



Title	ゲルマニウム中の電子-正孔液体に不純物がかかわる ダイナミクス
Author(s)	小川, 憲介
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/1130">https://hdl.handle.net/11094/1130</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

氏名・(本籍)	小川 憲介
学位の種類	理学博士
学位記番号	第 7616 号
学位授与の日付	昭和 62 年 3 月 26 日
学位授与の要件	理学研究科物理學専攻 学位規則第 5 条第 1 項該當
学位論文題目	ゲルマニウム中の電子-正孔液体に不純物がかかるダイナミクス
論文審査委員	(主査) 教授 大塚 順三 (副査) 教授 國富 信彦 教授 砂川 重信 教授 邑瀬 和生 助教授 大山 忠司

## 論文内容の要旨

半導体ゲルマニウム (Ge)を低温 ( $\sim 4.2\text{K}$ ) で光照射すると、高密度の電子-正孔対が生成される。高密度電子-正孔対は液滴様の縮退電子-正孔プラズマ (電子-正孔液滴) へと転移する。液滴中の電子、正孔 (キャリア) は非平衡状態にある。光照射を止めると、電子-正孔再結合のために液滴は減衰し消滅する。電子-正孔液滴はフェルミ流体として、金属電子系などで見られない性質を示すと期待される。本論文では半導体の電気的特性を左右する不純物原子が液滴にいかなる効果を与えるかを調べた。

実験では不均一な歪が加わった Ge 結晶を光照射した。この場合、キャリアは歪ポテンシャル中に閉じ込められる。その結果、電子-正孔液体は直径 1  $\mu\text{m}$ にも達する 1 つの巨大液滴に成長する。液滴が 1 つしかなく、液滴ごとの物理量のばらつきなどの不確定要素が取り除かれる。

不純物効果を調べる基礎固めとして、超高純度 Ge 中で巨大液滴の性質を調べた。超音波吸収法によりフェルミ流体固有の量子振動が巨大液滴に対して観測される。巨大液滴の熱膨脹、キャリア間散乱などが見出された。

比較的深い束縛準位をもつアクセプターである、II 族の Be あるいは Zn を含む試料に着目した。これら深い不純物は中性状態で電子-正孔対を 1 つおよび 2 つ、また正孔を束縛する。巨大液滴に対しても大きな影響を与えると予想される。

巨大液滴の再結合発光の寿命測定を行ない、再結合過程の不純物効果を調べた。深い不純物は非輻射再結合を促進し、寿命を著しく縮めることがわかった。Be 不純物の場合、再結合確率は温度上昇につれて増加する傾向を示す。これは不純原子の局所的変位をともなう多重フォノン放出過程が介在すると思われる。一方、浅い束縛準位をもつアクセプターである、III 族の In では再結合確率の増加は僅かである。

ミリ波吸収から巨大液滴中のキャリア散乱確率を求めた。深い不純物は浅い不純物に較べかなり大きな確率を与える、散乱中心としても大きな役割を果たす。Be不純物による散乱確率は温度が減少すると対数的に増加する。この振舞いは赤外発散や磁性合金の近藤効果などに現れるフェルミ面効果と類似する。Be原子のトンネル運動とキャリアとの相互作用が考えられ得る要因の1つである。

電子-正孔液滴中でなぜ深い不純物が非常に強い影響を与えるのか？これに対する定性的説明はMottの条件に基づいて述べられる。すなわち、深い不純物の軌道半径は液滴中のキャリアの遮蔽長よりもはるかに短かい。したがって不純物の束縛準位がほとんど遮蔽されない。この点に本質的な原因があるものと思われる。

### 論文の審査結果の要旨

半導体中に生じる電子・正孔液体に関する研究は、1970～1980年頃集中的に行われが、目下一段落の感がある。しかし、キャリヤーの再結合・散乱に関するダイナミクスは必ずしも解決済みとは言えない。とくに添加不純物が演ずる役割については、定性的な研究が少數報告されているのみである。

小川君はGe試料に不均一な歪みを導入することにより、電子・正孔液体を直径1mm程度の単一巨大液滴とし、その内部で起こるキャリヤー・ダイナミクスの研究を行なった。その結果、液体のサイズや数量の不明確さに起因するデータのバラツキを避けることができ、さらに巨大液滴でのみ可能なAlfven波共鳴の時間分解測定から有力な手がかりを得ることができた。添加した不純物は3種で、In, Be, Zn。いずれもアクセプターである。このうちInは深い準位を、BeとZnは比較的深い準位をもつ。不純物に起因するキャリヤー再結合過程は発光の時間分解測定により、またキャリヤー散乱過程は偏光ミリ波によるAlfven波共鳴で調べられた。その結果、深い準位をもつアクセプターBeとZnは、キャリヤーの再結合・散乱に著しい影響を及ぼすが、深い準位をもつアクセプターのInは、ほとんど影響を及ぼさないことがわかった。この差は、これまでに報告されている結果を根本的に覆すものである。アクセプターの種類によるこの差は、各アクセプターが中性時にもつ正孔外周軌道の半径と、電子・正孔流体による遮へい距離の大小関係によると小川君は推論する。

不純物効果を論じるための準備として、小川君は、超高純度Ge中の巨大液滴についても基本的な精密測定を行なった。ここでは超音波磁気吸収の量子振動が観測され、キャリヤー・キャリヤー散乱が主たる散乱機構であることを確認した。また電子・正孔密度は、温度の上昇とともに、液体の膨脹を反映して減少し、磁場の増加とともに大きくなる。

さらに、巨大液滴が生成されるに際して、多数の通常液滴、エクシトンが集まつてくる途中の輸送過程を、空間分解法で追跡し、不純物が巨大液滴の生成を妨げる効果を定性的に説明した。

以上得られた結果は、いずれも斬新なものである。とくに舞台が、“物質・反物質”の系から成るフェルミ流体であるところから、小川君の達成した研究内容は、単に半導体物理学の問題たるに止まらず、ひろく物理学全般の興味を惹くに足るものであると考えられる。ゆえに理学博士の学位を受けるに充分

な価値を備えたものと認める。