

N 型 InSb 的光子牵引效应

成春伟 王学忠 刘继周 史守旭 刘彩霞 甘子钊

(北京大学物理系、固体物理所)

本文报道了我们关于 N 型 InSb 光子牵引效应的研究工作。不同于 P 型 Ge 的价带间跃迁, N 型 InSb 的红外吸收是自由载流子吸收, 是二阶量子跃迁过程。除了电子和光波的相互作用外, 还同时有电子和声子或杂质中心的相互作用。我们研究了在这种情况下, 载流子和光波的动量交换如何引起光子牵引效应。由于 InSb 是典型的窄禁带半导体, 电子有效质量很小, 可以指望它有较强的光子牵引电流。对 N-InSb 光子牵引的报道是很少的。

在自由载流子吸收理论中略去了光子波矢 \mathbf{q} 的影响。在 N 型 InSb 的自由载流子吸收的量子理论的基础上, 考虑到 $\mathbf{q} \neq 0$, 利用 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 微扰近似表达二阶跃迁矩阵元, 保留矩阵元中与 \mathbf{q} 的一次方成正比的量, 把此表达式用于求在光场作用下的电子分布函数, 可以得到分布函数的稳态表达式。具体分析表明, 它反映了电子在 \mathbf{k} 空间的不对称分布, 这相当于有电流, 可求出电流表达式为

$$\mathbf{j} = \sum_{\mathbf{k}} \sum_{\mathbf{k}'} e \Delta M(\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{q}) \{ \tau(\mathbf{k}) \mathbf{v}(\mathbf{k}) - \tau(\mathbf{k}') \mathbf{v}(\mathbf{k}') \} \cdot \{ f^{(0)}(\mathbf{k}) - f^{(0)}(\mathbf{k}') \} \delta(E(\mathbf{k}) + \hbar\omega - E(\mathbf{k}')),$$

其中 $f^{(0)}$ 是热平衡的分布函数, $\tau(\mathbf{k})$ 是波矢为 \mathbf{k} 的电子弛豫时间; $\mathbf{v}(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}}$ 是波矢为 \mathbf{k} 的电子速度, $\Delta M(\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{q})$ 是前面提到的与 \mathbf{q} 的一次方成正比的量。利用 Kane 关于 InSb 能带结构的模型, 考虑电离杂质散射、声子散射等不同散射机制, 可分析光子牵引电流随温度的变化关系。由于不同的散射机构的弛豫时间与载流子能量的依赖关系是不同的, 因此, 光子牵引的温度关系是比较复杂的。

实验装置和 P 型 Ge 所使用的装置相同。

对一系列不同载流子浓度的 N 型 InSb 样品进行了从液氮温度到室温的测量。

从测量结果可以看出, N 型 InSb 在低温下有较大的光子牵引电压信号, 在液氮温度附近与 P 型 Ge 的光子牵引电压有相同的数量级, 实验中尚未观察到明显的各向异性。光子牵引张量随温度变化比较复杂。考虑到 InSb 中电子受到声学声子, 光学声子以及电离杂质三种主要散射机制的作用, 再考虑到在高于 200 K 后, InSb 样品中出现相当多的本征载流子, 电子和空穴的散射是近似于电子和电离杂质中心的散射的, 从理论上大致可以说明这种温度关系。