



| | |
|--------------|---|
| Title | ゲルマニウム中の強く束縛された励起子 |
| Author(s) | 中田, 博保 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 1984, 48, p. 10-12 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/11616 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

ゲルマニウム中の強く束縛された励起子

教養部 中田博保（豊中 5242）

半導体中では低温で様々な不純物に関係した複合体が形成される。束縛励起子はその一例である。¹⁾ 束縛励起子は中性の不純物に励起子 — すなわち電子と正孔がお互いに結合しあったもの — が束縛されたものである。中性のもの同志が束縛し合うのでその束縛エネルギーは小さく、シリコンやゲルマニウム中の浅い不純物に対しては、不純物のイオン化エネルギーの約1/10というHaynes則が成立する。ゲルマニウム中では浅い不純物のイオン化エネルギーが10 meV程度なので、束縛励起子の束縛エネルギーは約1 meVと非常に小さな値である。そのためヘリウム温度付近の低温でないと存在しない。

束縛励起子はシリコン中で1960年に初めて観測され、その後ゲルマニウムでも測定された。1970年代になってから、シリコン中で中性の不純物に2つ以上の励起子の束縛された束縛多重励起子複合体が観測された。このスペクトルを説明するため、多電子原子と同様の殻模型が提唱され、実験結果を解釈することができるようになった。この殻模型というのは、不純物中心のまわりに電子と正孔がそれぞれの殻を作るというもので、例えばドナーの場合、最初の電子の殻に2つの電子・最初の正孔の殻に4つの正孔が入ることができる。

これまでの実験は浅い不純物に限られていたが、我々はゲルマニウムに亜鉛をドープしたサンプルについて束縛励起子の測定を行なった。^{2), 3)} ゲルマニウム中の亜鉛はダブルアクセプタで2個の正孔が中性の状態において束縛されている。その第一イオン化エネルギーは30 meVと浅い不純物の10 meVと比較すると3倍近く深くなっている。測定は2種類の方法、フォトルミネッセンスと遠赤外磁気光吸収で行なった。得られた結果は、まとめると次の通りである。

- ① 束縛励起子が両方の測定方法で観測できた。束縛エネルギーは5.7 meVとかなり大きく強く束縛されていることがわかった。
- ② 遠赤外吸収のスペクトルが、ドナーとよく似ているため、正孔3つが強く不純物に束縛され、それに電子が弱く束縛されているドナーモデルがよく適用できる。
- ③ フォトルミネッセンスの測定において励起子が2つ、不純物に束縛された、束縛多重励起子複合体が観測された。

以下、それぞれの実験についてよりくわしく述べてみる。

フォトルミネッセンスの実験は束縛励起子の測定に一般的に用いられている手法で、最近は結晶の評価をするため、企業でもよく使われている。実験は光学デュワーの中におかれたサンプルをアルゴンレーザーで励起し、束縛励起子を作り、それからの発光を分光器を通してからゲルマニウムのPIN赤外検出器で検出するというものである。

図1にこのようにして得られたスペクトルが示してある。FE^{LA}と書いたのは自由励起子のLAフォノン線で不純物の入っていないゲルマニウムでも観測されるものである。それ以外の発光線はすべて亞

鉛に関係したもので対になって出ている。O、TA、LAと書いたのはそれぞれゼロフォノン、TAフォノン、LAフォノンが関与した線である。この図では、励起光強度、すなわちアルゴンレーザーの出力を変化させてデータをとっている。すると α と書いた線は励起光強度依存性が強く、 γ と書いた線は余り強くないことがわかる。この実験から、 γ を束縛励起子、 α を束縛多重励起子複合体と同定した。他の測定、不純物濃度依存性、温度依存性などもこの同定が正しいことを裏付けている。

FE^{LA} と α^{LA} 及び γ^{LA} のエネルギーの差が束縛多重励起子複合体と束縛励起子の束縛エネルギーを与えるが、それぞれ、3.2と5.7 meVであった。浅い不純物に対する Haynes 則より束縛励起子の束縛エネルギーは不純物のイオン化エネルギーの約1/10である。亜鉛不純物の第一イオン化エネルギーは約30 meVなので、浅い不純物であれば3 meVとなるところであるが、実験では、5.7 meVとかなり深くなってしまっており、励起子が強く束縛されている。それに対して、2つ目の励起子の束縛エネルギーは3.2 meVと5.7 meVに比較して小さく、比較的弱く束縛されている。

束縛多重励起子複合体の発光線 α の強度が束縛励起子の発光線 γ の強度に比較して同等もしくはそれ以上である。これはゲルマニウムにおいては非常に珍しい。大体、束縛多重励起子複合体の発光強度は、束縛励起子に比べて極端に弱いのが普通である。これは前に述べた殻模型によって説明できると思われる。

ゲルマニウム中の亜鉛について、中性不純物・束縛励起子、束縛多重励起子複合体を殻模型にもとづいて図2に示してある。中性の不純物状態では、ダブルアクセプターなので2個の正孔が正孔の殻に入っている。束縛励起子では、さらに電子と正孔が1つずつ束縛されるから、正孔が3つの正孔の殻に入り、電子が1つ電子の殻に入る。束縛多重励起子複合体の場合には、正孔が4つ正孔の殻に入り、電子が2つ電子の殻に入る。この場合正孔の殻は4つで閉殻となり、多重子原子の不活性ガスのように、安定な構造をとるものと考えられる。この正孔殻が閉じることが、強い発光線を生み出す原因となっていると考えられる。

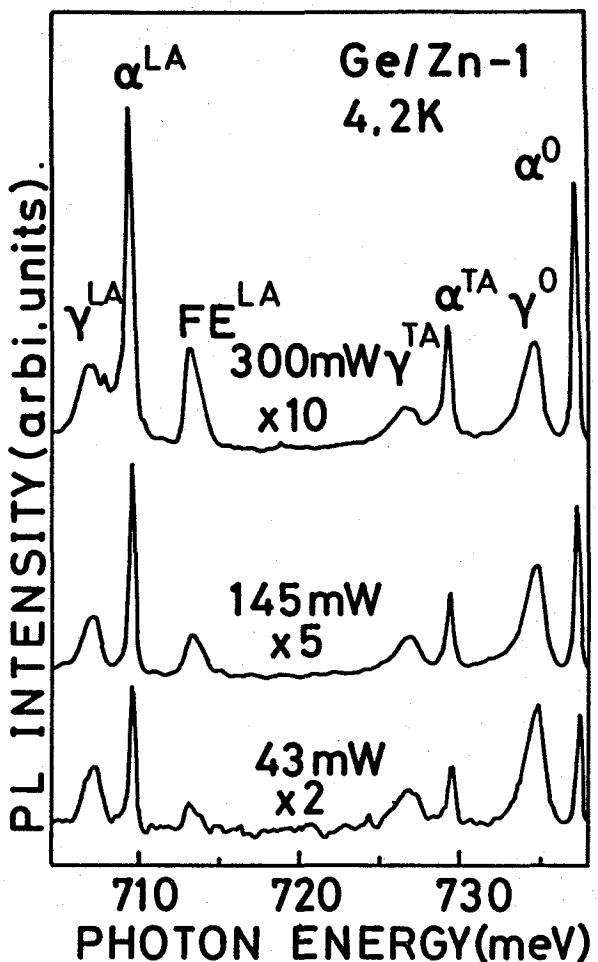


図1 ZnをドープしたGeのフォトルミネッセンスの励起強度依存性

えられる。最近行なった時間分解の測定によれば、この束縛多重励起子複合体の寿命が、 $2\ \mu s$ と比較的長いことがわかり、閉殻構造の傍証となっている。

もう1つの実験は遠赤外磁気光吸収の実験である。この実験はやはりアルゴンレーザーをサンプルに照射し、束縛励起子を作っておき、それによる遠赤外光 ($200 \sim 500\ \mu m$) の吸収の磁場変化を測定するものである。これによりいくつかのピークが観測されたが、そのピーク位置をまとめて図3に書いてある。この吸収ピークは、その励起強度依存性が、フォトルミネッセンスのピークAと同じであることから、束縛励起子であると同定された。束縛多重励起子複合体によるピークは、今までのところ観測されていない。図には、ゲルマニウム中の浅いドナーのゼーマン吸収のピークがあわせて示されている。実験結果とこの計算結果が4 meVほどシフトすれば、よく一致することから、束縛励起子の構造がドナーとよく似ていると推測できる。すなわち、この束縛励起子においては、正孔3つが不純物に強く束縛され、それに電子が弱く束縛されているというモデルでうまく説明できる。

以上のように深く不純物に対しても、浅い不純物同様、束縛多重励起子複合体の存在することがわかり、フォトルミネッセンスと遠赤外吸収の結合によって、束縛励起子系について多面的な情報の得られることが示された。フォトルミネッセンスの測定に協力して下さった基礎工・電気の西野先生、藤原君に感謝します。

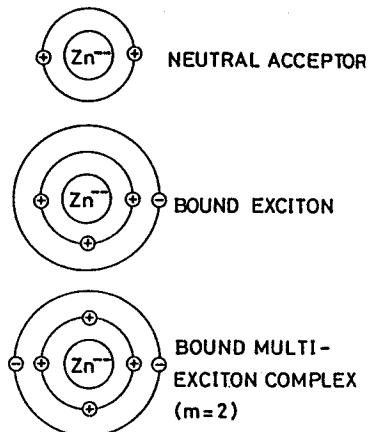


図2 殻模型による中性不純物、束縛励起子、束縛多重励起子複合体

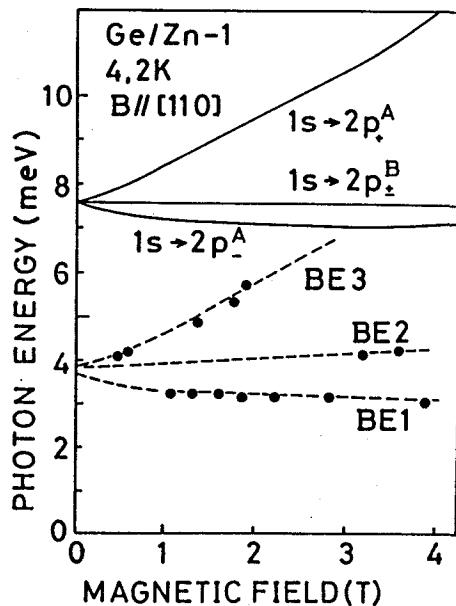


図3 束縛励起子の遠赤外磁気光吸収のピーク位置（実線はドナーに対する計算）

- 1) P.J. Dean and D.C. Herbet; Topics in Current Physics, ed. K. Cho (Springer, Berlin, 1979) Vol.14, p.55
- 2) H. Nakata and E. Otsuka; *Phys. Rev.* B29 (1984) 2347.
- 3) H. Nakata and E. Otsuka; *Jpn. J. Appl. Phys.* 23 (1984) L509.