

文章编号: 1672-8785(2011)04-0001-06

碲镉汞器件空间辐射损伤研究的进展

王忆锋 田 索

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 碲镉汞(MCT)红外探测器在天基平台中的应用正在逐渐增多, 运行于空间辐射环境这一特点给其功能实现带来了挑战。MCT器件的独特性质要求人们对空间辐射效应给予特别考虑。目前, 通过利用CdTe钝化MCT探测器技术, 器件的总剂量脆弱性问题已经得到解决。随着材料质量的改进(例如通过降低原生缺陷浓度), MCT器件更容易受到位移损伤引入缺陷的影响。介绍了部分已发表的有关MCT辐射效应研究的文献资料, 讨论了MCT器件辐射损伤效应机理研究的发展历程以及提高MCT器件辐射耐受性的方法。

关键词: 碲镉汞; 红外探测器; 空间辐射损伤; 总剂量损伤; 位移损伤; 辐射加固

中图分类号: TN304.2+5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.04.001

Research Advances in Space Radiation Damage of Mercury Cadmium Telluride Devices

WANG Yi-feng, TIAN Ying

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Mercury cadmium telluride (MCT) infrared detectors are more and more used on space-based platforms and the exposure to the radiation environment in space poses a challenge to their performance. Because of the unique properties of MCT devices, the effect of space radiation on them should be taken into account specially. Currently, the total-dose-vulnerability problem in MCT devices has been solved by using CdTe passivation in MCT detector technology. However, with the improvement of material quality (e.g. by reducing the native defect concentration), the MCT devices are more susceptible to the displacement-damage-induced defects. Some published literatures about radiation effect of MCT are investigated and the research process of radiation damage effect of MCT devices and the techniques used to improve their resistance against radiation are discussed.

Key words: mercury cadmium telluride; infrared detector; space radiation damage; total dose damage; displacement damage; radiation hardening

1 引言

在基于卫星和高空气球等空间(以及近地或临近空间, 即距地面20km~100km的空域, 大于飞机可达到的最大高度, 小于卫星轨道的最低高度)平台的红外探测与预警应用中, MCT

器件是一类具有重要地位的光电器件。此类系统的运行时间一般持续数年, 属于战略应用领域。光电器件在长时间受到空间辐射后, 其性能会逐渐降低, 严重时甚至会导致光电系统瘫痪。空间辐射对光电器件产生损伤的基本机理包括电离损伤和位移损伤。为了使光电器件在空间

收稿日期: 2010-10-19

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。E-mail: wangyifeng63@sina.com

辐射环境下正常工作，我们需要通过采取抗辐射加固措施来提高其可靠性。下面介绍 MCT 器件抗辐射加固技术的研究进展。

2 电离效应对 MCT 器件的影响

当物质受到各种射线辐照时，其原子的核外电子可能会完全摆脱原子核的束缚而成为自由电子，这种作用称为电离，相应的辐射称为电离辐射（主要有 X 射线、 γ 射线、 α 射线、 β 射线、中子流和重核等）。不会导致被作用物质产生电离作用的辐射称为非电离辐射，如可见光、红外、微波和无线电波等，它们主要来自太阳电磁辐射以及雷达与通信系统。关于空间辐射环境的更多介绍可见诸文献 [1] 和 [2] 等，本文不再引述。

不同空间辐照条件下器件参数的变化规律和损伤容限是辐照效应研究的要点之一。文献中描述损伤容限的术语至少有三个：total-dose-vulnerability、total-dose hardness、total-dose tolerance^[3]。本文将它们分别译作总剂量脆弱性、总剂量加固性和总剂量耐受性。

空间辐射对光电材料和器件产生损伤的基本机理包括电离损伤和位移损伤。损伤的结果是形成材料缺陷^[4]。其中，电离损伤需要的能量较低；而位移损伤需要的能量则高得多，此外它还可以由小剂量长期累积而成。

电离效应包括总电离剂量 (TID) 效应和单粒子效应 (SEE)，后者主要影响微电子器件。空基 MCT 器件所在环境的辐射剂量在 1rad/h (rad 为辐射剂量单位，拉德) 量级。由空间环境长时间引入的 TID 损伤机制一直是一个重要的研究课题。TID 损伤可以使电活性缺陷累积，导致半导体电导率发生变化，漏电流增加和时间响应变坏等。器件表面损伤以 TID 损伤为主^[5]。文献 [6-15] 研究了 TID 效应的机理以及相应的抗辐射加固措施。总的说来，对于具有较好初始质量（如 R_oA 较高）的探测器，其 TID 脆弱性也较低。

红外光电探测器本身对电离极为敏感，经常可以感应到单个粒子。大多数探测器中电离

导入的脉冲幅度主要取决于探测器的厚度。通过使用厚度较小的探测器的确可以减小电离导入的脉冲幅度，但它通常还是大于光电信号，会影响器件的性能。在粒子束流辐照下，探测器会产生一个脉冲分布。文献 [9,11,16-19] 报道了关于 MCT 器件在 γ 束流辐照下的响应的研究结果。电离导入的脉冲数取决于探测器的平均投影面积，并且主要受限于光敏面积。因为平均投影面积不会随着探测器厚度的减小而大幅降低，所以使用减薄的探测器并不能明显改善探测器对电离导入脉冲及噪声的耐受性。电离导入脉冲具有时间和空间上的关联性，据此可以利用过采样技术来实现对它们的识别和滤除。另外，使用微透镜可以在确保光敏面积的同时减小电学面积，降低电离导入脉冲，改善探测器性能，即使在没有电离辐射的情况下也是如此^[3]。

3 位移损伤对 MCT 的影响

化合物半导体 MCT 是闪锌矿结构的晶体。早期发展起来的是光导探测器，其间受益于为降低光导器件表面复合噪声和 1/f 噪声效应而发展起来的表面技术^[20]，出现了 MCT/MIS(金属 - 绝缘体 - 半导体) 器件^[6,7,21-25] 和 MCT/CCD 器件等^[8,26]。此后随着焦平面技术的发展，基于 pn 结的 MCT 光伏器件成为研发主流和重点。

根据固体物理学理论，晶体中的原子呈规则排列。理想晶体是由全同的结构单元（原子、离子、分子或其团簇）在空间中无限重复构成的，组成晶体的这种全同结构单元称为基元。如果忽略基元的具体细节，仅用一个几何点来代表，那么它们在空间中的周期性规则排列就构成了一个空间点阵。组成空间点阵的几何点称为阵点。若不考虑原子的影响，通过将晶体中的每个原子用处于该位置的一个几何点来代替，就可以得到与晶体几何性质相同的点的集合，这种集合称为晶格。引入晶格的概念后，阵点通常又称为格点。空格点称为空位。文献 [27] 指出，辐照 MCT 的基本位移损伤效应是引入施主，可能是 Hg 空位。这些施主同时也是肖克莱 - 里德 - 霍尔 (SRH) 中心。

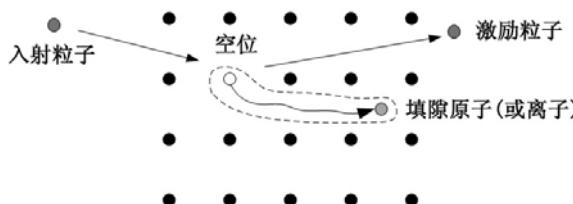


图 1 入射粒子在晶格中碰撞产生的空位 – 填隙(原子或离子)对

当格点上的原子或离子与入射粒子(或其辐照生成的次级粒子)发生弹性碰撞时, 入射粒子携带的一部分能量将会传递给晶格原子。当传递能量大于晶格原子的位移阈能(一般半导体材料的位移阈能在 $10\text{eV} \sim 25\text{eV}$ 之间)时, 晶格原子获得动能后离开原来位置, 转移到别的位置上而成为填隙原子, 原晶格位置因缺一个原子形成空位, 如图 1 所示。碰撞形成的空位 – 填隙(原子或离子)对称为 Frenkel 缺陷, 又称为点缺陷。点缺陷在室温下不稳定, 空位在运动中有时会与间隙原子复合, 使缺陷得以消除; 有时会形成不同特点的两大类缺陷:

(1) 简单缺陷: 最多可由几个原子联合在一起形成相对稳定的缺陷, 如双空位、三空位、空位和杂质的复合物等;

(2) 缺陷团簇: 每个团簇包含 $200 \sim 1000$ 个点缺陷, 团簇中心是直径约为 500\AA 的无序原子区并带有电荷。周围是一层直径约为 2000\AA 的耗尽层区, 带有相反的电荷。

最终形成的稳定缺陷会在晶体中引入一些深能级俘获陷阱(导致少数载流子寿命降低, 电子 – 空穴对热产生率增加以及载流子迁移率退化)和浅能级俘获陷阱(导致多数载流子复合, 降低多数载流子浓度), 使晶体的周期性产生扰动和晶格位能受到破坏, 在禁带中形成具有复合中心作用的新的电子能级, 从而影响半导体材料的电学和光学性质。高温退火可改变缺陷的组成, 使缺陷重新结合成更稳定的复杂缺陷, 而一些简单的缺陷会消失, 器件性能会有小幅度的恢复。文献 [28–39] 介绍了退火对于 LWIR 材料的电学和光学性能的影响。

具体说来, 对于光导器件, 光产生的电压信号 ΔV 为

$$\Delta V = \frac{g\tau_m V}{n} \quad (1)$$

式中, g 为光学产生率, τ_m 为多数载流子寿命, V 为偏置电压, n 为多数载流子(电子)浓度^[20]。对位移损伤最敏感的参数是 n ^[28–39]; 由位移损伤引入的施主会增加电子浓度, 从而降低光响应信号。为了获得高性能, 光导器件的初始施主浓度应尽可能低, 一般在 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 量级。由位移损伤引入的同样量级的施主浓度将会使光响应信号减小一半^[3]。

对于光伏器件来说, 零偏压下光电二极管的动态电阻 R_0 与结区面积 A 的乘积 $R_0 A$ 是评价其性能的一个重要参数指标。早期的探测器主要是 n-on-p 器件, 其 $R_0 A$ 值受来自 p 型材料的扩散电流主导。在这种情况下,

$$R_0 A = \frac{k_B T p \tau}{q^2 n_i^2 d} \quad (2)$$

式中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, p 为空穴载流子浓度, τ 为少数载流子寿命, q 为电子电荷量, n_i 为本征载流子浓度, d 为探测器厚度^[20]。受位移损伤影响最大的参数是少数载流子寿命 τ , SRH 中心的引入将使其衰减。光伏 MCT 探测器中的初始 SRH 缺陷浓度一般应尽可能低, 通常为 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 数量级。由位移损伤引入的同样浓度的 SRH 中心将会使 $R_0 A$ 值减小一半^[3]。

缺陷主要会造成载流子寿命的降低, 因此原生材料中的少数载流子寿命越低, 抗辐射能力就越高, 所以提高抗辐射能力的方向是选用低载流子寿命的材料^[2]。当然对此不能一概而论, 因为同一器件完全有可能对少数载流子寿命提出相反的要求^[40]。但是至少对 MCT 红外探测器来说, 利用低载流子寿命的材料来增强抗辐射能力可能不是一种较好的选择, 因为这一点与对器件的基本要求是矛盾的。例如, SPRITE 光导器件需要选择载流子寿命足够长的材料^[41]; pn 结少数载流子寿命的降低会引起漏电流的增加^[40]。非晶半导体之所以会受到重视, 就是因为其原生缺陷密度甚高, 载流子寿命甚低^[2]。

在近地空间中来自外层空间的高能粒子流里，质子占 87%， α 粒子占 10%，其余 3% 为重带电粒子、电子、光子和中子等。早期人们对 MWIR 材料研究得较少，只有文献 [28] 提到在某一剂量率质子辐照下，MWIR 材料受损伤要比 LWIR 材料快 1.5 倍。

中子是不带电粒子，根据能量可以分为热中子和快中子。它们主要通过中子与原子核的弹性碰撞来转移能量，概率虽小，但转移的能量是同样能量的电子或质子的数百倍，一般会在半导体材料中引起缺陷团簇。光伏 MCT 器件在 $\sim 2 \times 10^{13} n \cdot cm^{-2}$ ($n \cdot cm^{-2}$ 表示进入单位面积的粒子数) 量级的热中子辐照下，TID 损伤要先于位移损伤形成或出现^[9,16,17]。

早期人们多以由单一能量的中子造成的位移损伤为研究对象。20世纪80年代，人们通过对不同粒子 / 能量造成的位移损伤之间的关联度进行研究，提出了非电离能损 (NIEL) 概念。由此概念可以预测位移损伤剂量 (量纲为 MeV/g)，其作用等效于电离损伤效应中的 TID^[3]。

4 MCT 器件的抗辐射加固技术

在 MCT 中，Hg 是不稳定的，容易蒸发出，从而改变探测器的性能。为了控制隧道漏电和结漏电，防止合金组分随时间分解，需要对其表面进行钝化^[42]。钝化也带来了抗辐射加固的额外效益。事实上，早期的加固方法大多是引入一层钝化绝缘层材料，如阳极硫化物^[22,23]，或者沉积一层 SiO₂^[6,24]。人们偶尔还研究了未钝化器件^[12]。虽然观察到的结果在数值上有些差异，但是 MWIR 和 LWIR 器件的性能表现相似。

ZnS 钝化的 n-on-p 光伏探测器是早期最常见的 MCT 器件结构^[3]。但是 ZnS 有一个缺点，即它对于俘获电荷太敏感，以至于用 ZnS 钝化的 MCT 器件即使在 $3 \times 10^3 rd \sim 5 \times 10^4 rd$ 这样的低剂量辐照下也呈现出性能衰退现象^[9]。因此，到 20 世纪 80 年代末，人们已经意识到 ZnS 钝化不是一个较好的选择^[3]。虽然使用其他钝化材料（例如，阳极硫化物、SiO₂ 或氮化硅等）有时也

可以降低 MCT 器件的 TID 脆弱性，但是其改进程度仍不足以称为一种解决方案，特别是在需要兼顾光电探测性能与抗辐射加固性能的情况下。未经钝化的 MCT 器件可以耐受 $\sim 3 \times 10^6 rd$ 的辐照^[12]，但是由于 MCT 钝化更重要的功能是提供器件稳定性，去掉钝化层是一个不可接受的选择。最后的解决方案是采用 CdTe 钝化膜。

20 世纪 80 年代末、90 年代初，MCT 的 CdTe 钝化技术趋于成熟。与 ZnS 或早期所用的其他钝化材料相比，CdTe 与 MCT 的兼容性更好。CdTe 方法被证明是非常成功的，因为由此获得了高性能的探测器和均匀性好（只有少数盲元）的阵列器件。早期的探测器主要是 n-on-p 器件。随着往 CdTe 钝化的转移，大多数制造商也将器件从 n-on-p 结构转向 p-on-n 结构^[3]。p-on-n 结构与 CdTe 钝化的结合，提高了 MCT 器件的 TID 耐受性^[16,17,43-48]。文献 [16] 报道了经过 CdTe 钝化的 MCT 探测器可以耐受 1Mrd 的辐照。这就意味着，芯片整体的抗辐射加固效果已不再由 MCT 材料控制，而取决于读出电路 (ROIC) 的加固效果^[3]。在致冷型系统中，MCT/ROIC 工作在低温下。与室温下相比，这时 TID 效应对 ROIC 的影响要更严重，因为它使氧化物中的缺陷电荷增加了。通过使用加固设计和亚微米工艺，ROIC 在低温下也可以耐受一个 Mrd 的辐照，如同在室温下表现得那样，只是其加固成本高昂^[3]。

5 结束语

损伤容限是半导体器件辐照效应的研究重点之一。辐照剂量达到一定值时，材料损伤会出现饱和。对于空间用光电二极管，地面辐照老化可能有利于器件在空间工作时的长期稳定性^[49]。

“抗辐射性能好的材料，原则上应选择低载流子寿命或高掺杂的材料^[2]”这样的一般性描述可能不适合 MCT 材料。具有较高初始质量的 MCT 探测器的 TID 耐受性也是高的，这一事实导致人们最终接受了这样一个假设，即总剂

量脆弱性高的机理与探测器性能差的原因有关联。与此相关的一个观点是, 探测器性能的提高也可能有助于器件抗辐射性能的提高^[3]。

MCT 与钝化层之间的界面状态对于器件性能及抗辐射性能具有重要影响。通过使用 CdTe 钝化, MCT 器件的 TID 问题已经得到解决^[3]。在这种情况下, 位移损伤就成了 MCT 器件性能衰减的一个更为重要的机制。随着 MCT 材料质量的改善(例如, 通过降低原生缺陷浓度), 器件对由位移损伤引入的缺陷会更加敏感。这一点对于晶态 MCT 来说是一对相互制约的矛盾; 非晶态 MCT 能否避免这一矛盾值得关注^[2]。

采用常规工艺制备的 ROIC 具有 TID 脆弱性。通过使用加固设计技术和现代处理工艺, 可以制备出具有足够总剂量耐受性的 ROIC^[3]。

参考文献

- [1] Herbert R Shea. Radiation Sensitivity of Microelectromechanical System Devices [J]. *Journal of Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2009, **8**(3): 1303–1309.
- [2] 赖祖武, 包宗明, 宋钦歧, 等. **抗辐射电子学——辐射效应及加固原理** [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [3] James C Pickel, Arne H Kalma, Gordon R Hopkinson, et al. Radiation Effects on Photonic Imagers — A Historical Perspective [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, **50**(3): 671–688.
- [4] 王忆锋, 唐利斌. 硼镉汞外延材料缺陷研究的进展 [J]. *红外*, 2011, **32**(1): 1–9.
- [5] 王同权, 沈永平, 张若棋, 等. 空间辐射效应的蒙特卡罗模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(3): 339–342.
- [6] A H Kalma, M A Hopkins. Ionizing Radiation Effects in HgCdTe MIS Capacitors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, **28**(6): 4083–4087.
- [7] J R Waterman. Radiation Induced Interface Trap Limited Storage Times in 10 Micron Cutoff Wavelength (Hg,Cd)Te MIS Capacitors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, **35**(6): 1313–1318.
- [8] J R Waterman, J M Killiany. 2 MeV Electron Irradiation Effects in (Hg,Cd)Te CCDs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1983, **30**(6): 4209–4215.
- [9] A H Kalma, R A Cesena. Radiation Testing of Trimetal Infrared Detectors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, **26**(6): 4833–4839.
- [10] F A Junga, W W Anderson, R B Emmons. Effects of Gamma Irradiation on Surface Properties and Detector Properties of HgCdTe Photoconductors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1978, **25**(6): 1274–1282.
- [11] A H Kalma. Nuclear and Space Radiation Effects in Infrared Detectors [C]. SPIE, 1980, **217**: 186–191.
- [12] D W Domkowski, D G Feller, L R Johnson, et al. Effects of 6 MeV Electron Irradiation on the Electrical Characteristics of LPE HgCdTe mesa Photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1986, **33**(7): 1471–1473.
- [13] G M Williams, A H B Vanderwyck, E R Blazejewski, et al. Gamma Radiation Response of MWIR and LWIR HgCdTe Photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1987, **34**(6): 1592–1596.
- [14] G Sarusi, D Eger, A Zemel, et al. Degradation Mechanisms of Gamma Irradiated LWIR HgCdTe Photovoltaic Detectors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1990, **37**(6): 2042–2049.
- [15] J E Hubbs, G A Dole, M E Gramer, et al. Radiation Effects Characterization of Infrared Focal Plane Arrays using the Mosaic Array Test System [J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(11): 1739–1744.
- [16] E L Divita, M J Holtzman, R E Mills, et al. Methodology for Testing IR Detectors in Simulated Nuclear Radiation Environments [C]. SPIE, 1989, **1108**: 274–289.
- [17] E L Divita, R E Mills, T L Koch, et al. Methodology for Testing Infrared Focal Plane Arrays in Simulated Nuclear Radiation Environments [C]. SPIE, 1992, **1686**: 1686–1692.
- [18] I Arimura, J N Polky, W E Maher. Radiation Effects Analysis of A Coherent Laser Detection System [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1977, **24**(6): 2315–2320.
- [19] G M Williams, A H B Vanderwyck, E R Blazejewski, et al. Gamma Radiation Response of MWIR and LWIR HgCdTe Photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1987, **34**(6): 1592–1596.
- [20] R K Willardson, A C Beers. *Semiconductors and Semimetals*, vol.18 [M]. New York: Academic, 1981.
- [21] J R Waterman, R A Schiebel. Ionizing Radiation Effects in n-channel (Hg,Cd)Te MISFET's with Anodic Sulfide Passivation [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1987, **34**(6): 1597–1601.
- [22] M M Moriwaki, J R Srour, L F Lou, et al. Ionizing Radiation Effects on HgCdTe MIS Devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1990, **37**(6): 2034–2041.

- [23] M M Moriwaki, J R Srour, R L Strong. Charge Transport and Trapping in HgCdTe MIS Devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, **39**(6): 2265–2272.
- [24] A H Kalma, R A Hartmann, B K Janousek. Ionizing Radiation Effects in HgCdTe MIS Capacitors Containing A Photochemically Deposited SiO Layer [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1983, **30**(6): 4146–4150.
- [25] S C Chen, J R Srour. Ionizing Radiation Effects on Indium Antimonide MIS Devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, **26**(6): 4824–4827.
- [26] E A Burke, J J Boyle, H J Hummler. Gamma-induced Noise in CCDs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, **28**(6): 4067–4073.
- [27] C E Mallon, B A Green, R E Leadon, et al. Radiation Effects in HgCdTe [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1975, **22**(6): 2283–2288.
- [28] A G Foyt, T C Harman, J P Donnelly. Type Conversion And n-p Junction Formation in HgCdTe Produced by Proton Bombardment [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, **18**(8): 321–323.
- [29] J Melngailis, J L Ryan, T C Harman. Electron Radiation Damage And Annealing of HgCdTe at Low Temperature [J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, **44**(6): 2647–2651.
- [30] C E Mallon, J A Naber, J F Colwell, et al. Effects of Electron Irradiation on The Electrical And Optical Properties of HgCdTe [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1973, **20**(1): 214–219.
- [31] F D Shepherd, Jr. Radiation Effects on The Spectral Response of HgCdTe [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1974, **21**(1): 34–41.
- [32] R E Leadon, C E Mallon. Model for Defects in HgCdTe Due to Electron Irradiation [J]. *Infrared Physics*, 1975, **15**(5): 259–264.
- [33] B A Green, R E Leadon, C E Mallon. Mobility Changes Produced by Electron Irradiation of n-type HgCdTe [J]. *Jouranl of Applied Physics*, 1976, **47**(7): 3127–3133.
- [34] A V Voitsehovski, V N Brudnyi, Yu V Lilenko, et al. High Temperature Defects in Electron-irradiated Semiconductors HgCdTe, PbSnTe [J]. *Solid State Communication*, 1979, **31**(2): 105–112.
- [35] A V Voitsekhovskii, A P Kokhanenko, Yu V Lilenko, et al. Carrier Lifetime in Electron-irradiated p-Type HgCdTe Crystals [J]. *Soviet Physics: Semiconductor*, 1981, **15**(4): 386–391.
- [36] A V Voitsekhovskii, Yu V Lilenko, A P Kokhanenko, et al. High Temperature Electron Irradiation And Isochronal Annealing of p-Type HgCdTe Crystals [J]. *Radiation Effects*, 1982, **66**(2): 79–84.
- [37] A V Voitsekhovskii, A P Kokhanenko, S F Koverchik, et al. Characteristic Features of The Behavior of Electronirradiated HgCdTe Crystals Subjected to Various Heat Treatments [J]. *Soviet Physics: Semiconductor*, 1983, **17**(10): 1119–1123.
- [38] A V Voitsekhovskii, A P Kokhanenko, A S Petrov, et al. Investigation of Radiation Defects in Electron Irradiated HgCdTe Crystals Using Positron Annihilation [J]. *Crystal Research Technology*, 1988, **23**(3): 237–242.
- [39] V I Ivanov-Omskii, N V Kutekhov, V A Smirnov, et al. Neutron Irradiation of CdHgTe [J]. *Soviet Physics: Semiconductor*, 1992, **26**(3): 238–241.
- [40] 陈治明, 王建农. 半导体器件的材料物理学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [41] 褚君浩. 空禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [42] John Lester Miller. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Chapman and Hall, 1994 .
- [43] E Finkman, S E Schacham. Interface Properties of Various Passivations of HgCdTe [C]. SPIE, 1989, **1106**: 198–203.
- [44] R E Mills. Novel Methods for Cryogenic Testing of Infrared Focal Plane Arrays in A Co60 Radiation Environment [C]. SPIE, 1992, **1686**: 65–75.
- [45] E R Blazejewski, G M Williams, A H Vanderwyck, et al. Advanced LWIR HgCdTe Detectors for Strategic Applications [C]. SPIE, 1994, **2217**: 278–290.
- [46] D T Wilhelm, R K Purvis, A Singh, et al. Status of Focal Plane Arrays (FPA's) for Space-based Applications [C]. SPIE, 1994, **2217**: 307–329.
- [47] X Hu, X Li, H Lu, et al. Effect of Gamma Irradiation on Room-temperature SWIR HgCdTe Photodiodes [C]. SPIE, 1998, **3553**: 85–89.
- [48] X Hu, K X Li, J Fang. Influence of Gamma Irradiation on The Performance of HgCdTe Photovoltaic Devices [C]. SPIE, 1999, **3698**: 920–924.
- [49] 张建新, 刘俊星. 比较几种辐照对半导体器件性能的影响 [J]. 嘉兴学院学报, 2008, **20**(6): 94–98.