

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.379.8 : 666.92

Журнал технической физики, т. 55, в. 1, 1985

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ  
В ОПТИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИЕЙ СЕРЕБРА

А. И. Войтенков, В. П. Редько

Метод электродиффузии серебра впервые использован для целей создания волноводов в кварцевом [1] и техническом известково-натриевом [2, 3] стеклах. Зависимости свойств волноводов от условий их изготовления и химического состава стекла практически не исследовались, а отдельные выводы работ [2, 3] противоречивы. В настоящей работе изложены результаты исследования планарных волноводов, созданных электродиффузией Ag в различных марках многокомпонентных оптических стекол (ЛК4, ЛК5, ЛК7, К8, ТК9, БФ27, ЛФ11, Ф1).

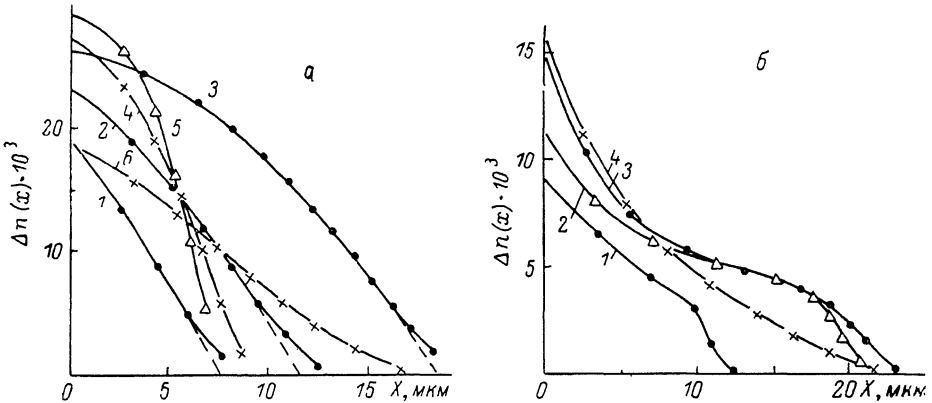


Рис. 1. Профили показателя преломления волноводов в стеклах ЛК5 (а) и ЛК7 (1—3) и ЛК4 (4) (б).

а:  $Q=0.1$  (1),  $0.2$  (2) и  $0.4$  Кл/см<sup>2</sup> (3),  $T=400$  °С,  $E=6$  В/мм;  $E=6$  (2),  $18$  (4) и  $54$  В/мм (5),  $T=400$  °С,  $Q=0.2$  Кл/см<sup>2</sup>;  $T=400$  (2) и  $500$  °С (6),  $E=6$  В/мм,  $Q=0.2$  Кл/см<sup>2</sup>; б:  $E=300$  В/мм,  $Q=0.1$  (1),  $0.2$  Кл/см<sup>2</sup> (2—4),  $T=400$  (1, 2, 4),  $500$  °С (3).

На одну сторону полированной стеклянной подложки термическим испарением в вакууме наносилась служившая анодом пленка серебра толщиной несколько микрометров и окислялась на воздухе при температуре  $300$  °С. В качестве катода использовался графитовый порошок или алюминиевая пленка толщиной  $5 \dots 10$  мкм. Подложка с электродами нагревалась до температуры, не превышающей температуру отжига стекла  $T_g$ ; на электроды подавалась разность потенциалов, и измерялся ток, протекающий через образец. Величина его практически не зависела от времени и резко уменьшалась лишь после полного внедрения серебра в подложку. Процесс формирования волноводов длился от нескольких минут до нескольких часов. После его завершения подложка быстро охлаждалась.

Установлено, что в любом из исследованных стекол при соответствующих технологических условиях могут быть получены волноводы с потерями  $\sim 1$  дБ/см и меньше. Для устранения основной причины потерь — окрашивания волноводного слоя коллоидными образованиями серебра [3] — электродиффузию следует проводить при температурах на  $100 \dots 150$  ° ниже  $T_g$  и плотностях тока, не превышающих, как правило,  $0.1 \dots 0.2$  мА/см<sup>2</sup>.

Исследованиями установлено, что свойства волноводов определяются прежде всего содержанием в стеклах оксидов щелочных металлов. В зависимости от вида замещающего се-

ребром иона щелочного металла все стекла могут быть разделены на два типа — натриевые и калиевые. Профили показателя преломления (ППП)  $\Delta n(x)$  волнопроводов в стеклах этих типов, рассчитанные методом ВКБ, приведены на рис. 1. В стекле ЛК5 содержится 5.0 мол.%  $\text{Na}_2\text{O}$ , в ЛК4 — 7.6 %  $\text{K}_2\text{O}$ , в ЛК7 — 5.3 %  $\text{K}_2\text{O}$  и 0.6 %  $\text{Na}_2\text{O}$ . Видно, что ППП в каждом из стекол определенным образом зависит от напряженности электрического поля  $E$ , температуры и величины заряда  $Q$ , прошедшего через 1 см<sup>2</sup> поверхности образца. С увеличением  $E$  при неизменной величине  $Q$  ППП в натриевых стеклах ЛК5 и К8 видоизменяется от функции ошибок при  $E$ , близком к нулю, до ступенчатого при  $E > 100$  В/мм. В калиевых стеклах ЛК4, ЛФ11, Ф1 даже при  $E=1.5$  кВ/мм образуются волнопроводы с профилем, близким к линейному. С увеличением температуры процесса при неизменных величинах  $Q$  и  $E$  в натриевых стеклах наблюдается расплывание ППП, сопровождающееся уменьшением ПП на поверхности волновода  $\Delta n_0$  и ростом его толщины. В калиевых стеклах, наоборот, при этом происходит увеличение  $\Delta n_0$  при фактически неизменной толщине. Из рис. 1 следует также зависимость ППП волнопроводов от величины  $Q$ . Эта величина является, вообще говоря, наиболее удачной характеристикой исследуемого процесса формирования волнопроводов. Измеряя ее, можно с высокой точностью контролировать параметры образующегося волновода.

Зависимость параметров волнопроводов  $\Delta n_0$  и  $d$  в стекле ЛК5 от величины  $Q$  приведена на рис. 2.<sup>1</sup> Она показывает широкие возможности метода электродиффузии для создания

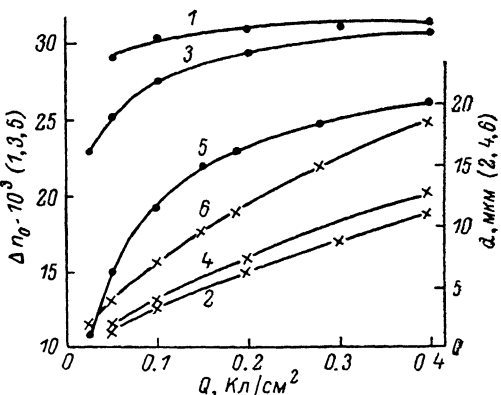


Рис. 2. Зависимость параметров волнопроводов в стекле ЛК5 от величины  $Q$ .

1, 2 —  $T=270$  °C,  $E=500$  В/мм; 3, 4 — 400, 54; 5, 6 — 400, 6.

волнопроводов с заданными параметрами. В целом аналогичная по виду зависимость получена и в других натриевых и калиевых стеклах. В обоих типах стекол наиболее существенно она проявляется при высоких температурах и низких напряженностях поля. В волноводах, получаемых нами ионным обменом в расплаве  $\text{AgNO}_3$  в электрическом поле, величина  $\Delta n_0$  практически не зависит от  $Q$ , что весьма ограничивает возможности этого метода для управления апертурой волнопроводов. Важным в технологическом плане преимуществом метода электродиффузии является также отсутствие неконтролируемого внедрения серебра за время установления рабочей температуры. Это подтверждается приведенными в [4] оценками скорости диффузии  $\text{Ag}$  из металлической пленки, которая на несколько порядков меньше, чем из расплава  $\text{AgNO}_3$ . Следовательно, увеличение ПП прианодного слоя стекла обусловлено только ионами  $\text{Ag}^+$ , замещающими ионы щелочного металла, которые под действием поля сместились в направлении к катоду. Поэтому концентрация серебра в поверхностном слое стекла  $m_0$ , выраженная в молярных долях, может быть рассчитана по формуле

$$m_0 = QV\Delta n_0 / 2FA,$$

где  $F$  — число Фарадея,  $V$  — молярный объем стекла. Инкремент показателя преломления  $k = \Delta n_0 / m_0$ , найденный по результатам исследования стекол ЛК5, К8, ТК9, оказался равным  $0.61 \pm 0.02$ . Учитывая близкие значения ПП окислов  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , такое значение  $k$  следовало ожидать и при замене ионов  $\text{K}^+$  на ионы  $\text{Ag}^+$ . Однако в калиевых стеклах оно было получено лишь при температурах, близких к  $T_g$ . При  $T=400$  °C значения величины  $k$  в стеклах ЛК4, ЛК7, ЛФ11 и Ф1 составляли соответственно 0.31, 0.40, 0.48 и 0.57. Здесь, видимо, не все вакансии ионов калия заполнялись ионами серебра и имело место явление электролиза стекла. Следовательно, на настоящем этапе исследований величина  $\Delta n_0$  может прогнозироваться только в натриевых стеклах.

Согласно расчетам, на поверхности всех стекол было достигнуто полное замещение ионов  $\text{Na}^+$ . В стеклах, содержащих только  $\text{K}_2\text{O}$ , близкое к полному замещение ионов  $\text{K}^+$  происходит только при температурах и напряженностях поля, при которых возникает опасность электрического пробоя стекла. В стеклах с преобладающим содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ , например

<sup>1</sup> Толщина волновода  $d$  выбирается по точке пересечения касательной к функции  $\Delta n(x)$  с осью  $x$  (рис. 1).

K8, ионы  $K^+$  не замещаются вовсе, а в стеклах с преобладающим содержанием  $K_2O$ , например ЛК7, судя по характерному виду ППП на рис. 1, б, — лишь частично и на значительно меньшую глубину.

Проведенные исследования свидетельствуют о высокой перспективности применения метода электродиффузии для целей создания волноводов с заданными параметрами и заданным профилем показателя преломления. Показана принципиальная возможность прогнозирования свойств волноводов исходя из химического состава стекла подложки.

### Литература

- [1] *Войтенков А. И., Редько В. П.* А. с. 762364 (СССР). Способ получения оптических волноводов. — Оpubл. в Б. И., 1982, № 34.
- [2] *Chartier G. H., Jaussaud P., De Oliveira A. D. et al.* Optical Waveguides fabricated by electric — field controlled ion exchange in glass. — *Electron. Lett.*, 1978, v. 14, № 5, p. 32—134.
- [3] *Findakly T., Garmire E.* Reduction and control of optical waveguide losses in glass. — *Appl. Phys. Lett.* 1980, v. 37, № 10, p. 855—856.
- [4] *Войтенков А. И., Редько В. П.* Определение параметров одномодовых диффузионных волноводов. — *Квант. электр.*, 1980, т. 7, № 9, с. 2001—2003.

Институт физики АН БССР  
Могилевское отделение

Поступило в Редакцию  
12 декабря 1983 г.