

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ ЭРБИЯ В ПРЕФОРМЕ АКТИВНОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

К.П. Латкин, *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН;*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

А.С. Смирнов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

В.В. Бурдин, *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН;*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Проведена оценка мощности люминесценции ионов эрбия в преформе активного волокна на длине волны 1,53 мкм. Полученные данные позволяют судить о возможности корректного измерения концентрации активных ионов эрбия по мощности люминесценции и выбирать параметры элементов экспериментальных установок.

**Ключевые слова:** эрбий, активные волоконные световоды, спектр люминесценции.

### Введение

Активные оптические эрбиевые волокна широко применяются в производстве волоконных усилителей и волоконных лазеров [1], поскольку длина волны люминесценции ионов эрбия (1,53 мкм) попадает в окно прозрачности кварцевых оптических волокон. Важнейшим параметром активного волокна является концентрация активных ионов эрбия, диапазон изменения которой составляет от  $10^{18}$  до  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> (предел растворимости эрбия). Концентрация активных ионов определяет мощность люминесценции и коэффициенты усиления будущих волоконных лазеров и усилителей. Контроль концентрации активных ионов эрбия необходимо осуществлять еще на стадии преформы будущего активного волокна. Производится накачка сердцевин преформы излучением с длиной волны 980 нм, и концентрация измеряется по мощности люминесценции активных ионов [3, 4]. Для того чтобы убедиться в

корректности полученных экспериментальных данных, правильно подобрать параметры отдельных элементов для экспериментальной установки, необходимо провести оценку мощности люминесценции активных ионов в преформе.

### Теоретические расчеты мощности люминесценции

Будем считать, что сердцевина активной заготовки из алюмосиликатного стекла с ионами эрбия облучается сбоку светом интенсивности  $I$ . На рис. 1 показана схема

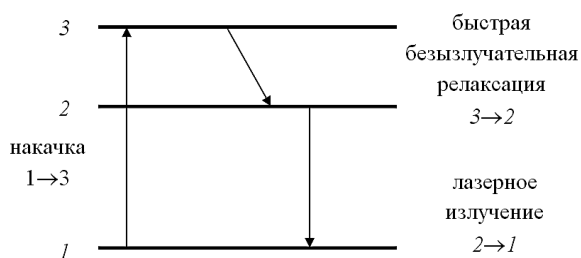


Рис. 1. Схема уровней иона  $Er^{3+}$

уровней энергии иона  $\text{Er}^{3+}$ . Интенсивность люминесценции прямо пропорциональна концентрации ионов в метастабильном состоянии  $n_2$  (на втором уровне), которая, в свою очередь, будет прямо пропорциональна суммарной концентрацией ионов эрбия  $n_0$  [2]. Докажем это утверждение.

Рассмотрим трехуровневую схему ионов эрбия (см. рис. 1). Накачка с длиной волны 980 нм переводит атомы эрбия на третий уровень. Далее происходит быстрая безызлучательная релаксация ионов эрбия на второй уровень, который является метастабильным. Время жизни второго уровня относительно перехода на первый уровень составляет  $\tau_{21}=0,012$  с [1].

Процесс  $2 \rightarrow 1$  является лимитирующей стадией релаксации ионов эрбия в основное состояние  $1$ , поскольку время  $\tau_{21}$  значительно больше времени  $\tau_{32}$  безызлучательной релаксации. Концентрацией ионов в состоянии  $3$  можно пренебречь.

Действительно, поскольку процесс  $3 \rightarrow 2$  безызлучательной релаксации очень быстрый, концентрацией ионов эрбия в состоянии  $3$  можно пренебречь. Тогда скорость изменения концентрации ионов эрбия в метастабильном состоянии равна сумме скоростей двух процессов: возбуждения  $1 \rightarrow 3$  и распада  $2 \rightarrow 1$ . При этом скорость процесса  $1 \rightarrow 3$  пропорциональна как концентрации ионов в основном состоянии  $n_1$ , так и интенсивности излучения накачки  $I$  на длине волны 980 нм (интенсивности в сердцевине заготовки). Скорость спонтанного перехода  $2 \rightarrow 1$  пропорциональна только концентрации ионов эрбия на метастабильном уровне  $n_2$ :

$$\frac{dn_2}{dt} = k_1 I_{\text{серд}} n_1 - k_2 n_2. \quad (1)$$

В установившемся режиме

$$\frac{dn_2}{dt} = 0.$$

Тогда из (1) с учетом того, что сумма концентраций на первом и втором уровнях равна общей концентрации ионов эрбия, т.е.  $n_1 + n_2 = n_0$ , получим

$$n_2 = \frac{\alpha n_0}{\alpha + 1}, \quad (2)$$

где коэффициент

$$\alpha = \frac{k_1 I_{\text{серд}}}{k_2}. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует, что концентрация ионов эрбия в возбужденном состоянии прямо пропорциональна суммарной концентрации ионов эрбия. При этом степень насыщения метастабильного уровня  $2$  (фактически величина коэффициента  $\alpha$ , если  $\alpha \ll 1$ ) не зависит от концентрации ионов эрбия в том или ином сечении, а определяется только интенсивностью излучения.

Сделаем оценки коэффициента  $\alpha$  для мощностей накачки сердцевины, порядка  $P=1$  Вт, реально используемых в экспериментальных установках [3, 4].

Константа  $k_2$  представляет собой вероятность распада иона эрбия за 1 с. По смыслу она равна обратному времени жизни ионов эрбия:

$$k_2 = \frac{1}{\tau_{21}}. \quad (4)$$

Произведение коэффициента  $k_1$  на интенсивность света представляет собой по смыслу величину, равную вероятности поглощения накачки одним атомом за 1 с, или, другими словами, равную обратному времени процесса поглощения накачки атомом  $\tau_{13}$ :

$$k_1 I_{\text{серд}} = \frac{1}{\tau_{13}}. \quad (5)$$

Мощность, поглощаемая атомом эрбия,

$$P = \frac{h\nu_{13}}{\tau_{13}}. \quad (6)$$

С другой стороны,

$$P = I\sigma_{13}. \quad (7)$$

Из формул (5), (6) и (7) следует:

$$k_1 = \frac{\sigma_{13}}{h\nu_{13}}. \quad (8)$$

Тогда из формулы (3) получим

$$\alpha = \frac{k_1 I_{\text{серд}}}{k_2} = \frac{\sigma_{13} \tau_{21} I_{\text{серд}}}{h\nu_{13}}. \quad (9)$$

Определим интенсивность излучения в сердцевине  $I_{\text{серд}}$ . Рассмотрим заготовку с характерными параметрами: показателем преломления  $n=1,46$ , радиусом  $R=6,5$  мм и радиусом сердцевины  $R_0=0,75$  мм. Мощность источника накачки  $P \sim 1$  Вт. Обычно для получения параллельного пучка света вместе с источником используется коллиматор. Будем считать, что примерно мощность 1 Вт выходит из коллиматора в виде почти параллельного цилиндрического пучка света с характерным сечением радиуса  $r_0 = 2$  мм. Интенсивность такого пучка  $I_0 = (P/\pi r_0^2) = 0,8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Вследствие преломления на сердцевину будет падать пучок, сечение которого приблизительно будем считать эллипсом с полуосями  $a$  и  $b$  (рис. 2). Оценим  $a$  и  $b$ .

Сначала найдем вертикальный размер

пучка  $a$ . На рис. 3 показан ход лучей света при преломлении на цилиндрической заготовке. Итак, из коллиматора  $K$ , линза которого имеет радиус  $r_0 = 2$  мм, выходит почти параллельный пучок света. Угол расходимости для современных коллиматоров, по крайней мере, не превосходит значение  $\varphi=0,01$  рад  $\approx 0,6^\circ$ . Для дальнейших оценок выбрана величина  $\varphi=0,01$  рад. Если расстояние от коллиматора до заготовки составляет примерно  $z_1 = 10$  мм, то радиус пучка света, падающего на заготовку, составляет  $r_1 = r_0 + \varphi \cdot z_1 = 2 + 0,01 \cdot 10 = 2,1$  мм.

Синус угла  $\gamma$ :  $\sin \gamma = r_1/R = 0,32$ , угол  $\gamma = 18,8^\circ$ . Угол падения крайнего луча пучка на заготовку  $\alpha = \gamma + \varphi = 19,4^\circ$ . Синус угла преломления  $\beta$

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = 0,23.$$

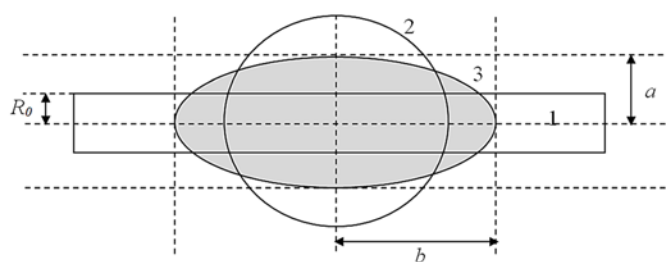


Рис. 2. Преобразование формы сечения пучка света вследствие преломления: 1 – сердцевина заготовки, 2 – круглое сечение пучка, вышедшее из коллиматора, 3 – приблизительно эллиптическое сечение пучка, падающего на сердцевину

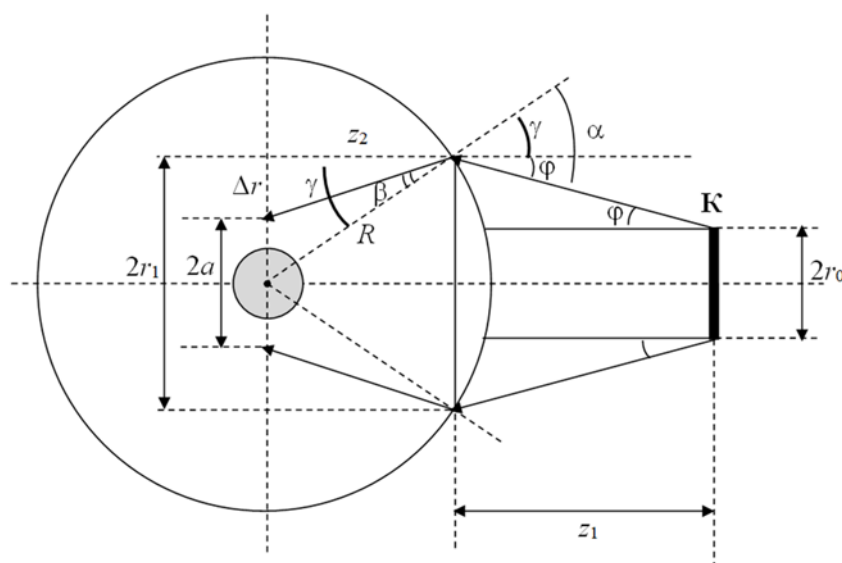


Рис. 3. Ход лучей света при преломлении на круглом сечении цилиндрической заготовки

Отсюда находим, что  $\beta=13,2^0$ . Тогда уменьшение вертикальной ширины пучка внутри заготовки

$$\Delta r = z_2 \operatorname{tg}(\gamma - \beta) = R \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\gamma - \beta) = 0,6 \text{ мм.}$$

В итоге получаем:  $a = r_1 - \Delta r = 1,5 \text{ мм}$ ,

Таким образом, размер  $a$  в 2 раза больше радиуса сердцевинки  $R_0 = 0,75 \text{ мм}$ .

Теперь определим горизонтальный размер пучка  $b$  света (рис. 4). Ход лучей показан на рис. 4. Величина  $r_1$  точно такая же, как на рис. 3:  $r_1 = r_0 + \varphi \cdot z_1$ . Тогда:

$$b = r_1 + \psi(R - R_0) = r_0 + \varphi \cdot z_1 + \psi(R - R_0).$$

С учетом закона преломления  $\psi = \varphi/n$  получаем:  $b = r_0 + \varphi \cdot z_1 + \frac{\varphi}{n}(R - R_0) = 2,1 \text{ мм}$ .

Таким образом, площадь сечения пучка, падающего на сердцевину, можно оценить как площадь эллипса с полуосями  $a=1,5 \text{ мм}$  и  $b=2,1 \text{ мм}$ :  $S = \pi ab \approx 10 \text{ мм}^2$ .

Интенсивность света, падающего на сердцевину,

$$I_{\text{серд}} = \frac{P}{S} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6}} \approx 0,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Сечение поглощения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в германо-алюмосиликатных стеклах на длине волны накачки 980 нм составляет  $\sigma_{13} = 2 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$  [5], время жизни второго уровня относительно перехода на первый уровень  $\tau_{21} = 0,012 \text{ с}$  [1].

В итоге из (9) получим  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ . Уровень мощности накачки 1 Вт соответ-

ствует режиму, далекому от насыщения метастабильного уровня ионов эрбия.

Теперь оценим интенсивность люминесценции ионов эрбия. В формуле (1) произведение  $k_2 n_2$  выражает собой количество переходов ионов эрбия с метастабильного уровня 2 в основное состояние 1 в единице объема за единицу времени. Это количество переходов будет равно соответственно числу фотонов с длиной волны 1540 нм, рождающихся в единице объема. Рассмотрим элемент сердцевинки длиной  $\Delta l$  ( $\Delta l$  – элемент части цилиндра длиной  $2b = 4,28 \text{ мм}$  на рис. 3). Объем этого элемента  $\Delta V = S_0 \Delta l$ . Число фотонов люминесценции, рождающихся в этом объеме за единицу времени будет равно  $k_2 n_2 \Delta V = k_2 n_2 S_0 \Delta l$ . Энергия этих фотонов (мощность люминесценции, исходящей из объема  $\Delta V$ ) будет равна  $k_2 n_2 S_0 \Delta l \cdot hc / \lambda_{21}$ . Поскольку суммарная длина люминесцирующего элемента  $2b$  существенно больше радиуса сердцевинки, для оценки примем, что вся эта энергия за единицу времени выходит через боковую поверхность элемента сердцевинки площади  $2\pi R_0 \Delta l$ . Тогда интенсивность люминесценции

$$I_{\text{люмин}} = \frac{k_2 n_2 S_0 \Delta l hc / \lambda_{21}}{2\pi R_0 \Delta l} = \frac{k_2 n_2 \pi R_0^2 hc}{2\pi R_0 \lambda_{21}} = \frac{k_2 n_2 R_0 hc}{2\lambda_{21}}.$$

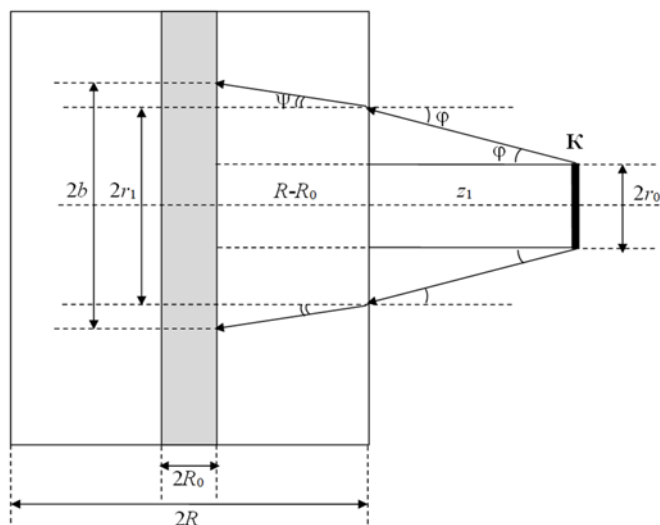


Рис. 4. Ход лучей света при преломлении в плоскости осевого сечения цилиндрической заготовки

Учитывая формулы (2) и (4), а также тот факт, что  $\alpha \ll 1$ , получим

$$I_{\text{люмин}} = \frac{\alpha n_0 R_0 h c}{2 \tau_{21} \lambda_{21}}.$$

Наконец, с учетом (9):

$$I_{\text{люмин}} = \frac{\sigma_{13} \tau_{21} I_{\text{серд}} n_0 R_0 h c}{2 \tau_{21} \lambda_{21} h c / \lambda_{13}} = \frac{n_0 R_0 \sigma_{13} \lambda_{13}}{2 \lambda_{21}} I_{\text{серд}} \quad (10)$$

Проанализируем формулу (10). При увеличении концентрации эрбия  $n_0$  прямо пропорционально растет интенсивность люминесценции. На этом, собственно, основан весь принцип измерения концентрации эрбия. Интенсивность люминесценции прямо пропорциональна интенсивности излучения накачки сердцевин  $I_{\text{серд}}$ , т.е. фактически мощности источника накачки. Источник должен быть стабильным по мощности во время измерения. Ну и, наконец, интенсивность люминесценции прямо пропорциональна радиусу сердцевин заготовки. Дело в том, что при увеличении радиуса, скажем, в 2 раза, объем цилиндра и, соответственно, количество активных ионов и мощность излучения увеличиваются в 4 раза, а площадь поверхности, через которую выходит излучение люминесценции, – только в 2 раза. Это и приводит к увеличению интенсивности (мощность/площадь поверхности) в 2 раза.

Теперь сделаем некоторые численные оценки. Пусть концентрация эрбия в сердцевине заготовки  $n_0 = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , тогда по формуле (10) получим значение  $I_{\text{люмин}} = 2,4 \cdot 10^{-4} I_{\text{серд}}$ . Таким образом, интенсивность люминесценции слабее интенсивности накачки  $\sim$  в 4 000 раз. Для значения  $I_{\text{серд}} = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  получим  $I_{\text{люмин}} = 24 \text{ Вт/м}^2$ . Мы нашли интенсивность излучения на поверхности сердцевин. Далее вблизи сердцевин интенсивность излучения ввиду цилиндрической геометрии спадает обратно пропорционально расстоянию до оси симметрии заготовки. Но на больших расстояниях  $R_1$  от сердцевин люминесцирующий элемент длиной  $2b$  уже можно примерно рассматривать как точечный ис-

точник, поэтому интенсивность будет уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния до элемента.

Излучение проходит через оболочку радиуса  $R = 6,5 \text{ мм}$  и попадает на чувствительный элемент приемника. Для оценки возьмем  $R_1 \sim 20 \text{ мм}$ . Мощность люминесценции, исходящая из объема люминесцирующего элемента  $\Delta V = S_0 \cdot 2b$ , равна  $k_2 n_2 S_0 2b \cdot h c / \lambda_{21}$ . На больших расстояниях  $R_1$  от элемента мощность распределяется примерно равномерно по всей площади сферы  $4\pi R_1^2$ , поэтому интенсивность излучения на расстоянии  $R_1$  от заготовки:

$$I_1 = \frac{k_2 n_2 S_0 2b h c / \lambda_{21}}{4\pi R_1^2} = \frac{k_2 n_2 \pi R_0^2 2b h c}{4\pi R_1^2 \lambda_{21}} = \frac{k_2 n_2 R_0^2 2b h c}{4 R_1^2 \lambda_{21}}.$$

С учетом (2) и (4) получаем:

$$I_1 = \frac{\alpha n_0 R_0^2 2b h c}{4 \tau_{21} R_1^2 \lambda_{21}}.$$

С учетом (9):

$$I_1 = \frac{\sigma_{13} \tau_{21} n_0 R_0^2 2b h c}{4 \tau_{21} R_1^2 \lambda_{21} h c / \lambda_{13}} I_{\text{серд}} = \frac{\sigma_{13} n_0 R_0^2 b \lambda_{13}}{2 R_1^2 \lambda_{21}} I_{\text{серд}} \quad (11)$$

Как видно из (11), на больших расстояниях от сердцевин интенсивность пропорциональна размерам люминесцирующего элемента (фактически его объему) и обратно пропорциональна квадрату расстояния до элемента.

Используя (11) и (12), можно выразить интенсивность излучения на большом расстоянии  $R_1$  от сердцевин через интенсивность люминесценции на поверхности сердцевин:

$$I_1 = \frac{R_0 b}{R_1^2} I_{\text{люмин}} \quad (12)$$

Таким образом, интенсивность излучения, падающего на приемник или приемный коллиматор при  $R_1 = 20 \text{ мм}$ , составит  $I_1 \sim 0,1 \text{ Вт/м}^2$ . Если площадь приемного элемента равна  $\Delta S = 1 \text{ мм}^2$ , то падающая на приемный элемент мощность  $P = I_1 \Delta S = 0,1 \text{ мкВт} = 100 \text{ нВт}$ .

### Выводы

Полученная величина мощности люминесценции при мощности источника накачки 1 Вт более чем достаточна для того, чтобы корректно измерять концентрацию ионов эрбия. Экспериментальные установки при этом могут содержать элементы, на 1–2 порядка понижающие

мощность, падающую на чувствительный элемент приемника, но повышающие стабильность и точность экспериментов (система коллиматоров, делители мощности, рассеиватели). При этом в качестве приемников могут быть использованы приемники нановаттного и даже фемтоваттного диапазонов.

### Библиографический список

1. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 2. – С.881–900.
2. Латкин К.П., Смирнов А.С., Константинов Ю.А., Бурдин В.В. Метод измерения абсолютной концентрации ионов эрбия в преформе активного волокна // Вестник ПНЦ. – 2018. – № 4. – С. 21–26.
3. Латкин К.П., Смирнов А.С., Константинов Ю.А., Бурдин В.В. Оценка равномерности распределения ионов эрбия вдоль преформы активного оптического волокна по интенсивности люминесценции на разных длинах волн // Вестник ПНЦ. – 2015. – № 3. – С. 4–11.
4. Смирнов А.С., Латкин К.П., Бурдин В.В. Спектроскопический метод измерения однородности концентрации эрбия вдоль длины активной оптической заготовки // Прикладная фотоника. – 2014. – №2. – С. 62–70.
5. Desurvire E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications. – N.Y.: Wiley-Interscience, 2002. – 770 p.

## ANALYTICAL ESTIMATION OF THE LUMINESCENCE POWER OF ERBIUM IONS IN THE ACTIVE FIBER PREFORM

K.P. Latkin<sup>1,2</sup>, A.S. Smirnov<sup>2</sup>, V.V. Burdin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Perm Federal Research Center UB RAS

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

The luminescence power of erbium ions in the active fiber preform at a wavelength of 1,53  $\mu\text{m}$  has been estimated. The data obtained make it possible to judge the possibility of correct measurement of the concentration of active erbium ions by the luminescence power and to choose the parameters of the elements of experimental installations.

*Keywords: erbium, active optical fibers, luminescence spectrum.*

### Сведения об авторах

Латкин Константин Павлович, младший научный сотрудник лаборатории фотоники, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), 614900, г. Пермь, ул. Ленина, 13А; аспирант факультета прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: latkin.k.p@ur.ru

Смирнов Александр Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории фотоники, ПФИЦ УрО РАН; аспирант кафедры прикладной математики, ПНИПУ; e-mail: a.s.smrnv@gmail.com

Бурдин Владислав Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, ПНИПУ; старший научный сотрудник лаборатории фотоники, ПНИПУ; e-mail: vlaburdi@mail.ru

*Материал поступил в редакцию 02.09.2020 г.*