

高灵敏高线性度区熔硅光晶体管的研究^{*}

韩德俊^{1,†} 孙彩明¹ 盛丽艳¹ 张秀荣¹ 张海君¹ 闫凤章¹
杨 茹¹ 张 录² 宁宝俊²

(1 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

(2 北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 报道了一种基于高纯区熔单晶硅和发射结-集电结接近穿通状态的光晶体管的实验结果. 在穿通电压附近 (40V), 0.83 μ m 波长的光入射及 0.15nW 入射光功率条件下, 器件的响应度为 38A/W; 工作在发射结-集电结接近穿通状态时线性度最好, 在 0.15~1500nW 光功率 (4 个数量级) 范围内, 线性因子为 0.9954, 接近于 Hamamatsu S1227-1010BQ 光电二极管在同一光功率区间内的线性因子 (0.9982). 另外, 这种光晶体管的增益在 130 左右且增益的起伏在 1% 以内时, 偏压的变化允许在 2.5% 以内 (40V $\pm$ 1V), 温度的变化可允许 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C. 其增益对偏压及温度的稳定性优于线性模式下具有相近增益的雪崩光电二极管.

关键词: 光晶体管; 区熔硅; 灵敏度; 线性度

PACC: 9580N; 2940; 8160C

中图分类号: TN312⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0223-04

1 引言

半导体光探测器由于具有量子效率高、体积小、重量轻、可靠性高、成本低、不受磁场影响、光谱响应范围宽、光敏面可做成任意形状、容易制作出大规模探测器阵列等优点, 已经成为所有光探测器当中应用最广泛的一类光探测器^[1]. 光电二极管, 尤其是硅光电二极管, 是应用最为成功和广泛的半导体光探测器. 它的结构简单、线性度好、响应速度快、噪声低^[1,2]. 但由于普通光电二极管没有内部增益, 限制了它在微弱 (例如皮瓦级) 光信号探测领域中的应用.

在半导体光探测器家族中, 雪崩倍增光电二极管 (APD) 和光晶体管 (phototransistor) 是最重要的两种具有内部增益的光探测器. 光晶体管的结构与双极晶体管非常相似, 工作时基区悬浮, 有两个电极, 其工作原理可参阅文献 [3]. APD 一般工作在线性模式, 即它的工作偏压低于其击穿电压. 与光晶体管比较, 当增益较大时 (例如几百倍以上), APD 的增益对温度和工作偏压非常敏感, 较难控制. 例如, 当 APD 增益为 100 倍左右时, 如果增益的起伏在 1% 以内, 则要求偏压的稳定度必须优于 0.01%, 温度的稳定度优于 1.2 $^{\circ}$ C. 并且增益越高, 对偏压或温度的稳定性要求越高^[4]. 因此, 在一般情况下 APD

的增益不如光晶体管的高. 并且, 这种苛刻的工作条件使得工作在线性模式下的 APD 应用在微弱光的成像领域时较为困难, 因为较难使每一个像素 APD 单元的增益保持一致. 另外, APD 有过剩噪声, 其噪声特性不如光晶体管好^[5]. 然而, APD 的带宽 (或工作速度) 以及灵敏度高于现有的光晶体管. 更由于以下几个方面的原因, 现有的光晶体管存在很大的局限性, 其实际应用远不如 APD 广泛:

(1) 当入射光信号较弱时, 光晶体管的增益较小, 且随入射光信号的功率减小而减小. 由于常规光晶体管通常是以直拉单晶硅^[6]、多晶硅^[7] 或 III-V 族半导体材料^[8] 为衬底制作的, 光较弱 (即光电流较小) 时, 发射结耗尽区中的复合中心导致的复合电流将在总发射极电流中占较大比例. 这个复合电流分量对集电极光电流的大小带来负面影响, 导致光晶体管的增益下降^[9]. 这种现象对光晶体管探测微弱光信号极为不利. 虽然硅是间接带隙半导体材料, 与 Ge 或其他 III-V 族半导体材料相比, 少子复合速率较低. 但单晶硅材料中许多不可避免的杂质缺陷, 尤其是重金属杂质缺陷会在其禁带中形成深能级复合中心, 致使少子的复合速度加快^[10], 并导致一般的硅光晶体管小信号增益 (即灵敏度) 较低. 现有光晶体管一般应用于强度在几百纳瓦以上的光信号的探测^[2].

(2) 光晶体管的线性度较差. 与双极晶体管一

^{*} 北京市凝聚态物理重点学科及国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA313120) 资助项目

[†] 通信作者, Email: djhan@bnu.edu.cn

2005-10-13 收到, 2006-01-11 定稿

样,现有光晶体管的增益依赖于工作电流.在光信号较弱时,光晶体管的增益随光强的增大而增大.当达到一峰值后,光晶体管的增益随光强的增大而减小.由于增益显著依赖于光强,其光电流随光强变化的线性度较差.现有光晶体管一般只能在 3~4 个数量级范围内保持线性,而一般的光电二极管可在 7~9 个数量级范围内保持线性^[11].线性较差的探测器对模拟光信号的探测容易产生失真,用作核探测器时对射线信号探测的能量分辨率较差.

我们于 1997 年报道过一种 AlGaAs-GaAs 异质结光晶体管的研究结果^[9],实验发现该光晶体管的线性特性依赖于器件结构及工作模式.近年来我们对采用非常规半导体材料——高纯区熔单晶硅的双极晶体管及光晶体管开展了研究^[12,13].由于区熔单晶硅材料纯度高,少子寿命长,我们证实用它做双极器件,其小信号增益特性得到很大提高.在本项研究工作中,我们采用高纯区熔单晶硅制作了工作于发射-集电结穿通状态下的光晶体管,以期改善或克服现有光晶体管线性度及灵敏度较差的缺点.

2 实验与结果

光晶体管采用厚度 $300\mu\text{m}$ 、 $\langle 111 \rangle$ 晶向、电阻率约 $8\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型区熔单晶硅,其光敏面积 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$,器件示意结构如图 1 所示.制作工艺与文献^[12,13]中的工艺类似,其基区由硼(B)离子注入实现,叠加注入的能量和剂量分别是 $400\text{keV}, 1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$; $150\text{keV}, 1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 和 $75\text{keV}, 6 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$.器件特性的测量利用了探针台、波长 $0.83\mu\text{m}$ 的半导体激光器、安捷轮 4156C 半导体参数测量仪和芯径 $50\mu\text{m}$ 的光纤探针等^[14].其发射-集电极 $I-V$ 特性如图 2 所示.由此可判定其穿通电压约为 40V .

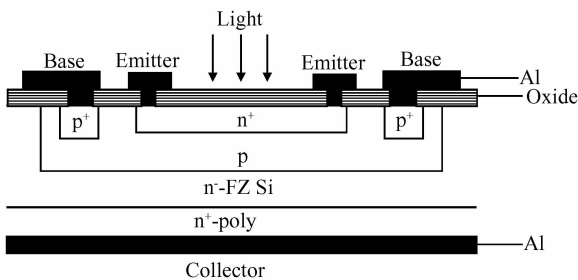


图 1 光晶体管结构示意图

Fig.1 Schematic structure of the phototransistor in this study

光晶体管的响应度与入射光功率及 E-C 偏压的关系如图 3 所示.线性度与工作偏压的关系与我们先前在 AlGaAs-GaAs 异质结光晶体管得到的结果一致^[9].如该图所示,器件工作在穿通状态时线性

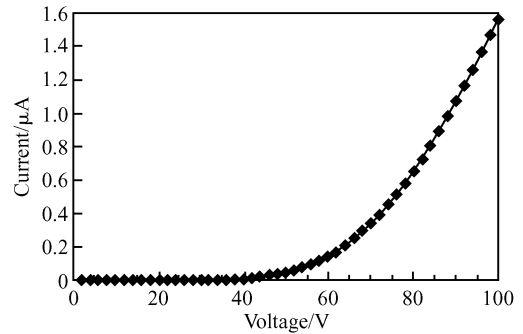


图 2 光晶体管集电极电流与集电极电压之间的关系

Fig.2 Dependence of the collector current on emitter-collector voltage for the fabricated phototransistor in this study

度最好,在 0.15nW 入射光功率下的响应度为 38A/W .我们对工作在穿通状态下的光晶体管与日本 Hamamatsu S1227-1010BQ 光电二极管的线性特性作了对比研究,结果如图 4 所示.在 $0.15 \sim 1500\text{nW}$ (4 个量级)入射光功率范围内,光晶体管 PTPT 的线性度因子为 0.9954 ,接近光电二极管的线性度因子(0.9982).由于光晶体管有内部增益,其光响应度远大于光电二极管,这有利于对微弱信号的探测.

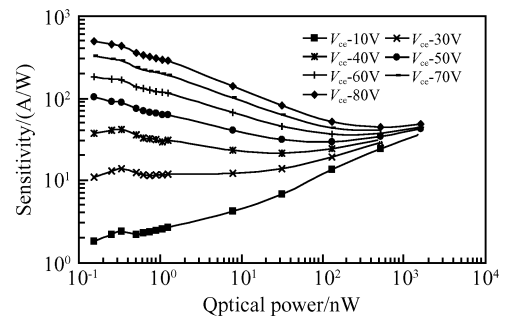


图 3 光晶体管的响应度与入射光功率以及集电极电压之间的关系

Fig.3 Dependence of the sensitivity on the incident optical power and the collector voltage for the fabricated phototransistor

同一 100mm 芯片上的另外一些光晶体管的响应度与工作偏压及温度在 100nW 入射光功率下的关系如图 5 所示.在穿通电压 40V 附近,响应度为 70A/W (若假定量子效率是 80% ,对应的光电转换增益等效为 130).如果这时要求响应度的起伏范围在 1% 内,则工作电压可以容许有 1V 的起伏,或称起伏幅度可以容许在 2.5% 以内,而温度则容许有 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的变化.与此相对照,EG&G C30921E 雪崩光电二极管(APD),如果增益在 100 附近容许变化 1% ,工作电压在 250V 附近的起伏要求稳定在 0.01% 以内,而温度的起伏要求稳定在 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 以内,并且增益越高,对工作偏压及温度稳定性的要求

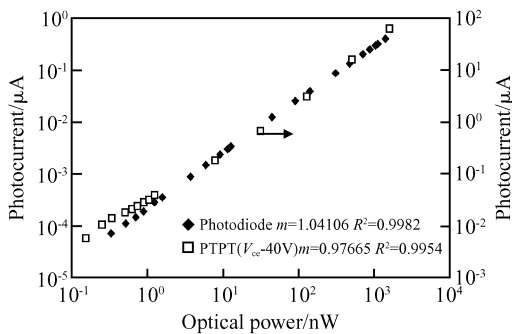


图 4 穿通型光晶体管的响应度(对应右 y 轴)与 Hamamatsu S1227-1010BQ 光电二极管的响应度(对应左 y 轴)的比较 入射光波长为 830nm.

Fig. 4 Photo-response of the fabricated punch through phototransistor (corresponds to the right y-axis) and the Hamamatsu S1227-1010BQ photodiode (corresponds to the left y-axis) for light with wavelength of 830nm.

也越高^[4]. 光晶体管的增益(或响应度)对工作偏压或温度的敏感性远小于雪崩光电二极管. 这有利于光晶体管在高增益下保持稳定可靠的工作, 简化偏置电路的复杂程度.

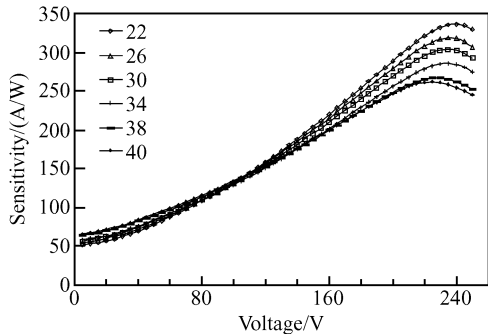


图 5 光晶体管的响应度与集电极电压及温度的关系 入射光功率约为 100nW.

Fig.5 Sensitivity versus bias voltage as a function of temperature for the fabricated phototransistor The incident optical power is approximately 100nW.

3 结论

初步研究结果表明, 一种基于高纯区熔单晶硅

和发射结-集电结接近穿通状态的新型光晶体管有可能克服或改善现有光晶体管线性度较差、灵敏度较低的缺点, 并具有增益特性对工作偏压和温度较不敏感的优点. 考虑到光晶体管具有噪声较低、增益较高的优点, 我们感觉在速度响应要求不是非常快的微弱光信号的探测领域, 尤其是在微弱光的成像方面, 光晶体管的整体性能有可能优于工作于线性模式下的雪崩光电二极管.

参考文献

[1] Renker D. Photosensors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, 527: 15

[2] PerkinElmer, Larry Godfrey, 2003

[3] Chand N, Houston P A, Robson P N. Gain of a heterojunction bipolar phototransistor. IEEE Trans Electron Devices, 1985, 32: 622

[4] Tapan I, Duell A R, Gilmore R S, et al. Avalanche photodiodes as proportional particle detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, 388: 79

[5] Refaat T F, Abedin N N, Sulima O V, et al. Novel Infrared phototransistors for atmospheric CO₂ profiling at 2μm wavelength. International Electron Device Meeting, San Francisco California, 2004

[6] Vo-Dinh T, Alarie J P, Isola N, et al. DNA biochip using a phototransistor integrated circuit. Anal Chem, 1999, 71: 358

[7] Nascetti A, Caputo D. Amorphous silicon phototransistor as nonlinear optical device for high dynamic range imagers. IEEE Trans Electron Devices, 2002, 49: 395

[8] Kamitsuna H, Matsuoka Y, Yamahata S, et al. Ultrahigh-speed InP/InGaAs DHPTs for OEMMICs. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 2001, 49: 1921

[9] Han Dejun, Li Guohui, Yan Fengzhang, et al. Ultrahigh sensitive AlGaAs-GaAs punch-through heterojunction phototransistor. IEEE Photonics technol Lett, 1997, 9: 1391

[10] Sze S M. Physics of semiconductor devices. 2nd ed. John Wiley, 1981

[11] EG & G Optoelectronics, 1997

[12] Han D J, Batignani G, Guerra A D. Supergain transistors on high-purity float-zone silicon substrate. Appl Phys Lett, 2003, 83(7): 1450

[13] Han D J, Batignani G, Guerra A D, et al. High-gain bipolar detector on float-zone silicon. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 512(3): 568

[14] Sun C M, Han D J, Sheng L Y, et al. Punch through float-zone silicon photo transistors with high linearity and sensitivity. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 547: 437

High Linearity Float-Zone Silicon Phototransistors with High Sensitivity and Stability^{*}

Han Dejun^{1,†}, Sun Caiming¹, Sheng Liyan¹, Zhang Xiurong¹, Zhang Haijun¹,
Yan Fengzhang¹, Yang Ru¹, Zhang Lu², and Ning Baojun²

(1 *Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

(2 *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: A float zone silicon phototransistor is fabricated with sensitivity of 38A/W for light of wavelength 0.83 μ m and optical power of 0.15nW. This demonstrates that the linearity reaches the highest when the base of the phototransistor is completely depleted, and the fitting goodness of output is 0.9954 over a 40dB range from 0.15 to 1500nW. The stability of 1% in the sensitivity for the punch through phototransistor with an internal current conversion gain of 130 can be obtained if the bias voltage and operating temperature can be stable to about 2.5% (1V in 40V) and the temperature to $\pm 2^{\circ}\text{C}$. The stability is better than that of reported APD which had a similar gain.

Key words: phototransistor; float zone silicon; sensitivity; linearity

PACC: 9580N; 2940; 8160C

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0223-04

^{*} Project supported by the Key Subject of Condensed-State Physics of Beijing City and the National High Technology Research and Development Program of China(No.2002AA313120)

[†] Corresponding author. Email: djhan@bnu.edu.cn

Received 13 October 2005, revised manuscript received 11 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics