

Модификация поверхности многокомпонентных стекол электронно-лучевой обработкой для элементов микрофлюидики

В.В. Поляков, С.П. Авдеев

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: Рассмотрены процессы модификации стекла для элементов микрофлюидики путем локального теплового нагрева электронным лучом сопровождающиеся десорбцией элементного состава поверхности стекла. Исследовались образцы силикатного стекла, подготовленные по стандартной технологии полировки и после электронно-лучевой обработки. Проведенные оценки показали, что глубина обеднения поверхностного слоя слабосвязанными щелочными элементами достигает 20-50 нм. При этом температурный фронт обработки достигает глубины 50 мкм.

Ключевые слова: микрофлюидика, электронно-лучевая обработка, элементный состав стекла, диффузия, десорбция, уравнение Френкеля–Андраде.

Как известно [1,2], в качестве материала при создании элементов микрофлюидики и биочипов обычно используют стекло, пластик, или кремний. Однако, исходя из технико-экономических требований, чаще всего используют стеклянные подложки. Для формирования каналов при их изготовлении используются эллионные технологии [1]. В связи с этим, особое внимание уделяется изменению элементного состава в тонком поверхностном слое многокомпонентных стекол при воздействии на их поверхность электронным, лазерным или плазменными пучком. Подобное рассматривались в работах [3-5]. В указанных источниках состав поверхностного слоя определялся совокупностью процессов диффузии и десорбции. Однако реализация их может идти по двум направлениям нетермическому или термическому. Нетермический путь наблюдается при малых токовых и низкоэнергетических воздействиях электронного потока и связан с Оже-релаксацией глубоких уровней [4]. Термический путь связан с термодинамической неустойчивостью многокомпонентной поверхности в условиях низкого динамического вакуума [5], ослаблением в области

высоких температур связей Si-O-Me и наличием в материале элементов с низким уровнем энергии активации десорбции[6].

Процесс формирования поверхности стекла при электронном облучении определяется тепловым действием электронного луча. При этом изменение элементного состава поверхностного слоя протекает по термическому пути. Предварительный подогрев пластины до температуры 400⁰С активизирует поверхностные процессы удаления молекул адсорбированной воды и только при длительном термическом воздействии вызывает выход на поверхность элементов с положительной энергией сегрегации [7]. В случае электронно-лучевой обработки (ЭЛО), когда весь процесс длится 30-60 мин., предварительный подогрев незначительно влияет на элементный состав поверхности материала.

Обеднение поверхностного слоя стекла под действием электронного луча может быть оценена по известному соотношению

$$h \approx \sqrt{D_i \cdot \tau},$$

где D_i - коэффициент диффузии i -го компонента,

$\tau = \sqrt{\frac{L - x_0 + x_1}{V}}$ - время существования ванны расплава под лучом, здесь L - ширина луча, x_0 -координата начала плавления, x_1 -координата точки расплава, соответствующая температуры застывания материала.

Используя ранее полученные соотношения для оценки глубины зоны обеднения, получим:

$$h \approx \left[D_i \cdot \frac{(1 - X_s + X_m)}{V} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Коэффициент диффузии i -го компонента можно определить из уравнения Стокса-Эйнштейна [8]:

$$D_i = k \cdot T / (\mu \cdot r_i), \quad (2)$$

где k - постоянная Больцмана; T -температура; μ - коэффициент вязкости материала при данной температуре; r_i - радиус иона i -го компонента.

Используя соотношения (1), (2) и распределение температуры под электронным лучом можем оценить глубину обеднения поверхности слабосвязанными элементами в зоне расплава. Так как температура на поверхности составляет 1273К и вязкость $\mu=6,8 \cdot 10^{-2}$ Па·с., то глубина составит ≈ 20 нм. Это значение близко к полученным экспериментально в работе [9]. По этим данным глубина залегания объемной концентрации от поверхности для натрия и калия после ЭЛО была сдвинута в глубь на 45–50нм, 20–26нм соответственно.

В зависимости от режима ЭЛО глубина расплава может составлять от 1 - 2 мкм, однако температурный фронт обработки достигает глубины до 50 мкм. Зная распределения температуры по глубине [10], мы можем определить изменение вязкости стекла по глубине, используя уравнение Френкеля–Андраде, которое справедливо в области температур выше T_f (для силикатного стекла $T_f=500^{\circ}\text{C}$):

$$\mu = A \cdot \exp(E_{\mu}/R \cdot T), \quad (3)$$

где E_{μ} - свободная энергия активации; R - универсальная газовая постоянная; T - температура; A - константа, зависящая от химической природы вещества. В результате, подставляя выражение (3) в (2) и затем в (1) можем получить значения глубины обеднения поверхности стекла (рис. 1).

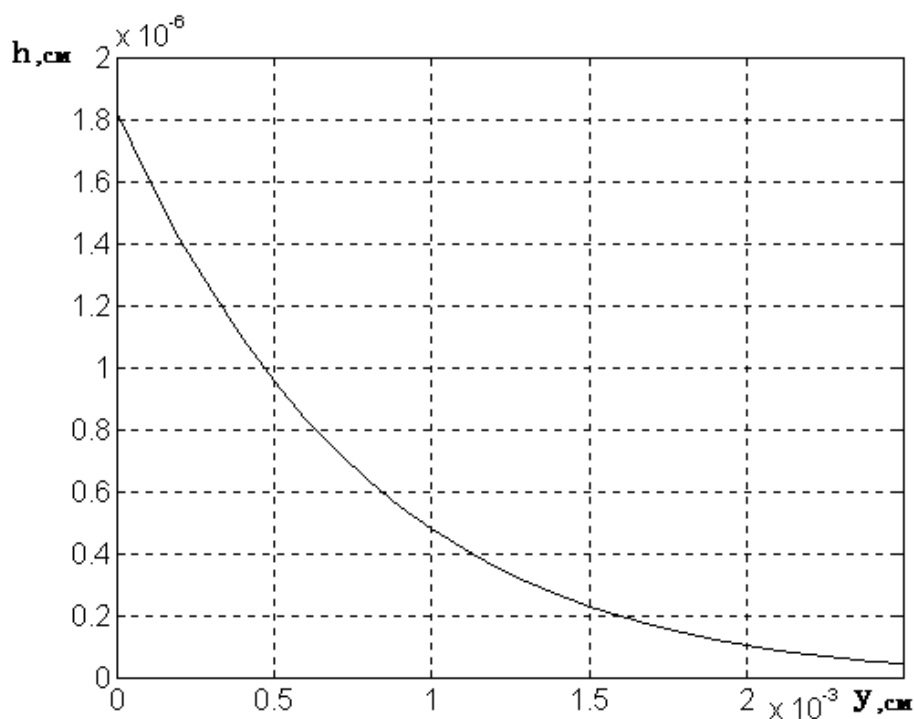


Рис. 1. -Глубина обеднения поверхностного слоя стекла

Из полученной оценочной кривой изменения глубины обеднения поверхностного слоя в стекле можно заключить, что модификация поверхности силикатных стекол в среднем происходит на глубину до 10нм. Таким образом, ЭЛО поверхности стекла при формировании элементов микрофлюидики не приводит к существенному обеднению поверхностного слоя стекла слабосвязанными щелочными элементами.

Исследования проводились с использованием оборудования центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Литература

1. Матвеев С.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И., Лисицын С.А., Смирнов В.А. Формирование структур микрофлюидики для гибридных систем методом фокусированных ионных пучков // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2) URL:ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1359

2. Vyazmitin V.N., Polyakov V.V. Microfluidic device for the separation of cancer cells in the blood // International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2016): Surabaya, Indonesia, 19-22 June 2016. p. 301.

3. Серба П.В., Авдеев С.П., Петров С.Н., Гаранжа С.Н., Луговой Е.В. Электронно-лучевая обработка оптических компонентов на основе боролантановых стекол, применяемых в приборе ориентации по Полярной звезде // Инженерный вестник Дона, 2011, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/555

4. Ohushi F., Holloway P.H. General model of sodium desorption and diffusion during electron bombardment of glass // J. Vacuum Sci. Technology. 1982. V.20, №3. pp.863-867.

5. Никитин В.В., Комолова Л.Ф. Электронно-стимулированный процесс в металлизированных щелочно-галогидных кристаллах //Изв. АН СССР, сер. физ. 1987.Т.51, №3.С.489-492.

6. Wurzburg E., Marmur A. Laser cleaning of glass surfaces: the effect of thermal diffusion // J. Colloid and Interface Sci. 1987. V.119, №2. pp.362-370.

7. Хенерт М., Раушенбах Б. Исследование поверхностных слоев силикатных стекол // Физика и химия стекла. 1983. Т.9, №6.С.696-703.

8. Евстропьев К.К. Диффузионные процессы в стекле. Л: Стройиздат, 1970. 320 с.

9. Авдеев С.П., Дудко Г.В., Кравченко А.А., Чередниченко Д.И., Полянский М.П. Вторичноэмиссионные свойства свинцовосиликатных стекол после электронного облучения // Физика и химия стекла. 1996. Т.22, №1.С.39-43.

10. Авдеев С.П. Разработка электронно-лучевой технологии изготовления малошумящих микроканальных пластин // Автореферат кандидатской диссертации. г. Таганрог, 1997. 185 с.



References

1. Matveev S.A., Kolomijcev A.S., Il'in O.I., Lisicyn S.A., Smirnov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (part 2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1359
2. Vyazmitin V.N., Polyakov V.V. International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2016): Surabaya, Indonesia, 19-22 June 2016. p. 301.
3. Serba P.V., Avdeev S.P., Petrov S.N., Garanzha S.N., Lugovoj E.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/555
4. Ohushi F., Holloway P. H. Vacuum J. Sci. Technology. 1982. V. 20, No. 3. Pp.863-867.
5. Nikitin V.V., Komolova L.F. Izvestija AN SSSR, serija fizicheskaja. 1987. V.51, №3. pp. 489-492.
6. Wurzburg E., Marmur A. J. Colloid and Interface Sci. 1987. V. 119, № 2. pp.362-370.
7. Henert M., Raushenbah B. Fizika I himija stekla. 1983. V.9, №6. pp. 696-703.
8. Evstrop'ev K.K. Diffuzionnye processy v stekle [Diffusion processes in glass]. L: Strojizdat, 1970. 320 p.
9. Avdeev S.P., Dudko G.V., Kravchenko A.A., Cherednichenko D.I., Poljanskij M.P. Fizika I himija stekla. 1996. V.22, №1. pp. 39-43.
10. Avdeev S.P. Razrabotka jelektronno-luchevoj tehnologii izgotovlenija maloshumjashhih mikrokanal'nyh plastin [The development of electron-beam fabrication technology low-noise microchannel plates]. Avtoreferat kandidatskoj dissertacii. Taganrog, 1997. 185 p.