

Title	弾道熱パルス-その半導体不純物準位の研究への応用
Author(s)	宮里, 達郎
Citation	大阪大学低温センターだより. 27 P.17-P.20
Issue Date	1979-07
Text Version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11094/6523">http://hdl.handle.net/11094/6523</a>
DOI	
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

# 弾道熱パルス — その半導体不純物準位の研究への応用

産業科学研究所 宮里達郎 (吹田 3562)

## § 1. はじめに

弾道熱パルス(ヒートパルス)を用いたフォノンスペクトロスコピーは、1950年代から報告されておりその利点、欠点をうまく使いわけて、多くの物性研究に用いられている。いくつかの優れた総合報告や解説<sup>1,2)</sup>がなされているので、詳しい事はこれ等の文献を見て載くとして、ここでは、SbやAsをドーブしたGe中の不純物準位の電子と格子系との相互作用を、磁場下(〜60 kG)に於いてヒートパルスにより調べている実験屋の立場から実験を行う上での問題点や苦心談、そして何をやろうとしているか、何がわかるか(この研究は目下進行中であるので決定的な事は言えないが)等を述べることにより、ヒートパルスによる物性研究の一端を紹介してみたい。

## § 2. ヒートパルスとは

試料(我々の場合は、AsやSbをドーブしたGeの単結晶)の一端面に薄い抵抗膜(この膜厚は以下で述べる条件を満たすべく、又同軸ケーブルやパルス電源のインピーダンス50Ωに合わすべく決められる)を蒸着し、これにduty-time 0.1μsくらいのパルス電流を流すと、抵抗膜はJoule熱で加熱され(この場合、抵抗膜中では電子・格子緩和時間は、duty-timeに比べて充分短く

1 nsくらいの中に熱平衡状態に達し、抵抗膜内の温度は均一である。この抵抗膜より試料結晶へ熱フォノンが緩和するのに必要な時間は、抵抗膜と試料の音響インピーダンス(密度×音速)に依存するが、大体数10 ns以下となるので)duty-timeの間、抵抗膜内は熱平衡にありながら定常的に熱フォノンを放射し続ける。この状態にある抵抗膜をヒーターと呼ぶと、このヒーター内のフォノンの周波数分布は、良く知られている様に、ヒーターの温度 $T_1$ で決まるプランク分布 $N(\nu, T_1) = 1 / [\exp(h\nu/kT_1) - 1]$ で与えられる。一方ヒーターから試料結晶へ放射される正味のフォノン(ヒートパルス)は、ヒーターと試料結晶(その温度を $T_0$ )に分布しているフォノン差(この場合試料結晶内でのフォノンの平均自由行程は充分長いという事が前提となる)であり、フォノンの黒体放射と考えることが出来る。この時電流により流れこむパワーを $P$ とすると、

$$P(T_0, T_1) = \frac{\pi^5 k^4}{15 h^3} \left[ \frac{\langle t_{10} \rangle_L}{u_L(1)^2} + 2 \frac{\langle t_{10} \rangle_T}{u_T(1)^2} \right] (T_1^4 - T_0^4)$$

で与えられ、ここにsuffixの0,1はそれぞれ試料結晶及びヒーター(又は抵抗膜)を、又L, Tは縦波・横波を表わし、 $u$ は音速である。又、 $\langle t_{10} \rangle$ はヒーターから試料結晶への透過係数を表わし抵抗膜・試料結晶の音響インピーダンスの整合で決まる。

ヒートパルスの最大の欠点は周波数 $\nu$ が単一でないという点であるが、フォノンの状態密度が $\nu^2$ に

比例するとして、 $\nu_1 = 5.87 \times T_1$  GHz でピーク(中心周波数)を持ち、 $T_1 = 10$  Kで587GHzと比較的容易に非常に高い周波数の音波を発生出来る。但しヒーターに喰わせるパワーを変える事は中心周波数を変える事になるので、パワー依存性は求められないし、周波数依存性を調べる事も容易ではない。

このヒートパルスの周波数を「単色化」する方法もいくつかある<sup>3)</sup>が、我々の実験では、磁場下で行う都合上、用いなかったのも、又紙面の都合もあり省く。

次にこのヒートパルスを検出する方法であるが、主にヒートパルスによる抵抗の変化を利用するもので、ポロメーターと呼ばれており、(1)超伝導膜(Al, Pb, In, Sn) (2)常伝導膜(In, Pb) (3)Si, Ge膜、(4)超伝導ジャンクション等があるが、ここでは我々の用いたCdS 薄膜ポロメーター<sup>4)</sup>を紹介したい。これを用いた理由は、磁場下で使用出来て、しかも高い感度を得られる唯一のものである事による。CdS(1 $\mu$ m くらいの薄膜)は液体He 温度でバンドギャップ以上のエネルギーの光を照射すると、電子と正孔の対が出来るが、正孔はすぐにsensitizing centerに捕獲され、一方伝導帯に上げられた電子の大部分は、trapping-siteに溜り光電流は長い時間(10<sup>3</sup>時間のオーダー)一定となる。この状態にbias電圧をかけると、Poole-Frenkel効果でtrap-siteのCoulomb-potential barrierは低くなり、ここへフォノンパルスが来ると、trapされた電子は解放され、このCdSポロメーターを流れる電流は増大する。この電流の変化をsignalとして観測する。

### § 3. 実験目的

Ge中の浅い中性ドナー電子の基底状態は、良く知られている様に、伝導帯の底の数に対応して、4重に縮退しているが、谷間・軌道相互作用により、Singlet とそれより4 $\Delta$ (Ge:Sbで0.32meV)だけ高いtriplet とに分裂している。液体He 温度ではドナー電子は総てこの基底状態にあると考えてよい。Geのような、多谷間半導体の場合、変形ポテンシャル定数が大きく、液体He 温度でも、この電子系は格子系の熱振動でかなりゆすられ、故にlevelは幅を持ち、数GHz くらいまでの周波数の音波は、level内の緩和として吸収される。同じような理由により、格子の静的な歪(内部歪や外力)及び外から入射した音波も、この基底状態をかなり変えてしまう。

このドナー電子による超音波吸収の機構も数回書きなおされているが未だ不十分であり、特に、磁場下でのふるまいは、説明が困難である。

この実験の目的は、

(1)  $[100] \parallel \mathbf{q} \parallel \mathbf{H}$ で、 $\mathbf{q}$ はヒートパルスの伝播方向、 $\mathbf{H}$ は磁場である。この方向では、Zeeman効果は0で、又、縦波も基底状態の電子とは結合しない(変化しない場合は、この縦波のecho-heightを基準として、横波の磁場効果が調べやすい)はずである。横波が磁場に依存する場合は、それは、ドナーの波動関数の磁場による収縮によるものであり、縦波が磁場に依存すれば、多分この電子によるフォノン散乱には、hopping過程とか、homo-polaron pairs による散乱が寄与しているであろう。又、power依存性(即ち周波数依存性)が不連続な変化を示せば、それは波動関数の広がりを示すcut-off 関数の大きさを知ることが出来る。

(2)  $[111] \parallel \mathbf{H} \parallel \mathbf{q}$ の場合、

基底状態は Zeeman 効果により分裂するが、その level の変化に伴い、電子の population や level 幅が変わり、又、level 間の共鳴散乱も観測出来る可能性があり、これにより level 間隔の磁場による変化の様子を直接調べられると共に、基底状態の磁場効果は、Zeeman 効果が主か、波動関数の収縮が主か、又はその双方かは興味深い。

#### § 4. 実験方法

- (1) 抵抗膜；一般に Al, Au, Cu, Ni 等の金属やその合金 (コンスタンタン等) が用いられ、膜厚・形状は § 2 で述べた条件を満たすべく設計される。常温と He とであまり抵抗が変わらないので作りやすいという理由でコンスタンタンが良く用いられるが、成分の Cu と Ni とで蒸発速度が 100 倍違うので、ベレットフラッシュ法を用いる必要があるのと、抵抗が磁気の影響を受ける事、及び電極 (Au) やリード線 (Au や Cu) 等とコンスタンタンの間ではオーミックな接触が困難で、常温ではオーミックでも液体 He 温度になると著しくオーミックから外れるため、ヒーターの  $T_1$  の制御が難しく、特にこの非オーミックの程度が磁場に依存するので、我々は磁場中での異種金属の接触を避け、抵抗膜・電極等はすべて Au で統一した。抵抗膜の厚さは  $50 \sim 60 \text{ \AA}$  で両端に Au をかなり厚く蒸着した。抵抗膜のサイズは  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$  である。
- (2) CdS ポロメーター；Ge の単結晶の一端面に  $\text{SiO}_2$  を  $5000 \text{ \AA}$  蒸着し、その上に CdS を  $1 \mu\text{m}$  蒸着し、その上にマスクを通して Au のクシ型電極をつける。CdS 蒸着膜の比抵抗はルツボの温度に著しく依存し、 $700^\circ\text{C}$  と  $800^\circ\text{C}$  の間でも、数百倍変わり、又 CdS はメルトしないで昇華するため、膜の比抵抗はルツボの一番高温部分の温度でほぼ決定されるので、所定の比抵抗を得るには、高度の技術を要する。我々の場合ルツボ温度は  $760^\circ\text{C}$ 、基板温度は  $100^\circ\text{C}$  で、ポロメーターの抵抗は室温で大体  $100 \Omega$ 、He 温度での電流は  $1 \text{ mA}$  (光励起後) で行った。
- (3) 試料結晶；一例として Sb を  $4 \times 10^{14}/\text{cm}^3$  ドープした Ge 単結晶で  $6 \times 7 \times 10 \text{ cm}^3$ 。長さは、エレクトロニクス関係上 (time of flight を  $2 \mu\text{s}$  以上欲しいので) 長い方が良いが、超伝導マグネットの磁場均一部分は小さいので、あまり長く出来ない。我々は  $10 \text{ mm}$  とした。
- (4) クライオスタット；主な特徴は、CdS ポロメーターに励起光を送るべく、ファイバークラスが入っている点と、Ge に一軸性圧力を加えて、 $4 \Delta$  を変化させて、共鳴散乱を観測して、<sup>(3)</sup> ヒートパルス の中心周波数を検定するようになっている点である。

#### § 5. 結果

実験上のいくつかの問題点は解決され、目下測定中であるので、あまり結論的な事は少ないが、

- (1)  $[100] // H // q$  の場合、横波は磁場に依存し、波動関数の収縮の効果が見出されていること。
- (2)  $[111] // H // q$  の場合、周波数が低い場合、GHz 帯の超音波吸収と良く似たふるまいを示しているが高い周波数では、異ったふるまいを示しているが目下この原因は不明である。この実験結果の詳しい議論は又、次の機会にしたい。

#### 参 考 文 献

- 1) R.J.von Gutfeld: Physical Acoustics vol.5, ed.by W.P.Mason (Academic Press, 1968) P.250.

- 2) 石黒武彦;物性 vol.13, (1972) P.193.  
 3) R.C.Dynes and V.Narayanamurti;Phys.Rev.B6 (1972) 143.  
 4) T.Ishiguro and S.Morita;Appl.Phys.Lett. 25 (1974) 533.

### 低温脆性試験機の共同利用について

昭和53年度予算において購入された低温脆性試験機は新設なった低温脆性試験機室に設置されました。本装置は低温センターとしては、初めての実験装置であり、その有効な利用が待たれています。

本装置は極低温装置の安全性確保と極低温材料の研究に用いられます。この目的にあった研究のために広く学内共同利用設備として使用されることになっております。現在試験場関係のワーキンググループが共同利用できるように機器の整備等を行っております。共同利用を希望される方は低温センター吹田分室(吹田地区 内線 4105)に御連絡下さい。

なお、本装置の概要は次の通りです。

### 低温脆性試験機の仕様

#### 1. 試験機本体

型式	インストロン	1125型(特別延長型)
クロスヘッドストローク		1905mm
クロスヘッド間隔		550mm
クロスヘッド速度		0.005mm/min~500mm/min
荷重限度		10,000kg
ロードセル		1kN(約98kg重) 50kN(約4,900kg重)
データ記録器		1125型標準

#### 2. 試料用クライオスタット

##### イ. マルチスペシメンクライオスタット

液体ヘリウム、窒素等による浸漬型クライオスタット。同時に数個の試料をセットして順に試験を行うことができる。

##### ロ. 連続クロークライオスタット

試料は単一片しか取付けることができないが、液体ヘリウムを連続的に流すことにより、7Kから室温まで任意の温度に設定することができる。