

文章编号:1001-9014(2009)03-0161-04

皮秒脉冲激光照射下碲镉汞光伏红外探测器的负光伏响应新现象

崔昊杨^{1,2}, 李志锋¹, 马法君¹, 胡晓宁¹, 叶振华¹, 陆卫¹

(1. 中科院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 上海电力学院 计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要:利用皮秒脉冲激光激发碲镉汞阵列探测器上的光敏元,发现光伏响应表现为在最初大约15 ns范围内首先形成一个明显的负光生电压的响应谷,之后才演变为正的光伏响应峰.改变入射激光脉冲的光子能量发现,无论是光子能量大于禁带宽度的单光子吸收跃迁还是小于禁带宽度的双光子吸收跃迁,器件的光伏响应随时间的演变均表现出类似的规律.用光阑对探测器的受光面积进行限制将使负的光生电压减弱并接近消失.结合探测器阵列的电极分布构形,将负光伏响应指认为p-电极的肖特基接触所致.利用该方法有可能对p-电极是否形成欧姆接触进行判定,其灵敏度应远高于常规的电学测量方法.

关键词:碲镉汞;脉冲激发;瞬态光伏响应;肖特基接触

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

NEGATIVE PHOTOVOLTAIC-RESPONSES IN HgCdTe INFRARED PHOTOVOLTAIC DETECTORS IRRADIATED WITH PICOSECOND PULSED LASER

CUI Hao-Yang^{1,2}, LI Zhi-Feng¹, MA Fa-Jun¹, HU Xiao-Ning¹, YE Zhen-Hua¹, LU Wei¹

(1. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Computer and Information Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A transient negative photovoltaic-response behavior was reported in a pixel of the linear array of HgCdTe infrared photovoltaic detectors. When irradiated with a picosecond pulsed laser, the time profile of the responding voltage shows an apparent negative valley during the first 15 ns, then it evolves a positive peak. By changing the excitation laser energy, the transient photo-responses of the detectors show the similar time evolution profiles, no matter for the case of single photon absorption transition that the photon energy is larger than the bandgap or for the case of two photon absorption transition that the photon energy is smaller than the bandgap. Blocking the laser beam with an aperture to limit the irradiation area makes the negative photovoltage decrease and even disappear. By considering the p-electrode configuration in the linear array of the detectors, the negative photovoltaic-response has been attributed to the Schottky contact behavior of the p-electrode. Such a new phenomenon could be used in characterizing the Ohmic contact of the p-electrode in this kind of photo-detectors, and its sensitivity is expected to be much higher than that of the conventional *I-V* measurements.

Key words: HgCdTe; pulsed excitation; transient photovoltaic-response; Schottky contact

引言

碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面阵列是当今最为先进的第三代红外光电探测器^[1,2],作为基本探测单元的pn结所产生的光伏效应已经被广泛研究.其

工作机理为依靠内建电场分离光生电子-空穴对将光信号转变为电信号,再通过金属电极输出到读出电路.对这一效应的充分理解,可以揭示光电转换的机制及其相关的物理过程,以利于探测器的设计和优化.瞬态光响应特性是描述材料、器件特性以及理

收稿日期:2008-06-21,修回日期:2009-04-18

Received date: 2008-06-21, revised date: 2009-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目(10734090,10234040,60476040)

作者简介:崔昊杨(1978-),男,吉林四平人,博士,主要从事半导体光电器件研究.

解光电转换基本物理过程的有力工具^[3,4]. 然而对于成品 HgCdTe 红外焦平面阵列而言, 瞬态光伏特性的研究还并不多见, 因此对 HgCdTe 光伏探测器瞬态现象进行细节性研究具有实际意义.

本文探讨了 HgCdTe 光伏红外探测器对超快脉冲激光的瞬态响应, 发现在正向光伏信号出现之前首先出现一负的光伏响应. 利用 p-金属电极界面肖特基接触机制对此现象进行了较好的解释. 由于该现象将光伏信号与电极界面接触状态相关联, 因此可望应用于对 HgCdTe 光伏器件 p-电极接触的评价这一关键技术环节. 相对于传统的电学 $I-V$ 方法^[5-8], 其灵敏度有望得到大幅度的提高.

1 实验

所测量的 HgCdTe 光伏红外探测器单元器件结构如图 1 所示. p 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 生长在以 GaAs 为衬底的 CdTe 缓冲层上. 在 p 型表面注入硼离子, 形成突变 $n^+ - p$ 结, 表面淀积有 ZnS 钝化层. 样品被倒焊在宝石基板上, 激光透过衬底背入射到 pn 结中. 测试器件放置在液氮杜瓦中, 温度接近 77K. 可调谐脉冲激光采用 Nd:YAG 激光器泵浦光学参量产生器/差频放大器产生, 激光脉冲的持续时间为 30ps, 重复频率为 10Hz. 基于激光脉冲的超短持续时间和低重复频率特性, 可以确保在每一次脉冲入射前, 系统已经由激发态恢复到基态. 同时, 也可以忽略器件上热效应积累的影响. 通过测量电路中的 50Ω 的负载电阻两端的电压降变化实现瞬态光响应信号的探测, 信号通过杜瓦上同轴电缆输入 Agilent Infiniium 54832B 数字存储示波器, 记录瞬态光伏信号的时间特性.

2 结果与讨论

图 2 为 77 K 下组分为 0.298, 结面积为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的 HgCdTe 线列器件中某光敏元在脉冲激光照射下形成的瞬态光伏信号随时间的演变过程及其与激光功率密度的变化关系. 组分为 0.298 的该器件的带隙宽度所对应的波长为 $4.8 \mu\text{m}$, 实验所用的激发波长为 $4.5 \mu\text{m}$, 因此光伏响应所对应的是 HgCdTe 价带到导带之间单光子吸收跃迁过程. 可以看到, 与常规稳态测试的单一正向光伏响应不同, 在脉冲响应的过程中最初的约 15ns 范围内首先形成一个明显的负光生电压的响应谷, 之后才演变为正的光伏响应峰. 随着激光功率的增加, 正、负光伏电压的峰值同时相应地增大. 对线列中其它光敏元进

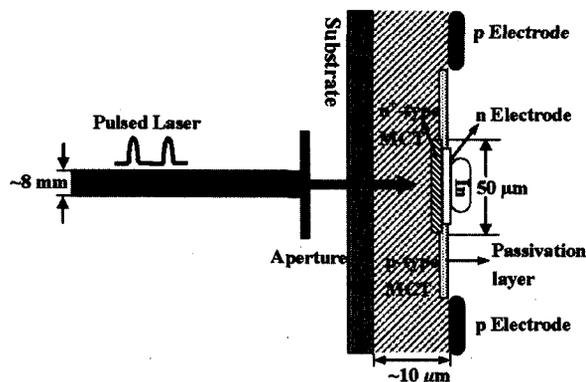


图 1 碲镉汞光伏探测器单元结构脉冲测试示意图 (图形未按真实比例)

Fig.1 Schematic diagram of the pixel in HgCdTe photovoltaic linear array irradiated by the pulsed laser beam (not to the scale)

行测量, 同样发现了类似的负光伏响应现象.

在已掌握的 HgCdTe 光伏器件的资料中, 尚未发现如此复杂的瞬态光伏信号形式. 所研究的 n-on-p 型 HgCdTe 光伏探测器的基本工作机制是由 p-型吸收层对入射光子进行吸收, 激发的电子-空穴对通过扩散到达结区, 然后被 pn 结内建电场分离, 形成光生电压. 对于脉冲光激发的响应, 在理想情况下应该是呈现出正向的快速上升和缓慢下降两个过程. 而本实验观察到的瞬态光伏信号中出现负向光伏信号意味着样品中存在新的光伏机制, 其作用效果与 pn 结相反. 从时间顺序上看, 该机制的响应频率高于 pn 结. 从响应幅度上看, 除了曲线 C 外, 曲线 A、B 中负光伏的幅度大致为正光伏的三分之一. 曲线 C 由于光强过大导致正向光伏响应出现饱和, 其随时间的衰退曲线出现严重的畸变, 正向光伏电压的幅度受到抑制.

为了探索负光生电压的形成机制, 进一步对该样品进行了双光子吸收的光伏响应实验. 用波长为 $7.9 \mu\text{m}$ (能量约为带隙宽度的 61%) 的激光脉冲对该样品进行激发, 其瞬态光伏响应曲线以及随激光功率密度的变化关系示于图 3. 可以看到, 在该波长激光的激发下, 器件同样出现了明显的光伏响应信号, 说明低于禁带宽度能量的光子通过双光子吸收跃迁产生了电子-空穴对, 并形成了光生电压. 与单光子脉冲激发的结果相类似, 双光子脉冲激发的光伏信号也出现了先负后正的时序关系, 并且随着激光脉冲能量的增加, 正、负光生电压的峰值也都增加. 负电压持续的时间也与单光子脉冲响应中负电压的时间相接近, 均约为 15ns. 这也许意味着两种

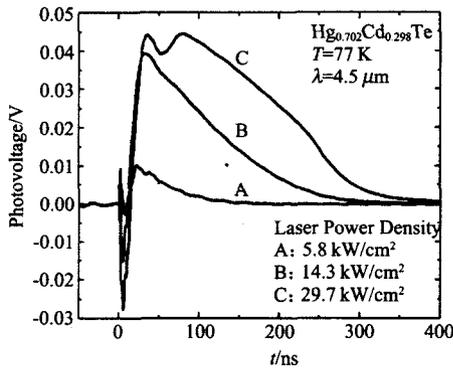


图2 HgCdTe 线列器件某光敏元对能量高于禁带宽度的脉冲激光的响应信号(单光子吸收跃迁)及其随入射激光功率密度的变化

Fig. 2 Transient photovoltaic response of the HgCdTe photodiode irradiated by the pulsed laser with the photon energy larger than the bandgap for the different laser power densities (single-photon transition)

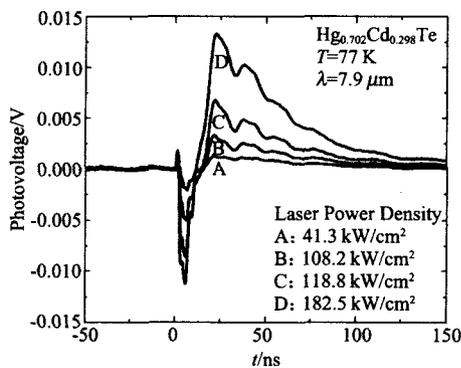


图3 入射光子能量小于禁带宽度时, HgCdTe 光伏器件的光伏信号(双光子吸收跃迁)随入射激光光强的变化关系

Fig. 3 Transient photovoltaic response of the HgCdTe photodiode irradiated by the pulsed laser with the photon energy smaller than the bandgap for the different laser power densities (two-photon transition)

激发条件下负的光生电压的产生是源于相同的机制. 与图2略有不同的是, 图3中负光伏响应的峰值在激光功率较小时甚至超过了正电压的峰值(曲线A、B), 而在功率较大时基本与正电压峰值相接近(曲线C、D).

如此显著的负光伏现象首先令人想到的就是界面电荷机制^[9], 即在衬底/HgCdTe 界面存在正电荷, 所形成的空间电势分布与pn结相反, 产生的光伏响应也与pn结相反. 可是, 细致的考虑很容易排除这种机制. 首先, 界面电荷不可能具有如此之高的密度, 使之产生的光伏电压能够与pn结可相比较甚至超过pn结. 其次, 双光子吸收的光伏曲线形状与单光子吸收相类似, 说明负、正光伏峰值在时序上的

差异并非由于界面电荷与pn结之间相距约 $10\mu\text{m}$ 所致. 也就是说, 如果按照界面电荷模型, 由于衬底界面位于光入射面(参见图1), 在单光子吸收的情况下, 界面处的吸收最强, 因而具有最高的电子-空穴对浓度, 可能导致率先出现被界面电荷分离形成负电压的情况. 对于双光子吸收的情形, 光在其所通过的路径上是均匀吸收的, 因而具有均匀分布的电子-空穴对. 这两种截然不同的光生载流子分布在界面电荷机制下不可能形成相类似的光伏响应时序过程, 因此排除了界面电荷的机制.

另外一种可能的机制就是p-电极的肖特基机制. 对于 n^+ -on-p型碲镉汞光伏器件, 普遍认为电极与 n^+ -HgCdTe容易形成欧姆接触, 而与p-HgCdTe不容易形成欧姆接触. 在所研究的HgCdTe光伏探测器中p-电极与n-电极共面(参见图1), 并且由于p-HgCdTe功函数较大^[10], 在简单近似下如果形成肖特基接触则构成类 n^+ -p结, 其方向与pn结相反, 产生的光伏响应的电压方向也与pn结相反. 此外, 由于肖特基结不存在少数载流子的电荷存储效应, 因此具有更快的光响应速度, 形成率先出现的负光伏响应^[11].

对上述两种激发情形下光生载流子浓度的估算证明了在p-电极界面处存在着较高浓度的光生载流子, 足以形成明显的光伏响应. 当入射波长为 $4.5\mu\text{m}$ 时(单光子吸收情况), 设一个光子激发一对电子-空穴对, 在实验所采用的功率密度范围内吸收区内的平均光生载流子浓度为:
$$N = \frac{W \cdot \lambda \cdot \alpha}{1.24 \cdot S} \cong 10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$
, 而在远离入射面的p-电极附近其光生载流子浓度约下降一个量级. 当入射光子能量小于带隙时(双光子吸收情况), 激发的光生载流子在器件受光路径上均匀分布. 光生载流子浓度由速率方程决定^[12]:
$$\frac{d\Delta n}{dt} = D \nabla^2 \Delta n - \frac{\Delta n}{\tau} + \frac{\beta I^2}{2\hbar\omega}$$
, 进而可以近似求出光生载流子浓度为:
$$\Delta n = \frac{\beta I^2}{2\hbar\omega} \Delta t \cong (0.5 \sim 30) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$
 (设双光子吸收系数为 $1.5 \text{ cm}^2/\text{MW}$). 由此可见: 在实验所用光强范围内, 即使采用背入射方式, 在远离入射面的电极界面处仍然存在着较高浓度的光生载流子. 这样, 如果p-电极接触形成的是肖特基结而不是欧姆接触, 就能够使电极界面处的光生载流子分离而形成率先出现的负光伏响应.

对所测HgCdTe线列光伏探测器的受光面积的分析进一步证明了对于肖特基机制的推断. 图4示

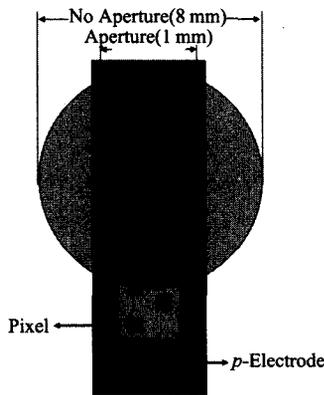


图4 HgCdTe 线列光伏探测器的电极分布和受光面积示意图
Fig.4 Schematic diagram of the electrode configuration and the laser irradiation areas with and without aperture in the HgCdTe photodiode linear array

出了线列探测器的电极分布构形, n-电极构成的探测器光敏元位于中间, 呈品字形排列, 而作为公共端的 p-电极则环绕在全部像元周围. 由于像元的尺寸只有 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. 而激光光斑尺寸约为 8mm, 因此在光照过程中不可避免地将对 p-电极覆盖区域形成光激发, 甚至构成了受光面积的主要部分. 一旦 p-电极形成肖特基接触, 其所产生的光生电压应足以与像元 pn 结的光生电压相比较, 这也正是实验中所观察到的现象.

为了验证上述推断, 用可变光阑对激光光斑尺寸进行了限制, 如图 4 中的小圆所示. 随着光阑尺寸的减小, 负光伏响应的幅度确实不断减小, 直至接近消失. 由于篇幅所限本文未给出加光阑后负光伏消失的实验曲线, 但实验现象的观察是明确无误的.

3 结论

本文报道了 HgCdTe 光伏探测器对皮秒脉冲光激发的瞬态响应中出现的负光伏现象, 表现为在最初的十几纳秒范围内首先形成一个明显的负光生电压的响应谷, 之后才演变为正的光伏响应峰. 改变入射激光脉冲的光子能量 (波长) 发现, 无论是光子能量大于禁带宽度 (单光子吸收跃迁) 还是小于禁带宽度 (双光子吸收跃迁), 器件的光伏响应随时间的演变均表现出类似的规律. 对此现象进行了详细的分析和实验, 发现该负光伏响应现象可以归结为 p-电极的肖特基接触所致. 由于肖特基结不存在少数载流子的电荷存储效应, 因此具有更快的光响应速度, 而其极性与 pn 结极性相反, 因此形成率先出现的负光伏响应. 用光阑对探测器的受光面积进行限制, 减小 p-电极的受光面积, 可使负的光生电压减

弱并接近消失. 由于传统的欧姆接触评价中采用 I-V 测量, 如果接触为肖特基型则在测试中总是有一个结处于反向偏置的高阻状态, 严重干扰着测试的灵敏度. 而利用本文的脉冲响应方法能够在时序上和极性上将肖特基结与 pn 结的作用分开, 因此在 p-电极欧姆接触特性的判定上, 其灵敏度应远高于常规的电学测量方法.

REFERENCES

- [1] QIAO Hui, ZHOU Wen-Hong, YE Zhen-Hua, *et al.* Study of hydrogenation on HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (乔辉, 周文洪, 叶振华, 等. 碲镉汞光伏型探测器的氢化处理研究. *红外毫米波学报*), 2007, **26**(5): 326—328.
- [2] SHAO Jun, MA Li-Li, LÜ Xiang, *et al.* Recent progress and potential impact of modulation spectroscopy for narrow-gap HgCdTe [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵军, 马丽丽, 吕翔, 等. 窄禁带碲镉汞调制光谱的近期进展和前景. *红外毫米波学报*), 2008, **27**(1): 1—6.
- [3] Song Q L, Wu H R, Hou X Y, *et al.* Excitation dissociation at the indium tin oxide-N, N-Bis(naphthalene-1-yl)-N, N-bis(phenyl) benzidine interface: A transient photovoltaic study [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(23): 232101.
- [4] Pan Y L, Chen L B, Wang Y, *et al.* Transient photovoltaic properties in Al/tin-phthalocyanine/indium-tin-oxide sandwich cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(10): 1314—1316.
- [5] HU Xiao-Ning, LI Yan-Jin, FANG Jia-Xiong. Influence of MS interface transport on the current-voltage characteristic of MCT PV device [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡晓宁, 李言谨, 方家熊. MS 界面运输特性对碲镉汞光伏器件 I-V 特性的影响. *红外毫米波学报*), 2001, **20**(3): 165—168.
- [6] HU Xiao-Ning, LI Yan-Jin, FANG Jia-Xiong. MS interface parameters extracted from current-voltage characteristic of PV device [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (胡晓宁, 李言谨, 方家熊. 碲镉汞光伏器件的电极界面参数. *半导体学报*), 2001, **22**(11): 1439—1443.
- [7] Milhelashvili V, Eisenstein G, Garber V, *et al.* On the extraction of linear and nonlinear physical parameters in nonideal diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(9): 6873—6883.
- [8] Polla D L, Sood A K, Schottky barrier photodiodes in p-HgCdTe [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(9): 4908—4912.
- [9] Schacham S E, Finkman E. Properties of insulator interfaces with p-HgCdTe [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8**(2): 1171—1173.
- [10] HU Xiao-Ning, ZHAO Jun, GONG Hai-Mei, *et al.* Ohmic contact of Au/Sn on p-HgCdTe [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡晓宁, 赵军, 龚海梅, 等. Au/Sn 与 p-HgCdTe 的欧姆接触. *红外毫米波学报*), 1998, **17**(5): 397—400.
- [11] LIU En-Ke, ZHU Bing-Sheng, LUO Jin-Sheng. *Physics of Semiconductors* [J]. Beijing: National Defense Industry Press, 4th Edition. (刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. *半导体物理学*. 第四版, 国防工业出版社), 1994: 190.
- [12] Seiler D G, McClure S W, Justice R J, *et al.* Nonlinear optical characterization of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ using two-photon absorption techniques [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1986, **4**(4): 2034—2039.