

高能 Ar^+ 辐照 P 型 CdZnTe 的电学特性和光致发光*

裴慧元¹ 李向阳¹ 方家熊¹ 侯明东²

(1 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

(2 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 采用能量 2GeV、剂量 10^{10} — 10^{13}cm^{-2} 的 Ar^+ 辐照 P 型 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 材料, 对辐照前后和不同辐照剂量的样品进行了电学测试和光致发光研究. 实验结果和分析表明, Ar^+ 辐照在 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 中产生了更大密度的受主型缺陷和散射中心, 引起材料载流子(空穴)浓度的增大和迁移率的降低. 随着辐照剂量的增大, 载流子迁移率的降低要比载流子浓度增大得快, 导致材料电阻随辐照剂量增大而增大.

关键词: CdZnTe ; 电学特性; 光致发光

PACC: 6170; 7200; 7855

中图分类号: TN304.2'6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)11-1392-05

1 引言

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料的辐照效应研究已越来越受到人们的注意. 一方面, 它是公认的外延红外探测器用 HgCdTe 薄膜最重要的衬底材料^[1], 当探测器在外部空间工作时, 包括位于入射面上的 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 衬底在内的探测器各部分都会受到各种辐射的作用. 另一方面, 高阻 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料也是制备室温核辐射探测器的重要材料^[2]. 在探测宇宙射线和应用加速器粒子探测过程中, 各种辐射不可避免地会对探测器和材料本身性能产生各种影响.

目前, 文献中可见到的有 γ 射线、中子、质子辐照 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料和核辐射探测器的一些研究成果^[3-6]. 采用的研究方法有电流-电压(I - V)测试、光致电流瞬态谱(PICTS)等. 但是, 重离子辐照 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料或器件的有关研究在文献中却未见到. 本文将结合辐照前后 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料的电学特性和光致发光实验研究高能 Ar^+ 辐照 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 材料的有关效应.

2 样品及实验方法

实验所用 CdZnTe 晶体采用垂直布里奇曼法生长, 原料为 6N 的 Te 、 Cd 和 Zn , 组分为 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$. 晶体锭条按(111)面切割成为约 1mm 厚的晶片. 将一块较大的样品切割成数片尺寸为 $\sim 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的小片. 从中选择四片样品, 经适当的表面处理制备欧姆接触电极. 另外再选择四小片样品, 预备辐照后进行光致发光实验. Hall 测量表明所选样品为 P 型.

重离子辐照实验所用离子为 Ar^+ (电荷量 17), 能量 2GeV, 采用四个不同的辐照剂量 1×10^{10} 、 1×10^{11} 、 1×10^{12} 和 $1 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$.

每个样品在辐照前后都进行了室温 I - V 特性测试, 所用测试仪器为 Keithley 236 电流测试单元. 光致发光(PL)实验采用 Ar^+ 激光器的 514.5 和 488.5nm 激光谱线作为激发源, 样品放在 Oxford 1204 液氮杜瓦瓶中, 样品温度为 4.2K. 用 InSb CCD 收集光致发光信号, 送入 Nicolet 800 Fourier 变换红外光谱仪中进行分析. 光致发光实验前, 样品

* 国防预研基金(批准号: 11.3.2)和国家自然科学基金(批准号: 19805014)资助项目.

裴慧元 男, 1973 年出生, 博士研究生, 主要从事化合物半导体材料和器件研究.

2001-01-06 收到, 2001-03-07 定稿

表面经 2% 溴+ 20% 乳酸+ 乙二醇溶液稍加腐蚀, 以去除表面脏物.

3 实验结果

3.1 辐照前后样品的 I-V 特性

在辐照实验中, 样品的电极背对着离子辐照. 按照 Trim-96 的计算结果, Ar⁺ 不能穿透样品, 因此电

极不受影响. 图 1 是剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的 Ar⁺ 辐照前后 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 材料的 I-V 特性曲线. 从图中可以看出, 辐照后样品零压电阻 R_{irr} 明显增大. 其他几个剂量辐照后, 零压电阻也有类似情况. 图 2 给出 Ar⁺ 辐照前后, 样品零压电阻之比 R_{irr}/R₀ (R₀ 为辐照前的零压电阻) 随辐照剂量的变化情况. 从图中可以看出, R_{irr}/R₀ 的趋势是随辐照剂量增大而增大.

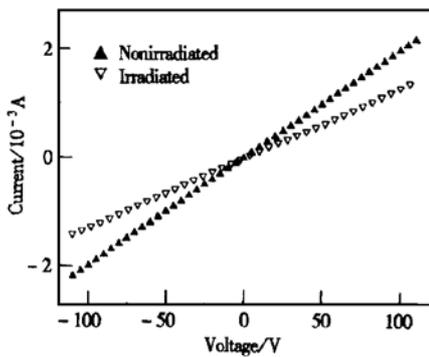


图 1 能量 2GeV, 剂量 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的 Ar⁺ 辐照前后 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 材料的 I-V 曲线
 FIG. 1 I-V Curves of Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te Material Nonirradiated and Irradiated by Ar⁺ (Energy: 2GeV, Fluence: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)

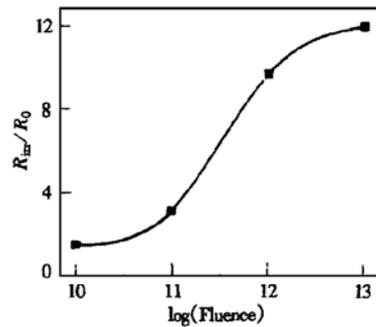


图 2 Ar⁺ 辐照前后, 零压电阻之比随辐照剂量的变化
 FIG. 2 Variation of Ratio of Resistances at Zero Voltage with Fluence Measured on Irradiated and Nonirradiated Materials

3.2 光致发光谱

图 3 给出未经辐照的样品和辐照剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 样品表面光致发光谱. 根据文献[7, 8], 图中的发光带或发光峰可分成为三个区域:

(I) 1.60—1.63eV, 为激子区; (II) 1.50—1.63eV, 与施主-受主对 (DAP) 跃迁有关; (III) 1.30—1.50eV, 则与晶体不完整性或深杂质能级有关, 常称为“1.40 发光带”. 通过比较未辐照样品和各种剂量辐照的样品 PL 谱, 未观察到有新能级的产生.

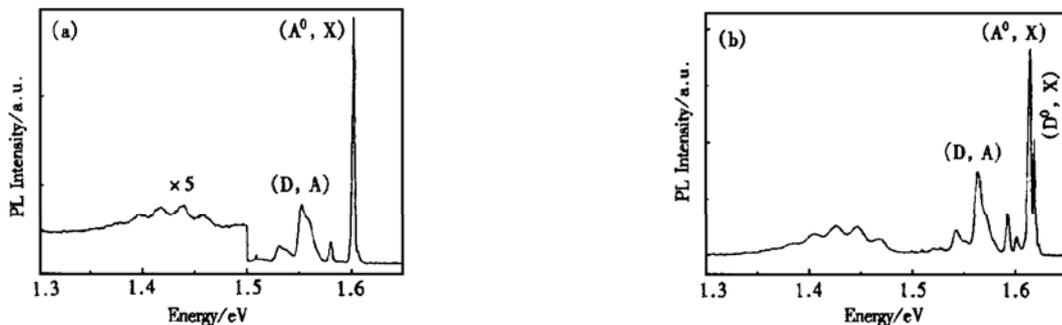


图 3 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 表面低温(4.2K)光致发光谱 (a) 未辐照的样品; (b) 辐照剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的样品
 FIG. 3 Low-Temperature (4.2K) Photoluminescence Spectra of Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te (a) Nonirradiated; (b) Irradiated by Ar⁺ with Fluence of $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

在利用 PL 谱分析 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 样品表面状况时, 一般考虑两个参数^[10]: (1) 辐射缺陷密度, 定义为样品 DAP 发射峰(I_{DAP})和“1.40 发光带”的强度(I_{def})与激子发射主线强度(I_0)之比, 根据比值大小判断样品近表面区缺陷数量的多少; (2) 激子发射主线半峰宽(FWHM), 表征了表面结构的均匀性. 对于这里的 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 样品, 可以看出有两个主要的激子峰, 分别是(A^0, X)和(D^0, X). 由于在大的辐照剂量下, 两个激子峰的强度之差减小, 峰宽都变宽而重叠更多. 为了获得(A^0, X)的 FWHM 值和强度, 近似将它们拟合合成两个 Lorentz 型的峰. 经过这样处理得到不同剂量辐照样品的上述两种参数值, 见表 1.

表 1 不同剂量 Ar^+ 辐照的 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 样品表面光致发光谱数据

Table 1 Data Obtained from PL Spectra of $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ Irradiated by Ar^+ at Various Fluences

Fluence/ cm^{-2}	(A^0, X) FWHM/ cm^{-1}	I_{def}/I_0	I_{DAP}/I_0
0	20.7	0.022	0.222
1×10^{10}	26.26	0.149	0.421
1×10^{11}	28.42	0.421	0.988
1×10^{12}	28.80	0.315	1.158
1×10^{13}	38.29	0.532	3.958

从表 1 中可以看出, 在所选剂量范围内, 激子线(A^0, X)的 FWHM 值随辐照剂量的增大而增大, 辐射缺陷密度 I_{def}/I_0 和 I_{DAP}/I_0 总的趋势也随剂量增大而增大(I_{def}/I_0 在剂量 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 处出现的异

常, 可能与 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 表面存在一定的组分和禁带宽度不均匀性有关^[9], 它影响了激子峰发光强度).

4 分析与讨论

4.1 Ar^+ 辐照对 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 材料电学特性、光致发光的影响

从前面辐照实验情况中可以知道, 样品电极在辐照过程中基本不受影响. 根据欧姆定律:

$$\rho = 1/nq\mu \quad (1)$$

可以推出, 辐照前后材料 $I-V$ 特性曲线零压电阻的变化可能来源于两个方面, 即辐照引起的材料载流子浓度 n 和迁移率 μ 的变化.

表 2 是对一块辐照剂量为 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的样品在辐照前后进行 Hall 测量所得的结果, 测量条件为: 温度 $\sim 200\text{K}$, 磁场强度 $\sim 1.3\text{T}$. 从表 2 中的数据可以看出, 经 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的 Ar^+ 辐照后, 样品的载流子浓度增大约 1 倍, 而迁移率降低了 3 倍, 由公式 (1) 可知电阻增大. 这一结果证明, Ar^+ 辐照在 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 样品中引入的缺陷使受主浓度增加和载流子迁移率降低; 并且迁移率变化的幅度要比载流子浓度大, 因此辐照后材料电阻都增大. 图 2 的结果还显示辐照后材料电阻增大倍数随剂量增大而增大, 这说明在所选辐照剂量范围内, Ar^+ 辐照导致的迁移率降低要比载流子浓度的增大随剂量的变化快.

表 2 剂量为 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的 Ar^+ 辐照前后, $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 样品的 Hall 测量数据

Table 2 Data of Hall Measurements on $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ Nonirradiated and Irradiated by Ar^+ ($1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)

	Hall Coefficient $/\text{cm}^3 \cdot \text{coul}^{-1}$	Resistivity $\rho/(\Omega \cdot \text{cm})$	Carrier Concentration n/cm^{-3}	Mobility $\mu/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
Nonirradiated	190270	802	3.285×10^{13}	237
Irradiated	80288	1536	7.784×10^{13}	52.3

表 1 光致发光谱的数据表明, 辐照后材料辐射缺陷密度 I_{def}/I_0 和 I_{DAP}/I_0 增大, 并且随剂量增大总体上呈增大趋势. 这说明 Ar^+ 辐照降低了 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ 材料近表面区域晶格的完整性, 引入了更多缺陷. 因为辐照前后, PL 光谱上没有观察到新的能级, 所以这里辐照引起的载流子(空穴)浓度的增加, 与 PL 光谱上区域 II、III 中, 联系着晶体缺陷的受主能级浓度的增大有关. 从图 3 还可以看到, 辐照后激子线(A^0, X)向高频方向移动. 由于(A^0, X)线的能量近似可看作 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 的禁带宽度, 并且随

组分 x 的增大而增大^[11], 这就说明辐照后表面组分 x 增大, 即 Cd 空位浓度增大. Cd 空位在 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 材料中是受主, 所以辐照后空穴浓度增大. 这一结果也说明 PL 光谱上区域 II、III 中的受主能级与 Cd 空位有一定的联系.

迁移率的降低来源于辐照所引起的散射中心的增加. 首先, 辐照引入的缺陷本身在晶体中起着散射中心的作用; 其次, 辐照引起载流子浓度变化, 这样对晶体内原有电离缺陷的屏蔽作用发生改变, 从而改变了载流子与声子之间的相互作用; 此外, 材料费

密能级位置的变化也改变了晶体中原有缺陷的电荷态和散射势. 这几方面的因素导致了载流子迁移率的降低. 从表 1 光致发光实验的结果来看, 激子发射主线半峰宽随辐照剂量的增大, 意味着材料表面结构均匀性变差, 晶格长程有序性降低和晶体周期性势场被破坏, 因此载流子运动所受散射更强, 迁移率降低.

4.2 与其他粒子辐照效应的比较

$I-V$ 特性变化直接联系着材料或器件质量、性能的演变, 多数报道^[4-6]着重研究了辐照前后 Cd_{1-x}Zn_xTe 材料或器件的 $I-V$ 特性变化. 例如, 对中子辐照^[4], 剂量为 $10^8-10^{11} \text{cm}^{-2}$ 、能量为 MeV 量级的中子辐照 Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te 探测器, 没有引起器件漏电流的变化; 当辐照剂量大于 $7 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 时探测器性能开始下降. 剂量为 $10^{10}-10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的热中子辐照虽然导致 Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te 探测器漏电流降低, 但同时产生的损伤使探测器的分辨率和电荷收集效率降低^[5]. 对于质子^[6], 实验发现 1.3 MeV、剂量 10^{10}cm^{-2} 的质子辐照使探测器条状电极间漏电流明显增大; 10^{12}cm^{-2} 剂量质子辐照后, 探测器体漏电流显著增大. 与我们这里 Ar⁺ 辐照效应相比, 可以看出, Cd_{1-x}Zn_xTe $I-V$ 特性的具体变化情况与辐射类型和剂量、能量等都有一定的关系.

辐照在 Cd_{1-x}Zn_xTe 中引入缺陷的研究目前还不多见. Samimi 等^[3]曾研究了强 γ 辐照(能量 1.17、1.33 MeV, 剂量 $1.2 \times 10^3-2.4 \times 10^4 \text{Gy}$) CdTe 材料缺陷能级的变化. 发现位于 0.15 eV 的缺陷能级浓度随辐照剂量增大而减小, 而位于 0.30 eV 的缺陷能级浓度随辐照剂量增大而增大. 实际上, Cd-Te 系材料中普遍存在着大量的各种固有缺陷(例如, Cd 空位、Te 沉淀^[12]等)和相应的缺陷能级, 辐照对各种能级的影响情况十分复杂, 需要更深入和广泛的研究.

5 结论

根据以上结果和讨论, 得到 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 样品

经能量 2 GeV、剂量 $1 \times 10^{10}-1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的 Ar⁺ 辐照后, 在材料中产生了更多的受主型缺陷, 材料载流子(空穴)浓度增大; 辐照同时在晶体中形成了更多的散射中心, 引起载流子迁移率降低. 随辐照剂量增大, 载流子迁移率的降低要比载流子浓度增大快, 所以材料电阻随辐照剂量增大而增大.

致谢 中国科学院近代物理研究所重离子加速器国家实验室王志光博士协助完成了离子辐照实验; 本所张小平先生提供了 Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te 材料, 王晓光博士协助测试了光致发光谱, 在此一并表示感谢.

参考文献

- [1] M. J. Bevan, N. J. Doyle and T. A. Temofonte, *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(1): 204.
- [2] R. Sudharsanan, G. D. Vakerlis and N. H. Karam, *J. Electron. Mater.*, 1997, **26**(6): 745.
- [3] M. Samimi, B. Biglari, M. Hage-Ali *et al.*, *Phys. Stat. Sol.*, 1987, **100**: 251.
- [4] L. M. Bartlett, C. M. Stable and P. Shu, *SPIE*, 1996, **2859**: 10.
- [5] P. Chirco, M. P. Morigi, M. Zanarini *et al.*, *SPIE*, 1999, **3768**: 424.
- [6] Bruce A. Brunett, Barney L. Doyle, Larry A. Franks *et al.*, *SPIE*, 1999, **3768**: 433.
- [7] H. Chen, J. Tong, Z. Hu *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(6): 3509.
- [8] Cheryl Barnett Davis, David D. Allred and A. Reyes-Mena, *Phys. Rev. B*, 1993, **47**(20): 13363.
- [9] LI Zhifeng, LU Wei, CAI Weiying *et al.*, *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, **22**(2): 177 [李志峰, 陆卫, 蔡伟颖, 等, *半导体学报*, 2001, **22**(2): 177].
- [10] LIU Puling, ZHANG Suying and W. Ossau, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1991, **12**(3): 156 [刘普霖, 张素英, W. Ossau, *半导体学报*, 1991, **12**(3): 156].
- [11] T. Taguchi, *Phys. Stat. Sol. A*, 1983, **77**: K115.
- [12] ZHU Jiqian, CHU Junhao, ZHANG Xiaoping *et al.*, *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, **18**(10): 782 [朱基千, 褚君浩, 张小平, 等, *半导体学报*, 1997, **18**(10): 782].

Electrical Properties and Photoluminescence of P-CdZnTe Irradiated by High-Energy Ar⁺*

PEI Hui-yuan¹, LI Xiang-yang¹, FANG Jia-xiong¹ and HOU Ming-dong²

(1 State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

(2 Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Ar⁺ with energy of 2GeV and fluences of 10^{10} — 10^{13} cm⁻² are used to irradiate P-Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te. The measurement of electrical properties and photoluminescence is carried out on the samples, which are nonirradiated and exposed to various ion fluences, respectively. The densities of the acceptor-type defects and scattering centers are elevated after the irradiation, which result in the increase in the carrier (hole) concentration and decrease in carrier mobility, respectively. With the ion fluence increasing, the carrier mobility decreases faster than carrier concentration increases. Therefore, the material resistance increases greatly.

Key words: CdZnTe; electrical properties; photoluminescence

PACC: 6170; 7200; 7855

Article ID: 0253-4177(2001)11-1392-05

* Project Supported by Advanced Research Foundation for National Defence of China Under Grant No. 11.3.2 and National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 19805014.

PEI Hui-yuan male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in research related to the compound semiconductor materials and devices.

Received 6 January 2001, revised manuscript received 7 March 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics