

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | Dynamical Behavior of Photoexcited Carriers in InSb                                 |
| Author(s)    | Fujii, Ken-ichi   |
| Citation     | 大阪大学, 1985, 博士論文  |
| Version Type | VoR   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/27771">https://hdl.handle.net/11094/27771</a> |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

【21】

|         |  |        |         |         |
|---------|--|--------|---------|---------|
| 氏名・(本籍) | ふじ<br>藤  | い<br>井 | けん<br>研 | いち<br>一 |
| 学位の種類   | 理  | 学      | 博       | 士       |
| 学位記番号   | 第  | 6788   | 号       |         |
| 学位授与の日付 | 昭和60年3月25日   |        |         |         |
| 学位授与の要件 | 理学研究科 物理学専攻<br>学位規則第5条第1項該当  |        |         |         |
| 学位論文題目  | InSbにおける光励起キャリアーの動的振舞い   |        |         |         |
| 論文審査委員  | (主査)<br>教授 大塚 穎三<br>(副査)<br>教授 國富 信彦 教授 邑瀬 和生 助教授 鈴木 勝久<br>助教授 大山 忠司 |        |         |         |

### 論 文 内 容 の 要 旨

強磁場下のⅢ-V族化合物半導体InSb中に光励起により作られたキャリアーの動的な振舞いを遠赤外レーザーを用いたサイクロトロン共鳴吸収の実験により調べた。

我々はすでに、光励起によっても電子は“熱い”状態にあることをサイクロトロン発光の観測により確かめてある。この学位申請論文における研究の目的はInSb中の“熱い電子”の緩和過程を調べることにある。この光励起による“熱い電子”の動的な振舞いはボックスカー積分器を用いた時間分解法で詳細に調べることができた。

この研究の特徴の一つとして本来電子が少数キャリアーであるp型の試料を用いたことがあげられる。p型であるため極低温域では電子は電場励起といった手段を用いても観測されないが、光励起を行なうことで電子を作り、その吸収を観測できた。p型の試料におけるこのような電子はすべて非平衡キャリアーであり、極低温の熱平衡下でも電子が存在するn型より“熱い電子”の研究には都合が良い。

時間分解法により電子、正孔の吸収信号は光励起後数ms後まで観測できることがわかった。さらに、この吸収信号の時間変化は三段階に分けられることがわかった。順を追って述べると、最初に1)自由キャリアー同志の非常に早い減衰が強励起下で観測され、その時定数は1.5 μs程度であった。2)電子が伝導帯とドナー準位間で複雑にやりとりされる時間領域が数十μs程ある、その後、3)電子はすべてドナー準位に束縛され、ドナー・アクセプター再結合による数msの時定数を持つゆっくりした減衰を経て、熱平衡状態に戻る。

ここで二番目の中間領域では、電子は伝導帯中のエネルギー的に高いLandau準位にまで分布が広がっており、この分布から電子の有効温度を求めると~50Kまで上昇していることがわかった。この伝導

帯中の高い準位から基底準位に落ちる遷移の時定数は  $3.5 \mu\text{s}$  であることがわかり、これは伝導帯内遷移としては極めて遅い。この大きな時定数は、遷移に際して電子がスピン状態を反転することに起因しており、励起強度依存性、不純物濃度依存性の実験から、主にドナー不純物による散乱が原因であることがわかった。ここで散乱体としてのドナーはその状態が中性かイオン化しているかにはあまりよらないこともわかった。

さらに電子のスピン状態が伝導電子とアクセプターの正孔の再結合においても重要な影響を及ぼすこともわかった。

三番目のドナー・アクセプター再結合はドナー及びアクセプターの信号双方の時間変化を調べその変化が一致することを確めた。又この再結合に対して磁場効果が認められること、それがドナー電子とアクセプターの正孔の波動関数の重なり積分への磁場効果であることを示した。

### 論文の審査結果の要旨

InSbはⅢ-V族半導体の中でもっとも電子の有効質量が小さく、その易動度も高いので、簡単に“熱い電子系”をつくることができる。また、液体ヘリウム温度から液体チッ素温度にかけて、遠赤外レーザーによる電子のサイクロトロン共鳴が、比較的低い磁場で観測される。この2つの理由から、過去に於て、n型InSb中で、電場によって励起された“熱い電子系”をサイクロトロン共鳴という手段を通じて研究することが、小林一大塚(1974)、松田一大塚(1978)によって為されてきた。

今回藤井君は、InSbにband-gapの光を当て、この光によって励起された電子系が熱くなること、およびそのエネルギー緩和過程でスピン反転が重要意味を持つことを見出した。光で電子が熱くなるという話は、数年来、GaAsを主たる舞台上に活発な話題を呼んでいる。したがってInSb中で同じことが起っても不思議はない。ただ、サイクロトロン共鳴で熱い電子の緩和過程を見ているうち、その緩和時間が異常に長い(4.2 Kで数 $\mu\text{s}$ )ことに藤井君は注目した。そして、最初、軌道運動のエネルギーが緩和する過程を追っていると思っていたのが、実はスピン緩和を見ているのであることに気が付いた。このあとは、伝導電子が、主としてイオン化不純物と相互作用することにより、スピンを反転させる過程を、理論と実験の両面から追うことになる。

伝導電子のスピン・軌道相互作用により、純粋に電気的な散乱ポテンシャルでも電子のスピン反転をひき起し得るということは、R.J. Elliott (1954) によって指適されている。この効果をサイクロトロン共鳴でみるのに、InSbはまさに格好の舞台であった。この舞台がいままで見逃されてきた理由は、誰もがInSbにband-gap光を当ててサイクロトロン共鳴を見ようとしなかっただけのことである。n型試料だと、光など当てずとも電子のサイクロトロン共鳴を見ることができるので、必要がなかったのである。必要がなくても、好奇心が新しい物理を発展させるという具体例を藤井君は示したといえよう。Elliottの考え方を基調とした解析の結果は、実験結果を定性的に説明した。と同時に、電子-アクセプター再結合過程、ドナー-アクセプター再結合過程等に関しても、純粋に実験的立場から、藤井君は新しい

知見をもたらした。またInSbという物質は、イオン化不純物と中性化不純物とが、電子散乱を生ぜしむる主体として、きわめて区別し難いという特異な性質を持っていることも示した。このほか色々の新事実が見出されたが、藤井君の仕事の主たるセールス・ポイントは大別して次の3点に絞られよう。1. 伝導電子のスピンの緩和を、サイクロトロン共鳴を通して観測するという奇抜さ、2. 通常のスピンの共鳴法では測られていない低濃度不純物領域と高磁場域で明確なデータを求めたこと、3. Band-gap 光による励起という手段で、n型よりむしろp型のInSb試料中で、“少数キャリア”である伝導電子を大量に作り、そのエネルギー緩和過程を多チャンネル時間分解という暫新な方法で追跡したことの3点である。

研究のきっかけは単純であったにもかかわらず、InSbの研究者たち、さらにはIII-V族半導体全般の研究者たちにとって、眼のうろこが落ちたと言ってもよいほどの新しい、インパクトの大きい情報を、藤井君の一連の研究はもたらした。よって、理学博士の学位論文として、十分に価値あるものと認める。