

Er, O 离子共注入 GaAs 的二次离子质谱的研究*

TN305

陈辰嘉 李海涛 王学忠
(北京大学物理系, 北京, 100871)

FA40

周必忠[†] 雷红兵 肖方方
(厦门大学物理系, 福建, 厦门, 361005)

TN304.23

O482.31

P. Bottazzi

(C. N. R. Centro di Studio per la Cristallografia e la Cristallochimica, 27100 Pavia, Italy)

摘要 在 III-V 族半导体 GaAs 外延层上共注入 Er 和 O 离子(GaAs:Er,O), 经面对面优化退火后, 光致发光(photoluminescence-PL)谱中观测到对应 Er³⁺ 第一激发态到基态 ⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 跃迁, 其相对强度较单注入 Er 的 GaAs(GaAs:Er) 增强 10 倍, 且谱线变窄. 从二次离子质谱(Secundary Ion Mass Spectrometry-SIMS) 和卢瑟福背散射实验给出退火前后 Er 在 GaAs:Er 样品中的剖面分布. SIMS 测量分别给出 O 注入前后 Er 和 O 在 GaAs:Er,O 中的深度剖面分布, 分析表明 Er 和 O 共注入后形成光学激活有效的发光中心.

关键词 铒, 氧离子共注入, 二次离子质谱, 光致发光.

砷化镓 | 发光学

引言

近年来稀土 Er 掺杂的 III-V 族化合物发光材料的研究引起人们关注^[1,2]. 这是由于这类材料的发光来源于 Er³⁺ 的内层 4f 电子 ⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 能级跃迁, 其特征波长为 1.538μm, 正好处于石英光纤的低损耗区, 且因存在外层电子的良好屏蔽作用, 致使发光过程受外界和晶体内部作用小, 具有单色性好, 热稳定和抗辐照等一系列优点, 可望作为光纤通讯系统的光源, 有广阔的应用前景. 目前国际上广泛使用离子注入法掺杂稀土 Er, 并探索提高发光效率的途径, 以实现高浓度 Er 的掺入和材料的高性能. 我们实验发现, O 杂质对 GaAs:Er 中的 Er 发光具有增强作用, 可使发光相对强度提高 10 倍^[3].

本文用较高注入剂量 Er(5×10¹⁴/cm²) 和剂量为 2.3×10¹³/cm² 的 O 共掺杂的 III-V 族半导体 GaAs(Er,O) 二次离子质谱(Secundary Ion Mass Spectrometry-SIMS) 的新结果. 共掺杂 GaAs(Er,O) 的样品不但发光强度显著增强, 而且谱线变窄.

* 国家自然科学基金(编号 19574004) 和北京大学稀土材料化学应用国家重点实验室基金资助项目
稿件收到日期 1997-01-06, 修改稿收到日期 1997-05-26

1 实验

衬底材料为取向(100)半绝缘 n 型 GaAs 单晶,用 MOCVD 法外延 GaAs 薄层,厚度为 $4\mu\text{m}$. Er 离子注入在室温下完成,注入离子束能量为 350keV ,剂量为 $5\times 10^{14}/\text{cm}^2$. 为避免注入的沟道效应,注入时离子束偏离表面法线方向 7° . 为研究杂质氧 O^+ 对 GaAs(Er, O) 中 Er 的发光增强效应,取部分单注入 Er 的 GaAs(Er) 样品进行二次注入 O^+ ,注入 O 的能量为 70keV ,注入剂量为 $2.3\times 10^{13}/\text{cm}^2$. 所有单注入和双注入的 GaAs 样品都经过面对面优化热退火处理^[4].

SIMS 的深度剖面分析是在 Cameca IMS4f 离子微探针上完成的,用电流为 600nA ,能量为 15keV 的 O_2^+ 为初级离子束测量只有 Er 注入样品 GaAs:Er. 为了同时能测定 GaAs:Er, O 样品中 Er 和 O 的分布,并避免测量过程中引入 O^+ ,将 O_2^+ 初级离子束改为 Ar^+ 离子束,用电流 50nA ,能量为 10.5keV 的 Ar^+ 初级离子束轰击样品表面 $250\mu\text{m}\times 250\mu\text{m}$ 的区域,以一个机械孔径加上光学元件从此区域的中心部分($\sim 60\mu\text{m}$ 直径)去选择正的二次离子,最后用电子倍增管收集二次离子: $^{167}\text{O}^+$, $^{166}\text{Er}^+$, $^{167}\text{Er}^+$. 样品表面镀金($\sim 20\text{nm}$ 厚度)以避免离子束轰击过程中在溅射表面上带来的电荷积累.

SIMS 的剖面深度用英国 Taylor-Hobson 公司的剖面计直接测定.

在低温 10K 下分别测量 GaAs:Er 和 GaAs:Er, O 的光致发光 PL 谱.

卢瑟福背散射(Rutherford Back Scattering) 谱测量时,入射粒子源用 Li^{2+} ,束能为 4.2MeV ,束流为 $10\sim 100\text{nA}$ 可调. 束斑直径 $\leq 1\text{mm}$,散射角(探测角)为 165° ,背散射粒子讯号经多道分析仪分析,计数器计数后给出谱图. 实验方法详见文献[4].

2 结果和讨论

2.1 退火前后 Er 离子注入深度剖面分布

图 1 给出单注入 GaAs:Er 样品退火前后 SIMS 分析的典型结果. 注入剂量为 $5\times 10^{14}/\text{cm}^2$,注入能量为 350keV . 退火前后 Er 的剖面分布基本无变化,峰值两侧剖面略呈非对称分布. 注入的深度在注入剂量相同情况下取决于注入能量.

图 2 给出 GaAs 中注入剂量相同($5\times 10^{14}/\text{cm}^2$),而注入能量分别为 350keV 和 150keV 的 Er 离子强度与剖面深度的分布实验结果. 从图 2 中可见注入能量为 350keV 时,Er 离子注入剖面峰值处的深度为 85nm ,而注入能量减小为 150keV 时,注入剖面峰值处的深度亦减小为 51nm ^[5],因而在相同注入剂量下,注入能量将决定注入峰值的深度.

图 3 给出单注入 GaAs(Er)退火前后 Er 浓度分布卢瑟福背散射实验(RBS)的典型结果. 注入剂量为 $5\times 10^{14}\text{Er}/\text{cm}^2$,注入能量为 300keV . 从图 3 所示表明峰值深度约为 80nm ,退火后 Er 浓度分布与退火前相比略有收缩,Er 注入最大峰值浓度为 $1.8\times 10^{19}/\text{cm}^3$.

SIMS 与 RBS 测量结果两者相比,注入剖面分布基本一致. 由于两者的样品注入能量有差别,因而 Er 离子峰值深度略有不同. Er 注入的浓度最大峰值处为 $10^{19}/\text{cm}^3$ 量级. 经优化退火后, GaAs 晶体能有效消除注入损伤,恢复晶格完整性,使其具有良好的发光特性.

2.2 Er, O 共注入 GaAs(Er, O)SIMS 的分析

图 4 为 Er, O 共注入 GaAs(Er, O) 中 SIMS 的测量结果,其中图 4(a)为单注入 Er 的

GaAs(Er)退火后 O 本底分布 SMS 分析的典型结果. 从图 4(a)中可明显看出,单注入 Er 的 GaAs 样品在峰值深度内本底 O 离子杂质最大值约为 ≤ 40 离子电流 ($I/a.u.$), 比 Er 离子电流小近三个量级, 峰值深度以外的氧离子则可略去不计.

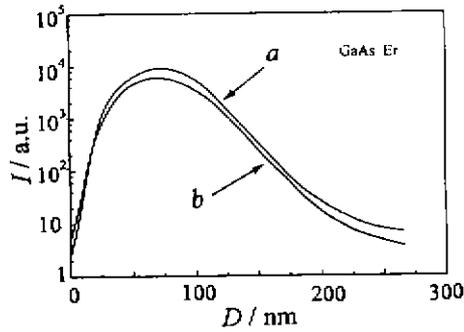


图 1 GaAs 中的 Er 注入 SIMS 深度剖面分布
(a) 退火前 (b) 退火后
Fig. 1 SIMS depth profile of Er-implanted in GaAs (a) as implanted (b) annealed

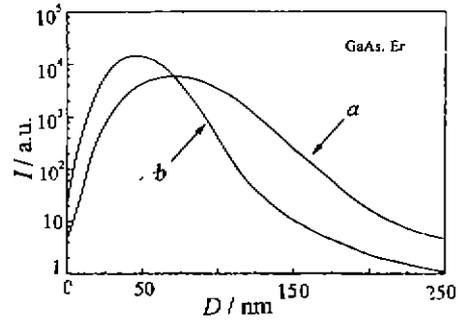


图 2 GaAs 中 Er 注入 SIMS 深度剖面分布
(a) 注入能量: 350keV (b) 注入能量: 150keV
Fig. 2 SIMS depth profile of Er-implanted in GaAs (a) implantation energy: 350keV (b) implantation energy: 150keV

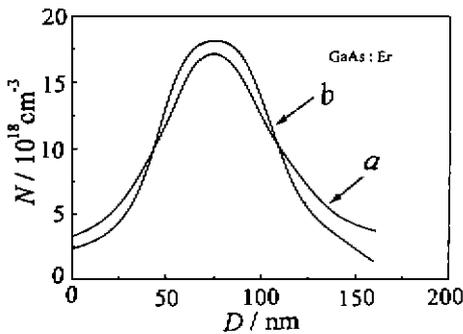


图 3 GaAs 中的 Er 注入 RBS 浓度分布
(a) 退火前 (b) 退火后
Fig. 3 RBS depth profile of concentration of Er-implanted in GaAs (a) as implanted (b) annealed

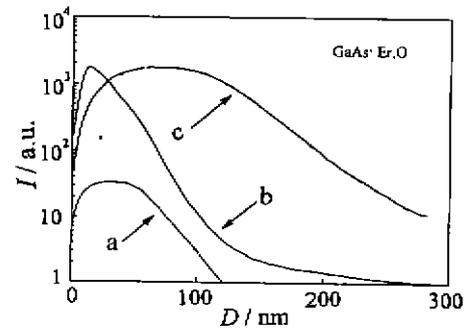


图 4 GaAs 中共注入 Er、O SIMS 深度剖面分布
(a) 单注入 Er 的 GaAs 中 O 本底分布
(b) 共注入 Er、O 的 GaAs 中 O 的分布
(c) 单注入和共注入 Er 的分布
Fig. 4 SIMS depth profiles of Er and O co-implanted in GaAs (a) depth profile of O background in GaAs:Er, (b) depth profile of O in GaAs:Er,O, (c) depth profile of Er in GaAs:Er,O and GaAs:Er,O

图 4(b)所示为共注入 Er、O 的 GaAs(Er,O)退火后 O 的分布 SIMS 分析的典型结果.¹⁶O 的剖面与 Er 的分布不同, 靠近表面附近 (~ 20 nm) 为峰值,¹⁶O 的分布随剖面深度的变化而迅速下降.¹⁶O 的峰值离子电流 $\sim 2 \times 10^2$ ($I/a.u.$), 剖面深度以外的¹⁶O 分布基本为零, O

的剖面深度约为100nm,O和Er的峰值离子电流为同一量级,图4(c)为单注入和共注入Er的分布结果,表明共注入Er的深度剖面分布与单注入的GaAs:Er相同.

共注入Er,O的GaAs中光致发光谱明显的增强和谐线变窄表明由于氧离子的存在,Er³⁺与O²⁻之间相互作用而增加了光激活的有效发光中心,从SIMS测量结果表明目前实验条件下,O离子的剖面深度较Er离子的为小,如能进一步增加O离子的注入深度,例如改变O的注入能量,可望获得更多的Er³⁺处于占位状态,从而使发光强度进一步增强.

2.3 光致发光谱

图5(a)和(b)分别给出 $T=10\text{K}$ 时单注入GaAs(Er)和双注入GaAs(Er,O)的PL谱,Er³⁺发光中心的主发光峰波长不变,具有Er³⁺离子4f电子能级跃迁的特征($\lambda=1.538\mu\text{m}$),但掺O后其PL谱强度(相对值)增加了10倍且谱线变窄,这是由于Er³⁺离子半径比GaAs中Ga原子大,晶体从RBS分析Er³⁺离子在GaAs晶格中占位情况表明,注入GaAs晶格后占据Ga³⁺位而成为有效发光中心的Er³⁺离子实际仅占极少数,因此单注入Er在GaAs晶体中发光强度较弱;而共注入Er和O时,由于O杂质在GaAs中与Er的相互作用,使注入GaAs中Er占据Ga³⁺位的数量明显增加,同时由于O具有比Er大的负电性,可能促使发生Er^{2+}→Er³⁺的离子价态改变,也使Er³⁺数量增加.}

3 结语

注入适量O杂质在GaAs:Er晶体中具有显著增强Er发光的作用,用SIMS对GaAs共注入Er,O进行研究和分析,实验分别给出退火前后单注入Er和共注入Er,O下的SIMS的深度剖面分布.

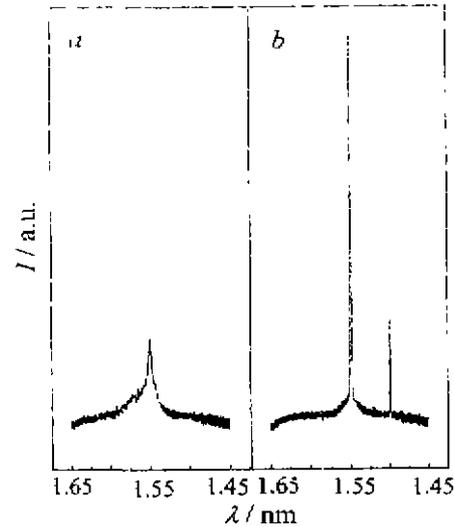


图5 $T=10\text{K}$ 时的PL谱
(a) 单注入Er的GaAs:Er
(b) 共注入Er和O的GaAs:Er,O
Fig. 5 PL spectra at $T=10\text{K}$ (a) Er-implanted in GaAs (b) Er and O co-implanted in GaAs

REFERENCES

- 1 Takahei K, Taguchi A. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**:1979
- 2 Klein P B, Moore F G, Dietrich H B. *J. Appl. Phys.*, 1991, **58**:502
- 3 LEI H B, XIAO F F, CHEN S B, et al. *Optoelectronics • Laser* (雷红兵,肖方方,陈世昂,等.光电子·激光), 1995, **6**, Supp: 121
- 4 ZHOU B Z, CHEN S B, LEI H B, et al. *Spectroscopy and spectral analysis* (周必忠,陈世昂,雷红兵等.光谱学与光谱分析), 1994, **14**:5
- 5 CHEN C J, WANG X Z, ZHOU B Z, et al. *J. Luminescence* (陈启嘉,王宇忠,周必忠等.发光学报), 1994, **15**:71

SECONDARY ION MASS SPECTROMETRY OF ERBIUM AND OXYGEN CO-IMPLANTED IN GaAs*

CHEN Chen-Jia LI Hai-Tao WANG Xue-Zhong

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

ZHOU Bi-Zhong LEI Hong-Bing XIAO Fang-Fang

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

P. Bottazzi

(C. N. R. Centro di Studio per la Cristallografia e la Cristallografia, 27100 Parma, Italy)

Abstract Er and O ions were co-implanted in II-V compound semiconductor GaAs (GaAs:Er,O). After face to face annealing the sharp photoluminescence (PL) spectra were observed at 1.538 μm , which correspond to the transition from the first excited state $^4I_{13/2}$ to the ground state $^4I_{15/2}$ of Er^{3+} . The intensity of PL was enhanced about ten times in comparison with the only Er-implanted GaAs sample; GaAs:Er.

Depth profiles of Er-implanted concentration were obtained and analyzed by Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) and Rutherford Back Scattering (RBS) measurements as implanted and annealed. Depth profiles of Er and O co-implanted were analyzed and studied by SIMS. The results indicate that a kind of optically active efficient luminescence center is formed in GaAs:Er,O.

Key words Er,O ions co-implanted, secondary ion mass spectrometry, photoluminescence.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the State Key Laboratory of Rare Earth Material Chemistry and Applications in Peking University
Received 1997-01-06, revised 1997-05-26