

不同响应波长的 HgCdTe 光导器件噪声分析

张 燕 方家熊

(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 研究了不同响应波长的 HgCdTe 器件在不同背景辐射条件下的噪声变化。随着背景辐射的增加, 甚长波器件的噪声减小, 而中波器件相反。噪声频谱测量表明, 产生-复合噪声分量和 $1/f$ 噪声分量是器件的主要噪声来源, 并且这两个分量随背景的变化趋势相同。非平衡载流子和器件有效寿命的理论分析, 表明器件噪声随背景辐射的变化存在一个极大值, 而中波和甚长波器件处在不同的作用区域内, 接受到的背景辐射对载流子浓度和器件有效寿命的影响不同, 从而噪声变化表现不同。在此基础上, 提出了“临界背景通量密度”的概念。

关键词 半导体探测器; 背景辐射; 噪声; 临界背景通量密度; HgCdTe

中图分类号 TN304.2⁺6; TN36 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1369

Noise Analysis of HgCdTe Photoconductive Detector with Different Response Wavelength

Zhang Yan Fang Jiexiong

(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 noise of medium-wave and extremely-long-wave HgCdTe detectors is studied. It is found that the noise of extremely-long-wave detector decreases with the background radiation increasing, while for the medium-wave detector is shows the different way. Noise spectra show that the main noise sources are generation-recombination (G-R) noise and $1/f$ noise which have the similar trend while the background is changing. The G-R noise for different wavelength response detectors is calculated using carriers and effective lifetime theory. There exists a maximum value when G-R noise changes with background radiation. While the noise is on the different position for medium-wave and extremely-long-wave detectors, the influence of background radiation on their effective lifetime is different. So noise behaves differently. Based on these, a new concept of “critical-background-radiation-flux-density” is put forward.

Key words semiconductor detector; background radiation; noise; critical-background-radiation-flux-density; HgCdTe

1 引 言

HgCdTe 是一种 II 族元素合金半导体, 通过调整 II 族元素的组分, 可以制备出不同响应波段的红外探测器件, 覆盖短波、中波、长波三个大气窗口。HgCdTe 材料目前已经成功应用于气象卫星等多种遥感系统中。

在制备和应用过程中, 器件表现出不同测量状态下的性能差异。这种差异与材料参量、器件结构、器件工作状态等多种因素有关。光电导器件受到光照产生光生载流子, 载流子在外加偏压的作用下定

向移动形成光生电流。器件的有效寿命依赖于平衡与非平衡载流子浓度, 同时非平衡载流子浓度又依赖于有效寿命, 而器件性能与有效寿命直接相关。由于背景辐射会产生非平衡载流子, 而器件不同测量状态时背景辐射不同, 噪声变化明显。因此针对器件具体工作状态的背景分析非常重要。

由于 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的响应波长对应于室温物体发射的红外辐射波段, 而且此波段器件受到背景的辐射较大, 因此早期对 HgCdTe 器件性能的影响主要集中在长波器件。Borrollo^[1]、Gopal^[2] 等人针对禁

带宽度为 0.1 meV 的 HgCdTe 长波光导探测器从理论上进行了详细分析。黄建新^[3]考虑了背景强度的变化、辐射在样品中的多次反射以及探测器厚度等多种因素的影响,但忽略了表面复合速度的影响,使用体俄歇(Auger)复合寿命代替器件的有效寿命进行计算,而实际情况是,表面复合速度对器件的影响很大^[4],不能忽略。

本文在实际应用的基础上,针对不同波段的探测器件进行研究,在分析背景辐射产生的非平衡载流子时,考虑了表面辐射复合、表面俄歇复合、表面 S-R 复合等多种表面复合方式的影响,从背景辐射和器件参量两方面分析了背景辐射影响器件变化的原因;在对产生-复合噪声研究的基础上,提出“临界背景通量密度”的概念,并分析了它与器件有效寿命的关系。

2 实验装置及实验过程

实验选用响应波长不同的两种 HgCdTe 光导器件。器件采用移动加热器法生长的体材料,经减薄、阳极氧化、刻蚀等工艺制备而成。测量时用低温胶粘贴在柯伐管座上,管座与杜瓦的冷头直接接触,以确保良好的热传导。器件上方安装冷屏从而改变接收到的背景辐射参量,结构如图 1 所示。

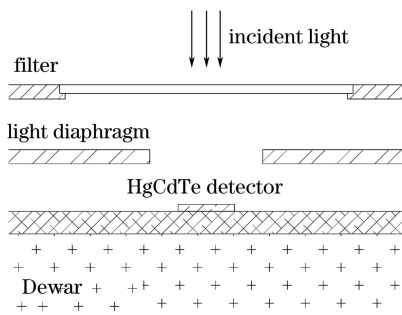


图 1 器件测试安装结构图

Fig. 1 Structure of the device setting

频谱测量采用自搭建的逐点测量装置,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宽内的噪声,其它频率的噪声被排除。测量结果通过显示器输出,同时在示波器上实时监控外部干扰的影响。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;然后,比较噪声频谱在

1 kHz 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。

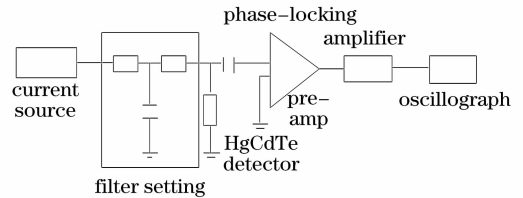


图 2 频谱测试装置图

Fig. 2 Experimental setup to measure noise spectrum

3 实验结果及其分析

图 3 表示 30 个中波器件在不同背景下的噪声变化。测试温度为 100 K,频率为 1 kHz。横坐标为器件序号;▲表示器件未带冷屏、滤光片测量的结果,•表示器件带冷屏、滤光片的测量结果。图中显示,增加冷屏、滤光片之后,噪声明显下降,30 个器件的平均噪声从 $9.97 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 降低到 $2.17 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$,降低了约 78.2%。利用普朗克公式计算,增加冷屏、滤光片之后,背景辐射通量密度由原来的 $1.32 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 降为 $5.86 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

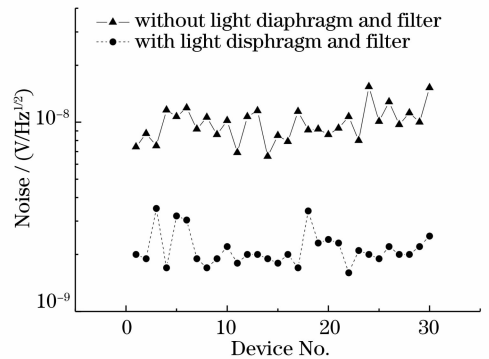


图 3 不同背景下中波器件的噪声变化

Fig. 3 Noise of medium-wave detectors under different background radiation

图 4 所示为甚长波器件在不同背景下的噪声随器件所加偏流的变化。测试温度为 77 K,频率为 1 kHz。无冷屏时,器件接收的背景辐射为 $1.55 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,来自半球空间;增加冷屏后,器件接收的背景辐射减小到 $6.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,噪声反而增加。

对于中波和甚长波这两个不同响应波段的器件,随背景辐射的变化,噪声呈现不同的变化趋势:随背景辐射的增加,中波器件噪声增加,长波器件的

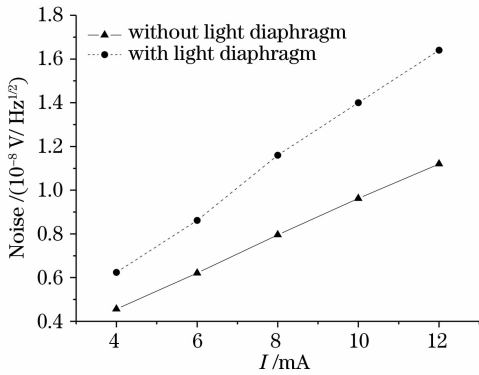


图 4 甚长波器件的噪声变化

Fig. 4 Noise of extremely-long-wave detectors under different background radiation

噪声减小。

光导器件的噪声主要有热噪声、产生-复合 (G-R) 噪声及 $1/f$ 噪声。其中, 热噪声 $V_j = (4kTr\Delta f)^{1/2}$, 与频率无关, 仅与器件的电阻值和温度有关, 对于 HgCdTe 器件, 热噪声很小, 通常可以忽略。G-R 噪声与光或热激发产生的自由载流子密度的涨落有关, 频率较低时基本不变, 高频时下降,

满足 $V_{G-R} = V_{G-R}(0) \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}$ 关系, 其中 $V_{G-R}(0)$

为低频噪声。由于 HgCdTe 中、长波器件有效寿命 τ 在 μs 量级以下, 因此在实验测量范围内, G-R 噪声随频率变化不大。 $1/f$ 噪声, 顾名思义, 在通常使用的测量范围内与频率成反比, 是一种低频噪声^[5]。其中有关 $1/f$ 噪声与 G-R 噪声的关系存在两种看法, 一种认为, $1/f$ 噪声与 G-R 噪声无关^[6], 这种观点在早期的光导器件测量数据中并没有得到实验证明, 另一种观点是 Broudy 从 HgCdTe 器件的实验数据中总结出来, 认为, $1/f$ 噪声与 G-R 噪声有关,

$V_{1/f}^2 \cong \frac{K_1}{f} V_{G-R}^2$, 这就为从 G-R 噪声分析噪声提供了

依据。而 G-R 型 $1/f$ 噪声起源的观点从不同尺寸的金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET) 低频噪声频谱测量结果中也获得了实验支持^[7]。根据各噪声与频率的不同关系, 可以进行不同噪声的分析。

图 5 为不同背景辐照作用下, 中波器件噪声频谱的典型测量结果。由图可见, 在小于 20 kHz 频率范围内, 封装前主要是 $1/f$ 噪声占主导, 在 1 kHz 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, 1 kHz 处的噪声受 $1/f$ 噪声影响减小, 产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声共同决定此频率下的器件噪声。

图 6 为不同背景作用下, 甚长波器件的噪声频

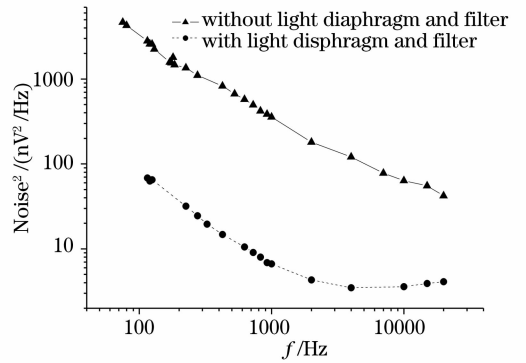


图 5 中波器件在封装前后噪声频谱的变化

Fig. 5 Noise spectra of medium-wave detector before and after packaging

谱变化。两种情况下, 器件的拐点频率都低于 1 kHz, 未加冷屏时拐点约为 500 Hz, 增加冷屏后拐点约为 900 Hz。随着背景辐射的减小, 拐点频率提高, $1/f$ 噪声增加, 产生-复合噪声增加, $1/f$ 噪声与产生复合噪声变化一致。在 1 kHz 频率, 主要为产生-复合噪声, 随着背景辐射减小, 器件的噪声由 5.5 nV/Hz^{1/2} 变为 9.4 nV/Hz^{1/2}。

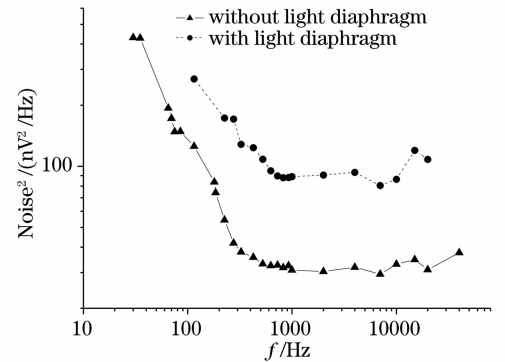


图 6 背景辐射对甚长波器件噪声频谱的影响

Fig. 6 Noise spectra of extremely-long-wave detectors under different background radiation

由于 $1/f$ 噪声和产生-复合噪声两者的变化一致, 因此从产生-复合噪声入手, 进行相应的理论计算分析。

在低频范围内, 光电导型探测器的产生-复合噪声为^[8]

$$V_{G-R} = \frac{2V_0}{(lwt)^{1/2}} \left(\frac{1+b}{nb+p} \right) \left(\frac{pn}{n+p} \right)^{1/2} \tau_{\text{eff}}^{1/2} \Delta f^{1/2}, \quad (1)$$

式中 l, w, t 分别为器件的长、宽、厚, V_0 为器件所加偏压, b 为电子迁移率与空穴迁移率的比值, $n = n_0 + n_B, p = p_0 + p_B, p_B$ 为背景辐射产生的非平衡载流子浓度

$$p_B = \eta \Phi_B \tau_{\text{eff}} / t, \quad (2)$$

式中 η 为量子效率, Φ_B 为背景辐射通量密度, τ_{eff} 为器件的有效寿命^[4], 满足

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{2S}{d} = \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{S-R}} + \frac{2}{d}(s_A + s_R + s_{S-R}), \quad (3)$$

各种复合机制与载流子浓度密切相关, 从而 τ_{eff} 又受到 p_B 的影响, $\tau_{\text{eff}} \propto p_B$. 利用(2)式、(3)式, 计算出一定背景照射下产生的非平衡载流子浓度和器件的有效寿命, 代入(1)式得到器件的产生-复合噪声。

对实际典型中波器件, 计算产生-复合噪声随背景辐射的变化, 如图 7 所示。产生-复合噪声随背景辐射的变化存在一个极大值(图中对应背景辐射通量密度为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 当背景辐射通量密度小于 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 随着背景通量密度的增加, 产生-复合噪声迅速增加; 背景辐射超过 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 后, 产生-复合噪声减小。

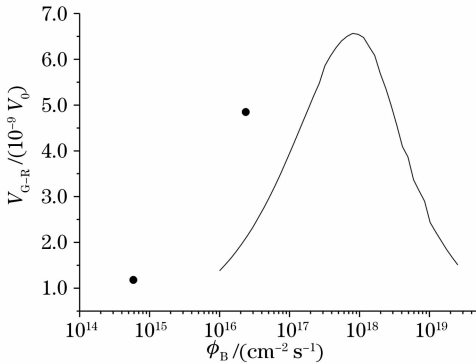


图 7 中波器件的产生-复合噪声与背景辐射的关系
Fig. 7 Relation between G-R noise and background radiation for medium-wave detector

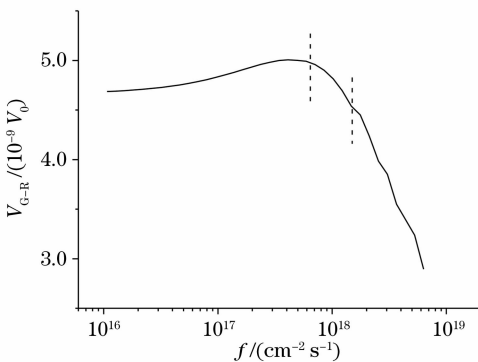


图 8 甚长波器件的产生-复合噪声与背景辐射的关系
Fig. 8 Relation between G-R noise and background radiation extremely for vrey-long-wave detector

由于 HgCdTe 的光吸收为直接跃迁过程, 假定能够产生跃迁的不同波长的光子对探测器作用的内

量子效率相同, 则封装前后中波器件受到的背景辐射通量密度分别为 $2.36 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $5.86 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 对应图 7 中“·”所示的位置。“·”表示的器件噪声的测量值, 比曲线代表的计算值大很多, 主要是由于中波器件在 1 kHz 频率处受 $1/f$ 噪声影响很大(见图 5)。

图 8 所示为计算所得的甚长波器件的产生-复合噪声随背景辐射的变化。背景辐射在 $4.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 左右, 噪声有一个极大值, 当背景辐射大于 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 噪声迅速减小。增加冷屏前后, 背景辐射通量密度分别为 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $6.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 对应图中虚线所处位置。可见, 增加冷屏, 背景辐射通量密度降低, 产生-复合噪声增加。

4 “临界背景通量密度”

背景辐射对不同波段的器件噪声产生不同的影响, 主要是因为噪声随背景辐射的变化存在一个与某一背景辐射通量对应的噪声极大值, 而不同波段的器件由于接收背景辐射大小不同而处于噪声变化的不同阶段。由这个背景辐射, 可以定性推测产生-复合噪声随背景辐射的变化情况。定义此通量密度为“临界背景通量密度” Φ_0 。当背景辐射小于 Φ_0 时, 噪声随着背景辐射的增加而增加; 当背景辐射大于 Φ_0 时, 噪声随背景辐射的增加而减小。

对于 n 型光导探测器, 在背景辐射产生的非平衡载流子浓度范围内, 量子效率变化很小。忽略量子效率随辐射通量的变化, 将其看作是一个常量。

“临界背景通量密度” Φ_0 满足

$$\left. \frac{\partial V_{G-R}^2}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\varphi_0} = 0. \quad (4)$$

结合(3)式, 进一步分析“临界背景通量密度” Φ_0 与有效寿命 τ_{eff} 等参量的关系。“临界背景通量密度” Φ_0 与材料组分、迁移率、表面电荷密度等参量有关。根据工程研发用器件的实际情况, Φ_0 大致在 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 到 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内变动。

对中波器件, 由于器件接收的背景辐射通量密度 Φ 通常小于“临界背景通量密度” Φ_0 , 产生-复合噪声随背景辐射的增加而增加, 器件的产生-复合噪声在封装之后可以减小约 10 倍左右。虽然中波器件受 $1/f$ 噪声影响严重, 但由于 $1/f$ 噪声与产生-复合噪声两者随背景辐射的变化一致, 因而通过产生-复合噪声可以较好地了解器件的噪声情况。

对于甚长波器件, 可根据“临界背景通量密度”

Φ_0 的大小分为三种情况:

1) $\Phi_0 < 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 器件的产生复合噪声在封装之后增加; 2) $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} < \Phi_0 < 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 器件的产生复合噪声在封装之后变化不大; 3) $\Phi_0 > 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 器件的产生复合噪声在封装之后减小。

“临界背景通量密度” Φ_0 的定义, 为器件筛选提供了有益的参考。器件经过氧化、刻蚀等工艺制备出来后, 进行性能测量, 挑选满足要求的合格芯片进行封装, 再进行测量。由于封装前后背景辐射不同, 因此, 根据器件的实际情况, 结合具体工艺参量, 估算 Φ_0 的值, 估计噪声的变化, 再提出封装前器件的噪声要求, 其标准更为合理。

5 结 论

对不同波长响应的 HgCdTe 器件在不同背景辐射条件下的噪声变化进行了研究。噪声频谱测量表明, 产生-复合噪声分量和 $1/f$ 噪声分量是器件的主要噪声来源, 并且这两个分量随背景的变化趋势相同。利用非平衡载流子和器件有效寿命的理论进行了计算和分析, 结果表明, 器件噪声随背景辐射的变化存在一个极大值, 而中波和甚长波器件处在不同的作用区域内, 接受到的背景辐射对载流子浓度和器件有效寿命的影响不同, 从而噪声变化表现不

同。在此基础上, 提出了“临界背景通量密度”的概念, 为工程研发器件筛选提供了有意义的参考。

参 考 文 献

- 1 S. Borrello, M. Kinch, D. LaMont. Photoconductive HgCdTe detector performance with background variations[J]. *Infrared Physics*, 1977, **17**(2): 121~125
- 2 V. Gopal, A. V. R. Warriar. On the optimum thickness of a photoconductive detector: a 0.1 eV HgCdTe detector [J]. *Infrared Physics*, 1984, **24**(4): 387~390
- 3 Huang Jianxin. Study on the photoelectric properties of N-type photoconductor and sprite detector [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 1989. 5~17
黄建新. n 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光电导体光电特性及 SPRITE 探测器研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 1989. 5~17
- 4 Gong Haimei. Study on Surface and Interface of Mercury Cadmium Telluride [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993. 68~93
龚海梅. 碲镉汞表面与界面的研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 1993. 68~93
- 5 Aldert van der Ziel. Unified Presentation of $1/f$ noise in electronic devices: fundamental $1/f$ noise sources [C]. *Proc. IEEE*, 1988, **76**(3): 233~258
- 6 Joseph Kimchi, J. Ray Frederick, Theodore T. S. Wong. Low frequency noise in photoconductive HgCdTe detectors [C]. *Proc. SPIE*, 1985, **2812**: 540~551
- 7 M. J. Uren, D. J. Day, M. J. Kirton. $1/f$ and random telegraph noise in silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(11): 1195~1197
- 8 D. Long. Letter to the editors on generation-recombination noise in infrared detector materials [J]. *Infrared Physics*, 1967, **7**(2): 169~170