

超晶格电子辐照缺陷的亚稳态特性

封松林 周洁 卢励吾

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家实验室, 北京, 100083)

摘要 用深能级瞬态谱 (DLTS) 系统地研究了 GaAs (50Å)/GaAlAs (50Å) 超晶格中的电子辐照缺陷, 证实其亚稳态特性的存在, 对其恢复温度、转变条件进行了研究, 指出在体材料中不能观察到电子辐照缺陷亚稳态的原因.

关键词 电子辐照缺陷, 超晶格, 亚稳态, 深能级瞬态谱.

引言

具有一定能量的电子辐照会在 GaAs^[1~4]、GaAlAs^[4,5]体材料或 GaAs/GaAlAs^[6]、GaAs/AlAs^[7]超晶格中产生初级缺陷 (如空位、间隙原子等), 对电子辐照缺陷的研究有助于人们对其它更加复杂缺陷的认识. 由于低能电子辐照不破坏晶体的完整性、只产生初级缺陷、引入缺陷的浓度可人为控制、且能获得三维均匀分布的缺陷, 因而是研究缺陷的一种重要辅助手段. 低能电子辐照在 GaAs 体材料中产生的较重要电子陷阱为 E_1 、 E_2 、 E_3 . 在 GaAlAs 体材料中产生的较重要的电子陷阱为 E'_1 、 E'_2 、 E'_3 , 在 GaAs/GaAlAs^[6]和 GaAs/AlAs^[7]超晶格中产生的较重要电子陷阱为 SE_1 、 SE_2 、 SE_3 、 SE_4 . E_1 和 E_2 被指认为 GaAs 中砷空位的两个不同的荷电状态^[1], SE_1 和 SE_2 为与其对应的超晶格中的能级^[6,7]. 正电子湮灭^[8]及对无晶格畸变砷空位所做的自洽紧束缚计算^[9]也给出了类似结果. 除我们在第十七届国际半导体缺陷会议首次报道外^[10], 还未见其它有关电子辐照缺陷亚稳态特性的报道.

1 超晶格深中心

超晶格中阱内载流子波函数相互交叠形成子带, 在生长方向载流子通过子带完成输运过程, 相关的一些物理过程也通过子带来实现. 对于深中心在超晶格中的行为, 由于其波函数的局域性, 除去紧邻界面的缺陷外, 能带的不连续性对其能级影响可以忽略. 也就是说, 能级相对体材料导带或价带的位置是不变的, 但在超晶格中, 子带取代了体材料中的导带或价带, 缺陷通过子带与载流子发生作用 (发射或俘获载流子), 而不是同体材料中的导带或价带发生关系. 超晶格中缺陷的参数可由构成超晶格的体材料中的参数以及超晶格

的结构参数 (第一子带的位置、能带不连续量等) 来决定, 参见参考文献 [6]. 式 (1)、(2) 分别给出了缺陷在超晶格及体材料中能级位置和俘获势垒间的相互关系 (本文仅给出导带和电子缺陷的情况. 其它可以类推):

$$SE_T = E_T + K, \quad (1)$$

$$E_{BS} = E_B \left(1 + \frac{K}{E_T - d_{FC}} \right)^2. \quad (2)$$

这里, 对于势阱, $K = \delta$; 对于势垒, $K = \Delta - \delta$. 式 (1)、(2) 中 SE_T 表示缺陷在超晶格中的能级位置, E_T 表示体材料中的能级位置, E_{BS} 为缺陷在超晶格中的俘获势垒, E_B 为体材料中的俘获势垒, d_{FC} 为弗兰克-康登移动, δ 为超晶格第一子带相对势阱体材料导带底的位置, Δ 为导带的能带不连续量. 用深能级瞬态谱方法, 做 Arrhenius 图测得的能量在体材料中是 $E_T + E_B$, 在超晶格中为 $SE_T + E_{BS}$. 晶格畸变很小时, E_B 或 E_{BS} 近似为零.

2 实验结果和讨论

样品为 n^+ 衬底上分子束外延生长的 Si 均匀掺杂 GaAs (50Å)/GaAl_{0.3}As (50Å) 超晶格, Si 掺杂浓度约为 $2 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 欧姆电极做在样品的背面. 肖特基结在样品表面蒸金点获得. 室温下用能量为 1 MeV 的电子辐照样品, 电子束剂量为 $3 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$. 深能级瞬态谱的温度扫描范围是 10~350 K. 图 1 和 2 给出了不同实验条件下典型深能级谱, 测试条件为: 反向偏压为 -1 V, 脉冲高度为 1 V, 脉冲宽度为 1 ms, 率窗为 2.07 ms. 图 1 和 2 中曲线 a 为无光条件, b 为白光照射下获得的深能级谱. 对辐照剂量小于 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的样品 (图 1), 在无光照的情况下, 150 K 以下只观察到两个明显的电子辐照缺陷 SE1 和 SE2, 与文献 [6, 7] 相同. 对辐照剂量大于 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的样品 (图 2), 在无光照的情况下, 150 K 以下深能级瞬态谱在低温区 (~30 K) 出现了

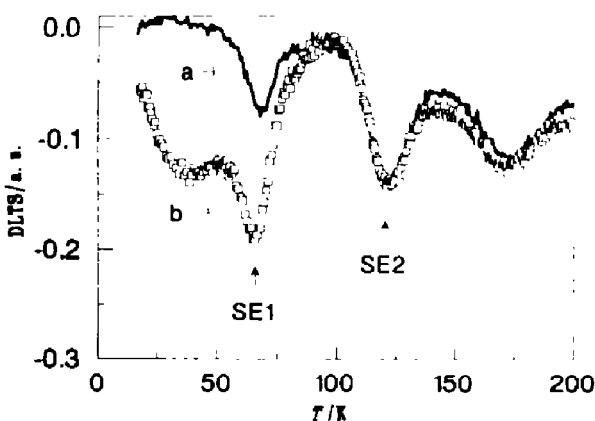


图 1 辐照电子剂量为 $4 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 的深能级瞬态谱

Fig. 1 DLTS spectra of the sample with electron irradiation dose of $4 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$

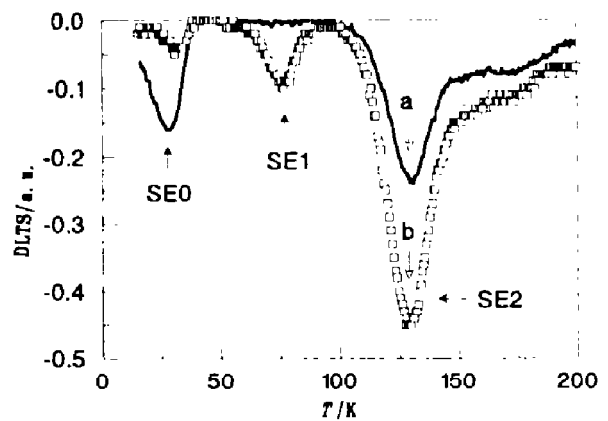


图 2 辐照电子剂量为 $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的深能级瞬态谱

Fig. 2 DLTS spectra of the sample with electron irradiation dose of $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$

一个新的多子能级 SE_0 , 而 SE_1 几乎完全消失. 在有白光照射的深能级瞬态谱中 SE_1 又在同一温度出现, SE_0 的强度却大为降低, 两者的强度增减具有互补性, 说明它们应为同一缺陷的不同状态. 这一实验结果也与文献 [6, 7] 一致, 因为后者测试时样品一直处于微弱白光照射之下, 未做全黑条件下的测量, 因而没有观察到 SE_0 与 SE_1 相互转变的现象. 本文是偶然发现该现象进而加以研究的. 此外, SE_0 的激活能还是辐照剂量的函数, 当它处于共振态时就无法从实验上观察到^[10]. 这也是人们没有在 GaAs 体材料中观察到这一现象的原因, 后文将作进一步讨论. 在低温光照或强正向注入时, SE_0 可以转化为 SE_1 , 反之, 无光条件下升温退火 SE_0 又可恢复. SE_1 不是一个稳定状态, 只在特定的外部条件下才能出现, 后文将专门讨论恢复温度. 光照后 SE_2 的强度也大为增加, 因为 SE_2 和 SE_1 是 GaAs 中砷空位的两个不同荷电状态^[1], SE_1 浓度增加必然导致 SE_2 浓度增加. 图 3 给出了 SE_0 、 SE_1 、 SE_2 能级位置以及样品的能带结构. SE_0 、 SE_1 、 SE_2 相对超晶格子带底 E_{SC} 的位置分别为 14、117、210 meV. SE_1 和 SE_2 的值同文献 [6] 基本吻合, 即满足关系式 $SE_T = E_T + \delta$ (理论计算 $\delta \approx 80$ meV).

为研究 SE_0 、 SE_1 、 SE_2 的恢复温度, 我们设计如下实验步骤: (1) 在全黑情况下将样品冷却到约 10 K 左右; (2) 用白光照射直到样品电容和深能级瞬态谱信号达到稳定状态, 然后移去光源, 恢复全黑条件直到样品电容和深能级瞬态谱信号达到稳定状态; (3) 将样品升温到某一设定温度; (4) 慢速降温取得一条谱线. 对不同的设定温度反复重复上述步骤, 以深能级瞬态谱缺陷峰高作为退火温度的函数, 即可推导出恢复温度. 恢复温度的定义为: 样品温度高于恢复温度时, 缺陷可以全部恢复, 恢复温度与亚稳态畸变势垒直接相关. 由图 4 得 SE_0 的恢复温度约为 80 K, SE_1 的恢复温度约为 150 K, SE_2 的约为 200 K. 从图 4 还可清楚地看到 SE_0 与 SE_1 、 SE_2 退火过程的互补性. SE_0 、 SE_1 、 SE_2 恢复温度的差别说明其恢复势垒不同, 恢复过程也不一样, 有待于深入研究. 综上所述, 我们可以确认 SE_1 是 SE_0 的一个亚稳态.

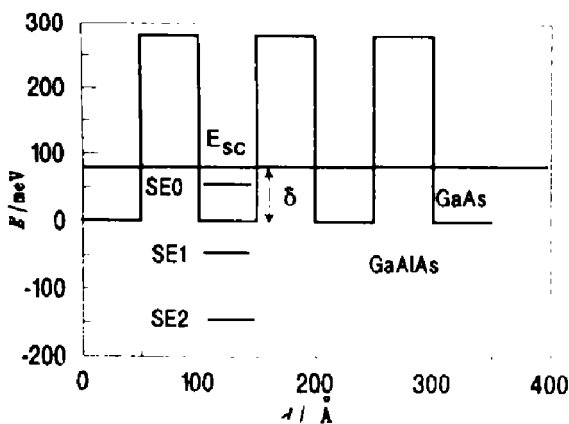


图 3 样品能带结构和能级位置
Fig. 3 Band structure and levels positions of the sample

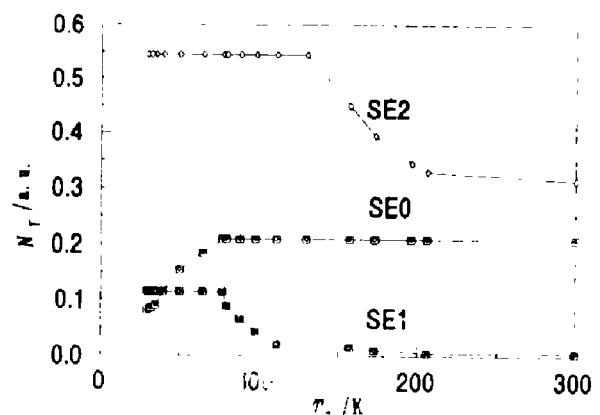


图 4 DLTS 峰高同退火温度的关系
Fig. 4 DLTS peak height versus annealing temperature

从图 3 不难理解为何在体材料中观察不到 SE_0 以及辐照缺陷的亚稳态特性. 在超晶格中, 子带取代了体材料的导带, 对阱区而言, 相当于禁带宽度增大, SE_0 降到禁带内.

成为可观测能级. 我们的结果也说明尽管某些能级是共振态, 但波函数仍可非常局域, 有深中心特性. 从文献 [3] 和 [6] 可知, $SE1$ 和 $SE2$ 的复合势垒很小, 这在我们的实验中也得到证实, 它说明微观结构无大的晶格畸变.

3 结论

我们首次发现 GaAs (50Å)/GaAlAs (50Å) 超晶格材料的电子辐照缺陷 $SE0$ 存在亚稳态, 并给出其恢复温度约为 80 K. 已被指认 $SE1$ 为 GaAs 中的砷空位, 并且是 $SE0$ 的亚稳态, 即空位缺陷有亚稳态结构. 有文献报道 $DX^{[1]}$ 中心以及 $EL2^{[11,12]}$ 的亚稳态均与空位有关, 本文的结果证实了这一论点. 由此可以推测与空位有关的复杂缺陷都有可能具有亚稳态. 本文还从实验上证实了共振态的波函数也可以非常局域化, 有深能级的特性.

参考文献

- 1 Stievenard D, Boddaert X, Bourgoin J C, *et al.* *Phys. Rev.*, 1990,**B41**:5271
- 2 Stievenard D, Boddaert X, Bourgoin J C. *Phys. Rev.*, 1986,**B34**:4048
- 3 Pons D, Bourgoin J C. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1985,**18**:3839
- 4 Lang D V, Logan R A, Kimerling L C. *Phys. Rev.*, 1977,**B15**:4874
- 5 Loualiche S, Gillot G, Nouailhat A, *et al.* *Phys. Rev.*, 1982,**B26**:7090
- 6 Feng S L, Bourgoin J C, Mauger A, *et al.* *Phys. Rev.*, 1989,**B39**:13252
- 7 Feng S L, Zazoui M, Bourgoin J C, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1990,**67**:276
- 8 Corbel C, stucky M, Hautojärvi P, *et al.* *Phys. Rev.*, 1988,**B38**:8912
- 9 Xu Honqi, Lindefelt U. *Phys. Rev.*, 1990,**B41**:5979
- 10 Feng S L, Zhou J, Lu L W, *et al.* In: *Proceeding of 17th International Conference of Defects in Semiconductors*, Gumden, Austria, 1993
- 11 Krause-Rehberg R, Polity A, Drost Th, *et al.* In: *Proceeding of 17th International Conference on Defects in Semiconductors*, Gumden, Austria, 1993
- 12 Krause R, Saarinen K, Hautojärvi P, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1990,**65**:3329

METASTABLE CHARACTERISTICS OF ELECTRON IRRADIATION-INDUCED DEFECTS IN SUPERLATTICES

Feng Songlin Zhou Jie Lu Liwu

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) was used to study the irradiation-induced defects in GaAs (50Å)/GaAlAs (50Å) superlattice. The existence of metastability of such defects was demonstrated, and their transition temperature was studied. The reason why these characteristics can not be observed in the bulk materials is pointed out.

Key words electron irradiation-induced defects, superlattices, metastability, DLTS.