



Title	長寿命キャリアと束縛励起子
Author(s)	真田, 淑
Citation	大阪大学低温センターだより. 1976, 15, p. 5-8
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/7723">https://hdl.handle.net/11094/7723</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

# 長寿命キャリアと束縛励起子

教養部 真田 淑 (豊中 2475)

不純物をドーピングした半導体にパルス光を照射することにより作られた電子と正孔は低温では、電子・正孔間に働くクーロン引力により励起子となったり直接再結合する以外に不純物に捕獲されて(束縛励起子、 $D^-$ ,  $A^+$  など)減少しつつ熱平衡分布へと緩和していく。この緩和の時定数  $\tau$  は、不純物をドーピングしていない Ge の場合ヘリウム温度では約  $10 \mu \text{sec}$  である。不純物がドーピングされると  $\tau$  は小さくなることが期待されるが、我々が行った不純物濃度の比較的低い ( $\sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ) p 型 (n 型) Ge では、正孔 (電子) が非常に長い緩和過程 ( $\tau = \text{数 m sec}$ ) をもつことが観測された。

実験はキャリアによる  $35 \text{GHz}$  マイクロ波のサイクロトロン共鳴吸収の励起後の時間変化を Boxcar 積分器を用いて測定することにより行なわれた (図 1(a))。励起光線としてはパルス幅約  $1 \mu \text{sec}$  のキセノンランプを用いた。有効質量が電子と正孔とでは一般に異なるためにサイクロトロン共鳴では、電子と正孔の信号を別々に観測できるという利点がある。In をドーピングした p 型 Ge におけるサイクロトロン共鳴吸収の時間変化を図 1(b) に示す。パルス励起後の正孔の、電子に対する相対的な吸収強度は、時間の経過と共に大きくなりやがてある時間が経過すると正孔のみが観測されることがわかる。図 2(a) と 2(b) には、 $4.2 \text{K}$  と  $2.2 \text{K}$  における吸収ピークの大きさの時間変化を示してある。 $4.2 \text{K}$  では、電子が励起後約  $10 \mu \text{sec}$  の  $\tau$  で減衰し  $40 \mu \text{sec}$  以後ではほとんど観測されないのに対し正孔は、約  $30 \mu \text{sec}$  までは電子とほぼ同様の減衰を示すが時間と共に再び増大を始め約  $40 \mu \text{sec}$  で再びピークを示したのち非常に大きな時定数でもって消滅していくのが観測される。 $2.2 \text{K}$  においては  $100 \mu \text{sec}$  付近から正孔の再増加が始まり、電子が観測されなくなった  $160 \mu \text{sec}$  付近でピークを示したのは  $4.2 \text{K}$  の場合と同様に非常にゆっくりと減衰していく。励起直後の電子・正孔の寿命が  $2.2 \text{K}$  では  $4.2 \text{K}$  の場合くらべてのびているのは、低温高励起下の Ge では励起子の空間的な凝縮相である比較的最長寿命 (約  $40 \mu \text{sec}$ ) の電子・正孔液滴が安定に存在するためである<sup>(1)</sup>。液滴からは励起子のほかに電子・正孔が放出されるので、励起光がすでに切られた後においても液滴が電子・正孔の供給源になるために見かけ上電子・正孔の寿命がのびる。図 3 には  $4.2 \text{K}$  における正孔の減衰の様子が時間域を広げて示されている。

p 型では正孔がこのような励起後長時間にわたって観測されるのはなぜであろう。試料が電氣的に中性であることを考えると、正孔が観測されている間正孔数に相当する負電荷は何が担っているのだろうか。なぜ長寿命の正孔は電子が減衰してしまってからあらわれるのだろうか (n 型では電子と正孔のふるまいが入れ替る)。

正孔 (電子) の寿命が非常に長くなるのは、不純物に束縛された励起子の存在と密接に関係している

のではないと思われる。束縛励起子が作られる過程はいろいろ考えられる。励起子として中性不純物に束縛される場合、正孔（電子）が中性不純物に捕獲された後に電子（正孔）が捕獲されて束縛励起子となる場合、束縛励起子として直接励起される場合、などである。

ここで p 型 Ge 中の束縛励起子を出発点として考える。

束縛励起子は光子を放出して再結合することにより消滅しその時定数はキャリアの再結合で決まる寿命とくらべて数桁大きい。この際不純物（アクセプタ）から正孔が価電子帯に励起されて不純物はイオン化される。放出された正孔はサイクロトロン共鳴吸収を行うが再びイオン化不純物に捕獲される。イオン化不純物は中性不純物となる（図 4）。正孔の供給源である束縛励起子の寿命が非常に長いために、例えばサイクロトロン共鳴吸収の時間変化を測定していると寿命が非常に長い正孔が観測される。

電子が減衰した後で長寿命の正孔が現われ始めるのは、電子・正孔液滴の存在の有無が束縛励起子の安定性を決めているのではないと思われる。有限温度において励起子系の平均濃度がある範囲内になるときにはガス状の自由励起子と高密度（ $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ）の電子・正孔プラズマから成る液滴とが共存する。液滴中の電子・正孔対の 1 ケ当りのエネルギーは束縛励起子のもつエネルギーよりも低い。ここで液滴が存在する系に 1 ケの励起子を加える。この励起子は束縛励起子となるよりも液滴の構成員となった方がエネルギーは低くなる。時間が経過して励起子系の平均濃度が臨界値よりも小さくなると液滴はもはや存在しないのでこの場合は束縛励起子の状態が安定となる。すなわちパルス励起後液滴が安定に存在している間は束縛励起子は作られず、液滴が消滅した後束縛励起子は安定な状態として存在し正孔の供給源となっているのではないと思われる。

束縛励起子は 4 体問題のモデルとして理論的にも興味をもたれている。実験的に束縛励起子の存在ならびに寿命を確かめるにはルミネセンスの時間変化を測定すればよい。束縛励起子が正孔（電子）の供給源になっているのであれば、不純物の数は一定であるので、長寿命正孔（電子）によるサイクロトロン共鳴吸収あるいはルミネセンスの強度は励起子強度と共に増大するがある臨界強度以上で飽和するであろう。その他、イオン化不純物による共鳴線幅の広がり、ストレス依存性などについても現在実験を計画中である。

(1) 森垣和夫, 固体物理 Vol.11, № 1. p3 (1976).

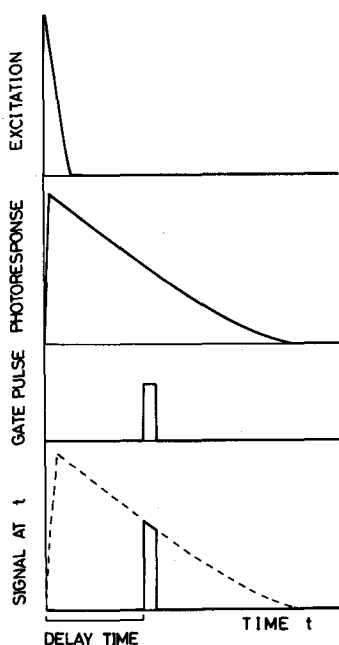


図 1.(a)

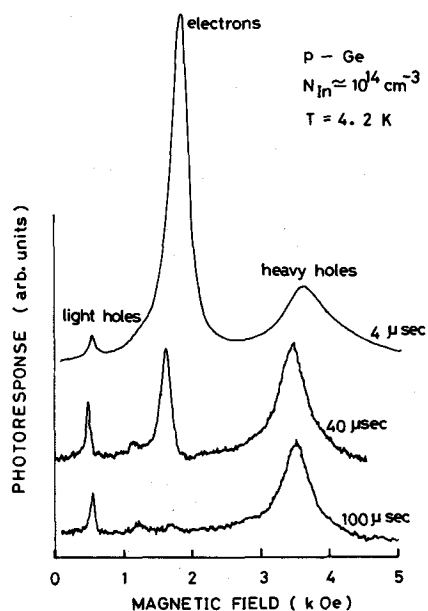


図 1.(b) p 型 Ge におけるサイクロトロン共鳴

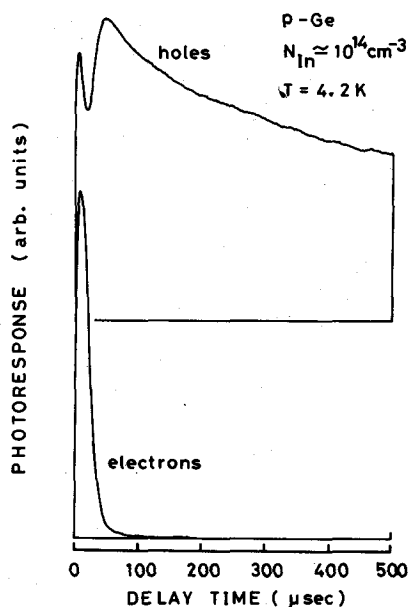


図 2.(a)

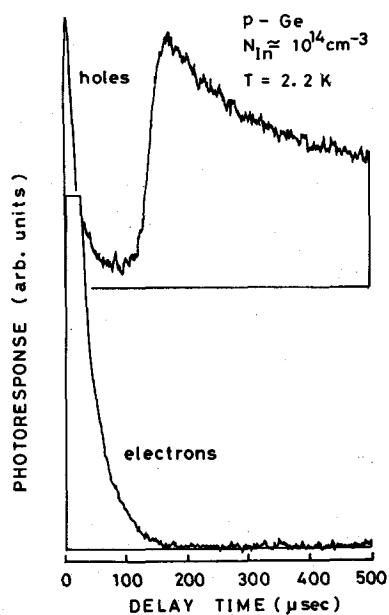


図 2.(b)

共鳴磁場における共鳴吸収の時間変化

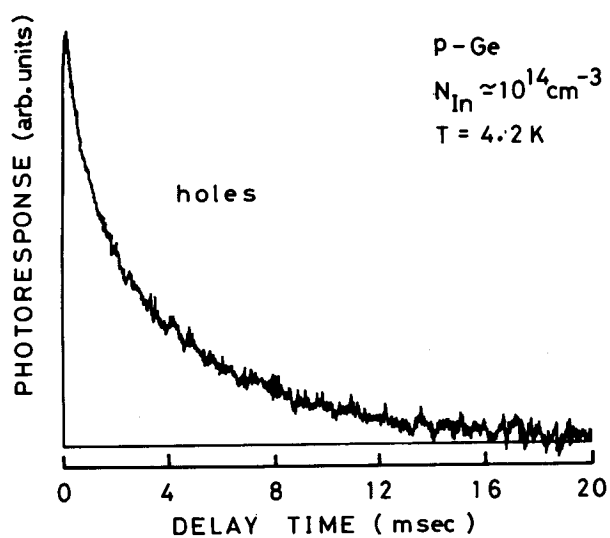


図3. 長寿命正孔の減衰

# In doped Ge ( p-type )

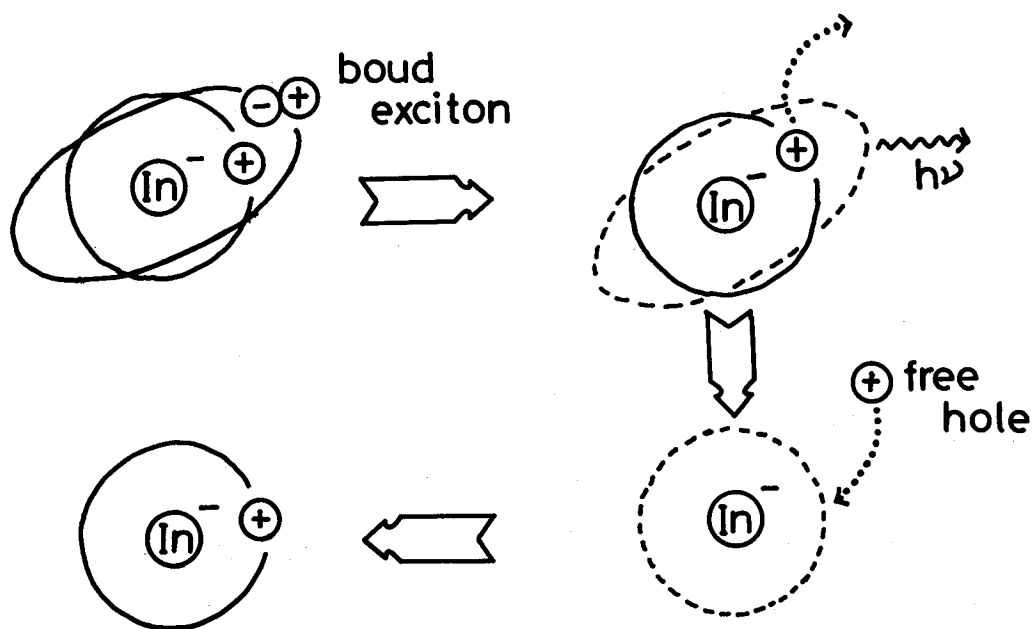


図4.