

半绝缘砷化镓 EPR 谱的异常退火特性*

韩洪涛 葛惟锟 林兰英

(中国科学院半导体研究所, 北京)

吴思 吴书祥 晏懋洵

(北京大学物理系, 北京)

1988年4月25日收到

中子辐照的水平生长半绝缘 GaAs(样品 A)、原生的和塑性形变的直法拉制半绝缘 GaAs(样品 C 和 D), 都给出一组四线谱, 但在不同的样品中呈现不同的退火特性: 样品 A 经 125°C 三小时退火后, EPR 谱有部分光猝灭效应, 加长退火时间, 光猝灭效应消失, 表现出异常的退火特性; 而样品 C 和 D, 则无光猝灭效应。

主题词: 本征缺陷 EL2、反位缺陷、光猝灭

一、引言

砷化镓中的本征缺陷 EL2 的识别问题业已成为国内外学者广泛研究的课题。EL2 能级对于作为集成电路衬底的未掺杂砷化镓的半绝缘性质起着决定性作用。通过各种手段对砷化镓中 EL2 能级的研究, 从不同侧面揭示了 EL2 的特性, 使得对 EL2 能级已经有了较深的了解。关于 EL2 的微观结构, 国内外学者已提出许多模型^[1,2]。这些模型在一定程度上可以对 EL2 能级的某些特性给予解释, 但还没有一个模型能全面地揭示 EL2 能级的本性。

电子顺磁共振 (EPR) 是研究物质中顺磁中心微观结构的有力手段。自从 1980 年 Wagner 等^[3]首次用于半绝缘 GaAs 中的点缺陷研究以来, 已在 EL2 的本性识别方面起了十分重要的作用。它肯定了 EL2 与反位缺陷 As_{Ga} 相关。但是, 对它的微观结构以及对 GaAs 中 EPR 谱本身的解释, 仍然是当前研究的热点。因此, 开展对半绝缘 GaAs 中本征缺陷的 EPR 研究工作, 仍然具有重要的意义。

二、样品与实验条件

实验所用的半绝缘 GaAs 样品是由中科院半导体所 104 组提供的。其拉制方法、电学参数和后处理条件列于表 1。

* 国家自然科学基金资助项目。

表 1

编 号	样品型号	拉制方法	电子浓度 (cm ⁻³)	电 阻 率 (Ω cm)	原处理方法
A	C-81-11C	水 平 法			中子辐照剂量 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$
B	C-81-11C	水 平 法	5.18×10^7	$(2.27-2.86) \times 10^7$	原生
C	HVC-84-7b (As/Ga=1.0195)	直 拉 法			塑性形变形变度 2.5% 400°C, N ₂ 气氛
D	HVC-84-7b (As/Ga=1.0195)	直 拉 法	1.70×10^8	8.47	原生

EPR 实验使用的是 BRUKER 公司生产的 X 波段 ER200D-SRC 型谱仪。测量温度为 5K。调制频率为 100kHz, 调制幅度为 12.5 高斯, 微波功率为 6.3 毫瓦。

三、结果与讨论

1. 除样品 B 外, 其余三组样品都给出一组各向同性的四线谱 (见图 1)。四线谱的一个明显特点是谱线间距不等, 越到高场, 间距越大; 另一个特点是各个峰的高度不等, 其中第三个峰明显高于其它峰。对于四线谱的起源, 当前有各种看法, 其中 A. Goltzene 等认为是 As_{Ga}⁴⁺ (砷代镓位) 的四重峰和 V_{Ga}¹⁻ (镓空位) 单峰的迭加^[4]。用以解释第三峰高于其它峰。有的作者用 Breit-Rabi 公式来解释四个峰的间距不等^[5,6]。

四线谱的各个峰都很宽 (大约 500 高斯), 这是 As_{Ga}⁴⁺ 上 s 态电子与近邻及次近邻等原子核高阶超精细相互作用的结果。因为 As_{Ga} 基质原子都具有 $I = \frac{3}{2}$ 的核自旋, 四线谱实际上大量单线组成的包络线。

谱线的各向同性说明 As_{Ga}⁴⁺ 的最近邻配位原子层无其它顺磁缺陷。

2. 样品 B 是与 A 同源, 但没有经过中子辐照。在其中没有观察到四线谱, 这可归因于样品中 As_{Ga}⁴⁺ 的浓度较低的缘故 (低于 10^{16} cm^{-3} 量级)。然而对其进行的光吸收实验结果表明, EL2° (中性 EL2) 的浓度为 10^{16} cm^{-3} 量级。结合 EL2 与 As_{Ga}⁴⁺ EPR 谱的光响应差别 (见下文), 说明虽然 As_{Ga} 参与了 EL2 的构成, 但 EPR 测到的与光吸收测到的并不是同一缺陷, 前者测的是 As_{Ga}⁴⁺ 或 EL2⁺, 而后者测的是 EL2°。

3. 四线谱强度随测量温度的变化关系见图 2。随着测量温度的升高, 第三个峰向高场方向移动, 同时第四峰上升沿上的平台消失 (见图 3)。

测量温度的升高产生另一个明显的效应是在样品 A 中出现一个新的共振峰 (称为 P

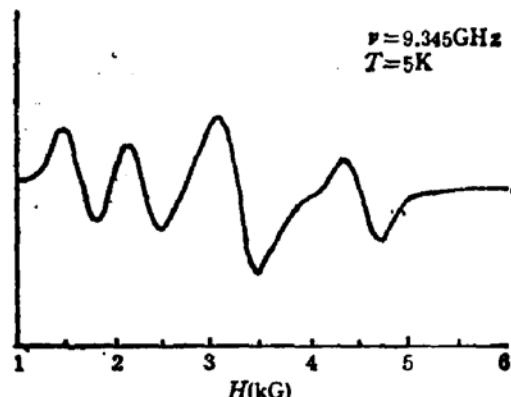


图 1 中子辐照 Hg-Ga-As 的 EPR 谱

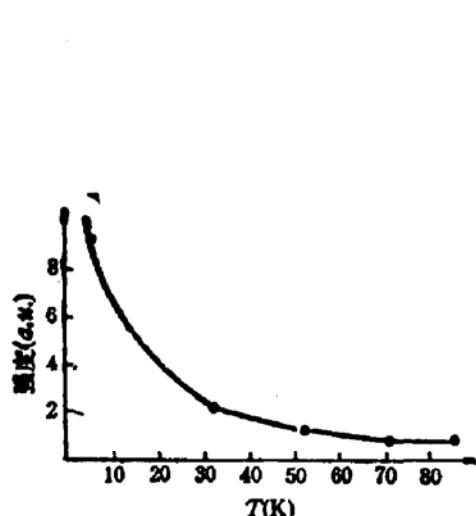


图 2 四线谱强度随测量温度的变化

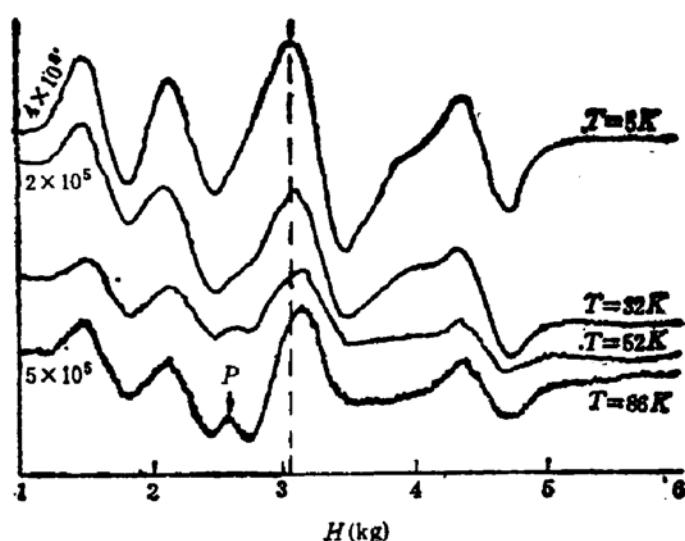


图 3 第三个峰的位置与温度的关系

峰). 其强度随测量温度的升高而增加。需要说明的是, 在样品 C 和 D 中, 在低温时 (5K) P 峰就已出现(见图 4)。

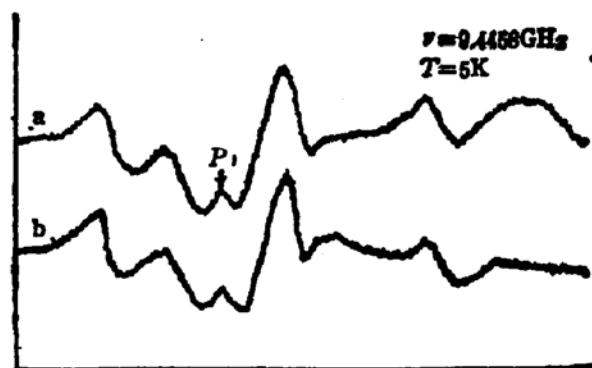


图 4 LEC-GaAs 中的 EPR 谱
a, 经过塑性形变(样品 c) b, 同源的原生样品(样品 d)

4. 退火处理前样品 A 中的四线谱对白光和单色光 ($\lambda = 1.1 \mu\text{m}$) 没有响应。在 125°C 退火 1 小时后, 谱线仍无光响应。在 125°C 退火 2 小时后, 发现有部分光猝灭效应(见图 5)。图中的 a 是光照前的谱线, b 是在光照条件下记录的谱线, 其强度比 a 弱(部分光猝灭), c 是将测量温度升到 145K , 维持 5 分钟, 再降到 5K 时记录的谱线, 其强度已恢复到与 a 相同(热恢复)。这种低温光猝灭和高温热恢复现象, 恰恰是 EL2 的特征(称为 EL2 的指纹)。表明样品 A 经过 125°C 退火 3 小时处理, 产生了一定数量的 EL2。部分光猝灭说明只有部分 As_{Ga} 转变为 EL2。当样品 A 在 125°C 退火 2.5 小时之后, 光猝灭效应反而消失了, 似乎说明 EL2 又转化为 As_{Ga} 。关于这种不寻常的退火特性, 在原理上还不清楚。经 600°C 退火后, 样品的电阻率急剧下降, 使得 EPR 实验无法进行。

对样品 C 和 D, 也进行了同样步骤的退火处理和光照实验, 发现其中的四线谱对白光和单色光都没有响应。说明在这两组样品中, 虽然有 $\text{As}_{\text{Ga}}^{4+}$, 却没有 EL2 形成。

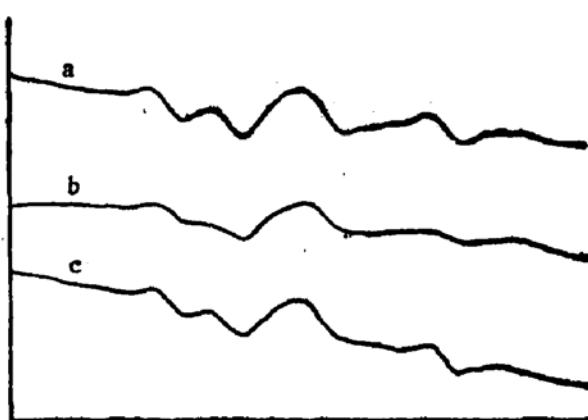


图5 样品A中的四线谱经125°C退火3小时后，部分光猝灭效应
a) 光照前的谱线 b) 光照时的谱线 c) 停止光照，升温到145K维持5分钟，又降到5K时的谱线

四、结 论

在生长过程和条件各不相同、产生缺陷的外加手段也不同的三组半绝缘砷化镓样品中，都观察到一组各向同性的四线谱和一个来源尚不清楚的单峰（称为P峰）。经125°C 3小时退火处理，中子辐照样品中的四线谱呈现部分光猝灭效应，说明部分 $\text{As}_{\text{Ga}}^{4+}$ 转化为 $\text{EL}2^+$ ，在同一温度下加长退火时间，光猝灭效应反而消失，呈现出异常的退火特性。而直法拉制的原生样品和塑性形变样品，则无光猝灭效应，说明在这两组样品中 $\text{As}_{\text{Ga}}^{4+}$ 没有转变为 $\text{EL}2^+$ 。

中国科学院半导体所何宏家同志提供样品，北京大学物理系秦国刚教授、毛晋昌、许惠英老师以及中国科学院原子能所李耀鑫同志，半导体所欧阳小龙、焉秋鸣、中国科学院上海冶金所汪光裕同志等在实验中曾给予大力支持和帮助。在此特向他们致谢。

参 考 文 献

- [1] 汪光裕,中国科学院上海冶金研究所博士论文,(1986).
- [2] 韩洪涛,中国科学院半导体研究所硕士论文,(1987).
- [3] R. J. Wagner, J. J. Krebs and G. H. Staus, A.M. White, *Solid State Commun.*, **36**, 15(1980).
- [4] A. Goltzene, B. Meyer, and C. Schwab, *Proc. of the 13th International Conference on Defects in Semiconductors*, 937(1984).
- [5] A. Goltzene, B. Meyer, C. Schwab, S. G. Greenbaum, R. J. Wagner, and T. A. Kennedy, *J. Appl. Phys.*, **56**, 3394(1984).
- [6] R. Wörner, U. Kaufman, and J. Schneider, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 141(1982).

Unusual Annealing Behavior of EPR Spectra in Semi-Insulating GaAs

Han Hongtao, Ge Weikun, Lin Lanying

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Wu En, Wu Shuxiang and Yan Maoxun

(Department of Physics, Peking University)

Abstract

An isotropic quadruplet EPR spectrum has been observed in HB and LEC semi-insulating GaAs. In the neutron-irradiated HB-GaAs, the quadruplet is partly quenchable after a three-hour annealing at 125°C and displays an unusual annealing behavior, while the quadruplet in the LEC-GaAs is not photosensitive.

KEY WORDS: Intrinsic defect *EL2*, Antisite defects, Photoquenching