

P 型 Ge 的光子牵引效应

王晓谦 王学忠 曹树石 朱印康 甘子钊

(北京大学物理系、固体物理所)

本文报道了我们对 P 型 Ge 光子牵引效应理论和实验的系统研究。

红外激光通过 P 型 Ge 样品时, 发生空穴带间的跃迁。分别考虑重、轻空穴带在 k 空间的分布函数 $f_1(k)$ 和 $f_2(k)$, 引入散射弛豫时间 $\tau_1(k)$ 和 $\tau_2(k)$, 可以得到光场作用下稳态的分布函数。具体分析表明, 这是一个 k 空间上的不对称分布, 因而半导体中将有轻、重空穴电流产生, 即光子牵引电流。

利用 P 型 Ge 的价带结构, 计算了轻、重空穴带间光跃迁的矩阵元。我们在计算中考虑了 P 型 Ge 价带结构的各向异性, 说明了光子牵引电流的张量性质乃是 Ge 的价带各向异性的反映。我们也计算了光子牵引张量 b 和 η 随温度的变化关系, 计算表明光子牵引电流来自于方向相反的轻、重空穴电流两部分的贡献。考虑不同的散射机制, 可以解释实验中的光子牵引电流反号现象以及和温度的关系。

计算中还考虑了饱和效应以及从受主能级到轻空穴带的跃迁过程, 理论结果还可以推广到 P 型 GaAs 等带间跃迁光子牵引过程的分析。

为了提高观察的精度, 有利于实验条件的控制, 我们采用 CW CO₂ 激光器为光源, 用锁定放大器进行测量, 测量的光子牵引电压下限可达 10^{-9} V。样品为 $3 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ 的 P 型 Ge 晶体, 长轴的晶向有 [111], [110] 和 [100] 三种。

对一系列不同掺杂浓度和迁移率的 P 型 Ge 样品, 依上述三个不同的晶向, 测量了 CO₂ 激光通过时产生的纵向和横向电压, 并在 20 K 到室温测量了光子牵引电压的数值。为了与理论进行比较, 我们还同时测量了这些样品的电阻率、霍尔系数以及光吸收系数随温度的变化。

在液氮温度到室温的温度范围内, 观察到了光子牵引的各向异性以及在某一温度下光子牵引电流反号的现象, 不同浓度, 不同晶向的样品具有不同的反号温度, 这些结果同前人已有的一些工作结果是一致的。

在液氮温度以下, 测量表明 $|b|$ 随温度的减小而迅速增大, 比室温下的数值大 1~2 个数量级, 且 b 与 η 具有不同的温度依赖关系, 这同理论的分析是一致的。如果认为重、轻空穴的散射弛豫分别由声学声子散射、光学声子散射以及电离杂质散射贡献, 按照它们与温度的不同关系, 适当选择参量, 可以相当满意地解释 b 和 η 随温度的变化。这说明光子牵引效应能提供关于空穴散射的进一步的信息。