

**ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
ОБРАБОТКИ
И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

УДК 535.212 : 621.372.8 : 666.22

Л. Б. ГЛЕБОВ, Н. В. НИКОНОВ, Г. Т. ПЕТРОВСКИЙ
(Ленинград)

**ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ
В ФОТОХРОМНЫХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДАХ
НА СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ**

В последнее время, наряду с интенсивным ростом числа работ по оптической записи информации на поверхности и в объеме фоточувствительных материалов [1], получили развитие работы по записи в волоконных и планарных волноводах [2—5], которые используются в системах связи, управления и обработки информации. Оптический волновод — специфический объект, сочетающий в себе характеристики устройства и материала и имеющий нетрадиционную с точки зрения записи информации геометрию. Интерес к созданию фоточувствительных волноводов (сочетанию фотоактивных свойств материала с волноводным характером распространения излучения) обусловлен, с одной стороны, расширением диапазона активных свойств материала, с другой — разработкой оптических устройств с уникальными свойствами. Так, например, высокая плотность мощности активирующего излучения, которая достигается на большой длине в волноводе, позволяет наблюдать различные нелинейные эффекты (окрашивание, бистабильность и т. д.), которые раньше в фоточувствительном материале не проявлялись [5]. Сочетание фотоактивных свойств с дискретным характером распространения волноводных мод позволяет создавать необычные элементы волоконной и интегральной оптики, способные осуществлять различные функциональные операции со световыми потоками [6].

Запись информации, а также управление световым пучком в фоточувствительных волноводах осуществляются как волноводным [6, 7], так и внешним [8—13] фотоактивным излучением. Под действием активного излучения оптические и спектральные характеристики волновода могут существенно меняться. Такие изменения используются для бинарной (дискретной) [6, 10—12] или голографической [7—9] записи информации в волноводах, для создания управляемых волноводных дефлекторов [14], селекторов [6, 11], переключателей [15], коммутаторов [4, 10], усилителей [13] и т. д.

В качестве фоточувствительных материалов для создания волноводных элементов применяются полупроводниковые и диэлектрические материалы с разнообразной структурой — кристаллические, поликристаллические, аморфные. Среди них можно выделить стекла [16]. Стекло как материал для волоконной и интегральной оптики имеет ряд преимуществ: высокую однородность, малые потери, стабильность и воспроизводимость характеристик, низкую стоимость, возможность создания различных пассивных и активных элементов в широком спектральном диапазоне, относительную простоту технологии получения волоконных и планарных волноводов. Однако выбор фоточувствительных стекол, на

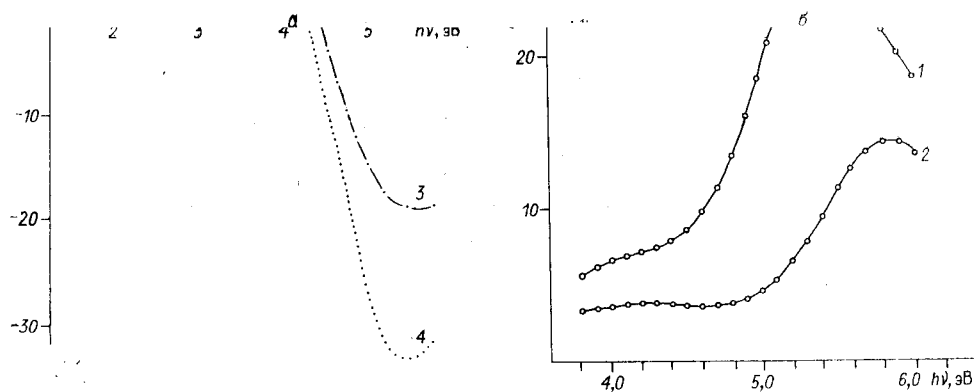


Рис. 1. Спектры дополнительного поглощения:

a — натриево-силикатных стекол с различным содержанием железа, подвергнутых γ -облучению дозой 10^6 Р. Содержание Fe^{3+} (мас. %): 1 — $5 \cdot 10^{-5}$, 2 — $1,7 \cdot 10^{-3}$, 3 — $4,3 \cdot 10^{-3}$, 4 — $7,6 \cdot 10^{-3}$; *b* — натриево-силикатного стекла с содержанием $Fe^{3+} 5 \cdot 10^{-5}$ мас. %, подвергнутого γ -облучению дозой 10^7 Р (1) и обесцвеченного УФ-излучением с $h\nu = 4,9-5,0$ эВ (2)

основе которых в настоящее время изготавливают волоконные и планарные волноводы, невелик. К ним, прежде всего, можно отнести халькогенидные стекла [2, 7], в которых реализуется фоторефрактивный эффект (изменение показателя преломления), и фотохромные [3, 5, 10, 11], в которых имеет место фотохромный эффект (обратимое изменение показателя поглощения). В настоящей работе рассмотрены процессы амплитудной записи информации в планарных волноводах на основе фотохромных силикатных стекол и перспективы их применения.

Фотохромные стекла разделяются на два класса [17]: гомогенные фотохромные стекла (носителем фотохимических свойств является матрица стекла, sensibilizированная различными активаторами) и гетерогенные фотохромные стекла (носителями фотохимических свойств являются фоточувствительные микрокристаллы, распределенные в матрице стекла). Ниже рассмотрены особенности изменения оптической плотности в фотохромных щелочно-силикатных стеклах, механизмы формирования планарных волноводных структур на их основе и процессы оптической записи информации в волноводах.

Оптическая запись в гомогенных фотохромных стеклах. Исследованию спектральных и оптических свойств щелочно-силикатных стекол, подвергнутых действию ионизирующих излучений (УФ- рентгеновского, γ -излучения), посвящено большое количество работ, результаты которых обобщены в монографиях [18, 19]. Под действием ионизирующего излучения в щелочно-силикатных стеклах образуются центры окраски (ЦО), поглощающие в видимой области спектра. Под действием теплового поля, УФ или излучения видимого диапазона ЦО способны распадаться, т. е. в фотохромных стеклах можно осуществлять как негативную (увеличение оптической плотности D), так и позитивную (уменьшение D) запись информации. В зависимости от состава матрицы стекла, типа и концентрации активатора или примеси, длины волны и мощности ионизирующего излучения фотохромные стекла могут обладать различной фоточувствительностью, плотностью и скоростью записи, временем хранения информации, возможностью стирания и повторной записи. На рис. 1, *a* показаны спектры дополнительного поглощения натрий-кальций-силикатных стекол с различным содержанием наиболее часто встречающейся

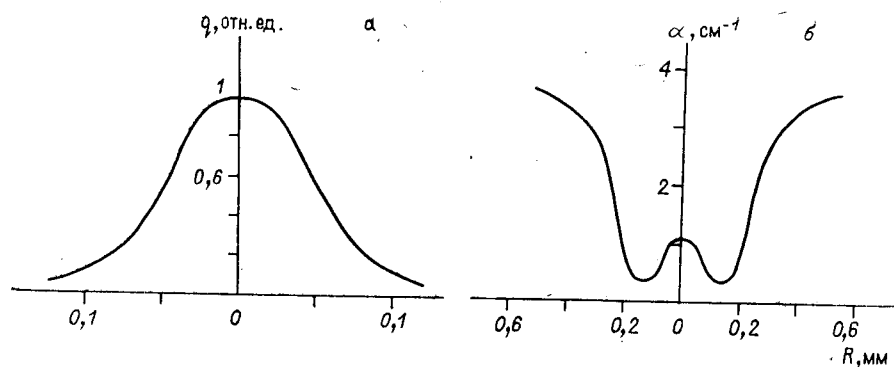


Рис. 2. Пример одновременного проявления двухфотонного окрашивания и однофотонного обесцвечивания натриево-силикатного стекла: а — распределение мощности в фокальном пятне лазера ($\lambda = 266$ нм); б — распределение дополнительного поглощения в γ -окрашенном стекле, подвергнутом воздействию лазерного излучения ($\lambda = 266$ нм) с указанным распределением мощности

примеси — иона железа, подвергнутых γ -облучению дозой 10^6 Р [20]. Приведенные на этом рисунке спектры типичны для спектров поглощения радиационно окрашенных щелочно-силикатных стекол. Эти спектры состоят из нескольких перекрывающихся полос поглощения в видимой области и полосы просветления в УФ-области. Природа этих полос в настоящее время подробно изучена в [20—23]. Под действием излучения с $h\nu = 4,9\text{—}5$ эВ происходит обесцвечивание части ЦО (рис. 1, б). При этом вследствие обесцвечивания может не только происходить равномерное по спектру уменьшение поглощения, но и существенно изменяться форма спектра [22]. Следует отметить, что эффективность обесцвечивания зависит от длины волны активирующего света: с увеличением длины волны эффективность резко уменьшается (так, для света с $\lambda = 633$ нм обесцвечивание $\sim 10\%$ наблюдается лишь при экспозиции 10^5 Дж/см² [24]). Это позволяет использовать излучение с $\lambda \leq 440$ нм для записи информации, а излучение с $\lambda = 633$ нм — для считывания.

Помимо рассмотренного выше однофотонного окрашивания и обесцвечивания стекол, окрашивание может происходить также в результате двухфотонной ионизации матрицы этих стекол мощным излучением, например излучением третьей ($\lambda = 355$ нм) или четвертой ($\lambda = 266$ нм) гармоники неодимового лазера [12, 25, 26]. Таким образом, независимо от исходного уровня потемнения можно уменьшать или увеличивать плотность дополнительного поглощения, изменяя мощность активирующего излучения, поскольку при уменьшении мощности будет происходить только однофотонное обесцвечивание. Это явление позволяет производить многократную запись и стирание изображения коротковолновым излучением с одной длиной волны. Рис. 2 иллюстрирует этот факт: на рис. 2, а представлено распределение плотности мощности излучения четвертой гармоники неодимового лазера в фокальном пятне объектива, на рис. 2, б — денситограмма γ -окрашенного стекла, подвергнутого воздействию этого излучения с распределением плотности мощности, указанным на рис. 2, а (измерение проводилось вдоль пятна облучения). Видно, что в центральной части, где плотность мощности максимальна, двухфотонное окрашивание превалирует над однофотонным обесцвечиванием. В периферийных областях наблюдается сильное влияние обесцвечивания. Двухфотонная запись изображения в стекле имеет ряд достоинств: высокое разрешение, нечувствительность к фоновым засветкам, стабильность чувствительности. Таким образом, окрашивание и обесцвечивание однородных фотохромных стекол позволяют осуществлять бинарную запись информации.

В [27] была впервые осуществлена запись трехмерной голограммы в калиевообратном стекле при обесцвечивании радиационных ЦО. В [24] показана возможность записи объемных голограмм в промышлен-

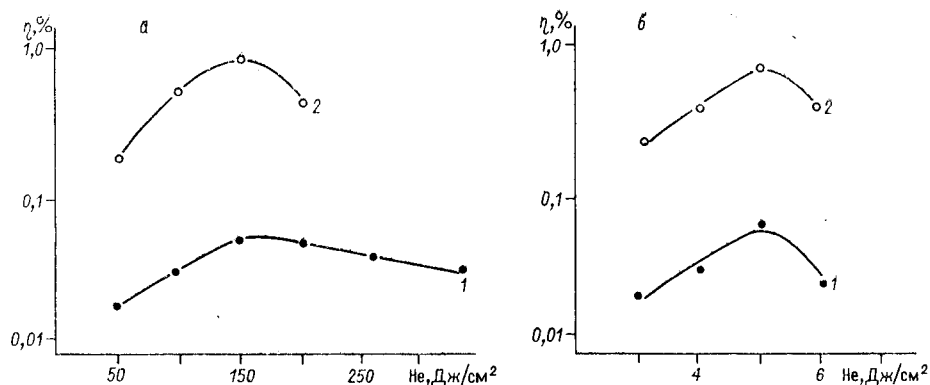


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности голограммы на радиационно-окрашенном стекле К-8 дозами 10^6 (1) и 10^8 Р (2) от экспозиции обесцвечивающего излучения:

а — $\lambda = 440$, б — 337 nm

ных кроновых стеклах. В настоящей работе рассмотрен энергетический аспект голографической записи в стеклах. Образцы промышленного оптического стекла К-8 подвергались γ -облучению дозами 10^6 – 10^8 Р. Экспонирование обесцвечивающим излучением ($\lambda = 337, 440 \text{ nm}$) производилось в попутных пучках с пространственными частотами 30 и 2000 мм^{-1} . Обнаружено, что при прохождении излучения с $\lambda = 633 \text{ nm}$ через частично обесцвеченный таким способом участок образца возникает дифракционная картина, соответствующая дифракции на периодической структуре. Таким образом, в образце производится объемная запись голографической дифракционной решетки. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции показаны на рис. 3. Видно, что независимо от дозы γ -облучения оптимальная экспозиция $\sim 150 \text{ Дж/см}^2$ для длины волны 440 nm и 5 Дж/см^2 для длины волны 337 nm . При этом дифракционная эффективность для образцов с дозой облучения 10^8 Р на порядок величины выше, чем у образцов с дозой облучения 10^6 Р , и составляет величину порядка 1% независимо от длины волны обесцвечивающего излучения. Записанные голограммы отличаются высокой угловой селективностью — 40° . При записи и восстановлении голограммы в попутных пучках достигнута высокая разрешающая способность 5000 мм^{-1} . Следует отметить, что γ -окрашенные силикатные стекла, наряду с длительным сроком хранения информации (несколько лет), позволяют производить многократную запись путем термического ($T = 100$ – 150°C) или оптического ($\lambda \leq 440 \text{ nm}$) обесцвечивания и последующего окрашивания.

Таким образом, процесс окрашивания или обесцвечивания силикатных стекол позволяет осуществлять на их поверхности или в объеме как бинарную, так и голографическую запись информации. Захват носителя заряда примесным или собственным центром, т. е. создание радиационных ЦО, происходит на атомарном уровне; таким образом, в гомогенных фотохромных стеклах может быть достигнута высокая плотность бинарной записи или высокая разрешающая способность голографической записи информации.

Оптическая запись в гетерогенных фотохромных стеклах. Гетерогенные фотохромные стекла состоят из матрицы стекла (как правило, натриево-алюмоборосиликатного) и распределенных в ней fotocувствительных микрокристаллов галогенидов серебра или меди со средним размером $\sim 10 \text{ nm}$ и расстоянием между ними $\sim 60 \text{ nm}$ [17, 28]. Под действием УФ- или коротковолнового излучения видимого диапазона ($\lambda \leq 440 \text{ nm}$) в гетерогенных фотохромных стеклах наводится добавочное поглощение, занимающее всю видимую часть спектра с максимумом в области 500–600 nm (рис. 4, а). Появление добавочного поглощения связывают с про-

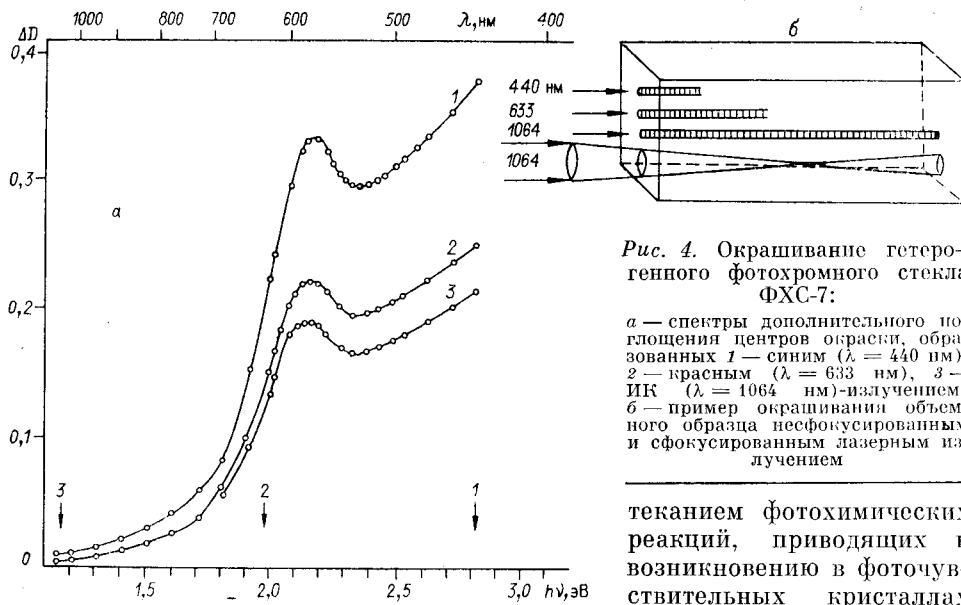


Рис. 4. Окрашивание гетерогенного фотохромного стекла ФХС-7:

а — спектры дополнительного поглощения центров окраски, образованных 1 — синим ($\lambda = 440$ нм), 2 — красным ($\lambda = 633$ нм), 3 — ИК ($\lambda = 1064$ нм)-излучением; б — пример окрашивания объемного образца несфокусированным и сфокусированным лазерным излучением

течением фотохимических реакций, приводящих к возникновению в фоточувствительных кристаллах коллоидных металлических

частичек малого размера — ЦО. В [29] показано, что фоточувствительность фотохромных стекол определяется наличием в них меди, вводимой в виде малых добавок в галоидосеребряные стекла или в виде основного компонента в галоидомедные стекла. Распространенная модель линейного фотоокрашивания заключается в следующем (рис. 5, а). Возбуждающее излучение ($\lambda < 450$ нм, $h\nu > 2,76$ эВ) поглощается в полосе «медного» экситона ($\lambda_{\max} = 387$ нм, $h\nu_{\max} = 3,25$ эВ). Электроны, образующиеся при термическом распаде экситона, захватываются ионами Ag^+ или Cu^+ , что приводит к образованию Ag^0 и Cu^0 , которые объединяются в коллоидные ЦО Ag_k^0 и Cu_k^0 . Таким образом, длинноволновая граница фоточувствительности фотохромных стекол определяется краем полосы поглощения «медного» экситона и находится в области $\lambda < 450$ нм. Рассмотрим возможность расширения границы фоточувствительности в длинноволновую сторону, которая представляет значительный интерес при использовании фотохромных стекол в волоконной и интегральной оптике.

Нами обнаружен новый тип фоточувствительности [30] — двух- и трехквантовое кооперативное размножение ЦО под действием излучения видимого ($\lambda = 633$ нм) и ближнего ($\lambda = 1064$ нм) ИК-диапазона. Эффект окрашивания нелинейно зависит от первоначальной концентрации ЦО, созданных предварительным коротковолновым излучением ($\lambda < 450$ нм)

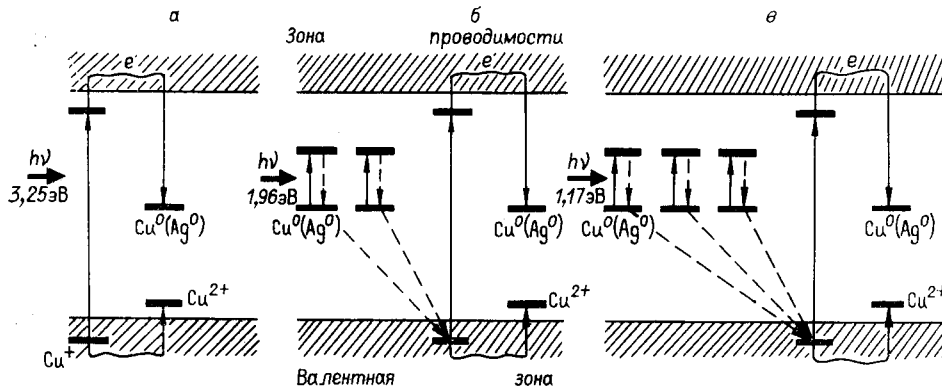


Рис. 5. Схематическое изображение линейного (а) и нелинейного (двух (б)- и трехквантовое (в) кооперативное размножение центров окраски) окрашивания гетерогенных фотохромных стекол

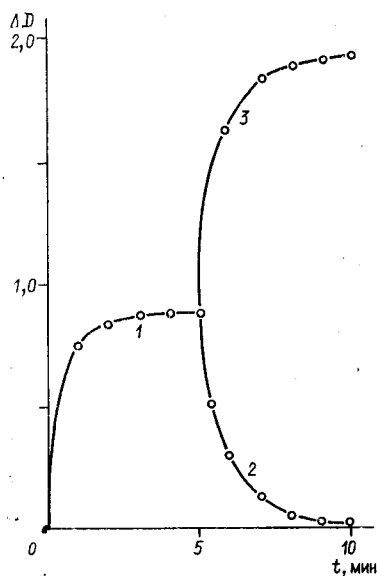


Рис. 6. Кинетики изменения плотности наведенного поглощения в волноводе на стекле ФХС-2: 1 — окрашивание синим светом ($\lambda = 440$ нм); 2 — оптическое обесцвечивание красным светом ($\lambda = 633$ нм, $q = 1$ Вт/см²); 3 — окрашивание красным светом ($\lambda = 633$ нм, $q \sim 100$ Вт/см²)

k^* , и плотности мощности активирующего длинноволнового излучения q^* . При этом $\kappa = 2$ для $\lambda = 633$ нм и $\kappa = 3$ для $\lambda = 1064$ нм.

В качестве объектов исследования были использованы промышленные галогидосеребряные (ФХС-2, ФХС-4, ФХС-6) и галогидомедные (ФХС-7) фотохромные стекла. Перед воздействием длинноволнового ($\lambda \geq 633$ нм) излучения фотохромные стекла предварительно окрашивались коротковолновым ($\lambda = 440$ нм) излучением до уровня оптической плотности $D = 0,9$ (рис. 6). Последующее воздействие «слабого» длинноволнового из-

лучения ($\lambda = 633$ нм, $q = 1$ Вт/см²) приводило к обесцвечиванию ЦО, а воздействие «мощного» длинноволнового излучения ($\lambda = 633$ нм, $q \sim 100$ Вт/см²; $\lambda = 1064$ нм, $q \sim 10^6$ Вт/см²) — к росту D до уровня 2,0. Существенное влияние мощности активирующего излучения, нелинейность процесса, идентичность спектров дополнительного поглощения ЦО, образованных УФ, видимым и ИК-излучением (см. рис. 4, а), недостаточность энергии квантов активирующего излучения ($h\nu = 1,96$ и $1,17$ эВ) для ионизации центра фоточувствительности Cu^+ ($h\nu = 2,76$ эВ) позволили предложить следующий механизм окрашивания (см. рис. 5): 1) два ЦО (Ag^0 или Cu^0), образованные предварительным коротковолновым излучением (например, по линейному механизму рис. 5, а), поглощают два кванта красного света и переходят в возбужденное состояние (для ИК-излучения в процессе участвуют три ЦО, рис. 5, в); 2) затем эти центры одновременно передают запасенную энергию на центр фоточувствительности Cu^+ и возвращаются в основное состояние; 3) образуется новый экситон меди, далее реализуется линейный механизм: термический распад экситона приводит к образованию нового ЦО (Ag^0 или Cu^0). Такой механизм представляет собой ценную реакцию, где сенсibilизаторами выступают продукты первоначального фотохимического процесса, инициируемого УФ-излучением.

Независимость спектров дополнительного поглощения ЦО от длины волны активирующего излучения (УФ, видимого, ИК) дает возможность использовать фотохромные стекла для визуальной регистрации излучения ближней ИК-области спектра (см. рис. 4, а). На длине волны активирующего ИК-излучения дополнительное поглощение мало. Это позволяет заметно снизить действие эффекта фильтрации, присущего всем фотохромным стеклам (затухание интенсивности активирующего излучения по толщине образца за счет того, что ЦО имеют полосы поглощения, совпадающие со спектральной областью такого излучения $\lambda < 600$ нм), и увеличить рабочую толщину образца (см. рис. 4, б). Таким образом, ИК-излучением можно окрашивать протяженные участки в объеме регистрирующего материала (более 10 см), при этом само ИК-излучение поглощается незначительно. Это является важным обстоятельством при записи информации в протяженных волноводах, а также при повышении угловой селективности амплитудных трехмерных голограмм. Нелинейность процесса окрашивания ИК-излучением дает возможность создавать ЦО в любом произвольном месте объема регистрирующего материала (см. рис. 4, б), что повышает плотность записи информации. Кроме того, нелинейность процесса позволяет управлять контрастом изображения как

на поверхности, так и в объеме фотохромных стекол, а также осуществлять запись, считывание и стирание информации на одной длине волны. Таким образом, гетерогенные фотохромные стекла обладают разнообразными свойствами: широким спектральным диапазоном fotocувствительности (от УФ до ИК) и времени термической и оптической релаксации (от долей секунд до нескольких лет), широким диапазоном порогов чувствительности (10^{-4} — 10^1 Дж/см²), образование ЦО происходит за времена $\sim 10^{-7}$ с.

Таким образом, можно заключить, что как гомогенные, так и гетерогенные фотохромные стекла обладают чрезвычайно широкими возможностями для записи, хранения, считывания и стирания информации. При этом на них может эффективно осуществляться как бинарная, так и голографическая запись.

Создание планарных волноводов на фотохромных стеклах методом ионного обмена. Одним из перспективных методов создания планарных волноводов на щелочно-силикатных стеклах является ионообменная диффузия из расплавов солей [31]. Суть метода заключается в обмене ионов щелочных металлов, содержащихся в стекле, на ионы других металлов из расплавов солей вследствие различия их химических потенциалов [32]. К наиболее распространенным ионам-диффузантам относятся Ag^+ и K^+ [31], которые представляют собой непоглощающие в видимой и ближней ИК-области спектра модификаторы. Диффундирующие из расплава в стекло ионы Ag^+ имеют большую удельную рефракцию, чем ионы Na^+ , диффундирующие из стекла в расплав: $Na_{ст}^+(0,098 \text{ нм}) \rightleftharpoons Ag_{расп}^+(0,113 \text{ нм})$ (в скобках указаны радиусы обменивающихся ионов). В результате такой замены происходит увеличение показателя преломления в поверхностном слое стекла, что приводит к образованию волновода. При низкотемпературном $T < T_g$ (T_g — температура стеклования) обмене ионов с разными радиусами $Na_{ст}^+(0,098 \text{ нм}) \rightleftharpoons K_{расп}^+(0,133 \text{ нм})$ и близкими удельными рефракциями в поверхностном слое возникают механические сжимающие анизотропные напряжения, достигающие 1 ГПа. Такие большие напряжения приводят к увеличению показателя преломления и созданию волноводного слоя за счет эффекта фотоупругости. Природа этих напряжений и их роль в формировании оптических свойств волноводов (профиля показателя преломления, двойного лучепреломления) описаны в [33, 34]. Ag^+ - и K^+ -диффузионные волноводы на щелочно-силикатных стеклах обладают следующими особенностями: Ag^+ -волноводы имеют низкие пороги пробоя, термо- и фотохимическую устойчивость [12]; K^+ -волноводы обладают рекордно малыми потерями (0,2 дБ/см), повышенной механической и оптической прочностью, микротвердостью, термостойкостью и химической устойчивостью [35, 36].

В качестве стекл-ионообменников использовались промышленные щелочно-силикатные стекла: оптическое К-8 и фотохромные ФХС-2, ФХС-4, ФХС-6, ФХС-7. Полированные образцы обрабатывались в расплавах KNO_3 и $AgNO_3$ (0,1 вес. %) — $NaNO_3$ (99,9 вес. %) при температуре 400—430 °С в течение 0,5—6,0 ч [33, 37, 38]. Обнаружено, что Ag^+ -волноводы изотропны, а K^+ анизотропны. Величина двойного лучепреломления в K^+ -волноводах достигает $\delta n = n^{TM} - n^{TE} = 15 \cdot 10^{-4}$ (ТМ и ТЕ — ортогональные поляризации света). Приросты показателя преломления (ПП) и глубины для Ag^+ - и K^+ -волноводов близки и составляют $\Delta n \sim 100 \cdot 10^{-4}$, $H \sim 15$ мкм. Также близки и профили показателей преломления волноводов для одинаковых режимов обработки. На рис. 7, а показан характерный профиль ПП для K^+ -волновода на стекле ФХС-4. Планарные волноводы на основе стекла К-8 имеют потери не более 0,5 дБ/см, а на основе гетерогенных фотохромных стекол — не более 1 дБ/см. Таким образом, методом ионообменной диффузии в щелочно-силикатных стеклах можно создавать планарные волноводы хорошего оптического качества с заданными параметрами.

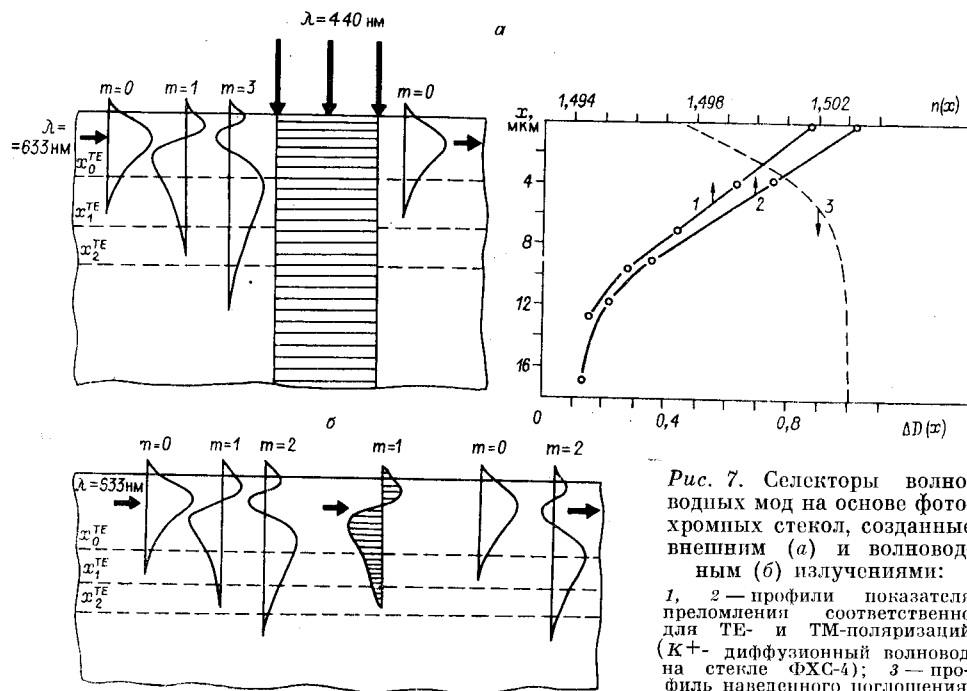


Рис. 7. Селекторы волноводных мод на основе фотохромных стекол, созданные внешним (а) и волноводным (б) излучениями: 1, 2 — профили показателя преломления соответственно для ТЕ- и ТМ-поляризаций (K^+ -диффузионный волновод на стекле ФХС-4); 3 — профиль наведенного поглощения

Важной проблемой при создании волноводов на основе фоточувствительных стекол является сохранение фотохромных свойств стекла при переходе его из объемной трехмерной структуры в планарную волноводную, а также изучение возможности целенаправленного изменения этих свойств. Поскольку при создании волноводов состав фоточувствительного стекла частично изменяется (замена щелочной компоненты в исходном стекле), а также действуют диффузионные напряжения, рассмотрим фотохромные свойства этих волноводов и влияние на них диффузионной обработки.

Свойства планарных волноводов на основе гомогенных фотохромных стекол. Исходные образцы стекла К-8 и K^+ -диффузионные волноводы на его основе подвергались γ -облучению дозами 10^5 — 10^8 Р при комнатной температуре. Обнаружено, что спектры поглощения исходного объемного образца совпадают со спектрами поглощения образцов, подвергнутых диффузионной обработке. Также совпадают и спектры наведенного поглощения, полученные при γ -облучении. Отсутствие изменений в спектрах поглощения определяется тем, что толщина диффузионного слоя в 1000 раз меньше толщины образцов и возможные изменения находятся за пределами точности измерений ($D = \pm 0,01$). Обнаружено, что значения поглощений в γ -окрашенных волноводах и объемных образцах на длине волны 633 нм практически совпадают для всех исследованных доз (рис. 8, а). При облучении указанными дозами модовый спектр волноводов в пределах точности измерений ($n = \pm 0,0002$) не меняется. Установлено, что фоточувствительность в волноводе и в объеме исходного стекла совпадает. На рис. 8, б показана характерная зависимость наведенного затухания K^+ -волновода от экспозиции обесцвечивающего излучения ($\lambda = 440$ нм). Таким образом, можно заключить, что в поверхностных слоях стекла, подвергнутого ионному обмену при γ -облучении, не происходит заметных структурных перестроек. Более того, фоточувствительность в волноводном слое в результате диффузионной обработки не изменилась по сравнению с исходным стеклом. Это означает, что для записи информации в радиационно-окрашенных K^+ -диффузионных волноводах на стекле К-8 можно применять арсенал методов, разработанных для объемных стекол.

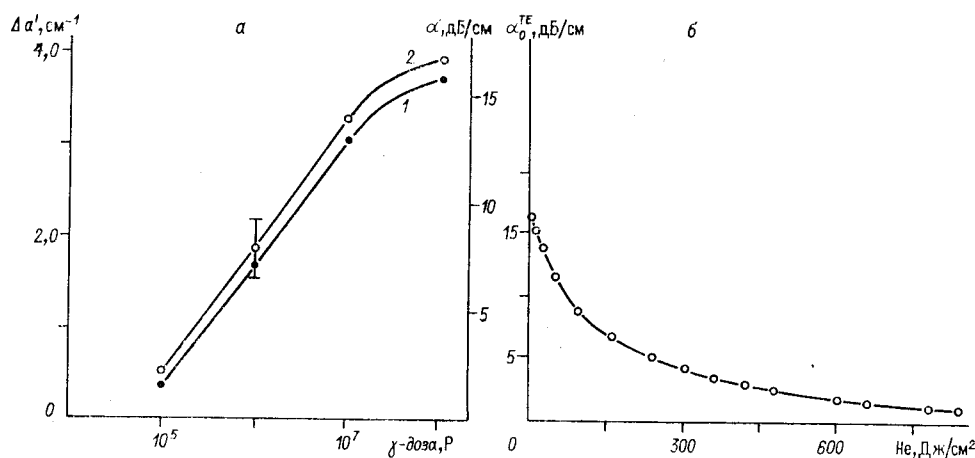


Рис. 8. Окрашивание и обесцвечивание K^+ -диффузионного волновода на стекле К-8: а — зависимости наведенного поглощения и затухания от дозы γ -облучения для объема стекла (1) и волновода (2); б — зависимость величины наведенного затухания для нулевой моды Те-поляризации от экспозиции обесцвечивающего излучения ($\lambda = 440$ нм)

При исследовании Ag^+ -диффузионных волноводов на стекле К-8 обнаружены следующие явления. Воздействие коротковолнового УФ-излучения ($\lambda < 200$ нм), а также третьей ($\lambda = 355$ нм) и четвертой ($\lambda = 266$ нм) гармоник неодимового лазера приводит к окрашиванию поверхности Ag^+ -волновода (рис. 9). Установлено, что такое окрашивание обусловлено образованием коллоидно-металлического серебра. Одновременно с таким окрашиванием происходят ионизация матрицы стекла и образование ЦО в объеме. Электроны, освобожденные в результате ионизации матрицы, частично захватываются Ag^+ , вследствие чего имеет место восстановление серебра. Таким образом, обработка стекла К-8 в расплаве нитратов серебра существенным образом изменяет фоточувствительность поверхностного слоя. Ag^+ -волноводы по сравнению с K^+ -волноводами обладают «дополнительными» фотохромными свойствами.

Свойства планарных волноводов на основе гетерогенных фотохромных стекол. Фотохромные свойства (линейное и нелинейное окрашивание) планарных волноводов на гетерогенных фотохромных стеклах подробно изучены в [37]. Использование высокой плотности мощности, которая достижима в волноводах, позволяет эффективно реализовывать нелинейные эффекты в фотохромных стеклах. Так, в волноводе на основе гетерогенного фотохромного стекла легко может быть достигнута высокая плотность наведенного поглощения ($D \sim 2,0$), в то же время для объемного материала, как правило, величина наведенного поглощения не превышает 1,0.

Нелинейные свойства кооперативного окрашивания приводят к возникновению бистабильности в окрашенном состоянии. Исследование бистабильности в фоточувствительных стеклах представляет собой отдельную задачу, поэтому в настоящей работе ограничимся только иллюстрацией экспериментального проявления неоднозначности окрашивания фотохромного волновода. K^+ -волновод на стекле ФХС-4 подвергался воздействию излучения двух длин волн: синего ($\lambda = 440$ нм) и красного ($\lambda = 633$ нм). Кривой 1 на рис. 10 показано окрашивание волновода под действием красного излучения — переход в состояние А. При одновременном воздействии синего и красного излучений волновод окрашивается сильнее и переходит в состояние С. Переход в состояние С осуществляется независимо от того, в какой последовательности включается синее и красное излучения: важен только факт их совместного действия. Интересным является то, что из состояния С при выключении синего излучения (красное излучение остается включенным) система релаксирует не в состояние А, а в состояние В. Для того чтобы перевести систему в

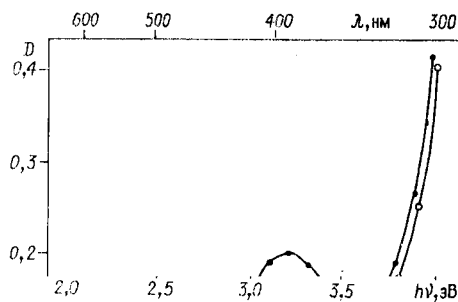


Рис. 9. Спектры поглощения стекла К-8: 1 — необработанного и обработанного в расплаве $\text{AgNO}_3 - \text{NaNO}_3$; 2 — обработанного в расплаве $\text{AgNO}_3 - \text{NaNO}_3$ и подвергнутого воздействию излучения с $\lambda < 355$ нм

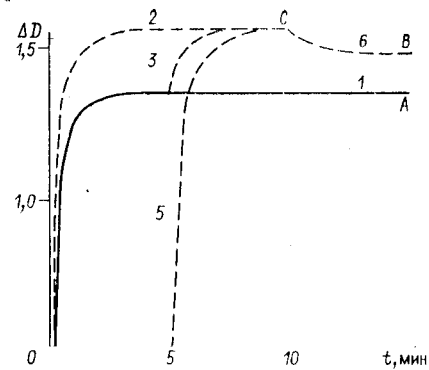


Рис. 10. Окрашивание K^+ -диффузионного волновода на стекле ФХС-4: 1, 6 — действие красного света ($\lambda = 633$ нм); 4 — действие синего света ($\lambda = 440$ нм); 2, 3, 5 — совместное действие красного и синего света

состояние А, нужно полностью выключить возбуждения, обесцветить систему и только потом включить красное излучение. Таким образом, фотохромный волновод под действием красного излучения окрашивается до различных состояний в зависимости от того, подавалось ли на волновод синее излучение или нет. Это доказывает наличие бистабильности при нелинейном окрашивании планарных волноводов на основе гетерогенных фотохромных стекол.

Отличительные особенности в характере термической и термооптической релаксации волноводов на гетерогенных фотохромных стеклах по сравнению с их объемными аналогами рассматривались в [37]. Влияние диффузионной обработки на фоточувствительность поверхностных слоев стекла можно проиллюстрировать следующими примерами.

Обнаружено, что с увеличением номера моды m (т. е. глубины волноводного слоя) в K^+ -диффузионных волноводах на основе гетерогенных фотохромных стекол увеличивается плотность наведенного поглощения (рис. 11. а) [38], т. е. в диффузионных волноводах наблюдается градиент фотохромных свойств — увеличение фоточувствительности с увеличением глубины волноводного слоя (см. рис. 7, а). Для мод высших порядков наблюдается выход кривых оптической плотности на насыщение, при этом фоточувствительность на большой глубине приближается к фоточувствительности исходного объемного фотохромного материала. Методом электронно-зондового анализа установлено, что такое изменение фоточромных свойств обусловлено эффузией меди из поверхностных слоев гетерогенных фотохромных стекол в процессе диффузионной обработки в расплаве KNO_3 .

Обнаружен дихроизм наведенного поглощения (анизотропия в поглощении для ортогональных поляризаций света) в K^+ -диффузионных волноводах на основе гетерогенных фотохромных стекол (см. рис. 11. а) [38]. С увеличением номера моды величина дихроизма уменьшается. Этот эффект наблюдается при линейном и нелинейном окрашивании K^+ -волноводов на гетерогенных фотохромных стеклах. Установлена линейная связь дихроизма со сжимающими диффузионными напряжениями, действующими в слое (рис. 11. б). Такой пьезодихроизм обусловлен воздействием сжимающих анизотропных напряжений на систему хаотически ориентированных анизотропных ЦО в фоточувствительных микрокристал-

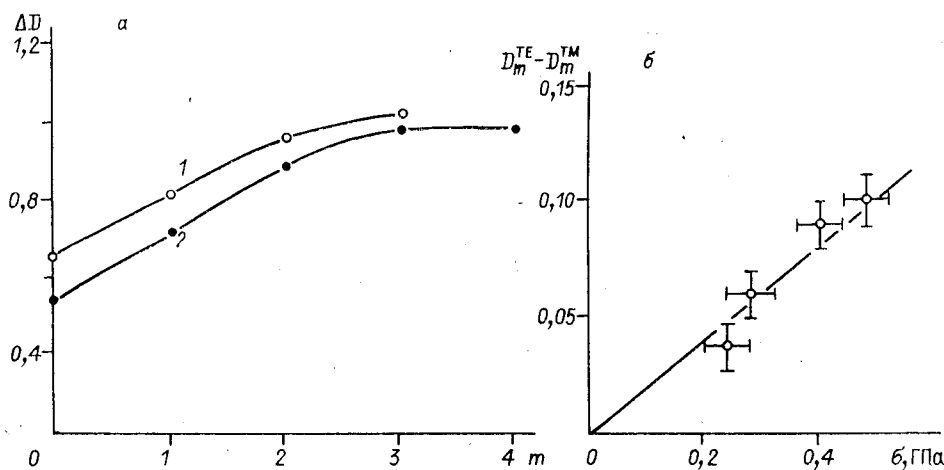


Рис. 11. Влияние диффузионной обработки на фотохромные свойства K^+ -диффузионного волновода на стекле ФХС-4:

a — зависимость плотности наведенного поглощения от номера моды для ТЕ (1)- и ТМ (2)-поляризаций (физический смысл имеют только целые значения m , соответствующие точки на рисунке соединены линиями для наглядности); *б* — связь между диффузионными напряжениями и дихроизмом

лах галогенидов серебра и меди гетерогенных фотохромных стекол. В Ag^+ -диффузионных изотропных волноводах анизотропия наведенного поглощения (пьезодихроизм) не наблюдается. Таким образом, ионообменная обработка гетерогенных фотохромных стекол существенным образом изменяет фоточувствительность волноводных слоев, а также их поляризационные свойства.

Можно заключить, что, помимо чрезвычайно большого разнообразия фотохромных свойств в объеме фотохромных стекол, планарные волноводы на их основе обладают важными дополнительными свойствами: бистабильностью в окрашивании, градиентом фоточувствительности, пьезодихроизмом. Это позволяет разнообразить процессы оптической записи, хранения, считывания и стирания информации в волноводных структурах. Приведем некоторые примеры сочетания фотохромных и волноводных свойств при создании функциональных оптических элементов в планарном исполнении.

Селекторы волноводных мод на фотохромных стеклах. Актуальной задачей при создании различных элементов интегральной оптики является разработка пространственных селекторов волноводных мод. В [6, 11, 39] рассмотрена перспективность использования фотохромных стекол при создании таких элементов. В планарных волноводах происходит пространственно селективное образование и разрушение ЦО. Это несколько необычное явление, поскольку в нем одновременно проявляются особенности квантовой (образование и распад ЦО) и волновой (дискретное распространение собственных типов колебаний — мод) оптики. В планарном волноводе пространственный профиль поля световой волны не может быть произвольно сформирован, как в объемной оптике, а однозначно определяется профилем показателя преломления (см. рис. 7, *a*) и номером волноводной моды m [40]. Поля волноводных мод различны. В случае диффузионных волноводов максимумы полей волноводных мод с различными номерами существенно сдвинуты друг относительно друга: основные максимумы распределения полей мод с большими номерами расположены на большой глубине (см. рис. 7). Рассмотрим два типа селекторов волноводных мод на основе фотохромных стекол: селекторы, записанные внешним излучением, и селекторы, записанные волноводным излучением.

Пусть диффузионный волновод на фотохромном стекле имеет градиент фоточувствительности (см. рис. 11, *a*). Тогда при воздействии

внешнего активирующего излучения в волноводе будет создаваться поглощающая (негативная) маска, профиль поглощения которой будет соответствовать градиенту фоточувствительности (см. рис. 7, а). При распространении волноводных мод с различными номерами через такую аподизирующую маску моды с высшими номерами будут поглощаться сильнее, чем моды с низшими номерами, поскольку максимумы их полей находятся в области максимального поглощения в волноводе (см. рис. 7, а). Такое взаимодействие мод с записанной поглощающей маской приведет к селекции волноводных мод низших порядков.

Принцип создания селекторов волноводным излучением заключается в следующем. Если в многомодовом фоточувствительном волноводе возбудить какую-либо моду активирующим излучением, то волновод будет окрашиваться (обесцвечиваться) и профиль наведенного поглощения (обесцвечивания) целиком будет определяться распределением плотности мощности излучения данной моды (см. рис. 7, б). Таким образом, в волноводе создается аподизирующая протяженная негативная (позитивная) маска, профиль которой согласован с профилем распределения плотности излучения моды в волноводе. (Такую маску можно также рассматривать как беспорядную однолучевую голограмму.) Наведенное затухание для остальных мод определяется перекрытием их полей с профилем созданной маски. Такое окрашивание (обесцвечивание) приводит к селекции волноводных мод (см. рис. 7, б). Чтобы записанная в волноводе маска не уничтожалась в процессе эксплуатации, необходимо использовать рассмотренные выше процессы записи: запись коротковолновым, а считывание длинноволновым излучением или запись за счет пелинейного образования ЦО.

Нами были созданы оба типа селекторов как при обесцвечивании ЦО (использовались γ -окрашенные K^+ -диффузионные волноводы на стекле К-8), так и при линейном и нелинейном образовании ЦО (применялись K^+ -диффузионные волноводы на стеклах ФХС-2, ФХС-4, ФХС-6, ФХС-7). При длине волновода ~ 2 см достигнут коэффициент селекции ~ 700 . Селекторы, записанные волноводным излучением, позволяют проводить селекцию мод с любыми номерами или их комбинациями, а также многократно перестраиваются на моды с другими номерами. Волноводное излучение, пропущенное через такой селектор, несет в себе информацию о номере селектора (т. е. о номере моды или номерах комбинации мод). Селекторы с такими свойствами могут найти применение для цифровой записи информации в многоканальных системах связи.

Таким образом, можно заключить, что обнаруженные и исследованные новые эффекты и явления при образовании или распаде центров окраски в силикатных гомогенных и гетерогенных фотохромных стеклах позволяют заметно расширить области применения этих стекол для записи и хранения информации. Одна из перспективных областей такого применения — оптика волноводов. В планарных волноводах на основе фотохромных стекол можно осуществлять как бинарную, так и голографическую запись, которая реализуется на большой длине без потери контраста. Такая запись может быть использована для хранения (архивная память), обработки информации в задачах связи и управления или для создания различных функциональных интегрально-оптических элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шварц К. К. Физика оптической записи в диэлектриках и полупроводниках.— Рига: Зинатне, 1986.
2. Андриеш А. М., Пономарь В. В., Смирнов В. Л., Миронос А. В. Использование халькогенидных стекол в интегральной и волоконной оптике // Квантовая электрон.— 1986.— Т. 13, № 6.
3. Tangonan G. L., Persechini D. L., Yones V. L. Photochromic waveguides and fibres // Electron. Lett.— 1984.— V. 20, N 7.— P. 287.
4. Чапурия Г. Ф., Кебуладзе Н. А., Мшвелидзе Г. Г., Татулов Р. А. Составной фотоправляемый оптический волновод // Квантовая электрон.— 1979.— Т. 6, № 5.

5. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Цехомский В. А. Фотохромные стекла для интегральной оптики // Проблемы оптической памяти: Тез. докл. III Всесоюз. конф. по вычислительной оптоэлектронике.— Ереван: АН АрмССР, 1987.— Ч. 2.
6. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Модовые селекторы на основе поглощающих масок, автоматически согласованных с полем моды в диффузионных фотохромных волноводах // Оптика и спектроскопия.— 1986.— Т. 60, вып. 3.
7. Андрияш А. М., Кульчин Ю. Н., Пономарь В. В., Смирнова А. С. Запись и считывание голограмм в планарном волноводе // Оптика и спектроскопия.— 1983.— Т. 55, вып. 2.
8. Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф., Дубровин В. Ф. Микроволноводная оптика и голография.— М.: Наука, 1983.
9. Lukosz W., Wüthrich A. Hologram recording and read-out the evanescent field of guided waves // Opt. Commun.— 1976.— V. 19, N 2.— P. 232.
10. Петровский Г. Т., Агафонова К. А., Мишин А. В., Никоноров Н. В. Фотоуправляемые планарные волноводы на основе фотохромного стекла // Квантовая электрон.— 1981.— Т. 8, № 10.
11. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Селектирующие свойства планарных фотоуправляемых волноводов на основе фотохромных стекол // Квантовая электрон.— 1986.— Т. 13, № 4.
12. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Оптический пробой и лазерное окрашивание диффузионных волноводов, содержащих серебро // ЖТФ.— 1983.— Т. 53, № 12.
13. Бабукова М. В., Беренберг В. А., Глебов Л. Б. и др. Исследование диффузионных волноводов на неодимовых силикатных стеклах // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 9.
14. Березин П. Д., Буачидзе З. Э., Семенов А. С. и др. Оптически управляемый дефлектор на основе тонкопленочного волновода // Квантовая электрон.— 1979.— Т. 6, № 7.
15. Cross P. S., Schidt R. V., Thornton R. L., Swith R. W. Optically controlled two channel integrated optical switch // J. Quant. Electron.— 1978.— V. 14.— P. 577.
16. Петровский Г. Т., Агафонова К. А. Волноводные структуры на основе стеклообразных материалов для задач интегральной оптики // Физика и химия стекла.— 1980.— Т. 6, № 1.
17. Цехомский В. А. Фотохромные оксидные стекла // Физика и химия стекла.— 1978.— Т. 4, № 1.
18. Бюргановская Г. В., Варгин В. В., Лео Н. А., Орлов Н. Ф. Действие излучений на неорганические стекла.— М.: Атомиздат, 1962.
19. Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Ланда Л. М. Радиационные эффекты в стеклах.— М.: Энергоиздат, 1982.
20. Глебов Л. Б., Докучаев В. Г., Петровский Г. Т. Спектры поглощения силикатных стекол высокой чистоты с переменным содержанием Fe^{3+} , окрашенных γ -излучением // Физика и химия стекла.— 1985.— Т. 11, № 1.
21. Mackey J. H., Smith H. L., Halperin A. Optical studies in X-irradiated high purity sodium — silicate glasses // J. Phys. Chem. Sol.— 1966.— V. 27, N 11/12.— P. 1759.
22. Глебов Л. Б., Докучаев В. Г., Петров М. А., Петровский Г. Т. Структура спектров поглощения γ -окрашенных натриевосиликатных стекол высокой чистоты в УФ-области // Физика и химия стекла.— 1987.— Т. 13, № 3.
23. Глебов Л. Б., Докучаев В. Г., Петров М. А., Петровский Г. Т. Новый тип собственных центров окраски в натриевосиликатных стеклах // Там же.— № 4.
24. Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Петровский Г. Т., Роговцев П. Н. Запись объемных голограмм в силикатных стеклах // Письма в ЖТФ.— 1984.— Т. 10, № 6.
25. Гагарин А. П., Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Ефимова О. С. Образование центров окраски в натриевокальциевосиликатном стекле при нелинейном поглощении мощного УФ-излучения // Физика и химия стекла.— 1979.— Т. 5, № 3.
26. Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Петровский Г. Т., Роговцев П. Н. Влияние фотообесцвечивания на двухфотонное окрашивание натриевосиликатных стекол // Физика и химия стекла.— 1984.— Т. 10, № 1.
27. Бухараев А. А., Штырьков Н. И., Яфасев Н. Р. Запись трехмерной голограммы на радиационных центрах в стекле // Письма в ЖТФ.— 1975.— Т. 1, № 21.
28. Барачевский В. А., Лашков Г. И., Цехомский В. А. Фотохромизм и его применение.— М.: Химия, 1977.
29. Грачева Л. В. Некоторые особенности спектров собственного и добавочного поглощения галлоидосеребряных фотохромных стекол с примесью меди // Физика и химия стекла.— 1983.— Т. 9, № 15.
30. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Новый тип фоточувствительности — кооперативное размножение центров окраски // Докл. АН СССР.— 1985.— Т. 280, № 5.
31. Findakly T. Glass waveguides by ion exchange. A review // Opt. Eng.— 1985.— V. 24, N 2.— P. 244.
32. Евстропьев К. К. Диффузионные процессы в стекле.— Л.: Стройиздат, 1970.
33. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Филиппова М. Н. Влияние напряжений на показатель преломления градиентных слоев стекла, полученный методом ионообменной диффузии // Физика и химия стекла.— 1983.— Т. 9, № 6.

- химия стекла.— 1984.— т. 10, № 5.
36. Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Оптический пробой поверхности стекла К-8, модифицированной низкотемпературным ионным обменом // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 10.
37. Бабукова М. В., Глебов Л. Б., Никоноров Н. В. и др. Создание и исследование фотоуправляемых планарных волноводов на основе фотохромных стекол // Физика и химия стекла.— 1986.— Т. 12, № 4.
38. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Цехомский В. А. Анизотропия поглощения центрами окраски в диффузионных волноводах на основе фотохромных стекол // Там же.— № 5.
39. Глебов Л. Б., Доценко А. В., Никоноров Н. В., Цыпляев С. А. Селекция мод в планарных фоточувствительных волноводах // Оптика и спектроскопия.— 1987.— Т. 62, вып. 4.
40. Интегральная оптика/Под ред. Т. Тамира.— М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 11 января 1988 г.

УДК 535.36.004.14

СИРО Ф. ВАСКЕС СОАРЕС ДЕ ФРЕЙТАС, И. В. ЧЕРЕМИСКИН
(Москва)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ,
РАССЕЯННОГО НА СЛУЧАЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ВОЛНОВОДЕ**

В настоящей работе на основе методики, разработанной для рассеяния на нерегулярностях границ раздела тонкопленочного волновода [1, 2], исследовалась зависимость характеристик излучения, рассеянного на случайных неоднородностях показателя преломления в несущем слое тонкопленочного диэлектрического волновода, от параметров неоднородностей. Полученные формулы и графики могут быть использованы для диагностики неоднородностей волновода по найденным экспериментально параметрам рассеяния, в частности для определения вида функции корреляции неоднородностей.

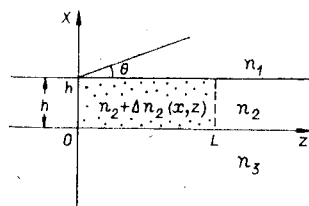


Рис. 1. Тонкопленочный диэлектрический волновод со случайными неоднородностями показателя преломления в несущем слое

В проведенных вычислениях предполагается, что тонкопленочный волновод является бесконечно протяженным в направлении оси y , вариации поля в этом направлении отсутствуют и случайные неоднородности показателя преломления сосредоточены в несущем слое (рис. 1). Распределение показателя преломления в волноводе записывается в виде

$$n^2(x, z) = \begin{cases} n_1^2 & \text{при } x > h; \\ n_2^2 + 2n_2\Delta n_2(x, z) & \text{при } 0 \leq x \leq h; \\ n_3^2 & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (1)$$