

# Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия

А.Ю.Плоцкий, А.С.Курков, М.Ю.Яшков, М.М.Бубнов,  
М.Е.Лихачев, А.А.Сысолятин, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Для световодов с сердцевиной на основе алюмосиликатного стекла, легированного ионами эрбия с концентрациями в диапазоне  $3 \times 10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , измерена относительная концентрация ионов эрбия, безызлучательно релаксирующих на основной уровень из-за взаимодействия на метастабильном уровне. Определена зависимость доли таких ионов от концентрации  $\text{Er}^{3+}$  для световодов с различным содержанием оксида алюминия в сердцевине. Показано, что увеличение концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  существенно снижает долю ионов эрбия, не участвующих в процессе усиления. Установлено, что кластеризация приводит к существенному падению коэффициента усиления активных световодов с высокой концентрацией  $\text{Er}^{3+}$ . На основании проведенных измерений построена зависимость квантовой эффективности волоконного усилителя от концентрации ионов эрбия. Данная зависимость может быть использована для оптимизации параметров эрбиевых волоконных усилителей.*

**Ключевые слова:** волоконные световоды, ионы эрбия, коэффициент усиления.

## 1. Введение

Волоконные световоды, легированные ионами эрбия, относятся к одному из самых распространенных типов активных волоконных световодов вследствие их широкого использования в волоконных усилителях для систем оптической связи. Одной из важных характеристик усилителя является длина используемого активного световода, которая, в основном, определяется концентрацией активных ионов, поэтому в ряде работ была исследована эффективность усиления в световодах с различной концентрацией активных ионов. В работах [1, 2] показано, что эффективность усиления снижается, если концентрация ионов эрбия превышает определенный предел, причем величина этой предельной концентрации зависит от наличия и концентрации других легирующих примесей. В частности было установлено, что введение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в сетку кварцевого стекла позволяет повысить предельную концентрацию редкоземельных ионов.

В [1, 2] падение эффективности усиления объясняется кластеризацией ионов эрбия, причем с ростом абсолютной концентрации оксида эрбия относительная доля кластеризованных ионов возрастает. При возбуждении двух ионов эрбия, находящихся в кластере, на метастабильный уровень происходит передача энергии от одного иона к другому. В результате один из ионов переходит на более высокий энергетический уровень, а другой безызлучательно релаксирует на основной уровень. Та-

ким образом, половина ионов, входящих в кластеры (если считать, что кластеры состоят только из двух активных ионов), находится на основном уровне вне зависимости от мощности накачки и не участвует в процессе усиления. В результате возникают потери как мощности накачки, так и усиленного сигнала, поскольку эрбиевый усилитель работает по трехуровневой схеме. Поэтому для активных световодов, используемых в усилителях в линиях оптической связи, максимальная концентрация активных ионов не превышает  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  при молярной концентрации оксида алюминия 1%–2%. При такой концентрации ионов эрбия длина используемого активного световода составляет около 10 м.

В последнее время интерес к световодам с высокой концентрацией  $\text{Er}_2\text{O}_3$  вновь возрос, что объясняется развитием импульсных волоконных лазеров с длительностью импульса в десятки и сотни фемтосекунд [3, 4]. Обычно средняя мощность таких лазеров невелика и их эффективное применение требует дополнительного усиления импульсов. В этом случае длина активного световода в усилителе оказывается принципиальной, т. к. ее уменьшение снижает вероятность возникновения нелинейных эффектов и искажения формы импульса.

Цель настоящей работы – измерение концентрации кластеров в световодах, изготовленных по MCVD-технологии с легированием как оксидом эрбия, так и оксидом алюминия. По сравнению с широко распространенной технологией легирования из раствора данный метод позволяет существенно увеличить концентрацию оксида алюминия в сердцевине световода. В работе [5] световоды, изготовленные по такой же технологии, были использованы для демонстрации возможности создания коротких усилителей. Кроме того, актуальным является исследование усилительных свойств данных световодов и определение зависимости эффективности усиления от концентрации легирующих оксидов для правильного выбора состава активной среды короткого волоконного усилителя.

А.Ю.Плоцкий, А.С.Курков, М.Ю.Яшков, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев, А.А.Сысолятин, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: (095) 132 82 56, факс: (095) 135 19 36, e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 4; тел: (831) 2-127313, факс: (831) 266-4634

Поступила в редакцию 25 марта 2005 г.

## 2. Экспериментальные образцы

В настоящей работе исследовались 10 образцов волоконных световодов. Все они были изготовлены по MCVD-технологии с легированием оксидами эрбия и алюминия из газовой фазы. Основные характеристики исследованных световодов приведены в табл.1. Концентрация  $\text{Al}_2\text{O}_3$  определялась из профиля показателя преломления, измеренного в заготовке световода, концентрация ионов эрбия – по измеренному поглощению в области 1.53 мкм с учетом радиального распределения поля распространяющегося излучения.

Табл.1. Параметры исследованных световодов.

Номер образца	$\Delta n$	$C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (%)	$\lambda_c$ (мкм)	$N_{\text{Er}^{3+}}$ ( $10^{18} \text{ см}^{-3}$ )	$k$ (%)
1	0.017	9	0.9	22	2.2
2	0.016	8.4	0.96	13	1.8
3	0.014	7.4	0.93	3	< 0.5
4	0.0167	8.8	0.82	65	4.2
5	0.0187	9.8	0.8	100	8.5
6	0.0025	1.3	1.44	17.5	6.3
7	0.0071	3.7	1.43	8	2.5
8	0.0033	1.7	1.44	12.5	4.5
9	0.0049	2.6	1.37	13	4.2
10	0.003	1.6	1.47	17	5.7

Все образцы могут быть разделены на две группы. Световоды № 1–5 имеют большую разность показателей преломления сердцевины и оболочки, молярное содержание оксида алюминия более 7% и длину волны отсечки  $\lambda_c < 1$  мкм. Эти параметры обеспечивают сдвиг длины волны нулевой хроматической дисперсии  $\lambda_0$  в спектральную область свыше 1.55 мкм; хроматическая дисперсия в области усиления составляет  $-15 \div -20$  пс·нм $^{-1}$ ·км $^{-1}$ . Световоды № 6–10 имеют малую разность показателей преломления сердцевины и оболочки, молярное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  менее 4% и длину волны отсечки, лежащую в спектральной области 1.4–1.5 мкм. При этом длина волны нулевой хроматической дисперсии  $\lambda_0$  находится вблизи 1.3 мкм, а хроматическая дисперсия в области усиления составляет  $15-20$  пс·нм $^{-1}$ ·км $^{-1}$ . Таким образом, исследованные световоды обладают принципиально различными дисперсионными свойствами и могут быть использованы, например, для лазерной генерации коротких импульсов и их сжатия в процессе усиления.

## 3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника сигнала использовался волоконный лазер с максимальной выходной мощностью 5 мВт на длине волны 1.56 мкм, в качестве источника накачки

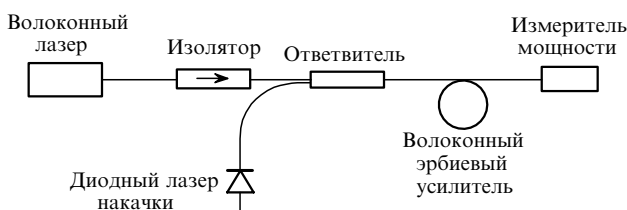


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

качки – полупроводниковый лазер с волоконным выходом и выходной мощностью до 300 мВт на длине волны 0.976 мкм. Излучения сигнала и накачки объединялись с помощью мультиплексора. Для оптической развязки источника сигнала и усилителя в схему устанавливался изолятор. Выходная мощность усилителя контролировалась измерителем мощности.

## 4. Измерение степени кластеризации ионов $\text{Er}^{3+}$

Степень кластеризации ионов эрбия в изготовленных световодах измерялась методом, предложенным в работе [6]. Для определения доли ионов  $2k$ , объединенных в пары, в [6] измерялась зависимость пропускания излучения  $T$  на длине волны 0.98 мкм, соответствующей одной из полос поглощения ионов  $\text{Er}^{3+}$ , от вводимой мощности  $P$ . При этом предполагалось, что взаимодействие активных ионов в кластерах приводит к тому, что вследствие передачи энергии часть ионов  $k$  быстро релаксирует в основное состояние, поглощая излучение накачки независимо от ее мощности. Таким образом, измерения  $T(P)$  позволяли определить остаточное поглощение. В работе [7] для более корректного учета волноводных характеристик активного световода предложено сравнивать измеренную зависимость  $T_m(P)$  с соответствующей расчетной зависимостью  $T_c(P)$ , полученной в предположении отсутствия передачи энергии между ионами. Тогда долю ионов  $k$ , релаксирующих на основной уровень, можно определить из следующего соотношения:

$$k = \frac{10}{L\alpha} \lg \frac{T_c}{T_m}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина отрезка световода;  $\alpha$  – коэффициент поглощения, измеренный в режиме слабого входного сигнала.

Расчет пропускания проводился нами с помощью модели из работы [8] с учетом как усилительных, так и волноводных свойств волоконного световода, легированного ионами эрбия. В качестве исходных данных использовались измеренные параметры световодов и табличные значения сечений поглощения и люминесценции, а также времени жизни ионов эрбия на метастабильном уровне в кварцевом стекле с добавкой оксида алюминия. Следует отметить, что в режиме насыщения данные расчета слабо изменяются при вариации исходных данных.

Для проверки этой методики был проведен расчет и измерена зависимость пропускания от мощности введенного излучения для образца длиной 4 м с невысокой ( $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) концентрацией ионов эрбия (№ 3 в табл.1). При измерении пропускания сигнал на длине волны 1.56 мкм не подавался и исследовалось лишь пропускание излучения накачки. Результаты, представленные на рис.2,а, показывают хорошее совпадение расчетных и измеренных данных, что позволяет сделать вывод о малой степени кластеризации ионов  $\text{Er}^{3+}$ . С учетом разброса экспериментальных точек и влияния ошибок измерения параметров световода погрешность измерения доли релаксирующих ионов  $k$  может быть оценена в 0.5%. Поэтому можно считать, что в данном образце  $k < 0.5\%$ . Аналогичный результат был получен в работе [6] для световода с близкой концентрацией ионов эрбия.

На рис.2,б представлены зависимости пропускания от мощности введенного излучения для двух световодов

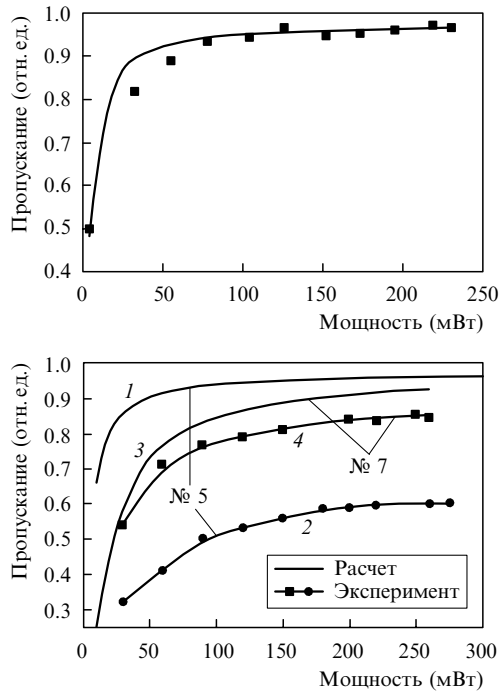


Рис.2. Расчетная и измеренная зависимости пропускания от мощности излучения для образца № 3 (а) и для образцов № 5 (1, 2) и № 7 (3, 4) (б).

с концентрациями ионов эрбия  $10^{20}$  и  $8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (образцы № 5 и 7 в табл.1). Длины использованных отрезков световодов составили 0.3 м (№ 5) и 2 м (№ 7), что обеспечивало примерно одинаковое поглощение слабого излучения. Различие в поведении расчетных значений пропускания (кривые 1 и 3) объясняется увеличением плотности мощности в образце № 5 из-за меньшего диаметра его сердцевины. Приведенные результаты показывают, что для данных образцов характерно значительное расхождение между расчетными и измеренными коэффициентами пропускания, причем это расхождение растет с увеличением концентрации ионов эрбия.

С помощью описанной выше методики мы провели измерения для всех образцов световодов, представленных в табл.1. Там же приведены соответствующие значения параметра  $k$ . На рис.3 эти данные представлены в виде зависимостей доли ионов  $k$  от концентрации ионов

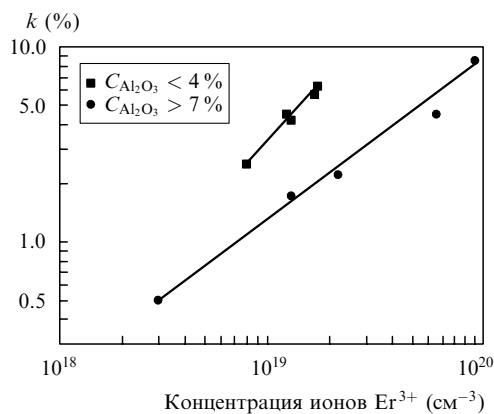


Рис.3. Зависимость доли ионов  $k$ , безызлучательно релаксирующих на основной уровень, от концентрации ионов эрбия для световодов с молярной концентрацией  $\text{Al}_2\text{O}_3$  более 7% и менее 4%.

$\text{Er}^{3+}$  – для световодов с молярной концентрацией  $\text{Al}_2\text{O}_3$  более 7% и менее 4%, что позволяет сделать вывод о сильном влиянии концентрации оксида алюминия на вероятность образования кластеров ионов эрбия. Сравнение с результатами работы [9], в которой для световода с концентрацией ионов эрбия  $6 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , изготовленного с использованием легирования из раствора, было получено  $k = 12\%$ , показывает преимущество в этом отношении световодов, изготовленных по MCVD-технологии с легированием оксидами алюминия и эрбия из газовой фазы, позволяющей достигать более высоких концентраций  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В нашем случае в образце № 4, имеющем концентрацию ионов эрбия, близкую концентрации ионов эрбия из работы [9], параметр  $k$  был равен лишь 4.2%.

## 5. Измерение коэффициента усиления

С помощью установки, схема которой представлена на рис.1, были измерены коэффициенты усиления нескольких активных волоконных световодов. На рис.4 представлены зависимости коэффициента усиления от мощности накачки для двух световодов с высокой концентрацией ионов эрбия –  $6.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (образец № 4), и  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  (образец № 5). Измерения проводились для непрерывного входного сигнала мощностью 1 мВт на длине волны 1.56 мкм. Длина использованных активных световодов составляла 1.6 м (№ 4) и 0.8 м (№ 5). На этом же рисунке представлена расчетная зависимость коэффициента усиления от мощности накачки, полученная без учета влияния взаимодействия ионов эрбия в кластерах (кривая 1) с использованием модели из [8]. Видно, что расхождение между расчетным и измеренными значениями коэффициента усиления составило около 3 дБ для образца № 4 и около 5 дБ – для образца № 5.

С целью определения причины уменьшения усиления в расчетах была учтена безызлучательная релаксация части возбужденных ионов. Доля таких ионов для каждого образца была определена в разд.4. Результаты расчета представлены на рис.4 кривыми 2, 3. Видно, что данные зависимости хорошо соответствуют результатам измерений. Это позволяет сделать вывод о том, что в исследованных световодах с высокой концентрацией ионов эрбия основным источником снижения усиления является передача энергии в кластерах активных ионов.

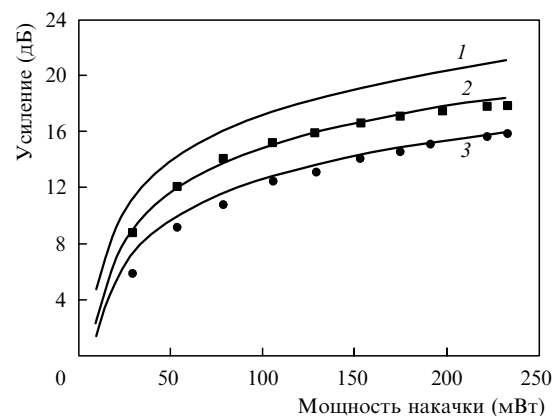


Рис.4. Расчетная зависимость усиления без учета передачи энергии в кластерах (1) и результаты измерения и расчета с учетом передачи энергии в кластерах для образцов № 4 (2) и № 5 (3).

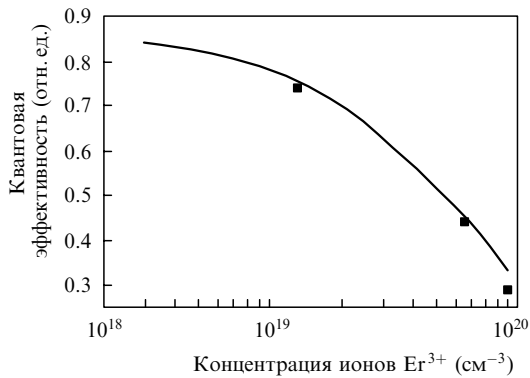


Рис.5. Результаты расчета и измерения квантовой эффективности усилителя от концентрации ионов эрбия для световода с высокой концентрацией примеси  $Al_2O_3$ .

## 6. Влияние концентрации активных ионов на эффективность усиления

Измерение концентрационной зависимости доли безызлучательно релаксирующих ионов  $k$  позволяет рассчитать зависимость эффективности преобразования излучения накачки в усиленный сигнал от  $N_{Er^{3+}}$ . Для расчета использовались волноводные характеристики, близкие к соответствующим параметрам образцов № 1–5: разность показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n = 0.015$ , длина волны отсечки первой высшей моды  $\lambda_c = 0.85$  мкм. Отметим, что данные параметры соответствуют параметрам исследованных световодов с высокой концентрацией оксида алюминия. Мощность входного сигнала принималась равной 1 мВт, накачки – 200 мВт.

На рис.5 представлена расчетная зависимость квантовой эффективности усилителя от концентрации ионов эрбия, а также экспериментальные точки, полученные для трех образцов активных световодов. Видно, что квантовая эффективность световода с невысокой концентрацией ионов эрбия ( $10^{18} см^{-3}$ ) достигает примерно 85 %, а у световодов с концентрацией активных ионов до  $10^{20} см^{-3}$  она падает до 33 %. Справедливость расчета подтверждается экспериментом. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации усилителя коротких импульсов, если в качестве параметра задается выходная пиковая мощность. При этом можно достичь баланса между потерей эффективности усиления

из-за высокой концентрации активных ионов и уширением импульса вследствие большой длины активной среды.

## 7. Выводы

Для световодов с сердцевиной на основе алюмосиликатного стекла, легированной ионами эрбия с концентрациями  $3 \times 10^{18} - 10^{20} см^{-3}$ , измерена относительная концентрация ионов эрбия, безызлучательно релаксирующих на основной уровень из-за взаимодействия на метастабильном уровне. Определена зависимость доли таких ионов от концентрации ионов эрбия для световодов с молярной концентрацией оксида алюминия в сердцевине более 7 % и менее 4 %. Показано, что увеличение концентрации  $Al_2O_3$  существенно снижает долю ионов  $Er^{3+}$ , не участвующих в процессе усиления. Поскольку получение активных световодов по MCVVD-технологии с осаждением оксидов алюминия и эрбия из газовой фазы позволяет достигать таких высоких концентраций этих легирующих примесей, данная технология является предпочтительной по сравнению с другими.

Исследование усилительных свойств активных световодов показало, что кластеризация приводит к существенному снижению коэффициента усиления образцов с высокой концентрацией ионов эрбия. Так, в режиме усиления сильного сигнала потери усиления составили около 5 дБ для световода с концентрацией ионов эрбия  $10^{20} см^{-3}$ . На основании проведенных измерений построена зависимость квантовой эффективности усилителя от концентрации ионов эрбия, которая может быть использована для оптимизации схемы эрбиевых волоконных усилителей.

1. Ainslie B.J. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **2**, 559 (1990).
2. Blixt P.M., Nilsson J., Carlnas T., Jaskorzynska B. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **3**, 996 (1991).
3. Galvanauskas A., Fermann M. E. *Opt. Lett.*, **19**, 1043 (1994).
4. Wen-hua Cao, Wai P. K. A. *Opt. Lett.*, **28**, 284 (2003).
5. Dianov E.M., Karpov V.I., Kurkov A.S., Protopopov V.N., Devyatikh G.G., Guryanov A.N., Gusovskiy D.D., Kobis S.V., Zverev Yu.B. *Proc. of 21 Europ. Conf. on Optical Commun.* (Brussels, 1995, v. 2, p. 21).
6. Delevaque E., Georges T., Monerie M., Lamouler P., Bayon J.-F. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **5**, 73 (1993).
7. Курков А.С. Автореф. докт. дис. (М., ИОФ РАН, 2003).
8. Morkel P.R., Laming R.I. *Opt. Lett.*, **14**, 1062 (1989).
9. Myslinski P., Nguen D., Chrostowski J. *IEEE J. Lightwave Techn.*, **15**, 112 (1997).