

## 波段外激光辐照光导型 InSb 探测器的一种新现象\*

郑鑫 江天 程湘爱<sup>†</sup> 江厚满 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年5月16日收到; 2011年6月24日收到修改稿)

利用不同功率密度的 10.6  $\mu\text{m}$  (光子能量为 0.12 eV) 连续激光辐照了禁带宽度为 0.228 eV 的光导型碲化铟探测器, 得到了与以往报道不同的实验现象. 当 10.6  $\mu\text{m}$  波段外激光辐照光导型探测器时, 探测器吸收激光能量后温度升高. 在探测器的温升过程中, 存在一个转变温度  $T_0$ . 当探测器的温度  $T < T_0$  时, 载流子浓度基本不变, 迁移率随温度的升高呈  $T^{-2.35}$  趋势下降, 引起探测器的电导率减小, 电阻增大, 响应输出电压升高; 当  $T > T_0$  时, 热激发载流子浓度随温度的升高呈指数增长, 电阻急剧下降, 超过了载流子迁移率降低对电阻的影响, 响应输出急剧下降. 光电导探测器在较高功率密度波段外激光辐照下的响应特性是载流子的浓度和迁移率在温度影响下相互作用的结果. 这对进一步完善半导体内载流子输运模型提供了实验依据.

**关键词:** 半导体探测器, 波段外激光, 光电导, 迁移率

**PACS:** 73.40.Lq, 73.50.Lw, 73.50. Pz

## 1 引言

半导体光电探测器由于体积小, 重量轻, 响应速度快, 灵敏度高, 易于与其他半导体器件集成, 已经广泛应用于遥感、遥测、摄像、传真和精密测量等许多领域. 半导体材料的辐照效应是半导体各种光电子应用的物理基础, 因而一直受到人们的关注, 是一个活跃的研究领域<sup>[1-7]</sup>. 半导体的光电导效应是指光照引起半导体材料电导率改变的现象, 这种改变可以是电导率的增加, 也可以是电导率的减小. 一般来说, 这是一个包括同时发生或者相继发生的几种物理过程的复杂现象. 这些物理过程包括光吸收和载流子的激发、热载流子弛豫、载流子的迁移和复合等<sup>[8]</sup>, 因而光电导现象提供了研究半导体各种有关物理性质的手段.

近几年来, 波段外激光对半导体探测器的辐照效应越来越引起关注. 2003年, 国内报道了在波段外激光辐照下光导型光电探测器的电压响应与波段内激光的正常电压响应方向相反的现象<sup>[9]</sup> (简称对波段外激光辐照的反向电压响应现象). 光导型 CdS 探测器对波段内和波段外双光束组合激

光辐照的动态响应的实验结果, 进一步证实了波段外激光辐照的反向电压响应的结果<sup>[10]</sup>. 光导型 HgCdTe 在波段外激光辐照下的研究也相继开展, 提出了反向电压响应的机理<sup>[11-14]</sup>. 已有的理论模型<sup>[13,14]</sup> 普遍认为, 在波段内激光辐照下, 入射激光的光子能量大于半导体材料的禁带宽度, 产生带间激发, 光激发载流子浓度迅速增加, 载流子浓度突变是引发电导变化的主要原因. 在波段外激光辐照下, 入射光子的能量小于半导体材料的禁带宽度, 不足以引起电子从价带到导带的跃迁, 但可以引起自由载流子在同一带内跃迁, 即自由载流子吸收. 自由载流子吸收不改变载流子的数目, 而是通过改变载流子的迁移率引发电导<sup>[14]</sup>.

在最近的实验中, 我们采用 10.6  $\mu\text{m}$  (光子能量为 0.12 eV) 连续激光辐照了禁带宽度为 0.228 eV 的光导型碲化铟 (InSb) 探测器, 发现在较高功率密度波段外激光辐照下, 其输出电压在激光辐照过程中增大到一最大值后逐渐减小. 通过分析, 我们认为在较高功率密度波段外激光辐照下, 在探测器的温升过程中, 存在一个转变温度  $T_0$ . 当探测器的温度  $T < T_0$  时, 载流子浓度基本不变, 迁移率随

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 1030110) 资助的课题

<sup>†</sup> E-mail: xiang.ai.cheng@126.com

温度的升高而下降, 电阻增大, 响应输出电压升高; 当  $T > T_0$  时, 热激发载流子浓度随温度的升高呈指数增长, 电阻急剧下降, 超过了载流子迁移率降低对电阻的影响, 响应输出急剧下降. 光电导探测器在较高功率密度波段外激光辐照下的响应特性是载流子的浓度和迁移率在温度影响下相互作用的结果.

## 2 实验现象

本文所使用的光导型 InSb 探测器是由上海技术物理研究所提供, 激光均匀垂直辐照在探测器的光敏面上. 由于探测器前端有冷屏结构, 背景辐射对实验的影响已经得到较好的消除. 探测器封装在液氮制冷的杜瓦瓶内, 工作温度约为 77 K.

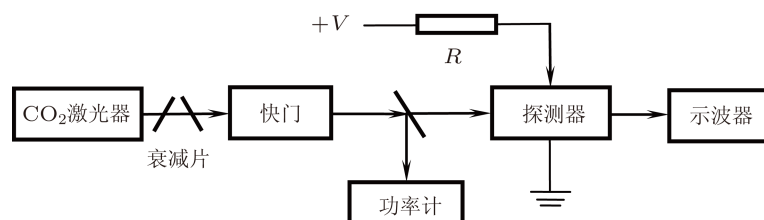


图1 CO<sub>2</sub> 激光器辐照 InSb 探测器实验装置示意图

10.6  $\mu\text{m}$  激光的光斑直径为 5 mm, 发散角为 5 mrad, 最大输出功率为 50 W, 激光器的输出功率可以通过调节其工作电流连续改变. 实验中探测器工作在直流偏置下 (直流偏压为 5 V), 与远大于探测器暗电阻 (3190  $\Omega$ ) 的负载电阻 ( $R = 30 \text{ k}\Omega$ ) 串联, 采用恒流工作模式, 实验装置如图 1 所示. 探测器上的端电压变化作为输出信号, 可以反映出探测器电阻的变化.

### 2.1 较低功率密度连续 CO<sub>2</sub> 激光辐照 InSb 探测器的实验现象

图 2(a), (b) 分别为 InSb 探测器在功率密度为 40 W/cm<sup>2</sup> 和 60 W/cm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线, 辐照时间约为 2 s, 对应于图 2 中的 5—7 s. 可以看出, 光导型探测器对波段外激光有响应.

在激光辐照过程中, 探测器的电阻有了明显的增大. 进一步的数据处理表明, 在激光开启和关闭瞬间, 响应曲线的上跳沿和下降沿均为毫秒量级. 这与先前的实验报道一致 [11–13].

### 2.2 较高功率密度连续 CO<sub>2</sub> 激光辐照 InSb 探测器的实验现象

图 3 为 InSb 探测器在不同功率密度 CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线, 随着激光功率密度的继续增大, 在激光辐照过程中, 探测器的输出电压不再是一直增大, 而是增大到一最大值后逐渐减小. 激光停止辐照的瞬间, 输出电压又很快上升, 然后迅速下降, 再进入热弛豫阶段. 增大到最大值所需时间和下降的幅度与入射激光的功率密度有关.

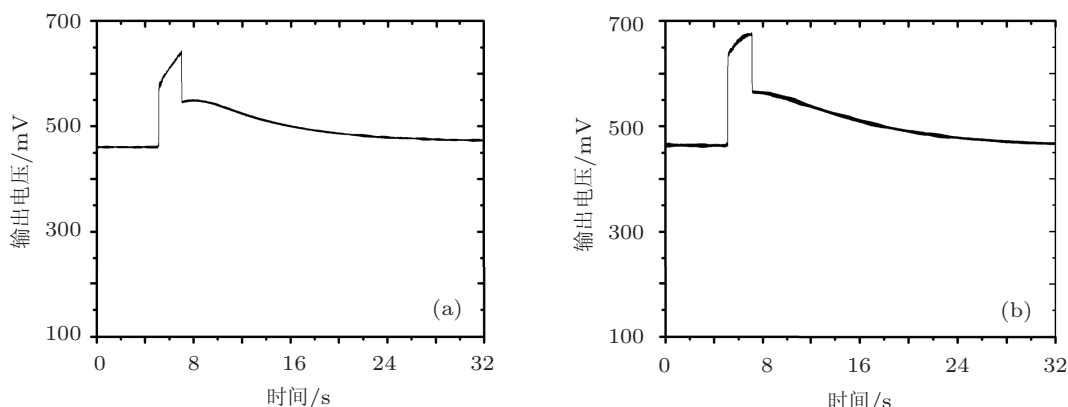


图2 InSb 探测器在不同功率密度 CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线 (a) 入射激光功率密度为 40 W/cm<sup>2</sup>; (b) 入射激光功率密度为 60 W/cm<sup>2</sup>

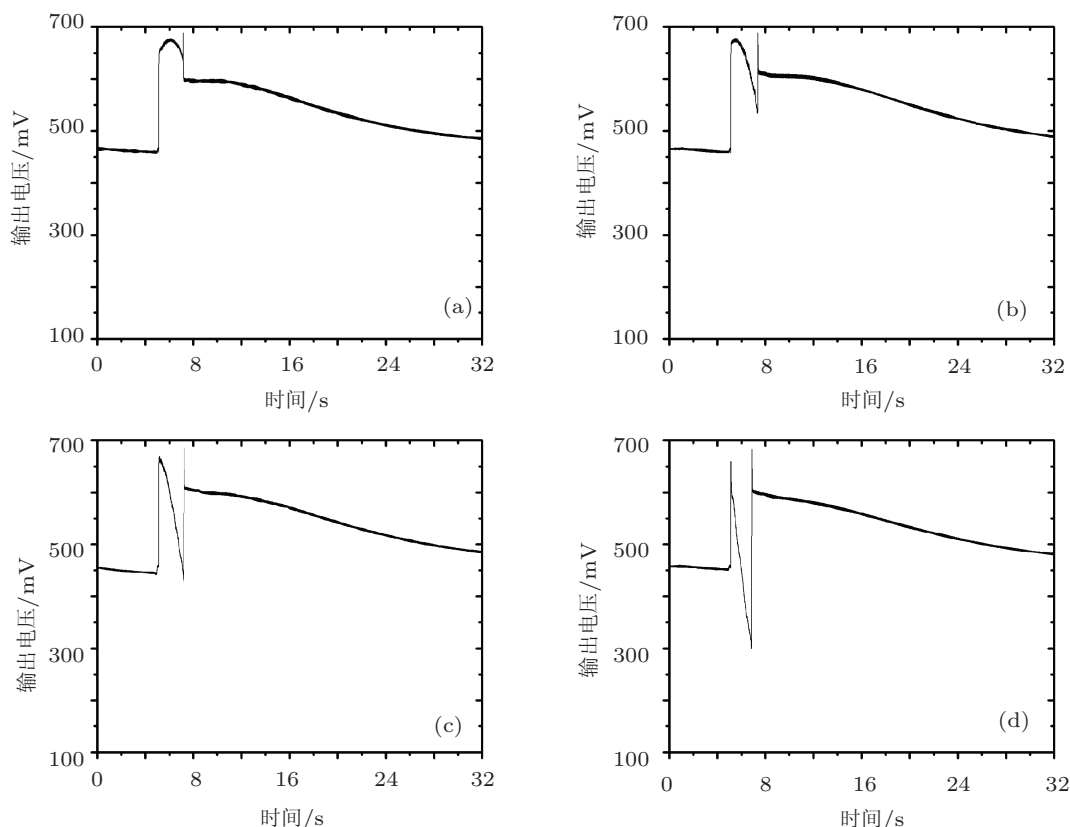


图3 InSb探测器在不同功率密度CO<sub>2</sub>激光辐照下的电压响应曲线 (a)入射激光功率密度为102 W/cm<sup>2</sup>; (b)入射激光功率密度为129 W/cm<sup>2</sup>; (c)入射激光功率密度为160 W/cm<sup>2</sup>; (d)入射激光功率密度为190 W/cm<sup>2</sup>

### 3 分析与讨论

探测器对不同波段、不同功率密度激光的响应是由半导体材料对激光的吸收决定的,半导体的光吸收有本征吸收、杂质吸收、自由载流子吸收、晶格吸收、激子吸收和多光子吸收等多种机理<sup>[15]</sup>.

由于InSb的禁带宽度小于两个CO<sub>2</sub>激光光子能量的总和,对于探测器在辐照过程中电阻突然降低,表现出与在波段内激光辐照下相同特性的现象,很有可能是由双光子吸收机理引起的.即随着器件温度的升高,其禁带宽度会有一定程度的变化<sup>[16]</sup>,当禁带宽度满足一定条件时,双光子吸收系数急剧增大<sup>[17]</sup>,从而导致了器件对CO<sub>2</sub>激光的吸收增强,表现出与波段内激光辐照下相同的现象.但双光子吸收所需的入射激光为脉冲激光且功率密度都在MW/cm<sup>2</sup>量级<sup>[18]</sup>,实验中所用的为连续激光且功率密度为100 W/cm<sup>2</sup>,远远低于这一标准,不满足双光子吸收的条件.一般而言,杂质吸收比较微弱<sup>[19]</sup>,且探测器已经具有较高的初始工作电压和工作温度,认为杂质已完全电离,可以忽略其对探

测器光电导的影响.激子吸收激光能量后形成的是电中性的互相联系在一起电子-空穴对,它们可以在体内运动,但是对电导率没有贡献,因而一般不能引起光电导效应<sup>[8]</sup>.

在波段外激光辐照下,入射光子的能量小于半导体材料的禁带宽度,不足以引起电子从价带到导带的跃迁(即本征跃迁),但可以引起自由载流子在同一带内跃迁,即自由载流子吸收.自由载流子吸收不改变载流子的数目,而是通过改变载流子的迁移率引发电导.而窄带半导体中自由载流子的光吸收截面最大,因而这类光电导在窄带半导体中最容易被观察到<sup>[8]</sup>.通常认为自由载流子吸收是波段外激光引发电导型探测器光电导效应的主要原因.由于自由载流子吸收引起的是载流子带内跃迁,这种光电导被称作带内光电导,已被广泛应用于远红外波段的辐射探测中.III-V族化合物的吸收光谱在远红外波段存在一定的吸收带,这就是晶格吸收<sup>[19]</sup>.光子能量被吸收后直接转化为晶格的振动动能,最终引起晶格的温升.晶格温度升高到一定程度后,引发探测器部分参数的变化,继而影响探测器的响应输出.综合以上分析,可以认为光

导型 InSb 探测器对波段外 CO<sub>2</sub> 激光的响应主要是由自由载流子吸收和晶格吸收引起的.

较低功率密度连续 CO<sub>2</sub> 激光辐照 InSb 探测器的实验现象与先前的实验报道一致<sup>[11-14]</sup>, 文献 [14] 将光导探测器在波段外激光辐照下电阻的迅速增大的原因归结为自由载流子吸收导致电子温度升高而引起的迁移率下降. 在波段外激光辐照下, 半导体内自由载流子吸收激光能量, 向带内高能态跃迁, 或者 (主要是电子) 向较高的非直接导带跃迁 (能谷间散射), 同时吸收或发射一个声子, 电子温度瞬间升高, 形成电子与晶格不等温的瞬间非稳态, 电子碰撞加剧, 迁移率降低.

在较高功率密度波段外激光辐照下, 探测器的温度会有比较明显的变化, 继而引发各种现象. 随着激光辐照时间的增长, 器件的温度继续上升, 本征激发迅速增加, 大量本征载流子的产生远远超过迁移率降低对电阻的影响, 导致探测器的电阻随温度的升高而下降, 从而输出电压逐渐减小. 综合两种情况, 可将光导型探测器在波段外激光辐照下的动态响应规律总结如下: 在探测器的温

升过程中, 存在一个转变温度  $T_0$ . 当探测器的温度  $T < T_0$  时, 本征激发还不显著, 载流子主要由杂质电离提供. 由于探测器具有较高的初始输出电压 (约 460 mV) 且工作在 77K, 可以认为杂质已经全部电离, 这时载流子密度约等于掺杂浓度  $N_D$ , 基本不随温度变化, 而迁移率随温度的升高而下降, 引起探测器的电导率减小, 电阻增大, 响应输出电压升高; 当  $T > T_0$  时, 本征激发迅速增加, 热激发载流子浓度随温度的升高呈指数增长, 大量本征载流子的产生远远超过了载流子迁移率降低对电阻的影响, 电阻迅速减小, 响应输出电压急剧下降.

为了验证这个判断, 我们设计实验加以验证. 实验现象是在较高功率密度激光辐照下发现的, 我们将其归结为载流子迁移率和本征载流子浓度在温度影响下共同作用的结果. 那么, 有理由认为, 在较低功率密度激光辐照下, 随着辐照时间的增长, 只要探测器的温度达到了  $T_0$ , 同样的现象是可以出现的. 为此, 将激光功率密度调整为 60 W/cm<sup>2</sup>, 辐照时间分别设置为 2s, 5s, 8s, 10s, 实验曲线如图 4 所示.

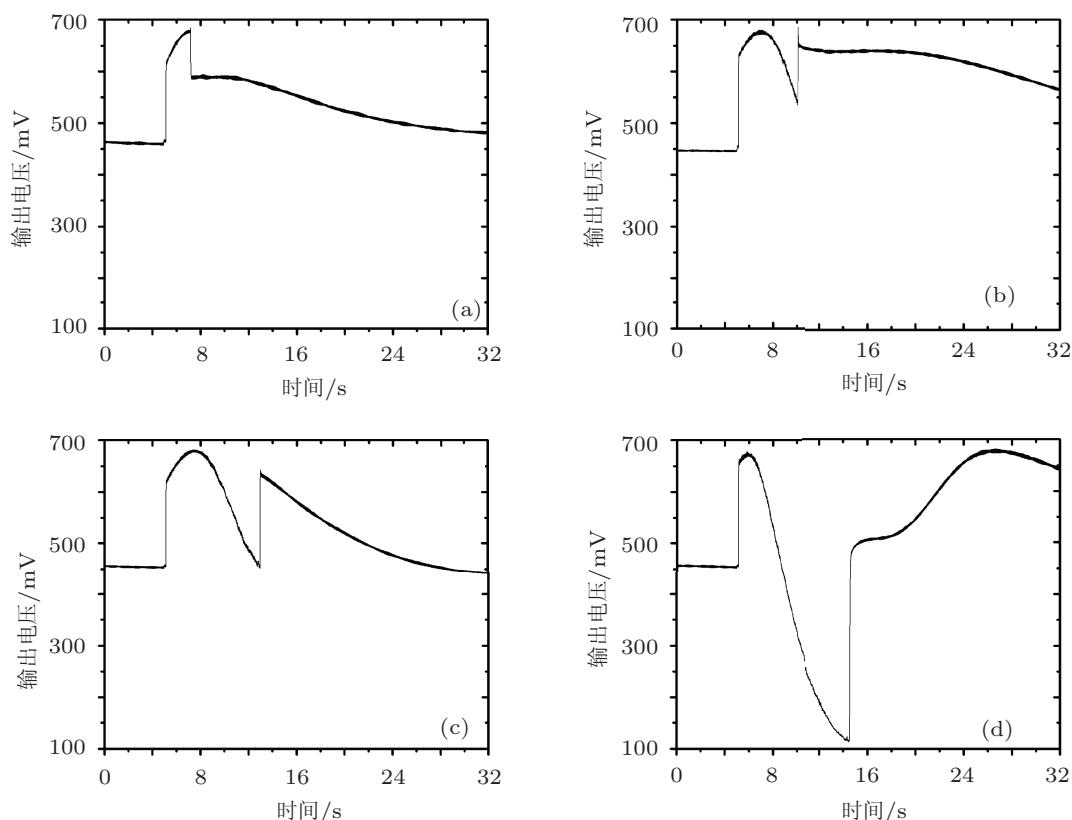


图 4 InSb 探测器在功率密度为 60 W/cm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线 (a) 辐照时间 2s; (b) 辐照时间 5s; (c) 辐照时间 8s; (d) 辐照时间 10s

图 4(a) 是短时间辐照的结果, 探测器的温度还没有达到  $T_0$ , 因而电阻呈一直增大的趋势. 随着辐照时间的延长, 探测器的温度高于  $T_0$  时, 电阻呈现减小的趋势, 如图 4(b), (c), (d) 所示.  $T_0$  即对应于图 4(b), (c), (d) 中激光辐照过程中的电压响应最大值时的温度. 可以看到, 激光功率密度的大小并不是产生这一现象的直接原因. 即使在我们认为的功率密度相对较低的激光辐照下, 只要辐照时间足够长, 热效应得到一定程度的积累, 探测器的温度达到了  $T_0$ , 仍然可以得到与较高功率密度激光辐照下相类似的现象.

我们可以简单估算一下  $T_0$  的大小. InSb 的禁带宽度  $E_g$  随温度的变化可由 Varshni 方程描述 [15]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (1)$$

其中,  $E_g(0)$  为  $T = 0$  K 时的禁带宽度,  $\alpha$  和  $\beta$  称为 Varshni 参数. 对 InSb 而言,  $E_g(0) = 0.235$  eV,  $\alpha = 2.7 \times 10^{-4}$  eV/K,  $\beta = 106$  K [20].

半导体本征载流子的浓度  $n_i$  可由下式给出 [19]:

$$n_i = \left[ \frac{2(2\pi k_0 T^{3/2})(m_p^* m_n^*)^{3/4}}{h^3} \right] \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0 T}\right), \quad (2)$$

其中  $k_0 = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K,  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  J·s, 对 InSb, 取  $m_p^* = 0.44m_0$ ,  $m_n^* = 0.0118m_0$  [19].

将 (1) 式代入 (2) 式可以求得 InSb 在一定温度时的本征载流子浓度.

对于非简并半导体, 当导带中的电子一部分来源于全部电离的杂质, 一部分由本征激发提供时, 其导带中的电子浓度  $n_0$  可由下式给出 [19]:

$$n_0 = \frac{N_D + (N_D^2 + 4n_i^2)^{1/2}}{2}. \quad (3)$$

实验中使用的探测器材料的掺杂浓度  $N_D$  由上海技术物理研究所提供, 约为  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup>. 对于 InSb 有 [17]

$$u_n \approx 10^5 T^{-2.35} \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4)$$

主要考虑多数载流子的影响, 可认为材料的电导率为 [19]

$$\sigma = n_0 q u_n, \quad (5)$$

其中电子电量  $q = 1.602 \times 10^{-19}$  C, 将相关参数代入 (3), (4) 和 (5) 式, 计算可得实验用 InSb 材料电导率随温度变化曲线, 如图 5 所示.  $T_0$  即对应于图 5 中电导率为最小值时的温度, 约为 147 K.

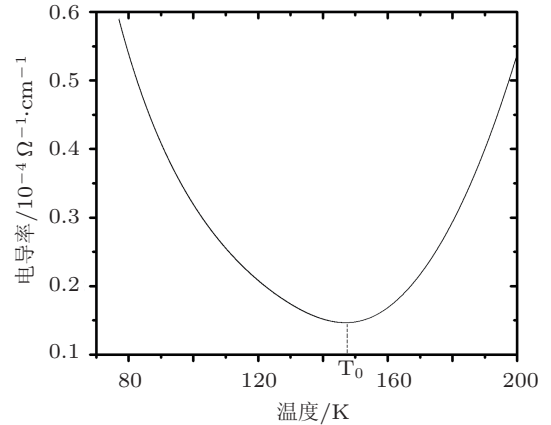


图 5 实验用 InSb 材料电导率随温度变化曲线 (计算值)

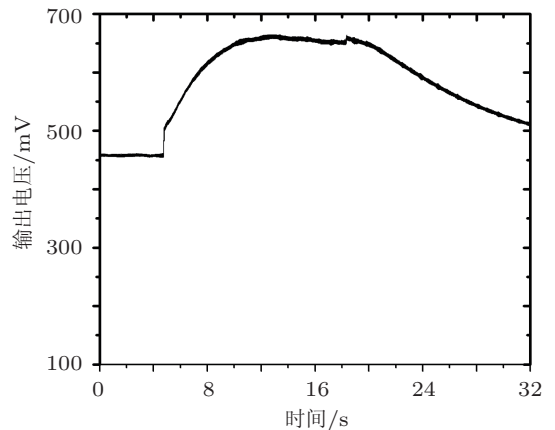


图 6 InSb 探测器在功率密度为 40W/cm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线

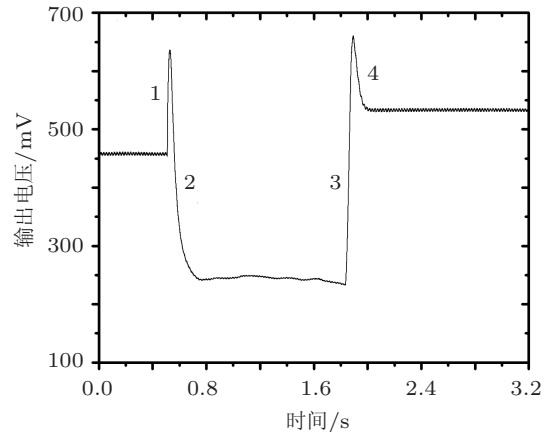


图 7 InSb 探测器在功率密度为 210 W/cm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> 激光辐照下的电压响应曲线

当然, 这种现象是在杜瓦瓶制冷的速率小于波段外激光对探测器加热的速率的情况下才能出现. 我们同样进行了 InSb 探测器在功率密度为 40 W/cm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> 激光辐照下, 辐照时间为 10s 的实验, 对应于图 6 中的 5—15s. 可以看到, 在激光辐照过程中, 输出电压增大到最大值后就趋于稳定, 没有减小的趋势. 这说明, 当激光功率密度低

于  $40 \text{ W/cm}^2$  时, 杜瓦瓶制冷的速率大于波段外激光对探测器加热的速率, 探测器的温度升高幅度不大, 低于  $T_0$ , 本征激发还不十分显著, 因而输出电压没有明显减小的趋势.

图 7 给出了 InSb 探测器在功率密度为  $210 \text{ W/cm}^2$   $\text{CO}_2$  激光辐照下的电压响应曲线, 为了避免损伤探测器, 我们缩短了辐照时间, 只采集了 3.2s 的数据, 并将响应曲线分为 4 个子过程. 子过程 1 是由于激光开启瞬间, 探测器接收到的光强迅速增加, 探测器温度升高, 电子碰撞概率增大, 迁移率下降而引起探测器的阻值增大. 子过程 2 是探测器的温度升高, 导致本征激发急剧增加, 大量本征载流子的产生超过了迁移率下降对阻值的影响, 故而探测器的电阻迅速下降. 子过程 3 是因为激光关闭瞬间, 探测器的温度下降, 本征激发减弱, 本征载流子迅速减小而导致的阻值增大. 子过程 4

则是随着探测器温度的下降, 载流子迁移率增大而导致探测器阻值的减小.

## 4 结论

光导型探测器对波段外激光的响应主要是由于自由载流子吸收和晶格吸收引起的半导体电导率的改变. 探测器材料吸收波段外激光能量后温度升高, 在温升过程中, 存在一个转变温度  $T_0$ . 当探测器温度低于  $T_0$  时, 由杂质电离产生的载流子的迁移率的改变对探测器光电导起主要作用; 当探测器温度高于  $T_0$  时, 热激发本征载流子的浓度对光电导的变化起主导作用.  $T_0$  的大小主要由半导体材料的掺杂浓度决定. 光导型探测器对波段外激光辐照下的动态响应是载流子迁移率和浓度在半导体器件温度变化的影响下共同作用的结果.

- [1] Bartoli F, Esterowitz L, Kruer M, Allen R 1977 *Appl. Opt.* **16** 2934
- [2] Bartoli F J, Esterowitz L, Kruer M R, Allen R E 1975 *Appl. Opt.* **14** 2499
- [3] Bartoli F, Esterowitz L, Allen R, Kruer M 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2875
- [4] Xu X Y, Ye Z H, Li Z F, Lu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2882 (in Chinese) [徐向晏, 叶振华, 李志锋, 陆卫 2007 物理学报 **56** 2882]
- [5] Hu W D, Yin F, Ye Z H, Quan Z J, Hu X N, Li Z F, Cheng X S, Lu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7891 (in Chinese) [胡伟达, 殷菲, 叶振华, 全知觉, 胡晓宁, 李志锋, 陈效双, 陆卫 2009 物理学报 **58** 7891]
- [6] Liu X Y, Ma W Q, Zhang Y H, Huo Y H, Zhong M, Chen L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5720 (in Chinese) [刘小宇, 马文全, 张艳华, 霍永恒, 种明, 陈良惠 2010 物理学报 **59** 5720]
- [7] He Y X, Jiang H M 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1233 (in Chinese) [贺元兴, 江厚满 2008 强激光与粒子束 **20** 1233]
- [8] Shen X C 2002 *The Spectrum and Optical Properties of Semiconductor* (Beijing: Science Press) pp363, 467 (in Chinese) [沈学础 2002 半导体光谱和光学性质 (北京: 科学出版社) 第 363, 467 页]
- [9] Li L, Lu Q S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1953 (in Chinese) [李莉, 陆启生 2008 光学学报 **28** 1953]
- [10] Wang R, Si L, Lu Q S 2003 *Laser & Infrared* **33** 335 (in Chinese) [王睿, 司磊, 陆启生 2003 激光与红外 **33** 335]
- [11] Li X Q, Cheng X A, Wang R 2003 *China J. Laser.* **30** 1070 (in Chinese) [李修乾, 程湘爱, 王睿 2003 中国激光 **28** 1070]
- [12] Li X Q, Cheng X A, Wang R 2003 *High Power Laser and Partial Beams* **15** 40 (in Chinese) [李修乾, 程湘爱, 王睿 2003 强激光与粒子束 **15** 40]
- [13] Ma L Q, Lu Q S 2006 *High Power Laser and Partial Beams* **18** 201 (in Chinese) [马丽芹, 陆启生 2006 强激光与粒子束 **18** 201]
- [14] Ma L Q, Lu Q S, Du S J 2004 *China J. Laser.* **31** 342 (in Chinese) [马丽芹, 陆启生, 杜少军 2004 中国激光 **31** 342]
- [15] Sun C W, Lu Q S 2002 *Effect of Laser Irradiation* (Beijing: National Defense Industry Press) pp341—360 (in Chinese) [孙承伟, 陆启生 2002 激光辐照效应 (北京: 国防工业出版社) 第 341—360 页]
- [16] Varshni Y P 1967 *Physica* **34** 149
- [17] Meyer J R 1978 *Bull. Am. Phys. Soc.* **23** 328
- [18] Srinivasan K, Zhi G Y 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 113104
- [19] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2009 *Semiconductor Phys.* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp76 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 2009 半导体物理学 (北京: 电子工业出版社) 第 76 页]
- [20] Sadao A, Ji Z G 2009 *Properties of Group IV, II-V and II-VI Semiconductors* (Beijing: Science Press) pp113, 114 (in Chinese) [Sadao Adachi 著季振国译 2009 IV 族, III-V 族和 II-VI 族半导体材料的特性 (北京: 科学出版社) 第 113, 114 页]

# A new phenomenon of photoconductive InSb detector under the irradiation of out-band laser\*

Zheng Xin Jiang Tian Cheng Xiang-Ai<sup>†</sup> Jiang Hou-Man Lu Qi-Sheng

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 16 May 2011; revised manuscript received 24 June 2011)

## Abstract

A new phenomenon is observed when a photoconductive InSb detector with 0.228eV band gap is irradiated by 10.6  $\mu\text{m}$  laser, whose photon energy is 0.12 eV. The detector is heated by this out-band laser, due to the absorption of laser energy. However, a transformation temperature  $T_0$  exists in this process. When the temperature of the detector,  $T$ , is lower than  $T_0$ , the number of carriers remains constant but the conductivity changes because of a change in mobility. The mobility decreases with the increase of temperature and varies as  $T^{-2.35}$ . At  $T > T_0$ , the concentration of thermally-activated carrier increases with temperature, which is proportional to  $\exp(-E_g/2k_0T)$ . As a result, the influence of carrier concentration becomes more and more important. As a result, the output of the detector decreases. In a word, the output voltage of photoconductive detector results from the temperature dependence of mobility and concentration of carriers. This work provides an experimental basis for improving the carrier transport model.

**Keywords:** photoconductive detector, out-band laser, photoconductive, mobility

**PACS:** 73.40.Lq, 73.50.Lw, 73.50. Pz

---

\* Project supported by the National Basic Technology Research and Development Program of China (Grant No. 1030110).

<sup>†</sup> E-mail: xiang.ai.cheng@126.com