

# Динамика излучения Yb, Er-лазера с диодной накачкой при воздействии на пассивный затвор мощной внешней подсветки

Е.О.Батура, Ю.К.Бобрецова, М.В.Богданович, Д.А.Веселов, А.В.Григорьев, В.Н.Дудиков, А.М.Кот, Н.А.Пихтин, А.Г.Рябцев, Г.И.Рябцев, С.О.Слипченко, П.В.Шпак

*Исследована временная динамика Yb, Er-лазера с поперечной диодной накачкой при воздействии на пассивный  $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ -затвор излучения полупроводникового импульсного модуля с интегральной плотностью потока энергии  $0.15-0.16$  Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что с помощью внешней подсветки затвора можно изменять время задержки начала генерации и величину временного джиттера  $\Delta T_{gi}$ . Зависимость  $\Delta T_{gi}$  от интервала между моментом включения модуля подсветки и моментом генерации лазерного пика  $t_i$  имеет минимум при  $|t_i| \approx 10$  мкс. Уменьшение  $\Delta T_{gi}$  при изменении  $|t_i|$  от 90 до 10 мкс свидетельствует о том, что момент появления пика генерации Yb, Er-лазера частично контролируется импульсом излучения высокостабильного полупроводникового модуля. Если же  $|t_i| < 10$  мкс, то плотность потока энергии усиленной люминесценции в резонаторе Yb, Er-лазера становится более  $0.16$  Дж/см<sup>2</sup>, излучение модуля подсветки уже не оказывает заметного влияния на процесс генерации иттербий-эрбиевого лазера и, как следствие, величина временного джиттера возрастает до исходного значения.*

**Ключевые слова:** твердотельный лазер, диодная накачка, полупроводниковый лазерный модуль, пассивная модуляция добротности, джиттер импульсов.

## 1. Введение

Импульсные эрбиевые лазеры с диодной накачкой, генерирующие в условно безопасном для органов зрения спектральном диапазоне 1.53–1.54 мкм, – перспективные источники излучения для приборов дальнометрии и спектроскопии [1–5]. Среди излучателей данного типа большое распространение получили компактные лазеры на основе Yb, Er-стекла, возбуждаемые по схеме поперечной накачки [2, 4, 6]. С целью минимизации габаритов режим модуляции добротности лазера задается, как правило, с помощью пассивных просветляющихся затворов [1, 2, 4], например на основе кристаллов  $LiGa_5O_8$ ,  $LaMgAl_{11}O_{19}$  или  $MgAl_2O_4$  [7].

Одним из недостатков, характерных для твердотельных лазеров с пассивной модуляцией добротности, является значительная временная нестабильность момента начала импульса генерации – временной джиттер [8], связанный с вариациями интенсивности, пространственных и/или спектральных параметров излучения накачки, с воздействием на активную среду спонтанного шума, а также с процессами межмодового взаимодействия. Как показано в [9–12], временной джиттер лазера может быть существенно уменьшен путем модулирования мощности излучения накачки прямоугольными импульсами, применени-

ем двух синхронизированных лазерных каналов и внешней подсветкой пассивного затвора. Представленные в литературе результаты исследований в данном направлении относятся к твердотельным лазерам на основе Nd:YAG или рубина с пассивными затворами на основе кристаллов  $Cr^{4+}:YAG$ ,  $F_2^-:LiF$  или раствора красителя.

Целью настоящей работы является исследование временной динамики Yb, Er-лазера с поперечной диодной накачкой в условиях, когда на пассивный затвор воздействует сфокусированное излучение мощной внешней подсветки. В качестве пассивного затвора использовался кристалл  $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ , широко применяемый в современных портативных эрбиевых лазерах. Излучение для подсветки пассивного затвора формировалось с помощью импульсного модуля на базе полупроводниковых лазеров со сверхузким волноводом, интегрированных с платой токовой накачки.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

Схема установки для исследования временной динамики Yb, Er-лазера с поперечной диодной накачкой и подсветкой пассивного затвора представлена на рис.1. Накачка активного элемента (АЭ) проводилась по поперечной схеме блоком линеек лазерных диодов (ЛЛД) МДН-70-940 (НПП «Инжект», Саратов). Возбуждение ЛЛД осуществлялось импульсами тока длительностью 4–5 мс при частоте следования импульсов 2 Гц. Материалом для АЭ прямоугольного поперечного сечения ( $1.5 \times 2.0 \times 35$  мм) служило Yb, Er-фосфатное стекло марки ЛГС-ДЕ (Фрязинский филиал ИРЭ РАН, Фрязино, МО). Концентрации ионов иттербия и эрбия составляли  $1.8 \times 10^{21}$  и  $3.0 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> соответственно. Резонатор лазера формировался плоскими зеркалами 2 и 3. Режим моду-

Е.О.Батура, М.В.Богданович, А.В.Григорьев, В.Н.Дудиков, А.М.Кот, А.Г.Рябцев, Г.И.Рябцев, П.В.Шпак. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Республика Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68

Ю.К.Бобрецова, Д.А.Веселов, Н.А.Пихтин, С.О.Слипченко. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: bobre-yulya@yandex.ru

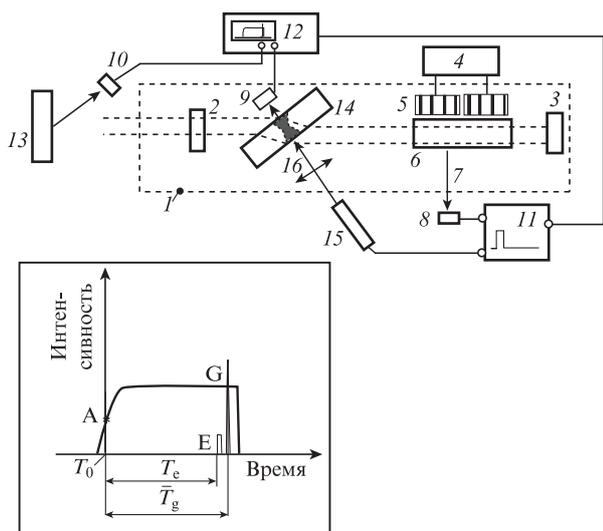


Рис.1. Оптическая схема установки для исследования временной динамики Yb, Er-лазера с поперечной диодной накачкой в условиях подсветки пассивного затвора:

1 – корпус лазера; 2 – выходное плоское полупрозрачное зеркало; 3 – плоское глухое зеркало; 4 – блок накачки ЛЛД; 5 – ЛЛД; 6 – АЭ из фосфатного Yb, Er-стекла; 7 – излучение блока ЛЛД (940–950 нм); 8, 9, 10 – быстродействующие фотодиоды; 11 – генератор синхронимпульсов; 12 – цифровой многоканальный осциллограф; 13 – измеритель энергии лазерных импульсов; 14 – пассивный затвор (кристалл  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ); 15 – импульсный модуль подсветки; 16 – фокусирующая оптика. На вставке – вид импульса излучения блока накачки (940–950 нм), регистрируемого фотодиодом 8; буквами G и E обозначены импульсы генерации Yb, Er-лазера (1534 нм) и блока внешней подсветки соответственно, точка A – начало отсчетов временных интервалов.

лированной добротности обеспечивался просветляющим  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -затвором с величиной начального пропускания 75%. При комнатной температуре рабочее значение энергии импульсов излучения на выходе исследуемого Yb, Er-лазера составляло 10 мДж, длина волны равнялась 1.54 мкм, а длительность импульсов – 16 нс. Внешняя подсветка  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -затвора осуществлялась импульсным модулем 15 на базе лазерных диодов со сверхузким волноводом [13]. Импульсы излучения модуля длительностью 900 нс и энергией 13 мкДж фокусировались оптической системой 16 на поверхности пассивного затвора в виде круглого пятна диаметром менее 100 мкм в окрестности центра лазерной моды диаметром  $\sim 700$  мкм. Диаметр сфокусированного пятна измерялся по уровню 0.5 максимальной интенсивности с помощью высокоразрешающей камеры, погрешность измерений не превышала 10%. Длина волны излучения импульсного модуля варьировалась в пределах 1.54–1.57 мкм в зависимости от температуры ЛЛД модуля и уровня возбуждения. Данный интервал длин волн попадает в широкий максимум спектральной зависимости коэффициента поглощения кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , определяемой оптическим переходом  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  (рис.2).

Временная динамика Yb, Er-лазера в условиях подсветки пассивного затвора исследовалась следующим образом. Импульсами излучения накачки (см. вставку на рис.1) возбуждался АЭ, и одновременно с помощью фотодиода 8 в момент времени  $T_0$  запускался генератор синхронимпульсов 11. Поскольку момент просветления пассивного затвора 14 с последующим развитием процесса генерации не задается какими-либо вспомогательными

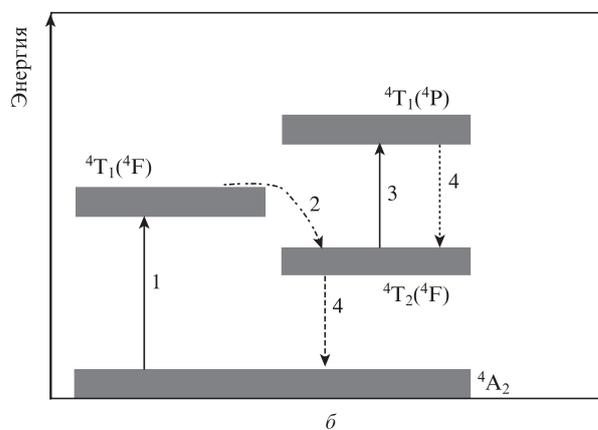
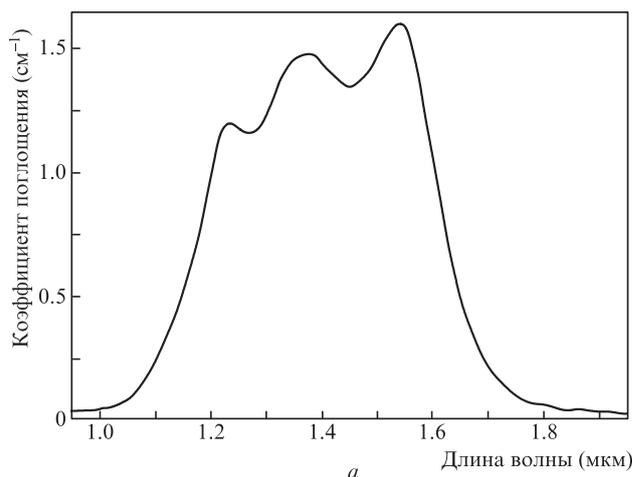


Рис.2. Спектр поглощения (a) и схема энергетических уровней (б) пассивного затвора на основе кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в ближней ИК области спектра [7, 14–17].

элементами, то за начало отсчета временных интервалов  $T_0$  с помощью специализированной программы выбиралась точка A на линейном участке переднего фронта импульса излучения накачки (см. вставку на рис.1). Стабилизация температуры Yb, Er-лазера и электрических параметров блока накачки 4 позволили добиться высокой повторяемости формы импульса и погрешности задания положения точки A на уровне  $\pm 50$  нс.

Импульсы синхронизации генератора 11 использовались для запуска развертки многоканального осциллографа 12 и импульсного модуля подсветки 15, при этом запуск модуля подсветки относительно начала возбуждения активного элемента  $T_0$  программируемым методом задерживался на время  $T_{ei}$ . Момент генерации лазерного импульса устанавливался по интенсивному пику излучения (обозначен буквой G на вставке к рис.1), рассеиваемого на поверхности измерителя энергии в направлении фотодиода 10.

На начальной стадии экспериментов для серии из нескольких десятков тысяч импульсов Yb, Er-лазера измерялось среднее значение времени появления пика генерации  $T_{g0}$ . Величина временного джиттера Yb, Er-лазера для исследуемой серии  $\Delta T_{g0}$  определялась как среднеквадратичное отклонение времени появления пика генерации от значения  $T_{g0}$  (рис.3, точка P). Спустя время  $T_{ei} < T_{g0}$  включался импульсный модуль подсветки, и для выбранной конфигурации эксперимента также регистрировались среднее время появления пика генерации  $T_{gi}$  и величина

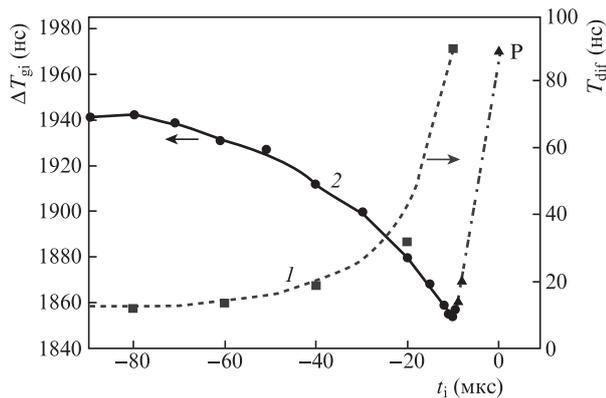


Рис.3. Зависимости интервала  $T_{\text{dif}}$  между средними значениями  $\bar{T}_{\text{g}0}$  и  $\bar{T}_{\text{g}i}$  (1) и временного джиттера  $\Delta T_{\text{g}i}$  (2) от параметра  $t_i$ ; точкой P обозначено исходное значение временного джиттера.

временного джиттера  $\Delta T_{\text{g}i}$ . Значения  $T_{\text{ei}}$  выбирались таким образом, чтобы абсолютная величина разности  $t_i = T_{\text{ei}} - \bar{T}_{\text{g}0}$ , которая определяет временной интервал между моментом включения модуля подсветки и моментом появления лазерного пика  $\bar{T}_{\text{g}0}$ , находилась в пределах 9–90 мкс.

Зависимость разности средних значений времени начала генерации без подсветки и с подсветкой пассивного затвора излучением внешнего импульсного модуля  $T_{\text{dif}} = \bar{T}_{\text{g}0} - \bar{T}_{\text{g}i}$  от переменного параметра  $t_i$  показана на рис.3. Там же представлена величина временного джиттера  $\Delta T_{\text{g}i}$  исследованного Yb, Er-лазера как функция переменной  $t_i$  в условиях внешней подсветки пассивного затвора.

### 3. Результаты и их обсуждение

Использованный в настоящей работе полупроводниковый импульсный модуль [13] излучает в диапазоне длин волн 1.54–1.57 мкм, который полностью попадает в широкую полосу ИК поглощения кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Канал поглощения в данном спектральном интервале задается главным образом параметрами перехода иона  $\text{Co}^{2+}$  из основного (нижнего) состояния  ${}^4\text{A}_2$  на верхний широкий уровень  ${}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  с последующим быстрым переходом на уровень  ${}^4\text{T}_2({}^4\text{F})$  [7]. Отношение сечений поглощения для переходов  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  и  ${}^4\text{T}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  на длине волны 1.54 мкм равно 0.03. Времена жизни для уровней  ${}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  и  ${}^4\text{T}_2({}^4\text{F})$  составляют 15 пс и 350 нс соответственно.

Приблизительно, без учета поглощения из возбужденного состояния  ${}^4\text{T}_2({}^4\text{F})$ , процесс просветления исследуемого пассивного затвора эрбиевого лазера можно представить в рамках подхода, включающего в рассмотрение основной (нижний) уровень  ${}^4\text{A}_2$  и верхний широкий уровень как комбинацию уровней  ${}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$  и  ${}^4\text{T}_2({}^4\text{F})$ . Согласно расчетным и экспериментальным данным [7, 18], коэффициент поглощения такой «квазидвухуровневой» системы, приведенный к начальному значению, падает на 15%–20% уже при уровнях интегральной плотности потока энергии излучения  $S = 0.15\text{--}0.20$  Дж/см<sup>2</sup>.

Значение  $S$  для импульсного модуля подсветки составляет примерно 0.15–0.16 Дж/см<sup>2</sup>, поэтому можно предположить, что оптические потери эрбиевого лазера в той или иной степени уменьшаются под действием падающего на  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ -затвор внешнего излучения. По этой причине пик генерации лазера появляется в момент  $\bar{T}_{\text{g}i} < \bar{T}_{\text{g}0}$ . По мере смещения  $|t_i|$  к нулю оптические переходы, свя-

занные с просветлением затвора излучением импульсного модуля, играют все более заметную роль в процессе развития генерации Yb, Er-лазера. Кривая 1 на рис.3 быстро возрастает, когда абсолютная величина  $t_i$  приближается к 20–30 мкс. Как свидетельствуют результаты численных расчетов характеристик исследованного Yb, Er-лазера, выполненные для модели, которая учитывает пространственные свойства резонатора, при  $|t_i| < 20$  мкс коэффициент усиления по порядку величины сравнивается с оптическими потерями и формируется поток усиленной люминесценции. Это приводит к доминированию эффекта просветления пассивного затвора в процессах генерации лазерного пучка.

Как следует из совместного анализа кривых 1 и 2 рис.3, воздействие излучения импульсного модуля сказывается не только на времени задержки начала генерации – значение  $T_{\text{dif}}$  возрастает по мере приближения  $t_i$  к нулю, но и на величине временного джиттера  $\Delta T_{\text{g}i}$ . Зависимость  $\Delta T_{\text{g}i}$  от  $t_i$  имеет хорошо выраженный минимум при  $|t_i| \approx 10$  мкс. Уменьшение временного джиттера при изменении от 90 до 10 мкс является следствием того, что в данной области значений  $t_i$  момент появления пика генерации Yb, Er-лазера частично контролируется импульсом излучения высокостабильного полупроводникового модуля.

Временной джиттер импульсного модуля подсветки не превышал 10 нс, поэтому относительно высокое значение временного джиттера Yb, Er-лазера в минимуме зависимости  $\Delta T_{\text{g}i}(t_i)$ , равное 1854 нс, вероятнее всего, объясняется нестабильностью процессов возбуждения его активной среды. Когда  $|t_i| < 10$  мкс, интенсивность потока усиленной люминесценции в резонаторе Yb, Er-лазера резко возрастает, приближаясь, согласно данным численных расчетов, к 15–20 Дж/см<sup>2</sup> при  $|t_i| < 0.5$  мкс. В этих условиях излучение импульсного модуля подсветки не оказывает существенного влияния на процесс генерации Yb, Er-лазера, и величина временного джиттера возрастает до исходного значения (точка P на рис.3).

Следует отметить, что при плотностях потока энергии подсветки свыше 0.15 Дж/см<sup>2</sup>, но меньших длительностях импульсов (например, при уменьшении длительности импульса до 100 нс) воздействия излучения импульсного модуля на характеристики Yb, Er-лазера не наблюдалось при всех значениях  $t_i$  в пределах 9–90 мкс. Возможно, это связано с тем, что время развития лазерного импульса в данном случае (3–5 мкс) значительно превышает время воздействия излучения импульсного модуля.

### 4. Заключение

Временная динамика Yb, Er-лазера с поперечной диодной накачкой исследована в условиях воздействия на пассивный затвор сфокусированного излучения блока мощной внешней подсветки. В качестве пассивного затвора применен кристалл  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Установлено, что воздействие на затвор излучения импульсного модуля с интегральной плотностью потока энергии 0.15–0.16 Дж/см<sup>2</sup> сказывается на времени задержки начала генерации Yb, Er-лазера и на величине его временного джиттера  $\Delta T_{\text{g}i}$ , зависимость которого от временного интервала между моментом включения модуля подсветки и моментом генерации лазерного пика имеет минимум при  $|t_i| \approx 10$  мкс. Уменьшение временного джиттера при изменении  $|t_i|$  от 90 до 10 мкс является следствием того, что в данной области значений  $t_i$  момент появления пика генерации Yb, Er-

лазера частично контролируется импульсом излучения высокостабильного полупроводникового модуля. Относительно высокое значение временного джиттера Yb, Eг-лазера (1854 нс), регистрируемое в минимуме зависимости  $\Delta T_{gi}(t_i)$ , объясняется нестабильностью процессов возбуждения его активной среды. Когда  $|t_i| < 10$  мкс, плотность потока энергии усиленной люминесценции в резонаторе Yb, Eг-лазера возрастает до 15–20 Дж/см<sup>2</sup>, излучение импульсного модуля подсветки не оказывает существенного влияния на процесс генерации Yb, Eг-лазера, и величина временного джиттера вновь достигает исходного значения 1970 нс.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-52-00022) и БРФФИ (проект Ф18Р-145).

1. Шачкин Л.В. *Квантовая электроника*, **36**, 106 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 106 (2006)].
2. Bogdanovich M.V., Kabanov V.V., Ryabtsev G.I., Ryabtsev A.G., Lebiadok Y.V. *Proc. SPIE*, **8677**, 8677OX-1 (2013).
3. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В., Зубов Н.Е. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, № 8, 215 (2013).
4. Богданович М., Григорьев А., Ланцов К., Лепченков К., Рябцев А., Рябцев Г., Титовец В., Щемелев М. *Фотоника*, **55**, 58 (2016).
5. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Магдич Л.Н., Погоньшев О.О., Садовский П.И., Семенов В.П. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, № 5, 14 (2017).
6. Шачкин Л.В. *Квантовая электроника*, **37**, 130 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 130 (2007)].
7. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. *J. Alloys Compd.*, **341**, 366 (2002).
8. Paschotta R. *Appl. Phys. B*, **79**, 163 (2004).
9. Muller A., Willenbring G.R. *Appl. Phys.*, **4**, 47 (1974).
10. Dascalu T., Pavel N., Pupei V., Philipps G., Weber H. *Opt. Eng.*, **35**, 1247 (1996).
11. Cole B., Goldberg L., Trussell C.W., Hays A., Schilling B.W., McIntosh Ch. *Opt. Express*, **17**, 1766 (2009).
12. Дементьев А.С., Мураускас Э., Славинские Н., Навакас Р., Сточкус В. *Квантовая электроника*, **42**, 437 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 437 (2012)].
13. Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Воронкова Н.В., Слипченко С.О., Стрелец В.А., Богданович М.В., Шпак П.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **49**, 488 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 488 (2019)].
14. Hercher M. *Appl. Opt.*, **6**, 947 (1967).
15. Shcherbitsky V.G., Girard S., Fromager M., Moncorge R., Kuleshov N.V., Levchenko V.I., Yakimovich V.N., Ferrand V. *Appl. Phys. B*, **74**, 367 (2002).
16. Кисель В.Э., Щербицкий В.Г., Кулешов Н.В., Постнова Л.И., Левченко В.И., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Сверчков С.Е. *Квантовая электроника*, **35**, 611 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 611 (2005)].
17. Demesh M., Marzahl D.-T., Yasukevich A., Kisel V., Huber G., Kuleshov N., Krankel Ch. *Opt. Lett.*, **42**, 4687 (2017).
18. Грибковский В.П. *Теория поглощения и испускания света в полупроводниках* (Минск: Наука и техника. 1975).