

HgCdTe 自由载流子光电导过程中的热电子效应

王威礼 邢启江

(北京大学物理系)

摘要——用连续运行的可调谐 CO₂ 激光器研究和观察 N 型 Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te 在 100 K 时的自由载流子吸收和光电导, 发现光激发引起热电子温度和迁移率的增加。实验结果指出电离杂质散射是造成迁移率变化的主要原因, 有可能发展成一种新型的远红外探测器。

一、前 言

长期以来, 在半导体光电导方面进行了大量的研究。事实上, 光电导是一个相当复杂的物理过程, 包括了光吸收、热电子的弛豫、载流子的输运和非平衡载流子的复合等过程。因此, 对光电导的研究为深入分析半导体的特性和许多基本物理机理提供了可靠的实验依据。

对于 N 型半导体材料, 由光激发引起的光电导可表示为

$$\Delta\sigma = e(\mu \Delta n + n_0 \Delta\mu), \quad (1)$$

其中 e 是电子的电荷量; n_0 是无光照时的电子浓度; Δn 是光激发产生的附加非平衡电子浓度; μ 是电子迁移率, 这里, 我们强调 μ 与电子所处的状态有关, 所以它是电子温度的函数, 而电子温度可能不同于晶格温度; $\Delta\mu$ 是光激发电子到较高的能量状态后, 引起迁移率的改变量。显然, 对于本征和杂质光电导, 公式(1)中等号右边第一项起主要作用。而在带内自由载流子激发引起的光电导过程中, 并不产生任何附加的非平衡载流子, 只改变了载流子所处的状态, 所以第二项将起主要作用。

半导体中热电子的早期研究主要集中于高电场下均匀半导体样品的输运过程。从外电场获得能量的热电子通过散射将能量传递给晶格, 在高电场下热电子的迁移率并不是常量, 结果导致偏离欧姆定律的实验事实^[1], 利用窄禁带半导体 InSb 的自由载流子光电导过程中的热电子效应已制成毫米波段探测器^[2]。

本文主要描述用 CO₂ 激光器作为红外光源研究窄禁带半导体 HgO₂Te 的自由载流子吸收和光电导过程, 通过热电子的电离杂质散射机理成功地解释了实验现象。

二、理论分析

1. 自由载流子光电导和光吸收

当光子能量低于禁带宽度的能量 ($\hbar\omega < E_g$) 时, 半导体所吸收的光频电磁场能量不足以产生本征激发, 但可引起导带内电子跃迁到较高的能量状态, 并具有较大的平均动能。按经典的德鲁德-洛伦兹理论, 并利用导带电子有效质量 m^* 代替自由电子质量 m , 即可得到自由载流子光电导和吸收系数如以下形式^[3]:

$$\Delta\sigma = \sigma_0(1 + \omega^2\tau_e^2)^{-1} \quad (2)$$

和

$$\alpha = \frac{4\pi\Delta\sigma}{C\epsilon^{1/2}} \quad (3)$$

其中

$$\sigma_0 = n_0 e^2 \tau_e / m^* \quad (4)$$

这里 ω 是光频电磁场的角频率; τ_e 是自由载流子电子的散射弛豫时间, 可直接根据迁移率测量数据公式 $\mu = e\tau_e/m^*$ 求得; ϵ 是介电常数; σ_0 是无光照时的直流光电导。公式(2)和公式(3)虽然是由经典理论推得, 但根据严格的量子理论也可以得到非常相似的形式^[4]。实验中选用 CO₂ 激光器, 其波段角频率为 $1.8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, HgO₂Te 样品在 77 K 时的迁移率为 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$, 可求得电子的散射弛豫时间为 $0.8 \times 10^{-12} \text{ s}$ 。因此, 只要满足 $\omega\tau_e \gg 1$ 的条件, 自由载流子光电导和吸收系数都具有与波长 λ^2 成正比的关系。

2. 光激发热电子过程

按经典理论可知, 热电子的平均能量和热电子温度满足

$$E_K = \frac{3}{2} k_B T_e \quad (5)$$

由于光功率 P 的激光束激发自由载流子的跃迁, 造成热电子温度的变化 $\Delta T_e = T_e - T_0$, 得到

$$\frac{\alpha P}{\pi w_1^2} = \frac{3}{2} n_0 k_B (T_e - T_0) / \tau_e \quad (6)$$

这里 T_0 是晶格的温度, k_B 是布尔兹曼常数, w_1 是激光束光斑的半径。由此得到热电子温度的改变量与光功率密度成正比的关系。

在输运过程中, 电子将经历各种不同的散射, 当计入各种散射后, 迁移率应由下式决定:

$$\frac{1}{\mu} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (7)$$

式中 μ_i 为对应于各种散射过程的迁移率, 它们与温度有不同的依赖关系。所以当热电子温度变化时, 迁移率的变化导致自由载流子光电导为

$$\Delta\sigma = e\mu(T_e)n_0 - e\mu(T_0)n_0 \quad (8)$$

当热电子温度变化不太大时, 式(8)又可改写为

$$\Delta\sigma = en_0(\partial\mu/\partial T_e)_{T_e=T_0}(T_e-T_0) \quad (9)$$

在主要只有电离杂质散射时, 迁移率与温度的关系服从 $T^{3/2}$ 定律^[5], 即

$$\mu = BT_e^{3/2}, \quad (10)$$

其中 B 是由半导体特性参量决定的比例常数。因此, 可以得到

$$(\partial\mu/\partial T_e)_{T_e=T_0} = \frac{3}{2} \frac{\mu(T_0)}{T_0} \quad (11)$$

把式(11)代入式(9)后, 得到

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{3}{2} \left(\frac{T_e-T_0}{T_0} \right) \quad (12)$$

这样, 就不难理解自由载流子光电导和热电子温度或激光光功率的正比关系。

三、实验测量与结果

自由载流子光电导和光吸收是同时测量的, 实验装置如图 1 所示。红外光源利用连续

运行的 CO_2 激光器, 采用刻线为 120 线/mm 的光栅, 可以在 $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 的波段范围内得到 50 条以上单线输出的功率大于 1 W 的激光谱线。组分 $x=0.22$ 的 N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品(在 77K 时净掺杂的浓度 $N_d-N_a \sim 5 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$, 迁移率 $\mu \sim 2 \times 10^5\ \text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$) 经过表面研磨、抛光并用溴和甲醇的混合液化学腐蚀后, 得到厚度为 1 mm 的矩形样品, 在矩形短边的两端用 In 焊接两个电极。样品置于带 ZnSe 红外光学窗口的低温液氮杜瓦瓶中, 保持温度为 100 K。用偏振器作为衰减器来控制激光束光强的 大小, 再经过斩波器, 用 ZnSe 透镜会聚成 $\sim \phi 1\ \text{mm}$ 的光斑投射在样品的前表面上。光电导信号用 锁定放大器测定, 经过后表面的透射光强用 RK1500 型热释电功率计测量。

图 2 给出了在不同激光谱线条件下自由载流子光电导(带内光电导)与光强关系的实验测量结果, 从图中可以清楚地看出: (1) 自由载流子光电导与光强成正比关系, 实验点很好地符合于图中的直线。(2) 自由载流子光电导的大小与入射光波的波长有关, 随波长的增长而增加。

吸收系数的测定是通过测得的透射率 T_r 按以下公式计算得到:

$$T_r = \frac{(1-R)^2 e^{-2l}}{1-R^2 e^{-2\alpha l}}, \quad (13)$$

这里 l 是样品的厚度; $R = (n-1)^2/(n+1)^2$ 是反射率; n 是折射率, 在计算中取 $n=3.5$ 。图 3 分别给出吸收系数 α 和光电导 $\Delta\sigma$ 的实验测量结果, 图中用波长的平方 λ^2 为横坐标。图中的直线关系进一步说明了在光电导过程中自由载流子的热化起主要作用。

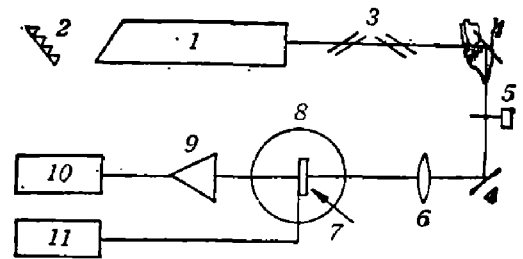


图 1 实验装置图

- 1— CO_2 激光器, 2—光栅, 3—偏振片, 4—反射镜, 5—斩波器, 6—ZnSe 透镜, 7— HgCdTe 样品, 8—低温液氮杜瓦瓶, 9—热释电探测器, 10—RK5100 功率计, 11—锁定放大器

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

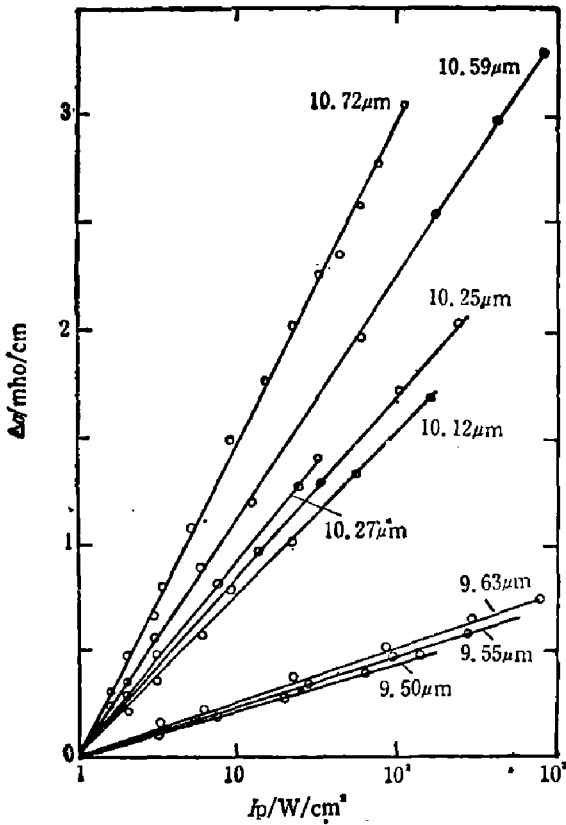


图2 100K 时 $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ 的自由载流子光电导(带内光电导)与光强的关系
Fig.2 The power dependence of free carrier photoconductivity (intraband photoconductivity) in $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ at 100K.

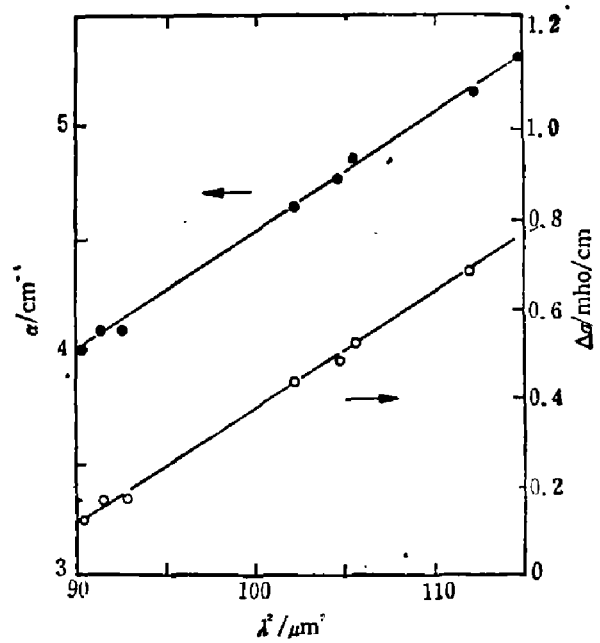


图3 100K 时 $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ 的自由载流子吸收和光电导
Fig.3 Free carrier absorption and photoconductivity in $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ at 100K.

四、讨 论

1. 在光电导过程中, 激光束照射样品有使晶体材料被局部加热的可能性。假设激光束对晶体内起作用的体积是半径为 w_1 的圆柱体, 产生的热量又通过另一个较大半径 w_2 的圆柱面向外热传导, 引起的局部温升为

$$\Delta T = \left(\frac{\alpha P}{2\pi kl} \right) l_n \frac{w_2}{w_1}. \quad (14)$$

在光功率 $P=100 \text{ mW}$ 时, 对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品进行了估算, 样品厚度 $l=1 \text{ mm}$, $w_1=0.05 \text{ cm}$, $w_2=0.25 \text{ cm}$, 热导系数 $k=0.2 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1[6]}$ 样品的温升约 1.28 K 。但是 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 禁带宽度的温度系数是正值, 为 $dE_g/dT=3 \times 10^{-4} \text{ eVK}^{-1[7]}$, 所以样品温升的结果使禁带宽度的能量值增加, 相应地只会引起自由载流子数目的减小, 与实验观察结果不符, 所以温升不是产生自由载流子光电导的机理。

2. 对于 N 型半导体, 光激发的自由载流子(电子)从光频电磁场获得一定的能量和动量后, 在动态平衡过程中又通过各种散射机构失去附加的能量和动量, 其中首先是电子之间的散射相互作用, 这种散射的平均时间极短, 一般小于 0.01 ps , 所以并不能改变电子具有的能量或动量的总和。电子从光频电磁场获得单一能量值, 通过散射过程中电子间的能量交换, 最终使电子的速度分布遵循麦克斯韦分布律。

在任何时候都同时存在几种散射机构,可以有声学波、光学波、电离杂质、位错和压电散射。通常位错和压电散射很弱,声学波和光学波的散射使迁移率与温度成反比,热电子温度的增加使光电导减小,也与实验测量结果不符。只有在以电离杂质散射机构为主时,才有迁移率与自由载流子光电导和热电子温度成正比的关系,这和自由载流子光吸收^[9]和高电场下热电子^[9]的测量与分析基本一致。

3. 具体分析表明^[10],由密度为 N_i 的电离杂质散射得到的迁移率为

$$\mu = \frac{64\pi^{1/2}\epsilon^2(2k_B T_e)^{3/2}}{N_i Z_1^2 e^3 m^{*1/2}} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi\epsilon k_B T_e}{2e^2 N_i^{1/2}} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, \quad (15)$$

其中 $Z_1 e$ 是电离杂质的电荷,热电子温度变化对大括号内自然对数项的影响较小,可以忽略不计。由此得到迁移率与电子温度 T_e 的 $3/2$ 次方成正比的规律,并且可以看出在窄禁带半导体中电子的有效质量很小(例如对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $x=0.22$, $m^*=0.007m$),有利于从实验上观察自由载流子光电导过程中的热电子效应,并可能利用这种效应制作新型的远红外光电导探测器。

4. 利用自由载流子光电导的热电子效应制成的红外探测器的灵敏度为^[10]

$$S = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dE}, \quad (16)$$

其中 $E = \frac{\alpha P}{\pi w_1^2}$ 是自由载流子吸收的光功率密度,当电离杂质散射为主时,利用公式(11)可以得到

$$S = \frac{3}{2T_e} \frac{dT_e}{dE}, \quad (17)$$

因此,在低温液氮条件下将会进一步提高热电子效应和探测器的灵敏度。

致谢——华北光电技术研究所红外部对本工作给予了热情的支持,中国科学院上海技术物理研究所钱定榕同志对本工作提出了宝贵的意见,与作者作了有益的讨论,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Gunn J. B., *Progress in Semiconductors*, 2(1957), 213.
- [2] Rollin B. V., *Proc. Phys. Soc.*, 77(1961), 1102.
- [3] Putley E. H., *Physica Status Solidi*, 6(1964), 571.
- [4] Fan H. Y., *Semiconductors and Semimetals*, 3(Academic Press, 1967), 406.
- [5] Brooks H., *Phys. Rev.*, 83(1961), 879.
- [6] Long D. et al, *Semiconductors and Semimetals*, 5(Academic Press, 1970), 175.
- [7] Guenzer C. S. and Biemenstock A., *Phys. Rev.*, B8(1973), 4655.
- [8] Diangrong Qian et al., *Solid State Comm.*, 56(1985), 813.
- [9] Elliott C. T. and Spain I. L., *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 7((1974), 727.
- [10] Conwell E. M. and Weisskopf V. F., *Phys. Rev.*, 77(1950), 388.

HOT ELECTRON EFFECTS IN FREE CARRIER PHOTOCONDUCTIVITY IN HgCdTe

WANG WEILI XING QIJIANG
(*Department of Physics, Peking University*)

ABSTRACT

The research and observation of free electron absorption and photoconductivity in N-type $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ at 100k have been made using a CW tunable CO_2 laser. It is found that the Photoexcitation gives rise to an increase in the hot electron temperature and a change of mobility. The analysis of experimental results shows that the ionized impurity scattering dominates variation of the mobility. There is a possibility to develop a new type far infrared detector.