

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

© 2011 г. А. А. Жигалов\*; А. И. Игнатьев\*; 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.

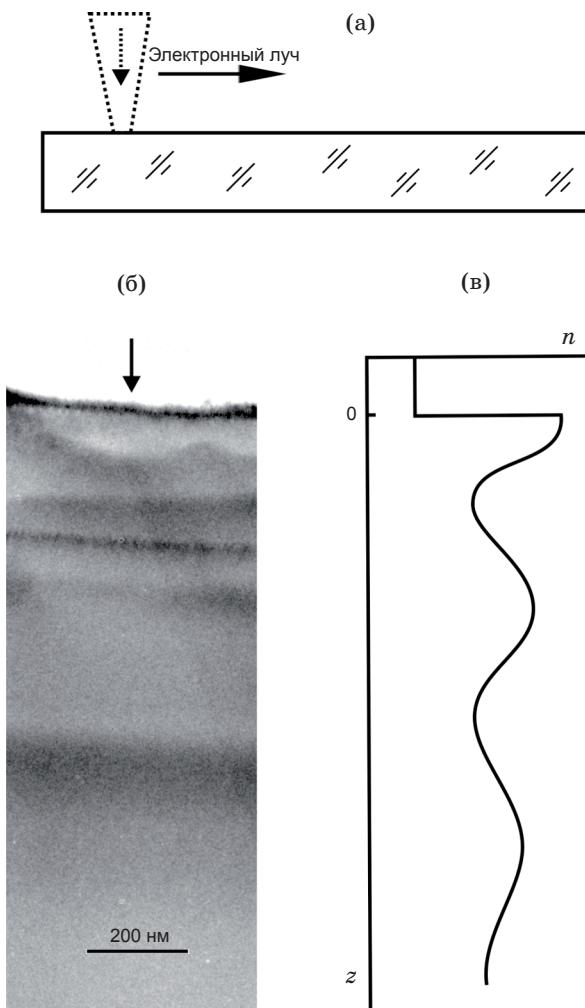
**Ключевые слова:** оптический волновод, силикатное стекло, электронный луч.

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: фототерморефрактивные (ФТР) стекла [7] с ионами серебра и натриево-боросиликатные (НБС) покровные стекла. ФТР стекла изготавливались в СПбГУ ИТМО и имели следующий исходный состав:  $\text{Na}_2\text{O}\text{-ZnO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaCl}$  с добавками  $\text{CeO}_2$  (0,02 вес%),  $\text{Ag}_2\text{O}$  (0,47 вес%) и  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  (0,2 вес%). Образцы представляли собой полированые 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 JEBD-2 при энергии электронов  $E = 10$  кэВ. Плотность электронного тока составляла  $j = 0,5\text{--}5 \text{ мкA}/\text{см}^2$ , доза электронного облучения варьировалась от  $Q = 0,7$  до  $2,5 \text{ мК}/\text{см}^2$ . 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 KOH. Облученная зона представляла собой полосу  $1\times25$  мм и формировалась путем перемещения электронного луча вдоль поверхности стекла (рис. 1а). Возбуждение волноводных мод проводилось призменным 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 Не-Не лазер ОКГ-13 ( $\lambda = 632$  нм). Для модификации сформированных волноводов проводилась дополнительная термообработка образцов в муфельной печи (*Neibotherm*) при температуре 350 °C 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  $\theta$  падения излучения на призму, при которых возбуждается волноводная мода.

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

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

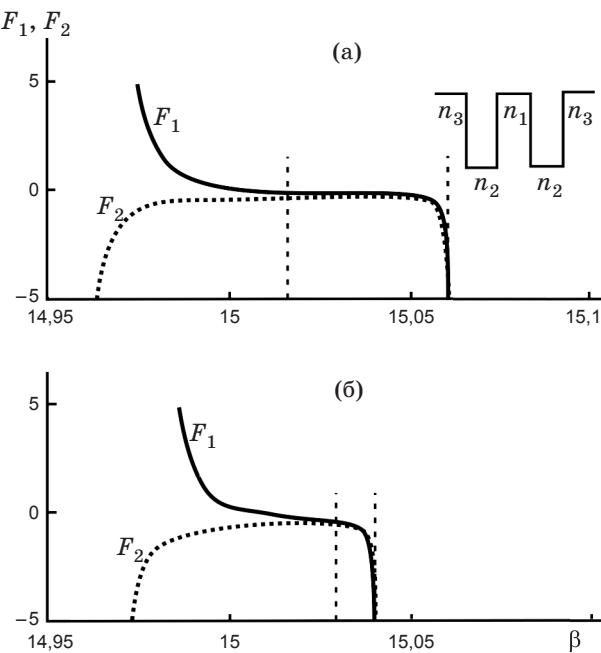
НБС стекло после облучения электронами ( $E = 10$  кэВ,  $Q = 5 \text{ мК/см}^2$ ,  $j = 2,5 \text{ мкА/см}^2$ ) –  $\theta = 19^\circ 19' - 22^\circ 35'$ ,  $\Delta\theta = 3^\circ 16'$ ,

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 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ) 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  $\text{Na}^+$  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  $\text{TM}_0$ . 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/см<sup>2</sup>) 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 пятислойного 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 поддерживание ими моды нулевого порядка в широких пределах варьирования постоянной распространения  $\beta$  [11], а моды высших порядков становятся вытекающими. Иллюстрацией возможности варьирования  $\beta$ , а следовательно и угла падения  $\theta$ , 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  $\beta$ . При уменьшении  $\Delta n$  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. Игнатьев А.И., Нащекин А.В., Неведомский В.М., Подсвицов 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. Б. 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., Евтихьев Н.Н., Папуловский В.Ф. Интегральная оптика в информационной технике. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.
  9. Adams M. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
  10. Touzin M., Goeriot D., Guerret-Piécart 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.
-