

基于 MEMS 技术新型硅磁敏三极管负阻-振荡特性*

赵晓锋 温殿忠

(黑龙江大学集成电路重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要: 介绍了一种新型硅磁电负阻-振荡器件——S 型负阻-振荡硅磁敏三极管. 该器件是基于 MEMS 技术在 p 型高阻单晶硅片上制作的具有立体结构的新型磁电转换器件, 采用 KOH 各向异性腐蚀技术实现发射区及引线的制作. 实验结果表明, 集电极电流随外加磁场的变化而变化; 在基极注入电流一定时, 出现集电极电流受外加偏压 V_{CE} 调制的负阻-振荡特性, 且集电极电流振荡随外加磁场而变化. 对该器件负阻-振荡特性的形成机理进行了讨论, 结果表明, 在集电区 n^+ 结和基区与区形成的 p^+ 结均处于反偏条件下, 当区满足雪崩倍增效应产生的条件时, 该磁敏三极管伏-安特性曲线中的 V_{p^+} 偏压相对应的基极注入条件下的集电极电流出现 S 型负阻-振荡特性. 在发射极和基极间的 n^+ 结和 p^+ 结附近存在的大量深能级杂质将对负阻-振荡特性进行调制.

关键词: MEMS; S 型负阻-振荡特性; 硅磁敏三极管; 雪崩倍增效应

PACC: 0710C; 0670M **EEACC:** 2575F; 3120W

中图分类号: TN322 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)06-1214-04

1 引言

从 1952 年埃伯斯(Ebers)提出负阻器件至今已经有五十多年历史. 在这段时间, 负阻器件不断发展, 尤其近年来, 硅光电负阻器件^[1]、高频硅光电负阻器件^[2]等各式各样的负阻器件相继出现, 并在光控领域得到了广泛地应用.

对于磁敏器件来说, 二十世纪七十年代出现了硅磁敏二极管的 S 型负阻现象^[3], 并由俄罗斯传感技术专家卓托夫教授制作了“Z 器件”, 而磁敏三极管的负阻现象未见报道. 2003 年 4 月黑龙江大学敏感技术研究所采用 MEMS 技术制作的新型立体结构的硅磁敏三极管出现负阻-振荡现象. 该器件不仅对磁场敏感, 在基极注入电流一定时, 还出现集电极电流受外加偏压 V_{CE} 调制的负阻-振荡特性, 且集电极电流的负阻-振荡特性随外加磁场而变化, 属于电流振荡器件, 在磁控领域有广泛应用. 在此基础上, 本文阐述了具有 S 型负阻-振荡特性的新型硅磁敏三极管的基本结构、工艺流程、基本特性, 并讨论了

负阻-振荡特性的形成机理.

2 新型硅磁敏三极管基本结构和制作工艺

2.1 硅磁敏三极管基本结构

图 1 给出了采用 MEMS 技术在型(即弱 p 型、电阻率 $100 \Omega \cdot \text{cm}$)的高阻单晶硅片表面制作具有矩形板状立体结构的 n^+pn^+ 型硅磁敏三极管的基本结构示意图. 要实现这种立体结构, 必须预先在硅片的下表面刻蚀发射区窗口^[4,5], 然后采用 KOH 硅各向异性腐蚀技术在硅片上腐蚀出硅膜厚为 $30\mu\text{m}$ 左右的硅杯, 接着在硅膜的上表面刻蚀集电区窗口, 再进行集电区、发射区浓磷扩散. 之后在硅杯的上表面刻蚀基区并进行浓硼扩散. 最后在硅杯上、下表面制作发射极、集电极和基极. 如图 1 所示, d 为高阻硅单晶经各向异性腐蚀后的硅膜厚度, $d = 30\mu\text{m}$; L 为基区与集电区之间距离; W 为发射区与集电区之间宽度且 $W > L_D$ (L_D 为载流子扩散长度); SiO_2 层厚度为 600nm , Si_3N_4 层厚度为

*国家自然科学基金资助项目(批准号:60076027)

赵晓锋 男, 1980 年出生, 助教, 博士研究生, 主要从事传感器 MEMS 研究.

温殿忠 男, 1949 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事传感器 MEMS 研究.

2004-08-14 收到, 2004-12-28 定稿

200nm.

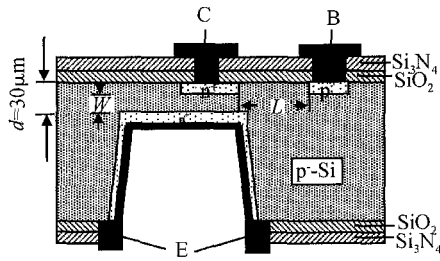


图 1 新型硅磁敏三极管剖面图

Fig.1 Cross-section of new type silicon magnetic sensitive transistor

2.2 硅磁敏三极管制作工艺

采用 MEMS 技术在高阻单晶硅片表面制作新型硅磁敏三极管,图 2 给出了硅磁敏三极管工艺流程示意图.图中,型高阻单晶硅片必须是硅片双面抛光,精确记录硅片厚度.采用 KOH 硅各向异性腐蚀技术,确保硅磁敏三极管发射区的实现,再利用美国 M-1 型双面红外透射光刻机实现发射区和集电区的对准^[6].

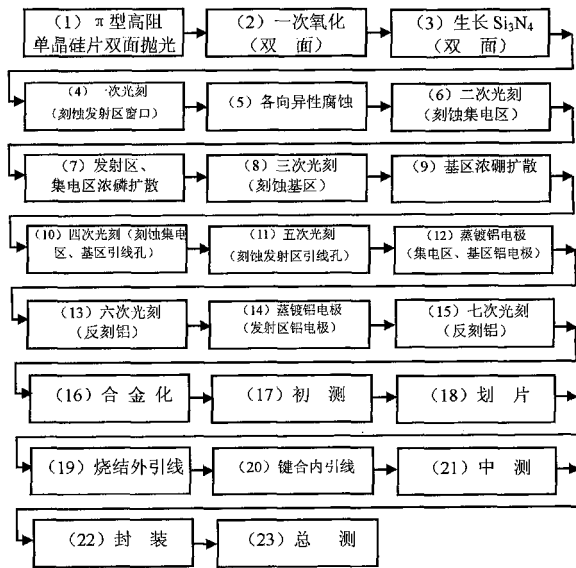


图 2 新型硅磁敏三极管工艺流程图

Fig.2 Process of new type silicon magnetic sensitive transistor

3 新型硅磁敏三极管负阻-振荡特性

图 3 给出了新型硅磁敏三极管在 BJ-4814 半导体特性图示仪上测出的负阻-振荡特性.图中, V_{CE}

为硅磁敏三极管发射极与集电极偏置电压,1V/div; I_C 为硅磁敏三极管集电极电流,1mA/div;基极注入电流 2mA/div.图 3 中所给出的硅磁敏三极管负阻特性曲线分别为磁场等于 0, - 0.1, + 0.1T 时,负阻特性曲线变化情况.从图 3 中可以看出,硅磁敏三极管负阻特性曲线在 B 不同时具有如下特点:

- (1) 硅磁敏三极管负阻特性曲线具有三极管 $I-V$ 曲线的基本特点,即在 V_{CE} 作用下,不同的基极电流 I_B 注入对应不同的集电极电流 I_C .
- (2) 硅磁敏三极管负阻特性曲线属于 S 型负阻特性曲线.
- (3) 硅磁敏三极管负阻特性曲线随基极电流不同而有相应的变化.当基极电流 $I_B = 1\text{mA}$, $V_{CE} > 6\text{V}$ 时,集电极电流出现明显的负阻现象并有电流振荡出现.
- (4) 硅磁敏三极管负阻特性曲线随磁场变化而变化:当 $B = - 0.1\text{T}$ 时,集电极电流 I_C 略有增加,负阻振荡稍有加强;当 $B = + 0.1\text{T}$ 时, I_C 减小,且 $I_B = 1\text{mA}$ 时负阻振荡减弱;当磁场再增加时, I_C 大幅度减小,特性趋向扁平,负阻振荡基本消失.

综合上述负阻特性曲线随磁场变化这一现象说明该三极管对磁场是敏感的,完全具有磁敏三极管 $I-V$ 特性曲线的特点,故将该磁敏器件负阻特性曲线称为“硅磁敏三极管负阻-振荡特性曲线”.

4 新型硅磁敏三极管负阻-振荡特性机理

硅磁敏三极管是一种结型磁电转换器件,本文围绕器件结构模型和实验测试结果对新型硅磁敏三极管负阻-振荡特性机理进行讨论.

4.1 C-B 长基区二极管雪崩倍增效应^[7]

图 4 给出了新型硅磁敏三极管基本结构模型,其中集电极和基极间结构相当于一个 C-B 长基区的硅磁敏二极管,当在集电极与基极之间加直流反偏电压 V_{CB} ($V_C > V_B$) 时,在 BJ-4814 型半导体图示仪上测出 C-B 长基区二极管在磁场 $B = 0, B = - 0.1\text{T}, B = + 0.1\text{T}$ 时外加偏压 V_{CB} 与 I_{CB} 伏安特性,且当反向偏压 V_{CB} 足够高时,具有电流负阻特性,如图 5 所示,其中 V_{CB} 为硅磁敏三极管集电极与基极偏压,2V/div; I_{CB} 为硅磁敏二极管电流,2mA/div.

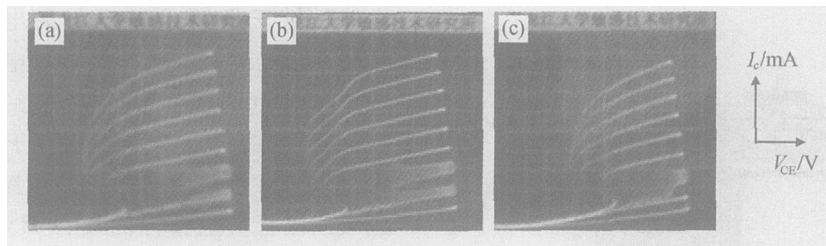


图 3 新型硅磁敏三极管负阻-振荡特性测试结果 (a) $B=0$; (b) $B=-0.1\text{ T}$; (c) $B=+0.1\text{ T}$

Fig. 3 Test result of negative-resistance oscillations characteristics of new type silicon magnetic sensitive transistor (a) $B=0$; (b) $B=-0.1\text{ T}$; (c) $B=+0.1\text{ T}$

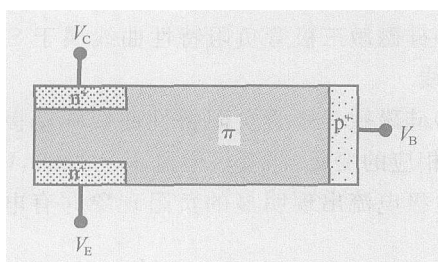


图 4 新型硅磁敏三极管基本结构模型

Fig. 4 Basic structure model of new type silicon magnetic sensitive transistor

上述负阻特性的机理是当 V_{CB} 反偏且较高时, 集电区 n^+ 结和基区与 π 区形成的 p^+ 结均处于反偏条件下, 使 n^+ 结和 p^+ 结势垒区的电场很强; 在电场力的作用下, 通过势垒区获得高能量的载流子与晶格原子碰撞, 在 π 区发生了雪崩倍增效应, 造成电流 I_{CB} 猛增的负阻特性, 从而使新型硅磁敏三极管伏-安特性曲线中的 V_{p^+} 偏压相对应的基极注入条件下的集电极电流出现 S 型负阻-振荡特性。

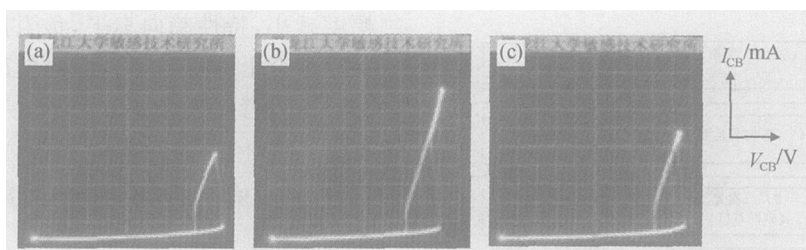


图 5 C-B 长基区硅磁敏二极管负阻特性测试结果 (a) $B=0$; (b) $B=-0.1\text{ T}$; (c) $B=+0.1\text{ T}$

Fig. 5 Test result of negative resistance characteristics of C-B long-base silicon magnetic sensitive diode (a) $B=0$; (b) $B=-0.1\text{ T}$; (c) $B=+0.1\text{ T}$

4.2 深能级杂质对负阻-振荡特性的调制^[8]

由新型硅磁敏三极管制作工艺(图 2)和基本结构模型(图 4)可知,发射极和基极间结构相当于一个 E-B 长基区的硅磁敏二极管.在 n^+ 结和 p^+ 结附近存在大量的深能级杂质,形成大密度的俘获中心,使由 n^+ 区注入的电子和由 p^+ 区注入的空穴被结附近的俘获中心所俘获,从而使通过 π 区的电流密度显得小.因为在 π 区非平衡载流子少,外加偏压的大部分都降落在 π 区.因此,在外加偏压较大范围内通过 π 区的电流小且曲线很平坦.当外加偏压进一步增大,逐渐使俘获中心填满,待俘获中心完全填满时电流很快增加.由于 π 区的空间电荷效应调

制 π 区的电导率,使得 π 区的偏压在突然下降的同时结偏压突然增加,进一步促进了对 π 区电导率的调制作用,结果产生外加偏压突然跌落的同时电流猛增的负阻现象.对硅磁敏三极管负阻-振荡特性进行调制.

5 结论

本文给出了一种新型磁电负阻-振荡器件,该器件既具有磁敏特性,又具有负阻-振荡特性.实验测试结果表明,在基极注入电流一定时,出现集电极电流受外加偏压调制的负阻-振荡特性,且集电极振荡随外加磁场而变化.结合器件的结构和测试特性进

行讨论,给出新型硅磁敏三极管负阻特性产生机理是反向偏压足够高时,集电区 n^+ 结和基区与 n^+ 区形成的 p^+ 结均处于反偏条件下,在 n^+ 区发生雪崩倍增效应,出现电流负阻特性.结果在新型硅磁敏三极管伏-安特性曲线中,与 p^+ 结偏压 V_{p^+} 相对应的基极注入条件下的集电极电流出现 S 型负阻-振荡特性.同时,在发射极和基极间的 n^+ 结和 p^+ 结附近存在的大量深能级杂质将对负阻-振荡特性进行调制.

参考文献

- [1] Li Dan, Li Shurong, Xia Kejun, et al. A novel silicon photoelectric negative resistance device. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(10): 1078 (in Chinese) [李丹, 李树荣, 夏克军, 等. 一种新型结构的光电负阻器件. 半导体学报, 2003, 24(10): 1078]
- [2] Zhu Shengli, Yao Suying, Zheng Yunguang, et al. Characteristic simulation and test analyses of darlington photo-lambda bipolar transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(5): 573 (in Chinese) [朱胜利, 姚素英, 郑云光, 等. 新型高频硅光电负阻器件的特性模拟及测试分析. 半导体学报, 2004, 25(5): 573]
- [3] Wen Dianzhong, Huang Dexing, Zhang Xiqin, et al. Magnetic sensitive device and magnetic sensor. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2003: 150 (in Chinese) [温殿忠, 黄得星, 张喜勤, 等. 磁敏感元器件与磁传感器. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 2003: 150]
- [4] Wen Dianzhong, Mu Changsheng, Zhao Xiaofeng. Adopt MEMS techniques make magnetic sensitive silicon transistor. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(5): 49 (in Chinese) [温殿忠, 穆长生, 赵晓峰. 采用 MEMS 技术制造硅磁敏三极管. 传感器技术, 2001, 20(5): 49]
- [5] Wen Dianzhong. Study on laser etching emitter region-groove approach of magnetic-sensitive silicon transistor. Chinese J Lasers, 2003, 30(5): 454 (in Chinese) [温殿忠. 激光刻蚀硅磁敏三极管发射区引线槽的研究. 中国激光, 2003, 30(5): 454]
- [6] Wen Dianzhong. Study on Ar-ion laser enhanced isotropic etching rate of Si. Chinese J Lasers, 1995, A22(3): 202 (in Chinese) [温殿忠. Ar 离子激光增强硅各向异性腐蚀速率的研究. 中国激光, 1995, A22(3): 202]
- [7] Sze S M. Modern semiconductor device physics. John Wiley & Sons, Inc, 1998: 343
- [8] Wen Dianzhong. Negative-resistance characteristics studies in silicon double injection $p^+ n^+$ magnetic-device. ISTC, 2001: 301

Negative-Resistance Oscillations Characteristics of a New Type Silicon Magnetic Sensitive Transistor on MEMS*

Zhao Xiaofeng and Wen Dianzhong

(Key Laboratory of Integrated Circuits, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: A new-type silicon magneto-electric negative-resistance oscillations device, S-type negative resistance oscillating silicon magnetic-sensitive transistor, is presented. It is fabricated on face of the p-type silicon with a high resistivity adopting MEMS techniques. It has rectangular structure and is a new-type magneto-electric transform device. Emitter region-groove manufactured by utilizing KOH anisotropic etching techniques. Experiment result shows that the collector current I_c varies with magnetic field; when the base injection current is constant, negative-resistance oscillations characteristics are mediated by biased voltage; oscillation of I_c varies with changing magnetic field. Further discuss on the principle of negative-resistance oscillations shows, in case of collector n^+ junction and p^+ formed between base and n^+ regions being biased, and an avalanche multiplication effect occurring in the n^+ region, base injection occurs corresponding to V_{p^+} biased voltage in the $V-I$ curve of the magnetic-sensitive transistor and the collector current shows S-type negative resistance oscillations characteristics.

Key words: MEMS; negative-resistance oscillations characteristics; silicon magnetic sensitive transistor; avalanche multiplication effect

PACC: 0710C; 0670M **EEACC:** 2575F; 3120W

Article ID: 0253-4177(2005)06-1214-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60076027)

Zhao Xiaofeng male, was born in 1980, PhD candidate. His research interesting is sensors and MEMS.

Wen Dianzhong male, was born in 1949, professor. His research interesting is sensors and MEMS.

Received 14 August 2004, revised manuscript received 28 December 2004