ 波波形を計測した.



Fig. 3 THz 放射分光システム.

フェムト秒 Ti:Sapphire レーザー(繰り返 し周波数:40 MHz,中心波長:780 nm, パルス幅:16 fs,平均出力:300 mW)から の光パルスを,ビームスプリッターで2つ に分け,一方は遅延時間ステージを経由し た後,THz 波検出素子であるダイポール型 の LT-GaAs 光伝導アンテナ素子に導き,他 方はオプティカルチョッパーで3 kHz に変 調し,試料の電極間ギャップの中央付近に 照射した.励起光の反射方向に放射された THz 波を平凸レンズ(直径:25 mm,焦点距 離: 50 mm)で検出素子に集光した.

測定は、常温(294 K)から順に、ラバーヒ ーターを用いて素子を昇温して行い、各温 度における 0 V から 100 V までのバイアス 電圧印加時の THz 波放射波形を計測した.

3. 実験結果

Fig. 4 (a)に室温と 424 K における 100 V のバイアス電圧印加時の SI-GaAs の PCA からのTHz波波形を示す.また比較として, 室温で 0 V 時の測定波形も示す.



Fig. 4 (a) 294 K および 474 K における THz 波放射波形. (b) フーリエ変換スペク トル.

(b)は、(a)の THz 波波形のフーリエ変換
 スペクトルである.(a)より、電極間電圧 0 V、
 試料温度 294 K の条件から、バイアス電圧
 を 100 V 印加すると THz 波放射強度が増大

し,かつ 424 K にすると THz 波放射強度が 更に増大していることがわかる.そして(b) より,1 THz 付近をピークとして 5 THz ま で観測できたが,各バイアス電圧,各温度 で測定した波形やスペクトルには大差は見 られない. Fig. 5 は各バイアス電圧印加時 の THz 波波形の最大振幅強度の温度特性で ある.0 V において,390 K までゆるやか に減少しており,390 K 付近から急激に増 大している.



Fig. 5 各バイアス電圧印加時における THz 波振幅強度の素子温度依存性(凡例は 電極間バイアス値).

4. 考察

PCA からの THz 波放射強度は, 印加さ れた電圧によって加速した光生成キャリア の過渡的な電流の変化に比例する. したが って,温度変化に伴う THz 波放射強度の変 化には,①光生成キャリア密度,②移動度, ③印加されている電場強度が大きく関係し ていると考えられる. これらが高温領域で どのような変化があるのかを検討する.

まず①の光生成キャリア密度の温度特性 について考察する. 780 nm の励起波長の場 合 GaAs の吸収係数(α) は 12900 cm⁻¹であ る[5]. よって温度 T によってバンド幅の吸 収係数は,

$$\alpha = 12900 \sqrt{\frac{1.589 - E_g(T)}{1.589 - E_g(RT)}}$$

と近似されるので, T = 420 K だと α =11600 cm⁻¹となる[6]. ここで, E_gはバ ンドギャップである.したがって光生成キ ャリア密度は 10 %程度増大する.また,室 温においてキャリア寿命は1 ns未満である が,高温ではフォノン散乱の影響で,さら に短くなることが予想される.フェムト秒 レーザーの繰返し周期は約 25 ns であるか ら,キャリア寿命の変化は THz 波放射強度 に影響しないと考えられる.

次に②の移動度の温度特性について考察 する. 真性半導体の散乱確率は,フォノン 散乱に起因する[7]. よって移動度µは,

 $\mu \propto T^{-3/2}$

と出来る. T = 420 K の時, µは室温時に対 し約 0.6 倍減少することになる. これはむ しろ THz 波放射強度の減少につながり, 実 験結果の説明は出来ない.

最後に③の印加されている電場強度の温 度特性について考察する.常温のSI-GaAs PCA の THz 波放射特性を見ると, Katzenellenbogen 等の報告と同様バイア ス電圧に対し非線形である.つまり光照射 領域の電場強度は電極間に印加したバイア ス電圧に比例していないと言える.また Ralph 等は,電極間の電流とTHz 波放射特 性が同じ印加電圧から急激に増加すること を報告している.彼らは高電場の局在につ いて,陽極付近でキャリアトラップされた 電荷が内部電場を発生させ,それによって 局在的に高電場が発生するとの見解を示し ている[2].我々の作製した PCA の 424 K での電極間抵抗は 8 k Ω と常温時の抵抗値 31 M Ω に対して著しく減少していた.した がって、高温時には低い印加電圧から電流 が発生しており、同じ印加電圧であれば、 常温時よりも高い電場領域が発生している ことが予想される.

5. まとめ

本研究では、SI-GaAs 基板上に Au 電極 をつけた光伝導アンテナ素子を用いて、そ れによる THz 波放射強度の温度依存性を THz 放射分光法により調べた.その結果、 THz 波放射強度は同じバイアス印加時にお いて 424 K の時には、常温時に比べて約4 倍増大する事が分かった.これは、温度上 昇に伴って、光照射領域の内部電場が増大 したと示唆される.

参考文献

- N. Katzenellenbogen and D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett. 58, 222 (1991).
- [2] S. E. Ralph and D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett. 59, 1972 (1991).
- [3] A. G. Markels and E. J. Heilweil, Appl. Phys. Lett. **72**, 18 (1998).
- [4] M. Nakajima, M. Takahashi, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett. 81, 1462 (2002).
- [5] E. D. Palik (ed.), Handbook of Optical Constants of Solids, (1985), p. 439.
- [6] 御子柴宣夫, 半導体の物理, 培風館, (2001), p. 245.
- [7] S. M. ジィー,半導体デバイス,産業
 図書, (1987), p. 29.