

講義

時間領域テラヘルツ放射分光による伝導率スペクトルの決定法

東京大学生産技術研究所 平川一彦

1. はじめに

伝導率の測定は、半導体などの電子材料の評価のうちで最も基本となるものである。近年の時間領域テラヘルツ (THz) 分光法の進歩により、THz 電磁波の透過を測ることにより、ミリ波領域から THz 領域まで半導体ウェーハなどの伝導率スペクトルの決定ができるようになった。しかし、このような透過測定がいつも可能であるとは限らない。

一般に半導体には非常に高い電界 (数 kV/cm ~ 数百 kV/cm) が印加され、その状態で現れる様々な効果 (たとえば Gunn 効果など) を利用してデバイスが作製される。従って、高い電界を印加した状態における伝導率スペクトルの情報が非常に重要となる。

しかし、もし通常の THz 透過測定を高い電界を印加した半導体に適用すると、どうなるであろうか? 容易に2つの問題があることに気づく;

(1) 透過測定には半導体にドーピングして、電子がいる状態しておかなければならないが、THz 透過測定に必要な mm オーダーの試料に高い電圧を印加すると、非常に大きな電流が流れ、安定した測定が極めて困難になる。

(2) 多くの半導体がそうであるように、半導体が微分負性抵抗を示すと、高電界ドメインと呼ばれる内部電界が不均一な領域が発生し、均一な電界が印加されたときは全く異なる伝導率を示すようになる。

これらの問題のため、通常の THz 透過測定は高い電界が印加されている半導体に適用するのは困難である。

2. 系の応答関数

この問題を解決するためには、時間分解 THz 放射分光法が極めて有効である。ご存じのように、ある物理量のスペクトルを測定したいとすると、周波数の関数としてその物理量の変化を測定するのが一般的である。しかし、線形応答を示す系の場合に、線形応答理論によれば、系にインパルス関数 (またはステップ関数) を入力した場合の系の出力を見ることでも、同じ情報を得ることができる。

そこで、フェムト秒レーザーパルスにより半導体中にキャリアを励起する通常的时间領域 THz 分光測定がどのようなものか、ポンチ絵で見てみよう。図1は、時間領域 THz 分光法の概念を時間を追って説明したものである。通常の測定では、電界を印加した半導体にフェムト秒光パルスを照射し、キャリアを生成する。この光励起キャリアはすかさず加速され、その加速度に比例した THz 電磁波を放射する。

ここで試行的に、電界のない状態で、光パルスを照射し、その直後にステップ的な電界を印加するような思考実験を行ってみよう。そうすると、同様にキャリアは加速され、THz 電磁波が放射される。このとき、本当の実験の場合 (図1(上)) も仮想実験の場合 (図1(下)) も、最終的な THz 放射の状態は第一近似としては同じと見なせる。このことは、時間領域 THz 放射実験が、系のステップ応答を測定していることに他ならず、放射される THz 電磁波は系のステップ応答として期待されるものと同じであることを示している[1]。

これを極簡単に定式化する。まず系にステップ関数的な電界を印加するために、電界を

$$F(t) = F\theta(t) \quad (1)$$

と表す。ここでラプラス変換を導入すると、印加電界は

$$\tilde{F}(s) = \frac{F}{s} \quad (2)$$

と表される。この電界により系に流れる電流は、

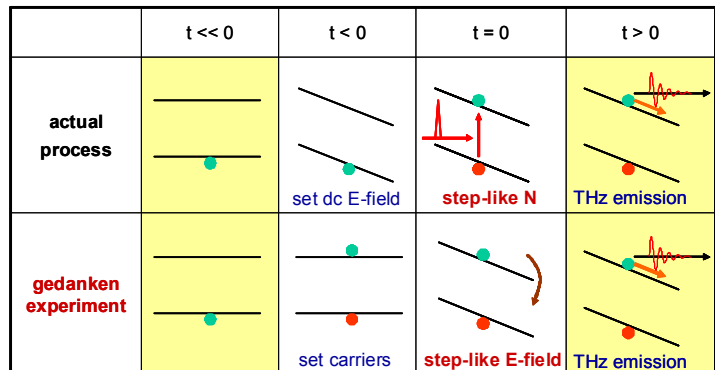


図1 時間領域 THz 放射測定 の概念図

(上) 通常行われる実験の過程を示したもの

(下) 電界の印加とパルス照射の順序を逆にした下層実験の概念図

$$\tilde{J}(s) = \tilde{\sigma}(s)\tilde{F}(s) \quad (3)$$

で与えられる。 \cdot は系の伝導率である。一般に、THz 放射は流れる電流の時間微分で与えられるので、

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} s e^{ts} \tilde{\sigma}(s) \frac{F}{s} ds = \sigma(t)F \quad (4)$$

を得る[2]。

このことは、放射される THz スペクトルが系の時間領域の伝導率に比例しており、THz 放射の波形のフーリエ変換を行い、それをバイアス電界 F で割ったものが、求めたい伝導率スペクトル $\cdot(\cdot)$ になることを意味している。時間領域 THz 分光の特徴では、放射 THz 電磁波を位相まで含めて測定できるので、フーリエスペクトルの実部、虚部はそれぞれ伝導率スペクトルの実部、虚部を与える。

3. 半導体超格子中のブロッホ振動の場合

この手法を用いて半導体超格子中でブロッホ振動する電子の伝導率を決定してみよう。図2は、時間領域 THz 分光法で測定された半導体超格子中でブロッホ振動する電子が放射する THz 時間波形を示したものである。紙面の都合でブロッホ振動そのものについて説明することはできないが、印加電界が増加するに従って、短い周期で電子が振動的に伝導していることがわかる。

この波形に上記の手法を適用して解析したのが図3である。図3(a)は伝導率の実部スペクトルに対応し、図3(b)は伝導率の虚部である。通常のサブバンド間遷移と異なり、伝導率の実部が分散的なスペクトルを示し、虚部の方がローレンツ型のスペクトルを有していることがわかる。超格子内でブロッホ振動する電子の伝導率を測定しようとする試みは、1970年の江崎らの提案[3]以来、多くの研究者が試みて、失敗してきた。その多くが伝導率を周波数の関数で測定しようとしたものである。ところが、時間領域 THz 放射測定により THz 電磁波形を測定することにより、あっという間に伝導率スペクトルの実部・虚部が測れてしまうと言うところが、本測定法のユニークな点である。

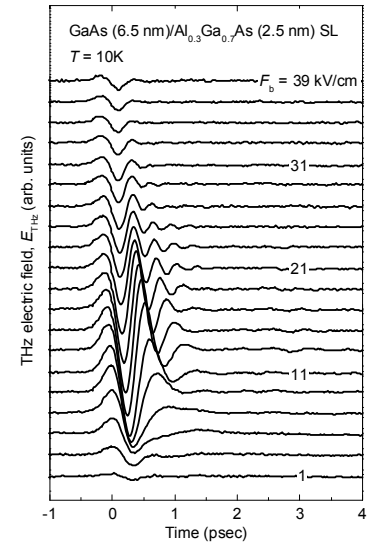


図2 時間領域 THz 分光法で測定された半導体超格子中でブロッホ振動する電子が放射する THz 時間波形

参考文献

- [1] Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao, Phys. Rev. Lett. **90**, 46806 (2003).
- [2] N. Sekine and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. **94**, 057408 (2005).
- [3] L. Esaki and R. Tsu, IBM J. Res. Dev. **14**, 61 (1970).

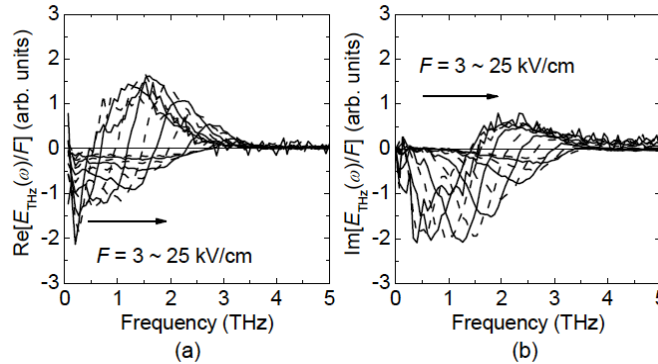


図3 図2の波形をフーリエ変換して求めたブロッホ振動電子の伝導率スペクトル。(a): 実部、(b): 虚部