

非晶态碲镉汞薄膜的射频磁控溅射生长 及其结构和光学特性*

孔金丞 孔令德 赵 俊 张朋举 李竑志 李雄军 王善力 姬荣斌†

(昆明物理研究所, 昆明 650023)

摘要: 在玻璃衬底上用射频磁控溅射技术进行了非晶态碲镉汞(a -HgCdTe, a -MCT)薄膜的低温生长. 采用 X 射线衍射(XRD)和原子力显微(AFM)技术对所生长的薄膜进行分析研究, 所生长的非晶态 HgCdTe 薄膜表面平整, 没有晶粒出现, 获得了射频磁控溅射生长非晶态 HgCdTe 薄膜的“生长窗口”. 采用傅里叶红外透射光谱分析技术对非晶态 HgCdTe 薄膜进行了光学性能研究, 在 $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$ 范围内研究了薄膜的透射谱线, 获得了薄膜的吸收系数($\sim 8\times 10^4\text{cm}^{-1}$), 研究了其光学带隙(约 0.83eV)和吸收边附近的 3 个吸收区域.

关键词: 非晶态碲镉汞; 射频磁控溅射; 光学带隙

PACC: 7280E

中图分类号: O742

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)04-0733-04

1 引言

碲镉汞(HgCdTe, MCT)由于其优良的光电性能及其在红外探测器方面较强的综合性能, 得到了许多研究团体的关注, 迄今为止, 还没有找到一种综合性能超过 HgCdTe 的红外探测器材料^[1,2]. 目前和未来一段时间内, HgCdTe 红外探测器的研究仍围绕大阵列、多波段展开^[3,4], 而大阵列红外焦平面发展主要受探测器材料制约, 探测器技术的发展对新探测原理、新材料研发提出了需求^[5]. 非晶态 HgCdTe 结构无严格周期性^[6], 与生长衬底不存在晶格失配、对衬底生长面结构完整性无要求, 容易以较低生长温度制备, 有可能解决红外焦平面探测器大阵列化、一体化、单芯片化研发过程中面临的诸如光电响应材料和衬底材料晶格失配等难题, 实现红外探测器研制的突破.

目前非晶态半导体材料的研究领域还局限于硫系非晶态半导体材料和四面体结构非晶态半导体材料, 主要应用于太阳能电池、复印材料、存储器件等方面. 非晶硅材料的应用最为广泛^[7~9]. 国内外对于非晶态 MCT 的研究还未见报道, 对非晶态 MCT 进行研究并开发其潜在的应用, 将是一个非常具有挑战意义的课题.

磁控溅射技术由于其生长温度低、薄膜粘附性好、膜质均匀致密、工艺可控性强等优点, 被广泛用来制备非晶态薄膜材料^[10~15]. 本文采用射频磁控溅射技术在玻璃衬底上进行了非晶态 HgCdTe 薄膜的生长, 获得了“生长窗口”, 初步研究了其表面形貌、结构及光学性能.

2 实验

采用 MSP3000 型射频磁控溅射设备进行非晶态 HgCdTe 薄膜生长, 射频频率为 13.56MHz . 溅射过程中选用氩气作为溅射气体. 靶材为多晶 HgCdTe 靶材. 采用 7101# 载玻片作为生长衬底, 材料生长前经过清洁处理. 为了获得非晶态的 HgCdTe 薄膜, 作者在固定衬底温度(50°C)后改变生长过程中 Ar 的压强和溅射功率进行了一系列的生长实验. 实验过程中氩气的压强选择了 $0.5, 2, 6$ 和 10Pa , 溅射功率选择了 $15, 30, 50$ 和 100W . 关于材料生长更详细的研究结果参看我们的前期报道^[16]. 材料生长后使用日本理学公司生产的 D/Max2200 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试, 射线源为 Cu 靶 $K\alpha$ 线(波长 $\lambda = 0.15406\text{nm}$, 管流 30mA , 管压 40kV , 石墨单色滤波). 使用台阶仪进行薄膜的厚度测试, 本文采用厚度为 $1.5\mu\text{m}$ 的非晶态 HgCdTe 薄膜(Cd 组分 $x_{\text{Cd}} = 0.1$)进行结构和光学特性研究. 所有的测试均在室温下进行.

3 结果与讨论

3.1 非晶态 HgCdTe 薄膜的射频磁控溅射“生长窗口”

不同的射频磁控溅射生长条件能获得不同结构特征的 MCT 薄膜, 如图 1 所示. ●所示的区域(B)为非晶态 HgCdTe 薄膜的“生长窗口”, 在这一区域所包含的生长条件下, 射频磁控溅射生长的 HgCdTe 薄膜表现为非

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60576069)

† 通信作者. Email: jirongbin@gmail.com

2007-09-20 收到, 2007-11-22 定稿

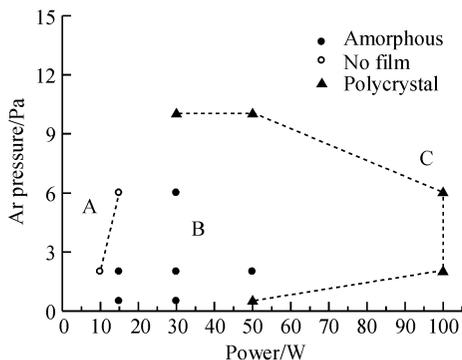


图 1 磁控溅射 HgCdTe 薄膜的生长“相图”

Fig.1 “Phase scheme” of RF sputtering of MCT films

晶结构. ▲所示的区域(C)为多晶 HgCdTe 薄膜的生长区域,而在○所示的区域内(A)由于溅射功率太小导致无法溅射生长 HgCdTe 薄膜.可以看出,选择合适的溅射功率、溅射压强对生长非晶 MCT 薄膜至关重要,过小的溅射功率导致无膜,压强过高或溅射功率过大都会使射频磁控溅射生长的 HgCdTe 薄膜晶化.

3.2 非晶态 HgCdTe 薄膜材料的 XRD 表征

在一定的生长条件下射频磁控溅射生长的 MCT 薄膜, XRD 测试结果表现为典型的非晶态材料, XRD 衍射图样如图 2 所示.可以看出,非晶态 HgCdTe 薄膜的 XRD 衍射图谱在 2θ 角为 $5^\circ \sim 100^\circ$ 的大范围内均无衍射结晶峰出现,而在 28° 左右的低角度位置形成展宽的包峰,与晶态 HgCdTe 的立方型(111)面 23.7° 的衍射峰相比,向高角度方向移动了 4° ,并且该包峰跨度大于 20° .同时,晶态 HgCdTe 在 39° 和 46° 左右的立方型(220), (311)面衍射峰也未出现,而在 47° 附近形成强度更弱的展宽包峰,显示了典型非晶结构的衍射特征.

作为对比,笔者同时给出了射频磁控溅射生长的多晶 HgCdTe 薄膜的 XRD 衍射图谱.可以看出,在一定的射频磁控溅射生长条件下获得的多晶态 HgCdTe 薄膜择优取向为 $\langle 111 \rangle$ 方向,其 XRD 衍射图样表现出典型多晶 HgCdTe 薄膜材料衍射特征.

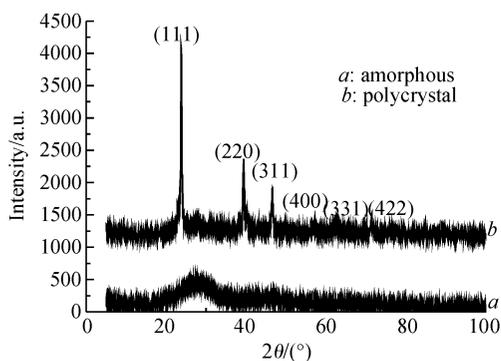


图 2 非晶态 HgCdTe 薄膜材料与多晶 HgCdTe 薄膜材料的 XRD 图谱
Fig.2 XRD spectra of amorphous MCT film and polycrystalline MCT film

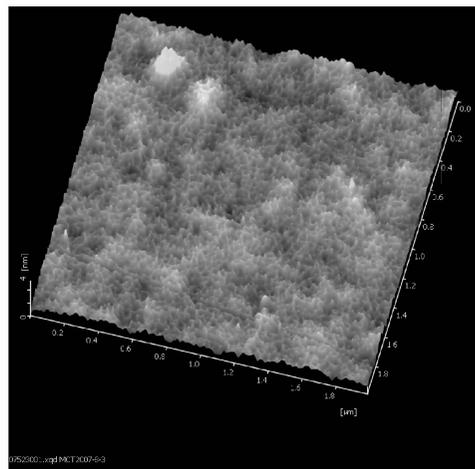


图 3 非晶态 HgCdTe 薄膜表面的原子力显微表征
Fig.3 AFM morphology of a-MCT film

3.3 非晶态 HgCdTe 薄膜的 AFM 表征

非晶态 HgCdTe 薄膜材料的原子力显微镜的表征结果示于图 3.很明显,所生长的非晶态 HgCdTe 薄膜材料的表面均匀,没有晶粒出现.在所表征的 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ 范围内,样品表面起伏小于 4nm ,说明材料的表面平整度是高的.

3.4 傅里叶红外透射光谱分析

红外透射光谱分析采用德国 BRUKER 公司生产的 EQUINOX 55 型傅里叶红外光谱仪,其光谱如图 4 所示.图中所示的非晶态 HgCdTe 薄膜透射曲线为已经去除了玻璃衬底的影响,可以看出,非晶态 HgCdTe 薄膜材料的红外透射光谱表现出与单晶 HgCdTe 材料类似的吸收边特性.

对于已经去除玻璃衬底影响的非晶态 HgCdTe 薄膜的红外透射谱,可以看作是单层非晶态 HgCdTe 材料的透射谱线,分析可以简单化.假设入射光为 I_0 ,出射光为 I ,因此有

$$T = \frac{I}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

式中 T 为透射比; α 为材料的吸收系数; d 为样品厚度; R 为样品表面的反射率.可以得到

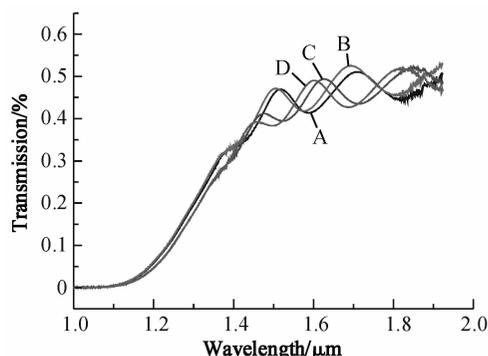


图 4 非晶态 HgCdTe 薄膜材料的红外透射光谱
Fig.4 FTIR spectra of a-MCT film

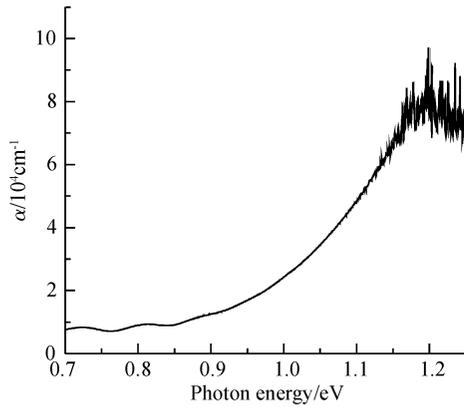


图 5 非晶态 HgCdTe 薄膜的吸收系数

Fig.5 Absorption coefficient of a-MCT film

$$\alpha = - \frac{\ln T}{d \ln(1 - R)^2} \quad (2)$$

通过椭圆偏振光谱测试,获得了在 0.7~1.2eV 范围内,非晶态 HgCdTe 薄膜材料的反射率为 41%,因此吸收系数可以通过(2)式得出.图 5 给出了 0.7~1.25eV 范围内非晶态 HgCdTe 薄膜材料吸收系数与入射光子能量的关系.可以看出,入射光子能量从 0.7eV 到 0.9eV 之间,非晶态 HgCdTe 薄膜材料的吸收系数变化不大,处于 10^3cm^{-1} 量级.随着入射光子能量的增加,从 0.9eV 到 1.2eV 范围内,材料的吸收系数增大较快,入射光子能量为 1.2eV 时达 $8 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$,随后吸收系数的变化趋于平缓.褚君浩^[17]研究了 Cd 组分 $x_{\text{Cd}} = 0.170 \sim 0.443$ 的单晶 HgCdTe 样品的室温吸收系数.从图 5 可以看出,非晶态 HgCdTe 在吸收边附近的吸收系数 ($>10000 \text{cm}^{-1}$) 明显高于单晶 HgCdTe 材料.

在获得了非晶态 HgCdTe 薄膜材料的吸收系数以后,对 $\sqrt{\alpha \hbar \omega}$ 随 $\hbar \omega$ 的变化作图,获得了非晶态 HgCdTe 薄膜材料的“Tauc 边”,如图 6 所示.“Tauc 边”作为一种经验公式被定义为非晶态半导体材料的光学带隙,在很多非晶态半导体中得到了验证^[18].

图 6 中,高能端 $\sqrt{\alpha \hbar \omega}$ 随 $\hbar \omega$ 变化关系满足

$$(\alpha \hbar \omega)^{1/2} = K(\hbar \omega - E_{\text{op}})$$

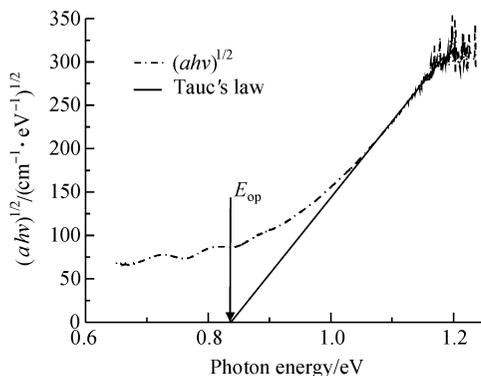


图 6 非晶态 HgCdTe 薄膜的 $\sqrt{\alpha \hbar \omega}$ 随 $\hbar \omega$ 变化关系

Fig.6 Relationship of $\sqrt{\alpha \hbar \omega}$ and $\hbar \omega$ of amorphous MCT film

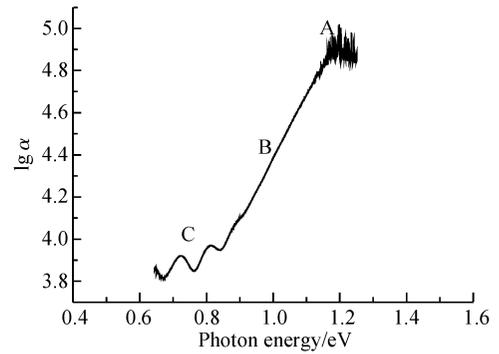


图 7 非晶态 HgCdTe 薄膜材料的三个吸收区域

Fig.7 Three absorption regions of amorphous MCT film

式中 E_{op} 即为非晶态 HgCdTe 薄膜材料的光学带隙.可以看出,我们获得的非晶态 HgCdTe 薄膜材料,光学带隙约为 0.83eV.在曲线的低能端, $\sqrt{\alpha \hbar \omega}$ 随入射光子能量的变化较平缓,不满足 $(\alpha \hbar \omega)^{1/2} = K(\hbar \omega - E_{\text{op}})$ 关系,0.72 和 0.8eV 附近的 2 个峰是薄膜厚度引起的干涉峰.

对 $\lg \alpha$ 随入射光子能量 eV 的关系作图,得到了图 7 所示的曲线.从图 7 可以看出,与许多其他非晶态半导体材料一样,非晶态 HgCdTe 材料的吸收边同样可以分为 3 个区域 A, B, C^[19].其中 A 区为吸收系数大于 10^4cm^{-1} 的高吸收区,对应于从价带到导带的本征吸收;B 区称指数吸收区,吸收系数 α 与光子能量 $\hbar \omega$ 间呈指数关系,吸收系数 α 的范围为 $10^{-1} \sim 10^4 \text{cm}^{-1}$,对应于从价带扩展态到导带带尾态或从价带带尾态到导带扩展态间的跃迁;C 区为弱吸收区,有可能对应于带尾态之间的跃迁,与材料的结构性能关系密切.

4 结论

采用射频磁控溅射技术成功生长了非晶态 HgCdTe 薄膜并找到了“生长窗口”.XRD 分析表明非晶态 HgCdTe 薄膜的衍射图样为典型的非晶态材料衍射波包形状,不同于多晶 HgCdTe 薄膜有 $\langle 111 \rangle$ 方向的择优取向.AFM 分析表明非晶态 HgCdTe 薄膜具有均匀平整的表面,在所研究的 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 范围内表面起伏小于 4nm.通过傅里叶红外透射光谱(FTIR)的分析,得到了非晶态 HgCdTe 材料的吸收系数,表现出明显的半导体特性,光学带隙约为 0.83eV;与大多数其他非晶态半导体一样,在吸收边附近表现出 3 个不同的吸收区域.

致谢 作者由衷感谢在本文完成过程中宋炳文先生给予的指导和帮助,感谢昆明物理研究所红外探测器中心分析测试小组的杨彦老师、云南大学分析测试中心的阚家德老师在样品测试上给予的帮助.

参考文献

[1] Rogalski A. New ternary alloys systems for infrared detectors. Washington, Bellingham: SPIE, 1994

- [2] Bonnet-Gamard J, Bleuse J, Magnea N, et al. Optical gain and laser emission in HgCdTe heterostructures. *J Appl Phys*, 1995, 78(12):6908
- [3] Rogalski A. Toward third generation HgCdTe infrared detectors. *J Alloys and Compounds*, 2004, 371:53
- [4] Rogalski A. Infrared detectors; an overview. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43:187
- [5] Bajaj J. HgCdTe infrared detectors and focal plane arrays. *IEEE Optoelectronic and Microelectronic Material Devices*, 1999:23
- [6] Richard Z. The physics of amorphous solids. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983:40
- [7] Roe K J, Katulka G, Kolodzey J, et al. Silicon carbide and silicon carbide; germanium heterostructure bipolar transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78:2073
- [8] Mutze F, Seibel K, Schneider B, et al. UV imager in TFA technology. Presented at Materials Research Society(MRS) Spring Meeting, San Francisco, 1999
- [9] Wu D S, Horng R H, Chan C C, et al. Plasma-deposited amorphous silicon carbide films for micromachined fluidic channels. *Appl Surf Sci*, 1999, 144/145:708
- [10] Nord J, Nordlund K, Keinonen J. Molecular dynamics simulation of ion-beam-amorphization of Si, Ge and GaAs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2002, 193:294
- [11] Horváth Zs J. Electrical peculiarities in GaAs and Si based low dimensional structures. *Current Applied Physics*, 2006, 6:205
- [12] Ridgway M C, Glover C J, Foran G J. Atomic-level characterisation of the structure of amorphised GaAs utilising EXAFS measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1999, 147:148
- [13] Perna G, Capozzi V, Plantamura M C. ZnSe films deposited on crystalline GaAs and amorphous quartz substrates by means of pulsed laser ablation technique. *Eur Phys J B*, 2002, 29:541
- [14] Santos P V, Zanatta A R, Dondeo F. Pulsed laser crystallization and structuring of a-Ge on GaAs. *J Non-Cryst Solids*, 2002, 299:137
- [15] Owensa A, Mosselmans J F W, Peacock A. Near K-edge linear attenuation coefficients for amorphous and crystalline GaAs. *Radiation Physics and Chemistry*, 2003, 66:1
- [16] Kong Jincheng, Kong Lingde, Zhao Jun, et al. Studies of deposition and crystallization of RF magnetron sputtered amorphous MCT films. *Infrared Technology*, 2007, 29(10):559 (in Chinese) [孔金丞, 孔令德, 赵俊, 等. 非晶态碲镉汞薄膜的磁控溅射生长及其晶化过程研究. *红外技术*, 2007, 29(10):559]
- [17] Chu Junhao. Photoelectricity transition of narrow-gap semiconductors. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9):759 (in Chinese) [褚君浩. 窄禁带半导体的光电跃迁效应. *激光与红外*, 2006, 36(9):759]
- [18] Tauc J, Abraham A, Pajasova L, et al. *Non-crystalline solids*. North-Holland, Amsterdam, 1965:606
- [19] Singh J, Shimakawa K. *Advances in amorphous semiconductors*. London and New York: Taylor & Francis Group, 2003

Structural and Optical Properties of Amorphous MCT Films Deposited by RF Magnetron Sputtering*

Kong Jincheng, Kong Lingde, Zhao Jun, Zhang Pengju, Li Hongzhi,
Li Xiongjun, Wang Shanli, and Ji Rongbin[†]

(*Kunming Institute of Physics, Kunming 650023, China*)

Abstract: Amorphous HgCdTe (*a*-HgCdTe or *a*-MCT) films on glass substrate were deposited by RF magnetron sputtering technology. The amorphous structure of the MCT films were studied by XRD and AFM technology and the “growth window” of *a*-MCT was obtained. FTIR technology was used to study the optical properties of amorphous MCT films and the absorption coefficient of amorphous MCT films ($\sim 8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$) was obtained. We also observed three absorption regions near the optical gap of amorphous MCT. The optical gap of our *a*-MCT film is about 0.83eV.

Key words: amorphous MCT; RF magnetron sputtering; optical gap

PACC: 7280E

Article ID: 0253-4177(2008)04-0733-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60576069)

[†] Corresponding author. Email: jirongbin@gmail.com

Received 20 September 2007, revised manuscript received 22 November 2007