

阴极射线激发下 ZnO 薄膜室温 紫外发光的超线性增长规律*

郭常新 傅竹西 施朝淑

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要 研究了直流溅射 ZnO 薄膜在阴极射线激发下紫外光(约390nm)和绿光(约520nm)的发光与激发电子束电流密度的关系, 随激发电流密度增加绿光相对下降, 紫外光相对增强, 使得 ZnO 薄膜的发光颜色从绿变蓝紫. ZnO 薄膜绿光随电子束流密度的增长呈亚线性增长, 并在不高的束流密度下达到饱和, 而紫外发光随电子束流密度呈超线性增长, 这是 ZnO 薄膜在室温阴极射线激发下紫外受激发光的迹象. 是高密度激发下的一种超辐射受激发光.

关键词 ZnO, 阴极射线发光, 紫外激光, 超辐射受激发光

1 引 言

最近几年, 世界范围内出现了蓝色发光和激光的研究热潮, 原因是显示现象和计算机高密度存储应用的急需, 并获得了一些重要进展. 显然, 在芯片上产生比蓝光波长更短的紫外激光, 在计算机 CD 盘的应用中, 可以取代蓝光激光, 获得更高存取分辨率, 并提高光盘中的存储密度. 这一点, 有重大科学和应用的意义.

在1997年美国 Material Research Society 学术会议上, 日本和香港的一个合作小组宣布了 ZnO 薄膜在高密度三倍频 YAG:Nd 激光的激发下产生紫外激光的结果^[1]. 这为提高光盘存储密度而缩短读出和写入激光波长的研究开辟了新方向. 几乎同时, 日本的另外一个小组在 Appl. Phys. Lett. 上宣布了 ZnO 在 YAG:Nd 激光的激发下受激发光的类似结果^[2], 为提高光盘存储密度而缩短读出和写入激光波长的研究开辟了新方向.

ZnO 为六角结构, 直接带材料, 禁带宽度3.37eV(低温下, 室温稍低), 激子能级很深, 在导带底下59meV, 因此室温下并不离化. 因此, 在室温高密度(大于240kW/cm²)三倍频 YAG:Nd 的353nm 脉冲激光激发下, ZnO 中激子可以产生紫外受激发光, 随激发增加, 发射增益加大, 谱峰变窄, 且红移, 出射光出现方向性^[1,2]. 文献[1]认为, 薄膜产生紫外激光的原因是由它的边界面形成反射的谐振腔的说法, 但这仅仅是一种估计.

我们研究了 ZnO 薄膜的阴极射线发光光谱. 在室温阴极射线激发下, 随激发电流密度增加绿光(约520nm)相对下降, 紫外光(约390nm)相对增强. 还观察到 ZnO 薄膜紫外发光强度随电子束流密度的超线性增长, 使得 ZnO 薄膜的发光颜色从绿变蓝紫.

2 实验方法

ZnO 薄膜是用直流溅射法制备, 经过退火, 制成的样品是厚约200nm 的高度取向的结晶薄膜. ZnO 薄膜的发光在室温下由 YFC-1型阴极射线荧光粉发光特性测试仪测量, 阳极加速电压2~30kV, 电子束流0.002~5 μ A, 光斑面积1mm²到1cm². 光谱由 WDG05-型0.5米平面光栅单色仪测量.

* 国家自然科学基金资助课题

3 结果和讨论

退火后的 ZnO 薄膜在阴极射线激发下发出明亮的宽谱带绿光(约520nm)和紫外光(约390nm). 在电子束激发下, 随激发电子束流密度的增加, 绿光谱带相对下降, 紫外光谱带相对增强, 使得 ZnO 薄膜的发光颜色从绿变蓝紫(见图1). 图1给出了在阴极射线激发条件下的三条发光谱线, (a)、(b)、(c)的电子束流分别为0.06, 0.2和3.0 μA . 当电子束流从0.06, 0.2提高到3.0 μA 时, 绿光峰值从519nm 红移到523nm, 紫外光峰值从390nm 也红移到395, 404nm. 在10kV 阳极电压, $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 束流密度阴极射线激发下, ZnO 多数薄膜绿光较强, 但经某些后处理后 ZnO 薄膜的390nm 紫外光强于绿光. 用 YFC-1型阴极射线荧光粉发光特性测试仪, 在室温下用大束流密度电子束激发(阳极电压5kV, 电子斑直径 $\Phi 2\text{mm}$) ZnO 薄膜, 得到了 ZnO 薄膜390nm 紫外发光强度随电子束流密度的超线性增长规律(见图2, 图中过零点的虚线是作对比用的该超线性曲线在过零

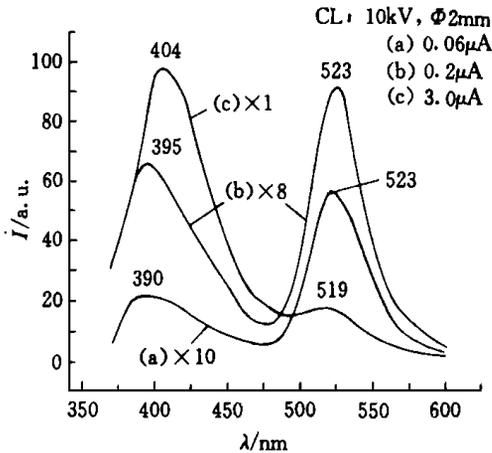


图1 ZnO 薄膜在不同电子束流密度下的阴极射线发光光谱

Fig. 1 Cathodoluminescent spectra of ZnO film under different electron beam current density.

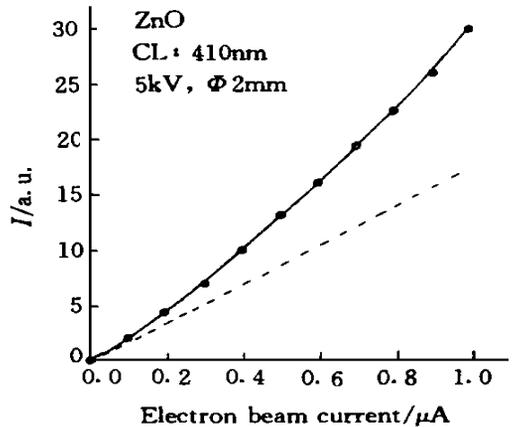


图2 室温下 ZnO 薄膜的阴极射线紫外发光强度随激发电子束流密度的超线性增长

Fig. 2 Ultraviolet cathodoluminescent intensity of ZnO film superlinearly increase with the increase of electron beam current at room temperature.

点处的切线), 看到了 ZnO 薄膜的在室温阴极射线激发下紫外超辐射受激发光的迹象. 相反, 在类似的激发条件下 ZnO 薄膜的520nm 绿光发射, 是亚线性增长, 并在不高的电流密度下很快达到饱和(见图3). 由此可见, ZnO 薄膜的紫外光和绿光来源于不同的发光中心. 从能量上来看, 390nm 的能量略小于室温下 ZnO 的禁带宽度, 可以推测390nm 紫外发光中心对应于 ZnO 中的室温激子. 如果 ZnO 薄膜的微结构是纳米数量级的六角蜂窝状结构^[1], 它的纳米级微小尺寸限制了电子的运动范围, 使 ZnO 薄膜中激子的结合能增大, 且电子和空穴的空间重合增加, 使振子强度增加, 甚至出现协振子效应, 这就是高密度激发下 ZnO 薄膜可能产生的激光的原因. ZnO 的这种紫外发光可能是在高密度激发下的一种超辐射受激发光.

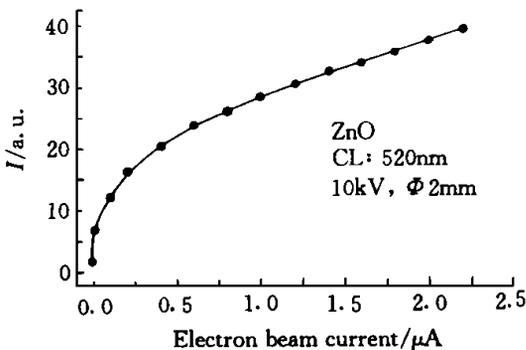


图3 室温下 ZnO 薄膜的阴极射线绿色发光强度随激发电子束流密度的亚线性增长

Fig. 3 Green cathodoluminescent intensity of ZnO film sublinearly increase with the increase of electron beam current at room temperature.

4 结 论

直流溅射 ZnO 薄膜在阴极射线激发下发射出宽谱带紫外光(约390nm)和绿光(约520nm), 随激发电流密度增加绿光相对下降, 紫外光相对增强, 使得 ZnO 薄膜的发光颜色从绿变蓝紫. 在室温下激发电流密度增加时, 绿光强度呈亚线性增长, 而紫外光强度呈超线性增长. 这是 ZnO 薄膜在室温阴极射线激发下紫外超辐射受激发光的现象.

参 考 文 献

[1] Segawa Y, Ohtomo A, Kawasaki M *et al*, Phys. Stat. Sol. (b), 1997, **202** 669.
 [2] Bag nall D M, Chen Y F, Zhu Z *et al*, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**(17) 6230.

SUPERLINEAR INCREASE PHENOMENON OF UV LUMINESCENCE OF ZnO FILM UNDER CATHODOLUMINESCENT EXCITATION

Guo Changxin Fu Zhuxi Shi Chaoshu

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

The dependence of ultraviolet (~ 390nm) and green (~ 520nm) luminescent peaks of ZnO film prepared by direct current sputtering under cathode-ray excitation on excitation electron beam current has been investigated. With the increase of the intensity of excitation electron beam current, green peak relatively decreases and ultraviolet peak relatively increases, so that the luminescent color of ZnO film changes from green to blue-violet. The green peak intensity increases sublinearly with the increase of the intensity of electron beam current and saturates under relatively low intensity of electron beam current. But the 390nm ultraviolet peak intensity increases superlinearly with the increase of the intensity of electron beam current. This is a sign of emitting ultraviolet laser from ZnO film under cathode-ray excitation under room temperature. This kind of ultraviolet laser from ZnO film may come from a super-radiation lasing luminescence under high density excitation.

Key words ZnO, cathodoluminescence, ultraviolet laser, super-radiation lasing luminescence