

背景辐射对 HgCdTe 中波叠层光导器件噪声的影响

张 燕[†] 方家熊 徐国森

(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)

摘要: 研究了 HgCdTe 中波叠层光导器件在不同背景辐射条件下的性能变化, 设计了增加冷光栏和使用不同温度的黑体对器件进行辐照的两种改变背景辐射的实验方案. 结果表明, 随着背景辐射的减小, 器件的测量噪声亦减小. 利用非平衡载流子和器件有效寿命理论对器件的产生复合噪声进行了计算, 计算结果与实验结果在随背景辐射变化的趋势上相似. 进一步的噪声频谱测量表明, $1/f$ 噪声是叠层器件噪声随背景辐射变化的主要原因; 而叠层结构中存在的边缘接触不对称 MIS 结构增大了背景辐射变化对 $1/f$ 噪声的影响.

关键词: HgCdTe; 叠层结构; 背景辐射; 噪声

EEACC: 7230

中图分类号: TN304.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0958-05

1 引言

HgCdTe 是一种 II-VI 二元系合金半导体, 由于禁带宽度可调, 能够制备出不同波段的红外探测器件, 用于气象卫星等多种遥感系统中. 其中, 利用中波探测可以得到地面温度的信息.

为了提高系统的最终分辨率, 对器件光敏面的要求越来越小, 光生少子在复合前就被拉入电极, 降低了器件的有效寿命. 为消除扫出效应的影响, 采用叠层结构, 增加光生少子到达电极前可以扩散的距离. 对于叠层结构的提出和研究, 早在上世纪 70 年代就已经开始, 主要集中在结构、信号响应、载流子分布等方面^[1,2]. 在当前实际应用中, 又出现一些值得研究的新问题. 例如, 叠层器件的噪声^[3], 以及背景辐射对叠层器件性能的影响等.

在影响器件性能的众多因素中, 背景辐射是重要一环. 很多人对背景辐射进行过研究. 由于长波的背景辐射较大, 早期研究主要集中在长波方面^[4~6], 并且在分析时通常忽略表面复合的作用, 使用体 Auger 复合寿命代替器件的有效寿命. 而对于中波器件的研究涉及很少, 特别是目前小光敏面的叠层器件. 应用中发现, 器件在封装前后, 性能变化明显.

本文在 HgCdTe 中波探测器件实际工程应用的基础上, 以探测器的叠层结构为出发点, 从产生复合噪声和 $1/f$ 噪声两方面分析背景辐射影响器件性能的变化, 为工程研发提供参考.

2 实验及结果分析

实验使用的 HgCdTe 中波器件是由移动加热法生长的体材料制备成的叠层光导器件, 结构见图 1 所示. 二氧化硅(SiO_2)做绝缘层, 左端金电极爬坡覆盖在绝缘层上, 光生载流子移动的距离增加, 避免了扫出效应. 器件用低温胶粘贴在柯伐管座上, 管座与杜瓦冷头直接接触, 以保证良好的热传导. 实验过程中, 通过增加冷光栏封装和使用黑体辐射两种方式改变背景条件, 测量各种情况下器件的探测率、噪声频谱等性能. 实验中, 除非特别指出, 器件均工作于 77K 液氮温度.

探测率测量采用常规黑体测量方法. 噪声频谱的测量采用两种不同的系统, 一种是逐点测量, 测量装置如图 2 所示. 采用 EG&G 公司的 model 124a 的锁相放大器, 配超低噪声前置放大器. 锁相放大器通过固定某一频率, 测量这一中心频率附近一定带

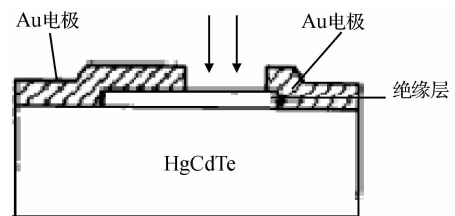


图 1 探测器结构图

Fig.1 Structure of detectors

[†] 通信作者. Email: zhangyan@mail.sitp.ac.cn

2006-10-27 收到, 2007-02-08 定稿

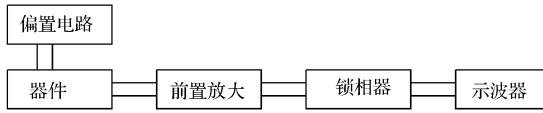


图 2 频谱测试系统框图

Fig. 2 Experimental setting to measure noise spectrum

宽内的噪声,其他频率的噪声被排除.测量结果通过显示器输出,同时在示波器上实时监视外部干扰的影响.测试系统建立以后,确认系统的测量准确性.首先进行放大器的设备噪声测量,确保系统噪声远小于测量器件的噪声;其次对同一器件进行多次测量比较,结果一致,重复性高;再次,比较噪声频谱在 1kHz 频率的数值与常规探测率测量中的噪声是否一致,确认系统准确可靠;最后对测量结果还进行了不同频率、不同输入阻抗的放大倍数校准计算,得到器件的实际噪声频谱情况.由于是逐点测量,这种测量步骤繁琐,选择频率点相对较少.另一种频谱测量方法是利用噪声频谱仪直接获得噪声曲线.这种方法测量简单,但未经校准计算.因此在实验数据分析时,只用于相对比较.

图 3 为增加冷光栏及滤光片前后(后面简称封装前后)器件性能的变化.图中所示数据为 40 个双元芯片(a,b)的测量结果.横坐标为器件序号;▲,△分别表示 40 个芯片 a 的封装前后性能;▼,▽分别代表 40 个芯片 b 在封装前后性能变化.测试温度为 100K,频率为 1kHz.图中显示,封装之后,器件性能有不同程度的提高,平均响应率从 $1.93 \times 10^4 \text{ V/W}$ 增加到 $8.65 \times 10^4 \text{ V/W}$,增加了约 3.49 倍;噪声从 $9.70 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 降低到 $2.36 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$,

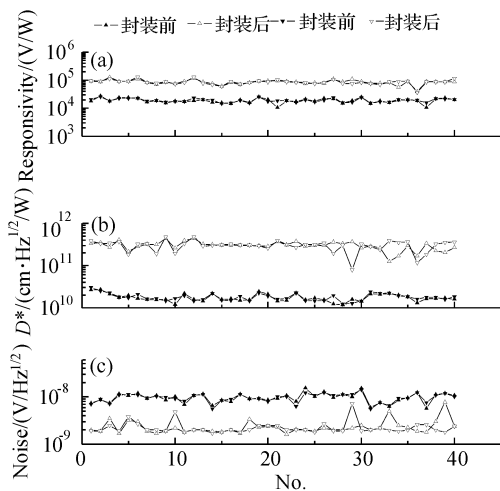


图 3 中波器件在封装前后性能比较

Fig. 3 Performance of middle-wave detectors before and after encapsulation

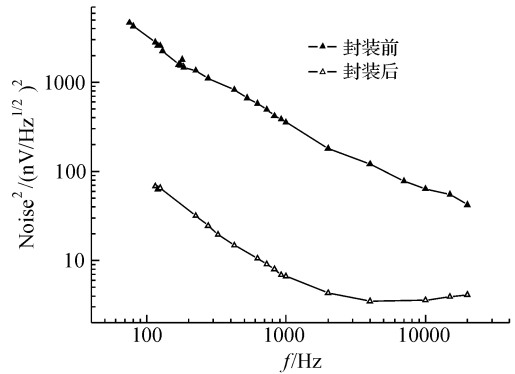


图 4 中波器件在封装前后噪声频谱的变化

Fig. 4 Noise spectra of middle-wave detector before and after encapsulation

降低了约 75.6%;探测率从 $1.77 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 增加到 $3.03 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$,提高了约 16.1 倍.其中,响应率最大提高到原来的 9.08 倍,噪声最大下降到原来的 13%,探测率最大增加了 32.4 倍.

响应率的变化主要在于增加了冷滤光片,封装后的响应率实际上代表的是波段响应率,增加的幅度与探测器本身的响应光谱范围有关.由于叠层结构器件信号响应的研究已经很多,我们把重点放在器件噪声的分析上.

选择数个叠层器件,采用图 2 所示的逐点法测量封装前后的噪声频谱,典型测量结果如图 4 所示.▲,△分别表示器件封装前后的噪声情况.在实验测量范围内,1/f 噪声与频率成反比;而产生-复合噪声与频率有 $V_{gr} = V_{gr}(0) \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}$ 的关系.对于中波器件,寿命 τ 在 μs 量级,因此在实验测量范围内,产生-复合噪声变化不大.所以,能够通过噪声频谱观察各噪声的情况.由图中可以看出,在小于 20kHz 频率范围内,封装前主要是 1/f 噪声占主导,在 1kHz 测量到的噪声为 1/f 噪声;封装之后,1/f 噪声明显减小,拐点频率降低,产生-复合噪声区域进入测试范围,1kHz 的噪声同时包含产生-复合噪声和 1/f 噪声.

中波器件在封装时安装冷光栏和窄带滤光片,接受到不同的背景辐射.利用普朗克公式计算,发现器件接收的室温背景辐射光子通量密度由封装前的 $1.32 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降为封装后的 $5.86 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.这种背景辐射的大幅度降低,引起器件内部噪声机制的变化.光导器件的噪声主要有 1/f 噪声、产生-复合噪声和热噪声等.其中,热噪声相对较小,随背景辐射的变化也较小,可以忽略.主要考虑产生-复合噪声和 1/f 噪声的变化.图 4 表明 1kHz 的噪声由封装前的 1/f 噪声变为封装后的产生-复合噪声和 1/f 噪声共同决定,而 1/f 噪声在封

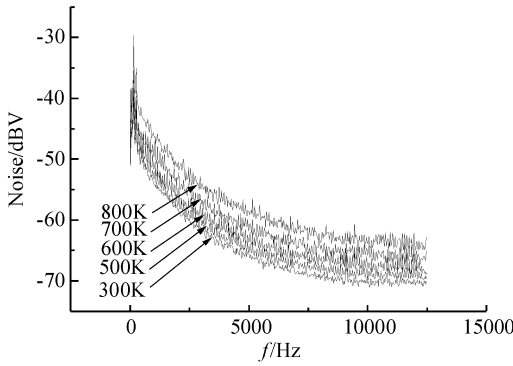


图 5 噪声频谱与黑体温度关系

Fig.5 Noise spectrum versus black body temperature

装之后有大幅度的降低.这也是封装之后探测器噪声大幅度下降的主要原因.

为进一步确定器件噪声与背景辐射的关系,设计了新的实验方案.利用黑体提供背景辐射光,通过改变黑体温度,使器件接受不同大小的背景辐射.辐射装置由常规探测率测试系统改装而成,噪声频谱直接由噪声频谱仪测量得到.不同黑体温度下的噪声频谱如图 5 所示.从下到上,曲线分别代表黑体温度为 300,500,600,700 和 800K 的噪声频谱.随着黑体温度的升高,低频区的 $1/f$ 噪声增加,平台区的产生-复合噪声也增加,两者具有相似的趋势.

图 6 所示为图 5 得到的产生-复合噪声(相对值)与器件接受的背景辐射的关系.随着背景辐射的增加,产生-复合噪声亦增加.

3 实验结果的理论分析

3.1 产生-复合噪声

利用光生载流子理论和器件的有效寿命理论计算产生-复合噪声随背景辐射的变化.产生-复合噪

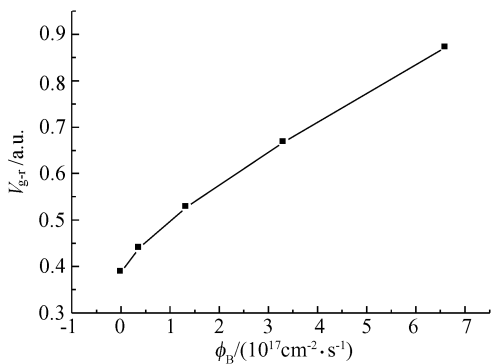


图 6 g-r 噪声随背景辐射的变化

Fig.6 Experimental result of g-r noise changing with background radiation

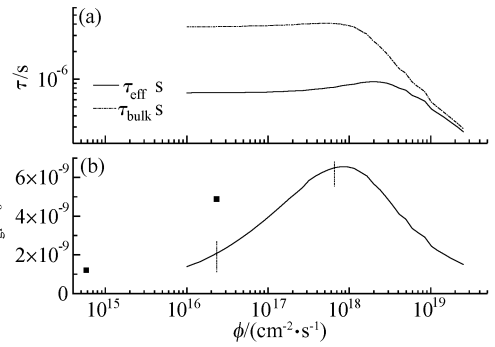


图 7 有效寿命、产生-复合噪声与背景辐射通量密度的理论计算

Fig.7 Theory computing result of the relation between effective lifetime, g-r noise and background radiation

$$V_{gr}(0) = \frac{2V_0}{(lwd)^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{1+b}{nb+p} \right) \left(\frac{pn}{n+p} \right)^{\frac{1}{2}} \tau_{eff}^{\frac{1}{2}} \Delta f^{\frac{1}{2}}$$

其中 l, w, d 分别为探测器尺寸; n, p 为电子、空穴浓度; $p = p_0 + p_B$, 其中 $p_B = \eta \phi_B \tau_{eff} / t$; b 为电子空穴迁移率比; V_0 为器件偏压; τ_{eff} 为有效寿命, 其满足: $\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{S-R}} + \frac{2(S_{S-R} + S_A + S_R)}{d}$, $\tau_A, \tau_R, \tau_{S-R}, S_A, S_R, S_{S-R}$ 分别表示 Auger 复合体寿命、辐射复合体寿命、S-R 复合体寿命、表面 Auger 复合速度、表面辐射复合速度、表面 S-R 复合速度. 可见, 产生-复合噪声由载流子浓度、迁移率、有效寿命共同作用. 有效寿命又与载流子浓度、迁移率、器件的表面状况等都有关系. 也就是说, 产生-复合噪声由材料状况与器件表面工艺共同决定. 而 HgCdTe 晶体位错密度很大, Te 沉淀、小角晶界等多种因素都会影响晶体质量.

图 7 为计算得到的器件有效寿命和产生-复合噪声随背景辐射通量密度的变化. 图中, 实线所示为器件的有效寿命, 虚线为体寿命, 表面复合对寿命的影响非常明显. 当背景辐射通量密度小于 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着背景通量密度的增加, 有效寿命增加, 产生-复合噪声迅速增加; 背景辐射超过 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 有效寿命继续增加, 但由于背景产生的电子浓度已经达到热平衡电子浓度的水平, 产生-复合噪声同时受到载流子浓度的影响开始减小; 背景超过 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 有效寿命减小, 产生-复合噪声继续减小. 图 7 中所示为器件在封装前后受到室温背景辐射时的噪声平均测量结果; 点划线表示的位置分别对应黑体温度为 300 和 800K 的背景辐射. 实验中所用的背景辐射均处于产生-复合噪声随背景辐射增加而增加的范围. 计算结果与实验结果趋势一致. 但图 7 中所示的测量值与计算值存在较大的偏差. 原因主要在于, 测量值与所有噪声机制

有关,包括产生-复合噪声、 $1/f$ 噪声、热噪声、设备噪声等,而图 4 的噪声频谱曲线已经表明,封装前的噪声主要是 $1/f$ 噪声,产生-复合噪声仅在封装之后有作用.

3.2 $1/f$ 噪声分析

将图 4 中 $1/f$ 噪声的实验数据按公式 $\frac{S_v(f)}{V^2} = \frac{\alpha_H}{fN}$ ^[8] 进行拟合,其中 $S_v(f)$ 为噪声功率谱中的 $1/f$ 噪声分量, α_H 称为 Hooge 系数, f 为频率, N 为载流子数量, V 为偏置电压.拟合得到,封装前后的 α_H 分别为 1.51×10^{-4} 和 1.18×10^{-5} ,背景辐射的不同在较大程度上影响了 $1/f$ 噪声.在图 5 所示的改变背景实验数据中,同样明显表现出了这一点.

由于器件采用叠层结构,与非叠层结构不同,在器件叠层部分的 HgCdTe 表面会有电势影响.工作时器件两端加偏压,在 HgCdTe 上形成一定的压降,HgCdTe 就与覆盖在上面的叠层电极形成一种特殊的 MIS 结构.这种边缘接触不对称 MIS 结构^[3,9]使叠层电极下 HgCdTe 表面形成耗尽层,耗尽层中陷阱电荷的涨落通过调制表面势,引起 HgCdTe 表面复合电流的涨落.因此,与非叠层结构相比,背景辐射对 $1/f$ 噪声的影响更大. $1/f$ 噪声分为基本 $1/f$ 噪声和非基本 $1/f$ 噪声两类^[10].位于空间电荷区、表面氧化层等的陷阱中心对载流子的俘获和发射,引起载流子数量的涨落,产生的 $1/f$ 噪声可以通过陷阱密度的降低而减小,属于非基本 $1/f$ 噪声,通过表面载流子涨落模型来解释.而体迁移率涨落属于基本 $1/f$ 噪声.对于光导器件而言,通常认为,迁移率涨落模型占主导, α_H 是一个与材料和结构有关的近普适常数.但由于 HgCdTe 是三元合金材料,工艺中仍然存在很多不确定因素, α_H 变化较大,体迁移率涨落模型不足以解释器件低频噪声,需要同时考虑表面载流子模型. α_H 也正表明了这种与器件工艺和器件状态相关的 $1/f$ 噪声状况.当受到不同背景辐射的作用时,器件光敏面上形成不同数量的光生载流子,电极界面处的耗尽层发生变化,引起载流子数量的涨落,进而对 $1/f$ 噪声产生影响.器件在封装之后,接受到的背景辐射由 $1.32 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 $5.86 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,引起载流子数量的涨落减小, α_H 减小, $1/f$ 噪声减小.而我们器件采用的叠层结构引起的 HgCdTe 表面复合电流的涨落,恰恰增加了表面载流子涨落对于 $1/f$ 噪声的影响,从而大大影响器件噪声.

背景辐射对产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声的影响一致,这从侧面证明了两者的相关性,与图 7 中噪声

的平均测量结果(黑点显示)的变化趋势一致.

4 结论

本文对 HgCdTe 中波叠层光导器件在不同背景辐射条件下的性能进行了研究.随着背景辐射的减小,器件噪声减小.利用非平衡载流子和器件有效寿命理论对器件的产生-复合噪声进行了计算,理论与实验趋势相似.进一步的噪声频谱测量表明, $1/f$ 噪声是叠层器件噪声随背景辐射变化的主要原因;而叠层结构中存在的边缘接触不对称 MIS 结构增大了背景辐射变化对 $1/f$ 噪声的影响.

参考文献

- [1] Kinch M A, Borrello S R, Breazeale B H, et al. Geometrical enhancement of HgCdTe photoconductive detectors. *Infrared Physics*, 1977, 17(2): 137
- [2] Hu Xiaoning, Fang Jiaxiong. Carrier concentration distribution and performance of overlap photoconductive detector. *J Infrared Millim Waves*, 1996, 15(4): 285 (in Chinese) [胡晓宁, 方家熊. 叠层 HgCdTe 光导器件载流子浓度分布及器件性能. *红外与毫米波学报*, 1996, 15(4): 285]
- [3] Zhang Yan, Fang Jiaxiong. The low frequency noise of HgCdTe sensor with overlap structure. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5472: 359
- [4] Borrello S, Kinch M, LaMont D. Photoconductive HgCdTe detector performance with background variations. *Infrared Physics*, 1977, 17(2): 121
- [5] Gapal V, Warriar A V R. On the optimum thickness of a photoconductive detector: a 0.1eV HgCdTe detector. *Infrared Physics*, 1984, 24(4): 387
- [6] Huang Jianxin. Study on the photoelectric properties of n-type photoconductor and sprite detector. Doctor Dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 1989 (in Chinese) [黄建新. n 型 Hg_{1-x}Cd_xTe 光电导体光电特性及 SPRITE 探测器研究. 中国科学院上海技术物理研究所博士论文, 1989]
- [7] Hooge F N. $1/f$ noise is no surface effect. *Phys Lett*, 1969, A-29: 139
- [8] Gong Haimei. Study on surface and interface of mercury cadmium telluride. Doctor Dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993 (in Chinese) [龚海梅. HgCdTe 表面与界面的研究. 中国科学院上海技术物理研究所博士论文, 1993]
- [9] Zhang Yan, Fang Jiaxiong. The low frequency noise mechanism of medium wave HgCdTe with asymmetrical MIS structure. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004, 10(3): 391 (in Chinese) [张燕, 方家熊. 中波 HgCdTe 边缘接触不对称 MIS 结构的低频噪声. *功能材料与器件学报*, 2004, 10(3): 391]
- [10] Van der Ziel A. Unified presentation of $1/f$ noise in electronic devices; fundamental $1/f$ noise sources. *Proceedings of the IEEE*, 1988, 76(3): 233

Influence of Background Radiation on a Medium-Wave HgCdTe Photoconductive Detector with Overlap Structure

Zhang Yan[†], Fang Jiaxiong, and Xu Guosen

(*State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract: The influence of background radiation on a medium-wave HgCdTe photoconductive detector with an overlap structure is studied. In the experiment design, two methods are put forward to change the background radiation. It is found that the detector noise decreases with the decrease of the background radiation. The g-r noise is calculated from the number of carriers and lifetime theory. It is shown that the calculation result has the same trend as the experimentally observed phenomena. Further noise spectrum measurement shows that $1/f$ noise is the primary factor that causes the detector noise to change with background radiation. The edge contacts' asymmetrical MIS structure increases the effect of background radiation on the $1/f$ noise.

Key words: HgCdTe; overlap structure; background radiation; noise

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2007)06-0958-05

[†] Corresponding author. Email: zhangyan@mail.sitp.ac.cn

Received 27 October 2006, revised manuscript received 8 February 2007