

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-34-39

УДК 621.373.826.038.825.3

Вклад ионов растворённой платины в тепловыделение в иттербий-эрбиевом стекле при ламповой накачке

Светлана Михайловна Козлова¹, Павел Иванович Садовский²✉

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Фрязино, Московская область, Россия

¹offmrx@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7959-3261>

²spavi@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0002-6571-0973>

Аннотация

Предмет исследования. В работе исследуется вклад ионов растворённой в иттербий-эрбиевом фосфатном стекле платины в нагрев активного элемента при ламповой накачке. Так как стёкла лазерного качества синтезируют в платиновых тиглях, то во всех них присутствует определённое её количество, которое зависит от многих факторов. Одним из них является длительность процесса варки, которое в случае эрбиевых стёкол вдвое и более превышает длительность процесса варки неодимовых стёкол, что приводит к повышенному содержанию платины в стекле. **Метод и краткое описание эксперимента.** Величина тепловыделения в активном элементе определялась по его относительному удлинению во время прохождения импульса накачки. Удлинение определялось интерферометрическим методом. Для выделения вклада ионов платины в общее тепловыделение активного элемента были сварены стёкла с разным её содержанием. Получены **экспериментальные зависимости** этого вклада в общее тепловыделение от концентрации ионов платины в стекле марки ЛГС-ХЧ (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) для активных элементов $\varnothing 4 \times 80$ мм. Установлено, что в активных элементах из стекла, отвечающего по уровню неактивных потерь лазерным применениям, в полосах поглощения ионов платины генерируется до 10% тепла от общего его количества. Полученные данные позволили объяснить имевшие место до этого расхождения между результатами расчёта с использованием предложенной авторами модели иттербий-эрбиевой и хром-иттербий-эрбиевой активной среды и экспериментальными данными. **Практическим результатом** работы можно считать рекомендацию по дополнительной фильтрации излучения лампы накачки для снижения нагрева активного элемента из иттербий-эрбиевого стекла.

Ключевые слова: лазерное излучение 1,54 мкм в медицине и косметологии, эрбиевое лазерное стекло, тепловыделение в лазерном активном элементе

Благодарность: работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (0030-2019-0012).

Ссылка для цитирования: Козлова С.М., Садовский П.И. Вклад ионов растворённой платины в тепловыделение в иттербий-эрбиевом стекле при ламповой накачке // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 34–39. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-34-39

Коды OCIS: 140.3500;140.6810;160.3380.

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на эрбиевом стекле широко используются для целей дальнометрии, благодаря наличию окна прозрачности в атмосфере и безопасности для зрения генерируемого ими из-

лучения с длиной волны 1535 нм. Учитывая полевые условия работы таких устройств, к ним предъявляются определённые требования как по весогабаритам, так и по энергопотреблению. В связи с этим, предпочтение

во вновь разрабатываемых дальномерами от- даётя накачке лазерными диодами или диодными линейками. Однако и лазерные даль- номеры с ламповой накачкой ещё широко ис- пользуются как на внутреннем рынке, так и для поставок за рубеж. В качестве таких устройств можно привести лазерный даль- номерный модуль ЛДМ-2 производства АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» [1] и лазерный дальномер LR-M производства Красногорско- го завода им. С.А. Зверева [2]. В последнее вре- мя эрбиевые лазеры находят всё более широ- кое применение в медицине и косметологии. Здесь также всё чаще используются лазеры на иттербий-эрбиевом волокне, а также на иттер- бий-эрбиевом фосфатном стекле с накачкой лазерными диодными линейками [3]. Однако в лазерных системах, где требуется большая выходная энергия импульса (5–15 Дж), ока- зывается целесообразнее использовать лам- повую накачку, как более простую конструк- тивно, так и на порядок более дешёвую. Наи- более известна и распространена, в том числе и в России, лазерная платформа для космо- тологии Star Lux 500 фирмы Palomar (США) с насадкой Palomar 1540 на эрбиевом стекле [4]. Одним из факторов, ограничивающих ис- пользование ламповой накачки, является по- вышенное по сравнению с селективной накач- кой лазерными диодами тепловыделение. Это снижает как частоту следования импульсов, что прямым образом приводит к увеличению длительности процедуры в системах меди- цинского и косметологического применения, так и качество генерируемого пучка, увели- чивается его расходимость. Достоверное уста- новление всех каналов, приводящих к нагре- ву активного элемента, позволило бы опти- мизировать как саму активную среду, так и архитектуру накачки. Для эрбиевых лазеров работ, в которых бы рассматривался данный вопрос, очень мало, полученные эксперимен- тальные результаты носят отрывочный ха- рактер и не всегда согласуются между собой [5–7]. Работа [8] была призвана внести ясность в этот вопрос. В ней впервые был выполнен ко- личественный расчёт тепловыделения с ис- пользованием последовательно развиваемой авторами модели иттербий-эрбиевой актив- ной среды. Результаты расчёта показали удов- летворительное совпадение с эксперименталь- ными данными. Однако реальное тепловыде-

ление в активном элементе оказалось на 10% выше значения, предсказываемого расчётом. В указанной работе причину этого расхожде- ния установить не удалось.

При дальнейшем анализе ситуации мы об- ратили внимание на присутствие в спектре поглощения стекла, сваренного в платиновом сосуде, широкой полосы поглощения, захва- тывающей область от УФ части спектра и до 650 нм. Причина, по которой это обстоятель- ство не нашло своего отражения в предыду- щей работе, объясняется тем, что основной акцент в ней был сделан на хром-иттербий- эрбиевое стекло, в котором эта полоса скрыта за интенсивной полосой поглощения сенсibili- затора — ионов трёхвалентного хрома.

Цель настоящей работы состоит в том, что- бы оценить вклад этого неучтённого в преды- дущих работах канала в общее тепловыделе- ние. Так как все фосфатные стёкла лазерного качества варят в платиновых сосудах, то и на- личие ионной и металлической платины при- сущее всем этим стёклам. Ряд исследований по изучению влияния условий варки, как то, состав стекла, температура, атмосфера, время варки и т.д., для неодимовых фосфатных стё- кол подробно освещён в публикациях [6–8]. Акцент в этих работах ставился на поиск усло- вий, при которых количество металлических включений платины в стекле будет мини- мальным, а вся оказавшаяся в стекле плати- на будет переведена в ионное Pt^{4+} состояние. Конечной целью работ являлось исключение или минимизация разрушений стекла по ме- таллическим включениям при генерации ко- ротких и сверхкоротких импульсов. В зависи- мости от условий варки и состава стекла, по- глощение, вызванное ионами Pt^{4+} , может раз- личаться в несколько раз. Однако, поскольку во главу угла всегда ставится задача обеспе- чения минимального содержания металличе- ской платины в отливках, предназначенных для изготовления активных элементов, то на- личие ионной платины воспринимается как нежелательный, но неизбежный факт.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследований были сварены три отливки фосфатного стекла марки ЛГС-ХЧ (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) [8], активированого ионами иттербия и эрбия ($Yb-Er$ стекло) в одной

и той же концентрации $N_{Yb} = 2,1 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $N_{Er} = 1,3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Одна отливка № 1 была получена по стандартной технологии: высушенная шихта предварительно наваривалась в кварцевом стакане. Очищенный бой полученного стекла затем расплавлялся и варился в платиновом тигле объёмом 1 л с барботажем расплава сухим кислородом (точка росы $-70 \text{ }^\circ\text{C}$) и созданием защитного слоя над расплавом продувом над ним этого же кислорода.

Отливка № 2 была получена, минуя стадию наваара боя стекла в кварцевом стакане. Шихта сразу же разваривалась в платиновом стакане. Защитная атмосфера над расплавом и барботаж были аналогичны тем, что использовались в процессе получения отливки № 1.

Процесс варки отливки № 3 отличался от процесса варки отливки № 1 тем, что вместо кислорода над расплавом продувался сухой азот, полученный испарением из сосуда Дьюара. Барботаж расплава отсутствовал.

Варка во всех трёх случаях продолжалась до достижения значения длительности люминесценции ионов эрбия 8,2 мс, определяемой по ходу процесса путём отбора проб расплава. Указанная длительность люминесценции соответствует содержанию ОН-групп на уровне 10 ppm. Данное условие должно было обеспечить одинаковый для всех трёх образцов уровень тепловыделения, связанного с процессами передачи энергии от ионов иттербия к ионам эрбия.

В процессе варки расплавы всех трёх образцов интенсивно перемешивались пропеллерной мешалкой, на финишной стадии варки для обеспечения лазерного качества отливок по однородности были предприняты стандартные приёмы по обезуглеороживанию и гомогенизации расплава. После прохождения стадии тонкого отжига из отливок отбирались однородные участки, из которых вырезались заготовки и изготавливались плоскопараллельные пластинки толщиной 5–10 мм для измерения спектра пропускания.

На рис. 1 приведены спектры пропускания этих трёх образцов в полосе поглощения ионов платины. Четыре узких полосы на приведённом спектре принадлежат переходам на верхние уровни, начиная с уровня $^4F_{9/2}$ и выше ионов эрбия. Наибольшее поглощение, как и ожидалось, присуще отливке № 2. Помимо

того, что платина варочного сосуда растворялась расплавом не только в процессе варки, но и на стадии развара шихты, когда её агрессивный по отношению к материалу тигля потенциал максимален. И, наоборот, минимальное поглощение зафиксировано для отливки № 3. В этом случае отсутствовал контакт с платиной на стадии развара шихты и получения расплава, а также был исключен контакт внутренней поверхности выступающей над расплавом части варочного платинового сосуда с кислородом, находящимся в окружающем воздухе. Выход платины из стенок под воздействием высокой температуры в атмосфере азота на порядок ниже, чем в атмосфере кислорода. Также, из-за отсутствия барботажа, был снижен окислительный потенциал самого расплава.

Определение Pt^{4+} в стёклах проводили методом индуктивно-связанной плазмы (ИСП) на масс-спектрометре NexION 300D с пределом обнаружения примесных частиц платины не хуже 0,105 ppm. Навески боя стекла предварительно растворяли в высокочистой плавиковой кислоте. Содержание Pt^{4+} в отливке № 1, согласно аналитической методике определения, составило 210 ppm. Коэффициент экстинкции, отношение концентрации ионов платины к поглощению на длине волны 400 нм (в отливке № 1 $k_{400\text{нм}} = 0,35 \text{ см}^{-1}$), в стекле ЛГС-ХЧ равен 600 ppm/ см^{-1} , что

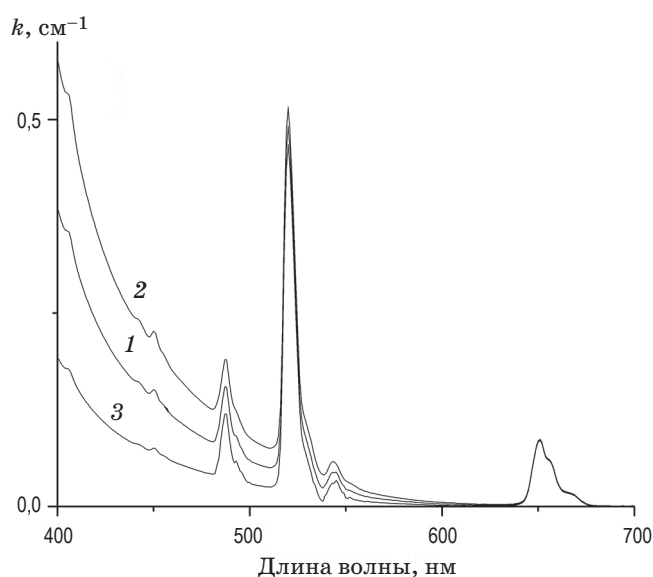


Рис. 1. Спектры поглощения отливок № 1 (1), № 2 (2) и № 3 (3).

близко к значению аналогичного параметра для неодимовых фосфатных стёкол [7]. Как уже было сказано выше, технология, по которой была получена отливка № 1, является стандартной для варки фосфатных стёкол. Для сравнения, поглощение ионной платины в крупногабаритных дисках из неодимового фосфатного стекла, предназначенных для использования в системе поджига плазмы (NIF) Ливерморской лаборатории, в зависимости от содержания в матрице оксида алюминия, составляет $0,079 \text{ см}^{-1}$ (стекло LHG-8) и $0,224 \text{ см}^{-1}$ (стекло LG-770) [8]. Повышенный уровень растворённой платины в эрбиевом фосфатном стекле связан с более длительным процессом варки, что требуется для его более глубокого обезвоживания, по сравнению с неодимовым стеклом.

Из полученных отливок были изготовлены цилиндрические стержни (ЦС), по геометрии полностью идентичные тем, что использовались в работе [8]. Коротко воспроизведём их параметры. Торцы ЦС диаметром 4 и длиной 80 мм были полированы «до прозрачности». В эксперименте была использована та же методика и оборудование, что и в работе [8]. Выделяемая в ЦС за импульс накачки тепловая энергия определялась по его относительному удлинению, измеряемому интерферометрическим методом.

Один из паразитных каналов тепловыделения — поглощение УФ части световой энергии матрицей стекла, сводился к минимуму путём замены дистиллированной воды на 1% водный раствор хромпика. Отсечка УФ части спектра, как было установлено ранее, не сказывается на КПД лазера на Yb-Er стекле.

Экспериментальные зависимости тепловыделения для всех трёх отливок приведены на рис. 2. Как и предполагалось, изменение содержания ионов платины отражается на величине тепловыделения. В исследованном интервале концентраций платины 100–300 ppm дополнительное тепловыделение, разность между экспериментальными данными и расчётом, прямо пропорционально её концентрации. Экстраполяция этой зависимости в сторону меньших значений платины показывает, что при уменьшении концентрации ионов платины в стекле результаты расчёта приближаются к реальному тепловыделению (кривые 3 и 4 на рис. 2). Несомненно, что пол-

ное совпадение возможно только при включении в расчёт энергии лампы поглощённой ионами эрбия (рис. 1). В обсуждаемой модели иттербий-эрбиевой среды [8] этот факт не учитывался и предполагалось, что вся энергия возбуждения инверсной энергии поступает через ионы иттербия, имеющие широкую от 900 до 1000 нм полосу поглощения с коэффициентом абсорбции в максимуме более 25 см^{-1} , что намного превышает плотность поглощения в полосах эрбия $0,1\text{--}0,5 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1) Это также осталось за рамками и настоящей работы, однако, анализируя приведённые на рис. 2 экспериментальные данные, можно сделать вывод, что погрешность расчёта из-за игнорирования вышеуказанного факта не оказывает существенного влияния на адекватность используемой модели.

Таким образом, при оценке тепловыделения в активном элементе из иттербий-эрбиевого фосфатного стекла дополнительно к теплу, генерируемому ионами иттербия, следует учитывать нагрев АЭ за счёт поглощения световой энергии лампы в полосе поглощения ионов платины.

В достаточном для практического применения приближении, как видно из полученных

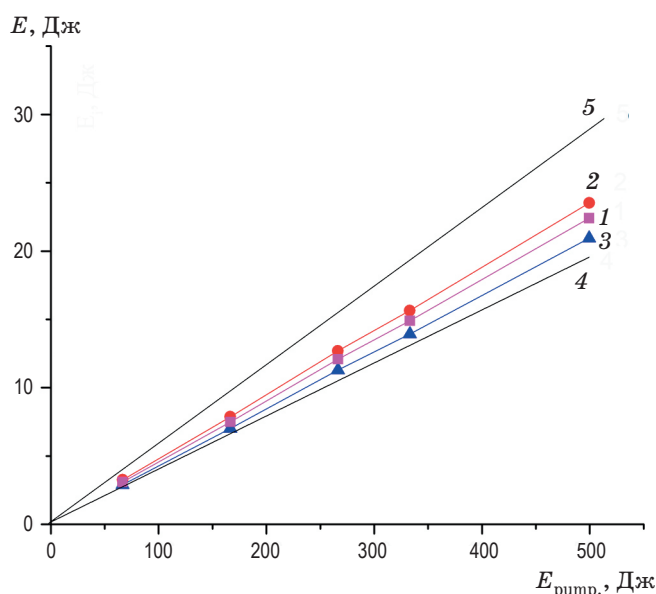


Рис. 2. Экспериментальные зависимости тепловыделения от энергии накачки в АЭ изготовленных из отливки № 1 (1), отливки № 2 (2), отливки № 3 (3). Поглощенная ионами иттербия энергия (5) и её составляющая, выделявшаяся в АЭ в тепло (4) — результаты расчёта.

в этой работе результатов, эта прибавка составляет около 10% от тепловой энергии, генерируемой в процессе передачи возбуждения от ионов иттербия к ионам эрбия.

И если, в случае иттербий-эрбиевого стекла, можно рекомендовать уменьшить тепловыделение в активном элементе за счёт добавки в воду красителей или заключение активного элемента в стеклянную трубку, отсекающих спектр излучения лампы вплоть до полосы поглощения ионов иттербия, то в случае хром-иттербий-эрбиевого стекла это сделать не представляется возможным. Однако в последнем случае полоса поглощения ионов платины перекрывается мощными полосами поглощения дополнительного соактиватора ионов хрома, что резко снижает влияние ионов платины за счёт поглощения в её полосе на общее тепловыделение из-за отбора большей части

энергии возбуждения от лампы в этой области спектра ионами хрома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе экспериментальные данные позволили установить вклад ионов растворённой в иттербий-эрбиевом фосфатном стекле платины в нагрев активного элемента. В результате была подтверждена адекватность модели иттербий-эрбиевой активной среды для численного расчёта параметров проектируемых лазерных излучателей, включая уровень генерируемого ими тепла. Практическим результатом работы можно считать рекомендацию по дополнительной фильтрации излучения лампы накачки для снижения нагрева активного элемента из иттербий-эрбиевого стекла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <https://nii-polyus.inni.info/>
2. <https://shvabe.com/upload/iblock/812/LR-M.pdf>
3. Беликов А.В., Смирнов С.Н., Копаев С.Ю., Немсицверидзе М.Н., Батов Ю.Н, Губин А.Б., Пирожков Ю.Б. Использование пакетов микросекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 1,54 мкм для разрушения катаракты // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 1. С. 2–7.
4. <https://cosmetomed.ru/oborudovanie/palomar-star-lux-500>
5. Калинин В.Н., Фромзель В.А. О тепловыделении в иттербий-эрбиевых стеклах при лазерной и ламповой накачке // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 5. С. 1030–1033.
6. Лунтер С.Г., Митькин В.М., Федоров Ю.К. Оптимизация концентрации активаторов в неодимовых и эрбиевых стеклах для лазеров импульсно-периодического действия с ламповой накачкой // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 65–71.
7. Li Chen, Shunguang Li, Lei Wen, Yongchun Xu, Lili Hu, Biao Wang, Wei Chen. Energy storage and heat deposition in Cr, Yb, Er co-doped phosphate glass // Chinese Optics Letters. 2006. Т. 4. № 6. С. 345–347.
8. Бышевская-Конопко Л.О., Воробьев И.Л., Изынеев А.А., Садовский П.И. Тепловыделение в эрбиевом активном элементе при ламповой накачке // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10 С. 13–23.
9. Campbell J.H., Wallerstein E.P., Hyden J.S., Sapak D.L. Elimination of platinum inclusions in phosphate laser glasses // Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-JC-53932. 1989.
10. Hyden J.T., Campbell J.H. Platinum solubility in phosphate laser glasses // Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-JC-105475. 1991.
11. Suratwala T.I., Campbell J.H., Miller P.E., Thorsness C.B., Riley M.O., Ehrmann P.R., Steele R.A. Phosphate laser glass for NIF: production status, slab selection and recent technical advances // Proc. of SPIE. 2004. V. 5341. P. 102–113.

АВТОРЫ

Светлана Михайловна Козлова — аспирант, младший научный сотрудник, Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской об-

AUTHORS

Svetlana M. Kozlova — postgraduate, research assistant, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Moscow

ласти, Россия; Scopus ID 57221520118, <http://orcid.org/0000-0002-7959-3261>, offmrx@mail.ru

Павел Иванович Садовский — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской области, Россия; Scopus ID 6507428657, <http://orcid.org/0000-0002-6571-0973>, spavi@rambler.ru

region, Russia, Scopus ID 57221520118, <http://orcid.org/0000-0002-7959-3261>, offmrx@mail.ru

Pavel I. Sadovskii — PhD, senior researcher, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, 141190, Fryazino, Moscow region, Russia, Scopus ID 6507428657, <http://orcid.org/0000-0002-6571-0973>, spavi@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2021, одобрена после рецензирования 06.11.2021, принята к печати 07.02.2022