

p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结结构的微波 反射光电导衰减法表征及机理分析*

吴小利^{1,2,†} 王妮丽¹ 张可峰^{1,2} 唐恒敬^{1,2} 黄翌敏^{1,2} 韩冰^{1,2} 李雪¹ 龚海梅¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用微波反射光电导衰减法测量了 p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结材料的非平衡载流子寿命分布, 通过对非平衡载流子浓度在 p^+ n 结中衰减过程的分析, 建立了在此结构材料中微波反射光电导衰减法测试少子寿命与器件参数之间的联系, 并且解释了寿命测试值随温度降低而减小的反常行为。

关键词: 铜镓砷; 双异质结; 微波反射; 光电导衰退

PACC: 6110F; 2320C

中图分类号: TN21

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1769-04

1 引言

微波发射光电导衰减法(μ -PCD)能够实现对接触式表征, 得到材料的少子寿命分布, 被广泛地应用于各种半导体材料, 如 HgCdTe, Ge/GaAs, 掺杂 Si 和离子注入 Si 材料的研究中^[1~3]. 在这些材料中, 非平衡载流子以指数形式衰减, 所以通过对微波反射光电导衰减曲线的指数拟合可以测量少子寿命, 一般来讲, 测量少子寿命受到体内复合与表面复合的制约。

p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结结构材料是一种重要的光电材料, 材料均匀性的表征对其焦平面器件的制备非常重要. 与其他材料不同的是在这种材料中 p^+ n 结的内建电场分离了光脉冲产生的空穴电子对, 改变了非平衡载流子的空间分布, 使其复合过程与在体材料中的复合有很大的区别. 早期的研究一般用表面复合或其他边界条件来代替 p^+ n 结的电场效应^[4,5], 所以忽略了内建电场在少子复合中的作用, Metzger 等人^[6]用计算机拟合的方法研究了 p^+ n 结内建电场对少子复合过程的影响, 结果表明在小注入条件下, p^+ n 结内建电场对少子寿命有着决定性的影响, 可是, 却很少有人对其物理机制作详细的研究. Lü 等人^[7,8]将微波反射光电导衰减法应用于 p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结材料的均匀性分析, 但他们忽略了 pn 结在非平衡载流子衰减过程中的作用, 将其简化为体材料

中的衰减过程, 可是, 在测试中激发光源为波长 904nm 的脉冲红外激光在掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的 p 型 InP 中的透入深度约为 $1 \mu\text{m}$, 而所测试材料的冶金结位置为 $0.5 \mu\text{m}$, 所以 pn 结对激发光所产生的非平衡载流子的分离收集作用是不可忽视的. 本文通过对非平衡载流子浓度在 p^+ n 结中衰减过程的分析, 建立了在以 pn 结为基本结构的材料中微波反射光电导衰减法得到的少子寿命与器件参数之间的联系, 并且基于对衰减过程的分析解释了少子寿命随温度的反常变化。

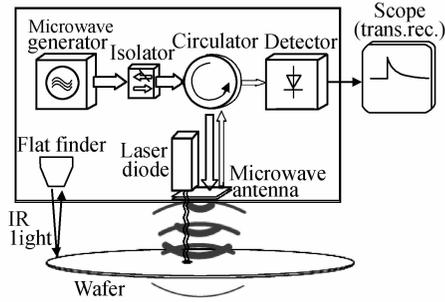
2 实验

测量仪器为 SEMILAB 公司生产的型号为 WT-2000 的 μ -PCD 寿命扫描仪, 图 1 为 μ -PCD 测量示意图. 把样品放在一个封闭的腔体中, 抽真空后, 用液氮控制样品的温度, 并且用电脑自动控制扫描面积, 探头上红外半导体激光器产生的红外光可以透过腔体上边的透明玻璃对样品扫描. p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 结构是由中科院上海微系统所制备, 用分子束外延技术在 50mm InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的 n-InP 缓冲层, $n \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $2.5 \mu\text{m}$ 的 n-In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层, $n \approx 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的 p-InP 窗口层, $p \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. 激发光源为激光二极管产生的 904nm 的脉冲红外激光, 脉冲宽度为 200ns, 激光束光斑直径为 1mm, 微波探测器的频率为 10.2GHz.

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:50632060)

† 通信作者. Email: qiuchong2003@126.com

2007-05-22 收到, 2007-06-13 定稿

图 1 μ -PCD 测量示意图Fig. 1 Block diagram of μ -PCD measurement

3 理论分析

3.1 μ -PCD 的测试原理

一束能量大于半导体禁带宽度的脉冲光照射半导体,会在半导体中产生非平衡载流子.当一高频电磁波(微波)与脉冲光同时辐照到半导体样品上时,样品的电导率变化会影响被探测的微波场.这样,通过测量微波的入射波和反射波的功率变化,即可决定样品电导率的变化,具体分析如下:

在小注入(如 $\Delta n \ll n_0$)条件下测量到的微波反射信号正比于样品电导率^[9].在无光照时有:

$$P(\sigma_0) \propto \sigma_0 \quad (1)$$

其中 $P(\sigma_0)$ 表示样品暗条件下的反射微波能量; σ_0 表示样品的暗电导.当有过剩少数载流子产生时 $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$, 此时反射强度:

$$P(\sigma) \propto \sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (2)$$

将(2)式在 σ_0 处用 Taylor 级数展开并忽略高次项,减去(1)式有:

$$\Delta P = P(\sigma) - P(\sigma_0) \approx \left. \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=\sigma_0} \Delta\sigma \quad (3)$$

(3)式说明在小注入时,反射能量的变化正比于电导率的变化.

半导体中的电导率定义为:

$$\sigma_0 = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4)$$

其中 q 是电子电荷; μ_n, μ_p 分别表示半导体中电子和空穴的迁移率; n, p 分别是无光照时半导体中电子和空穴的浓度.

当脉冲光照发生时,若样品中无陷阱存在,电子、空穴成对产生,有 $\Delta n = \Delta p$. 样品的电导率变化为:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\mu_n + \mu_p)\Delta n, \text{ 即} \\ \Delta\sigma \propto \Delta n \quad (5)$$

结合(3)和(5)式可看出:

$$\Delta P \propto \Delta\sigma \propto \Delta n \quad (6)$$

即微波信号变化正比于非平衡载流子浓度的变化.

3.2 p^+nn 结构中电导率衰减过程

将 p^+nn 结构材料等效为一个 p^+n 结,一束脉冲激光分别在样品的 p^+ 层和 n 层注入空穴 Δp 和电子 Δn , 这些空穴和电子存储于 pn 结耗尽层的两边,在小注入条件下, p^+ 层的电导率 σ 远大于注入空穴引起的 $\Delta\sigma$, 所以只考虑注入 n 层电子浓度的变化.在激发光消失时,注入电子 Δn 将发生两个方向的扩散运动:垂直于 p^+n 结方向和平行于 p^+n 结方向.

3.2.1 垂直于 p^+n 结的扩散

电子垂直于 p^+n 结的扩散引起 n 层中注入电子数量的减少,从而使得注入电子浓度下降.

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -j_{\perp} A \quad (7)$$

其中 j_{\perp} 为垂直于 pn 结的电流; A 为光斑面积. j_{\perp} 满足经典 pn 结电流电压公式:

$$j_{\perp} = j_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

其中 j_s 为反向饱和电流; V 为光注入引起的正向偏压.

在小注入条件下, $V \ll nk_B T/q$, 所以

$$j_{\perp} = j_s \left[\frac{qV}{nk_B T} - 1 \right] \quad (9)$$

假设注入载流子不会引起耗尽层电容 C 的变化,那么

$$V = \frac{\Delta n}{C} \quad (10)$$

求解(7)~(10)式可得:

$$\Delta n = C_1 \exp\left(-\frac{j_s A q}{C n k_B T} t\right) + C_2 \quad (11)$$

所以,由 j_{\perp} 控制的少子寿命为

$$\tau_{\perp} = \frac{C}{j_s A} \times \frac{nk_B T}{q} \quad (12)$$

3.2.2 平行于 p^+n 结的扩散

注入电子在平行于 p^+n 结方向的扩散不会引起电子数量的减少,但是会使得电子分布面积增大,所以同样会造成电子浓度的减小.

电子由于平行于 p^+n 结方向扩散运动而引起的浓度的衰减速度应该正比于 n 层电子的扩散系数,所以由此运动控制的少子寿命为

$$\tau_{\parallel} \propto \frac{1}{D_n} = \frac{q}{k_B T \mu_n} \quad (13)$$

其中 D_n 为电子扩散系数; μ_n 为电子迁移率.

4 结果与讨论

4.1 面扫描图像

部分样品的面扫描结果如图 2 所示,样品各点

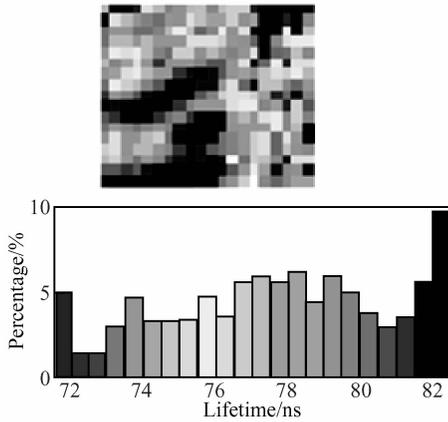


图 2 p-InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结寿命分布图

Fig. 2 Lifetime mapping of p-InP/n-InGaAs/n-InP wafer

少子寿命主要集中在 72 和 82ns 之间,而且具有比较集中高低寿命区域之分.可见,微波反射光电导衰减法能够对样品的非均匀性有一定程度的反映.根据分析可知, $\tau_{\perp} \propto \frac{1}{j_s}$, 而光电二极管器件的优值因子 $R_0 A \propto \frac{1}{j_s}$ ^[10], 即 $\tau_{\perp} \propto R_0 A$. 所以,在扩散系数具有较高均匀性的样品中,测试结果反映了最终器件性能的均匀性.

4.2 衰减曲线

在样品上取特定的点测量信号的衰减曲线,结果如图 3 所示,可以看到,实际的衰减过程偏离指数衰减,具有更大的衰减速度.理论分析可知,非平衡载流子衰减受到两个方向的扩散运动的制约,在垂直于 pn 结方向的扩散是指数形式的,而平行于 pn 结方向的扩散运动可能是导致衰减过程偏离指数形式的原因.

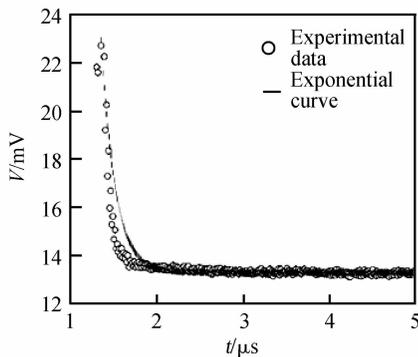


图 3 微波信号衰减曲线

Fig. 3 Decay curve of the microwave signal

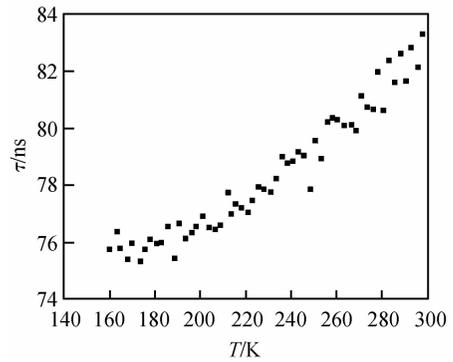


图 4 少子寿命变温测试

Fig. 4 Lifetime measurement at different temperatures

4.3 变温测试

在体材料中,随着温度的降低,由于平衡载流子浓度减小,表面复合速率减小等因素的影响,一般来讲,少子寿命随温度降低而增大.而双异质结结构材料的寿命变温测试结果如图 4 所示,可以看到,在室温附近它的少子寿命随温度降低而减小.

在微波测试中测试寿命受两个方向的扩散所制约,而由于 pn 结反向饱和电流密度^[10]:

$$j_s \propto T^{3+\frac{\gamma}{2}} \exp\left[\frac{-E_g}{k_B T}\right]$$

其中 γ 为常数; E_g 为禁带宽度. 所以垂直运动寿命 $\tau_{\perp} \propto \frac{T}{j_s} \propto T^{-2-\frac{\gamma}{2}} \times \exp\left(\frac{E_g}{k_B T}\right)$.

在室温附近, j_s 随温度的变化主要由指数项决定,因此 j_s 随温度升高而增大, τ_{\perp} 则随温度降低而增大.

对 III-V 族化合物半导体,其电子迁移率^[8]:

$$\frac{1}{\mu} \propto AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}} + \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (15)$$

对于 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料,其电导率在 160~300K 之间随温度降低而升高^[11], 而由于 $\tau_{\parallel} \propto \frac{1}{T\mu_n}$, 所以受平行于 p⁺n 结方向扩散运动制约的非平衡载流子寿命是随温度降低而减小的.

综上所述,当平行于 p⁺n 结的扩散分量较大时,测量寿命可能出现随着温度降低而减小.而测试结果说明在微波测试中,由于光注入载流子分布面积的扩大而引起的信号衰减不容忽视.正是这一因素的存在使得测量寿命随温度的变化出现反常.

5 结 论

本文用微波反射光电导衰减法测量了 p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结材料的少子寿命分布,分析了非平衡载流子浓度在 p^+ n 结中衰减过程,建立了在此结构材料中微波反射光电导衰减法测试少子寿命与器件参数之间的联系,并且解释了寿命测试值随温度降低而减小的反常行为.结果表明,微波反射测得的光电导衰减受到平行于 pn 结方向扩散运动的影响,偏离非平衡载流子的复合过程,使得测试结果与少子寿命有所不同.

参考文献

- [1] Chen M C. Photoconductivity lifetime measurements on HgCdTe using a contactless microwave technique. *J Appl Phys*, 1988, 62(2): 946
- [2] Ichimura M, Hirano M, Tada A, et al. Characterization of Si wafers by μ -PCD with surface electric field. *Mater Sci Eng B*, 2000, 73: 230
- [3] Sontag D, Hahn G, Geiger P, et al. Two-dimensional resolution of minority carrier diffusion constants in different silicon materials. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 2002, 72: 533
- [4] Ahrenkiel R K. Influence of junctions on photoluminescence decay in thin-film devices. *J Appl Phys*, 1987, 62: 2937
- [5] Dhariwal S R, Mehrotra D R. On the recombination and diffusion limited surface recombination velocities. *Solid-State Electron*, 1988, 31(9): 1355
- [6] Metzger W K, Ahrenkiel R K, Dashdorj J, et al. Analysis of charge separation dynamics in a semiconductor junction. *Phys Rev B*, 2005, 71: 1
- [7] Lü Yanqiu, Wang Nili, Zhuang Chunquan, et al. Uniformity of InGaAs in InP/InGaAs/InP by microwave photoconductivity decay (μ -PCD) carrier lifetime measurement. *Semiconductor Sci Technol*, 2006, 21: 771
- [8] Lü Yanqiu, Wang Nili, Zhuang Chunquan, et al. The uniformity of InGaAs absorbing layer by μ -PCD technique. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(5): 551 (in Chinese) [吕衍秋, 王妮丽, 庄春泉, 等. 微波反射光电导衰减法测量 InGaAs 吸收层的均匀性. *半导体光电*, 2006, 27(5): 551]
- [9] Eikelboom J A, Leguijt C, Frumau C F A, et al. Microwave detection of minority carriers in solar cell silicon wafers. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 1995, 36: 169
- [10] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. *Semiconductor physics*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. *半导体物理学*. 北京: 电子工业出版社, 2003]
- [11] Olive J D, Eastman L F, Kirchner P D, et al. Electrical characterization and alloy scattering measurements of LPE $Ga_xIn_{1-x}As/InP$ for high frequency device applications. *J Cryst Growth*, 1981, 54(1): 64

Microwave Photoconductivity Decay (μ -PCD) Characterization and Mechanism of p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP Double Heterojunction Material*

Wu Xiaoli^{1,2,†}, Wang Nili¹, Zhang Kefeng^{1,2}, Tang Hengjing^{1,2}, Huang Yimin^{1,2}, Han Bing^{1,2}, Li Xue¹ and Gong Haimei¹

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The lifetime mapping of a p^+ -InP/n-InGaAs/n-InP double heterojunction wafer is measured by the microwave photoconductivity decay technique, and the mechanism of photoconductivity decay in this material is analyzed. Based on this analysis, the relationship between the measured lifetime and the device parameters is determined, and the abnormal change of lifetime with the decrease in temperature is explained.

Key words: InGaAs; double heterojunction; microwave reflection; photo conductivity decay

PACC: 6110F; 2320C

Article ID: 0253-4177(2007)11-1769-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50632060)

† Corresponding author. Email: qiuchong2003@126.com

Received 22 May 2007, revised manuscript received 13 June 2007