

文章编号: 1000-7032(2012)04-0444-05

标准 CMOS 工艺载流子注入型三端 Si-LED 的设计与研制

韩磊¹, 张世林^{1*}, 郭维廉^{1,2}, 毛陆虹¹, 谢生¹, 张兴杰¹, 谷晓²

(1. 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072;

2. 天津工业大学 信息与通信工程学院, 天津 300161)

摘要: 采用无锡华润上华(CSMC) 0.5 μm 标准 CMOS 工艺, 设计并制备了一种新型的高发光功率载流子注入型三端 Si-LED 器件。该器件在 p 型衬底上进行 n^+ 掺杂, 与 p 衬底形成两个相对的 n^+p 结, 其中一个结正向偏置, 发出峰值波长在 1 100 nm 附近的红外光; 另一个结同样正偏, 作为注入结对发光进行调制。测试结果显示: 第三端注入载流子明显增强了总体的发光功率, 在 10 mA 偏置电流、3 V 调制电压下, 可获得 1 nW 的光功率, 与单结相比提高了两个数量级。由于工作电压低, 该器件可与目前主流的 CMOS 工艺共电源单芯片集成, 在光电集成领域具有一定的应用前景。

关键词: 硅基 LED; 标准 CMOS; 发光器件; 正向注入发光; 光电集成

中图分类号: TN383 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20123304.0444

Design and Fabrication of Three-terminal Carrier-injection-type Si-LED with Standard CMOS Technology

HAN Lei¹, ZHANG Shi-lin^{1*}, GUO Wei-lian^{1,2},

MAO Lu-hong¹, XIE Sheng¹, ZHANG Xing-jie¹, GU Xiao²

(1. School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Information & Communication Inst., Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300161, China)

* Corresponding Author, E-mail: zsl@tju.edu.cn

Abstract: This paper demonstrates a novel carrier-injection-type silicon based light emitting device (LED) with three terminals and high light emission intensity. The device was designed and fabricated in the commercial standard 0.5 μm CMOS process offered by Central Semiconductor Manufacturing Corporation (CSMC) without any modification. Two shallow diagonal n^+p junctions were embedded on the p type substrate. One junction biased in forward mode emits infrared light, and the other is also forward biased to inject carriers into the light emitting region. Experiment results show that, at 10 mA biased current and 3 V modulation voltage, 1 nW optical power can be obtained and it's approximately two orders of magnitude higher than the single junction. Due to the low operating voltage, the device can be monolithic integrated with the current mainstream silicon CMOS technology and shows a great potential in optoelectronic integration field.

Key words: Si-LED; standard CMOS; light emitting device; carrier injection; OEIC

收稿日期: 2012-02-08; 修订日期: 2012-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036002)资助项目

作者简介: 韩磊(1987-), 男, 江苏宿迁人, 主要从事光电集成电路方面的研究。

E-mail: hanlei2732@163.com

1 引言

近年来,在摩尔定律的引导下,集成电路经历了飞速发展,集成度越来越高。然而,随着器件特征尺寸的不断减小,金属互连结构日趋复杂,互连的金属线日益变细变密。寄生电容、信号延迟及串扰、功耗等问题已经成为制约集成电路性能的瓶颈。用光互连取代电互连是一种极具吸引力的解决方案^[1-2]。传统的光纤通信系统使用的是Ⅲ-V族化合物材料,不能与目前主流的CMOS集成电路工艺兼容,很难实现单片集成且价格昂贵。而硅是一种价格低廉、加工工艺成熟的材料,在硅基实现光电回路的单片集成有着极大的应用前景。

当前,影响硅基光电子器件集成的主要障碍在于发光器件。早在1955年,Roger Newman就报道了硅pn结发射可见光现象^[3]。然而,由于硅是间接带隙材料,载流子的带间复合需要借助于声子的参与^[4],因此硅基LED(Si-LED)的发射光功率以及外量子效率都很低。此后,Lukas W. Snyman等人利用标准CMOS工艺制作了硅基反偏发光二极管^[5]。这种器件工作在雪崩击穿或齐纳击穿状态下,因此工作电压较高,外量子效率较低。该小组随后不断进行器件结构和工作方式创新,使得发射光功率和电光转换效率都有了一定的提高^[6-8]。2005年,台湾的Hsiu Chih Lee等人提出了硅基pn结正偏发光结构^[9],与反偏发光二极管不同,该器件发光机理为正向注入发光,工作电压较低。同时,这种器件发出光谱峰值在1100 nm左右的近红外光,体硅对这一波段的吸收较少,因此具有较高的外量子效率。近年来,随着研究人员的不断努力,不论是可见光还是红外光的发射效率都在不断提高^[10-13],对于发光机制的研究不断有新的理论提出^[14-16],对于光电回路的单片集成也有了一些有益的尝试^[7,17]。2007年,Lukas W. Snyman等人报道了一种新型的双结LED三端器件^[8],该器件在p型衬底上进行掺杂形成两个相对的n⁺p结,其中一个结反偏在雪崩击穿状态,另一个结正偏,通过向雪崩区域注入少数载流子来增强发光。在9 V的反偏电压下,该器件发出波长在450~750 nm范围内的可见光,发射光功率达到10 nW/ μm^2 。然而,随着集成电路尺寸的不断减小,芯片的工作电压也在不

断降低,光电回路的单片集成要求发光器件的工作电压要在5 V以下,该器件无法满足要求。

为了解决上述问题,本文提出了一个新的使硅基LED发光增强的n⁺pn⁺三端器件结构,利用其中一个结正向偏置发光,另一个结同时正偏进行载流子注入。由于正向偏置发光器件工作电压低,所以可以与目前的集成电路芯片共用电源。测试结果表明:载流子注入对发光有明显改善,辐射光处于红外波段,器件可在3 V甚至更低的电压下工作。

2 器件设计与制备

采用无锡华润上华(CSMC)0.5 μm 标准CMOS工艺设计和制备了正向偏置载流子注入硅基LED。如图1(a)所示,整个器件制作在p型衬底上,上下两个相对的p⁺掺杂区作为衬底接触用金属连线引出。在与p⁺掺杂区垂直方向上进行n⁺掺杂,构造左右相对的两个n⁺区,n⁺区和p衬底形成n⁺p结。两个衬底接触p⁺区相距7.5 μm ,n⁺掺杂区相距11 μm ,器件总面积约为20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。所有掺杂区域均为楔形,目的是利用尖端效应增强电场,同时由于电场限制效应使得发光区域更为集中,距离衬底接触较近的n⁺区的顶端做成针尖形状也是基于同样的考虑。工作时,距离衬底

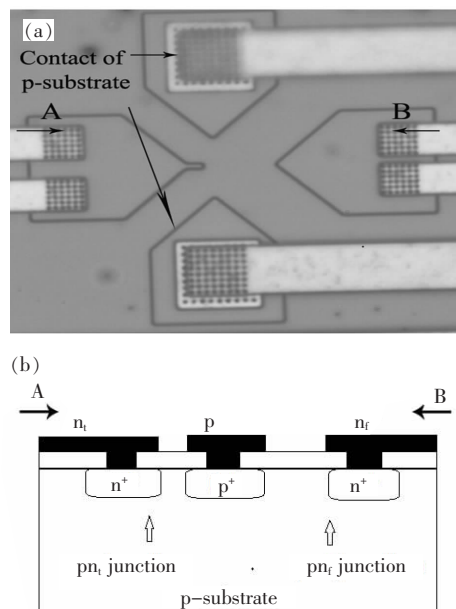


图1 (a) 器件实际照片;(b) 器件沿AB方向的剖面示意图。

Fig.1 (a) Picture of the device;(b) cross-sectional view along AB.

接触较近的 pn_i 结(图 1)正偏发光^[9],较远的 pn_r (图 1)结向发光区域进行载流子的注入^[8]。图 1 (b)为器件的剖面示意图。

3 结果与讨论

3.1 测试结果

采用吉时利公司的 4200-SCS 型半导体特性分析系统测试了器件的 I - V 特性,如图 2 所示。由于是 n^+p 结, p 衬底掺杂浓度较低,所以器件反向击穿电压较高,在 12 V 左右,正向开启电压约为 0.8 V。

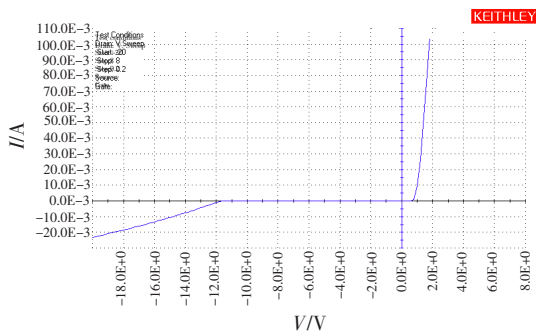


图 2 器件的 I - V 特性

Fig. 2 I - V characteristics of the device

为了测试器件的发光特性,我们采用卓立汉光公司(Zolix)的光学测量平台,该平台包括以下几个部分:

- (1) 显微镜及微调准架,固定被测器件及与光纤对准;
- (2) 一根多模光纤,将光信号传输至光功率计;
- (3) AV6334 型光功率计,由中国电子科技集团公司第四十一研究所生产,测试由光纤传输过来的光信号强度;
- (4) 半导体特性图示仪,用于偏置器件并测试器件的 I - V 特性。

分别对结 pn_i 和结 pn_r 独立地进行了光学特性测试。图 3 显示了结 pn_i 和结 pn_r 正向偏置发光时输出光功率随偏置电流的变化关系。图中方块代表结 pn_i ,圆点代表结 pn_r 。由图可以看出,结 pn_i 的电光转化效率要高于结 pn_r ,这是因为结 pn_i 的针尖状 n^+ 掺杂区增强了电场,同时由于电场限制效应使得发光区更为集中,这与设计预期的一致。两个结的输出光功率与偏置电流均呈线性关系,与之前文献报道的结果相符^[9]。

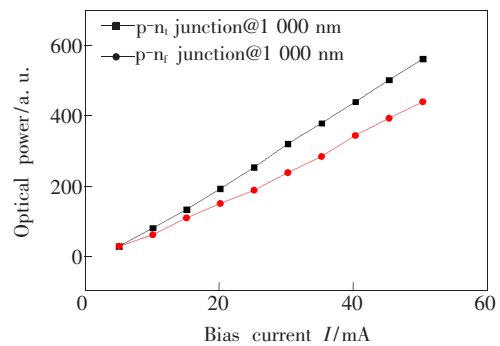


图 3 光功率和偏置电流的关系

Fig. 3 Relationship between optical power and forward biased current

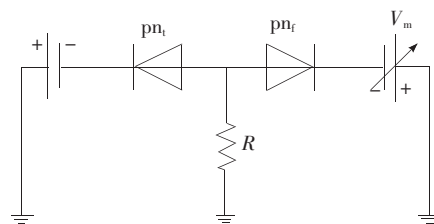


图 4 器件测试简化电路图

Fig. 4 Schematic of simplified test circuit

对器件进行调制测试,即在结 pn_i 正偏的基础上,改变第三端 n_r 的电压,对总体发光强度进行调控。图 4 是调制模式下器件测试的简化电路图,没有考虑两结之间载流子注入的影响。

图 5 显示的是在调制模式下,调制电流 I_m 对器件发光特性的影响,此时 pn_i 结正向偏置在 10 mA 电流下。使用光功率计测试 1 000 nm 波长下的输出光功率,图中曲线明显可以分为 AB 和 BC 两段。其中 AB 段斜率较小,此时调制电流在比较低的水平;当 I_m 继续增大时,曲线进入 BC 段,此时的发光效率有了明显提高。出现这种现象的原因可能是在较大注入电流下,两结之间产生了

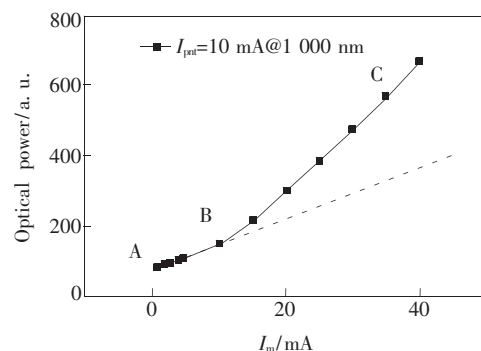


图 5 光功率和调制电流的关系

Fig. 5 Relationship between optical power and injection current

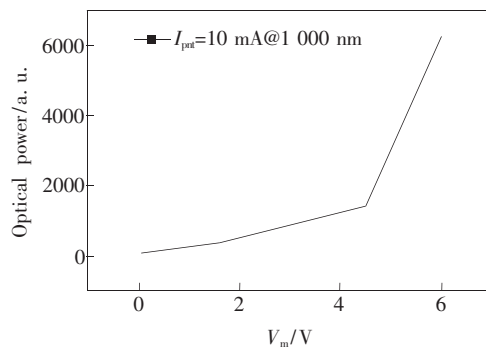


图6 光功率和调制电压的关系

Fig. 6 Relationship between optical power and modulation voltage

相互影响,类似于在较大电场下产生的某种倍增效应,其详细机理有待于进一步研究。

图6显示的是在调制模式下,另一个结构相同的器件调控电压 V_m 对发光特性的影响。相比于调控之前,输出光功率呈现出数量级式的增长。在3V调控电压下,发光功率增长了近两个数量级,获得了约1nW的输出光功率。6V时,输出光功率超过了6nW。

3.2 结果分析

初步分析认为,对于发光增强的原因,可能有

两种因素起作用。其一是调制结(pn_r)正向载流子注入发光使得整体光功率增强,这个因素是肯定存在的,但是这种叠加应该是线性叠加,不会造成发光功率产生几个数量级的变化。其二即上文提到的两个结之间的相互作用,可能在大的注入电流下,存在于强场下的载流子倍增效应对发光产生了影响,提高了发光功率。至于其具体的作用机理目前尚不明确,下一步的研究工作将着重解决此问题。

4 结 论

采用无锡华润上华(CSMC)0.5 μm CMOS工艺设计并制备了一种高发射功率新型三端可调的Si基发光器件。测试结果表明,器件正偏时发射不可见的红外光,发光强度和电流近似呈线性关系。器件一端 n^+ 掺杂区设计成楔形,另一端在楔形基础上增加了一针形的尖端,利用电场限制效应使发光区域更为集中,测试结果表明达到了设计预期。对器件进行三端调制测试,第三端电流的注入对发光功率有明显提高,在3V调制电压作用下,光功率提高了近两个数量级。该器件在光互连、光电集成等领域有一定的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Meindl J D, Chen Qiang, Davis J A. Limits on silicon nanoelectronics for terascale integration [J]. *Science*, 2001, 293 (5537):2044-2049.
- [2] Dong Zan, Wang Wei, Huang Beiju, et al. Silicon-based LED display array in standard CMOS technology [C]//7th IEEE International Conference on Group IV Photonics, Beijing, China: IEEE, 2010:332-334.
- [3] Newman R. Visible light from a silicon p-n junction [J]. *Phys. Rev.*, 1955, 100(2):700-703.
- [4] Sze S M, Ng Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007:14-15.
- [5] Snyman L W, Aharoni H, du Plessis M, et al. Increased efficiency of silicon light emitting diodes in a standard 1.2 μm complementary metal oxide semiconductor technology [J]. *Opt. Eng.*, 1998, 37(7):2133-2141.
- [6] du Plessis M, Aharoni H, Snyman L W. Two-and multi-terminal CMOS/BiCMOS Si LED's [J]. *Opt. Mater.*, 2005, 27 (5):1059-1063.
- [7] Snyman L W, Aharoni H, du Plessis M, et al. Planar light-emitting electro-optical interfaces in standard silicon complementary metal oxide semiconductor integrated circuitry [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(12):3230-3240.
- [8] Snyman L W, du Plessis M, Aharoni H. Injection-avalanche based n^+pn Si CMOS LED (450~750 nm) with two order increase in light emission intensity [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, 46(4B):2474-2480.
- [9] Lee Hsiuchih, Liu Chengkuang. Si-based current-density-enhanced light emission and low-operating-voltage light-emitting/receiving designs [J]. *Solid-State Electron.*, 2005, 49(7):1172-1178.
- [10] Dong Zan, Wang Wei, Huang Beiju, et al. Low threshold voltage light-emitting diode in silicon-based standard CMOS technology [J]. *Chin. Opt. Lett.* (中国光学快报), 2011, 9(8):082301-1-4 (in English).
- [11] Wang Wei, Huang Beiju, Dong Zan, et al. A low-voltage two-wavelength light emitter in standard CMOS technology

- [C]//7th IEEE International Conference on Group IV Photonics, Beijing, China: IEEE, 2010:111-113.
- [12] Yang Guanghua, Mao Luhong, Huang Chunhong, *et al.* Design and analysis of a forked n-well and p-sub junction Si LED based on standard CMOS technology [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):369-372 (in Chinese).
- [13] Green M A, Zhao J H, Wang A H, *et al.* Efficient silicon light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2001, 412(6849): 805-808.
- [14] Akil N, Kerns S E, Kerns D V, *et al.* A multimechanism model for photon generation by silicon junctions in avalanche breakdown [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, 46(5):1022-1028.
- [15] Tahchi M El, Nassar E, Mialhe P. Study and development of a silicon infrared diode operating under forward bias [J]. *Microelectron. J.*, 2005, 36(3-6):260-263.
- [16] Pavesi L. Silicon-based light sources for silicon integrated circuits [J]. *Advances in Optical Technologies*, 2008, 2008: 416926-1-12.
- [17] Huang Beijiu, Zhang Xu, Wang Wei, *et al.* CMOS monolithic optoelectronic integrated circuit for on-chip optical interconnection [J]. *Opt. Commun.*, 2011, 284(16-17):3924-3927.



欢迎订阅 欢迎投稿 《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,青年科学家曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新能力。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国权威学术期刊(RCCSE)
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省精品期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国 INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PJK)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊	中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊(光盘版)	中国学术期刊综合评价数据库
万方数据系统数字化期刊	中国科学期刊全文数据库
台湾华艺中文电子期刊网	中国光学文献数据库
中国科学引文数据库	中国学术期刊文摘
中国物理文献数据库	中国物理文摘
中国期刊网	

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176855

传 真: (0431)84613409

E-mail: gxjmge@ciomp.ac.cn

gxjmge@vip.sina.com

http://www.eope.net

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 50.00 元/期

帐 户: 中国科学院长春光学
精密机械与物理研究所

银 行: 中行吉林省分行营业部

帐 号: 0000162005506170