

电场辅助离子迁移过程中离子迁移深度模型

王国强¹, 郝寅雷^{1,2}, 李宇波^{1,2}, 杨建义^{1,2}, 江晓清^{1,2}, 周 强^{1,2}, 王明华^{1,2}

(1. 浙江大学 信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江大学 唐仲英传感材料及应用研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 考虑了焦耳热导致的玻璃基片温度升高效应, 建立了玻璃基片上电场辅助离子迁移 (FAIM) 过程中离子迁移深度的计算模型。该模型首先通过求解玻璃基片的热平衡方程获得玻璃基片温度随时间的变化规律, 在此基础上获得流过玻璃基片的电流密度以及电荷通量密度随时间的变化规律。最后利用电荷通量密度与离子迁移深度的正比关系计算离子迁移深度。利用该模型获得的模拟结果与实验结果的比较显示, 在集成光学器件制作的实验参数下, 利用该模型所获得的离子迁移深度变化的规律与相应的实验结果接近。分析表明, 由于模型中考虑到了焦耳热导致的玻璃基片温度的升高, 该模型用于研究 FAIM 过程中的迁移深度具有更好的普适性。

关键词: 电场辅助离子迁移; 玻璃; 焦耳热效应

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0818-05

Modeling of ion migration depth in field-assisted ion-migration

Wang Guoqiang¹, Hao Yinlei^{1,2}, Li Yubo^{1,2}, Yang Jianyi^{1,2}, Jiang Xiaqing^{1,2},
Zhou Qiang^{1,2}, Wang Minghua^{1,2}

(1. Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Cyrus Tang Center for Sensor Materials and Applications, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A model for calculation of time dependence of ion migration depth in glass substrate in the process of field-assisted ion-migration (FAIM) was presented, in which glass wafer temperature rise induced by Joule heating effect was taken into consideration. In this model, glass wafer temperature rise behavior was firstly obtained by solving its thermal balance equation; after that, time dependence of electric current density, and in turn charge flux density flowing through glass wafer was calculated; finally, ion migration depth was calculated by utilizing its universally linear dependence on charge flux density. It can be observed that there exists a reasonable agreement between simulated data and experimental results in the respect of ion migration depth, for experimental conditions conventionally applied for glass-based integrated optical device fabrication. Analysis shows that this model possess wider adaptability than the conventional model in the respect of ion migration depth calculation, due to its involving of glass wafer temperature rise effect induced by Joule heating.

Key words: field-assisted ion-migration; glass; Joule heating effect

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(60977043); 浙江省自然科学基金(Y1100665); 中兴通信产学研项目

作者简介: 王国强(1988-), 男, 硕士生, 主要从事玻璃基集成光学器件的研究。

导师简介: 郝寅雷(1974-), 男, 副教授, 主要从事集成光学、光学材料的研究。Email: haoyinlei@zju.edu.cn

0 引言

采用离子交换技术在玻璃基片上制作的光波导具有损耗低、稳定性好、成本低廉等优点,适用于大批量、低成本集成光学器件的制作^[1]。1972年 Izawa 等首次报道了采用离子交换技术在玻璃基片上制作的光波导^[2]。从那时起,玻璃基光波导器件的研究在集成光电子领域受到了持续关注。由于研究者的不断努力,以及光通信产业发展的强力拉动,玻璃基集成光学器件已经在光信息网络中获得了越来越广泛的应用,如 FTTH 网络中大量使用的集成光功分器,以及集成光放大器等^[3-6]。

电场辅助离子迁移 (field-assisted ion-migration, FAIM) 是玻璃基集成光学器件制作的重要工艺步骤。采用 FAIM 技术可以将表面光波导的芯部在电场的作用下迁移至玻璃基片表面以下,变成掩埋式光波导,显著改善光波导的传输损耗和偏振相关性。

掩埋深度是掩埋式光波导的一项重要结构参数,它与 FAIM 过程中离子迁移深度直接相关并对光波导的性能有显著影响。因此,建立离子迁移深度与 FAIM 技术参数之间的计算模型对于优化玻璃基光波导性能具有重要意义。传统的计算模型认为 FAIM 过程中离子的迁移率保持不变,因此在恒定电压作用下离子迁移深度与随迁移时间线性增加。然而,最近的研究发现,FAIM 过程中的焦耳热效应会给离子迁移带来不可忽视的影响^[7-8]。恒定电压作用下,FAIM 过程中电流产生的焦耳热使玻璃基片的温度升高,同时,基片温度的升高使玻璃中的离子迁移率增大,这使流过玻璃基片的电流密度是一个随时间变化的量。这种电流随时间的变化使掩埋式光波导的掩埋深度随时间的变化规律偏离线性关系。而且,在通常的 FAIM 过程中,这种偏离是不可忽略的。因此,建立 FAIM 过程中离子迁移深度模型时考虑焦耳热效应导致的玻璃基片温度的升高非常必要。

考虑到焦耳热效应,文中作者对 FAIM 过程中离子迁移深度变化的模型进行了研究。首先建立了恒压条件下玻璃基片温度变化的热平衡方程;通过求解该热平衡方程,得到玻璃基片温度变化的规律,并进而获得流过玻璃基片电流的变化规律和电荷通量密度的变化规律。在此基础上,根据电荷通量密度

与离子迁移深度的正比关系计算离子迁移深度。这种模型由于考虑到了焦耳热效应导致的玻璃基片温度的变化,用于计算离子迁移深度更具有普适性。

1 理论模型

1.1 玻璃基片的温度

对于恒压下的 FAIM 过程,假定辅助电压保持恒定值 U ,则流过玻璃基片的电流为:

$$I = \frac{U}{r(T_{\text{glass}})} \quad (1)$$

该电流在玻璃基片中产生的焦耳热功率为:

$$P_{\text{Joule}} = \frac{U^2}{r(T_{\text{glass}})} \quad (2)$$

$r(T_{\text{glass}})$ 为玻璃基片电阻,与玻璃基片的温度有如下关系:

$$r(T_{\text{glass}}) = r_0 \exp\left(\frac{Q}{RT_{\text{glass}}}\right) \quad (3)$$

式中: r_0 为常数因子; Q 为离子扩散活化能; R 为理想气体常数; T_{glass} 为玻璃基片的热力学温度。 r_0 和 Q 可以通过参考文献[7]中所用的方法确定。

FAIM 过程中,高温炉腔维持恒温状态,玻璃基片温度升高导致玻璃基片通过离子交换器具向高温炉腔散热。根据传热理论,散热功率可以表示为:

$$P_{\text{dis}} = K(T_{\text{glass}} - T_f) \quad (4)$$

式中: K 为散热系数,取决于玻璃基片的散热条件,其数值可以根据参考文献[7]所用的方法确定; T_f 为高温炉腔温度。

根据以上分析,可以列出玻璃基片在 FAIM 过程中的热平衡方程:

$$P_{\text{Joule}} - P_{\text{dis}} = mC \frac{dT_{\text{glass}}}{dt} \quad (5)$$

式中: m 为玻璃基片的质量; C 为玻璃基片的比热容。

考虑到实际情况,在进行 FAIM 之初($t=0$ 时刻),玻璃基片的温度与高温炉腔相同,所以在求解方程(5)时的初始条件为:

$$T_{\text{glass}}|_{t=0} = T_f \quad (6)$$

通过求解玻璃基片的热平衡方程(5)可以获得 FAIM 过程中玻璃基片温度随时间的变化规律。

1.2 流过玻璃基片的电流

根据玻璃基片温度随时间的变化规律,利用公式(1)和公式(3),可以获得流过玻璃基片的电流在 FAIM 过程中的变化规律。

1.3 离子迁移深度

FAIM 过程中,掺杂离子迁移深度 d 可表示为^[8-9]:

$$d(t) = \frac{1-\alpha}{(1-\alpha N_A^-)C_B^0 F} \int_0^t \sigma(\tau) d\tau \quad (7)$$

式中: C_B^0 为玻璃基片中的一价离子的浓度; N_A^- 是 N_A 的在掺杂层中的数值, $N_A = C_A/C_B^0$, C_A 是掺杂离子在其扩散层中的浓度; σ 是通过玻璃基片的电流密度; F 是法拉第常数。

将公式(7)等号右侧积分前面的系数记为 M (M 是一个与玻璃材料以及掺杂离子种类以及掺杂量有关的常数),则公式(7)简化成:

$$d(t) = M \int_0^t \sigma(\tau) d\tau \quad (8)$$

显然, $\int_0^t \sigma(\tau) d\tau$ 表示电场辅助离子扩散过程中玻璃基片上的电荷通量密度(单位面积通过的电荷量),它对时间的依赖关系由电流密度曲线积分得到。

1.4 离子迁移深度计算模型

综上所述,考虑到焦耳热效应对离子迁移率的影响,在恒压下的 FAIM 过程中可以采用如下步骤确定离子迁移的深度:(1) 通过求解玻璃基片热平衡方程,获得玻璃基片在 FAIM 过程中的温度变化曲线;(2) 由玻璃基片的温度变化曲线获得流过玻璃基片的电流随时间的变化曲线;(3) 由玻璃基片电流变化曲线获得玻璃基片表面电荷通量随时间的变化曲线;(4) 根据电荷通量与迁移深度之间的正比关系确定离子迁移的深度。

2 结果与讨论

2.1 玻璃基片温度模拟结果

一般情况下,公式(5)表示的玻璃基片热平衡方程不存在解析解,文中采用四阶 Runge-Kutta 算法对该方程求数值解。

首先根据参考文献[17]中所述方法确定了相关参数: $r_0 = 1.33 \times 10^{-12} \text{ k}\Omega$, $Q = 130 \text{ kJ/mol}$, $K = 0.41 \text{ W/}^\circ\text{C}$;此外,玻璃基片质量 $m = 0.01 \text{ kg}$,玻璃材料比热 $C = 879 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$,高温炉的温度 $T_f = 237^\circ\text{C}$;计算步长选择 0.1 s 。

当辅助电压 U 分别取 50 V 、 100 V 、 150 V 、 200 V 、 250 V 、 300 V 和 350 V 时,玻璃基片的温度随时间变

化的计算结果如图 1 所示。相应地,图 2 给出了在相应条件下对玻璃基片温度变化的测试结果。

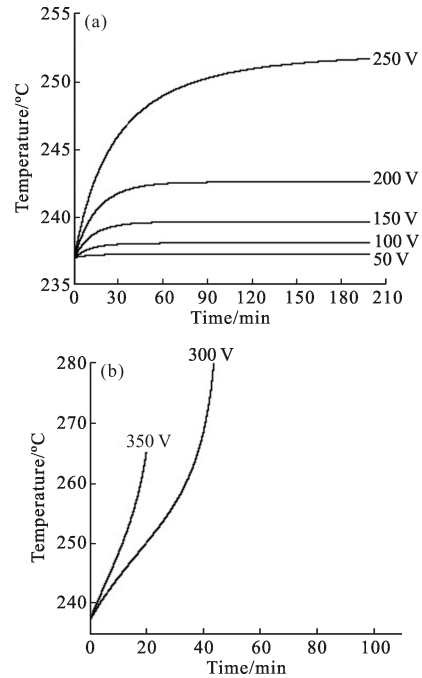


图 1 在 50~350 V 电压下,基片温度与时间关系的理论计算结果
Fig.1 Theoretical calculation result of the relationship between the glass substrate temperature and time with constant applied voltages of 50~350 V

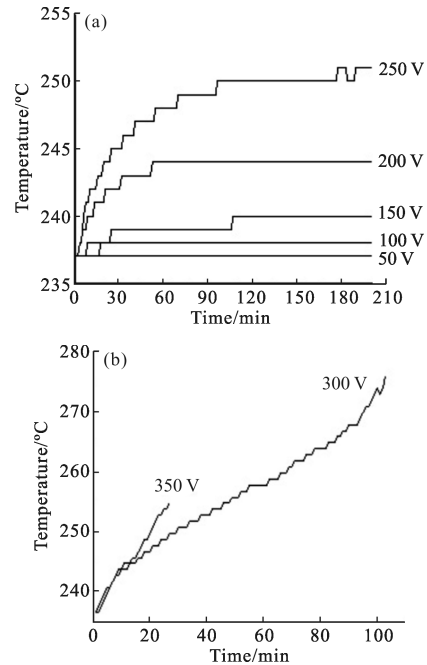


图 2 在 50~350 V 电压下,基片温度与时间关系的实验结果
Fig.2 Experimental result of the relationship between the glass substrate temperature and time with constant applied voltages of 50~350 V

对比图 1 与图 2 可知,对于辅助电压小于 250 V 的情况,模拟结果中玻璃基片温度上升的过程以及最终的平衡值都与实验结果相符:FAIM 的初始阶段基片温度和流过基片的电流随时间增加,而后达到稳定值。而对于电压值为 300 V 和 350 V 的情况,玻璃基片温度的测试值随时间的变化滞后于模拟值。这种滞后一方面归因于玻璃基片温度的测试方法,由于实验测试值实际上是玻璃基片外部紧靠玻璃基片的温度,当玻璃基片温度上升过快时,由于传热过程的限制,温度测试值发生明显滞后,另一方面,可能归因于基片温度过高导致熔盐内温差增大,对流传热的机制加强,加强了玻璃基片的散热。

一般情况下,玻璃基光波导器件制作过程中,辅助电压的选取须保证 FAIM 工艺过程中温度可以达到平衡状态,以避免玻璃基片温度持续上升。譬如对应于参考文献[7]中的条件,辅助电压应选择在 251 V 以下。图 3 给出了辅助电压在玻璃基集成光学器件制作的电压范围(0~251 V)内,玻璃基片温度的稳定值与辅助电压之间的关系。作为比较,图中也给出了辅助电压为 50 V,100 V,150 V,200 V,250 V 时玻璃基片平衡温度的测量结果。从图 3 中可以看出,模拟结果与测试结果符合得很好。

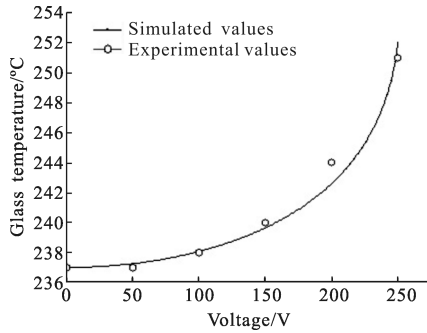


图 3 玻璃基片平衡温度与辅助电压的关系

Fig.3 Dependence of glass substrate equilibrium temperature on assisting voltage

2.2 流过玻璃基片的电流

图 4 给出了不同辅助电压下 FAIM 过程中流过玻璃基片的电流随离子迁移时间的变化。作为比较,图 5 给出了相应的实验结果。对比图 4 和图 5 可以看出,与前述玻璃基片平衡温度情况相似,对于辅助电压为 50~250 V 的情况,模拟结果与相应的实验值相符;而对于辅助电压为 300 V 和 350 V 的情况,电流模拟值与实验值有在一定差异。这种差异的原因

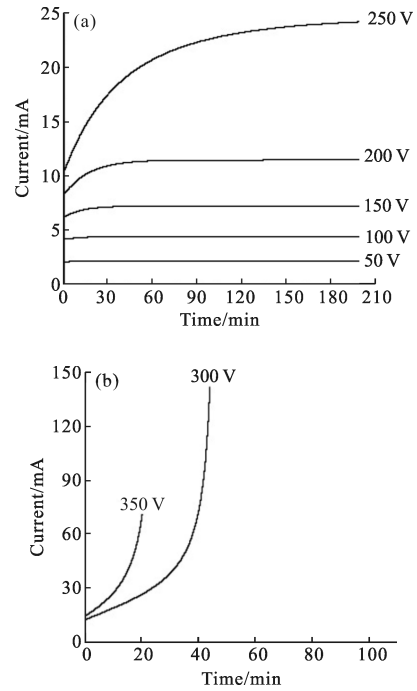


图 4 在 50~350 V 电压下,流过基片电流与时间关系的理论计算结果

Fig.4 Theoretical calculation result of the relationship between the current flowing through the glass wafer and time with constant applied voltages of 50-350V

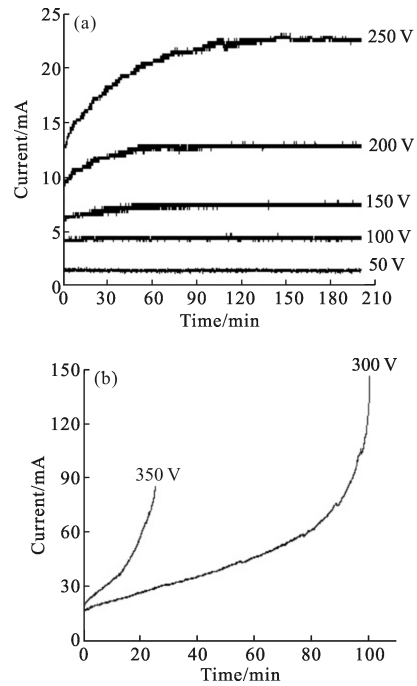


图 5 在 50~350 V 电压下,流过基片电流与时间关系的实验结果

Fig.5 Experimental result of the relationship between the current flowing through the glass wafer and time with constant applied voltages of 50-350 V

可能在于基片温度过高导致熔盐内部温差增大,对
流加强而导致的玻璃基片的散热机制的强化。

2.3 离子迁移深度与时间的关系

图 6(a)给出了电荷通量密度的模拟结果。从图中
可以看出,辅助电压较低时(譬如小于 200 V 的情况),
电流在玻璃基片中产生的焦耳热效应造成玻璃基片
的温度升高幅度不大,相应地流过玻璃基片的电流在
FAIM 过程中变化程度不大,因此电荷通量密度随时间
呈现近似的线性增加,这与现有的关于 FAIM 的模
型结论一致。当辅助电压增大时,电流在玻璃基片
中产生的焦耳热效应趋于明显,FAIM 过程中的电流变
化范围增大,相应地,电荷通量密度随离子迁移时间
的变化偏离线性关系,如 250 V,300 V 的情况。

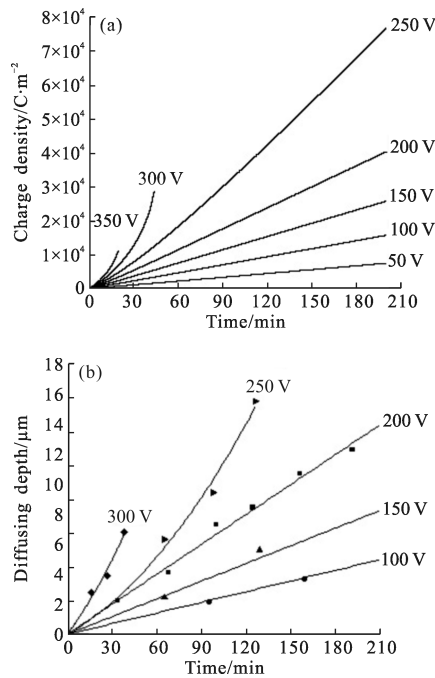


图 6 在 50~350 V 电压下, q 变化趋势的理论仿真和 100~300 V
电压下, 扩散深度的实验结果

Fig.6 Theoretical simulation result of the relationship between
 q and time with voltages of 50~350 V and experimental
result of the diffusing depth with voltages of 100~300 V

图 6(b)给出了在不同辅助电压下 Ag 离子在玻
璃基片中的迁移深度随 FAIM 时间的变化规律。图
中可以看出,辅助电压在 200 V 以下时,离子迁移深
度与时间有很好的正比关系,这与传统的 FAIM 模
型一致;而对辅助电压为 250 V 和 300 V 的情况,由
于焦耳热效应的影响,上述离子迁移深度对时间的
依赖关系偏离正比关系。

如公式(8)所示,离子迁移深度与迁移过程中玻
璃基片上的电荷通量密度与离子迁移深度成正比。
图 6(a)、(b)的相似性是这种正比关系地具体体现。由
图 6 可以推断,对于参考文献[7]所述的实验条件,比
例系数 M 大约等于 $3.3 \times 10^9 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$,即离子迁移深度
增加 $1 \mu\text{m}$ 对应的电荷通量密度约为 $3.3 \times 10^3 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3 结论

文中建立了恒压条件下 FAIM 过程中离子迁移
深度随时间的变化模型。与传统离子交换模型相比,
文中所述模型考虑到焦耳热效应引起基片温度变化
的影响,因此可以文中所述模型用于光波导深度的模
拟具有更好的普适性。文中提供的方法为优化玻璃基
集成光波导器件的制备技术提供了可靠的技术基础。

参考文献:

- [1] Ramaswamy R V. Ion-exchanged glass waveguide: a review [J]. *Lightwave Technol.*, 1988, 6(6): 984-1002.
- [2] Izawa T, Nakagome H. Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plates[J]. *Appl Phys Lett*, 1972, 21(12): 584-586.
- [3] Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, et al, Modeling of polarization noise in silicon integrated optical resonance gyroscope and performance analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1287-1293. (in Chinese)
- [4] Hao Yinlei, Zheng Weiwei, Jiang Suhang, et al. Engineering-oriented research of glass-based planar optical power splitter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 299-304. (in Chinese)
- [5] Shao G W, Jin G L, Li Q. Gain and noise figure characteristics of an Er^{3+} - Yb^{3+} doped phosphate glass waveguide amplifier with a bidirectional pump scheme and double-pass configuration[J]. *Opt Eng*, 2008, 47(10): 104201.
- [6] Xia Hongyun, Teng Chuanxin, Zhao Xiaowei, et al. Refractive index profiles of copper ion exchange glass planar waveguides[J]. *Chinese Phys Lett*, 2012, 29: 084215.
- [7] Hao Yinlei, Zheng Bin, Wang Hongjian, et al. Experiments and analysis on Joule heating effect in field-assisted ion diffusion[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(1): 014601.
- [8] Zheng Weiwei, Yang Bing, Hao Yinlei, et al. Charge-density flux model for electric-field-assisted ion exchange in glass [J]. *Opt Eng*, 2011, 50(9): 094602.
- [9] Prieto X, Linares J. Increasing resistivity effects in field-assisted ion exchange for planar optical waveguide fabrication [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(17): 1363-1365.