

アンドープ GaAs/*n* 型 GaAs エピタキシャル層構造における テラヘルツ電磁波増強機構

竹内日出雄,^A 柳沢淳一,^A 長谷川尊之,^{B*} 中山正昭^B

^A 滋賀県立大学工学部電子システム工学科

^B 大阪市立大学大学院工学研究科応用物理学専攻

Enhancement mechanism of terahertz electromagnetic wave emission in undoped GaAs/*n*-type GaAs epitaxial layer structures

H. Takeuchi,^A J. Yanagisawa,^A T. Hasegawa,^{B*} and M. Nakayama,^B

^ADepartment of Electronic Engineering Systems, The University of Shiga Prefecture, Shiga, Japan

^BDepartment of Applied Physics, Osaka City University, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka, Japan

Abstract

We have investigated terahertz (THz) electromagnetic waves from an undoped GaAs (200 nm)/*n*-type GaAs (3 μm) epitaxial layer structure (*i*-GaAs/*n*-GaAs structure), where the doping concentration of the *n*-GaAs layer is $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. It is found that the first-burst amplitude of THz wave of the *i*-GaAs/*n*-GaAs structure is remarkably stronger than that of an *n*-GaAs crystal, which means that the *i*-GaAs layer enhances the THz emission intensity. The first-burst amplitude of the *i*-GaAs/*n*-GaAs structure, by tuning the pump-beam energy to the higher energy side, exceeds that of an *i*-InAs crystal known as one of the most intense THz emitters. We, therefore, conclude that the *i*-GaAs/*n*-GaAs structure is useful to obtain intense THz emission. From the pump-beam energy dependence of the first-burst amplitude, the THz-emission mechanism of the *i*-GaAs/*n*-GaAs structure is attributed to the surge current of the photogenerated carriers flowing through the *i*-GaAs layer.

1. 序論

テラヘルツ(THz)分光が実用化段階へ発展を遂げるために、簡便な高強度 THz 電磁波発生方法の開発が求められている。化合物半導体では、表面フェルミ準位ピンギングに由来する表面電場を有するため、フェムト秒レーザーパルス光を照射すると表面空乏層内での光生成キャリアのサージ電流に起因した THz 電磁波が発生する[1]。この現象を応用すれば、電極形成を必要としない簡便な THz エミッタを得ることができる。この表面サージ電流を利用した THz エミッタでは、ドーピング濃度が表面空乏層厚と表面電場を決定する主要因である。この表面空乏層厚と表面電場強度とはトレードオ

フの関係にある。これまでの研究では、適切な材料探索とそれに引続くドーピング濃度調整がなされてきた[2]。さらに THz 電磁波増強するため、1 テスラオーダーの外部磁場印加が行われてきた[3]。しかしながら強磁場を用いる手法は、本来の長所である簡便性を欠くことになる。

本研究では、化合物半導体の特徴であるエピタキシャル層構造設計の自由度を利用した THz 電磁波増強の実現可能性について探索を行った。そして、アンドープ GaAs/*n*-type GaAs (*i*-GaAs/*n*-GaAs)エピタキシャル層構造から発生する THz 電磁波がこれまで最も高強度とされてきた InAs 結晶からの THz 電磁波の強度を凌ぐという結果を得た。

*: 現所属先: 兵庫県立大学大学院物質理学研究科

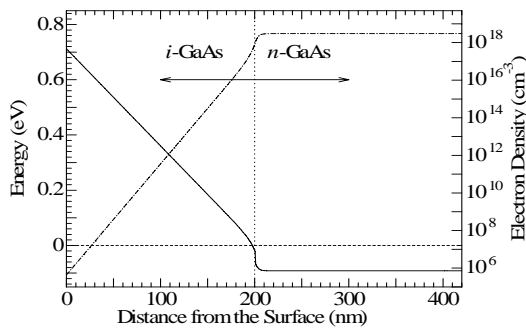


図 1: 表面からの距離の関数としてプロットした *i*-GaAs/*n*-GaAs エピタキシャル構造におけるポテンシャル構造(実線)と電子密度(一点鎖線)。破線は、フェルミ準位を示す。

2. *i*-GaAs/*n*-GaAs 構造におけるポテンシャル構造とキャリア密度分布

本研究で用いた試料は、有機金属気相成長法によって 2° オフ(001)面方位半絶縁性 GaAs 基板の上にエピタキシャル堆積した *i*-GaAs(200 nm)/*n*-GaAs($3 \mu\text{m}$, $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)構造である。ここで括弧内の数値は、各層の層厚およびドーピング濃度である。この構造の特徴を明確にするために、Boltzmann-Poisson モデルに基づいた数値計算を用いて、ポテンシャル構造及び電子濃度分布を解析した。その結果を、図 1 に示す。なお本研究で用いたパラメータは、文献[4]で用いた値と同一である。図 1 の実線は、表面からの距離の関数としてプロットした伝導帯ポテンシャルエネルギーである。なおエネルギー軸の原点は、フェルミレベル(破線)である。伝導帯エネルギーは、*i*-GaAs 層で有限の傾きを有しており、*i*-GaAs 層に 35 kV/cm の均一な内部電場を形成している。この程度の高電場は、ドリフト運動によるサージ電流を発生させるのに有効である。図 1 の一点鎖線は、表面からの距離の関数としてプロットした電子密度である。この電子密度分布が示すように、ポテンシャル構造に対応して、*i*-GaAs 層は、完全に空乏

化している。このことは、THz 電磁波の自由電子吸収を抑止するのに有効である。加えて、*i*-GaAs 層内で、光生成キャリアのバックグラウンドキャリア散乱が無視できる。 10^{18} cm^{-3} オーダーで均一にドーピングされた GaAs の空乏層厚が 30 nm 程度であることを考慮すると、数値計算結果は、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造が THz エミッタとして適していることを示唆している。なお計算によって得られたポテンシャル構造の妥当性は、光変調反射分光法により、既に確認されている[4]。

3. 実験方法

試料からの THz 電磁波の時間領域信号は、パルス幅 70 fs のレーザーパルス光を用いて、室温下で測定された。試料から放射された THz 電磁波ビームは、光ゲート法を用いて低温成長 GaAs エピ層上に形成されたギャップ幅 $5.0 \mu\text{m}$ のボウタイ・アンテナによって検出された。ゲート光の強度は、 4.0 mW であった。参照試料として、(001)面方位 *n*-GaAs ($\approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 結晶と(001)面方位 *i*-InAs 結晶を用い、それらからの THz 電磁波も測定した。

4. 実験結果と考察

図 2 は、ポンプ光エネルギー $1.531, 1.589$ および 1.621 eV における *i*-GaAs/*n*-GaAs 構造(実線)、*n*-GaAs 結晶(点線)と *i*-InAs 結晶(破線)からの時間遅延に対する THz 電磁波波形を示している。全ての試料で、時間遅延 0 ps において振動パターン、いわゆる第一バーストが観測されている。図 2 が示すように、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造の第一バースト振幅は、*n*-GaAs 結晶のそれより一桁程度強い。すなわち *i*-GaAs 層の存在は、確かに THz

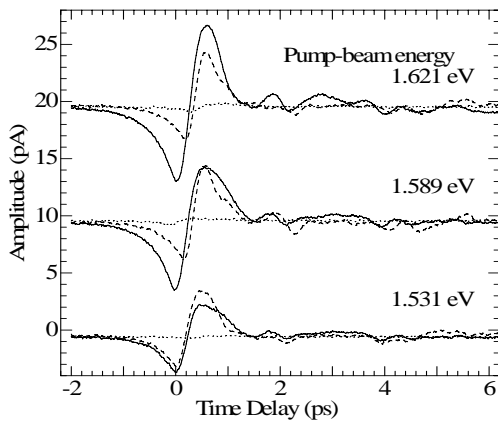


図2: 時間遅延の関数としてプロットしたTHz電磁波波形(室温)。実線、点線および破線は、それぞれ*i*-GaAs/*n*-GaAs構造、*n*-GaAs結晶および*i*-InAs結晶からの時間領域信号を示す。ポンプ光強度は、20 mW一定であるが、ポンプ光光子エネルギーは、1.531, 1.589 および 1.621 eVである。

電磁波強度を増強している。よってエピタキシャル構造は、THz電磁波強度の増強に対して重要な役割を担うと結論される。

次に、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造および*i*-InAs結晶の第一バースト振幅を比較しながらTHz電磁波のポンプ光エネルギー依存性について議論する。ポンプ光エネルギーを高くすることは、試料の吸収係数を増強することに対応しており、THz電磁波が発生する表面領域での光生成キャリアを増加させる。光子エネルギー1.531, 1.589と1.621 eVにおけるGaAs (InAs)の吸収係数は、それぞれ 1.41×10^{-3} (6.95×10^{-3}), 1.77×10^{-3} (7.69×10^{-3}) および 1.96×10^{-3} (8.09×10^{-3}) nm^{-1} である[5]。従って、ポンプ光エネルギーを1.536から1.621 eVに増加させることにより吸収係数は、1.45(1.19)倍に増強される。InAsの吸収係数が光子エネルギーに対して相対的に敏感でないが、これはInAsの基礎光学遷移エネルギー(0.354 eV[5])がGaAsのそれ(1.424 eV[5])に比べて十分低く、実験での光子エネルギー領域より離れているためである。吸収係数がTHz電磁波強度に

与える効果は、図2に明確に出現している。1.531 eVでは、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造の第一バースト振幅は、InAs結晶のものより若干弱い。一方1.589および1.621 eVでは、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造の第一バースト振幅は、InAs結晶のものより明らかに大きい。すなわち、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造の第一バースト振幅は、光生成キャリアの増加によって増幅されている。GaAs結晶からのTHz電磁波強度がInAs結晶のものより一桁程度低いとされてきた従来の報告[3]と今回の実験結果を考慮すれば、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造は、THz電磁波強度を増強する一つの解であると結論できる。

光子エネルギーの増加により第一バースト振幅が増強されることは、3次の非線形光学過程がTHz電磁波放射にほとんど寄与しないことを示している。3次の非線形光学効果は、基礎光学遷移エネルギーの近傍での放射過程では支配的である[6-8]。従って、ポンプ光エネルギーが基礎光学遷移エネルギー(GaAsの場合、1.424 eV)から離れるに従い、3次の非線形光学過程によって生成されるTHz電磁波強度は、減少するはずである。上記シナリオとは対照的に、図2は、第一バースト振幅がGaAsの基礎光学遷移エネルギーから高エネルギー側に離れるに従い徐々に増大することを示している。すなわち実験結果は、3次の非線形光学過程に基づいたシナリオとは矛盾する。よって3次の非線形光学過程は、今回のTHz電磁波生成機構から除外される。

我々は、*i*-GaAs/*n*-GaAs構造からのTHz電磁波のポンプ光強度依存性についても調べた。図3は、ポンプ光エネルギー1.621 eVという条件下での様々なポンプ光強度におけるTHz電磁波波形を示している。振幅の

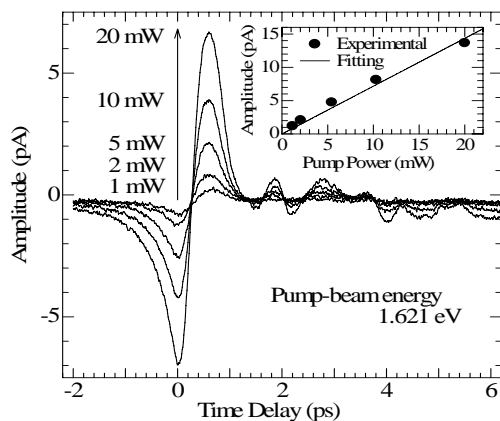


図 3: 遅延時間の関数としてプロットした様々なポンプ光強度における *i*-GaAs/*n*-GaAs 構造からの THz 電磁波波形。ポンプ光エネルギーは、1.621 eV。挿入図は、第一バースト振幅をポンプ光強度の関数としてプロットした図である。黒丸と実線は、それぞれ実験結果およびそれに対するフィッティング結果を示す。

大きさを除いて、全ての波形が同じ形状である。波形形状が *i*-GaAs 層を流れるサージ電流の応答であることを考慮すると、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造における光生成キャリアのサージ電流の流れ方は、ポンプ光強度に依存しないことを示している。

図 3 内の挿入図は、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造の第一バースト振幅をポンプ光強度の関数としてプロットしたものである。第一バースト振幅は、ポンプ光強度に対してほぼ直線性を示す。このことは、今回の最大ポンプ光強度 20 mW という条件が飽和レベル以下であることを示唆している。よって、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造は、高強度励起光源を用いることにより、より強い THz 電磁波を発生させる能力がある。

5. まとめ

THz 電磁波の増強をエピタキシャル層構造設計によって実現できないかという観点から、*i*-GaAs(200 nm)/*n*-GaAs(3 μ m, 3×10^{18} cm⁻³)構造から放射される THz 電磁波についての調査を行った。Boltzmann-Poisson モデ

ルに基づいた数値計算結果は、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造が THz エミッタとして適することを示した。THz 電磁波発生の実験結果から、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造の第一バースト振幅が *n*-GaAs 結晶のものに比べて、一桁程度増大することが判明した。加えて、ポンプ光エネルギー 1.589 および 1.631 eV では、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造の THz 電磁波が *i*-InAs 結晶からの THz 電磁波より明確に強い値を示すことが明らかとなった。以上から我々は、エピタキシャル層構造設計が THz 電磁波の増強に対して重要な戦略になると結論した。第一バースト振幅のポンプ光エネルギー依存性から、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造における THz 電磁波発生機構は、*i*-GaAs 層を流れる光生成キャリアのサージ電流に帰結した。

[参考文献]

- [1] For a review, P. Gu and M. Tani, Terahertz Optoelectronics ed. by K. Sakai (Springer-Verlag, Berlin 2005), pp.63-97.
- [2] X.-C. Zhang and D. H. Auston, J. Appl. Phys. **71**, 326 (1992).
- [3] N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, and Z. Liu, J. Appl. Phys. **84**, 654 (1998).
- [4] H. Takeuchi, Y. Kamo, Y. Yamamoto, T. Oku, M. Totsuka, and M. Nakayama, J. Appl. Phys. **97**, 063708 (2005).
- [5] O. Madelung (Ed.), Semiconductors -Basic Data (Springer, Berlin 1996).
- [6] B. B. Hu, X.-C. Zhang, and D. H. Auston, Phys. Rev. Lett. **67**, 2709 (1991).
- [7] E. Yablonovitch, J. P. Heritage, D. E. Aspnes and Y. Yafet, Phys. Rev. Lett. **63**, 976 (1989).
- [8] Y. Yafet and Yablonovitch, Phys. Rev. B **43**, 12480 (1989).