

HgCdTe 中特征正电子湮没 寿命值的确定*

何元金¹⁾

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

辛明瑞

(中国陕西骊山微电子公司 西安 710600)

张天保

(中国科学院高能物理研究所应用部 北京 100080)

1993年4月23日收到

摘 要

提出了一种新的在热平衡状态下实时测量碲镉汞 (MCT) 中特征正电子湮没寿命的方法, 用该方法测得 HgCdTe 中基体正电子湮没寿命 τ_b 为 $277 \pm 1\text{ps}$, 汞空位缺陷捕获态寿命 τ_d 为 $306 \pm 2\text{ps}$, 并与用其它方法测量的结果进行了比较与讨论。

关键词 正电子湮没, 碲镉汞半导体缺陷, 汞空位。

1 引 言

碲镉汞 (MCT) 是一种十分重要的红外探测器材料, MCT 中汞空位对该材料电学性质的影响一直是人们感兴趣的研究课题, 近来用正电子湮没方法测量和研究 MCT 中的汞空位受到了人们的关注^[1-3], 因为正电子湮没谱方法可能成为一种独立的测量 MCT 中汞空位浓度的手段。

在将正电子湮没技术应用于材料缺陷的研究中, 最重要的也即最基本的材料参数是 τ_b 和 τ_d 。这里 τ_b 是指处于基体态的正电子湮没的寿命, 而 τ_d 是指处于缺陷捕获态的正电子湮没的寿命。在半导体 Si 和 GaAs 材料中, τ_b 和 τ_d 值在实验和理论两方面都已有了较一致的结果, 然而在 MCT 中已有的实验结果尚不够充分, 理论计算值尚未见报导。

为从实验上获得较为准确的 τ_b 和 τ_d 值, 除了寿命谱仪本身的正确标定以外, 更重要

* 中国科学院核分析技术开放研究实验室开放课题。

1) 中国科学院国际材料物理中心协联成员。

的是制备特征样品。人们或许可仿造制备金属样品的方法,即通过长期退火来获得无缺陷样品,通过将样品升到一定温度后再淬火处理使缺陷冻结来获得特征缺陷样品,但由于 MCT 这种材料的特殊性即它的脆性、多种缺陷性以及不均匀性,上述传统的制样方法也许不一定可靠,因此最好有多种方法来制样和测量。本文提出的加汞升温原位测量法即是沿着这种思路提出的一种新方法。它的基本原理是利用控制汞的分压来控制样品中热平衡态下的汞空位浓度并进行实时测量,所得出的结果能较准确地反映汞空位的正电子湮没参数。将一定数量的汞与样品放在密闭管中,在样品与汞同时加热过程中,在实验初期,且温度不太高时,由于有过量汞存在,汞气压达到过饱和,样品中汞空位浓度较低,这时所测得正电子湮没平均寿命接近于 τ_b ; 而当实验继续进行到过量汞全部蒸发完(转移到炉中较冷部分)且温度较高时,这时汞气压降低,将有大量平衡态热空位出现,当空位浓度增多到使正电子捕获过程饱和时,实测所得正电子平均寿命即为 τ_d 。

2 实 验

实验采用的是碲溶剂法生长的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品 $x = 0.20$, 它们是从同一晶锭上切割下来的相邻的两块, $\phi 14 \times 1.5\text{mm}$, 未经热处理。样品经抛光和在溴-甲醇溶液中 5 分钟浸蚀后用去离子水冲洗干净并用氮气吹干后待用。正电子源是强度约为 $10\mu\text{Ci}$ 的液体 $^{22}\text{NaCl}$, 源液直接滴在样品表面上, 盖上另一片样品后用铝箔包裹起来, 一起封装到一个特制的可以密封抽真空的石英管内, 管中预先滴入一定量的汞, 以便在加热时维持一定的汞分压, 整个石英管放到一个特殊设计的加热炉内(参见图 1)。正电子湮没光电倍增管探头放在炉外, 与炉壁保持一定距离并用风扇吹风冷却。

为了在一次实验中同时得到 τ_b 及 τ_d , 石英管内放入的汞的量是个很重要的参数。既要保证在升温过程初期在样品处有足够的过量汞存在, 又不能太多, 以免在实验后期为使样品处的汞耗尽而使实验拖延的时间太长。在所采用的样品几何及石英管尺寸下, 实验开始时放入的汞量约为 5g。

正电子寿命谱仪为传统的快-快符合系统, 仪器时间分辨率为 320ps, 每个寿命谱计数积累到 5×10^5 , 在每一个温度下取四个谱, 将四个谱按峰位对齐迭加以后进行二成分拟合, 并得出平均寿命。测量过程分三个阶段:

阶段 I: 室温 25°C 升到 362°C , 每隔 $5-10^\circ\text{C}$ 就在当时温度下测量寿命谱;

阶段 II: 从 362°C 降至室温并每隔 $5-10^\circ\text{C}$ 进行寿命谱测量;

阶段 III: 从室温快速升温到 333°C 后, 再按每间隔 $8-15^\circ\text{C}$ 进行寿命谱测量, 直至 556°C , 这时正电子平均寿命已趋于饱和。

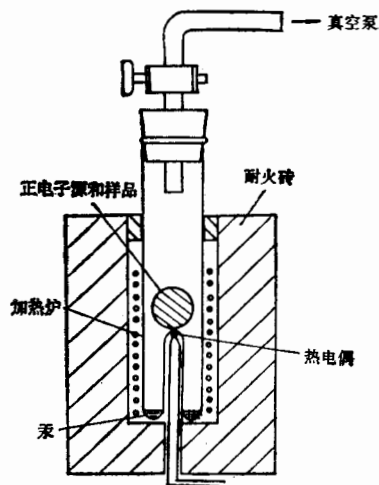


图 1 加汞升温原位正电子湮没寿命谱测量实验装置示意图

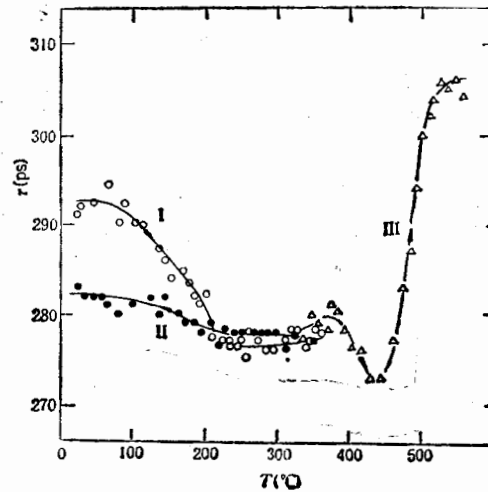


图2 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 中正电子湮没平均寿命随温度的变化

圆圈、圆点以及三角分别代表阶段 I、II、III 的实验点；曲线上的箭头表示实验进行的方向

汞空位的迁移和扩散是个很缓慢的过程，为了使测量结果能反映处于平衡态的汞空位浓度，升温或降温过程进行极为缓慢，即约每3小时改变温度5—10℃。在温度改变1小时后分四次测量4个谱，比较这四个谱分别进行数据处理的结果可知，其间差别在2ps以内，而且与先后顺序没有一定关系，说明误差主要属统计性质，与汞空位扩散没有联系，说明实验所采用的升温速度是足够缓慢的。三个阶段的实验连续进行总共约15天，全部实验结果所得平均寿命 τ 作为温度的函数示于图2。

3 结果与讨论

由图2可看出，刚生长样品的平均寿命值较高，这说明样品中存在较多的生长缺陷，随着温度升高，正电子平均寿命减小，这说明生长缺陷随着退火过程消除，待到升温至200℃以上后，平均寿命值减小至一最小值277ps，并一直保持到温度达约350℃。在200℃—350℃之间，由于汞蒸气处于过饱和状态，样品中存在的汞空位数量很少，而且由于加热退火，部分生长缺陷被消除，因此这时样品中正电子平均寿命值应十分接近于基体材料中正电子湮没的寿命，因此可得出 $\tau_b = 277\text{ps}$ 。

值得指出的是样品经阶段II实验降温到室温以后，正电子平均寿命反而比300℃时的值277ps升高了，达约282ps。对其它样品的多次实验表明，经约250℃退火以后样品在室温至250℃之间正电子平均寿命随温度的变化是一个可逆的过程，即是说在该温度范围内，升高温度则寿命降低，而降低温度则寿命增大。我们将这一现象归结为正电子捕获效应的负温度效应，它可能是存在于MCT样品中的某种正电子浅势阱缺陷引起的。关于这点，将在另文中讨论。下面仅就这点作定性的说明：在MCT样品中除汞空位外，尚可能存在碲沉淀晶格位错等其它缺陷，对正电子平均寿命的增大也有贡献。汞空位由于有较强的负电性和较大空间，对正电子捕获作用较强，而其它缺陷则捕获作用较弱

可统称之为正电子的浅势阱,被浅势阱捕获的正电子在热激发下可能逃逸出捕获中心,故高温下浅势阱使平均寿命增大的贡献减少,使总的正电子捕获效应出现负温度效应。

在阶段 III 实验中,当温度升至 440°C 左右时,正电子平均寿命有进一步减小,这是由于这时样品管内汞蒸汽压较高造成的,这时可能出现液态汞在样品表面的凝聚,使正电子平均寿命变小。当温度升高超过 460°C 以后,正电子平均寿命急剧上升,这是由于大量汞蒸汽蒸发后在样品室内其它低温部分冷凝(实验结束拆卸样品室时发现管口等低温部位有汞液滴),而样品处的汞已耗尽,汞蒸汽压已脱离饱和,样品中迅速产生大量汞空位造成的,当温度 > 500°C 时,正电子平均寿命的增大趋于饱和,这时的平均寿命值 306ps 即认为等于 τ_d 。

表 1 列出了迄今为止实验测量 HgCdTe 中正电子湮没特征寿命值的结果。从表中可以看出,不同实验室得出的 τ_b 与 τ_d 值的绝对值差别还是比较大的。我们认为,这种差别除了仪器本身的差别以外,更重要的是样品来源和实验条件不一致所成的。

表 1 HgCdTe 中正电子湮没特征寿命值

来 源	τ_b (ps)	τ_d (ps)	τ_d/τ_b
参考文献[2]	256	295	1.11
参考文献[3]	282	310	1.10
参考文献[4]	264	298	1.13
参考文献[5]	286	309	1.08
本工作	277	306	1.10

由表中可以看出,不同工作得到的汞空位中正电子湮没的寿命值 τ_d 比较接近,这说明,无论是在热平衡态下原位测量(文献[3]及本工作),或是将高温低汞压下产生的空位通过淬火冻结下来进行测量(文献[2、4、5]),所得结果是相近的。这两种方法得出的结果比较相近,暗示双电离的汞空位 (V_{Hg}^{2-}) 对正电子捕获基本不存在温度效应,换言之, V_{Hg}^{2-} 是正电子的深势阱。另外,由于 τ_d 值的确定只决定于正电子捕获是否饱和,只要 V_{Hg}^{2-} 浓度大于一定数目以后,该浓度对 τ_d 值的影响就不大了,这也是 τ_d 值易于确定的原因。相比之下, τ_b 值的确定就困难得多了,因为这要求样品是“不存在”汞空位的,而且没有其它可能成为正电子陷阱的缺陷存在。在本工作中,经过阶段 I 实验,在饱和汞压下降温至 350°C 足够长时间以后又降温到室温的样品,可以认为已基本转型成为 n 型样品了,应该基本看作汞空位很少的样品,其平均正电子湮没寿命似乎应接近于 τ_b , 但实际结果是其平均寿命值在室温下并不是最小的,而是比在中温(200°C—300°C)范围内平衡态下原位测得的平均寿命值大(5—8)ps。这说明室温下样品中还可能其它的有正电子陷阱,而这种陷阱是某种未知的正电子浅势阱。在中温范围内,由于逃逸效应,这种浅势阱对正电子的捕获可以忽略,这时才能得到真正的基体态正电子寿命 τ_b 。若以这种观点将文献[5]所得 τ_b 值与本小组(文献[3]及本工作)所得结果对比,则可以看出结果是比较合理的,因为前者是在室温下测量的 n 型样品,其 τ_b 值应该较大,而后者是在 200°C—300°C 之间原位测量的结果,所得 τ_b 值应该较小。本工作与我们前期工作(文献[3])相比寿命值绝对值 (τ_b 与 τ_d) 减小了 4ps,这可能与实验样品是取自不同的研究所有关;两次实验

所得 τ_d/τ_b 值一致,这是由于在所采用的加汞升温原位测量方法中,对 τ_b, τ_d 两个参数的测量是在一个实验中对同一块样品完成的,因此可以精确地确定 τ_d/τ_b 比值。

4 结 论

对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.20$) 样品进行了加汞升温原位正电子湮没寿命谱的测量,得到了正电子在 HgCdTe 中湮没的基体态寿命 τ_b 和双电离的汞空位中缺陷捕获态寿命 τ_d 值分别为 277ps 和 306ps, 比值 τ_d/τ_b 为 1.10。在低温段(室温至 200°C)作者观测到部分可逆的正电子捕获温度效应,这可能是样品中除 V_{Hg}^2 以外的其它正电子浅势阱造成的。经与其它工作对比认为,本文总结提出的加汞升温原位测量法,是确定 HgCdTe 中正电子湮没特征寿命值的较可靠的方法。

参 考 文 献

- [1] B.Geffroy, C.Corbil, R. Triboulet, P. Hautojarvi and P. Moser, *Matter Sci. Forum*, Vol. 10--12(Trans. Tech)(1986)1241.
- [2] R. Krause, A. Polity, A. Klimakow and M. Schenk, *Positron Annihilation* (Singapore: World Scientific, 1988)684.
- [3] Y.J. He, X.F. Li, L.H. Li, W.Z.Yu and J.R. Xiao, *J. Phys.: Condens. Matter (UK)*, 1(1989) SA91.
- [4] R. Krause, A. Klimakow, F.M. Kiessling, A. Polity, P. Gille and M. Schenk, *J. Cryst. Growth*, 101(1990)512.
- [5] C. Gely, C. Corbel and R. Triboulet, *J. Phys.: Condens. Matter (UK)*, 2(1990)4763.

Measurement of Characteristic Positron Annihilation Lifetime in HgCdTe

He Yuanjin

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Xin Mingrui

(Lishan Microelectronics Inc., Xian 710600)

Zhang Tianbao

(Application Division, Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100084)

Received on April 23, 1993

Abstract

A new measurement method of characteristic lifetime of positron annihilation in mercury cadmium telluride (MCT) in thermoequilibrium was proposed. A result of τ_b , the annihilation lifetime of positrons in bulk state in HgCdTe , being 277 ± 1 ps, and τ_d , the lifetime of positrons trapped in mercury vacancies, being 306 ± 2 ps was obtained. The result was discussed and compared with that from other methods.

Key words positron annihilation, defects in mercury cadmium telluride semi-conductors, mercury vacancies.