

GaSb/InAs ヘテロ構造からのテラヘルツ放射強度の評価

佐々 誠彦

大阪工業大学 工学部 ナノ材料マイクロデバイス研究センター

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 電磁波領域は 1 THz 前後の周波数帯に当り、高効率・高感度の受発光素子の開発が要求される未開拓な電磁波領域である。我々は、励起波長 800 nm のフェムト秒パルスレーザーにより InAs 薄膜を励起することで、高価なバルク基板に代わる、より高強度な THz 放射素子が得られることを見いだした[1]。放射強度の増強機構が、薄膜構造による多重反射であることを明らかにし、反射層をもつ構造でさらなる高強度化が可能なことを示した。最近では、GaSb とのヘテロ接合を用いて、高エネルギー電子を InAs 中に注入することで、放射強度自身の増強が可能であることを見出した[2]。それまでの取り組みは励起波長 800 nm の光源に対する放射特性を対象にしてきたが、その波長に使用する光源のチタン・サファイアレーザーは大型かつ高価であり、これを 1.56 μm 帯のファイバーレーザーに置き換えることで、よりコンパクトで安価な THz 時間領域分光システムの構築が可能となる。そこで、励起波長を 1.56 μm に変えて THz 放射特性の評価を開始した。この波長で InAs を励起すると電子が得る過剰エネルギーは高々 0.4 eV 程度となり、より高い電子移動度を有する InSb (同励起波長での過剰エネルギーは約 0.5 eV) からの放射強度が InAs を上回ることが知られている[3-5]。これらの結果は、上述のように励起キャリアの初速度 (初期エネルギー) と半導体のバンド構造が、その後の拡散過程に重要な役割を果たしていることを示している。そこで、1.55 μm 付近の長波長の光を励起光として使用した場合にも、大きな初速度が得られるよう、ヘテロ接合の利用が有効であると期待し、GaSb/InAs ヘテロ接合を使って放射強度特性を評価した。

しかし、初期的な結果では 800 nm 励起で得られたような薄膜での放射増強を得ることはできなかった。そこで、今年度は再度 800 nm と 1.56 μm 励起での特性の違いを検討することとした。

2. 励起エネルギーと放射特性の関係

図 1 は GaSb/InAs ヘテロ構造のテラヘルツ放射特

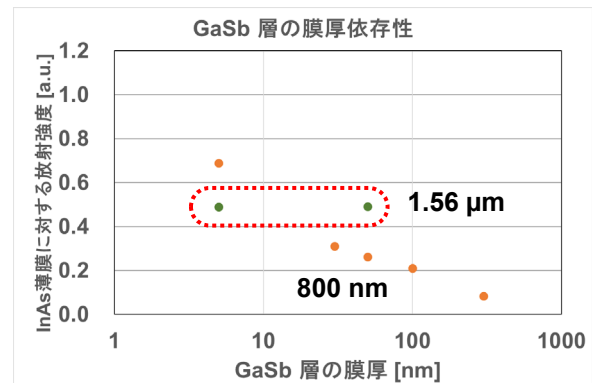


図 1 励起波長 800 nm および 1.56 μm で励起した GaSb/InAs ヘテロ構造の放射強度の GaSb 層厚依存性。

性を励起波長を変えて測定した結果である。800 nm の波長で励起した場合には、GaSb 層厚さに対して単調に減少するという明確な依存性が見られるのに対し、1.56 μm の波長で励起した場合には、放射強度は GaSb の厚さを変化させてもほとんど変化していないことがわかる。また、これらの試料の放射強度は InAs 基板の試料に比べても、放射強度は弱く、薄膜による増強効果も見られていない[6]。

この結果から励起波長の違いにより生ずる違いとして、光励起層での光吸収に着目したところ、1.56 μm での GaSb 層の吸収係数は、800 nm に比べて大きく減少することが判明した[7, 8]。吸収係数は吸収しようとする光の波長に対して、バンドギャップが小さい方が大きな値となる。そこで、励起層の物質のバンドギャップを GaSb より小さくし、そこでの光吸収の増大効果を検討するため、それに対応する構造を作製した。

3. 実験内容

GaSb/InAs ヘテロ構造層で光吸収層の GaSb 層にバンドギャップの小さな InSb を加え、InGaSb 層 (In 組成約 0.2) として、光吸収の増大を図り、THz 放射特性を THz 時間領域分光法により測定した。

測定には、斗内研究室の THz 時間領域分光評価システムを使用した。励起レーザーはファイバーレーザーで励起波長 1.56 μm 、ビーム径約 10 μm 、励起強度は

約 80 mW である。受光素子には、スパイラル型アンテナをもつ LT-GaAs 光伝導スイッチを用いた。

InGaSb 層の導入により、発光強度が増加した試料も見られたが、素子構造との対応に、統一的な説明を行うことができない段階であり、さらなる評価を行う予定である。

放射（電界）強度の基準として InAs 薄膜のみの試料も作製しているが、その時間波形を図 2 に示す。時間約 23 ps に現れる第 1 のピークは、レーザーパルス励起により誘起された拡散電流による通常のテラヘルツ放射と見られる。図 3 には放射波が試料内をどのように進行するかを示している。第 1 のピークは図中①の過程に相当する。ところが、38 ps 以降に第 2 のピークが観測されている。この 2 つのピークの間隔（約 15 ps）から、第 2 のピークは、第 1 の放射で検出器とは反対の基板側に向かったものが、基板裏面で反射され、それが再び InAs 薄膜を透過して表面から放射されたものと考えられる（図 3②）。

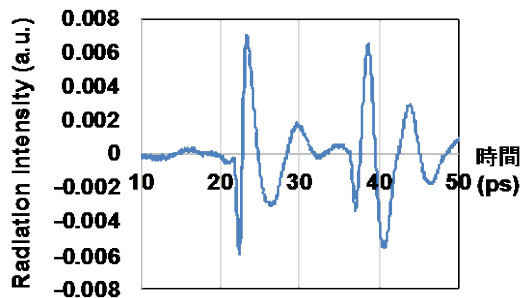


図 2 InAs 薄膜の放射（電界）強度時間波形。

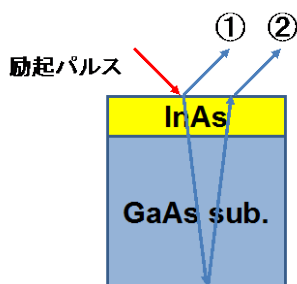


図 3 放射パルスの基板内での伝播経路。

4. 考察

図 2 に見られるように、第 1 ピークと第 2 ピークの強度は同程度である。この第 2 ピークは、図 3 に示す第 1 ピークに寄与する放射のうち、GaAs 基板側（図で下向き）に放射されたテラヘルツ波が InAs/GaAs 界面で反射されることなく、GaAs 基板に入射・透過して、GaAs 基板の底面で反射され、再び GaAs/InAs 界面を通過し、InAs を透過した後、表面から放射されたもの（図 3②）である。2 つのピークの強度が同程度であることは、下部へ放射されたテラヘルツ波が、従来は、InAs 薄膜と GaAs 基板の界

面で反射され、薄膜内での多重反射により、放射強度の増大に寄与していたものが、界面でほとんど反射を受けることなく、透過したため、この増強過程が働いていないことを示している。

現時点では、InAs/GaAs 界面で反射が低下した理由は明確ではないが、界面に高濃度 n-InAs 層を形成し、プラズマ反射層を形成するなど、界面での反射が増強される構造を作ることによって、放射強度を高めることができると考えられる。

まとめ

GaSb/InAs ヘテロ接合を使って、励起波長の違いによる放射特性の違いを 800 nm と 1.56 μm で評価した。励起波長が 1.56 μm の場合に、800 nm のときに強度増強に有効であった多重反射が見られない原因が、(InAs/GaAs 界面での反射の低下によること)が明らかになった。この結果は、界面での反射を増強する構造を作製することで、1.56 μm 励起でも高い放射が得られることを示唆している。

参考文献

- [1] S. Sasa, S. Umino, Y. Ishibashi, T. Maemoto, M. Inoue, K. Takeya, M. Tonouchi, "Intense Terahertz Radiation from InAs Thin Films", *J. Infrared Milli Terahz Waves* **32**, 646 (2011).
- [2] S. Sasa, M. Tatsumi, Y. Kinoshita, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi, "Enhanced Terahertz Radiation from GaSb/InAs Heterostructures", *Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, (IRMMW-THz)*
- [3] M. Suzuki, M. Tonouchi, K. Fujii, H. Ohtake, and T. Hirosumi, "Excitation wavelength dependence of terahertz emission from semiconductor surface", *Appl. Phys. Lett.* **89**, 091111 (2006).
- [4] P. Gu, M. Tani, S. Kono, K. Sakai, and X.-C. Zhang, "Study of terahertz radiation from InAs and InSb", *J. Appl. Phys.* **91**, 5533 (2002).
- [5] R. Adomavičius, G. Molis, A. Krotkus, and V. Sirutkaitis, "Spectral dependencies of terahertz emission from InAs and InSb", *Appl. Phys. Lett.* **87**, 261101 (2005).
- [6] S. Sasa, R. Ohashi, D. Shimada, M. Koyama, T. Maemoto, I. Kawayama, and M. Tonouchi, "Terahertz Radiation Characteristics of GaSb/InAs Heterostructures", *Int. Conf. on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Nara, Japan* (2019).
- [7] D. E. Aspnes and A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV", *Phys. Rev. B* **27**, 985 (1983).
- [8] M. Muñoz, K. Wei, and Fred H. Pollak, "Spectral ellipsometry of GaSb: Experiment and modeling", *Phys. Rev. B* **60**, 8105 (1999).