

# SiC 光控异质结达林顿晶体管的导通机理\*

蒲红斌 陈治明

(西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

摘要: 利用窄能隙 SiCGe 三元合金, 采用 SiCGe/SiC pn 异质结产生基极光电流方法, 提出了新型 SiC 光控达林顿异质结晶体管功率开关结构, 并用二维数值模拟软件对其导通机理进行了研究. 分析结果表明, SiC 光控异质结达林顿晶体管在近红外区内具有明显光控开关特性, 其饱和导通压降为 4.5 V 左右, 且宜于强光工作.

关键词: SiC; 光控达林顿晶体管; 异质结; 功率开关

EEACC: 4150; 2560P; 2520M

中图分类号: TN32 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0143-04

## 1 引言

随着电子产品的广泛应用, 电磁环境对电子产品安全性和可靠性产生的影响和危害不容忽视. 电磁干扰使常规电子系统性能下降, 以至无法工作的现象时有发生. 采用光电隔离的方式是解决电磁干扰问题的有效途径, 这使人们对研制光控功率开关器件产生了极大兴趣. 虽然硅基光控晶闸管已经研制成功并投入应用多年<sup>[1]</sup>, 但受硅材料本身物理性能的限制, 在高温、高频和大功率应用方面, 硅的局限性日渐明显, 而 SiC 器件却显露出巨大潜力. 随着 6H-, 4H-SiC 体材料相继商品化和外延生长技术的成功应用, 对 SiC 功率开关器件的研究和开发逐渐进入实用化阶段. 2001 年, Ryu 等人<sup>[2]</sup>采用外延发射区和结终端技术实现了阻断电压高达 1800V, 其共发电流增益和通态比电阻分别为 20 倍和  $10.8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  的 SiC 同质结双极晶体管. 目前, 限制 SiC 同质结双极晶体管增益的重要原因是基区的少子寿命扩散系数低, 对器件结构与基区掺杂进行优化设计将有助于器件性能的提高. 而采用异质结发射结, 通过提高发射结的发射效率, 降低基区电阻, 有望实现较高的电流增益. 最近, 美国特拉华大学的 Katulka 等人<sup>[3]</sup>在研究 Ge 离子注入 4H-SiC

形成 SiCGe 三元合金时, 发现其禁带宽度比 4H-SiC 减少 0.1 eV, 并首次报道了 SiC/SiCGe/SiC 结构的 4H-SiC pnp HBT<sup>[4]</sup>.

SiCGe 三元系材料还以其独特的光电特性引起人们的普遍重视. 利用这种合金, Huang 等人<sup>[5]</sup>开发了一种响应波长为  $1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$  的 SiCGe/Si 红外光电探测器, 预示着 SiCGe 材料在光电子领域的应用潜力.

对于近红外区光不敏感 SiC 材料, 为实现光控 SiC 功率开关器件, Bhadri 等人<sup>[6]</sup>提出了用硅光电二极管和 SiC 达林顿晶体管组成复合模块的办法, 这种办法显然不能彻底防止电磁干扰. 我们也曾提出过一种在光敏区和基区采用窄能隙的 SiCGe 材料来实现光控达林顿晶体管的单片集成异质结构<sup>[7]</sup>. 为了简化器件制造工艺, 本文提出一种新颖的仅在光敏区采用窄能隙的 SiCGe 材料的光控达林顿异质结晶体管功率开关结构, 并采用二维数值模拟器 MEDICI<sup>[8]</sup>, 对其导通机理进行了分析和讨论.

## 2 器件结构

图 1 为 SiC 光控达林顿异质结晶体管新结构的示意图, 其中辅助晶体管 T1 的发射极浮空, 右上部主晶体管 T2 发射极和底部集电极构成该器件为两

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60376011)

蒲红斌 男, 1964 年出生, 副教授, 博士研究生, 主要从事新型半导体器件设计与开发. Email: puhongbin@xaut.edu.cn

陈治明 男, 1945 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体材料与电力电子器件研究.

2004-10-27 收到, 2004-11-30 定稿

电极,从而使晶体管 T1 和 T2 形成了达林顿晶体管功率输出单元. 在器件左端,由窄能隙 p-SiCGe 材料与 n-3C-SiC 缓冲层和 n<sup>-</sup>-4H-SiC 集电区构成异质结光敏二极管单元,选用透明材料 ITO 做上电极并与 T1 基极互连. 器件之间采用 SiO<sub>2</sub> 隔离. 光照时,器件左端反偏异质集电结构成的光敏二极管产生的

光电流,途经晶体管 T1 基区为后级的达林顿晶体管功率输出单元提供驱动电流. 由于调整 p-Si<sub>1-x-y</sub>-C<sub>x</sub>Ge<sub>y</sub> 三元合金的 x 和 y 组分值,不但可以改变其禁带宽度,还可以改变其吸收系数,因而能够使人们更加灵活地进行光电器件的设计.

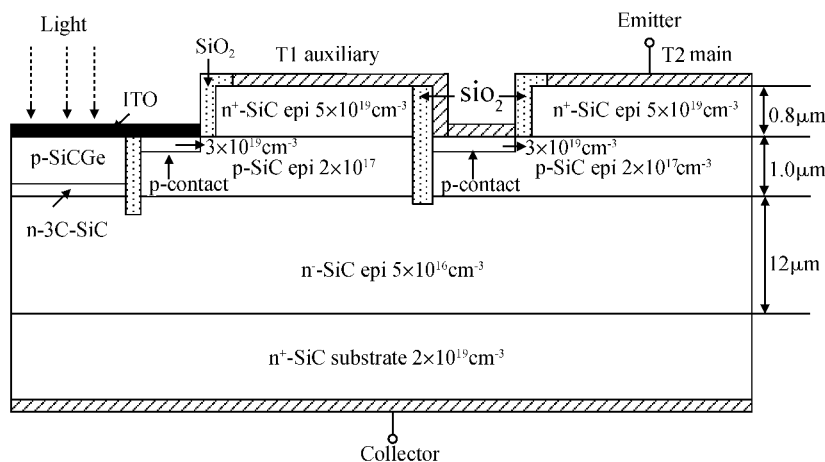


图 1 碳化硅光控达林顿异质结晶体管的结构图

Fig. 1 Structure design of the light activated SiC Darlington transistor

器件的结构参数为:选用在重掺杂 ( $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) SiC 单晶上生长厚度为  $12 \mu\text{m}$  的中等掺杂 ( $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) 的 4H-SiC 外延层为衬底, p-SiC 基区层和 n<sup>+</sup>-SiC 发射区层的结深和掺杂浓度分别为  $1 \mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  和  $0.8 \mu\text{m}$ ,  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . p-SiCGe 层的厚度和掺杂浓度分别为  $0.8 \mu\text{m}$  和  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . n-3C-SiC 缓冲层的厚度和掺杂浓度分别为  $0.2 \mu\text{m}$  和  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . 用 SiO<sub>2</sub> 对  $5 \mu\text{m}$  宽的光敏区和发射极隔离区加以保护.

### 3 器件模拟

采用二维数值模拟软件 MEDICI 4.0 对器件的开关特性进行模拟分析时,选用适当而准确的半导体材料参数和器件模型是获得正确结果的关键. 室温 4H-SiC 的禁带宽度为  $3.26 \text{ eV}$ , 电子和空穴的寿命分别取  $1.5$  和  $0.15 \mu\text{s}$ , 受主和施主的激活能分别为  $0.191$  和  $0.066 \text{ eV}$ <sup>[9]</sup>, 电子和空穴对的产生率采用 Ruff 等人提出的模型<sup>[10]</sup>, 低场迁移率采用修正的 Caughey-Thomas 模型<sup>[11]</sup>. 同时也采用了禁带窄化、碰撞电离、Auger 和 SRH 复合等其他的模型<sup>[8]</sup>. 由于 SiCGe 是新型的三元合金,对其特性的解析模

型报道较少,因而,除禁带宽度和吸收系数外,其他模型均采用类 SiC 的修正模型. Soref<sup>[12]</sup> 的三元合金理论分析表明, SiCGe 材料的禁带宽度是随 C 和 Ge 组分的改变而变化,因此我们进行器件特性模拟时,选取基区 p-SiCGe 材料的禁带宽度为  $1.46 \text{ eV}$ . 吸收系数采用 Macfarlane-Robert 解析表达式<sup>[13]</sup>.

## 4 结果与讨论

### 4.1 通态电流密度分布

图 2 给出了入射光强为  $0.2 \text{ W/cm}^2$ , 集电极外加偏置电压为  $20 \text{ V}$  时,碳化硅光控达林顿异质结晶体管处于通态的电流密度分布,可见器件的通态电流主要由主晶体管的集电极电流承载,而光敏区的光生电流用于维持辅助晶体管导通时的基极电流,经辅助晶体管放大后的光生电流用于维持主晶体管导通时的基极电流.

### 4.2 光控开关电流随激发光强度的变化

光控器件的光电流不仅取决于器件的结构而且取决于光敏材料的性能. 在图 1 所示的器件结构中

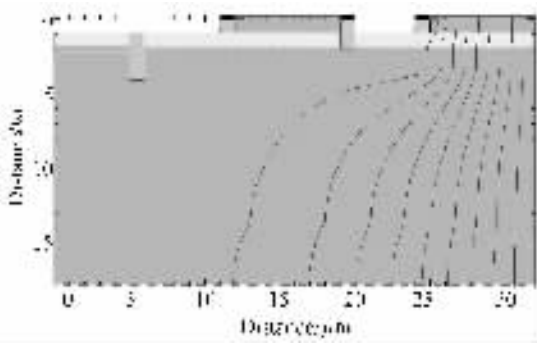


图2 在集电极外加偏置电压  $V_{ce}=20V$  时, SiC 光控达林顿异质结晶体管的通态电流密度分布

Fig. 2 Distributions of current density in the SiC light activated Darlington transistor during on-state for a collector voltage of 20V

选取 p-SiCGe 材料的禁带宽度为  $1.46eV$  时, 在  $V_{ce}$  为  $20V$ , 激发光波长为  $0.85\mu m$  的条件下, 对集电极电流随激发光强度的变化进行了模拟, 模拟结果如图 3 所示. 结果表明该器件具有明显的光开关特性, 当光强  $I > 8.0 \times 10^{-3} W/cm^2$  开始有光电流响应; 弱光区 ( $8 \times 10^{-2} W/cm^2 > I > 8.0 \times 10^{-3} W/cm^2$ ) 响应小; 强光区 ( $I > 8 \times 10^{-2} W/cm^2$ ) 响应大, 可见该器件宜于强光工作, 这一点也可以从图 2 中的电流密度分布加以印证.

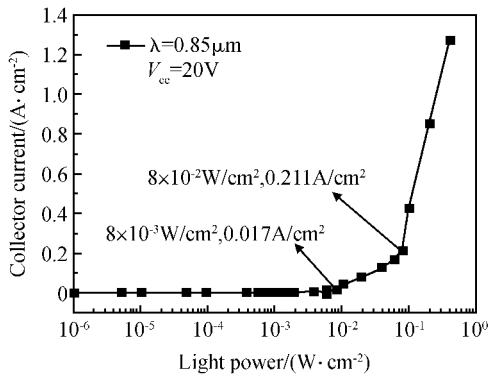


图3 SiC 光控达林顿异质结晶体管的集电极电流随激发光光强的变化

Fig. 3 Photocurrent versus light power for the SiC light activated Darlington transistor

#### 4.3 器件的伏安特性

入射光波长  $\lambda$  取  $0.85\mu m$ , 在无光照和光强分别为  $0.05, 0.10, 0.15$  和  $0.20 W/cm^2$  的条件下, 对器件的  $I-V$  特性进行了模拟, 结果见图 4. 不难发现, 当无光照射时, 无论集电极电压加载与否, 光控器件总处于截止状态; 当有光照时, 光控器件在偏压为零

时, 集电极电流为零; 光控器件在偏压不为零时, 其输出电流比同样光照下光电二极管的输出电流有所放大; 当光控器件进入饱和区时, 其饱和导通压降为  $4.5V$  左右. 可见, 光控器件具有明显的开关特性. 模拟曲线还表明, 在光功率等间距增大的情况下, 输出电流近似等间距增大, 说明电流放大倍数不随光强的变化而变化. 同时, 随着集电极电压的增加, 受基区宽变效应的影响, 集电极电流表现为不饱和.

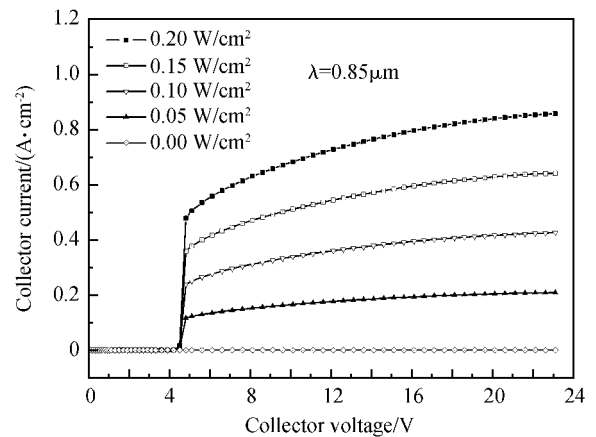


图4 不同光强时, SiC 光控达林顿异质结晶体管的光电流随集电极电压的变化

Fig. 4 Photocurrent versus collector voltage for the SiC light activated Darlington transistor with different light power

## 5 结论

本文用器件模拟的方法, 对新提出的 SiC 光控达林顿异质结晶体管功率开关的导通机理进行了数值分析. 分析结果表明, 该新结构碳化硅光控开关在红外区域内具有明显光控开关特性, 其饱和导通压降为  $4.5V$  左右, 且宜于强光工作. 本工作表明: 如果通过改变  $Si_{1-x-y}C_xGe_y$  三元合金的组分  $x$  和  $y$  能够实现其光能隙在较宽范围内调整, 采用  $Si_{1-x-y}C_xGe_y/SiC$  异质结构必将给光控 SiC 开关器件的灵活设计带来曙光.

#### 参考文献

- [1] Taylor P D. Thyristor design and realization. New York: John Wiley, 1987: 133
- [2] Ryu S H, Agarwal A K, Singh R, et al. 1800V NPN bipolar junction transistors in 4H-SiC. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22(2): 124

- [ 3 ] Katulka G, Guedj C, Kolodzey J, et al. Electrical and optical properties of Ge-implanted 4H-SiC. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(4):540
- [ 4 ] Roe K J, Katulka G, Kolodzey J, et al. Silicon carbide and Silicon carbide; germanium heterostructure bipolar transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(14):2073
- [ 5 ] Huang F Y, Sakamoto K, Wang K L, et al. Epitaxial SiGeC waveguide photodetector grown on Si substrate with response in the 1.3~1.55 $\mu\text{m}$  wavelength range. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(2):665
- [ 6 ] Bhadri P, Sukumaran D, Ye K, et al. Design of smart optically controlled high power switch for fly-by-light applications. *IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Dayton OH USA, 2001:401
- [ 7 ] Chen Zhiming, Pu Hongbin, Beyette F R. A light-activated SiC darlington transistor using SiCGe as base layer. *Chin Phys Lett*, 2003, 20(3):430
- [ 8 ] Palo Alto. MEDICI 4.0 user's manual. CA: TMA Inc, 2001
- [ 9 ] Ikeda M, Matsunami H, Tanaka T. Site effect on the impurity levels in 4H, 6H and 15R SiC. *Phys Rev B*, 1980, 22(6):2842
- [10] Ruff M, Mitlehner H, Helbig R. SiC devices; physics and numerical simulation. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(6):1040
- [11] Schaffer W J, Negley G H, Irvine K G, et al. Conductivity anisotropy in epitaxial 6H and 4H SiC. *Mat Res Soc Symp Proc*, 1994, 339:595
- [12] Soref R A. Optical band gap of the ternary semiconductor  $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ . *J Appl Phys*, 1991, 70(4):2470
- [13] Pankove J I. Optical processes in semiconductors. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971:38

## Turn-On Mechanism of a Light-Activated SiC Heterojunction Darlington HBT\*

Pu Hongbin and Chen Zhiming

(Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A novel light-activated Darlington heterojunction transistor power switch which is made of narrow bandgap ternary SiCGe alloys and SiC is proposed in which SiCGe/SiC pn heterojunction is employed to produce a base current by means of optical illumination. By using two-dimensional numerical simulation, performance of the novel light-activated power switch is simulated. It is shown that the light-activated device has very good switching characteristics for an infrared triggering light, and the forward voltage drop is about 4.5V during condition of saturation turn-on, and the switch is well suited for high light power.

**Key words:** SiC; light-activated Darlington transistor; heterojunction; power switch

**EEACC:** 4150; 2560P; 2520M

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0143-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60376011)

Pu Hongbin male, was born in 1964, associate professor, PhD candidate. He is engaged in research on design and development of new power semiconductor devices. Email: puhongbin@xaut.edu.cn

Chen Zhiming male, was born in 1945, professor. He is engaged in research on semiconductor materials and power semiconductor devices.

Received 27 October 2004, revised manuscript received 30 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics