

InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的瞬态 光伏响应特性

黄亮, 李志锋*, 周易, 陈建新, 陆卫

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:报道了 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的瞬态光伏响应特性. 通过对 p-b-i-n 二类超晶格探测器对皮秒脉冲激发的瞬态响应特性的分析及拟合, 获得了器件的表观少数载流子的寿命. 并对不同尺寸台面结构单元器件进行测试分析, 发现少数载流子寿命随着台面面积的增大而增大, 归结为由于侧壁表面效应带来的影响. 所测器件的少数载流子为空穴, 其表观寿命约为 2~12 ns.

关键词: InAs/GaSb 二类超晶格; 瞬态特性; 红外探测器

中图分类号: O472 文献标识码: A

Transient photovoltaic responses in InAs/GaSb type-II superlattice infrared photodetectors

HUANG Liang, LI Zhi-Feng*, ZHOU Yi, CHEN Jian-Xin, LU Wei

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

Abstract: The transient photovoltaic responses in InAs/GaSb type-II superlattice infrared photodetectors under picosecond pulsed laser illumination are reported. By analyzing the dynamic processes in the transient response curves of the p-b-i-n structured type-II superlattice detectors, the apparent carrier lifetime can be obtained. A series of single element devices with different mesa areas have been investigated. The minority carrier lifetime trends to increase as the mesa area increases, implying a reduced surface recombination resulted from the un-passivated side-walls of the mesa. The investigated minority carriers are attributed to holes, with the apparent lifetime in the range 2-12 ns.

Key words: InAs/GaSb type-II superlattice, transient response, infrared detector

PACS: 77.55.Px, 78.47.jb, 72.40.+w

引言

InAs/GaSb 二类超晶格器件首先由 Sakaki 和 Esaki 在 1977 年提出^[1]. 由于 InAs 的导带底比 GaSb 的价带顶还要低, 两者间隔形成周期性的势阱结构, 当 InAs 和 GaSb 的厚度较薄时, 电子和空穴各自的波函数之间存在较强的耦合, 形成微带能级. 通过调整其超晶格的周期, 可以实现 3~30 μm 波段截止波长的调控, 从而可以在红外探测器中得到应

用. 可以通过能带设计, 抑制 InAs/GaSb 二类超晶格的俄歇复合, 且生长技术较为成熟, 可以获得良好的均匀性. 特别是在长波波段, 理论计算表明, 超晶格制备成的器件能够具有比碲镉汞更优越的性能^[2], 成为长波红外材料的有力竞争者. 对于探测器件而言, 少数载流子寿命是一个非常重要的参数, 直接决定着器件的探测能力以及响应速度等重要特性. 对于 InAs/GaSb 二类超晶格材料的寿命测试已有文献报道^[3-4], 但是由于制备成为器件之后形成了特殊的

收稿日期: 2014-01-19, 修回日期: 2015-02-02

Received date: 2014-01-19, revised date: 2015-02-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB922004); 国家自然科学基金(61376053, 61405231)

Foundation items: National Basic Research Program of China (2011CB922004), National Nature Science Foundation of China (61376053, 61405231)

作者简介 (Biography): 黄亮 (1987-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 主要从事基于 In, Ga, As, Sb 的 III-V 族薄膜红外探测材料及器件性能的研究

* 通讯作者 (corresponding author): E-mail: zfli@mail.sitp.ac.cn

几何结构,其真正反映器件性能的等效寿命受到表面、界面及台面性质等的影响,由材料测试所获得的数据并不能真正反映器件的性质,因此需要用另外的测试方法对器件中的等效表观少数载流子寿命进行表征.对于二极管类器件内部少数载流子的寿命测试,最先由 Gossick^[5] 实现了开路衰退法测试 p-n 型二极管少数载流子寿命的方法,其后 Davies^[6-8] 等人扩展了其方法,实现了对 p-i-n 型器件基区少数载流子寿命的测试.本文基于上述测试方法,改进为并联小电阻,并使用 Nd:YAG 皮秒激光器泵浦可调谐 OPG/DFG 输出脉冲激光进行光注入,实现了器件快速衰退过程的测量.

1 实验方法

在二类超晶格器件 77 K 的工作温度下,使用 Nd:YAG 脉冲激光器 (Ekspla) 泵浦可调谐 OPG/DFG 输出脉冲激光激发 p-b-i-n 型 InAs/GaSb 二类超晶格,激光器脉宽为 30 ps,重复频率为 10 Hz,其输出光强和波长均可调,使用示波器 (Agilent Infiniium 54832B,带宽 1 GHz) 观测负载光伏响应信号,实验装置示意图见图 1 所示.探测器 M944 的器件结构为 p-b-i-n 结构,p、i、n 三个区域超晶格结构均为 14 ML InAs/7 ML GaSb,p 型 Be 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,n 型 Si 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,i 为非故意掺杂本征区,厚度 d 约为 $1.85 \mu\text{m}$,呈现出非故意掺杂的本征弱 n 型^[9-11]. b 为弱掺杂的 p 型势垒区,掺杂浓度 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,结构为 7 ML InAs/7 ML GaSb,器件的结构以及 p-b-i-n 层的能带结构见图 2 以及图 3 所示.实际测试中对多个不同结构的器件都做了相关测试,不同的器件基本表现出类似的衰退过程,为了便于讨论,本文仅以 M944 号器件为代表进行相关的讨论.

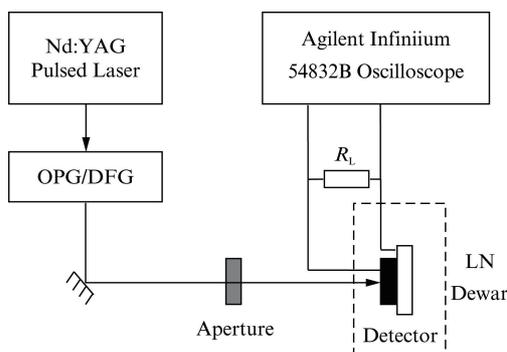


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

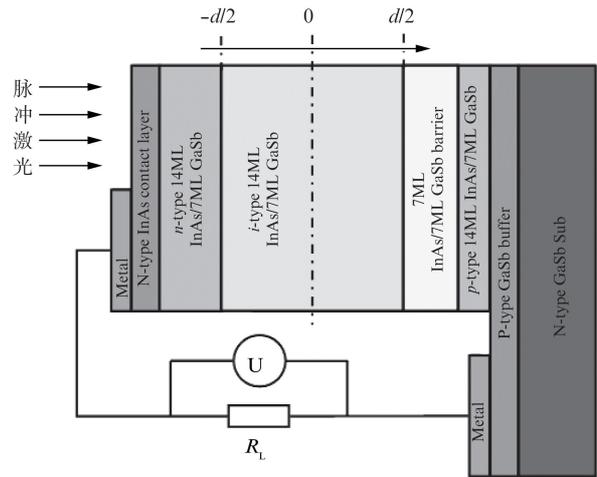


图 2 器件结构及测试示意图,激光从左侧正入射,其中 R_L 为负载电阻,U 为示波器

Fig. 2 Schematic diagram of the device structure and the experiment. Laser pulses illuminate from left. R_L is load resistor, U is the oscilloscope

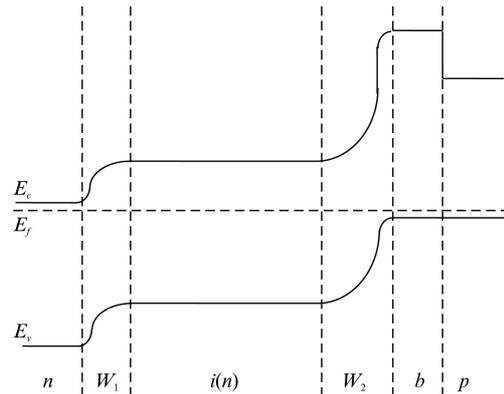


图 3 器件 p-b-i-n 层的能带结构图

Fig. 3 Energy band diagram of the p-b-i-n layers

2 结果与讨论

2.1 光伏衰退理论模型

基于 p-i-n 型二极管开路电压的理论分析过程,一般取单边突变结的理论作为扩展得到,存在以下的假设^[5-8,12]:在空间电荷区以外的区域为电中性,可以近似为空间电荷区以外不存在载流子的浓度梯度;由两端 p+ 和 n+ 的高掺杂区对光伏的贡献可以忽略;空间电荷区储存的电荷总量远小于 i 区存储的电荷量;且在 i 区内少数载流子的寿命是各处均匀的.在满足上述基本假设的情况下,器件的光伏响应的衰退特性将由 i 区的少数载流子决定.通过 Bassett^[7] 和 Mahan^[8] 等人的工作可知,p-i-n 型器件理想的开路电压衰退过程由三个阶段组成.第一阶段为大注入情

况,即过剩少数载流子超过平衡多数载流子的情况,则衰退过程表现为线性,少数载流子寿命为^[6-8]:

$$\tau = \frac{2kT}{q} \left| \frac{dt}{dV_{oc}} \right|, \quad (1)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, q 为电子电荷, V_{oc} 为开路电压;

第二阶段为中等注入情况,即过剩少数载流子超过平衡少数载流子但小于平衡多数载流子的情况,则衰退过程依然表现为线性,少数载流子寿命为^[6-8]:

$$\tau = \frac{kT}{q} \left| \frac{dt}{dV_{oc}} \right|, \quad (2)$$

当过剩的少数载流子少于平衡少数载流子的情况下,当 V_{oc} 趋近于 kT/q 时^[5],衰退过程表现为:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln [(e^{qV(0)/kT} - 1)e^{-t/\tau} + 1], \quad (3)$$

当 $V_{oc} \ll kT/q$ 时,表现为指数衰退过程:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} (e^{qV(0)/kT} - 1)e^{-t/\tau}. \quad (4)$$

2.2 测试结果分析

首先对面积为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的 M944 器件进行了测试,采用波长为 $8 \mu\text{m}$ 、输出光强约 $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 的激光从 n 区正入射激发二极管探测器. 通过示波器采样负载电阻两端电压,便可以获得探测器的脉冲衰退响应光谱^[13]. 由于所测试的二类超晶格器件的少数载流子寿命较小,因而开路电压测试系统中存在的 RC 过程将严重影响测试结果. 将其改进为并联小电阻的测试方法,通过较小的负载电阻可以极大地降低测试中的 RC 常数,从而可以忽略其带来的影响. 同时并联小电阻的方法可能会使得少数载流子通过并联小电阻的回路复合,相当于增加了一个载流子的复合通道,从而可能导致所测得的少数载流子寿命比实际有所偏小. 由于采用并联小电阻的测试方法,所以示波器测得的电压为光伏电压中因负载 R_L 与探测器串联电阻 R_s 的串联而加在负载上的分压,通过正向导通状态下的 R-V 特性,可以计算出 R_s 的值约为 7.8Ω ,则可以获得输出电压为 $V_{out} = V_L(R_L + R_s)/R_L$,则获得的实际光伏输出电压信号的衰退过程见图 4 所示.

可以看到,在所获得的器件响应光谱中有一个快速的上升沿,在到达较高的光伏电压后,保持一段时间 t_1 的平台过程后,依次出现近似线性的 t_2 以及非线性的 t_3 的衰退过程. 因激发脉冲仅 30 ps 宽,所以输出电压随时间的变化是由器件本身所决定的,其衰退过程反映了器件内部的本征特性. 由此可见,与电注入非平衡载流子的方法中衰退的过程不

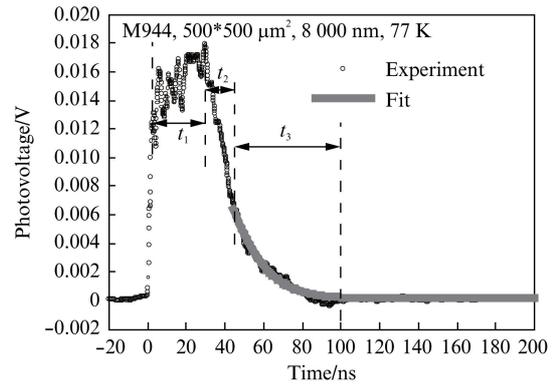


图 4 M944 器件台面面积为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的单元器件脉冲响应,表现为三个时间段的衰退过程. 激发波长为 $8 000 \text{ nm}$,工作温度为 77 K

Fig. 4 Transient photoresponse of M944 device with the mesa area of $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$. The decay curve shows three characteristic sequences. The wavelength of the laser is $8 000 \text{ nm}$, the working temperature is 77 K

同^[6-8],光注入下的衰退过程并未在光脉冲注入消失后立即出现衰退,而是先出现了一个相对平稳的平台过程,然后表现出与电注入相似的光伏衰退阶段.

首先对平台过程的原因进行分析. 为简化起见将 InAs/GaSb 二类超晶格探测器作为一个体材料的 p-b-i-n 结构来考虑. p-i-n 型器件实际存在 n-i 结以及 i-p 结两个结,对两个结分别应用玻尔兹曼关系可以获得^[6]:

$$V_{ni} = \frac{kT}{q} \ln(n_{-d/2}n_{n0}/n_n n_{i0}) \quad , \quad (5)$$

$$V_{ip} = \frac{kT}{q} \ln(p_{d/2}p_{p0}/p_p p_{i0}) \quad , \quad (6)$$

其中 $n_{-d/2}$ 和 n_n 分别为 i 区和 n 区靠近 n-i 结边缘的电子浓度, n_{n0} 和 n_{i0} 分别为 i 区和 n 区平衡态的电子浓度. $p_{d/2}$ 和 p_p 分别为 i 区和 p 区靠近 i-p 结边缘的空穴浓度, p_{i0} 和 p_{p0} 分别为 i 区和 p 区平衡态的空穴浓度.

则当激发的载流子浓度远小于高掺杂的 n 区和 p 区多数载流子浓度时:

$$\begin{aligned} V_{oc} &= V_{ni} + V_{ip} = \frac{kT}{q} \ln(n_{-d/2}p_{d/2}n_{n0}p_{p0}/n_n p_p n_{i0} p_{i0}) \\ &\approx \frac{kT}{q} \ln(n_{-d/2}p_{d/2}/n_i^2) \quad . \quad (7) \end{aligned}$$

可见 p-i-n 型器件的输出电压大小的变化基本由 $n_{-d/2}p_{d/2} = (n_i + \Delta n_{-d/2}) \cdot (p_i + \Delta p_{d/2})$ 的变化决定. 衰退过程中的光伏输出随着注入大小的变化,理论上将满足式(1)~(4)的讨论. 而由于所测试的器件 i 区为本征弱 n 型,且电子的扩散系数比空穴的扩散系数大很多,则由光注入的非平衡电子将在短时

间内很快弛豫,此后的变化过程将主要由 $p_{d/2}$ 的变化决定. 由于器件的吸收系数 α 约为 $2\ 000 \sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 当入射光从器件的 n 区正入射时, 沿着入射方向形成初始非平衡载流子的浓度梯度分布, 见图 5 中 $t=0$ 时刻. 因 n-i 结的作用, 将非平衡电子扫至 n 区一侧, 同时将非平衡空穴扫至 i 区一侧, 进一步增大了非平衡空穴的浓度梯度. 扫至 n 区的非平衡电子迅速形成光伏信号, 并通过外电路到达 p 区. 由于阻挡层的存在, 通过外电路到达 p 区的非平衡电子将形成一定的积累, 在 i-p 结附近形成从 i 区指向 p 区的电场, 从而增大了 i 区空穴的漂移成分. 因此, 在上述过程快速建立后, i 区的非平衡空穴在形成的浓度梯度下向 i-p 结边扩散边复合, 由于扩散的补偿作用, 使得 $\Delta p_{d/2}$ 不会立即衰减, 而是能够在一定的水平上维持一段时间, 从而使得 $n_{-d/2}$ 和 $p_{d/2}$ 的乘积基本保持不变, 导致了平台过程的出现, 整个过程中载流子的变化过程的示意图由图 5 给出.

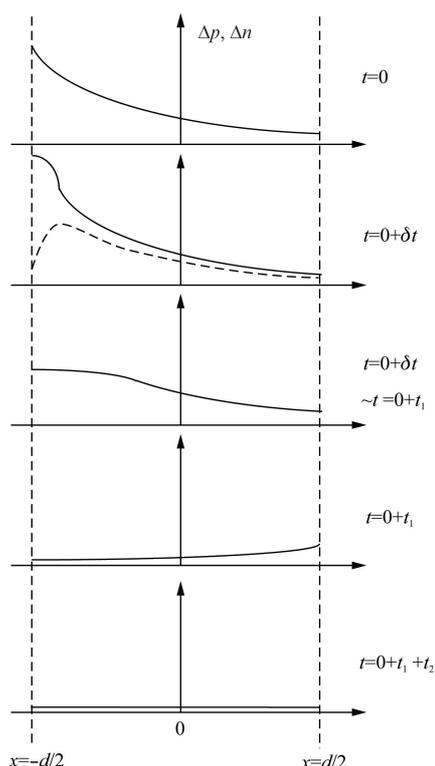


图 5 脉冲激发之后的不同时间段器件内部非平衡载流子的分布随时间的变化示意图, 其中实线为非平衡空穴的浓度, 点线为非平衡电子的浓度, $t=0$ 时刻两者重合. $x = -d/2, 0, d/2$ 对应于图 2

Fig. 5 Schematic diagram of the non-equilibrium carrier distribution changing with time in the device after the laser pulse illumination. The solid lines represent the concentrations of non-equilibrium holes, the dotted lines are for electrons. The two overlaps at $t=0$. $x = -d/2, 0, d/2$ are corresponding to Fig. 2

通过图 4 可以看出, 在平台过程后, 光伏开始衰退的 $t_2 \sim t_3$ 整个过程中, 呈现出典型的从线性阶段至指数阶段变化的过程, 且线性区未见如式 (1) 和式 (2) 所表现出的斜率改变过程, 仅呈现出从式 (2) 至式 (4) 的转变过程. 器件最大电压输出约为 $18\ \text{mV}$, 仅为 $77\ \text{K}$ 时 $kT/q = 6.7\ \text{mV}$ 的 3 倍, 因此可以认为上述测量到的结果是器件的 i 区处于中弱注入条件下时所形成衰退过程. 同时由于前文分析中, 在阻挡层靠近 p 区一侧积累的非平衡电子对 i 区空穴漂移的贡献, 在衰退过程中由于其不断地复合, 对 i 区空穴的漂移贡献随之减小, 使得输出光伏衰退更为迅速. 当积累的非平衡电子浓度降为较低后, 可以认为其对 i 区空穴无漂移贡献, 此时 i 区空穴浓度处于均匀分布. 通过以上讨论, 可以看出时间越长, 器件内部越接近均匀态, 更能反映出少数载流子的寿命, 同时衰退过程越接近末尾, 则输出光伏信号也越小. 因测试需要光伏输出有一定信噪比, 则以 $V(0)$ 下降为 $6.7\ \text{mV}$ 处作为初值, 对其衰退过程采用式 (3) 进行拟合, 获得的少数载流子寿命约为 $12\ \text{ns}$, 由于器件 i 区为本征弱 n 型, 因此 i 区中的空穴作为少数子在复合过程中占主导地位. 由于此类器件的少数载流子的体寿命主要由俄歇复合、辐射复合和 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合所决定: $1/\tau = 1/\tau_{\text{Auger}} + 1/\tau_{\text{Rad}} + 1/\tau_{\text{SRH}}$, 所研究的非线性衰退区为弱注入的情况, 且是 $77\ \text{K}$ 的较低温度, 所以影响少数子寿命的俄歇复合过程可以忽略^[3-4], 则所测试少数载流子的体寿命主要由辐射复合和 SRH 复合决定.

2.3 变面积的测试

由于器件的单元均刻蚀成台面结构, 通过测试不同台面尺寸的器件脉冲衰退的过程, 获得了如图 6(a) 所示的结果, 可以看出器件的尺寸对少数载流子的复合带来了明显的影响. 图 6(a) 中小面积器件的光谱衰退末端呈现出减幅振荡的过程, 表现为典型的振铃 (Ringing) 现象. 这是由于测量系统中存在一定的寄生电感, 当脉冲衰退速度过快时将形成 L-C 振荡的衰减过程. 说明所测试的 M944 系列器件随着单元面积的减小, 衰退过程表现出加快的趋势. 通过前文同样的拟合处理方法, 对不同面积的器件进行拟合, 获得的少数载流子的表观寿命随单元面积的变化见图 6(b) 所示. 可见, 随着面积的增大, 少数载流子表观寿命出现增大的现象. Plis^[14] 和 Umana-Membreno^[15] 等人的工作表明, InAs/GaSb 二类超晶格在平面内方向上具有较长的扩散长度, 当器件制备成台面结构时, 侧壁的存在会对器件的输运特

性产生非常显著的影响,导致暗电流密度随着台面面积的减小而增大. 本文所研究的器件侧壁均未进行钝化,因此由于面内扩散到表面由表面复合对少数载流子寿命带来的影响将更为显著. 同时,由图 6 (b) 中小面积情况下,少数载流子寿命出现基本不随面积的变化而改变的现象,表明表面复合作用会出现一定的饱和. 由于表面复合的存在,本文所测器件少数载流子的表观寿命为体寿命与表面复合寿命的综合表观寿命,要比针对同类二类超晶格材料测试得到的寿命(约为 30 ~ 80 ns)低^[3-4],而由于表面复合速率难以准确提取,通过所测试的表观寿命无法准确提取体寿命^[16]. 通过图 6 (a) 还可以看出,随着器件面积的减小,上述准稳态的时间宽度逐渐减小,也是因为由于侧壁辅助扩散效应的存在,导致器件内部能够更快达到均匀,从而 $\Delta p_{d/2}$ 在更短的时间内开始出现衰减,也与上节讨论相一致.

因此,从探测器的角度来说,要提高其工作状态

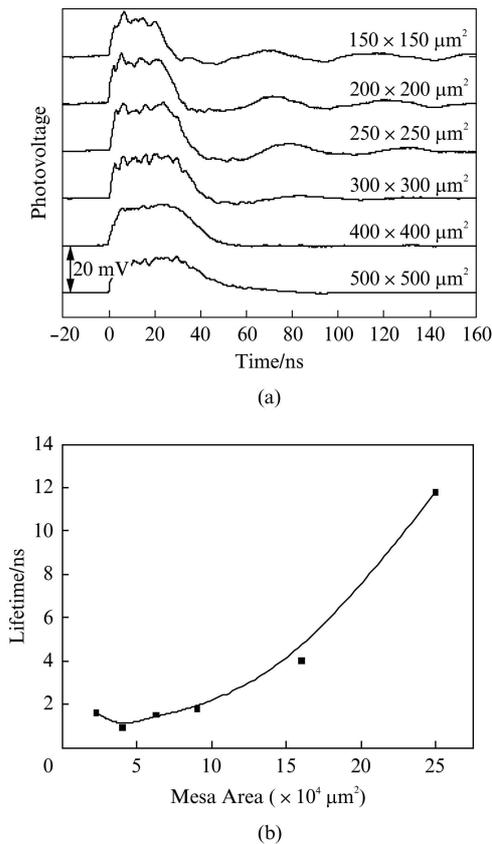


图 6 (a) M944 系列器件的脉冲衰退光谱随其尺寸的变化, (b) M944 系列器件少数载流子表观寿命随单元面积的变化,实线为引导视线

Fig. 6 (a) Transient responses of M944 series devices changing with mesa areas, (b) the apparent minority carrier lifetime of M944 series devices against mesa areas, the solid line is for guide of sight

下的实际少数载流子寿命,在台面器件尺寸一定的情况下,应对其侧壁进行较好的钝化,抑制表面效应带来的影响. 目前国外已经有针对表面钝化层的研究报道, Kim^[17-18] 等人利用 SU-8 对 InAs/GaSb 二类超晶格器件的表面进行了钝化,并对钝化作用对表面漏电流的影响作了研究,认为 SU-8 钝化可以抑制表面暗电流,进而认为在焦平面单元上可能获得一定的应用. 然而其后 Umana-Membreno^[15,19] 等人同样采用 SU-8 对 InAs/GaSb 二类超晶格焦平面单元器件进行了钝化工艺的研究,发现钝化后仍然存在明显的侧壁表面漏电的现象,说明 SU-8 的钝化作用仍然有限. 因此,相关 InAs/GaSb 二类超晶格器件的表面钝化工艺仍然有待进一步的研究.

3 结论

通过并联小电阻测试 p-b-i-n 型 InAs/GaSb 二类超晶格光伏脉冲响应的方法,获得了二类超晶格器件少数载流子的表观寿命约为 2 ~ 12 ns,与相同方法测试得到的碲镉汞探测器 (MCT) 的少数载流子寿命(约为 18 ~ 407 ns^[20]) 相比明显偏低. 说明所测 InAs/GaSb 二类超晶格器件的少数载流子寿命目前仍未达到 MCT 的水平^[4,21],从而限制了二类超晶格器件的探测能力. 通过对不同尺寸的超晶格器件的测试分析发现,在所研究的探测器件结构中,少数载流子寿命出现随着单元台面面积的增大而增大的趋势,归结为由于台面侧壁未进行钝化,所造成的表面效应对少数载流子辅助扩散以及诱导表面复合有着重要作用. 所测量得到的少数载流子寿命为其体寿命与表面复合寿命的综合表观寿命,由于表面复合效应的存在,导致表观寿命比实际材料的体寿命要低,对准确提取体寿命造成较大困难. 对于 InAs/GaSb 二类超晶格而言,目前还未能发展出效果明确的钝化工艺,因此相关的表面钝化工艺还需要进一步的工作进行研究.

References

- [1] Sa-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 1977, **30** (12): 651-653.
- [2] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **64** (23): 3160-3162.
- [3] Donetsky D, Svensson S P, Vorobjev L E, et al. Carrier lifetime measurements in short-period InAs/GaSb strained-layer superlattice structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95** (21): 212104.
- [4] Donetsky D, Belenky G, Svensson S, et al. Minority carrier

- er lifetime in type-2 InAs-GaSb strained-layer superlattices and bulk HgCdTe materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(5): 052108.
- [5] Gossick B R. On the transient behavior of semiconductor rectifiers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, **26**(11): 1356–1365.
- [6] Davies L W. The use of PLN structures in investigations of transient recombination from high injection levels in semiconductors[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1963, **51**(11): 1637.
- [7] Bassett R J. Observations on a method of determining the carrier lifetime in $p^+ - n^+$ diodes[J]. *Solid-state Electronics*, 1969, **12**(5): 385–391.
- [8] Mahan J E, Ekstedt T W, Frank R I, *et al.* Measurement of minority carrier lifetime in solar cells from photo-induced open-circuit voltage decay[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, **26**(5): 733.
- [9] Szmulowicz F, Haugan H J, Elhamri S, *et al.* Transport studies of MBE-grown InAs/GaSb superlattices[J]. *Opto-Electronics Review*, 2010, **18**(3): 267–270.
- [10] Hood A, Hoffman D, Wei Y J, *et al.* Capacitance-voltage investigation of high-purity InAs/GaSb superlattice photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(5): 052112.
- [11] Grein C H, Young P M, Flatté M E, *et al.* Long wavelength InAs/InGaSb infrared detectors: Optimization of carrier lifetimes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **78**(12): 7143–7152.
- [12] Fredrik A. Lindholm, C. Tang Sah. Normal modes of semiconductor $p-n$ junction devices for material parameter determination[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, **47**(9): 4203–4205.
- [13] Salach-bielecki R, Pisarkiewicz T, Stapiński T, *et al.* Influence of junction parameters on the open circuit voltage decay in solar cells[J]. *Opto-Electronics Review*, 2004, **12**(1): 79–83.
- [14] Plis E, Kim H S, Bishop G, *et al.* Lateral diffusion of minority carriers in nBn based type-II InAs/GaSb strained layer superlattice detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 123507.
- [15] Umana-Membreno G A, Klein B, Kala H, *et al.* Vertical minority carrier electron transport in p-type InAs/GaSb type-II Superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(25): 253515.
- [16] Waldmeyer J. A contactless method for determination of carrier lifetime, surface recombination velocity, and diffusion constant in semiconductors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, **63**(6): 1977–1983.
- [17] Kim H S, Plis E, Khoshakhlagh A, *et al.* Performance improvement of InAs/GaSb strained layer superlattice detectors by reducing surface leakage currents with SU-8 passivation [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(3): 033502.
- [18] Kim H S, Plis E, Gautam N, *et al.* Reduction of surface leakage current in InAs/GaSb strained layer long wavelength superlattice detectors using SU-8 passivation [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(14): 143512.
- [19] Umana-Membreno G A, Klein B, Kalaa H, *et al.* Vertical transport in InAs/GaSb type-II strained-layer superlattices for infrared focal plane array applications[J]. *Infrared Technology and Applications XXXVII, Proceeding of SPIE*, 2011: 80120Y–1.
- [20] CUI Hao-Yang, LI Zhi-Feng, QUAN Zhi-Jue, *et al.* Measurement of minority carrier Lifetime in HgCdTe $p-n$ junctions[J]. *Laser & Infrared*, (崔昊杨,李志锋,全知觉,等. 碲镉汞 pn 结中少数载流子寿命的测量. *激光与红外*), 2006, **36**(11): 1063–1066.
- [21] Pellegrino J, DeWames R. Minority carrier lifetime characteristics in type II InAs/GaSb LWIR superlattice $n + \pi p$ photodiodes[J]. *Infrared Technology and Applications XXXV, SPIE Proceedings*, 2009: 72981U.