

Short note

Low Temperature Anomaly of Cyclotron Resonance with Heavily Doped Germanium

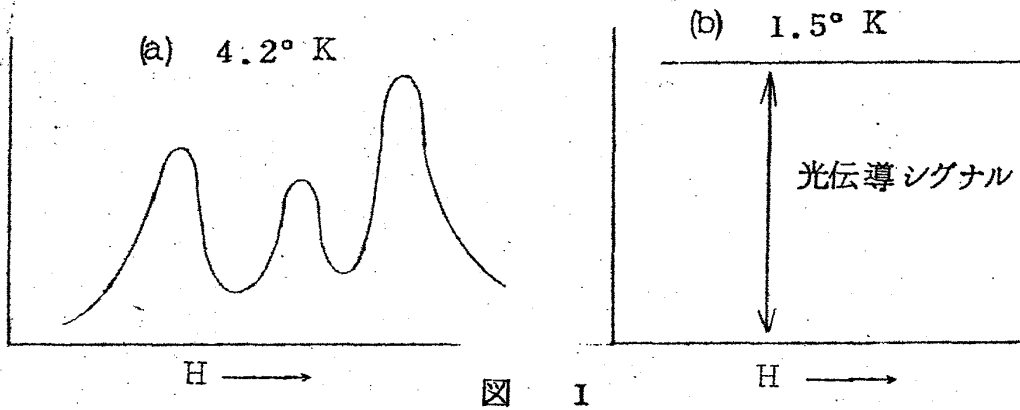
大塚 エイ三 (阪大理)

(6月21日受理)

Ge や Si における電子が、中性化した不純物によつて散乱される模様は、不純物がドナーであるかアクセプターであるかによつて著るしく異なる。即ちドナーでは散乱断面積が大きく、V族不純物が $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ も入るとミリ波ではサイクロトロン共鳴の観測が不可能になつてしまう。ところがアクセプターでは、電子の共鳴シグナルに関する限り、この程度の濃度では十分に観測される。その差は前者を水素原子による電子の散乱、後者を水素原子による陽電子の散乱に対比させる事により、定性的には説明される。この方面の研究は、Ge に III 族の In をドーブした場合について簡単な速報を既に出してあるが、¹⁾ 多量に In をドーブして行つた場合、極めて興味ある異常現象に縫着したのでここに報告したい。但し未だ実験データも少く、解釈も可成り独断的なので、近い将来もう少し完備した形で更めて報告するつもりである。従つてこのノートは未だ十二分に責任を持ってないものであることをお断りしておく。

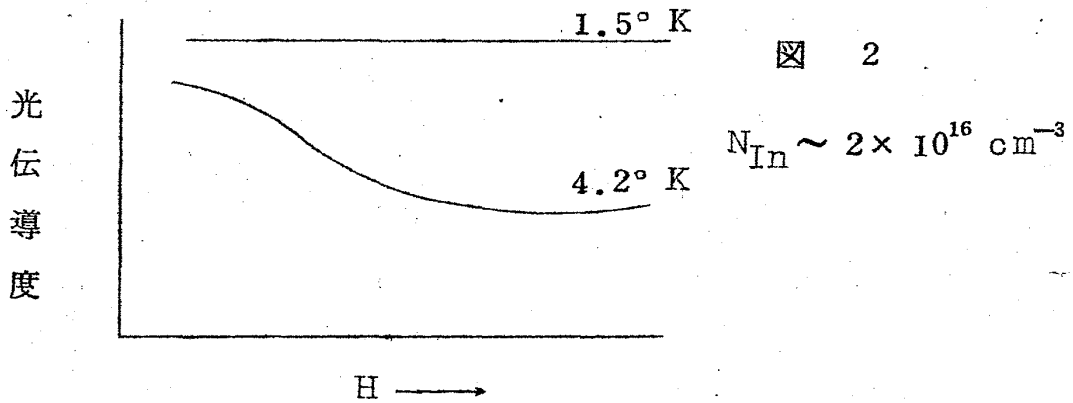
上述の如く Ge に In をドーブした場合、可成り高濃度まで電子の共鳴シグナルは観測されるが、それでも無論共鳴線の巾は次第に増加してゆく(必ずしも濃度に比例はしない)。In の濃度が $6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ に達すると、いささか奇妙な現象が生ずる。即ち 4.2° K では十分に分解し得る電子の共鳴線が非常に強く現われるが、温度を下げてゆくと急激に電子の共鳴線は沈んでゆき、 1.5° K では全く見当らない。この事だけならば、程度の差こそあれ、キャリア寿命の短い試料で時々見かける現象であるが、不思議なのは共鳴線が消えるにつれ、次第に大きな光伝導シグナムが現われる点である。この様子を模式的に図 1 に示す。

大塚エイ三



$$N_{\text{In}} = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

更に In の濃度が $\lesssim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ である様な試料につき実験を行うと、今度は 4.2° K に於ても、多少磁場依存性は残るが、上述の試料に比して遙かに強い光伝導シグナルが現れる。これを 1.5° K にまで温度を下げると磁場依存性はなくなる。(光伝導シグナルの絶対値の大きさの変化は未だ確認していない。)



中性化された In による電子の散乱は、高温になる程利かなくなる。($1/\tau_{\text{In}} \propto T^{-\frac{1}{2}}$; to be published) 従つてこの試料については、温度を上げてやれば次第に格子散乱が浮かび上がり、電子の共鳴線が分解されるかと思ひ $11^\circ \text{ K} - 20^\circ \text{ K}$ の範囲で実験を行つてみたが、 $11^\circ \text{ K} - 14^\circ \text{ K}$ の様子は 4.2° K と大同小異、 20° K では光伝導シグナルも消え去る。 20° K で消える点は、この温度では In が既に出払い域に入ること説明がつくが、 $11^\circ \text{ K} - 14^\circ \text{ K}$ で格子散乱による巾を伴つたサイクロトロン共鳴線が復活しない点は、上の現象が単に不純物濃度の増大で、電子の散乱確率が殖えたと云うだけではない事を示している。而も光伝導の増大は In による電子散乱一本槍の解析では説明がつかず、新しい現象の発生を仮定せねばならない。

仮に一つのモデルを提出する。電子が中性化した In 原子に近付くと、In⁻ 芯の周囲を正孔による電荷分布を分極して図3の様な状態になる。この際の相互作用ポテンシャルは、e⁺H 模型を適用すれば定性的に

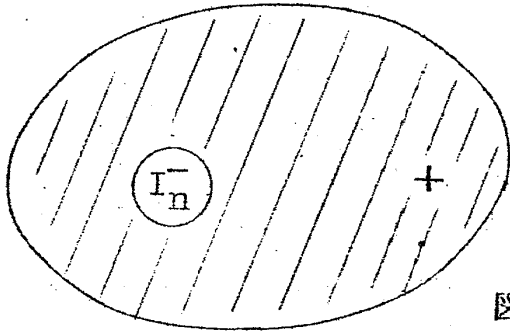


図 3

e⁻

$$V(r) = 2e^{-2r}(1+r^{-1}) - \alpha(r^2+d^2)^{-2} \quad (1)$$

で与えられよう。右辺の第1項はHartreeポテンシャルで反撥力を示し、第2項は現象論的な分極効果である。而して α は分極率、 d はBohr半径の程度のadjustable parameterである。水素原子の場合の実情に即して $\alpha = 9/2$ 、 $d = 1.225$ とおくと $V(r)$ は図4の様になる。即ちBohr半径のあたりにポテンシャルの凹みが出るので、十分低温で電子の運動エネルギーが小さくなれば此処に捉えられて一種

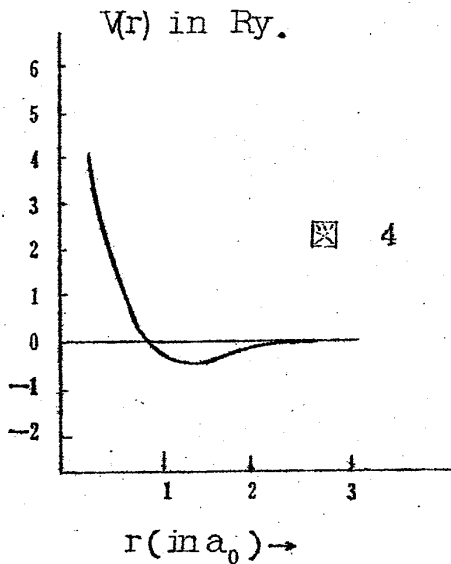


図 4

の exciton complex をつくる。このため電子は動き得えなくなり共鳴線は消える。

一方電子と対になつて作られた正孔はどうなるかと云うと、ポテンシャルの符号が逆になるから、図4の凹みは凸起となり、むしろ遠去けられる。而して正孔と中性Inとの衝突断面積は、電子のそれより約一桁大きいから、幾らも近寄らない内に忽ち弾き飛ばされ、仕方なく不純物間の“自由空間”をさまよう結果となる。このため正孔による光伝導シグナルが観測されるわけであるが、その絶対値が極めて大きく現われるのは、殆んどすべての電子がInに捉えられて動けないために、正孔が単独で再結合中心に達しても、結合する相手がないために再び光によつて価電子帯へ躍り出すことになり、結果的にはその平均寿命が著るしく延びることによるのではなからうか？

不純物間の平均距離は

$$\frac{4}{3} \pi r_s^3 = \frac{1}{N_I} \quad (2)$$

を用いて計算すると、 $N_I = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ に対して $r_s = 290 \text{ \AA}$ となり、サイクロトロン半径 (30 Ge (sec) として 1.5° で 1130 \AA) に比べてずっと小さく、サイクロトロン共鳴の観測されるのがかえって奇異に感じられる。また正孔の Bohr 半径が $\sim 40 \text{ \AA}$ (人によつては 100 \AA 以上にとつている) であることを考え合わせると、不純物間の“自由空間”は殆んどなく、更に不純物濃度が少しでも増すと、いよいよ電子は動きがとれなくなる。

このモデルをテストする一つの手段は、一軸性ストレスの適用である。Hall²⁾ は応力をかけた p 型 Ge の試料について Hall 効果の実験を行い、不純物準位が浅くなることを確かめた。準位が浅くなることは有効 Bohr 半径が増大する事であり、上のモデルが正しければ、電子は益々捉えられ易くなるであろう。 $N_{In} = 6.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の試料について 4.2° K でストレスを加えつつ電子の共鳴線の全強度 (\propto 自由電子の総数) を測つてみると、極めて鋭敏な反応を示し、ストレス x を横軸に、共鳴線の強度を縦軸にとると図 6 の実線で示す様な急激な変化が現れる。不純物を含まない試料に於ても電子共鳴線の全強度はストレスを加えると多少減ずるが、点線で示す強度であり、急激な変化は不純物を含む試料に特有である事がわかる。尚鎖線で示したのは、電子共鳴線

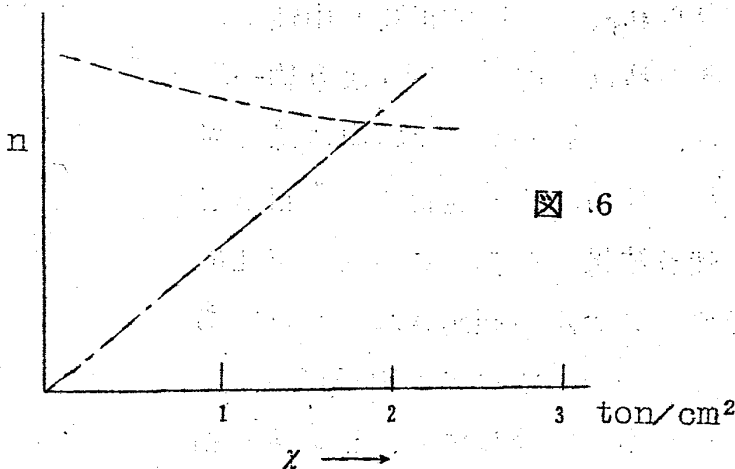


図 6

とは逆に、応力と共に増加する光伝導シグナルで、殆んど直線的に増加している。

以上極めて定性的なモデルと実験事実だけを記したが今後更に詳しい濃度特性、温度特性、応力特性等をしらべてゆきたい。又 n 型の

試料について同様の事情が起るかどうかも調べたい。半導体で局在励起子をおさえたと言う例は未だ余り聞かないので、その方面の研究にも役立つであろうし又濃度が高いだけに不純物伝導に関しても何か新しい情報を提供し得ることを

期待して、とりあえず筆をおくことにする。

- 1) E. Otsuka et al : Phys. Rev. Letters 13 (1964) 232
- 2) J.J. Hall : Phys. Rev. 128 (1962) 68.

FeCl₂における Fe³⁺不純物の局在スピン共鳴

伊達宗行, 本河光博 (阪大理)

(6月21日 受理)

1. 緒言

我々は以前から強磁性および反強磁性体中に他の磁気イオンが不純物として入っている場合、その不純物に局在した磁氣的構造がどのようになるかについて興味をもっている。簡単のために話を化合物に限ると、理論的には最近たとえば強磁性体中反強磁性不純物のごく簡単な場合についてスピン波の方法で研究が行われているが⁽¹⁾、実験的には強磁性、反強磁性いずれの場合についてもまだすつきりした研究が行われていないようである。これは普通に混晶系の磁性を論ずるに当つても、その実験結果が net moment の挙動を見るのに終ることが多いため、直接に不純物スピンだけを動かしてその磁性を調べることが困難だからである。したがって磁性体における不純物の研究は、host に対する "impurity effect" にとどまっているようである。しかし一般に host spin と impurity spin が非常にちがった性質をもっているならばその impurity spin のみ、もしくはまわりの host spin を若干かかえこんだいわば衣を着た localized spin state があるはずである。磁性体の光吸収はこの種の問題を取扱う有力な方法のようであるがごく最近我々は Fe²⁺ と Fe³⁺ が磁氣的に非常にちがっているのを利用してメタ磁性体である FeCl₂ 中の微量 Fe³⁺ スピンの局在した磁気状態を ESR でしらべること成功したのでここ