

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2011 г. А. А. Жигалов*; А. И. Игнатъев*; Н. В. Никоноров*, доктор физ.-мат. наук;
О. А. Подсвиров**, доктор физ.-мат. наук; А. И. Сидоров*, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: aisidorov@qip.ru

Экспериментально показано, что облучение силикатных стекол электронным пучком приводит к формированию в приповерхностном слое стекла слоистой структуры с повышенным показателем преломления, обладающей волноводными свойствами. Данный эффект связан с локальным увеличением показателя преломления стекла в результате полевой миграции положительных ионов металла в область отрицательного объемного заряда.

Ключевые слова: оптический волновод, силикатное стекло, электронный луч.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2290, 060.2300

Поступила в редакцию 27.04.2011

Силикатные стекла являются важным материалом для устройств интегральной оптики. Они технологичны и обладают высокими оптическими и механическими характеристиками. Существует ряд методов формирования градиентных оптических волноводов в стеклах. К ним относятся термодиффузия, метод ионного обмена, метод ионной имплантации и запись волноводов лазерным лучом [1–4]. Все эти методы основаны на локальных изменениях состава, структуры или внутренних механических напряжений в стекле, приводящих к локальному увеличению показателя преломления. В работах [5, 6] показано, что при облучении пучком электронов натриево-силикатных стекол, содержащих ионы серебра, в приповерхностном слое стекла возникает отрицательный объемный заряд, приводящий к полевой миграции подвижных положительных ионов металла из объема стекла к его поверхности. Такое перераспределение ионов металла должно приводить к увеличению показателя преломления стекла в приповерхностном слое, т. е. к формированию оптического волновода. Целью настоящей работы была экспериментальная проверка возможности записи в стеклах волноводных структур электронным лучом и оценка характеристик таких волноводов.

Для проведения исследований использовались два типа стекол: фототерморелактивационные (ФТР) стекла [7] с ионами серебра и натриево-боросиликатные (НБС) покровные стекла. ФТР стекла изготавливались в СПбГУ ИТМО и имели следующий исходный состав: $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaF}-\text{NaCl}$ с добавками CeO_2 (0,02 вес%), Ag_2O (0,47 вес%) и Sb_2O_3 (0,2 вес%). Образцы представляли собой полированные плоскопараллельные пластины толщиной 1,5–2 мм. Показатель преломления ФТР стекла, измеренный рефрактометром Аббе ИРФ-454, составил 1,499, а НБС стекла – 1,511. Облучение электронами проводилось на сканирующем электронном микроскопе JEVD-2 при энергии электронов $E = 10$ кэВ. Плотность электронного тока составляла $j = 0,5\text{--}5$ мкА/см², доза электронного облучения варьировалась от $Q = 0,7$ до 2,5 мК/см². Облучение проводилось при комнатной температуре. Для удаления поверхностного заряда образцы покрывались слоем Al толщиной 50–100 нм, который после облучения электронами удалялся травлением в растворе КОН. Облученная зона представляла собой полосу 1×25 мм и формировалась путем перемещения электронного луча вдоль поверхности стекла (рис. 1а). Возбуждение волноводных мод проводилось призмным методом

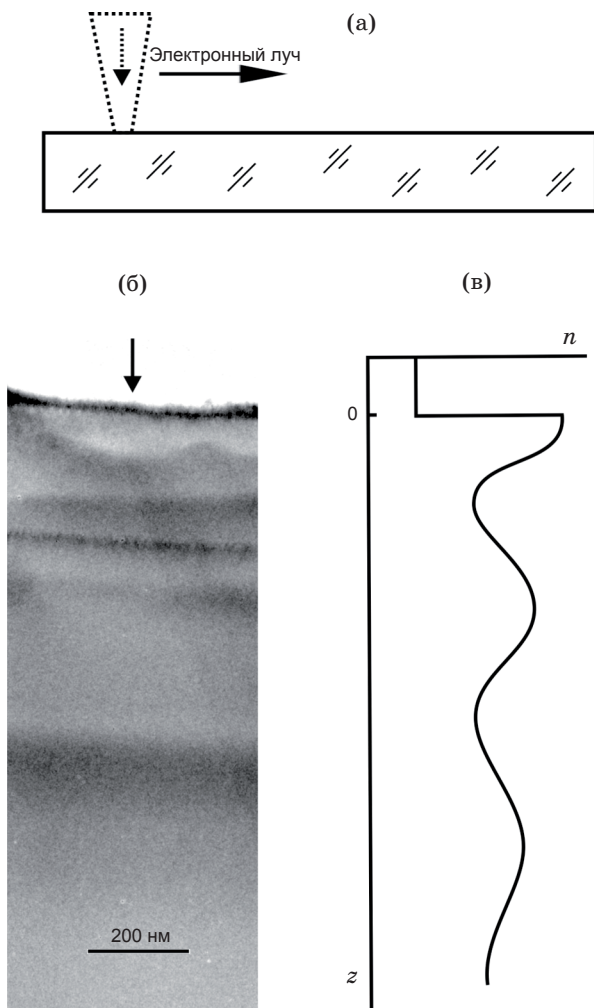


Рис. 1. Схема записи волновода (а). ТЕМ-изображение слоев наночастиц серебра в ФТР-стекле после электронного облучения и термообработки (б), стрелкой отмечена поверхность стекла. Качественное распределение показателя преломления по глубине (в).

[1, 8] для ТМ-поляризации падающего излучения. Источником излучения служил He-Ne лазер ОКГ-13 ($\lambda = 632$ нм). Для модификации сформированных волноводов проводилась дополнительная термообработка образцов в муфельной печи (*Neibotherm*) при температуре 350 °С в течение 1 ч. Выбор режима термообработки важен для ФТР-стекла. Это связано с тем, что при увеличении температуры и продолжительности нагрева в ФТР-стекле, облученном электронами, формируются наночастицы металлического серебра [6]. В данном случае это нежелательно, так как приведет к существенному увеличению коэффициента поглощения.

Эксперименты показали, что облучение электронами вызывает образование вблизи поверхности стекла одномодового градиентного волновода. Ниже приведены диапазоны углов θ падения излучения на призму, при которых возбуждается волноводная мода.

ФТР-стекло после облучения электронами ($E = 10$ кэВ, $Q = 2,1$ мК/см², $j = 2,1$ мкА/см²) – $\theta = 21^{\circ}16' - 22^{\circ}16'$, $\Delta\theta = 1^{\circ}$,

ФТР-стекло после термообработки – $\theta = 22^{\circ}10' - 22^{\circ}18'$, $\Delta\theta = 8'$,

НБС-стекло после облучения электронами ($E = 10$ кэВ, $Q = 5$ мК/см², $j = 2,5$ мкА/см²) – $\theta = 19^{\circ}19' - 22^{\circ}35'$, $\Delta\theta = 3^{\circ}16'$,

НБС-стекло после термообработки – $\theta = 23^{\circ}24' - 24^{\circ}26'$, $\Delta\theta = 1^{\circ}2'$.

Отметим, что диапазоны углов падения излучения на призму, при которых возбуждается волноводная мода, относительно велики. После термообработки происходит уменьшение этих диапазонов углов.

Рассмотрим некоторые особенности процессов, происходящих в стекле при облучении электронами. Расчет показывает, что при энергии электронов в пучке 10 кэВ толщина приповерхностного слоя стекла, в котором электроны теряют энергию, равна 0,5 мкм, а область максимальных потерь энергии лежит на глубине 0,25 мкм от поверхности. Термализованные электроны образуют в приповерхностном слое отрицательный объемный заряд, который вытягивает подвижные положительные ионы металлов (Na^+ , Ag^+) из объема стекла к поверхности. Увеличение концентрации ионов металлов, имеющих высокую поляризуемость, приводит к образованию в приповерхностном слое стекла области с повышенным показателем преломления n , обладающей волноводными свойствами. Наибольший вклад в этот процесс вносят ионы Na^+ ввиду их высокой концентрации и высокой подвижности [9].

Как показано в работе [10], методом численного моделирования при облучении электронами диэлектрика, содержащего носители заряда противоположных знаков, имеющие разную подвижность, объемный заряд распределяется в виде слоев. При этом напряженность электрического поля между слоями может достигать 100–200 кВ/см. Толщина слоев объемного заряда увеличивается по мере удаления от облучаемой поверхности. Экспериментально данный эффект подтвержден в работе [6]. На рис. 1б показано ТЕМ-изображение слоев наночастиц серебра в ФТР-стекле после электрон-

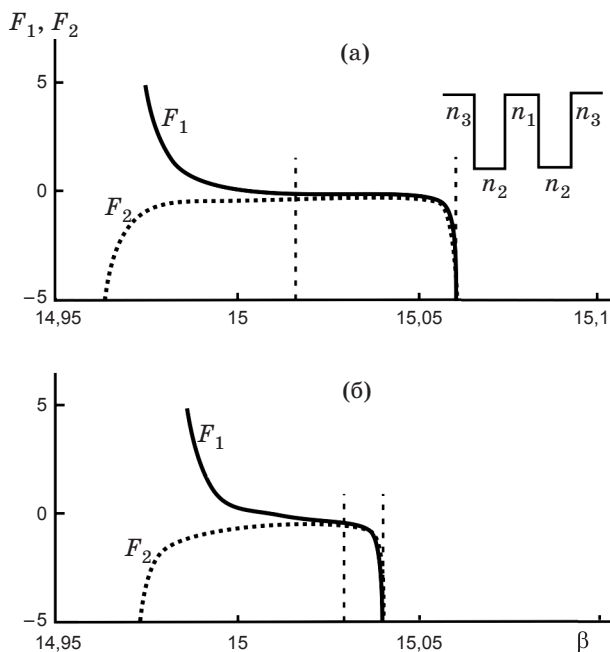


Рис. 2. Графическое решение характеристического уравнения $F_1(\beta) = F_2(\beta)$ симметричного W -волновода для моды TM_0 . а – $\Delta n = n_3 - n_2 = 0,01$, б – $\Delta n = 0,007$. Штриховой линией обозначены области существования решения. На вставке – профиль показателя преломления W -волновода.

ного облучения ($E = 10$ кэВ, $Q = 50$ мК/см²) и термообработки при $t = 500$ °С в течение 5 ч. Из рисунка видно, что наночастицы серебра располагаются слоями, параллельными поверхности, причем толщина слоев увеличивается по мере удаления от поверхности. Слои формируются в областях максимальной концентрации атомов серебра, соответствующих слоям объемного заряда. Поэтому естественно предпо-

ложить, что непосредственно после облучения электронами сформированный волновод имеет профиль показателя преломления по глубине, качественно показанный на рис. 1в. Структура такого волновода подобна структуре пяти-слойного волновода W -типа [11], имеющего сердечник с высоким n_1 , внутреннюю оболочку с низким n_2 и внешнюю оболочку с высоким n_3 (см. вставку в рис. 2а). В данном случае W -волновод является асимметричным с градиентным профилем показателя преломления. Это не позволяет провести измерение эффективного показателя преломления моды по стандартной методике [8]. Особенностью W -волноводов является поддержание ими моды нулевого порядка в широких пределах варьирования постоянной распространения β [11], а моды высших порядков становятся вытекающими. Иллюстрацией возможности варьирования β , а следовательно и угла падения θ , при котором возбуждается мода, служит графическое решение характеристического уравнения симметричного W -волновода со ступенчатым профилем показателя преломления, показанное на рис. 2а. Из рисунка видно, что для $\Delta n = n_3 - n_2 = 0,01$ решение существует в относительно широком диапазоне изменения β . При уменьшении Δn область существования решения сужается (рис. 2б). В данном случае это соответствует расплыванию слоев при термообработке в результате термической диффузии ионов и атомов металла.

Таким образом, электронное облучение стекла приводит к формированию волноводных структур вблизи его поверхности. Данный эффект может найти применение при создании интегрально-оптических устройств.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральная оптика. Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1978. 344 с.
2. Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития // Физ. и хим. стекла. 1999. Т. 25. № 1. С. 21–43.
3. Nolte S., Will M., Burghoff J., Tuennemann A. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics // Appl. Phys. A. 2003. V. 77. P. 109–111.
4. Cheng G., Mishchik K., Mauclair C., Audouard E., Stoian R. Ultrafast laser photoinscription of polarization sensitive devices in bulk silica glass // Opt. Express. 2009. V. 17. № 12. P. 9515–9520.
5. Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V.A., Usov O.A., Vostokov A.V. Modification of Ag containing photo-thermo-refractive glasses induced by electron-beam irradiation // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2010. V. 268. P. 3103–3106.
6. Игнатъев А.И., Нащекин А.В., Неведомский В.М., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Соловьев А.П., Усов О.А. Особенности формирования наночастиц серебра в фототерморефрактивных стеклах при электронном облучении // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 5. С. 75–80.
7. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. Physics and Chemistry of Photochromic Glasses. CRC Press LLC, 1998. 190 p.

8. Голубков В.С., Евтихийев Н.Н., Папуловский В.Ф. Интегральная оптика в информационной технике. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.
 9. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
 10. Touzin M., Goeriot D., Guerret-Piécort C., Juvé D., Tréheux D., Fitting H.-J. Electron beam charging of insulators: A self-consistent flight-drift model // Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 114110.
 11. Tervonen A., Honkanen S., Leppihalme M. Control of ion-exchanged waveguide profiles with Ag thin-film sources // Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 759–765.
-