

研究快报

硅中 $E_c - 0.18 \text{ eV}$ 铜能级的单轴应力 深能级瞬态谱研究*

姚秀琛 王雷 陈开茅

(北京大学物理系)

秦国刚

(中国高等科学技术中心(世界实验室),北京大学物理系**)

1988年8月1日收到

首次用单轴应力下的深能级瞬态谱法研究了N型直拉硅中与铜有关的主要深能级 $E_c - 0.18 \text{ eV}$ 。由实验结果推断,这个能级对应于硅中两个不同的铜中心,其深能级的激活能十分接近,单轴应力使偶然简并解除从而将它们分开。

主题词: 硅, 深中心, 铜

由于铜,与其它 $3d$ 过渡族元素相比,在硅中具有最大的扩散系数和相当大的溶解度等原因,人们对它在硅中的行为进行了广泛的研究^[1-16]。但是,关于硅中铜的深能级至今没有一致的结果,各个实验室用各种不同的实验技术测得的参数有相当大的分散性^[14]。部份本文作者最近比较系统地用深能级瞬态谱法(DLTS)研究了硅中铜的深能级^[12-13]。本文则是用单轴应力深能级瞬态谱(USDLTS)详细研究了硅中铜的主要的电子陷阱能级 $E_c - 0.18 \text{ eV}$,发现它实际上对应于两个不同的铜中心。

样品取自N型掺磷直拉硅,电阻率为 $2-4 \Omega\text{-cm}$ 。用X射线定向切出 $0.5 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$ 的样片,使其长边分别平行于 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 晶向。样片清洗后将纯度高于99.999%的金属铜蒸镀在样片表面上,在高纯氮气保护下 820°C 扩散1小时,然后快速淬火至室温。将样品的一个 $5 \times 7 \text{ mm}^2$ 表面抛光,清洗后蒸金制成肖特基势垒二极管。由C-V法测定样品的载流子浓度为 $2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 左右。

用DLTS法在扩铜的N型肖特基样品中检测到一个与铜有关的主要能级 $E_c - 0.18 \text{ eV}$,记为 $E(0.18)$,见图1。在DLTS测量中对样品施加不同方向的单轴应力,所得的USDLTS谱见图2。当样品受到沿 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向的单轴应力时, $E(0.18)$ 谱峰都可分裂成两个峰(记为 E_L 和 E_H),其高度比近似为2:1,两峰高度之和约等于未分裂的峰高。表1给出分裂后这两个能级 E_L 和 E_H 的激活能随压力变化的压力系数及 $E(0.18)$

* 国家自然科学基金资助项目。

** 通讯地址。

能级分裂的压力系数。

图 2(b) 中的虚线是在其它条件不变只是把注入脉冲宽度 (τ_d) 从实线对应的 1 ms 减小到 0.5 μ s 时得到的。和饱和注入的情况(实线)相比, E_L 几乎完全消失, 而 E_H 高度只降低约 50%。这表示 E_L 和 E_H 两能级的电子俘获截面相差较大。

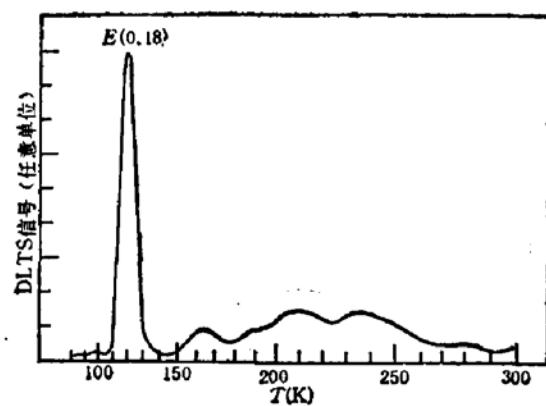


图 1 NCZSi: Cu 样品的
DLTS 谱 $V_R = -8V$,
 $V_P = 7.5V$, 脉宽: 1ms,
 $\epsilon_m = 866 \text{ s}^{-1}$

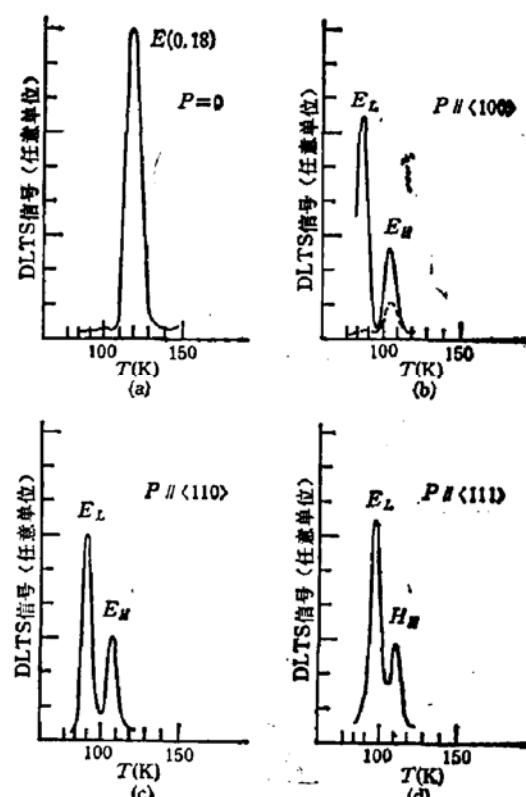


图 2 NCZSi 中铜中心 $E(0.18)$ 的 USDLTS 谱
 $V_R = -8V$, $V_P = 7.5V$, 脉宽: 1 ms, $\epsilon_m = 866 \text{ s}^{-1}$. (a) $P = 0$. (b) $P = 5.7 \text{ Kbar}$ 沿 $<100>$ 晶向。
对于虚线, 脉宽为 0.5 μs . (c) $P = 11.5 \text{ Kbar}$ 沿
 $<110>$ 晶向. (d) $P = 12.5 \text{ Kbar}$ 沿 $<111>$ 晶向且
 $\epsilon_m = 54 \text{ s}^{-1}$

表 I E_L 和 E_H 能级激活能变化的压力系数 $C(E_L)$ 、 $C(E_H)$ 及 $E(0.18)$
能级分裂的压力系数 S .

| 应力方向 | $C(E_L)$ (meV/Kbar) | $C(E_H)$ (meV/Kbar) | S (meV/Kbar) |
|--------------|---------------------|---------------------|----------------|
| $P // <100>$ | -13.2 | -4.4 | 8.8 |
| $P // <110>$ | -6.6 | -5.5 | 1.1 |
| $P // <111>$ | -1.0 | 1.1 | 2.1 |

Kaplyanskii^[17] 的压力谱理论给出了立方晶体中各种非立方中心在单轴应力下取向简并解除时谱线的分裂情况。我们可以根据深中心的 USDLTS 谱及该理论分析深中心的对称性。对于本文研究的 $E(0.18)$ 能级, 在 Kaplyanskii 的理论中找不到与其 USDLTS 谱对应的中心类型, 说明 $E(0.18)$ 谱峰在压力下的分裂不是非立方中心取向简并解除造成的。我们认为, 这一分裂也不可能是由杂质缺陷的基态简并能级的分裂所致。因为: (1) 如果基态简并, 在不同方向施加应力时, 杂质缺陷的基态能级简并解除情况不会是完全一样的, 例如分裂谱峰的数目和峰高比不会完全相同。(2) 同样晶向的不同样品, 在施加相同的应力时, 分裂的双峰的高度比略有差别, 超过了 DLTS 测量的误差范围。如果是基态简并, 则不应有这种差别。

我们认为观察到的 $E(0.18)$ 的分裂图象可解释如下：有两个深中心的激活能在实验的温度范围内很接近，都在 0.18 eV 左右，因而两者的谱峰重叠在一起。在单轴应力作用下，由于两个深中心激活能变化的压力系数不同，原来叠在一起的两个谱峰因移动程度不同而错开，分裂成两个峰，其高度比对应于两种深中心的浓度比。关于 $E(0.18)$ 的这个看法可以解释前面提到的一些实验现象。例如，同是沿 $\langle 100 \rangle$ 加压，不同样品中 $E(0.18)$ 分裂出来的两峰高度比有差异，超过了测量误差。如果我们认为这个高度比代表两种不同深中心的浓度比，实验说明这浓度比在不同样品中不尽相同，存在这种差异是容易理解的。

通过以上对 $E(0.18)$ 深中心的研究，可以看到单轴应力深能级瞬态谱（USDLTS）法具有这样一个特点，即它有可能分辨激活能很相近的不同能级，得到它们的一些电学参数或微观结构方面的信息。

本文首次报道了用 USDLTS 法对硅中铜有关的主要电子陷阱能级 $E_c = 0.18\text{eV}$ 研究结果，推断这一能级对应于两种不同的铜中心，其相应深能级激活能都很接近于 0.18 eV 。单轴应力使这种偶然简并得以解除，分成了两个能级。

参 考 文 献

- [1] J. W. Chen and A. G. Milnes, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **10**, 157(1980).
- [2] R. N. Hall and J. H. Racette, *J. Appl. Phys.*, **35**, 379(1964).
- [3] A. M. Salma, *J. Electrochem. Soc.*, **126**, 114(1979).
- [4] C. S. Fuller and J. C. Severins, *Phys. Rev.*, **98**, 21(1954).
- [5] C. J. Gallagher, *J. Phys. Chem. Solids*, **3**, 82(1957).
- [6] C. B. Collins and R. O. Carlson, *Phys. Rev.*, **108**, 1409(1957).
- [7] T. Nakano and Y. Inuishi, *J. Phys. Soc. Japan*, **19**, 851(1964).
- [8] A. A. Lebedev and M. M. Akhmedova, *Sov. Phys. Semicond.*, **10**, 1130(1976).
- [9] M. M. Akhmedova *et al.*, *Sov. Phys. Semicond.*, **10**, 140(1976).
- [10] N. Toyama, *Solid State Electron.*, **26**, 37(1983).
- [11] L. C. Kimerling, J. L. Benton and J. J. Rubin, *Defects and Radiation Effects in Semiconductors*, **59**, 217(1980).
- [12] 王忠安、陈开茅、秦国刚, *半导体学报*, **6**(4), 437(1985).
- [13] Chen Kaimao and Qin Guogang, *Mater. Sci. Forum.*, **10-12**, 1093(1986).
- [14] 陈开茅、王忠安, *电子科学学刊*, **9**(3), 256(1987).
- [15] 陈开茅、秦国刚、兰李桥, *中国科学(A辑)*, 第2期, 149(1987).
- [16] G. W. Ludwig and H. H. Woodbury, *Solid-State Phys.*, **13**, 1962.
- [17] A. A. Kaplyanskii, *Opt. Spectrosc.*, **16**, 329(1964).

Study of Copper-Related Deep Level $E_c=0.18\text{eV}$ in Silicon with Uniaxially Stressed Deep Level Transient Spectroscopy

Yao Xiuchen, Wang Lei, Chen Kaimao

(Departments of Physics, Peking University, Beijing)

Qin Guogang

(CCAST (World Laboratory) and Departments of Physics, Peking University*, Beijing)

Abstract

The main copper-related deep level $E_c=0.18\text{eV}$ in n-type silicon has been studied with Uniaxially Stressed Deep Level Transient Spectroscopy for the first time. Judging from the experimental results, this level corresponds to two different copper centers with their activation energies very close to one another. These two centers can be distinguished from one another by removing the accidental degeneracy with uniaxial stress.

KEY WORDS : Silicon, Deep center, Copper

* Mailing address.