

## Фосфоалюмосиликатные световоды, легированные оксидом эрбия

М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, К.В.Зотов, О.И.Медведков,  
Д.С.Липатов, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов

*Исследованы активные свойства эрбиевых световодов с сердцевиной из фосфоалюмосиликатного (ФАС) стекла для широкого диапазона концентраций оксидов эрбия, алюминия и фосфора. Выявлено сходство спектрально-люминесцентных характеристик эрбиевых световодов на основе ФАС стекол с избытком оксида фосфора или алюминия и эрбиевых световодов на основе бинарных стекол, легированных соответственно оксидом фосфора или алюминия. Показано, что соединение  $AlPO_4$ , образующееся в ФАС световодах, не только способствует уменьшению показателя преломления стекла, но и позволяет значительно повысить предел растворимости  $Er_2O_3$  в кварцевом стекле.*

**Ключевые слова:** активные фосфоалюмосиликатные световоды, кластеры, коэффициент усиления.

### 1. Введение

Световоды, легированные ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), являются ключевым элементом волоконных лазеров и усилителей. Известно, что оксиды РЗЭ имеют ограниченную растворимость в кварцевом стекле, поэтому увеличение их концентрации приводит к образованию кластеров и существенному снижению эффективности преобразования излучения накачки в сигнал вследствие ряда кооперативных эффектов [1–3]. Для уменьшения уровня кластеризации обычно применяется солегирование кварцевой сердцевины световода оксидом алюминия либо оксидом фосфора, причем для эффективного растворения в кварцевом стекле необходимо, чтобы на каждый ион РЗЭ приходилось не менее 10 атомов Al либо 15 атомов P [4]. Легирование оксидом фосфора (алюминия) повышает показатель преломления кварцевого стекла, поэтому повышение концентрации РЗЭ в сердцевине световода одновременно приводит к увеличению разности показателей преломления  $\Delta n$  между его сердцевиной и оболочкой.

В последнее время все больший интерес вызывают волоконные лазеры и усилители с высоким уровнем средней либо пиковой мощности [5–7]. Максимальная выходная мощность таких устройств ограничена нелинейными эффектами, которые могут быть подавлены за счет использования световодов с увеличенным диаметром поля моды и уменьшенной рабочей длиной. Уменьшение длины активного световода возможно за счет увеличения концентрации РЗЭ, однако сопутствующее увеличение  $\Delta n$  оказывается неприемлемым в случае световодов с большим диаметром поля моды из-за нарушения режима одномодовости. Поэтому в световодах с

большим полем моды, используемых в мощных лазерах и усилителях, реализуется относительно низкий уровень легирования РЗЭ.

Решение данной проблемы может быть найдено при использовании трехкомпонентного стекла состава  $P_2O_5-Al_2O_3-SiO_2$  в качестве матрицы для введения оксидов РЗЭ. Уникальным свойством фосфоалюмосиликатного (ФАС) стекла является образование в нем соединения  $AlPO_4$ , имеющего показатель преломления (ПП) ниже, чем у кварцевого стекла [8]. В результате возникает возможность легирования сердцевины световодов до высоких концентраций оксидами алюминия и фосфора при одновременном сохранении малой величины  $\Delta n$ . С другой стороны, свойство стекла  $SiO_2-AlPO_4$  во многом близко к свойствам нелегированного кварцевого стекла, поскольку ионы  $Al^{3+}$  и  $P^{5+}$  при образовании соединения  $AlPO_4$  становятся четырехкоординированными и замещают два атома кремния, образуя связь  $\equiv P-O-Al \equiv$ , аналогичную связи  $\equiv Si-O-Si \equiv$  [8, 9]. Возникает вопрос, будут ли атомы алюминия и фосфора, связанные в структурные группы  $AlPO_4$ , повышать растворимость ионов РЗЭ в чисто кварцевом стекле. Предшествующие исследования [10–15], посвященные ФАС световодам, не позволяют однозначно ответить на этот вопрос.

Для того чтобы установить влияние соединения  $AlPO_4$  на растворимость РЗЭ, в настоящей работе проведено исследование активных свойств эрбиевых световодов с ФАС сердцевиной для широкого диапазона концентраций оксидов эрбия, алюминия и фосфора. Выбор оксида эрбия обусловлен наиболее сильным (по сравнению с другими РЗЭ) влиянием кластеризации на активные свойства эрбиевых световодов, что облегчило определение пределов растворимости оксида эрбия в различных стеклянных матрицах.

### 2. Техника эксперимента

Для проведения настоящих исследований при помощи метода MCVD было изготовлено несколько серий заготовок световодов с различной концентрацией

М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, К.В.Зотов, О.И.Медведков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: likhachev@fo.gpi.ru

Д.С.Липатов, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококичестных веществ РАН, Россия, 603950 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 23 марта 2010 года

оксидов фосфора, алюминия и эрбия в сердцевине. Метод MCVD был модифицирован таким образом, что осаждение всех легирующих элементов (в том числе оксидов алюминия и эрбия) осуществлялось из газовой фазы. В частности, для легирования оксидом алюминия порошок  $AlCl_3$  загружался в контейнер, термостатированный при постоянной температуре  $130^\circ C$ . Пары  $AlCl_3$  вместе с газом-носителем (аргоном) поступали в зону реакции по обогреваемой магистрали отдельно от других реагентов до их смешивания в опорной трубе. Аналогичным образом проводилось легирование оксидом эрбия, в качестве исходного реагента для которого был использован дипивалоилметанат эрбия  $Er(DPM)_3$ . Данные модификации позволили обеспечить тщательный контроль состава сердцевины изготавливаемых заготовок, а также возможность введения высоких концентраций легирующих добавок (до 20 мол. %  $Al_2O_3$  и  $P_2O_5$ , до 1 мол. %  $Er_2O_3$ ). Уровень легирования заготовок оксидами фосфора и алюминия контролировался при помощи электронного микроскопа JSM-5910LV (JEOL) с рентгеновским микроанализатором спектра. Концентрация ионов эрбия определялась при помощи электронно-зондового микроанализатора Camebax (Cameca). Измерение профиля показателя преломления заготовок осуществлялось прибором P102 (York Technology).

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

#### 3.1. Спектры поглощения и люминесценции

Спектры оптических потерь всех изготовленных эрбиевых световодов были получены при помощи стандартной методики последовательного уменьшения длины световода (метода обламывания). В ряде предыдущих работ в ФАС световодах с избытком фосфора в спектральном диапазоне 600 – 1600 нм наблюдалась интенсивная (100 – 600 дБ/км) полоса поглощения с максимумом на 1200 нм [10 – 14]. Как показали наши недавние исследования, данная полоса была обусловлена проявлением загрязняющей примеси железа, находящегося в фосфоросиликатном стекле в двухвалентном состоянии [16]. В настоящей работе полоса поглощения на 1200 нм была устранена за счет тщательного контроля чистоты исходных соединений и процесса изготовления заготовок. Поэтому все исследованные эрбиевые световоды с ФАС сердцевиной вдали от пиков поглощения ионов эрбия имели сравнительно низкие (не более 40 дБ/км) оптические потери в ближнем ИК диапазоне. Измерение спектров поглощения ионов  $Er^{3+}$  выявило подобие спектров световодов с ФАС сердцевиной с избыточной концентрацией  $Al_2O_3$  и алумосиликатных световодов, а также спектров ФАС световодов с избытком  $P_2O_5$  и фосфоросиликатных световодов (рис. 1, а).

Для всех исследованных световодов была проанализирована зависимость величины поглощения на длинах волн 980 и 1530 нм от средней концентрации оксида эрбия в сердцевине:

$$C_m = \int_0^\infty C(r)I(r)rdr / \int_0^\infty I(r)rdr, \quad (1)$$

где  $C(r)$  и  $I(r)$  – радиальное распределение концентрации

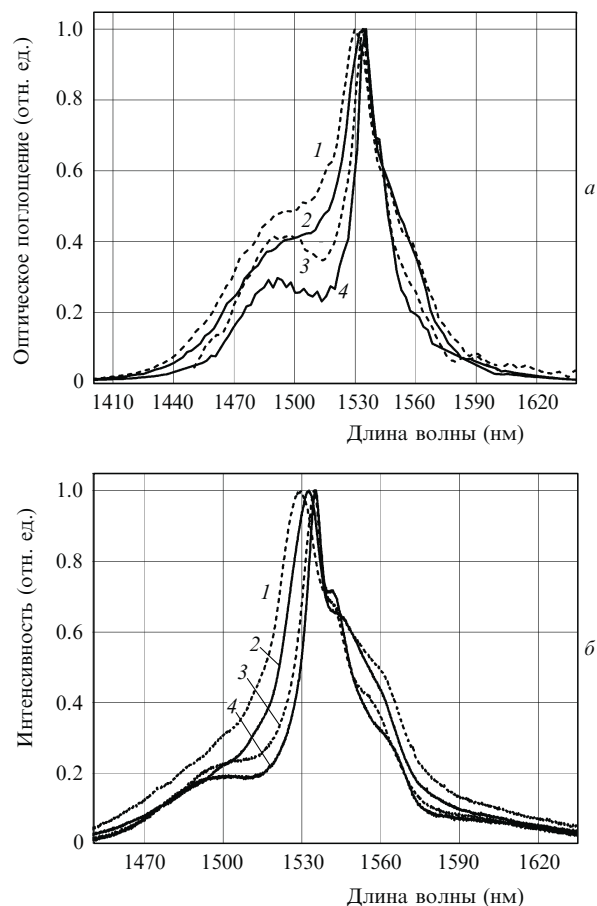


Рис. 1. Характерные спектры поглощения слабого сигнала в области 1.55 мкм (а) и люминесценции ионов эрбия (б) в световодах с сердцевиной, легированной  $Al_2O_3$  (1),  $Al_2O_3$  и  $AlPO_4$  (2),  $P_2O_5$  (3) и  $P_2O_5$  и  $AlPO_4$  (4).

эрбия и интенсивности электрического поля на исследуемой длине волны (980 или 1530 нм) соответственно. Коэффициент экстинкции для полосы поглощения с максимумом на 1530 нм в пределах погрешности измерений ( $\sim 10\%$ ) оказался одинаков для всех типов световодов и составил 780 дБ/м на 1 мол. %  $Er_2O_3$ . Для полосы поглощения с максимумом на 980 нм коэффициент экстинкции составил 240 дБ/м на 1 мол. %  $Er_2O_3$  в случае фосфоросиликатных световодов и ФАС световодов с избытком фосфора, тогда как для алумосиликатных световодов и ФАС световодов с избытком алюминия коэффициент экстинкции оказался в полтора раза больше и составил 350 дБ/м на 1 мол. %  $Er_2O_3$ .

Для измерения спектров люминесценции ионов эрбия в различных матрицах в активный световод вводилось излучение одномодового лазерного диода с длиной волны 980 нм. Длина эрбиевого световода подбиралась достаточно короткой, чтобы предотвратить искажение формы спектра люминесценции вследствие перепоглощения, а возможная генерация устранялась косым сколом выходного торца световода. Спектр люминесценции, выходящей через боковую поверхность световода, измерялся спектроанализатором ANDO AQ6317B. Проведенные измерения показали, что так же, как и в случае спектров поглощения, форма спектров люминесценции оксида эрбия для световодов с ФАС сердцевиной при избыточной концентрации  $Al_2O_3$  или  $P_2O_5$  подобна форме спектров световодов с двухкомпонентной сердцеви-

ной, легированной только  $\text{Al}_2\text{O}_3$  либо  $\text{P}_2\text{O}_5$  соответственно (рис. 1, б).

Стоит отметить, что проведенные ранее исследования спектров поглощения в УФ и видимом диапазонах длин волн для пассивных световодов [16], а также исследования иттербиевых световодов [13, 14] выявили такое же сходство между ФАС световодами и световодами с сердцевиной из двухкомпонентного алюмосиликатного либо фосфоросиликатного стекла. Данный эффект можно объяснить сходством свойств кристаллического  $\alpha$ -кварца и берлинитной формы  $\text{AlPO}_4$  и, как следствие, сходством свойств стекла  $\text{SiO}_2\text{--AlPO}_4$  и кварцевого стекла [8, 9]. Практически все атомы алюминия и фосфора (за исключением находящихся в избытке) участвуют в образовании соединения  $\text{AlPO}_4$ . По этой причине ФАС стекло можно рассматривать как стекло состава  $\text{SiO}_2\text{--AlPO}_4$ , легированное  $\text{P}_2\text{O}_5$  (в случае избытка оксида фосфора) либо  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в случае избытка оксида алюминия). Таким образом, спектрально-люминесцентные свойства ФАС световодов определяются легирующими добавками ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  либо  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), находящимися в избытке.

### 3.2. Усилительные свойства эрбиевых световодов

Кластеризация ионов эрбия является основным фактором, ответственным за ухудшение усилительных свойств эрбиевых световодов [1–3]. В настоящей работе, для того чтобы сравнить растворимость ионов эрбия в различных стеклянных матрицах, была измерена эффективность преобразования излучения накачки в сигнал в схеме волоконного усилителя, работавшего в режиме насыщения [17]. Для минимизации ошибки измерения, связанной с потерями на сварку с активным световодом, была выбрана схема усилителя, в которой накачка и сигнал распространялись в одном направлении (рис. 2). В качестве источника накачки использовался одномодовый лазерный диод (ЛД) с рабочей длиной волны 980 нм и максимальной выходной мощностью 200 мВт. Излучение накачки вводилось в сердцевину исследуемого эрбиевого световода (ЭС) при помощи стандартного телекоммуникационного мультиплексора 980/1550 нм (WDM). Через тот же мультиплексор вводился сигнал от лазерного диода на длине волны 1550 нм мощностью 10 мВт. Волоконный изолятор на  $\lambda = 1550$  нм устранял возможность перехода волоконного усилителя в режим генерации. Отражение выходного сигнала обратно в усилитель от торца эрбиевого световода подавлялось путем приварки многомодового световода (ММС) с диаметром сердцевины 60 мкм. Мощности накачки и входного сигнала измерялись на входе в усилитель напрямую, путем облома активного световода в точке 1. Использованная схема

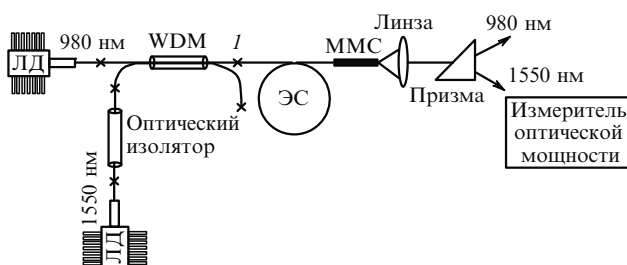


Рис. 2. Схема установки для измерения эффективности усиления эрбиевых световодов.

позволила минимизировать ошибки измерения, связанные с появлением генерации, спонтанной люминесценции, а также с изменением потерь на сварку выходного конца мультиплексора и эрбиевых световодов, имевших различные диаметры сердцевины. Излучения непоглощенной мощности накачки (980 нм) и усиленного сигнала (1550 нм) на выходе усилителя разводились при помощи кварцевой призмы и измерялись раздельно. Оптимальная длина эрбиевого световода подбиралась экспериментально по максимальной мощности усиленного сигнала. Величина, характеризующая эффективность преобразования излучения накачки в сигнал (эффективность усиления), определялась по наклону экспериментальной зависимости разности  $P_{\text{out}} - P_{\text{in}}$  от мощности накачки  $P_p$ , введенной в эрбиевый световод, где  $P_{\text{out}}$  и  $P_{\text{in}}$  – выходная и введенная мощности оптического излучения на длине волн 1550 нм.

Исследуемые эрбиевые световоды в зависимости от состава стекла сердцевины были разделены на несколько серий: фосфоросиликатные (с концентрацией 4–10 мол. %  $\text{P}_2\text{O}_5$ , назовем их Р световоды); алюмосиликатные (с концентрациями 1.5, 3, 6 и 12 мол. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , соответственно Al-1.5, Al-3, Al-6 и Al-12 световоды); ФАС световоды с избытком оксида фосфора в сердцевине (избыточная концентрация  $\sim 4$  мол. %  $\text{P}_2\text{O}_5$ , ФАС–Р световоды); ФАС световоды с избытком оксида алюминия (избыточная концентрация 1.5, 3 и 6 мол. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , соответственно ФАС–Al-1.5, ФАС–Al-3 и ФАС–Al-6 световоды). В каждой серии концентрация оксида эрбия варьировалась в широком диапазоне. Эффективности усиления при различных концентрациях  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , измеренные для всех серий световодов, представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, при высокой концентрации  $\text{Er}_2\text{O}_3$  наиболее высокую эффективность усиления имеют световоды с алюмосиликатной сердцевиной, легированные  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с концентрацией 3 мол. % и более. При этом изменение концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в сердцевине от 3 до 12 мол. % (Al-3, Al-6 и Al-12 световоды), как и добавление  $\text{AlPO}_4$  (ФАС–Al-3 и ФАС–Al-6 световоды), не приводит к росту эффективности усиления. Все экспериментальные точки ложатся на одну «предельную» кривую 1. Максимально достижимая эффективность усиления снижается с ростом концентрации эрбия, и это связано, по-видимому, с тем,

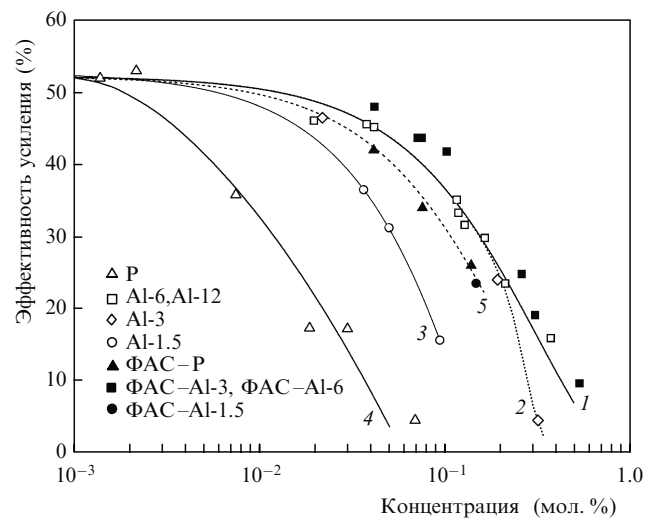


Рис. 3. Зависимость эффективности усиления световодов от концентрации ионов эрбия и состава сердцевины.

что даже в отсутствие кластеризации распределение ионов эрбия неравномерно по объему стекла. Поэтому при увеличении концентрации эрбия становится все более вероятным нахождение ионов эрбия на расстоянии, достаточном для передачи энергии друг другу [2].

На рис.3 наблюдается снижение эффективности усиления относительно «предельной» для Al-3 световодов с концентрацией ионов эрбия 0.3 мол. % (кривая 2), а также для Al-1.5 световодов с концентрацией ионов эрбия более 0.03 мол. % (кривая 3). В обоих случаях концентрация  $Al_2O_3$  недостаточна для предотвращения кластеризации ионов эрбия, что качественно соответствует результатам работы [1], в которой указывалось, что на один атом эрбия должно приходиться не менее 20 атомов алюминия.

В фосфоросиликатной матрице оксид эрбия растворяется гораздо хуже, чем в алюмосиликатной [18]. Поэтому в световодах с фосфоросиликатной сердцевиной снижение эффективности усиления наблюдается при более чем на порядок меньшей концентрации оксида эрбия, чем в световодах с высокой концентрацией  $Al_2O_3$  (рис.3, кривая 4).

Влияние соединения  $AlPO_4$  на растворимость ионов эрбия проще всего обнаружить при добавлении этого соединения в стеклянную матрицу, наиболее сильно подверженную эффекту кластеризации. В настоящей работе в качестве такой матрицы было выбрано фосфоросиликатное стекло. Проведено сравнение двух образцов: Р световода (4 мол. %  $P_2O_5$  и 0.7 масс. % F) и ФАС-Р световода (9 мол. %  $AlPO_4$ ). В обоих случаях концентрация оксида эрбия была одинаковой (0.07 мол. %). Легирование фосфоросиликатного световода фтором использовалось для снижения показателя преломления сердцевины до уровня ФАС-Р световода, в котором присутствие 9 мол. %  $AlPO_4$  приводило к снижению  $\Delta n$  приблизительно на 0.001. В результате оба световода имели одинаковые  $\Delta n$  (рис.4,а) и длину волны отсечки, что позволило избежать возможных ошибок, связанных с различием волноводных параметров сравниваемых световодов. Фактическим различием световодов являлось присутствие 9 мол. %  $AlPO_4$  в ФАС световоде и 0.7 масс. % F в фосфоросиликатном световоде. Измерение эффективности усиления показало, что такая концентрация эрбия слишком высока для фосфоросиликатного световода и он практически утратил способность усиливать сигнал (рис.4,б, кривая 1). В то же время эффективность усиления ФАС световода оказалась выше почти на порядок (рис.4,б, кривая 2). Сравнение с Р световодом, в сердцевине которого концентрация фосфора в два раза больше, а концентрация эрбия в два раза меньше (рис.4,б, кривая 3), также указывает на преимущество ФАС-Р световода. Стоит отметить, что в фосфоросиликатном световоде, соответствующем кривой 3, концентрация  $P_2O_5$  оказалась выше не только избыточной, но и абсолютной концентрации  $P_2O_5$  в ФАС-Р световоде. Более того, фтор и другие легирующие добавки не вводились в сердцевину этого фосфоросиликатного световода для чистоты эксперимента. Приведенные на рис.4 данные являются несомненным доказательством способности соединения  $AlPO_4$  снижать кластеризацию ионов эрбия. Из сравнения ФАС-Р световодов и Р световодов для широкого диапазона концентраций ионов эрбия (рис.3, кривые 4 и 5) следует, что присутствие соединения  $AlPO_4$  в фосфоросиликатном стекле позволяет почти на порядок увели-

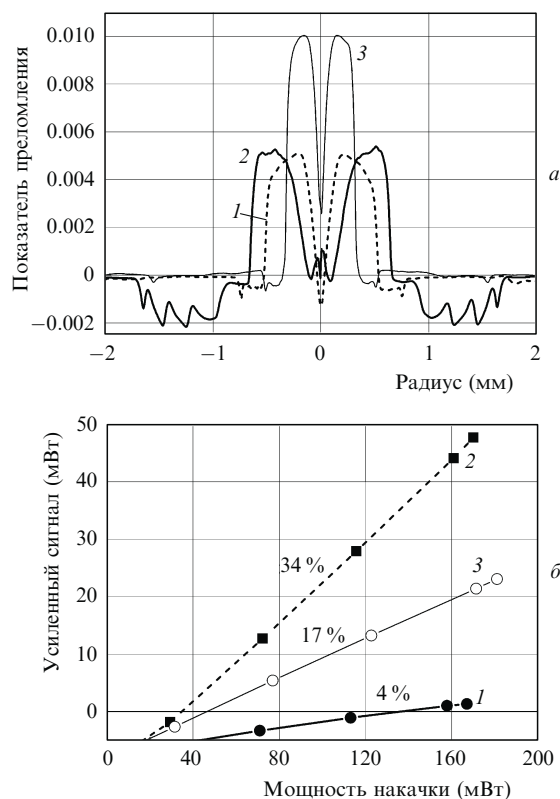


Рис.4. Профили показателя преломления эрбиевых световодов с сердцевиной, легированной  $P_2O_5$  с концентрацией 6 мол. % и F – 0.7 масс. % (кривая 1),  $P_2O_5$  с концентрацией 4 мол. % и  $AlPO_4$  – 9 мол. % (кривая 2),  $P_2O_5$  с концентрацией 11 мол. % (кривая 3) (а), а также зависимость усиленного сигнала на  $\lambda = 1.55$  мкм от введенной мощности накачки на  $\lambda = 0.98$  мкм для этих световодов (б).

чить концентрацию оксида эрбия при сохранении величины эффективности усиления.

Результаты, представленные на рис.3, показывают, что эффективность усиления в световодах, содержащих более 3 мол. %  $Al_2O_3$ , оказывается выше, чем в ФАС световодах с избытком фосфора либо с небольшим (~1.5 мол. %) избытком  $Al_2O_3$ . В алюмосиликатную матрицу удается ввести ионы эрбия с приблизительно в полтора раза большей концентрацией при той же эффективности усиления. Однако, вследствие высокой молярной рефрактивности  $Al_2O_3$ , увеличение его концентрации всего до 3 мол. % приводит к повышению ПП сердцевины до  $\sim 7 \times 10^{-3}$ . Уменьшение ПП сердцевины до 0.002–0.003 даже при дополнительном легировании фтором (~0.7 масс. %) возможно только при снижении концентрации  $Al_2O_3$  до 1.5 мол. % и приводит к падению эффективности усиления эрбиевых световодов (рис.3, кривая 3). В данном случае можно ожидать, что использование ФАС стекла предотвратит снижение эффективности усиления. Для проверки этого предположения нами были исследованы два световода – Al-1.5 (0.7 масс. % F, 0.095 мол. %  $Er_2O_3$ ) и ФАС-Al-1.5 (30 мол. %  $AlPO_4$ , 0.15 мол. %  $Er_2O_3$ ), имевшие приблизительно одинаковые длины волн отсечки и показатели преломления сердцевины. Результаты измерений, представленные на рис.5, показывают, что, несмотря на меньшую в полтора раза концентрацию ионов эрбия, Al-1.5 световод (кривая 1) продемонстрировал заметно худшую эффективность усиления по сравнению с ФАС-Al-1.5 световодом (кривая 2). Как уже отмечалось выше, повышение концентрации алюминия до

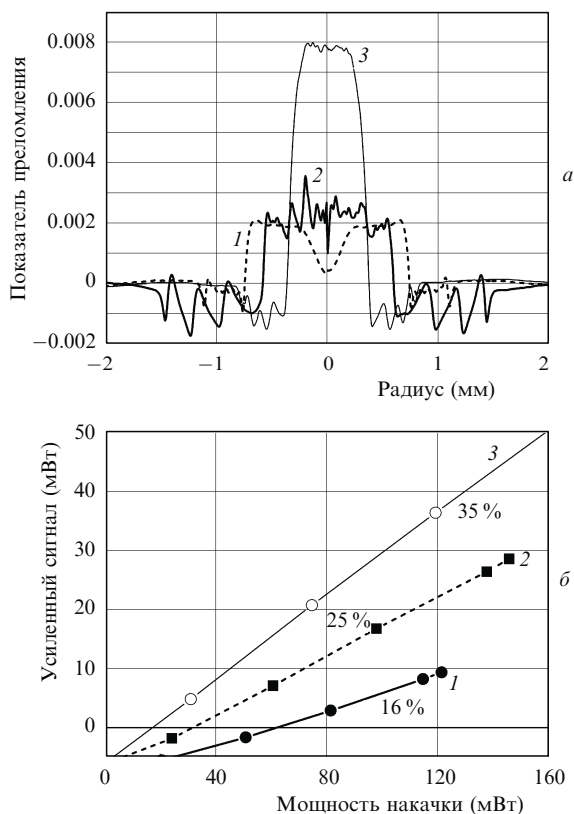


Рис.5. Профили показателя преломления эрбиевых световодов с сердцевинной, легированной  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с концентрацией 1.5 мол. % и F – 0.7 масс. % (кривая 1),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с концентрацией 1.5 мол. % и  $\text{AlPO}_4$  – 30 мол. % (кривая 2),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с концентрацией 3 мол. % (кривая 3) (а), а также зависимость усиленного сигнала на длине волны 1.55 мкм от введенной мощности накачки на 0.98 мкм для этих световодов (б).

3 мол. % (кривая 3) позволяет существенно повысить эффективность усиления, однако одновременно происходит резкий рост ПП сердцевин. Заметим, что точка на рис.3, соответствующая ФАС – Al-1.5 световоду, легла на ту же кривую 5, что и точки ФАС – P световода. В обоих случаях избыточная концентрация солегирующих добавок ( $\text{P}_2\text{O}_5$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) недостаточна для эффективного растворения ионов эрбия, и кривая 5 характеризует влияние структурных групп  $\text{AlPO}_4$  на растворимость  $\text{Er}_2\text{O}_3$ .

Таким образом, для эрбиевых световодов с увеличенной площадью поля моды оказывается целесообразным в качестве стекла сердцевинки использовать ФАС матрицу. С одной стороны,  $\text{AlPO}_4$  снижает ПП сердцевинки световода. С другой стороны, благодаря тому, что концентрация входящего в состав сердцевинки  $\text{AlPO}_4$  высока (10 – 30 мол. %), его присутствие, даже несмотря на более низкую, чем у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , способность растворять ионы эрбия, позволяет заметно повысить эффективность усиления.

Использование ФАС стекла для изготовления активных световодов дает также дополнительные преимущества. Известно, что фосфоросиликатное стекло, как и алюмосиликатное, имеет крайне низкую фоточувствительность, поэтому резонаторы волоконных лазеров обычно создаются путем сварки активного световода и германосиликатных пассивных световодов с записанными в них брэгговскими решетками. Потери в точках сварки вызывают снижение эффективности волоконного лазера. В случае ФАС световодов введение приблизительно равных концентраций оксидов алюминия и фосфора при-

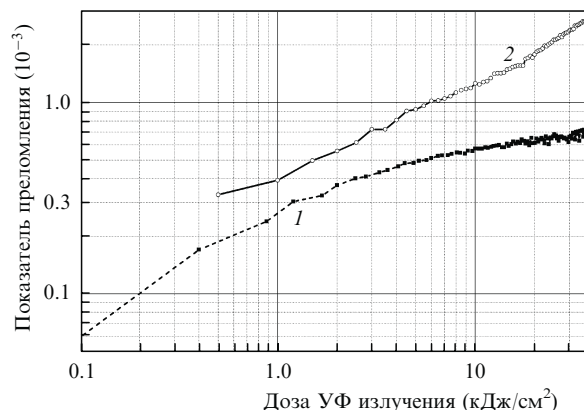


Рис.6. Динамика наведения показателя преломления для ФАС световода, легированного  $\text{GeO}_2$  (5 мол. %) (1) и для германосиликатного световода, содержащего  $\text{GeO}_2$  (4.5 мол. %) (2).

водит к снижению показателя преломления ниже уровня кварцевого стекла, что позволяет формировать профиль ПП этих световодов за счет введения дополнительных легирующих добавок. В случае солегирования оксидом германия можно ожидать существенного повышения фоточувствительности световода, в результате чего появится возможность записывать брэгговские решетки непосредственно в сердцевине активного световода.

Для проверки данной идеи нами был изготовлен эрбиевый световод, легированный  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1.5 мол. %),  $\text{AlPO}_4$  (26 мол. %),  $\text{GeO}_2$  (5 мол. %) и  $\text{Er}_2\text{O}_3$  (0.043 мол. %). Фоточувствительность этого световода сравнивалась с фоточувствительностью германосиликатного световода, легированного  $\text{GeO}_2$  с концентрацией 4.5 мол. % ( $\Delta n = 0.007$ ). Для повышения фоточувствительности оба световода предварительно выдерживались в атмосфере  $\text{H}_2$  при давлении 100 атм и температуре 100 °C до насыщения сетки стекла световода молекулярным водородом. Динамика роста наведенного ПП оценивалась по коэффициенту отражения брэгговской внутриволоконной решетки, записанной интерферометрическим методом с помощью второй гармоники  $\text{Ag}^+$ -лазера (244 нм). Для эрбиевого ФАС световода, содержащего  $\text{GeO}_2$ , скорость роста наведенного ПП (рис.6, кривая 1) оказалась сравнимой со скоростью роста в германосиликатном световоде с приблизительно таким же содержанием  $\text{GeO}_2$  (рис.6, кривая 2). Дифференциальная эффективность эрбиевого волоконного лазера с записанным в этом световоде резонатором, состоящим из двух брэгговских решеток с коэффициентами отражения 100 % и 10 % на длине волны 1580 нм, составила 43 %.

#### 4. Заключение

Проведено исследование оптических свойств эрбиевых световодов с ФАС сердцевинкой для широкого диапазона концентраций оксидов эрбия, алюминия и фосфора. Обнаружено сходство спектрально-люминесцентных характеристик эрбиевых световодов с ФАС сердцевинкой, легированной избытком оксида фосфора либо алюминия и эрбиевых световодов на основе бинарных стекол, легированных соответственно оксидами фосфора либо алюминия.

Продемонстрировано, что в случае фосфоросиликатной матрицы за счет добавления  $\text{AlPO}_4$  максимально допустимая концентрация эрбия может быть увеличена

почти на порядок при неизменной эффективности усиления. Показано, что в алумосиликатных световодах с малой концентрацией  $Al_2O_3$  (1.5 мол. %) добавка  $AlPO_4$  позволяет значительно повысить эффективность усиления при больших концентрациях  $Er_2O_3$ . Продемонстрирована возможность записи внутриволоконных брэгговских решеток непосредственно в сердцевине активных ФАС световодов, солегированных оксидом германия.

Авторы благодарят директора НЦВО Е.М.Дианова за постоянную поддержку и проявленный интерес к данной работе.

1. Wagener J.L., Dignonnet M.J.F., Wysocki P.F., Shaw H.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2073**, 14 (1993).
2. Quimby R.S., Miniscalco W.J. Thompson B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2073**, 2 (1993).
3. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.В., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, (6), 559 (2005).
4. Arai K., Namikawa H., Kumata K., Honda T., Ishii Y., Handa T. *J. Appl. Phys.*, **59**, 3430 (1986).
5. Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N. Nilsson J. *Opt. Express*, **12**, 6088 (2004).
6. Roser F., Eidam T., Rothhardt J., Schmidt O., Schimpf D.N., Limpert J. Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **32**, 3495 (2007).
7. Jasapara J.C., Andrejco M.J., Yablon A.D., Nicholson J.W., Headley C. DiGiovanni D. *Opt. Lett.*, **32**, 2429 (2007).
8. DiGiovanni D.J., MacChesney J.B. Kometani T.Y. *J. Non-Cryst. Solids*, **113**, 58 (1989).
9. Kosinski S.G., Krol D.M., Duncan T.M., Douglass D.C., MacChesney J.B. Simpson J.R. *J. Non-Cryst. Solids*, **105**, 45 (1988).
10. Vienne G.G., Brocklesby W.S., Brown R.S., Chen Z.J., Minelly J.D., Roman J.E., Payne D.N. *Opt. Fiber Technol.*, **2**, 387 (1996).
11. Unger S., Schwuchow A., Dellith J., Kirchhof J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6469**, 646913 (2007).
12. Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Likhachev M.E., Zotov K.V., Bubnov M.M. *Proc. of 32th ECOC* (Berlin, Germany, 2007, Paper P020).
13. Jetschke S., Unger S., Schwuchow A., Leich M. Kirchhof J. *Opt. Express*, **16**, 15540 (2008).
14. Unger S., Schwuchow A., Jetschke S., Reichel V., Leich M., Scheffel A., Kirchhof J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7212**, 72121B (2009).
15. Suzuki S., McKay H.A., Peng X., Fu L. Dong L. *Opt. Express*, **17**, 9924 (2009).
16. Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Зотов К.В., Исакова Л.Д., Лаврищев С.В., Липатов Д.С., Лихачев М.Е., Рыбалтовский А.А., Хопин В.Ф., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **39**, 857 (2009).
17. Laming R.I., Townsend J.E., Payne D.N., Meli F., Grasso G. Tarbox E.J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 253 (1991).
18. Craig-Ryan S.P., Massicott J.F., Wilson M., Ainslie B.J., Wyatt R. *Proc. of 16th ECOC* (Amsterdam, The Netherlands, 1990, p. 571).