

高纯区熔单晶硅高增益光晶体管的研究*

田晓娜¹ 张秀荣¹ 张海君¹ 韩德俊^{1,**} G. Batignani²

(1 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

(2 意大利国家原子核物理研究院比萨分院, 意大利 56100)

摘要 区熔单晶硅与直拉单晶硅以及其他半导体材料相比杂质含量少, 少子寿命长, 所以以区熔单晶硅为衬底制作的光晶体管在弱的光信号下仍然有高的增益, 适宜于弱光探测. 报道了以区熔单晶硅为衬底的光晶体管的实验结果. 为了保持区熔高纯单晶硅内的少子寿命, 背面淀积了一层掺磷多晶硅作为外吸杂层. 已经测量得到对于实验中发射极直径为2 mm的光晶体管在波长为0.83 μm 的入射光照射下, 光功率低至0.16 nW时, 光晶体管的增益仍然高达4400.

关键词 区熔单晶硅; 外部吸杂; 光晶体管; 增益; 少子寿命

中图分类号 TN366 **文献标识码** A

0 引言

双极晶体管的结构如果适合用来探测光并被用作光电探测器时, 称为光晶体管. 由于光晶体管本身有内部增益, 一直受到人们的极大关注, 得到了广泛应用. 例如光晶体管可以用于光纤通讯中的前端接收^[1], 医学中的x射线探测^[2], 环境监测^[3], 以及生物芯片测试^[4]等等. 由于光晶体管有高的内部增益, 可以简化输出电子线路, 减少寄生效应, 使探测器更加简单可靠, 所以光晶体管适宜于探测微弱光信号.

光晶体管通常是以直拉单晶硅^[4]、多晶硅^[5]或III-V族半导体材料^[1]为衬底制作的. 文献中提到的光晶体管很少是以区熔单晶硅为衬底制作的, 如Kamistsuna报道了截止频率为82 GHz的InGaAs/InP光晶体管^[1]. 当入射光信号减弱时, 这些光晶体管的增益急剧下降. 这是因为光生电流比较弱时, e-b耗尽区中的复合中心产生的复合电流将在总发射极电流中占较大比例, 复合电流并不会被集电结收集, 因而对增益没有贡献. 这必然会导致增益下降. 虽然硅是间接带隙的半导体材料, 与锗和其他III-V族半导体材料相比, 少子复合速率较低, 但很多杂质会在其禁带中间形成深能级, 从而导致少子复合速度加快. 事实上, 少子寿命反比于产生复合中心的浓度, 杂质浓度高, 少子寿命短, 会导致大的复合电流从而降低光增益. 因此减少硅中的产生复合中心或去除硅中的杂质和缺陷是提高光晶体管

弱光增益的有效途径.

区熔法是除直拉法外的生长单晶硅的主要方法. 区熔单晶硅的生长不需要坩埚, 在制备过程中除了与保护气体接触外不与其他任何材料接触, 因此区熔单晶硅比直拉单晶硅有更高的纯度(后者由于在生长过程中与坩埚接触, 含有相当数量的O、C、B和其他金属杂质)^[6], 所以我们认为区熔单晶硅更适宜于制作探测弱光的光晶体管.

然而由于氧元素含量少, 区熔单晶硅极易产生位错^[6]. 而且在器件制作过程中各种沾污无处不在. 区熔单晶硅中的少子寿命对容易带来杂质或激活杂质甚至带来位错的高温过程非常敏感. 减少高温过程、避免急剧升降温、在所有高温过程中避免沾污(尤其是金属沾污)都是解决这些问题的方法. 外部吸杂, 即在硅片背面淀积一层掺磷多晶硅也是解决这些问题的一个方法. 借助于磷与杂质的结合能力和多晶硅的晶粒边界可以将杂质吸引到有源区外的多晶硅吸杂层^[7].

本文给出了以区熔高纯单晶硅为衬底制作的光晶体管的实验结果, 器件背面淀积了掺磷多晶硅的吸杂层. 当波长为0.83 μm 、光功率为0.16 nW的入射光通过光纤耦合入射到光晶体管上时, 光晶体管的增益高达4400.

1 理论与实验

从器件物理的角度上讲光晶体管的工作原理如图1所示, 一般采用发射极作为入射光的“窗口”, 用基区-集电区pn结作为受光结. 发射区对光的吸收很小(如0.83 μm 的光穿过100 μm 厚的Si层时, 吸收率仅为2.8%). 当入射光穿过发射极照在器件上, 大部分被基区、b-c耗尽区和集电区吸收并产生电子-空穴对. 在b-c耗尽区和基区、集电区外一

*本项研究工作受到国家自然科学基金(批准号: 60244004)、“863”计划(课题编号: 2002AA313120)的部分资助

**Tel: 010-62208250

收稿日期: 2003-07-04

个少数载流子扩散长度范围内的电子-空穴对将被分开并被 b-c 结区吸收,空穴将聚集在基区内,基区内电荷的变化改变了发射极的电位,使得电子在此处的电势变低. 为了保持基区的电荷中性条件,将从发射极向基区注入一个大的电子流. 如果注入电子在基区内的寿命远比它穿过基区的渡越时间长,则按普通晶体管的工作原理就可以获得增益^[8].

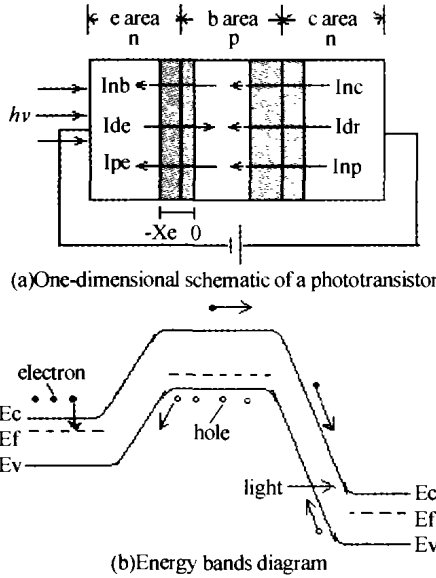


图 1 基极悬浮光晶体管的工作原理
Fig. 1 A phototransistor operated under the mode of base area float

从电子学的角度看,光晶体管等效于在基极和集电极之间接有光电二极管的双极晶体管,其结构和工作原理与双极晶体管类似. 假设器件中每个区域的掺杂都是均匀的,入射光穿过发射极,吸收主要发生在 b-c 结耗尽区内. 我们考虑基极悬浮的 n-p-n 结构. 基极悬浮,即基极不加电压,基极的信号电流由光生载流子产生. 在发射极和集电极之间加上偏置电压,使发射结和集电结分别处于正向偏置和反向偏置. 在基极悬浮的光晶体管中,流过器件的总电流为一常数,即发射极电流 I_e 和集电极电流 I_c 应相等. 在 e-b 结处,发射极电流 I_e 包括从发射极注入到基区的电子流分量 I_{nb} 、从基区注入到发射极的空穴流分量 I_{pe} 和 e-b 耗尽区的复合电流分量 I_{de} ; 在 b-c 结处,集电极电流 I_c 也由三部分组成,从基区流入到集电极的电子流分量 I_{nb} 、从集电极注入到基区的空穴流分量 I_{pe} 和 b-c 耗尽区的光生载流子漂移电流分量 I_{dr} . 在 e-b 结耗尽区内的复合电流的大小为^[8]

$$I_{de} = \int_{-x_e}^0 qAUdx \approx \frac{qx_e}{2} \sigma_0 \nu_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV_c}{2kT}\right) = \frac{qAx_e n_i}{2\tau_r} \exp\left(\frac{qV_c}{2kT}\right) \quad (1)$$

在这里, V_{th} 为载流子热速度, σ_0 为电子和空穴

的俘获截面, N_i 为单位面积内的复合中心数, $\tau_r = 1/(\sigma_0 \nu_{th} N_i)$ 为载流子的有效复合寿命, V_c 为发射结电压, A 为 e-b 结面积, U 为复合率, x_e 为 e-b 结耗尽区宽度.

考虑到发射结和集电结耗尽区及表面的边界条件,由少数载流子的一维连续方程的解可以确定光晶体管中发射极、基极和集电极的电流. 光增益 g 可由如下方程计算得到

$$g = \frac{I_c}{I_e} = \frac{I_c(1-R)}{qA\Phi_0} \quad (2)$$

式中的 I_c 代表集电极电流中的光电流成分, $\Phi_0 = P_0(1-R)/h\nu$ 是单位面积上的入射光通量, P_0 为入射光功率, R 为反射系数. 可见,大的 N_i 和小的 τ_r 会使 I_{de} 增大,导致 I_c 及光增益 g 下降.

图 2 是在研究中所用的发射极直径为 2 mm 的光晶体管的结构示意图. 器件的原始材料是直径 100 mm、280 μm 厚、 $\langle 111 \rangle$ 晶向的 n 型高纯区熔单晶硅,电阻率约是 6 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$. 在同一硅片上还制作了测试二极管(如 p-i-n 二极管,门二极管等)以监测制作工艺过程. 器件在意大利 IRST 制作完成,详细工艺可参考文献[9]、[10]. 发射极设计为 n^+ /n 结构是为了减薄基区厚度以获得高的灵敏度. 首先进行基区 B 注入,注入的能量 400 KeV、剂量 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$,然后热扩散,形成 p-well 层;其次发射区 P 注入,注入能量 400 KeV、剂量 $7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$,然后热扩散,形成 n-channel 层;集电区是背面 280 μm 厚的硅.

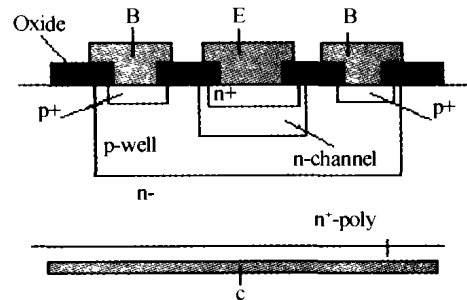


图 2 光晶体管结构示意图
Fig. 2 Schematic of the phototransistor

光晶体管的响应是通过 Keithley 237 测得的,光源是一个发射波长为 0.83 μm 的激光二极管,光通过直径 50 μm 的光纤耦合至光晶体管. 光增益是通过 e-c 结光电流(b 电极悬空)与 b-c 结光电流(e 电极悬空)之比得到的.

2 结果与讨论

在完全耗尽情况下测试二极管的漏电流为 $\sim 1 \text{ nA/cm}^2$. 通过门二极管测得表面复合速度为 $\sim 25 \text{ cm/s}$,这说明制作工艺过程是合理的. 在测试过程中,e-c 结加电压高至 70 V,高于器件集电区完

全耗尽时所需的45 V.

不同偏压下光晶体管的增益随入射光强的变化如图3,光源是波长为0.83 μm的激光二极管.光增益的表达式是

$$G = \frac{I_{ec光}}{I_{bc光}} \quad (3)$$

$I_{ec光}$ 、 $I_{bc光}$ 为光致电流,测量时用加光时的电流减去无光时的暗电流得到,由于 $I_{bc光}$ 是未经放大的光电流,由下式可估算入射光功率

$$P_0 = \frac{h\nu}{\eta} \frac{I_p}{q} = \frac{h\nu}{\eta} \frac{I_{bc光}}{q} \quad (4)$$

式中为 $h\nu$ 为光子能量, η 为量子效率, I_p 为光生电流即 $I_{bc光}$, q 为电子电量.

在70 V电压下当e-c结b-c结光电流分别为363 nA,83 pA,计算得 $G=4400$,再由光功率计算公式(4)可得此时光功率为0.16 nW(η 按80%估算),所以在非常弱的入射光下光晶体管仍然有很高的光增益.光晶体管在弱光下的光增益如图3所示.三条曲线分别表示不同偏压下的情况.由图3可以看到,随着入射光功率的增强光增益增大,这是由于入射光增强时,复合电流在发射极电流中占的比重减小,提高了发射效率,从而导致增益变大.同时同一入射光强下,增益还随着发射极和集电极之间电压的增大而增大,这是由于发射极所加电压越高,一方面b-c结耗尽区增大,收集光生电子-空穴对的效率提高,另一方面基区宽度随e-c结间的偏压增大而变窄,导致增益增大.

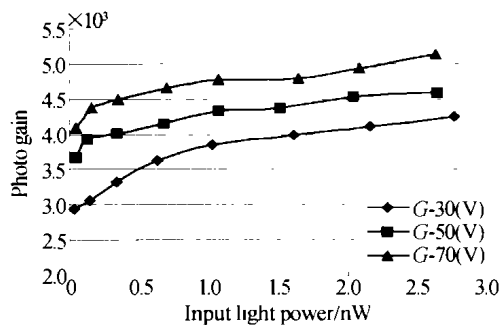


图3 不同偏压下光晶体管的增益随入射光强的变化

Fig. 3 Photo gain as a function of input light power at different bias voltage

响应速度是光晶体管的另外一个重要指标.载流子的扩散时间、耗尽区内的漂移时间及耗尽区电容都会影响响应速度.响应速度还与入射光功率有关,入射光功率越大,响应速度越快.有关本器件响

应速度方面的工作正在进行中.

3 结论

区熔单晶硅与直拉单晶硅和其他半导体材料相比杂质浓度低,少子寿命长.如果在工艺过程中能够避免沾污(尤其是金属沾污),减少离子注入和退火带来的缺陷,区熔单晶硅特别适用来制作探测微弱光信号的光晶体管.掺磷多晶硅的背面吸杂层能有效的保持长的少子寿命.

感谢北京师范大学的闫凤章老师为我们提供测量光响应所需光源.

参考文献

- 1 Kamistuna H, Matsuoka Y, Yamahata S, *et al.* Ultrahigh-speed InP/InGaAs DHPTs for OEMMICs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**:1921 ~ 1925
- 2 Horisber R. The bipolar silicon strip detector: A proposal for a Novel Precision Tracking Device. *NIM*, 1990, **A288**: 87 ~ 91
- 3 Wen Tse Hsieh, Yean Kuen Fang, Lee W J, *et al.* An a-SiGe:H phototransistor integrated with a Pd film on glass substrate for hydrogen monitoring. *IEEE Transactions on Electron Device*, 2000, **ED-47**: 939 ~ 943
- 4 Vo-Dinh T, Alarie J P. DNA biochip using a phototransistor integrated circuit. *Anal Chem*, 1999, **71**: 358 ~ 363
- 5 Nascetti A, Caputo D. Amorphous silicon phototransistor as nonlinear optical device for high dynamic range imagers. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, **ED-49**: 395 ~ 399
- 6 Wolf S, Tauber R N. Silicon processing for the VLSI era. *Process Technology by Lattice Press*, 1986, **1**: 61 ~ 70
- 7 Holland S. An IC-Compatible detector process. *IEEE Transaction on Science*, 1989, **NS-36**: 283 ~ 289
- 8 Chand N, Houston P A, Robson P N. Gain of a heterojunction bipolar phototransistor. *IEEE Trans Electron Devices*, 1985, **ED-32**: 622 ~ 627
- 9 DallaBetta G F, Verzellesi G, Boscardin M, *et al.* Silicon PIN radiation detectors with on-chip front-end junction field effect transistors. *Nucl Instr and Meth*, 1998, **A417**: 325 ~ 331
- 10 Simi G, Angelini C, Batignani G, *et al.* Design and characterization of integrated front-end transistors in a micro-strip detector technology. *Nucl Instr and Meth*, 2002, **A485**: 193 ~ 198

Ultra-high Sensitive Bipolar Detector on Float-Zone Silicon

Tian Xiaona¹, Zhang Xiurong¹, Zhang Haijun¹, Han Dejun¹, G. Batignani²

¹ Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875

² INFN-pisa and Nuiversita' di Pisa, 56100, Via F. Buonarroti 2 (PI), Italy

Received date: 2003-07-04

Abstract Since the float-zone (FZ) silicon has lower contaminations and longer minority carrier lifetime than those in Czochralski Silicon and other semiconductor material, it has potential advantages to fabricate phototransistor on high-purity FZ silicon substrate to achieve a high gain at ultra low signal levels. Preliminary experimental results of a phototransistor fabricated on an unusual high-purity FZ silicon substrate have been obtained. A backside gettering layer of phosphorus-doped polysilicon was employed to preserve the long carrier lifetime of the high-purity FZ silicon. The bipolar detector with a circle of 2 mm diameter has demonstrated high gain up to 4400 for 0.16 nW light with wavelength of 0.83 μm .

Keywords Float zone silicon; Extrinsic gettering; Bipolar junction transistor; Minority carrier lifetime



Tian Xiaona was born in 1976. She received the B. S. degree in physics department from Beijing Normal University in 1999. Now she is studying for master degree in Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University. Her major research is in semiconductor photonic devices.