

## ЛАЗЕРНАЯ МЕДИЦИНА

# Динамика лазерного нагрева и спектры свечения углерод-, титан- и эрбийсодержащих оптотермических волоконных конвертеров для лазерной медицины\*

А.В.Беликов, А.В.Скрипник

*Впервые обсуждаются титан- и эрбийсодержащие оптотермические волоконные конвертеры лазерного излучения, расположенные на дистальном торце кварц-кварцевого оптического волокна. Описана технология создания таких конвертеров. Исследованы также конвертеры, содержащие углерод. Исследованы динамика лазерного нагрева конвертеров и спектры свечения, возникающего при воздействии на конвертер каждого типа излучения диодного лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм и средней мощностью до 4 Вт. Показано, что наряду с широкополосным тепловым излучением, сопровождающим лазерный нагрев всех трех типов конвертеров до температур в диапазоне 600–1100 °С, только в спектре свечения эрбийсодержащего конвертера присутствуют интенсивные полосы с максимумами на длинах волн 493, 523, 544, 660 и 798 нм, отвечающие излучательным переходам эрбия  ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  и  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  соответственно. Такие конвертеры могут использоваться в лазерной медицине для хирургии тканей, биостимуляции, фотодинамической терапии, а также в процедурах, сочетающих лазерное, тепловое, биостимулирующее или фотодинамическое воздействия.*

**Ключевые слова:** лазерное излучение, конвертер, эрбий, титан, углерод, волокно, свечение, нагрев.

## 1. Введение

Излучение лазеров широко применяется при обработке различных материалов, а также в медицине для хирургии [1, 2], биостимуляции [3], фотодинамической терапии [4] и т. д. Для большинства лазерных вмешательств эффективность воздействия тем выше, чем больше коэффициент поглощения света хромофором, содержащимся в биоткани или привнесенным в нее. Для фотодинамической терапии используются полупроводниковые лазеры и светодиоды, генерирующие излучение с длинами волн 600–700 нм [4, 5], т. е. в качестве хромофора выступает фотосенсибилизатор, например радахлорин, поглощающий в этой области спектра [6]. Наиболее эффективными для хирургии принято считать CO<sub>2</sub>- и эрбиевые лазеры [1, 2, 7–9], коэффициенты поглощения излучения которых мягкими биотканями определяются сильным поглощением их излучения водой [10]. В последнее время в контактной лазерной хирургии стали использоваться полупроводниковые лазеры [1, 11–13], генерирующие излучение в ближней ИК области спектра на длинах волн 0.81–0.98 мкм. Излучение этих лазеров слабо поглощается мягкими биотканями. В результате эффективность удаления биоткани получается низкой, а размер зоны повреждения окружающих разрез тканей (коагуляции, денатурации, некроза) – значительным [9, 14–16].

\* Доложена на международном симпозиуме «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» (FLAMN-16) (Ленинградская обл., Пушкин, 27 июня – 1 июля 2016).

А.В.Беликов, А.В.Скрипник. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49;  
e-mail: alesch\_skrupnik@mail.ru

Поступила в редакцию 24 марта 2017 г.

Для повышения эффективности действия полупроводникового лазера в контактной лазерной хирургии на дистальный торец оптического волокна, по которому лазерное излучение доставляется к биоткани, помещают специальный оптотермический волоконный конвертер (ОТВК) [17–22]. Большинство известных в лазерной медицине таких конвертеров (blackened tip) содержат углерод [19, 23–26], при этом разрушение мягкой биоткани происходит в основном в результате контакта с нагретым под действием лазерного излучения до высоких температур (вплоть до 900 °С [21]) углеродсодержащим ОТВК. Следует отметить, что возникающее при нагреве конвертера широкополосное тепловое излучение также может быть использовано для дополнительного воздействия на биоткань [20]. Известны наконечники «hybrid probe», сочетающие воздействие на биоткань теплового и видимого излучения [27]. Таким образом, расширение областей применения полупроводниковых лазеров в медицине возможно в том числе и за счет создания новых конвертеров лазерного излучения.

В этой связи разработка конвертеров, позволяющих не только эффективно иссекать биоткань, но и оказывать при этом селективное, например биостимулирующее или фотодинамическое воздействие на хромофоры, поглощающие в видимой области спектра, является весьма перспективной.

В настоящей работе исследованы конвертеры трех типов, различающиеся преобразующим лазерное излучение веществом (эрбий, титан и углерод). Впервые описаны конвертеры, содержащие эрбий и титан. Исследована динамика лазерного нагрева углерод-, титан- и эрбийсодержащих конвертеров под действием излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм. Определены средние мощности лазерного излучения и температуры, при которых каждый из конвертеров разрушается. Получены спектры свечения, возникающего под действием

излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм на конвертер каждого из трех типов. Обсуждаются возможные медицинские применения таких конвертеров.

## 2. Материалы и методы

В настоящем исследовании использована полупроводниковая лазерная система Alta-ST (Dental Photonics, Inc., США) [21]. Лазерное излучение с длиной волны  $980 \pm 10$  нм передавалось по кварц-кварцевому оптическому волокну. Диаметр световедущей жилы оптического волокна составлял  $400 \pm 5$  мкм, общий диаметр волокна без полимерного покрытия –  $440 \pm 5$  мкм, с полимерным покрытием –  $475 \pm 10$  мкм. Средняя мощность излучения на выходе кварц-кварцевого волокна достигала 25 Вт. Лазерное излучение представляло собой последовательность импульсов длительностью 400 мкс, следующих друг за другом с частотой 2 кГц, которая была предустановлена компанией-производителем в качестве оптимальной для корректной работы системы.

Система Alta-ST имеет уникальную встроенную систему измерения температуры дистального торца оптического волокна, на котором и располагается конвертер. Система измеряет интенсивность теплового излучения, возникающего в результате нагрева ОТВК лазерным излучением, которое доставляется к конвертеру по оптическому волокну. Тепловое излучение распространяется от конвертера по тому же волокну, но в противоположном лазерному излучению направлении. На входе в оптическое волокно тепловое излучение отделяется от лазерного спектроделителем и регистрируется ИК приемником FD10D (Thorlabs, США), сигнал с которого поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее в соответствии с калибровочной кривой соотносится с температурой. Калибровка выполняется путем сопоставления амплитуды регистрируемого ИК приемником сигнала на выходе АЦП с температурой на поверхности конвертера, измеренной в диапазоне  $300\text{--}800^\circ\text{C}$  с помощью тепловизора Fluke Ti 400FT (Fluke, США), а в диапазоне  $800\text{--}2500^\circ\text{C}$  – с помощью пирометра «Проминь» (Камеиц-Подольский приборостроительный завод, Украина). Минимальная температура, которую можно было измерить из-за ограниченной спектральной чувствительности ИК приемника и внутренних шумов приемного тракта, составляла  $280^\circ\text{C}$ . АЦП позволяет измерять температуру каждые 30 мс, при этом погрешность измерения температуры не превышает 5%. Значение измеренной таким образом температуры конвертера отображается в режиме реального времени в окне программы stLase-1.19 (Dental Photonics, Inc., США) при подключении к usb-порту персонального компьютера.

При достижении заранее установленного в программе stLase-1.19 значения температуры система Alta-ST изменяла среднюю мощность лазерного излучения таким образом, чтобы текущая температура дистального торца оптического волокна отличалась от заданного значения не более чем на  $\pm 5\%$ . Программа управления системой позволяла также формировать заранее заданные временные профили изменения средней мощности лазерного излучения и регистрировать динамику лазерного нагрева дистального торца волокна (или конвертера, расположенного на этом торце), что важно при формировании конвертера.

Для фотографирования и измерения геометрических размеров конвертеров использовался микроскоп AxioScope A1 со встроенной программой AxioVision rel.4.8.2 (Carl Zeiss GmbH, Германия), позволяющей определять размер помещенного в поле зрения микроскопа предмета с точностью до 1 мкм. Расчет среднего значения измеряемого размера, например диаметра конвертера каждого типа, проводился на основе данных десяти отдельных измерений. Доверительный интервал определялся с помощью программы StatGraphics Plus 2.1 (Statistical Graphics Corp., США).

Спектры свечения, возникающего в конвертерах под действием излучения лазера Alta-ST, доставляемого к конвертеру по волокну, на дистальном торце которого располагается исследуемый конвертер, измерялись в диапазоне  $200\text{--}900$  нм спектрометром Ocean Optics USB2000 (Ocean Optics, США). При регистрации спектра входной торец приемного волокна спектрометра устанавливался перпендикулярно оси оптического волокна, на дистальном торце которого находился конвертер, а оптическая ось приемного волокна спектрометра проходила через центр конвертера. При этом расстояние между плоскостью торца приемного волокна спектрометра и осью оптического волокна с конвертером для всех типов конвертеров было постоянным и составляло  $50.0 \pm 1.0$  мм. Для всех спектральных измерений постоянной интегрирования приемной системы была одинаковой и равной 100 мс. Для построения спектра усреднялись данные десяти отдельных измерений.

## 3. Углеродсодержащий оптотермический волоконный конвертер

Конвертер этого типа формировался по двухстадийной технологии, описанной в [18, 28, 30], и представлял собой «объемный» сферический углеродсодержащий ОТВК [28]. При создании этого конвертера дистальный торец оптического волокна находился в контакте с плоской поверхностью мишени из активированного угля, при этом излучение полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью до  $12.0 \pm 0.1$  Вт, распространяясь по оптическому волокну в течение  $0.50 \pm 0.01$  с, воздействовало на поверхность углеродсодержащей мишени. В результате мишень разрушалась, а продукты ее разрушения оседали на поверхности дистального торца волокна (шаг 1). После этого дистальный торец волокна размещался свободно в воздухе, а импульс излучения полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью  $11.0 \pm 0.1$  Вт и длительностью  $1.00 \pm 0.01$  с, распространяясь по оптическому волокну дважды (с паузой в  $0.50 \pm 0.01$  с), воздействовал на конвертер, формируя модифицированный слой (шаг 2). Характерный внешний вид углеродсодержащего ОТВК представлен на рис. 1.

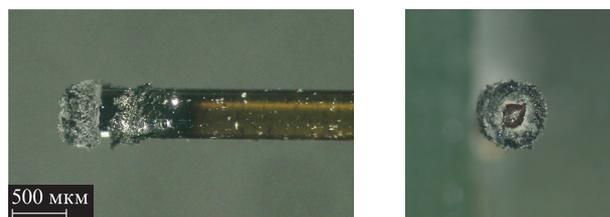


Рис. 1. Характерный внешний вид углеродсодержащего ОТВК.

Диаметр углеродсодержащего ОТВК составляет  $680 \pm 20$  мкм, длина –  $340 \pm 20$  мкм [28]. Его боковая и торцевая поверхности покрыты углеродной пленкой, в центре, на продольной оси волокна, присутствует прозрачное «окно» диаметром  $150 \pm 20$  мкм. Достаточно подробно устройство «объемного» углеродсодержащего ОТВК описано в работах [28, 29], где показано, что наряду с углеродной пленкой конвертер состоит из кварца, внутри которого находятся поглощающие лазерное излучение микро-включения.

#### 4. Титансодержащий оптотермический волоконный конвертер

Конвертер этого типа формировался по трехстадийной технологии. При создании титансодержащего ОТВК дистальный торец оптического волокна погружался на 2–3 мм в кювету с порошком  $\text{TiO}_2$  со средним размером частиц 0.1–0.2 мкм (ЗАО «Новосибирские наноматериалы», Россия). Излучение полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью до  $12.0 \pm 0.1$  Вт, распространяясь по оптическому волокну в течение  $0.50 \pm 0.01$  с, воздействовало на этот порошок (шаг 1). В результате продукты абляции порошка оседали на поверхность дистального торца волокна. После этого дистальный торец волокна оставался погруженным в порошок, а импульс излучения полупроводникового лазера специальной формы с максимальной средней мощностью  $11.0 \pm 0.1$  Вт и длительностью  $1.00 \pm 0.01$  с, распространяясь по оптическому волокну, дважды с паузой в  $0.50 \pm 0.01$  с воздействовал на конвертер, формируя модифицированный слой

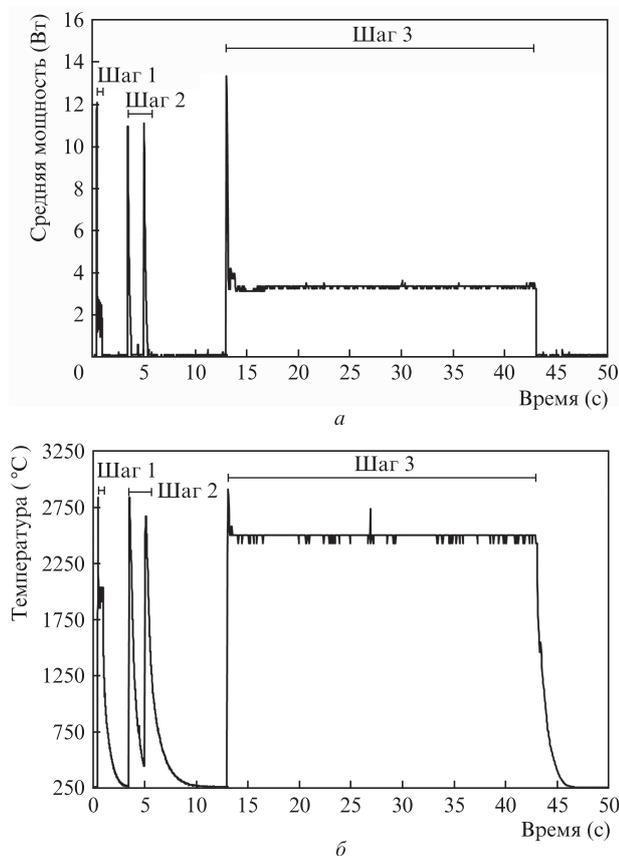


Рис.2. Типичные осциллограммы средней мощности лазерного излучения (а) и температуры конвертера (б) в процессе формирования титансодержащего ОТВК.

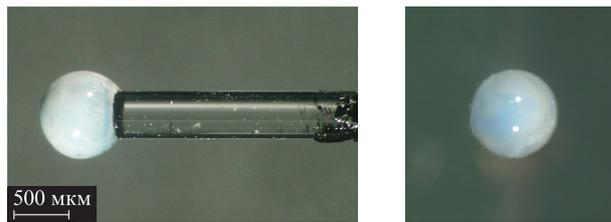


Рис.3. Характерный внешний вид титансодержащего ОТВК.

(шаг 2), представляющий собой слабо связанную с волоконном смесь порошка  $\text{TiO}_2$  и кварца. Затем на конвертер, состоящий из модифицированного слоя и находящийся на воздухе, в течение 30 с воздействовало лазерное излучение со средней мощностью  $3.5 \pm 0.1$  Вт (шаг 3). Осциллограммы, демонстрирующие поведение средней мощности лазерного излучения и температуры конвертера в процессе его создания, представлены на рис.2. Характерный внешний вид титансодержащего ОТВК представлен на рис.3. Его диаметр составлял  $780 \pm 20$  мкм, длина –  $700 \pm 20$  мкм.

Титансодержащий конвертер представлял собой спекшийся с кварцем в результате термообработки (шаг 3) оксид титана  $\text{TiO}_2$ , о чем свидетельствует его белый цвет [33]. Следует также отметить высокую механическую связность конвертера с волоконном, возникающую в результате спекания (шаг 3).

#### 5. Эрбийсодержащий оптотермический волоконный конвертер

Конвертер этого типа формировался по трехстадийной технологии. При его создании дистальный торец оптического волокна на 2–3 мм погружался в кювету с порошком оксида эрбия  $\text{Er}_2\text{O}_3$  со средним размером частиц 0.5–1.0 мкм (ЕСОМ, Япония). Излучение полупроводникового лазера с максимальной средней мощностью до  $13.0 \pm 0.1$  Вт, распространяясь по оптическому волокну в течение  $0.50 \pm 0.01$  с, воздействовало на этот порошок (шаг 1). В результате продукты абляции порошка оседали на поверхность дистального торца волокна. После этого дистальный торец волокна оставался погруженным в порошок, а импульс излучения полупроводникового лазера специальной формы с максимальной средней мощностью  $11.0 \pm 0.1$  Вт и длительностью  $1.00 \pm 0.01$  с, распространяясь по оптическому волокну, дважды с паузой в  $0.50 \pm 0.01$  с воздействовал на конвертер, формируя модифицированный слой (шаг 2), представляющий собой слабо связанную с волоконном смесь порошка  $\text{Er}_2\text{O}_3$  и кварца. Затем на конвертер, состоящий из модифицированного слоя и находящийся на воздухе, в течение 15 с воздействовало лазерное излучение со средней мощностью  $5.0 \pm 0.5$  Вт (шаг 3). Осциллограммы, демонстрирующие поведение средней мощности лазерного излучения и температуры конвертера в процессе его создания, представлены на рис.4. Характерный внешний вид эрбийсодержащего ОТВК представлен на рис.5. Его диаметр составлял  $890 \pm 20$  мкм, а длина –  $820 \pm 20$  мкм.

Эрбийсодержащий конвертер представлял собой спекшийся с кварцем в результате термообработки (шаг 3) оксид эрбия  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , о чем свидетельствует его розовый цвет [31]. Следует также отметить высокую механическую связность конвертера с волоконном, возникающую в результате спекания (шаг 3).

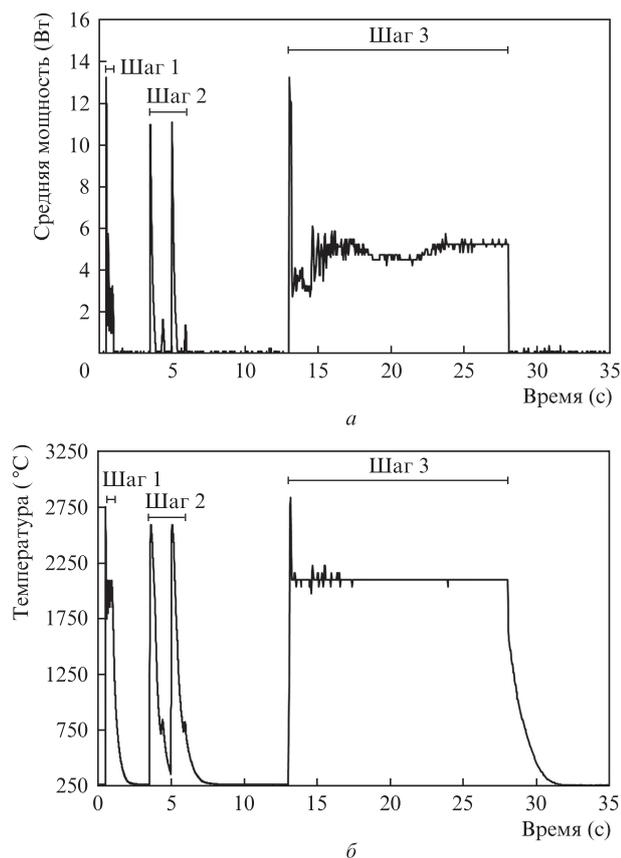


Рис.4. Типичные осциллограммы средней мощности лазерного излучения (а) и температуры конвертера (б) в процессе формирования эрбийсодержащего ОТВК.

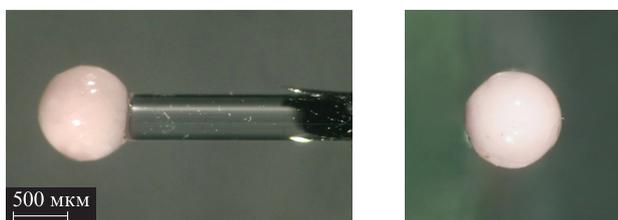


Рис.5. Характерный внешний вид эрбийсодержащего ОТВК.

## 6. Динамика лазерного нагрева углерод-, титан- и эрбийсодержащих конвертеров

Типичные зависимости, характеризующие динамику лазерного нагрева конвертеров, находящихся на воздухе, при различных средних мощностях действующего на конвертер излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм представлены на рис.6.

При воздействии лазерного излучения со средней мощностью  $0.30 \pm 0.05$  Вт температура эрбийсодержащего конвертера стабилизируется на уровне  $400 \pm 40$  °С, углеродсодержащего – на уровне  $600 \pm 50$  °С, а титансодержащего – на уровне  $800 \pm 50$  °С. При такой мощности конвертеры не разрушаются.

При воздействии лазерного излучения со средней мощностью  $1.0 \pm 0.1$  Вт температура эрбийсодержащего конвертера стабилизируется на уровне  $600 \pm 50$  °С, углеродсодержащего – на уровне  $1000 \pm 50$  °С, а титансодержащего – на уровне  $1450 \pm 50$  °С. При такой мощности конвертеры также не разрушаются. При средней мощности лазерного излучения  $4.0 \pm 0.1$  Вт температура титан-

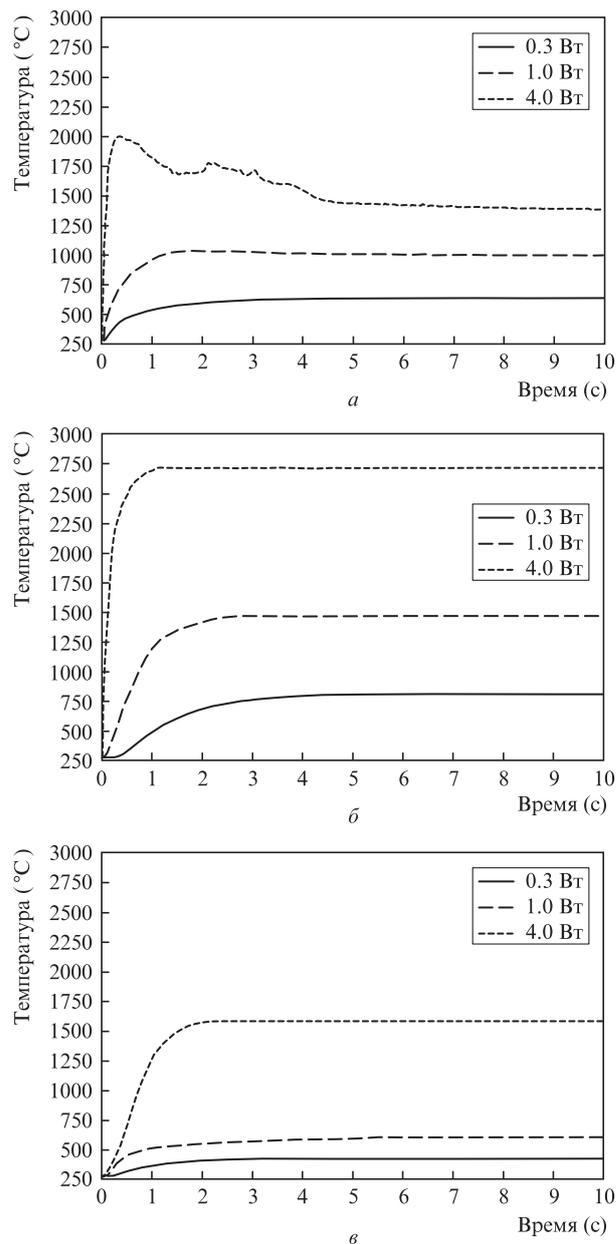


Рис.6. Динамика лазерного нагрева углерод- (а), титан- (б) и эрбийсодержащих (в) ОТВК при различной средней мощности падающего на конвертер излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм.

содержащего конвертера достигает  $2700 \pm 50$  °С, эрбийсодержащего –  $1600 \pm 50$  °С, а динамика нагрева углеродсодержащего конвертера отличается от динамика нагрева двух других: его температура в течение первых 4–5 с лазерного воздействия ведет себя нестабильно, что объясняется частичным разрушением конвертера, а именно утратой углеродной пленки на поверхности, что отмечалось также в [28, 29].

Разрушение конвертеров на воздухе под действием лазерного излучения сопровождается деформацией (изменением формы) конвертера и приводит к падению регистрируемой в эксперименте температуры. Оно наблюдается для титан- и эрбийсодержащих ОТВК при средней мощности лазерного излучения свыше  $10.0 \pm 0.1$  Вт, а для углеродсодержащего ОТВК – свыше  $4.0 \pm 0.1$  Вт.

Таким образом, наименее эффективно при одинаковых условиях нагревается эрбийсодержащий ОТВК, а наи-

более эффективно – титансодержащий. При этом оба они демонстрируют более высокую, чем углеродсодержащий конвертер, стойкость к воздействию лазерного излучения. Наблюдаемые различия, очевидно, связаны с различием в поглощающих способностях материалов конвертеров.

## 7. Спектры свечения углерод-, титан- и эрбийсодержащих конвертеров

Типичные спектры свечения конвертеров, возникающего при их нагреве лазерным излучением до температуры из диапазона 600–1100 °С, регистрируемые в области 200–900 нм, представлены на рис. 7.

Спектры свечения для углерод- и титансодержащих конвертеров в области 200–900 нм не содержат ярко выраженных полос (рис. 7, а, б). Регистрируемое свечение этих двух конвертеров можно связать с тепловым излучением, возникающим при их нагреве до температур 600–1100 °С.

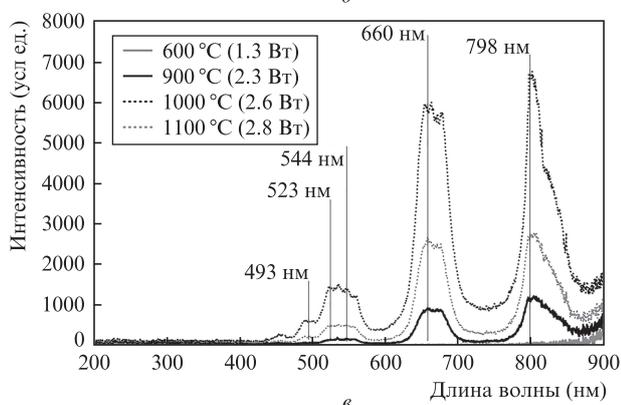
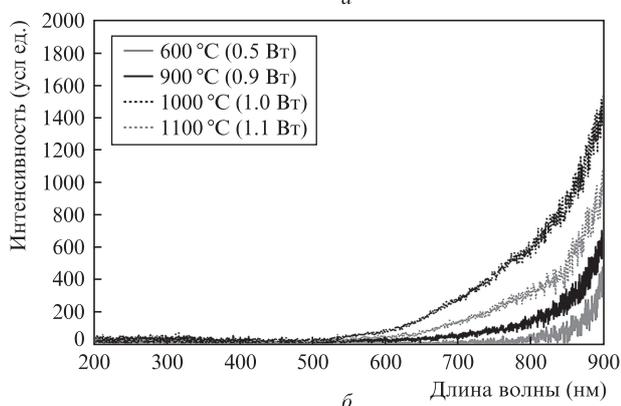
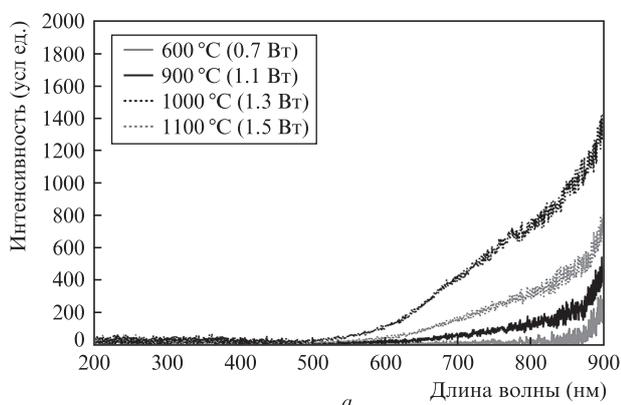


Рис. 7. Спектры свечения углерод- (а), титан- (б) и эрбийсодержащих ОТВК (в) при различных температурах конвертеров и средних мощностях падающего на них излучения полупроводникового лазера с длиной волны  $980 \pm 10$  нм.

Если предположить, что конвертер является абсолютно черным телом, то, согласно [32, 34], максимум его спектра свечения при повышении температуры смещается в область коротких длин волн. Этим обстоятельством можно объяснить рост интенсивности свечения в диапазоне 500–900 нм при увеличении температуры углерод- и титансодержащих конвертеров.

Спектр свечения эрбийсодержащего конвертера, регистрируемый в области 200–900 нм, существенно отличается от спектра свечения двух других рассмотренных конвертеров и имеет ярко выраженные полосы с максимумами на длинах волн 493, 523, 544, 660 и 798 нм, соответствующие излучательным переходам эрбия  ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  и  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  и связанные с ап-конверсией [35].

Свечение эрбийсодержащего конвертера в видимой области может быть использовано для биостимуляции при одновременном иссечении биоткани, что согласно [36] позволяет сократить сроки ее постоперационного восстановления. Близость полосы свечения этого конвертера с максимумом на длине волны 660 нм к полосе поглощения радахлорина [6] открывает перспективы использования эрбийсодержащего ОТВК для фотодинамической терапии в онкологии, дерматологии и др. Титан- и эрбийсодержащие конвертеры также могут быть использованы для иссечения биотканей в контактной лазерной хирургии в качестве альтернативы углеродсодержащим конвертерам. Титансодержащий конвертер за счет высокой эффективности преобразования лазерной энергии в тепловую может повысить эффективность иссечения биоткани при сопоставимой мощности лазерного излучения.

## 8. Выводы

В работе исследованы углерод-, титан- и эрбийсодержащие оптотермические волоконные конвертеры, расположенные на дистальном торце кварц-кварцевого оптического волокна. Углеродсодержащий ОТВК сформирован по двухстадийной технологии, а титан- и эрбийсодержащие ОТВК – по трехстадийной. Показано, что наиболее эффективно под действием излучения полупроводникового лазера с длиной волны 980 нм нагревается титансодержащий ОТВК. Экспериментально установлено, что титан- и эрбийсодержащие конвертеры более устойчивы к воздействию лазерного излучения, чем углеродсодержащие. Обнаружено, что под действием лазерного излучения с длиной волны 980 нм все конвертеры излучают в области 200–900 нм. При этом наряду с тепловым излучением только в спектре свечения эрбийсодержащего конвертера наблюдаются ярко выраженные полосы, наличие которых позволит расширить область его биомедицинских применений. Например, полоса с максимумом в области 660 нм может быть использована для биостимуляции и фотодинамической терапии. Титан- и эрбийсодержащие конвертеры могут рассматриваться в качестве альтернативы существующим углеродсодержащим ОТВК в контактной лазерной хирургии.

1. Rai P.K., in *Emerging Trends in Laser & Spectroscopy and Applications* (New Delhi: Allied Publi., 2010).
2. Gubitosi A., Ruggiero R., Ortolani R., Podzemny V., Parmeggiani D., Esposito E., Foroni F., Esposito A., Villaccio G. *Ann. Ital. Chir.*, **75**, 515 (2012).
3. Karu T., in *Lasers in Medicine* (New York: CRC Press, 2011, p.171).

4. Гафтон Г.И., Семилетова Ю.В., Анисимов В.В., Гельфонд М.Л., Мяснянкин М.Ю., Новик А.В., Нехаева Т.Л., Балдуева И.А., Гафтон И.Г. *Сибирский онкологический журнал*, **4**, 23 (2013).
5. Samsøe Andersen E. *Laser Diode Systems for Photodynamic Therapy and Medical Diagnostics* (Lund: Lund University, 2004).
6. Власова О.Л. *Вестник СПбГУ, Сер. 11, Медицина*, **1**, 170 (2011).
7. Kaufmann R., Hartmann A., Hibst R. *J. Dermatol. Surg. Onc.*, **20**, 112 (1994).
8. Rao G., Tripathi P.S., Srinivasan K. *Int. J. Laser Dent.*, **2**, 74 (2012).
9. Kaufmann R., Hibst R. *Clin. Exp. Dermatol.*, **15**, 389 (1990).
10. Wieliczka D.M., Weng S., Querry M.R. *Appl. Opt.*, **28**, 1714 (1989).
11. Romanos G., Nentwig G.H. *J. Clin. Laser Med. Sur.*, **17**, 193 (1999).
12. Sanz-Moliner J.D., Nart J., Cohen R.E., Ciancio S.G. *J. Periodontol.*, **84**, 152 (2013).
13. Romanos G.E., Belikov A.V., Skrypnik A.V., Feldchtein F.I., Smirnov M.Z., Altshuler G.B. *Laser. Surg. Med.*, **47**, 411 (2015).
14. Beer F., Körpert W., Passow H., Steidler A., Meinl A., Buchmair A.G., Moritz A. *Laser. Med. Sci.*, **27**, 917 (2012).
15. Capon A., Mordon S. *Am. J. Clin. Dermatol.*, **4**, 1 (2003).
16. Rizzo L.B., Ritchey J.W., Higbee R.G., Bartels K.E., Lucroy M.D. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, **225**, 1562 (2004).
17. Альтшулер Г.Б., Беликов А.В., Скрипник А.В., Фельдштейн Ф.И. *Инновационная стоматология*, **1**, 2 (2012).
18. Скрипник А.В. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **56**, 37 (2013).
19. Belikov A.V., Feldchtein F.I., Altshuler G.B. US Patent № 2012/0123399 A1/ № 13/379,916; appl. 31.12.2010; pub. 17.05.2012.
20. Altshuler G.B. *Proc. 19th Annual Conf. of the Academy of Laser Dentistry* (Scottsdale, AZ, USA, 2012).
21. *Alta-ST Soft Tissue Surgical Modular System User Manual* (Walpole, MA, USA, Dental Photonics, Inc., 2015).
22. Belikov A.V., Skrypnik A.V., Shatilova K.V. *Frontiers Optoelectron.*, **8**, 212 (2015).
23. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. *Laser Phys.*, **20**, 1641 (2010).
24. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. *Laser Phys.*, **21**, 1230 (2011).
25. Bagratashvili V.N., Yusupov V.I., Chudnovskii V.M. *Proc. III Int. Symp. «Topical Problems of Biophotonics»* (St. Petersburg – N.Novgorod, 2011).
26. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N., in *Hydrodynamics – Advanced Topics* (Rijeka, Croatia: InTech, 2011, p.95).
27. Abela G.S., Barbeau G.R., in *Lasers in Cardiovascular Medicine and Surgery: Fundamentals and Techniques* (Norwell: Kluwer Acad. Publ., 1990, p.229).
28. Беликов А.В., Скрипник А.В., Курнышев В.Ю., Шатилова К.В. *Квантовая электроника*, **46** (6), 534 (2016) [*Quantum Electron*, **46** (6), 534 (2016)].
29. Belikov A.V., Skrypnik A.V., Kurnyshev V.Y. *Proc. SPIE*, **9917**, 99170G (2016).
30. Скрипник А.В. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **58**, 385 (2015).
31. Huber E.J., Head E.L., Holley C.E. *J. Phys. Chem.*, **60**, 1582 (1956).
32. Ландсберг Г.С. *Оптика* (М.: Физмалит, 2003).
33. Gesenhues U. *Chem. Eng. Technol.*, **24** (5), 685 (2001).
34. Панов В.А. *Справочник конструктора опτικο-механических приборов* (Л.: Машиностроение, 1980).
35. Narro-Garcia R., Chillece E.F., Barbosa L.C., de Posada E., Arronte M., Rodriguez E. *J. Lumin.*, **134**, 528 (2013).
36. Кобаев С.Ю., Малюгин Б.Э., Кобаева В.Г. *Вестник ТГУ*, **20** (3), 619 (2015).

## ПОПРАВКА

Ю.П.Яценко, Е.Н.Плетенева, А.Г.Охримчук, А.В.Гладышев, А.Ф.Косолапов, А.Н.Колядин, И.А.Буфетов. Генерация многозонного суперконтинуума в револьверном световоде с поллой воздушной сердцевиной («Квантовая электроника», 2017, т. 47, №6, с. 553–560).

В статье допущен ряд опечаток. На с. 557 в подрисуночной подписи к рис.9 вместо

Рис.9. Распространение спектрально-ограниченного гауссового импульса длительностью 200 фс в модах LP<sub>01</sub> и LP<sub>21</sub> при энергии входного импульса в каждой моде 6 мкДж: форма и спектр излучения на выходе световода длиной 3 м для мод LP<sub>01</sub> (а) и LP<sub>02</sub> (б); денситограммы эволюции спектра и формы импульса по длине световода для мод LP<sub>01</sub> (б) и LP<sub>02</sub> (з). На этом рисунке и рис.10 штриховой кривой показаны форма и спектр импульса на входе в световод.

должно быть

Рис.9. Распространение спектрально-ограниченного гауссова импульса длительностью 200 фс в модах LP<sub>01</sub> и LP<sub>21</sub> при энергии входного импульса в каждой моде 6 мкДж: форма и спектр излучения на выходе световода длиной 3 м для мод LP<sub>01</sub> (а) и LP<sub>21</sub> (б); денситограммы эволюции спектра и формы импульса по длине световода для мод LP<sub>01</sub> (в) и LP<sub>21</sub> (з). На этом рисунке и рис.10 штриховой кривой показаны форма и спектр импульса на входе в световод.