

# 高強度テラヘルツ波照射下における半導体の電気伝導特性

物質系専攻 47-126039 橋本 未知也

指導教員：末元 徹（教授）

キーワード：高強度テラヘルツ波、超高速現象、衝突イオン化、非線形光学、半導体

## 1. 研究背景

近年、テラヘルツ波技術の進歩によって  $\text{LiNbO}_3$  結晶を用いた高強度テラヘルツ (THz) 波の発生が可能となり、ピーク電場  $1 \text{ MV/cm}$  と非常に強い THz 波パルスの発生が報告されている[1]。この高強度 THz 波を用いて THz 波領域での非線形現象や物性制御の研究の発展が期待されている。THz 波は、時間幅  $1 \text{ ps}$  程度のパルス波として発生するため、時間幅  $1 \text{ ps}$  の強力な電場パルスとして用いることができる。半導体に高強度 THz 波を照射すると電場によってキャリアが急激に増加する衝突イオン化という現象が起こることが知られている。この現象は、図 1 に示すように強力な THz 波の電場でキャリアが加速され、バンドギャップエネルギーより大きなエネルギーを持つに至ると、加速された電子が価電子帯の電子を励起して電子・ホールペアを生成し、自らのエネルギーを失って低エネルギー状態に遷移し、キャリアの数が増加することによって起こる。この過程では 1 回の衝突イオン化で電子数が 2 倍になるため複数回起こることで指数関数的に電子が増加する。実際に THz 電場による衝突イオン化によって増加したキャリアの再結合発光を観測したという報告がある[2]。キャリア数が衝突イオン化によって大きく変化するため、半導体の伝導特性も大きく変化すると考えられ、この変化はマクロな電流の変化として観測できることが期待される。

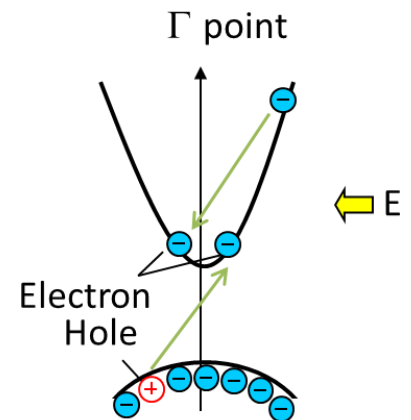


図 1: GaAs での衝突イオン化

本研究の目的は、衝突イオン化によるキャリア増加を電氣的に検出し、高強度 THz 波によるキャリアダイナミクスを明らかにすることである。

## 2. 高強度 THz 光源の構築

まず初めに、実験に必要な高強度 THz 波発生系を構築した。高強度 THz 波発生系に用いた励起光源は、再生増幅された Ti:ファイアレーザー（パワー  $4 \text{ mJ}$ 、パルス時間幅  $100 \text{ fs}$ 、中心波長  $800 \text{ nm}$ 、繰り返し周波数  $1 \text{ kHz}$ ）である。フェムト秒光パルスは広いスペクトル幅を持つため、非線形光学結晶に入射すると、2 次の非線形光学効果である差周波発生によって THz 波が発生す

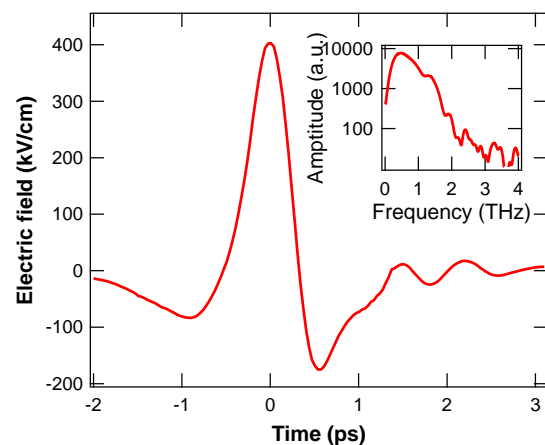


図 2: THz 波の時間波形とスペクトル

る。LiNbO<sub>3</sub>結晶は、大きい2次の非線形感受率と高い損傷閾値を持つため高強度THz発生に適しているが、同軸上では位相整合条件を満たさない。そのため、THz波は、チェレンコフ放射のようにコーン状に広がる。この問題は、回折格子でパルス面を傾斜させるパルス面傾斜法ことによって解消される[3]。本研究では、このパルス面傾斜法を用いて高強度THz波を発生させた。

発生したTHz波の時間波形・電場強度は、EOサンプリング法を用いて検出した。時間波形を図2に、スペクトルを図中に示す。発生したTHz波のピーク電場は、400 kV/cmである。100 kV/cm程度から起きる衝突イオン化などの非線形現象を見るためには十分な強度である。

### 3. 半導体試料

本研究では、試料としてGeを用いた。Geは、SiやGaAsと比べ、バンドギャップが0.66 eVと比較的小さいため、真性半導体でも室温で熱励起されたキャリアがある程度存在する。そのため電極を作成するとき、オーミックコンタクトが作りやすく、また電流がある程度流れるため、テラヘルツ波を照射した時の変化を測定しやすい。そのため、Geは本実験に適した材料である。サンプルは5×5×0.5 mmのGe基板にIn電極を4つオーミックに接合した構造である。4つ電極は、図2.2のように四角形に配置した。また、電極はIn半田を付けた後に600度でアニールすることでオーミックコンタクトにした。

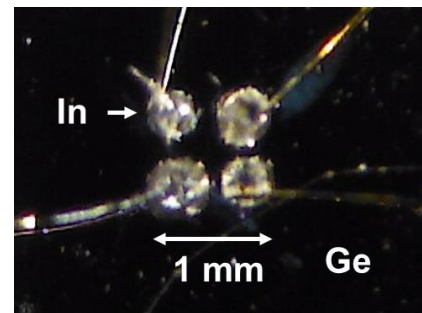


図3: Geサンプルの実体顕微鏡写真

### 4. 実験結果と考察

図4の図中に実験配置を示す。4つの電極のうち対角線上の電極2・4を用いた。2つの電極間に直流電源を接続し、電圧を印加した。電極間に交調をかけたテラヘルツ波を照射し、抵抗変化を電流変化としてロックイン検出した。照射したTHz波は、ピーク電場314 kV/cm、偏光は図中のE<sub>THz</sub>で示した方向である。

その結果、THz波照射による電流の増加を検出した。図4にTHz波照射時の電流変化の印加電圧依存性を示す。0 Vから3 Vまでは、印加電圧が増加するに連れて電流変化の大きさも大きくなっている。これは、衝突イオン化によるキャリア増加の抵抗率低下を観測していると考えられる。3 V以上では増加せずむしろ小さくなっている。THz照射によって生じたキャリアは、印加電圧によって決まるドリフト速度で電極に移動し、緩和する。3 V以上で増加しないのは、抵抗率の変化している時間が短くなっているからだと考えられる。

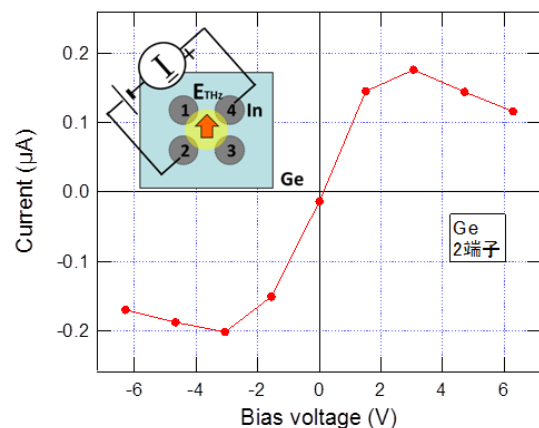


図4: THz波照射時の電流変化の印加電圧依存性と実験配置

次に、THz 電場強度依存性を調べた。その結果を図 5 に示す。THz 電場が 100 kV/cm を超えると、急激に電流変化が増加している。衝突イオン化では、THz 電場に対し電子が指数関数的に増加する[2]。この強度依存性も指数関数的に増加しており、衝突イオン化によるキャリア増加を見ていると考えられる。また、電極間には常に数 mA 程度の電流が流れていて、 $0.1 \mu\text{A}$  の変化は元の電流の 0.01 % である。キャリアが指数関数的に増加しているにもかかわらず、電流の変化量が小さいのは、キャリアの緩和時間が短く、1 ms 後の次の THz パルスが来る前に大部分のキャリアが緩和しているからだと考えられる。

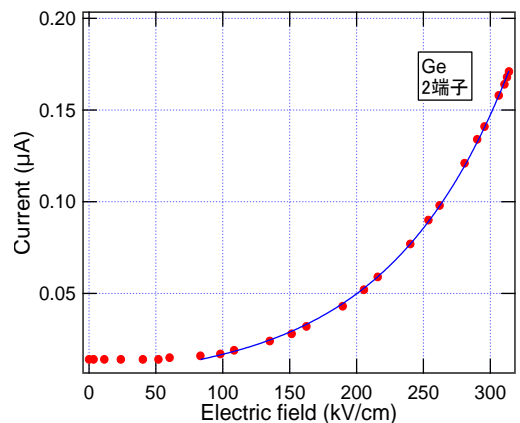


図 5: THz 波照射時の電流変化の THz 波強度依存性

次に、照射 THz 波の偏光依存性について測定した。その結果、図 6 に示すように、周期 180 度、位相 30 度の偏光依存性を示した。この偏光依存性は、測定に用いる電極を電極 1-3 にしても位相が変わらなかった。このことからサンプルの構造に由来する偏光依存性だと考えられる。2 つの電極の距離は約  $600 \mu\text{m}$  と THz 波の波長  $300 \mu\text{m}$  に比べて同程度であり、電極による電場増強が起こることが期待される。この効果は電極間の距離の 3 乗に反比例し、また偏光依存性を持つ為、4 つの電極の距離が等間隔ではなかった場合、間隔の狭い電極対の方向に平行な THz 波を照射したときに電場増強が起こり、より多くのキャリアが生成されることが考えられるので 180 度周期の変化を理解することができる。

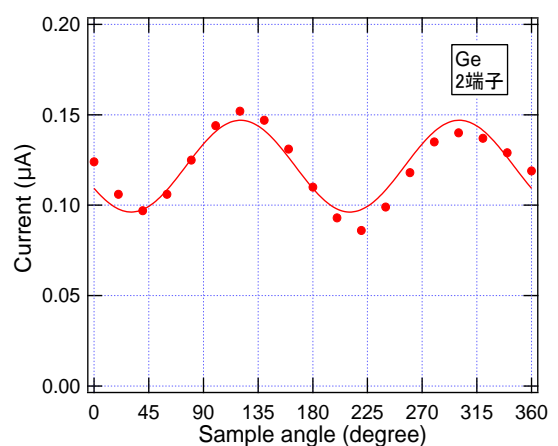


図 6: THz 波照射時の電流変化の THz 波偏光依存性

## 5. まとめ

高強度 THz 波によって半導体の伝導特性が変化することを電流で直接検出することに成功した。THz 波強度依存性から電流変化が衝突イオン化によるキャリア増加によるものだと考えられる。また、衝突イオン化によるキャリア増幅では現れない 180 度周期の偏光依存性も観測された。これはサンプルの構造に由来した電極による電場増強効果の寄与だと考えられる。

## 参考文献

- [1]H.Hirori *et al.*, Nature commun. **2**, 594(2011).
- [2]H.Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 091106(2011).
- [3]J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, Opt. Express **18**,12311 (2010).

## 学会発表

第 69 回日本物理学会「半導体における高強度テラヘルツ波によるキャリア増殖のマクロ電流による観測」 27aCK-9