

银纳米晶掺杂玻璃基片对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜 的荧光增强及其数值模拟

孙天拓¹, 林 健^{1,2}, 魏恒勇¹, 冯昭彬¹

(同济大学 1. 材料科学与工程学院; 2. 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 采用电场辅助热扩散工艺制备了银纳米晶掺杂玻璃基片, 用非水解溶胶-凝胶法在基片上制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜, 研究表明, 玻璃基片中的银纳米颗粒对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜具有明显的荧光增强效果. 利用菲克第一、第二定律、欧姆定律、泊松方程对电场辅助热扩散过程进行了数值模拟, 计算了玻璃内银的浓度分布. 结果表明: 玻璃内银纳米颗粒的总量越大、近玻璃表面银纳米颗粒的浓度和粒度越大、银耗尽层的厚度越小, 荧光增强效果越好. 此外, 不仅近玻璃表面的银纳米颗粒可以产生荧光增强效应, 而且远离表面的银纳米颗粒也有荧光增强效应.

关 键 词: 银纳米晶; 碲酸盐薄膜; 电场辅助热扩散; 表面等离子体增强荧光; 数值模拟

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

Luminescence Enhancement of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Tellurite Films on Ag-nanoparticles-doped Glass Substrates and Numerical Simulating

SUN Tian-Tuo¹, LIN Jian^{1,2}, WEI Heng-Yong¹, FENG Zhao-Bin¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The glass substrates doped with Ag nanoparticles (NPs) were fabricated by the field-assisted thermal diffusion (FATD) process. The $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite thin films were deposited on these substrates *via* nonhydrolytic Sol-Gel method. It was found that the luminescence of the thin film was significantly enhanced by the Ag NPs embedded in the glass substrate. The distribution of Ag in the substrate after FATD process was calculated by numerical simulating on base of Fick's first and second law, Ohm's law and Poisson equation. The enhancement factor increased with the increase of concentration and diameter of Ag NPs near the glass surface. When the total amount of NPs decreased and the thickness of space-charge layer increased, the enhancement effect became weak. In addition, besides the Ag NPs near the glass surface the Ag NPs far from the glass surface could also contribute to the luminescence enhancement.

Key words: silver nanoparticles; tellurite films; field-assisted thermal diffusion; surface-plasmon-enhanced luminescence; numerical simulating

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺薄膜具有良好的荧光特性, 在彩色显示、光学数据存储等诸多领域具有应用前景,

因此人们对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺薄膜进行了大量的研究^[1-3]. 由于碲酸盐玻璃的声子能级很低, 碲酸盐薄

收稿日期: 2010-12-26; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 上海市科学技术委员会纳米专项基金(0852nm06500)

Nano-tech Foundation of Shanghai Science and Technology Committee (0852nm06500)

作者简介: 孙天拓(1986-), 男, 硕士研究生. E-mail: sttstudy@126.com

通讯作者: 林 健, 教授. E-mail: lin_jian@tongji.edu.cn

膜常被用作稀土发光物质的基质材料^[3].

当荧光物质分布于银等贵金属的纳米颗粒表面或附近时,金属纳米颗粒的表面等离子体共振吸收 (SPR)效应会大大增加荧光物质的荧光强度,这种现象被称为表面等离子体增强发光^[4-5].在研究金属表面增强荧光的过程中,人们提出了多种制备金属纳米颗粒的方法,如用溅射法在发光薄膜表面沉积金属纳米颗粒^[5-6]、用离子交换^[7]或溶胶-凝胶法^[8]向发光薄膜中掺入金属纳米颗粒.另外,用电场辅助热扩散工艺可以向玻璃基片内引入金属纳米颗粒,并通过改变扩散工艺调节金属纳米颗粒的分布,这是一种制备金属纳米晶掺杂玻璃的重要方法^[9-10].目前对电场辅助热扩散的研究多集中于对机理和工艺的讨论^[9-12],而 Wei 等^[13]对用该工艺制备的金属纳米晶掺杂玻璃对发光薄膜的荧光增强及其机制进行了研究.

随着计算机技术的不断发展,用数值模拟解释和预测实验结果逐渐成为材料科学中的一种重要研究手段.用有限差分法对浓度场进行数值模拟是研究扩散过程的常用方法^[14].本工作用电场辅助热扩散工艺制备银纳米晶掺杂玻璃基片,用非水解溶胶-凝胶法在基片上制备 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜,并用数值模拟方法计算电场辅助热扩散后玻璃内银的浓度分布,研究银纳米晶掺杂玻璃基片对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜的荧光增强效果.

1 实验

以厚度为 1 mm 的载玻片(SiO_2 , 72.4wt%; Na_2O , 13.6wt%; CaO , 8.1wt%; MgO , 3.2wt%; Al_2O_3 , 1.7wt%; 其它, 2.0wt%)为玻璃基片,在其表面涂覆 BYJ0775 型导电银胶,干燥后,以此面作为阳极,在表 1 所示 1 至 12 号各工艺条件下进行电场辅助热扩散(如表 1 所示),装置图如图 1 所示.热扩散结束后,取出样品,待冷却至室温,用稀硝酸洗去残余银胶,并清洗干净.

采用非水解溶胶-凝胶法制备 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜:以 TeO_2 和 1,2-丙二醇为原料,以对甲苯磺酸为催化剂,制备前驱体 1,2-丙二醇碲,并配成

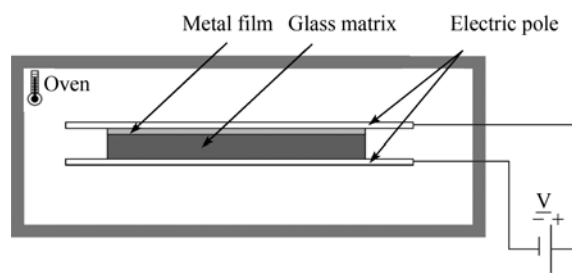


图 1 电场辅助热扩散装置示意图

Fig. 1 Sketch map of field-assisted thermal diffusion apparatus

浓度为 1.5mol/L 的 1,2-丙二醇碲的 1,2-丙二醇溶液;称取 NaNO_3 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 1,2-丙二醇中;按摩尔比 1:1 分别量取一定体积的乙酰丙酮和钛酸四正丁酯进行混合,并磁力搅拌得到两者的混合溶液.按照 $4\text{NaO}_{0.5}-4\text{TiO}_2-18\text{ZnO}-64\text{TeO}_2-1\text{ErO}_{1.5}-9\text{YbO}_{1.5}$ (摩尔分数)的组成将上述溶液混合,得到溶胶.称取一定量的聚乙烯吡咯烷酮(平均分子量 58000)溶解到乙二醇甲醚中,加入前驱体溶胶中混合搅拌.将溶胶旋涂在经过电场辅助热扩散处理的基片上,干燥后在 130°C 烘箱中保温 36 h,然后在 500°C 下煅烧 2 h,在玻璃基片表面制得 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜的同时,使玻璃中的银离子得以形核长大,析出银纳米颗粒.

用 980 nm 激光器(180mW)激发,用卓立汉光 Zolix 生产的组合式荧光分光光度计(PMTH-S1-CR131 光电倍增管探测器、HVC1800 高压稳压电源、ZAMP 放大器、SAC 样品室、DCS103 数据采集系统、Omni- λ 300 光谱仪)检测 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜的荧光发射光谱;采用 H-800 型透射电镜观察银纳米颗粒的形貌;采用 JXA-8100 型电子探针检测银离子在玻璃内的浓度分布.

2 电场辅助热扩散过程中银离子在玻璃基片中分布的数值模拟

若不考虑电极的边界效应造成的电场畸变,假设玻璃内与电极平行的任意截面上,各处的电势相

表 1 电场辅助热扩散工艺参数表
Table 1 Parameters of field-assisted thermal diffusion (FATD) process

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Voltage/V	400	500	600	700	600	600	600	600	700	700	700	700
Temperature/ $^\circ\text{C}$	250	250	250	250	220	250	280	300	250	250	250	250
Time/min	30	30	30	30	30	30	30	30	10	30	60	90

等, 各处的同种离子的浓度相等, 则玻璃内金属离子浓度的三维分布可以简化为金属离子浓度在垂直于玻璃表面方向上的一维分布。

2.1 计算原理

在电场辅助热扩散过程中, 金属离子在玻璃内的扩散流量由浓度梯度导致的扩散流量和外加电场导致的扩散流量组成。前者可由菲克第一定律^[15]给出, 后者可由欧姆定律^[16]给出, 另结合能斯特-爱因斯坦公式^[15], 可得扩散流量:

$$J = \frac{Dq}{kT} nEC - D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中, D 为金属离子在玻璃内的扩散系数, C 为金属离子浓度, q 为元电荷量, n 为金属离子所带电荷数量, E 为直流电场强度, k 为玻耳兹曼常数, T 为温度。将式(1)代入菲克第二定律^[15]可得,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{Dq}{kT} nE \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{Dq}{kT} nC \frac{\partial E}{\partial x} \quad (2)$$

将电场 E 与电势 U 的关系代入式(2), 得,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{Dq}{kT} n \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{Dq}{kT} nC \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (3)$$

另引入泊松方程^[16]以计算电势 U , 如式(4)所示,

$$\nabla^2 U = -\frac{\rho}{\varepsilon} = -\frac{(C - C_0)F}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中, U 为与阳极表面的距离为 x 处的电势, ε 表示玻璃的绝对介电常数, ρ 表示“空间电荷”^[17]的浓度, C_0 为玻璃中载流子的初始浓度, F 为法拉第常数。

玻璃内的钠离子的迁移对银离子的浓度分布有较大影响, 因此也需要计算钠离子浓度。根据式(3)可以建立银离子和钠离子的浓度方程, 与式(4)联立, 即可求解玻璃中银离子的浓度分布。

2.2 计算方法

采用有限差分法^[18]求解 2.1 建立的偏微分方程组。步骤如下:

- 1) 确定位置步长 h 和时间步长 t 等参数。
- 2) 采用高斯-赛德尔迭代法^[16]求解式(4), 计算 j 时刻的电势分布。
- 3) 将第 2 步计算出的电势分布和 j 时刻的金属离子浓度分布代入式(3)的差分格式, 求得 $j+1$ 时刻的金属离子浓度分布。
- 4) 重复第 2、3 步, 直至算出所有时刻的金属离子浓度分布。

2.3 参数设定

需要设定的参数包括: 工艺参数, 温度、外加电压、处理时间; 玻璃参数, 玻璃的介电常数、玻璃内的钠离子浓度; 格点参数, 时间步长、时间格点数、

位置步长、位置格点数; 银离子, 扩散系数(与温度有关, 将用实验数据对其进行确定)、表面银源中银总量。

2.4 扩散系数的确定

银离子的扩散系数 D 与温度的关系应满足:

$$D = D_0 e^{-\frac{B}{T}} \quad (5)$$

式中, T 为温度, D_0 和 B 为待定参数, 需要利用实验数据计算而得。

分别在 280°C 、 700V 、 60 min 条件下和 200°C 、 200 V 、 20 min 条件下(为获得较好的测试结果, 涂覆银源的量为常用量的 2 倍), 用电场辅助热扩散工艺制备银离子掺杂玻璃基片, 利用 JXA-8100 型电子探针样品断面进行 Ag 元素的线扫描分析, 获得银离子在深度方向上的相对浓度分布, 并在不同深度处进行点分析, 获得银离子的绝对浓度。

调节程序中扩散系数的值, 分别使上述条件下的计算结果与相应的 EDS 线扫描数据相吻合, 如图 2(a)、(b)所示; 另外, 点分析获得的图 2(a)中曲线平台的浓度值约为 10000 mol/m^3 , 故设银在玻璃内的最大浓度为 10000 mol/m^3 。得到 280°C 和 200°C 的扩散系数, 代入式(5), 可得到一个二元方程组。解得 D_0 、 B , 代入式(5), 可得到扩散系数与温度的关

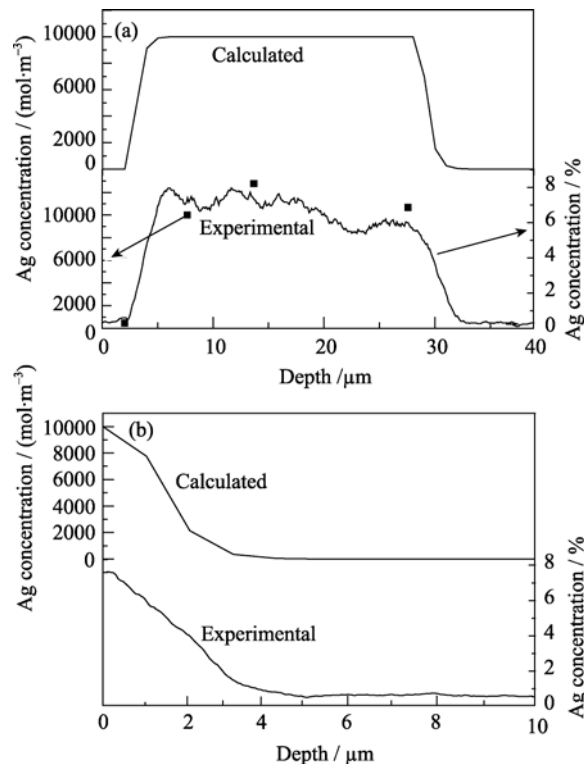


图 2 玻璃基片中银浓度分布计算和实验结果对比

Fig. 2 Distribution of Ag concentration in the glass slides obtained by calculation and experiment

(a) 280°C , 700 V , 60 min ; (b) 200°C , 200 V , 20 min

系式:

$$D = 3.2029 \times 10^{-13} \times e^{-\frac{3.1634 \times 10^3}{T}} \quad (6)$$

根据式(6)可计算任意温度时的扩散系数.

3 结果与讨论

电场辅助热扩散的工艺参数如电压、温度、时间会影响玻璃基片中银纳米晶的分布,进而影响基片表面发光薄膜的荧光性能.下文将根据数值模拟的结果对电压、时间、温度对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜荧光性能的影响进行讨论.

3.1 电场辅助热扩散电压对荧光增强的影响

图 3 为采用表 1 中 3 号工艺制备并镀膜煅烧后的掺银玻璃基片中的银纳米颗粒的 TEM 照片.从图 3 可以看出,在掺银玻璃基片中存在着银纳米颗粒,平均粒径约为 12nm.图 3 插图是银纳米颗粒的选区电子衍射图样,(111)、(200)、(220)、(311)的衍射花样说明银纳米晶属面心立方结构.

以表 1 中 1 至 4 号工艺,分别制备四个未涂银胶样品和四个涂银胶样品,制发光薄膜后,检测其荧光性能如图 4 所示.从图 4 中可以看出,加载不同的电压,掺银玻璃基片表面的薄膜的荧光强度均较无银样品高.这种荧光增强效应可用 Lakowicz 提出的辐射等离子体模型^[19]进行分析,即激发态的稀土离子能够将能量以非辐射的形式传递给银表面等离子体,使其产生与激发态稀土离子相同的荧光辐射,从而增强荧光辐射强度.

将图 4 中薄膜各荧光峰位的增强倍率做成如图 5 所示的柱状图,可以看出基片中的银纳米晶对薄膜的 526、546、657nm 的发光增强效果随电压增

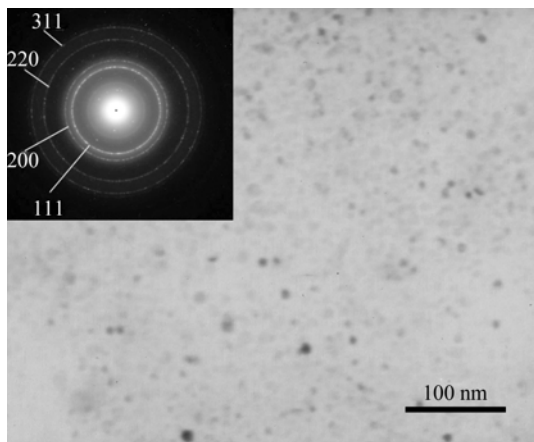


图 3 250℃, 600V, 30min 条件下制备并镀膜煅烧后的掺银玻璃基片中的银纳米颗粒的 TEM 照片和选区电子衍射花样
Fig. 3 TEM image and SAED pattern of Ag NPs embedded in the glass slides fabricated by FATD at 250℃, 600V for 30min

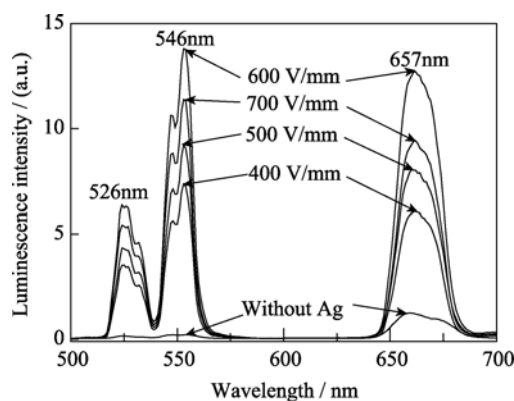


图 4 热扩散电压对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐薄膜发光的影响
Fig. 4 Luminescence of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite thin film on the Ag-doped glass fabricated by FATD at different voltages

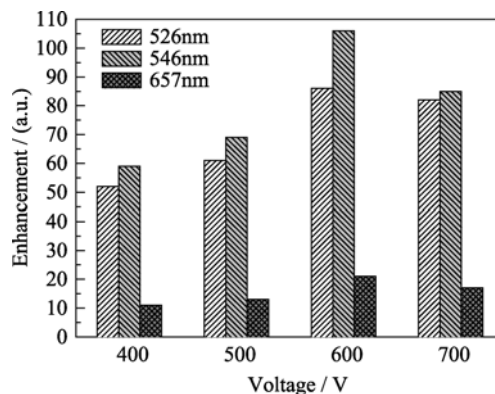


图 5 扩散电压对薄膜的荧光增强的影响
Fig. 5 Enhancement of luminescence from $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped tellurite thin films on the Ag-doped glass fabricated by FATD at different voltages

大而先增强后减弱.按表 1 中 1 至 4 号工艺进行电场辅助热扩散后的银离子浓度分布计算结果如图 6 所示,可以看出:在 400 至 600V 间,电压越高,进入玻璃基片的银离子的总量就越多,这样,在热处理之后形成的银纳米颗粒总量也就越多.这说明图 5 中增强效果的逐渐增大与玻璃内银纳米颗粒的总量有关,总量越大,增强越大.而从图 6 中可以看出,银纳米颗粒的富集深度达到数微米,即说明距稀土离子几微米的银纳米颗粒仍然具有增强效应.这可能与金属纳米颗粒的长程效应有关,即金属纳米颗粒之间的共振耦合作用不仅可以产生强大的局域电磁场,而且可以实现表面等离子振荡产生的电磁波在纳米颗粒之间传输,其传播的距离有时可达几十微米^[20].Wei 等^[13]的研究也表明,那些远离玻璃表面的银纳米颗粒也能够通过电磁场耦合长程传输作用接受激发态稀土离子的能量,从而产生与稀土离子辐射波长一致的辐射,起到增强荧光作用.因此,银纳米颗粒的总量越大,通过长程效应对稀土离子进行荧光增强的效果就越强.

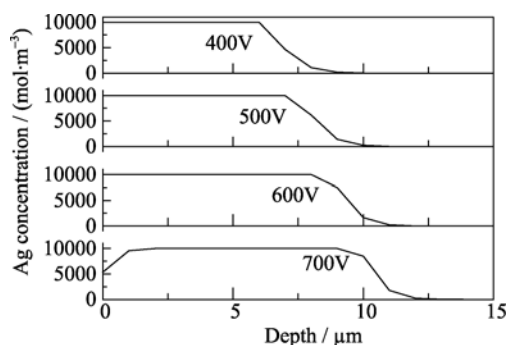


图 6 在 250°C、不同电压下进行电场辅助热扩散 30min 后玻璃基片银离子浓度分布计算结果

Fig. 6 Calculated distribution of Ag concentration in the glass slides fabricated by FATD at 250°C and different voltages for 30 min

另外, 虽然图 6 中 700V 的银总量最大, 但是近玻璃表面区域的银浓度较小, 这就导致热处理后表面区的银纳米颗粒的浓度或者粒度小于内部的银纳米颗粒, 图 5 中 700V 的荧光增强效果下降可能与此有关. 这说明表面银纳米颗粒对荧光的影响比内部的银纳米颗粒更显著, 其原因可能是, 内部银纳米颗粒的荧光增强作用有可能通过表面银纳米颗粒传递, 表面银纳米颗粒浓度或粒度的减小可能会极大地减弱能量的传递.

3.2 电场辅助热扩散温度对荧光增强的影响

以表 1 中 5 至 8 号工艺, 分别处理四个未涂银胶样品和四个涂银胶样品, 制备发光薄膜后, 检测其荧光性能, 将增强倍率做成如图 7 所示的柱状图. 可以看出增强效果随扩散温度升高先增大后减小.

图 8 为按表 1 中 5 至 8 号工艺进行电场辅助热扩散后的银离子浓度分布计算结果. 由图 8 可以看出, 随着扩散温度从 220°C 升高到 280°C, 玻璃基片中银的总量逐渐增多; 另外, 虽然图 8 中 300°C 的银总量最大, 但是近玻璃表面区域的银浓度较小. 根

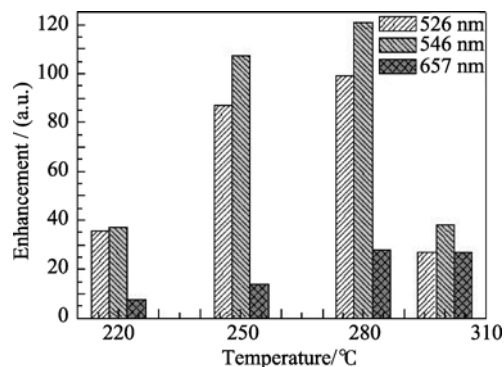


图 7 扩散温度对薄膜荧光增强的影响

Fig. 7 Enhancement of luminescence from $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite thin films on Ag-doped glass fabricated by FATD at different temperatures

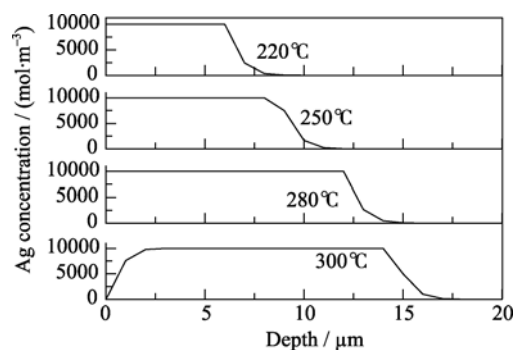


图 8 在 600 V、不同温度下电场辅助热扩散 30 min 后玻璃基片银离子浓度分布计算结果

Fig. 8 Calculated distribution of Ag concentration in glass slides fabricated by FATD at different temperatures

据 3.1 的讨论, 同样可以解释图 7 中出现的荧光增强效果随温度升高先增大后减小的现象.

3.3 电场辅助热扩散时间对荧光增强的影响

以表 1 中 9 至 12 号工艺, 分别处理四个未涂银胶样品和四个涂银胶样品, 制备发光薄膜后, 检测其荧光性能, 将增强倍率做成如图 9 所示的柱状图. 可以看出增强效果随扩散时间延长, 先增大后减小.

图 10 为按表 1 中 9 至 12 号工艺进行电场辅助热扩散后的银离子浓度分布计算结果. 由图 10 可以看出, 扩散时间由 10 min 延长到 30 min, 玻璃基片中的银总量逐渐增多, 因此在热处理之后形成的银纳米晶体逐渐增多, 进而荧光增强效果逐渐增大. 但是, 当银胶中的银全部进入玻璃后, 玻璃内的银离子会继续向内部扩散, 从而在阳极一侧形成银离子的耗尽层, 如图 10 中 60、90 min 所示. 随着扩散时间由 60 min 延长到 90 min, 耗尽层厚度增大, 即富银区与发光中心的间距变大, 荧光增强效果减小. 这说明耗尽层的存在对荧光增强效果有很大的影响.

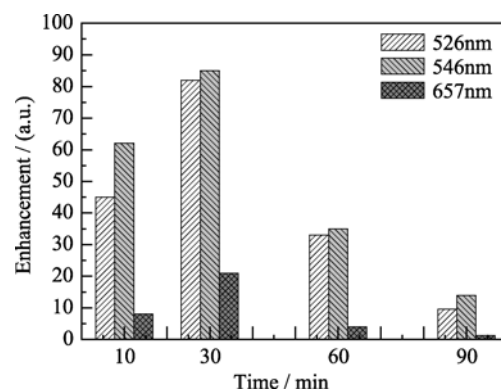


图 9 扩散时间对薄膜的荧光增强的影响

Fig. 9 Enhancement of luminescence from $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite thin films on Ag-doped glass fabricated by FATD for different times

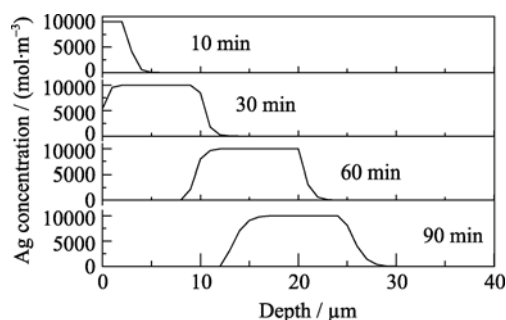


图 10 在 250℃、700V 条件下电场辅助热扩散不同时间后银离子浓度分布计算结果

Fig. 10 Distribution of Ag concentration in glass slides fabricated by FATD at 250℃, 700 V for different times

4 结论

实验结果表明, 银纳米晶掺杂玻璃基片对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐薄膜有明显的荧光增强效果, 并且随着电场辅助热扩散工艺参数如电压、温度、时间的增加, 荧光增强效果均出现先增大后减小的趋势. 对电场辅助热扩散过程中银在玻璃中的浓度分布进行数值模拟后, 发现荧光增强效果实际上与玻璃内的银的总量、近玻璃表面银纳米颗粒的浓度或粒度、银耗尽层的厚度有关: 银的总量越大, 增强效果越大; 近玻璃表面银纳米颗粒的浓度或粒度越小, 增强效果越小; 银耗尽层的厚度越大, 增强效果越小. 模拟结果同时说明, 不仅玻璃表面的银纳米颗粒可以产生荧光增强效应, 而且那些远离表面的银纳米颗粒也有荧光增强效应.

参考文献:

- [1] Battisha I K. Visible up-conversion photoluminescence from IR diode-pumped $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ nano-composite films heavily doped with $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ and $\text{Nd}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$. *J. Non-Cryst. Solids*, 2007, **353**(18-21): 1748–1754.
- [2] Chen S Y, Ting C C, Hsieh W F. Comparison of visible fluorescence properties between Sol-Gel derived $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ and $\text{Er}^{3+}\text{-Y}^{3+}$ co-doped TiO_2 films. *Thin Solid Films*, 2003, **434**(1/2): 171–177.
- [3] Ho H P, Wong W W, Wu S Y. Multilayer optical storage disk based on the frequency up-conversion effect from rare-earth ions. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(8): 2349–2353.
- [4] Kassab L R P, Bomfim F A, Martinelli J R, *et al.* Energy transfer and frequency upconversion in $\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ -doped PbO-GeO_2 glass

- containing silver nanoparticles. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(2): 239–242.
- [5] Aisaka T, Fujii M, Hayashi S. Enhancement of upconversion luminescence of Er doped Al_2O_3 films by Ag island films. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(13): 132105.
- [6] Verhagen E, Kuipers L, Polman A. Field enhancement in metallic subwavelength aperture arrays probed by erbium upconversion luminescence. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14586–14598.
- [7] Pivin J C, Sendova-Vassileva M, Lagarde G, *et al.* Optical activation of Eu^{3+} ions by Ag nanoparticles in ion exchanged silica-Gel films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(14): 2955–2958.
- [8] Marques A C, Almeida R M. Er photoluminescence enhancement in Ag-doped Sol-Gel planar waveguides. *J. Non-Cryst. Solids*, 2007, **353**(27): 2613–2618.
- [9] Lin J, Huang W H, Lei S H, *et al.* Preparation of silver nano-crystal patterns in oxide glasses under electric field accompanied by heat treatment. *J. Ceram. Process. Res.*, 2008, **9**(4): 416–420.
- [10] Cattaruzza E, Battaglin G, Gonella F, *et al.* Characterization of silicate glasses doped with gold by solid-state field-assisted ion exchange. *Mater. Sci. Eng. B*, 2008, **149**(2): 195–199.
- [11] Gonella F, Canton P, Cattaruzza E, *et al.* Field-assisted ion diffusion of transition metals for the synthesis of nanocomposite silicate glasses. *Mater. Sci. Eng. C*, 2006, **26**(5/6/7): 1087–1091.
- [12] Kapila D, Plawsky J L. Diffusion processes for integrated waveguide fabrication in glasses a solid-state electrochemical approach. *Chem. Eng. Sci.*, 1995, **50**(16): 2589–2600.
- [13] Wei H Y, Lin J, Feng Z B, *et al.* Enhancement of up-conversion luminescence from $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ -codoped tellurite films by Ag nanoparticles embedded in glass substrates. *Mater. Sci. Eng. B*, 2010, **172**(3): 321–326.
- [14] 徐 瑞. 材料科学中数值模拟与计算. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 129.
- [15] 贺蕴秋, 王德平, 徐振平. 无机材料物理化学. 北京: 化学工业出版社, 2005: 146–148, 158.
- [16] 叶齐政, 孙 敏. 电磁场. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 30, 46, 96, 98, 185–186.
- [17] Prieto X, Srivastava R, Linares J, *et al.* Prediction of space-charge density and space-charge field in thermally ion-exchanged planar surface waveguides. *Opt. Mater.*, 1996, **5**(1/2): 145–151.
- [18] 杨学桢. 数学建模方法. 保定: 河北大学出版社, 2000: 57–58.
- [19] Lakowicz J R. Radiative decay engineering 5: metal-enhanced fluorescence and plasmon emission. *Anal. Biochem.*, 2005, **337**(2): 171–194.
- [20] Lakowicz J R, Ray K, Chowdhury M, *et al.* Plasmon-controlled fluorescence: a new paradigm in fluorescence spectroscopy. *Analyt.*, 2008, **133**(10): 1308–1346.