

Yb、Er 双注入 SI-InP 发光中的浓度 猝灭效应和光子雪崩现象研究

曹望和 张联苏

中国科学院长春物理研究所，长春 130021

(1991年10月22日收到；1991年12月30日收到修改稿)

本文首次报道了 Yb、Er 双注入 SI-InP 中 Yb^{3+} 1.04 μm 和 Er^{3+} 1.54 μm 发光行为，观察到了浓度相互猝灭效应和光子雪崩现象。

PACC: 7220, 6170I, 7855

1. 引 言

半导体掺稀土离子的光学行为由于对光电器件具有潜在应用前景而得到研究。尽管 Yb^{3+} 在 InP 中能够与 In^{3+} 半径匹配并至少可取代 50% In^{3+} ^[1] 和只有一种发光中心^[2]，因而发光较强，但是发现 1.04 μm PL 从 50K 开始衰减约 110K 时基本猝灭^[3,4]。所以给室温下电激发带来了困难。 Er^{3+} 虽然在 GaAs(我们已观察到)、InP、GaAlAs、ZnTe 和 CdS^[5] 中目前室温下已观察到 1.54 μm 发光，但理论计算的其增益值在 $10^{-2} - 10^{-1} cm^{-2}$ 间，此值勉强接近半导体激光器件要求。且 Er^{3+} 因半径较大难于与 In、Ga 等实现半径匹配，不仅难于重掺杂同时 Er^{3+} 发光中心为复合体^[2]。为了提高它们的发光效率我们进行了双注入研究。

2. 实 验

衬底为(100)掺 Fe SI-InP($\rho < 10^7 \Omega cm$)，室温 350keV 平方分布注入， Yb^{3+} 和 Er^{3+} 剂量分别在 $1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{15} ions cm^{-2}$ 和 $1 \times 10^{13} - 1 \times 10^{15} ions cm^{-2}$ 间变化。注入样品溅射 200nm Si_3N_4 后 Ar 气氛中 700—850℃ 等时退火 15min。He-Ne 632.8nm 激发，功率密度为 2.6W/cm²。10—130K 测试，Ge 探测器接收。

3. 结果和讨论

当 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 剂量相同时 ($5 \times 10^{14} ions cm^{-2}$) 均未观察到它的特征发光；即使将信号放大也只观察到 Yb^{3+} 1.04 μm 微弱信号而 Er^{3+} 1.54 μm 信号仍然不可辨认。这与 Yb、Er 分别单注入 SI-InP 均呈现很强 PL 强度的情况截然相反^[6]。所以我们认为此时发生了浓度相互猝灭效应。当 Er^{3+} 为 $5 \times 10^{14} ions cm^{-2}$ 而 Yb^{3+} 降为 $2 \times 10^{14} ions cm^{-2}$ 时，观察到 Yb^{3+} 1.04 μm 很强特征发光峰但仍低于单注入情况。虽然 Er^{3+} 1.54 μm PL 谱也出现了但极弱，不仅失去 Er^{3+} PL 谱特征且呈现出多发光中心^[6]，造成 Yb^{3+} 1.04 μm 降低和 Er^{3+}

• 吉林省科委及长春物理所开放实验室资助。

1. $54\mu\text{m}$ 几乎猝灭的原因: 一是由于 Er 在 InP 中形成了 ErP 沉淀^[7]而降低了 Yb³⁺发光中心数目^[2]; 其次是由于 Er³⁺半径 $>$ Yb³⁺半径双注入后将产生很大应变能, 因而双注入层再结晶后残存损伤大于 20%^[4]而降低了再结晶度。我们对 SI-InP:Yb、Er 的背散射(RBS)谱的初步测量也证实了这一点。

图 1 给出了当 Er³⁺剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 时 Yb³⁺ $1.04\mu\text{m}$ 和 Er³⁺ $1.54\mu\text{m}$ PL 强度随 Yb³⁺剂量变化曲线。从图中看出 PL 相互猝灭浓度为 $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 。显然它与文献[8]中给出的单掺杂稀土离子情况下 PL 随浓度猝灭临界值的含义不同。因为这里 PL 猝灭不仅与浓度有关, 而更主要取决于它们的浓度相互制约的程度。

我们也进行了固定 Yb³⁺剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 而相应在 1×10^{13} — $1 \times 10^{15} \text{ ions cm}^{-2}$ 间变化 Er³⁺的剂量的实验。实验结果与图 1 相同, 特别当 Yb³⁺为 $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 时发生了

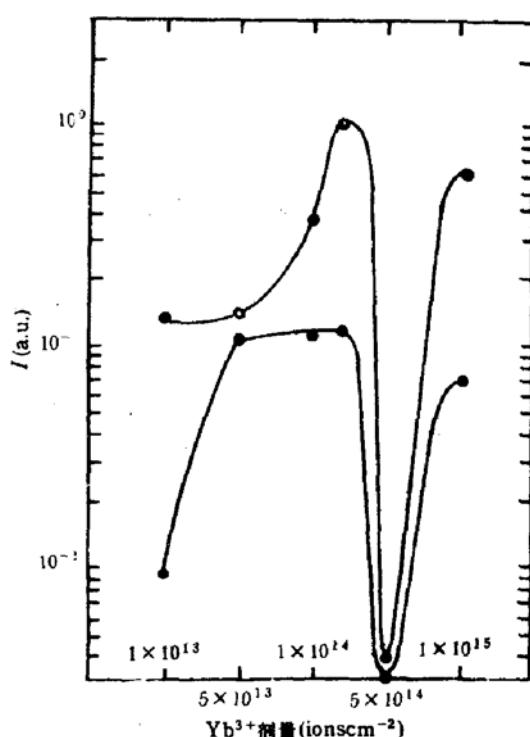


图 1 SI-InP:Yb、Er 样品 Er³⁺剂量固定时 ($5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$) Yb³⁺(○) 和 Er³⁺(●) 10K 时 PL 强度随 Yb³⁺剂量变化关系

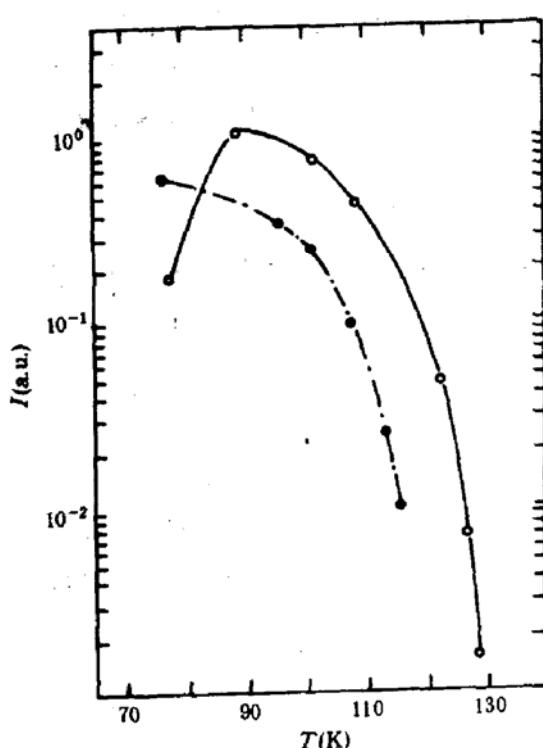


图 2 SI-InP:Yb(●), Yb³⁺: $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 和 SI-InP:Yb、Er(○), Yb³⁺: $2 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$, Er³⁺: $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 中 Yb³⁺ PL 强度随温度变化曲线。

与图 1 完全相同的浓度相互猝灭效应。以上实验结果说明 Yb-Er 对在半导体中的行为与在玻璃^[9]和 BaY₂F₈^[10]中情况完全不同。

图 2 显示了 SI-InP 单注入 Yb³⁺ ($5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$) 和双注入 Yb³⁺ ($2 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$)、Er³⁺ ($5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$) 样品中 Yb³⁺ $1.04\mu\text{m}$ PL 强度随温度变化曲线。单注入 Yb PL 强度的衰减与文献[4, 11]报道基本相同。但双注入时 Yb³⁺ PL 在 80—90K 间随温上升不是衰减而是几乎急剧线性上升, 上升幅度 40 倍左右。约 83K 时便超过单注入时 PL 值; 90K 时达到极值后才开始衰减。猝灭温度提高了 14K 左右。上述现象与 W. E. Case 等人^[12]在 LaCl:Pr 中 80K 时观察到的“the photon avalanche”现象相似, 所以我们认为我们观察到的现象也是光子雪崩。

这种光子雪崩机制可能与使用掺 Fe 的 SI-InP 基质有关, 因为 P. B. Klein 等人^[13]在 5—29K 发现 InP 中 Fe²⁺ 的 ${}^5\text{T}_2$ - ${}^5\text{E}$ 跃迁的

PL 强度随温度上升而上升直到 $T \geq 60K$ 时才随温度上升而衰减. 但是我们认为最大可能是 Er^{3+} 在这特定温度下发生了 $\text{Er}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 能量传输过程. 因为 $\text{Yb}^{3+} 1.04\mu\text{m}$ PL 强度表达式为

$$I = N_5 A_{5-7} h V_{5-7}, \quad (1)$$

N_5 、 A_{5-7} 分别为 Yb^{3+} 激发态 $^2F_{5/2}$ 上的电子数目和 $^2F_{5/2}$ 到基态 $^2F_{7/2}$ 的跃迁几率. 由(1)式可知只有 N_5 剧增才会引起 I 值剧增. 但是在样品及其发光功率密度均已确定情况下, 仅从(1)式是看不出 N_5 增加的物理过程. 因而有必要将 N_5 写成玻尔兹曼分布形式

$$N_5 = N_7 \frac{g_5}{g_7} \exp\left(-\frac{E_5 - E_7}{KT}\right), \quad (2)$$

N_7 为 $\text{Yb}^{3+} {^2F}_{7/2}$ 基态上的电子数目; g_5 、 E_5 与 g_7 、 E_7 分别为 $\text{Yb}^{3+} {^2F}_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 能级简并度和能量; K 为玻尔兹曼常数; T 为温度. 由(2)式可知要使 N_5 剧增必须 N_7 剧增, 但是我们知道

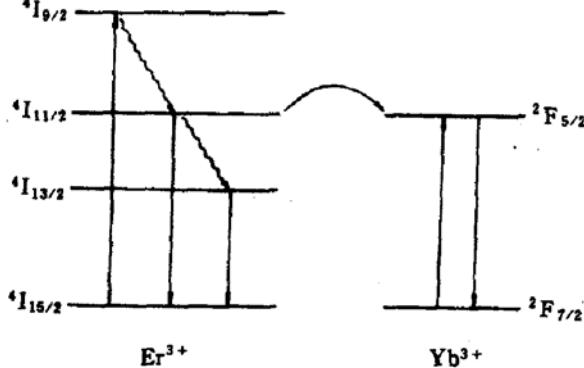


图3 SI-InP:Yb、Er 中 $\text{Er}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 能量传输示意图

双注入中 Yb^{3+} 发光中心数目肯定小于单注入数目, 也就是说 N_7 不可能出现剧增. 所以说在雪崩过程中 Yb^{3+} 激发态 $^2F_{5/2}$ 上的电子不再服从玻尔兹曼分布, 那么引起 N_5 的剧增肯定是其它物理过程, 即如图3所示的 $\text{Er}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 能量传输过程造成的. 实际上, 因 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$ 激发态能级与 Yb^{3+} 的 $^2F_{5/2}$ 激发态能级的能量很接近, 它们之间在一些特定条件下通过共振传递能量是完全可能的.

另外, 我们还发现双注入时 $\text{Yb}^{3+} 1.04\mu\text{m}$ PL 谱在 $126K$ 时仍相当清晰, 甚至在猝灭前 $129K$ 时的光谱仍呈现 Yb^{3+} PL 谱特征结构. 而单注入早在 $112K$ 时便失去 Yb^{3+} PL 谱特征结构, 在 PL 猥灭前 $115K$ 时 Yb^{3+} PL 谱几乎被其它发光包迹掩没. 这说明双注入中 $\text{Yb}^{3+} 1.04\mu\text{m}$ 发光与单注入相比受温度影响较小.

4. 结 论

在 Yb、Er 双注入 SI-InP 样品中, 当 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 剂量相同时 ($5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$), Yb^{3+} 和 Er^{3+} 发光发生浓度相互猝灭效应. 当 Yb^{3+} 剂量为 $2 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 而 Er^{3+} 为 $5 \times 10^{14} \text{ ions cm}^{-2}$ 时, $\text{Yb}^{3+} 1.04\mu\text{m}$ 发光强度在 $80-90K$ 间随温度上升而几乎线性剧增, 幅度达 40 倍左右, 我们把这种现象叫做光子雪崩, 并用 $\text{Er}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量共振传输初步解释了这种雪崩机制.

参 考 文 献

- [1] A. Kozanecki et al., *J. Appl. Phys.*, **68** (2), 517 (1990).
- [2] 曹望和等, 半导体学报, **12** (2), 80 (1991).
- [3] P. Galtier et al., *Appl. Phys. Lett.*, **55** (20), 2105 (1989).

- [4] P. B. Klein, *Solid State Communications*, **65** (10), 1097(1988).
- [5] P. N. Favenec *et al.*, *Electron. Lett.*, **25** (11), 718(1989).
- [6] Cao Wanghe(曹望和) *et al.*, *Chinese J. Rare Earth*, **9** No(6), 31(1991).
- [7] G. Jasiolek *et al.*, *J. Crystal Growth* **97**, 583(1989).
- [8] F. Hulliger, *Handbook on Physics and Chemistry of Rare Earth*, Vol. 4 (North-Holland 1979), P. 254.
- [9] E. Snitzer *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **6** (3), 45(1965).
- [10] L. F. Johnson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **19**, (2), 44(1971).
- [11] C. Rochaix *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (12), L2348(1988).
- [12] W. E. Case *et al.*, *J. Luminescence* **45**, 351(1990).
- [13] P. B. Klein *et al.*, *Phys. Rev. B* **29** (4), 1947(1984).

Investigation of Concentration Quenching Effect and Photon Avalanche Phenomenon of Both Impla- ntation of Yb and Er in SI-InP

Cao Wanghe and Zhang Liansu

Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun 130021

(Received 22 October 1991; revised manuscript received 30 December 1991)

Abstract

The luminescent behavior of Yb^{3+} at $1.04 \mu\text{m}$ and Er^{3+} at $1.54 \mu\text{m}$ in both implantation of Yb、Er in SI-InP is reported for the first time. The cross concentration quenching effect and photon avalanche phenomenon are observed.

PACC: 7220, 6170T, 7855