

掺锰硅材料的电流振荡特性*

陈朝阳^{1,†} 巴维真¹ 张 建¹ 丛秀云¹ Bakhadyrkhanov M K² Zikrillaev N F²

(1 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 乌兹别克斯坦国立技术大学, 塔什干 700095)

摘要: 用高温扩散方法制备出补偿 Si (B, Mn) 材料, 并研究了这种材料的电流振荡参数与光照和电场之间的关系. 结果表明: 在一定光照和电场范围内 (276 ~ 305 V/cm), 电阻率为 $10^4 \cdot \text{cm}$ 的材料在液氮温度下显示出电流振荡特性; 在一定的电场下, 电流振荡波形是固定的, 不随时间变化; 振荡频率随光照强度的增大而线性增大; 调制系数随着光强的增强而减弱; 振荡的最大值随着光照强度增大而减小, 最小值随着光强增大而缓慢增大.

关键词: 硅; 掺杂; 补偿; 电流振荡

PACC: 7300; 7280; 8120C

中图分类号: TN304.1[†]2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)09-1582-04

1 引言

近年来, 我们在单晶硅材料中扩散掺杂不同的杂质, 得到了常温下的热敏材料^[1~5], 但是对这种材料在低温下的特性研究却涉及不多. Bakhadyrkhanov 等人^[6~8]对单晶硅进行了高温扩散掺杂, 在得到的材料中发现了电流振荡现象, 即在一定的条件下, 材料在直流电路中产生电流周期性变化的现象, 这一现象在开发新型的振荡器方面有潜在的应用前景. 但是, 这些工作未系统研究振荡基本参数 (频率、振幅、调制系数) 的动态变化, 以及振荡参数随外界光照和电场强度变化的规律. 本文通过高温扩散的方法制备出高补偿的单晶硅材料 Si (B, Mn), 并比较系统地研究了该材料的电流振荡现象及其参数随光照和电场强度变化的规律.

2 实验

实验用的原始材料是晶向为 [111], 电阻率为 $10^4 \cdot \text{cm}$ 的 p 型单晶硅片, 对其进行了锰掺杂. 锰掺杂是在高真空 ($1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$) 的石英管中, 用高温经气相扩散方法进行. 选择不同的扩散时间和温度, 使锰在样品中均匀扩散, 得到 300 K 下的电阻率为 $10^2 \sim 10^5 \cdot \text{cm}$ 的 p 型硅材料样品. 扩散的温度稳定在 ± 1 的精度. 扩散后样品经过机械加工和化学清洗. 在扩散前后都用霍尔效应方法测定了样品的基本电学参数 (电阻率、迁移率等), 样品的尺寸

为 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$.

Si (B, Mn) 样品中的振荡是在液氮温度下外加直流电压的方法进行的. 测试电路如图 1 所示. 样品和一个 1000 Ω 电阻 R 串联在电路中, U 为 500V 直流电源, 用示波器检测电阻 R 上电压振荡波形, 用电压表 V 实时监测电阻 R 上的电压变化, Keithley 619 静电计测量电阻 R 两端电压, 经 IEE 488 接口与微机相连, 由自编的控制采集程序对测量的电压数据进行采集. 数据经过处理后, 得到电路中电流随时间变化的波形, 即振荡电流波形. 选择足够多的样品 (约 15 ~ 20) 进行了研究, 得到可靠和可重复的结果.

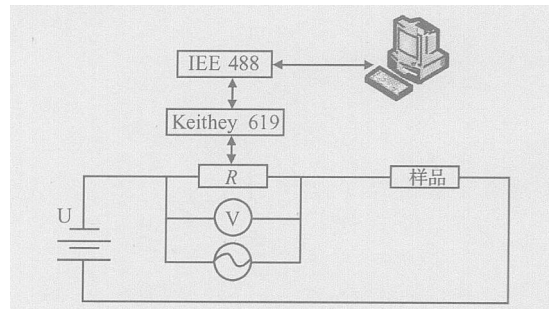


图 1 材料电流振荡特性测试电路框图

Fig. 1 Measurement circuit of material current oscillation properties

3 结果与讨论

图 2 显示了电阻率为 $10^4 \cdot \text{cm}$ 的 p 型 Si

* 中国科学院“西部之光”和乌鲁木齐市科技攻关计划 (批准号: G041202) 资助项目

† 通信作者. Email: czy @ms. xjb. ac. cn

(B, Mn) 样品 (扩散温度为 1200 °C, 扩散时间 1h) 在不同光照强度下产生的电流振荡的典型形状. 从图中看到, 振荡具有稳定和确定的波形. 如果温度保持恒定, 则观测到的振荡波形是稳定的, 不随时间变化. 应该指出, Si (B, Mn) 中的电流振荡激发于足够低水平的光照下 ($L_0 = 10^{-3}$ lux). 实验中光照强度是用硅光电池元件测量的. 由此, 通过改变光照强度, 振荡波形可从突变形向准调谐形转变.

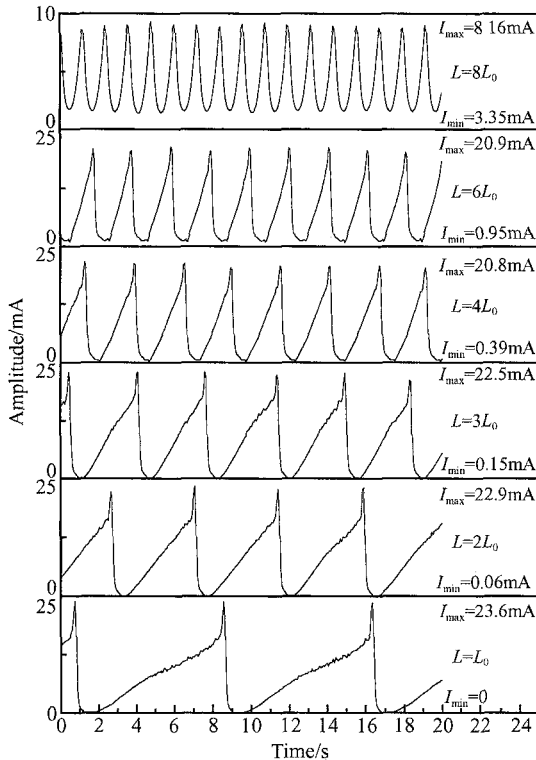


图 2 在 $E = 160\text{V/cm}$ 和不同光照强度下 Si (B, Mn) 中的振荡波形

Fig. 2 Oscillation waves of Si (B, Mn) at $E = 160\text{V/cm}$ and different light densities

图 3 显示了不同电场值下电流振荡频率对光照强度的依赖性, 可以看到, 振荡频率随光强的增大而线性增大, 可写为以下形式:

$$f = f_0 \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (1)$$

其中 L_0 是激发振荡所需的最小光强; f_0 为该光强下的振荡频率; L 是光照强度; f 是系数. 实验研究表明, f 的值依赖于电场大小, 并随后者增大而增大. 由此, 确定出了 E 在 $276 \sim 305\text{V/cm}$ 范围变化时, f 的值在 $0.95 \sim 1.15$ 之间变化. 因此可以确定, 光强的变化能够在一定范围控制振荡的频率. 正如本工作的实验所显示, 激发振荡的热力学条件的变化能够在 $0.01 \sim 10\text{Hz}$ 范围改变振荡频率. 我们从文献 [6, 7] 得知, 频率与光强之间通常不发生这种明显的关联.

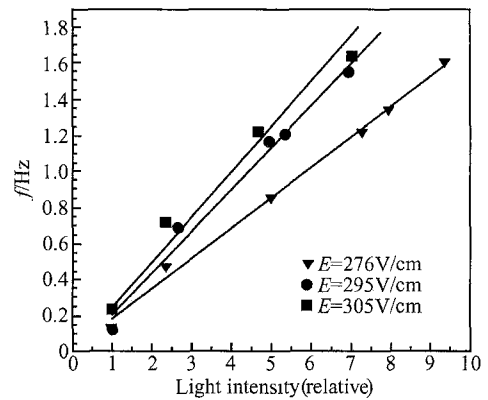


图 3 不同电场下振荡频率对光照强度的依赖关系

Fig. 3 Oscillation frequency versus light intensity at different electronic fields

振荡的基本参数之一是调制系数 K , $K = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}$, 其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是振荡电流的最大值 (振荡波形的最大电流值) 和最小值 (振荡波形的最小电流值). K 不仅代表振荡的稳定性和波形, 而且给出它与噪声谱的区别. 图 4 显示了 K 随光强变化的关系, K 随光强的变化可分为三个区间. 第一区间为低水平光照 ($L/L_0 = 1 \sim 3$), K 的值为 $100\% \sim 97.5\%$; 第 2 区间, $L/L_0 = 3 \sim 5$, K 缓慢减小, 其值为 $K = 97.5\% \sim 90\%$; 在第三区间, $L/L_0 > 5$, 观察到 K 值显著减小至 68% . 从图中看到, 在三个区间 K 值都随电场的增大而减小.

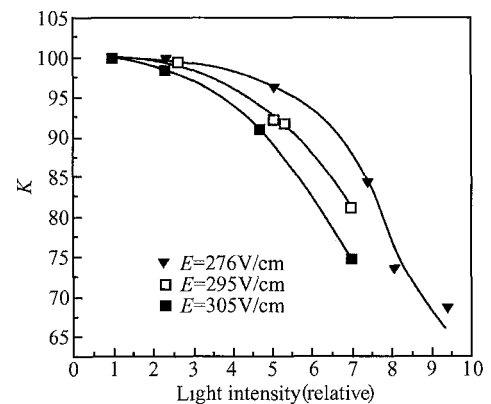


图 4 振荡波形的调制系数对光照强度的依赖关系

Fig. 4 K versus light intensity

图 5 给出振荡幅度随光强变化的依赖关系. 在低强度光照区间 ($L/L_0 = 1.5 \sim 3$), 电流振荡的最大值 I_{\max} 随光强的增大比初始值减小 $15\% \sim 25\%$; 光强进一步增大时 ($L/L_0 = 3 \sim 8$), I_{\max} 缓慢减小; 当 $L/L_0 > 8$ 时, 振荡幅度趋于稳定, 变化很小. 而电流振荡的最小值 I_{\min} (振荡波形的最小电流值) 在整个区间都缓慢增大. 正如图中所示, 在低光强区间, 电场对振荡幅度的影响更加显著一些.

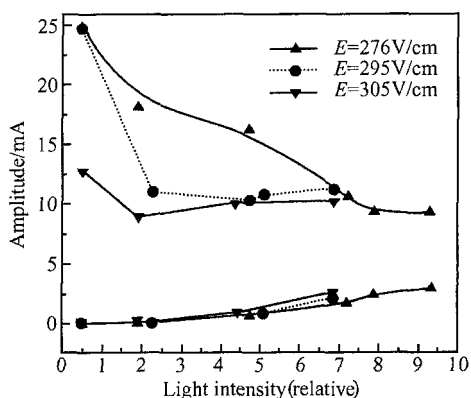


图 5 电流振荡的幅度(极大值和极小值)随光强的变化
Fig. 5 Oscillation amplitude versus light intensity

图 6 给出了电场对振荡频率的影响. 随着电场的增大, 振荡频率大致以线性规律增大, 这样的关系在不同的光照强度下发生. 由此可将频率随电场值变化的关系写为如下形式:

$$f = f_0 \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (2)$$

系数 f_0 的值大致上不依赖于光强, 约为 1.35. 这表明 Si (B, Mn) 样品的振荡频率可用电场来控制, 而振荡波形基本上不变化.

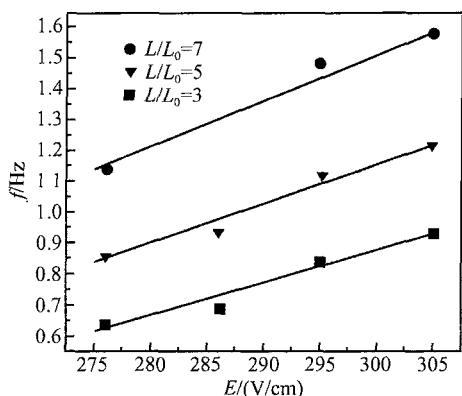


图 6 振荡频率对电场的依赖关系
Fig. 6 Oscillation frequency versus electronic field

我们还研究了样品几何尺寸对振荡参数变化规律性的影响. 样品的尺寸从 10mm × 4mm × 1.5mm 至 2mm × 1mm × 0.6mm 之间改变. 研究结果显示, 上述规律性对几何尺寸、欧姆接触形式和样品的表面加工方法无关, 仅决定于样品的电学参数和激发振荡的温度.

4 结论

通过高温扩散的方法得到一种高阻的硅材料, 研究了这种材料的电流振荡特性, 结果表明: (1) 在

一定光照和电场范围内 (276 ~ 305 V/cm), 电阻率为 $10^4 \cdot \text{cm}$ 的材料在液氮温度下显示出电流振荡特性; (2) 在一定的电场和光强下, 电流振荡波形是固定和恒定的, 不随时间变化; (3) 振荡频率和光照的依赖关系可以表示为: $f = f_0 (L/L_0)$; (4) 调制系数 K 随着光强的增强而减弱; (5) 振荡的最大值 I_{max} 随着光照强度增大而减小, 最小值随着光强增大而缓慢增大.

对于所观测的这些实验现象目前还没有合理的理论解释, 有待于将来进一步的工作加以解决.

参考文献

- [1] Zhang Jian, Ba Weizhen, Chen Zhaoyang, et al. Highly compensated Si: resistivity-temperature characteristic. *Electronic Components & Materials*, 2004, 23 (4): 19 (in Chinese) [张建, 巴维真, 陈朝阳, 等. 高补偿硅的阻-温特性. *电子元件与材料* 2004, 23 (4): 19]
- [2] Zhang Jian, Ba Weizhen, Chen Zhaoyang, et al. Compensated silicon: thermal-sensitive characteristic. *Electronic Components & Materials*, 2004, 23 (5): 24 (in Chinese) [张建, 巴维真, 陈朝阳, 等. 补偿硅的温度敏感特性. *电子元件与材料*, 2004, 23 (5): 24]
- [3] Zhang Jian, Ba Weizhen, Chen Zhaoyang, et al. The effect of Mn doping on the thermal sensitive characteristics of different Si materials. *Electronic Components & Materials*, 2004, 23 (6): 23 (in Chinese) [张建, 巴维真, 陈朝阳, 等. 掺锰对不同导电类型硅材料热敏特性的影响. *电子元件与材料*, 2004, 23 (6): 23]
- [4] Cai Zhijun, Ba Weizhen, Chen Zhaoyang, et al. Compensation characteristics of deep energy level impurity Zn to n-type silicon. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26 (6): 1140 (in Chinese) [蔡志军, 巴维真, 陈朝阳, 等. 深能级杂质 Zn 对 n 型硅半导体的补偿特性. *半导体学报*, 2005, 26 (6): 1140]
- [5] Cai Zhijun, Ba Weizhen, Chen Zhaoyang, et al. Compensation study of Zn doped n-type silicon materials. *Electronic Components & Materials*, 2005, 24 (6): 24 (in Chinese) [蔡志军, 巴维真, 陈朝阳, 等. Zn 掺杂 n 型硅材料的补偿研究. *电子元件与材料*, 2005, 24 (6): 24]
- [6] Bakhadyrkanov M K, Azimkhuzhaev Kh, Zikrillaev N F, et al. Control of the excitation conditions and the parameters of self-sustained oscillations of current in compensated silicon doped with manganese. *Semiconductors*, 2000, 34 (2): 171
- [7] Bakhadyrkanov M K, Khamidov A, Iliev Kh M. Excitation of recombination waves in silicon compensated with manganese at mono-axis elastic deformation. *Physics and Techniques of Semiconductor*, 1991, 25 (10): 1731 (in Russian) [. . . , 1991, 25 (10): 1731]
- [8] Bakhadyrkanov M K, Kurbanova U K. Recombination waves in sulphur doped silicon. *Physics and Techniques of Semiconductor*, 1994, 28 (8): 1305 (in Russian) [. . . , 1994, 28 (8): 1305]

Current Oscillation Properties of Manganese-Doped Silicon Materials^{*}

Chen Zhaoyang^{1,†}, Ba Weizhen¹, Zhang Jian¹, Cong Xiuyun¹,
Bakhadyrkhanov M K², and Zikrillaev N F²

(1 *Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

(2 *Tashkent State Technical University, Tashkent 700095, Uzbekistan*)

Abstract : Compensated material Si (B, Mn) is prepared by high temperature diffusion. The relation between the current oscillation parameters of this material and light intensity and electric field is studied. The experiment shows that : (1) In certain light intensity and electric field ranges (145 ~ 305V/cm) the material Si (B, Mn) with a resistivity of $10^4 \cdot \text{cm}$ exhibits a current oscillation phenomenon at liquid nitrogen temperature; (2) At a certain electric field, the waveform of the current oscillation is stable and does not change with time; (3) The dependence relation between the oscillation frequency and light-intensity can be expressed by $f = f_0 (L / L_0)$ where L_0 is the minimum light-intensity needed to stimulate oscillation, f_0 is the frequency under L_0 , L is the intensity of the light, and is a coefficient that increase with electric field; (4) The modulating coefficient K ($K = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}$) decreases as the light increases; (5) The maximum value of the oscillation I_{\max} decreases with the increase of the light-intensity while the minimum value of oscillation I_{\min} increases slowly.

Key words : silicon; diffusion; compensation; current oscillation

PACC : 7300; 7280; 8120C

Article ID : 0253-4177(2006)09-1582-04

^{*} Project supported by the West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences and the Key Technologies Research and Development Program of Urumqi (No. 04650102005001)

[†] Corresponding author. Email : czy @ms. xjb. ac. cn