

# GaAs単結晶の熱伝導率と散乱機構

電子材料学講座 池部研究室 浜田 和宏

## 1 序論

Ⅲ-V族化合物半導体GaAsは、Siに比べ電子の移動度が室温で5倍以上大きく、超高速トランジスタへの応用が盛んに研究されている。又、バンドギャップの大きさから、オプトエレクトロニクス材料への実用化が行われている。しかし、結晶の完全性は、二元化合物であることや、Asが高い蒸気圧を有することなどのため、Siには及ばない。本研究では、GaAsにⅣ族のSiをドーブしたn型、Ⅱ族のZnをドーブしたp型及び、故意に不純物をドーブしない高抵抗GaAsについて、熱伝導率などの物理量を測定し、不純物が熱伝導の散乱のメカニズムにどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的としている。なお3つの単結晶は、いずれも同和鉱業製のものである。

## 2 実験方法

### (1) ホール係数の測定

正形状の試料の4隅に超音波はんだごてを用いて、インジウムはんだで端子を取り付け、ファンデルパウ法によりホール係数、移動度、キャリア密度を決定した。なお測定は液体窒素温度と室温について行った。

### (2) 電気抵抗率の測定

直流四端子法により、77~240K まで測定した。

### (3) 熱伝導率の測定

試料の一端は、銅ブロックにインジウムはんだを用いて熱的に接触させ、銅ブロックとヘリウム冷凍機のCold Headの熱的コンタクトを良くするため、アピエゾンNグリースを接触面に薄く塗布してある。他端には抵抗ヒーターを熱的に接触させた。Au(Fe)-クロメル熱電対は試料に熱的に接触させた。今回使用した試料は、厚さがZn, Non-dopedの場合は0.408 (mm)、Si-dopedの場合は0.650 (mm)であり、幅はそれぞれ2.7~3.0 (mm)であり、定常熱流法により測定を行った。熱伝導率 $k$ は

$$k = LQ / (\Delta T \cdot S) \quad (1)$$

Q : 熱流 L : 端子間距離  $\Delta T$  : 温度差 S : 試料の断面積  
と定義される。

## 3 結果及び考察

Si-doped, Zn-doped GaAsの電気抵抗率の温度依存性を図1に示す。また、この2つの試料のホール係数測定の結果を表1に示す。Non-dopedについては抵抗率が高いため、この2つの測定は不可能であった。表1において、本研究による結果と同和鉱業のデータとを比較すると、室温においてはほぼ再現された。二つの試料を移動度から評価する。移動度は、室温付近では光学的フォノン散乱により、低温では不純物散乱により支配される。しかし不純物濃度が高くなると、室温での不純物散乱の影響は無視できなくなり、 $10^{17}$  (cm<sup>-3</sup>) 以上になると、室温と77Kでの移動度の差はほとんどなくなる。つまり移動度は不純物散乱により支配される。この2つの試料はともに、キャリア濃度が $10^{18}$  (cm<sup>-3</sup>) 以上であり、Si-dopedは、ほぼ文献の内容と一致する。図1からSi, Zn-dopedが金属的な振る舞いをするのがわかる。特にSi-dopedについては、電気抵抗率が一定であることから、抵抗は残留抵抗によるものと言える。なおホール係数は、Zn-dopedが $R_H = 0.34$  (cm<sup>3</sup>/C)、Si-dopedが $R_H = -1.66$  (cm<sup>3</sup>/C)となり、室温ではSiはドナー、Znはアクセプターとして働く。次に3つの単結晶の熱伝導率の温度依存性を図2に示す。この3つの単結晶の伝導散乱機構を明らかにするために、緩和時間近似による解析を行った。それについて図3、図4、図5に示す。全熱伝導率 $K$ は、電子

熱伝導率 $K_e$ とフォノン熱伝導率 $K_{ph}$ から成り、 $T \ll \Theta$  ( $\Theta$ : デバイ温度)での極低温においては、Wiedemann-Franz則を用いて、 $K_e$ を分離することができる。これより熱輸送に関しては、電子はほとんど寄与していないので、TW理論を用いた解析は測定された $K$ を $K_{ph}$ として行った。フォノン熱伝導率は、ボルツマンの輸送方程式を緩和時間近似を用いて解くことで次のように書ける。

$$\kappa_{ph} = \frac{3dnRv^2}{M} \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \tau_{ph}(x) \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (2)$$

ここで $x$ はフォノンの還元エネルギーである。複数の散乱過程が存在するとき、(2)式中の $\tau_{ph}(x)$ は以下のように表される。本研究ではフォノン散乱過程として、境界、フォノン、点欠陥、及び伝導電子を考えた。

$$\tau_{ph}^{-1} = \tau_b^{-1} + \tau_u^{-1} + \tau_p^{-1} + \tau_e^{-1} = \tau_b^{-1} + P(Tx)^4 + Ux \exp\left(\frac{-\Theta_D}{\alpha T}\right) + E(Tx) \quad (3)$$

ここで $\tau_b$ は境界散乱によるフォノンの緩和時間、 $U$ はフォノンによるフォノン散乱の強さ、 $P$ は点欠陥によるフォノン散乱の強さ、 $E$ は電子によるフォノン散乱の強さである。まず、Non-dopedについて解析を行った。これについては抵抗が高いので、電子の寄与を省いて考えた。次にそこから、点欠陥を増やしてZn-dopedの計算値とフィットするかどうか試してみたが、フィットしなかった。なお、Zn-dopedとSi-dopedは、キャリア濃度から判断し、パラメーターとして $\tau_e^{-1}$ を導入した。解析の結果、Zn-dopedについては、ウムクラップ過程の他、境界や電子の寄与が大きく、これらが $\kappa$ - $T$ 曲線を下方に押しやると思われる。

#### 4結論

解析の結果、Zn-dopedはウムクラップ過程の他、境界や電子のフォノンに関する寄与が見られた。3つの単結晶いずれについても、フォノン散乱への点欠陥の寄与は少ない。SiとZnをドーパした場合の $\kappa$ - $T$ 曲線の差は、EPDの値より、Znは置換されにくいことと、Znのキャリア濃度がSiと比較して1桁以上高いのが原因と思われる。

	Si-doped			Zn-doped			Non-doped	
	液体窒素	室温	同和純業データ (室温)	液体窒素	室温	同和純業データ (室温)	同和純業データ (室温)	同和純業データ (室温)
$\rho(\Omega\text{cm})$	$1.60 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-3}$ ~ $1.6 \times 10^{-3}$	$4.18 \times 10^{-3}$	$5.91 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-3}$ ~ $4.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^7$	
$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	1160	1340	2400~1800	0.249	53.1	76~62	7100	
$n(\text{cm}^{-3})$	$3.36 \times 10^{18}$	$2.86 \times 10^{18}$	$1.2 \times 10^{18}$ ~ $2.1 \times 10^{18}$	$6.00 \times 10^{21}$	$1.83 \times 10^{19}$	$9.8 \times 10^{18}$ ~ $2.2 \times 10^{19}$	$3.5 \times 10^7$	
EPD( $\text{cm}^{-2}$ )			$3.5 \times 10^4$ ~ $1.8 \times 10^4$			$6.9 \times 10^3$ ~ $4.5 \times 10^4$	$1.6 \times 10^4$ ~ $2.0 \times 10^4$	

表1. Zn, Si, Non-dopedの電気伝導率、移動度  
キャリア濃度、EPD

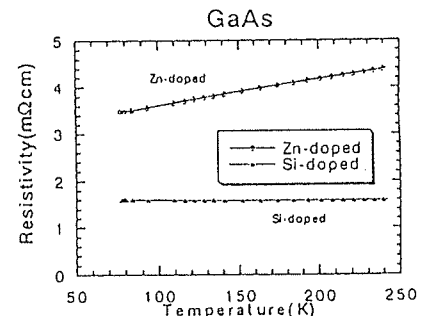


図1. Zn, Si-dopedの電気抵抗率の温度依存性

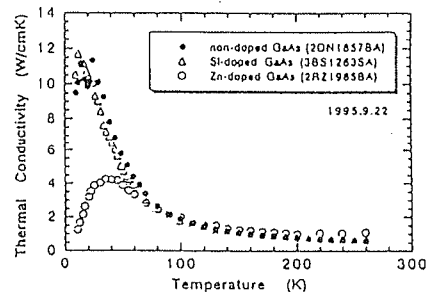


図2. Zn, Si, Non-dopedの熱伝導率の温度依存性

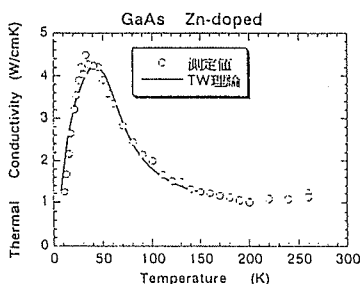


図3. Zn-dopedにおける熱伝導率の緩和時間近似

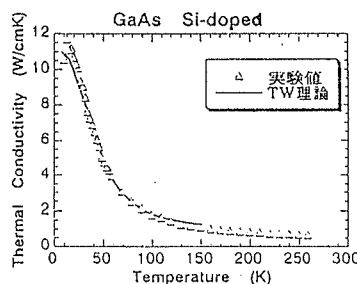


図5. Si-dopedにおける熱伝導率の緩和時間近似

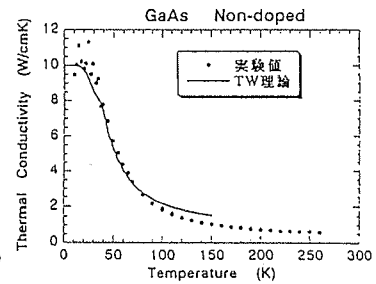


図4. Non-dopedにおける熱伝導率の緩和時間近似