

層状半導体 InSe の超音波による弾性的性質の研究

北海道大学工学部原子エ学科

今井 和明, 阿部 寛

§1. はじめに

InSe は、同族の GaS や GaSe と異なり、 γ -タイプと呼ばれる斜方面体の結晶構造を持つ。以後、この構造を六方晶系の座標で表わす。≡つの基本層でひとつの単位格子を作り、基本層内も $\text{Se}/\text{In}/\text{In}/\text{Se}$ の四枚のシートから成っている。各基本層の c 軸に関して、隣接する上下の基本層の状況が異なるため、基本層内において c 軸に垂直な鏡面对称性が、厳密には乱れている。基本層間の結合は弱い van der Waals 型の力であるとは云え、層間の相互作用は無視できない。

InSe は機械的には容易にへき開し、強い=次元の異方性を示す。この異方性を表わす物性量として、弾性定数の異方性がある。弾性定数は超音波で測定するのが簡便であり、相對測定精度(例えば音速の温度依存性など)を4~5桁得るのは容易である。しかし、この方法は、試料の形状に条件があり、層状物質に関する報告は少ない。

本報告は、 InSe の室温温度における弾性定数を、超音波の音速測定によって決定した結果である。機械的異方性について、 GaS 、 GaSe との比較を行なう。

§2. 実験

InSe 単結晶は、非化学量論的組成($\text{In}_{1.04}\text{Se}_{0.96}$)を出発液相とする Bridgman 法によって育成した。試料はインゴットからダイヤモンドカッターで適当な大きさに切り出し、 $z(c)$ 面はへき開によって、 $x(2\bar{1}0)$ 面は研磨して平行度を出した。音波が伝播する方向の試料の長さは6~8mmである。 x 面は、真ちゅう円筒の中央に試料が入る穴をあけ、試料をダイヤモンドカッター用の硬いワックスでその穴に封じ止め、これ全体を機械研磨した。研磨剤はアルミナ1500番までとし、それ以上に仕上げようとしても効果はなかった。

音速の測定は、通常の超音波パルスエコー法を用いて行ない、音波の周波数は、10~15 MHz とした。トランスデューサには LiNbO_3 を用い、シリコングリースによって試料に接着し、そのまま液体窒素中につけた。

§3. 結果と考察

InSe の対称性は C_{3v} に属し、その弾性テンソルは(1)式で与えられる。音波伝播の純モード軸は、縦波に対しては z と x 軸、横波は x 軸に、 z 軸と0°傾いた変位を持つ波と、それに直交する変位を持つ波の二つのモードがあり、全部で四つのモードが存在する。 θ は(2)式で与えられる。従って、四つのモードの音速と θ の測定値から六つの独立した C_{ij} のうち C_{13} を除く五つの弾性定数が決定できる。

Z軸とX軸に伝播する縦波の音速は各々 2.6 及び 4.6×10^3 m/s であった。X軸に伝播する横波のうち、早い横波の音速は、 2.9×10^3 m/s であり、その変位方向はZ軸に対し約 70° 傾いている。遅い横波はそれと直交し、音速は 1.8×10^3 m/s であった。これらの横波は減衰

$$(1) \quad C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし } C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$$

$$(2) \quad \theta = \tan^{-1} \frac{C_{66} - C_{44} \pm \sqrt{(C_{66} - C_{44})^2 + 4C_{14}^2}}{2C_{14}}$$

が非常に大きい。そこで、パルス反射法と透過法を併用して音速を決定した。又、変位方向はトランスデューサをX軸の周りに回転させて、パルス高が最大になる点を探した。この時、X面が荒れるため、測定毎に研磨し直す必要があった。θの誤差は $\pm 5^\circ$ 程度ある。

InSeの比重を 5.6×10^3 kg/cm³ として計算した C_{ij} の値を、GaS, GaSeの値と共に下の表に示す。 C_{44} は C_{66} に比して小さいが、 C_{14} を無視できない。従って D_{6h} , D_{3v} の対称性を持つ GaS, GaSe のように C_{66}/C_{44} を異方性パラメータとして比較する事ができない。 C_{14} がゼロのとき、層に沿って伝播する横波のうち、 C_{44} は変位が積層方向にある音速に関連し、 C_{66} は層内の変位を持つ音速に関連している。InSeは、 C_{14} の存在のため、X軸伝播の横波は、変位方向が主軸系にないからである。

しかし、層内に変位を持つ縦波に関連した C_{11} と、積層方向に変位する縦波に関連する C_{33} との比をひとつの異方性パラメータと考えると、GaS, GaSeとの比較が可能である。この結果もあわせて表に示してある。

表から、InSeはGaS程異方性は大きくなく、GaSeと同程度である事を示している。これは51でふれたように、基本層間の結合がけっこう強い事からも予想される。

Table 1. Elastic constants of several III-VI layered semiconductors (10^{10} N/m²)

	InSe			GaSe			GaS		
	This work	Ultra-sonic ¹⁾	Raman scat. ²⁾	Brillouin scattering ³⁾			Neutron ⁶⁾ scat.	Brillouin scat. ⁷⁾	
C_{11}	12	12.5	11.8	10.5	10.5	10.50	15.5	15.7	12.16
C_{12}	3.4	4.8	4.6	2.75	3.25	2.97		3.32	3.52
C_{13}		3.68	1.6	1.22	1.26	1.22		1.50	1.14
C_{14}	0.94								
C_{33}	3.8	4.52	3.8	3.57	3.51	3.51	3.64	3.58	3.79
C_{44}	2.2	1.49	1.1	1.05	1.04	1.00	1.33	0.81	0.95
C_{66}	4.3	3.85	3.6	3.88	3.63	3.77		6.19	4.32
C_{11}/C_{33}	3.2	2.77	3.1	2.94	2.99	2.99	4.26	4.39	3.21
C_{66}/C_{44}		2.58	3.3	3.70	3.49	3.77		7.64	4.55

1) Z.A.Iskender-Zade et al., Sov.Phys.S.S.19(1977)492. 2) V.Ya.Altshul et al., pss(b) 98(1980)K5. 3) M.Yamada et al., JPSJ40(1976)1778. 4) T.C.Chiang et al., SSC28(1978)173. 5) Y.Honma et al., JPSJ52(1983)2777. 6) B.M.Powell et al., J.Phys.C10(1977)3039. 7) C.Hamaguchi et al., 3rd Int.Conf.Phonon Scat.Condensed Matter, 1979 (Plenum Press 1980)p.441.