

Title	Cd Sn As ₂ 結晶のトンネル分光
Author(s)	白川, 二; 中井, 順吉; 中島, 祐一
Citation	大阪大学低温センターだより. 30 P.6-P.9
Issue Date	1980-04
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/6715
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

Cd Sn As₂ 結晶のトンネル分光

工学部 中島裕一, 白川 二, 中井順吉 (吹田 5013)

半導体材料はGe, Siの単元素半導体から, III-V族あるいはII-VI族化合物半導体にまで拡張されることによって, 応用の範囲と可能性の著しい拡大を見て来た。カルコパイライト型半導体の研究はこのような, 半導体材料の多様化の歴史的流れの延長としてとらえることができる。

ダイヤモンド型結晶構造をもつゲルマニウム, シリコンの結晶において, 原子をある規則に従って, III族元素のIn原子とV族元素のAs原子で次々に置きかえることによって, ジンクブレンド型化合物, InAsの結晶が得られる。さらにこの結晶のIn原子をある規則に従って, II族元素のCd原子とIV族元素のSn原子とで置換したものが, II-IV-V₂族カルコパイライト型半導体CdSnAs₂の結晶構造である。

CdSnAs₂の結晶構造を図1に示した。この図でわかるように, 結晶格子がc軸方向では, ジンクブレンド型の2倍になった超格子構造になっており, 正方晶系に属する。なお, 正確には, 単位格子はz軸方向にわずかに縮んでおり, 格子定数の比は $c/a = 1.959$ であり, また, V族原子の位置は $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ の位置からわずかにずれている。

我々は垂直ブリッジマン法によってCdSnAs₂の単結晶を育成し, 伝導電子密度は約

$10^{18}/\text{cm}^3$ となり大きい, 移動度が $8 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (at 77 K)近いものまで得ることができた。

以下に, その結晶を用いて行った, 高磁場下でのトンネル分光, および磁場変調法によるシユブニコフ・ドハース(SdH)振動の測定について紹介する。

2つの電極a, b間に薄い絶縁層をもうけ(以下でこれをトンネル接合と呼ぶ), 電圧を印加したとき, トンネル効果によって流れる電流密度は

$$J = (2m^* e/\hbar^3) \int_{-\infty}^{\infty} dE \int \rho_a \rho_b |M_{ab}|^2 f_a (1-f_b) dE_1 \dots \dots \dots (1)$$

f_a, f_b : 電子の占有確率

ρ_a, ρ_b : 電子の状態密度

M_{ab} : 遷移の行列要素

$E_1 = \hbar^2 k_1^2 / 2m^*$ m^* : 電子の有効質量

k_1 : トンネル電流に直交する \mathbf{k} の成分

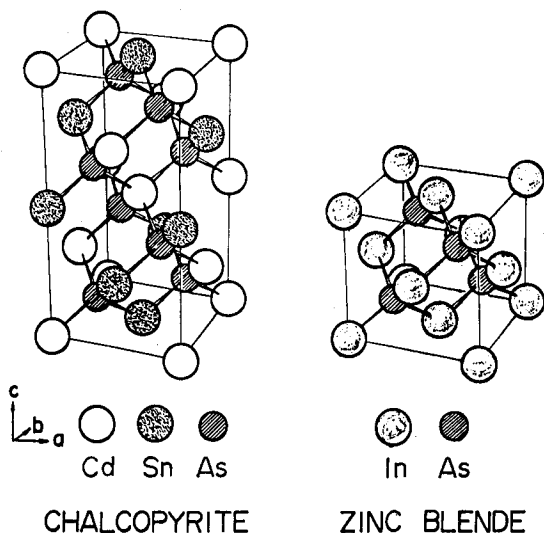


図1. CdSnAs₂とInAsの結晶構造

で表わされる。トンネル接合のコンダクタンス (dI/dV) およびその微分 (d^2I/dV^2) のバイアス電圧 (V) 依存性を測定することによって、以下に見るように電子の状態密度の変化などを知らることができる。

我々は Cd Sn As₂ 単結晶の表面を熱酸化し、その上に鉛を真空蒸着した試料を製作し、鉛電極と、Cd Sn As₂ 結晶間の印加バイアスをスイープして、 $dI/dV-V$ 、 d^2I/dV^2-V 特性を測定した。その際、トンネル電流と平行 (トンネル接合に垂直) に磁場 $H \leq 55$ kGauss を加えることができるようにした。測定結果の例を図2および図3に示す。

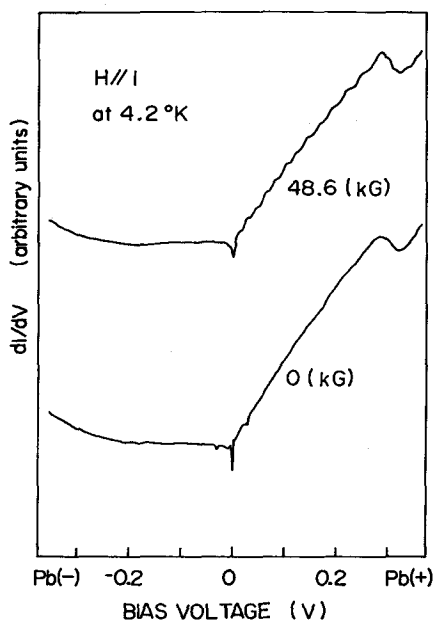


図2. Pb-Oxide-ntype Cd Sn As₂ トンネルMOSのコンダクタンス-バイアス特性

図2は $dI/dV-V$ 特性であり、バイアス位置 $V=308$ mV にある構造は Cd Sn As₂ 結晶と酸化膜との界面に存在する蓄積層内に電子が閉じこめられたために生じた2次元量子化準位によるものであると考えられる。図4は界面に蓄積層のある場合のトンネル接合のバンド図である。十分に狭い蓄積層内の井戸型ポテンシャルに閉じこめられた電子のz方向 (深さ方向) の運動は量子化されるが、 x_y 面内では自由粒子的である。その電子のエネルギーは

$$E = E_{bi} + (\hbar^2/2m^*) (k_x^2 + k_y^2) \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

E_{bi} : 束縛エネルギー

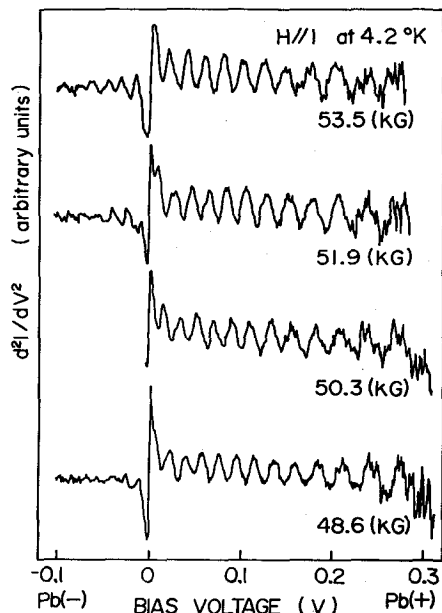


図3. Pb-Oxide-ntype Cd Sn As₂ トンネルMOSの磁場の下での d^2I/dV^2-V 特性

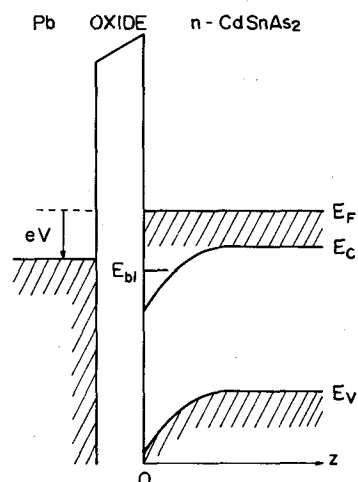


図4. 蓄積層の存在するトンネルMOSのバンド図

と表わすことができる。この2次元量子化準位の状態密度は特徴的であり

$$\rho_{bi}(E) = (m^*/\pi\hbar^2)\theta(E-E_{bi}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし } \theta(E) = \begin{cases} 1 & (E > 0) \\ 0 & (E \leq 0) \end{cases}$$

となる。これによる電流密度は(1)式に適当な近似をして、絶対零度の場合

$$J_i \propto \int_{E_F - eV}^{E_F} dE \rho_{bi} \dots\dots\dots (4)$$

E_F : フェルミエネルギー

となる。上述のバイアス $V = 308 \text{ mV}$ の構造はこれを反映している。

さて、今、磁場 H を xy 平面に垂直 (Z 方向) に加えた場合、蓄積層内の電子の自由粒子的であった xy 平面内での運動は、ランダウ準位に分裂する。分裂の間隔は有効質量 m_s^* を用いて

$$\Delta E = \hbar\omega_c = eH/m_s^*c \dots\dots\dots (5)$$

ω_c : サイクロトロン角振動数

となり、 ΔE を測定することによって蓄積層内の井戸型ポテンシャルに閉じこめられた電子の有効質量を知ることができる。また、この井戸型ポテンシャルにとらえられていない、自由粒子的にふるまっているバルクの電子も、上述のように磁場を加えたとき、ランダウ分裂するので、このエネルギー間隔からバルクの電子の有効質量も知ることができる。図3は磁場を加えたときの $d^2I/dV^2 - V$ 特性の例であるが、ランダウ分裂による振動構造がみられる。この振動の谷のバイアス位置の磁場に対する依存性を調べたのが図5である。

図5に示したD1からD11までの構造のいくつかは2次元量子化準位のランダウ分裂であり、他はバルクの電子のそれである。それを調べる際に、図5で磁場の強さを固定して、D1からD11までの構造の間隔を順に見ていくと、それが減少していくことに気付く。これは CdSnAs_2 の伝導帯の有効質量 m^* がエネルギーの関数になっていることを直接観測したことになる。そこでE.O.Kaneの2バンドモデル

$$E = E_g/2 + \hbar^2 k^2/2m_0 + (E_g^2/4 + \gamma^2 k^2)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

E_g : 禁止帯巾 m_0 : 自由電子質量

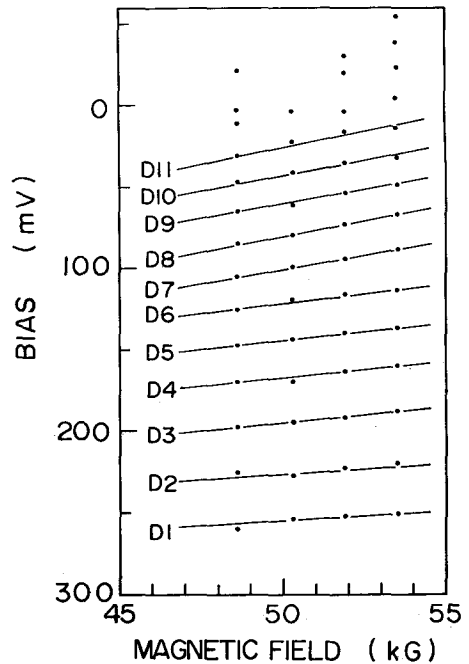


図5. $d^2I/dV^2 - V$ にみられる振動構造の磁場依存性

そこでE.O.Kaneの2バンドモデル

を用いると、図5のD4からD11はそれぞれバルクの伝導電子の $N = 0, 1, 2, \dots, 7, 8$ のランダウ準位に対応し、D1からD3は2次元量子化準位によるものであると考えられる。

ところで、図3は磁場を一定に保って、バイアス電圧をスイープした場合の測定結果であったが、逆にバイアスを一定に保って、磁場の大きさをスイープしてもランダウ分裂による振動構造が d^2I/dV^2 -H曲線にみられるはずである。その測定結果の例を図6に示した。この振動構造は、対向電極として用いた鉛のフェルミ面を、CdSnAs₂の電子のランダウ準位が次々とよぎることによって生ずるものである。

ここまで説明が進むと、この測定がSdH振動の測定に類似していることがよくわかる。SdH効果とは、導体中のキャリアのランダウ準位がフェルミ面を次々とよぎることによって生ずる磁気抵抗の振動である。図7はCdSnAs₂のSdH振動を磁場変調法によって測定したものである。この方法によって比較的磁場の強さの小さいところでの、振巾の小さい振動でも簡単にSN比のよいデータを得ることができた。

以上、CdSnAs₂の高磁場下でのトンネル分光および、それに関連してシュブニコフ・ドハース効果の測定結果を紹介した。

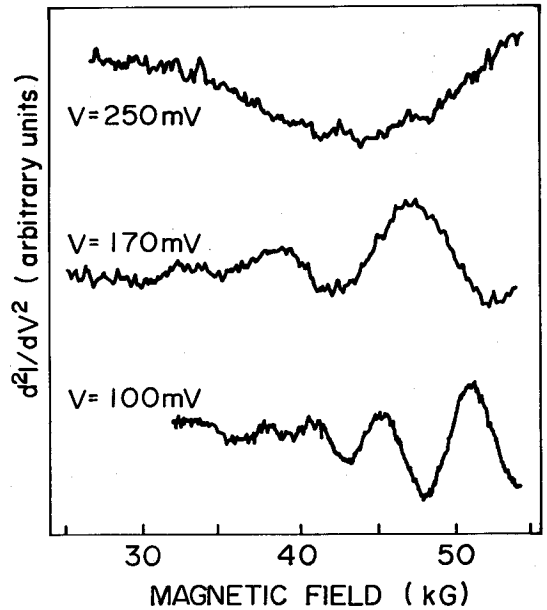


図6. Pb-Oxide-ntype CdSnAs₂ トンネルMOSの d^2I/dV^2 -H特性

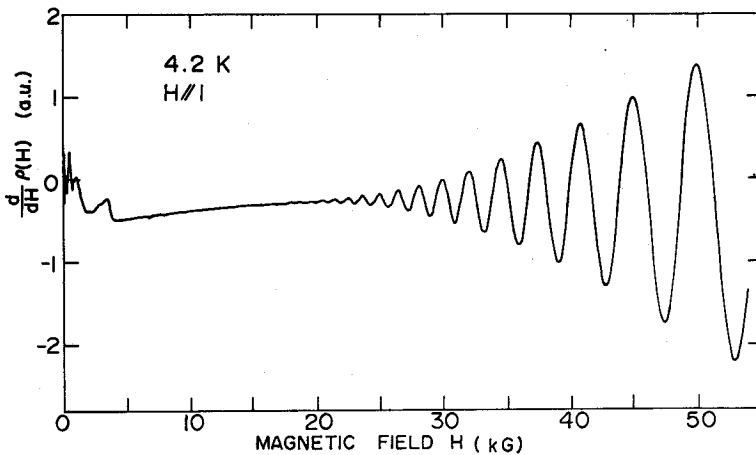


図7. 磁場変調法による、CdSnAs₂のSdH振動