

# Система контроля температуры рабочего торца оптоволоконна лазерных модулей с волоконным выводом излучения для медицинской аппаратуры

© С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова<sup>†</sup>, А.Л. Тер-Мартirosян \*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* ЗАО „Полупроводниковые приборы“,  
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 июня 2013 г. Принята к печати 16 июня 2013 г.)

В данной работе предлагается устройство контроля температуры торца оптоволоконна, встраиваемое в блок питания мощных лазерных диодов и модулей (с оптоволоконным выходом), используемых в медицинских лазерных аппаратах. В качестве чувствительного элемента выбран фотодиод на основе  $A^{III}B^V$  среднего инфракрасного диапазона, разработанный в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, из класса фотодиодов, по своим параметрам оптимально подходящих для создания детекторов теплового излучения (пирометрических сенсоров) различного назначения. Разработанное устройство позволяет осуществлять контроль температуры на торце рабочего оптоволоконна лазерного „скальпеля“ в диапазоне 600–1100°С с погрешностью не хуже 1% при быстродействии 1 мс. Устройство имеет цифровой и аналоговые выходы сигнала температуры, которые могут быть использованы для управления током накачки лазера. Тем самым расширяются функциональные возможности медицинской лазерной аппаратуры, повышается ее эффективность, безопасность и увеличивается срок службы.

## 1. Введение

В последнее время одним из важнейших применений твердотельных и полупроводниковых лазеров с вводом излучения в оптическое волокно (ОВ) является медицинская лазерная аппаратура, предназначенная для контактной и бесконтактной коагуляции биологических тканей. Режущие, коагулирующие, испаряющие возможности хирургических лазеров нашли широкое применение во многих областях хирургии. Использование лазерного излучения позволяет выполнять хирургическое вмешательство с высокой точностью, строго дозируя воздействие, дает возможность оперировать соматически отягощенных больных. Санкт-Петербургская компания ЗАО „Полупроводниковые приборы“ ([www.atscd.ru](http://www.atscd.ru)) является одним из крупнейших в России разработчиков и производителей мощных лазерных диодов и модулей с волоконным выводом излучения. На основе этих лазерных модулей компанией-партнером ООО „Аткус“ ([www.atcus.ru](http://www.atcus.ru)) разработана серия медицинских лазерных аппаратов ЛАТУС, предназначенных для использования в медицинских учреждениях широкого профиля для контактной и бесконтактной коагуляции тканей.

В режиме контактной коагуляции тканей (лазерный „скальпель“) луч лазера является достаточно мощным, чтобы обеспечить коагуляцию, разрез или испарение биоткани. В этих применениях важным техническим параметром лазеров с волоконным выводом излучения становится температура торца ОВ, неконтролируемое повышение которой (например, при „загрязнении“) может представлять угрозу как для пациента, так и для самой аппаратуры. Таким образом, контроль температуры

торца ОВ важен как в медицинском, так и в техническом аспектах. С медицинской точки зрения поддержание постоянной рабочей температуры торца ОВ позволяет избежать перегрева и некроза тканей, окружающих оперативное поле. С технической точки зрения контроль температуры позволяет предотвратить разогрев кварцевых волокон до температур, приводящих к изменению их свойств. Оснащение медицинских лазерных аппаратов системой контроля температуры рабочего торца ОВ позволит не только минимизировать травматическое воздействие на биоткани, но и продлить срок использования волоконно-оптического инструмента, снизив тем самым стоимость лазерной операции.

Целью данной работы являлась разработка принципа построения и конструкции устройства контроля температуры (пирометрического сенсора) рабочего торца ОВ лазерного „скальпеля“, которое легко интегрируется в уже существующие аппараты серии ЛАТУС, а также в любые другие блоки управления (драйверы) твердотельных и полупроводниковых лазеров с вводом излучения в оптическое волокно. Устройство представляет собой оптоволоконный пирометрический сенсор, в качестве чувствительного элемента которого использован  $In_xAs_{1-x}Sb$ -фотодиод среднего инфракрасного (ИК) диапазона, разработанный в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, который по своим параметрам оптимально подходит для создания детекторов теплового излучения (пирометров) различного назначения.

## 2. Постановка задачи

Аппараты серии ЛАТУС в зависимости от области применения различаются длиной волны излучения (665–980 нм), выходной оптической мощностью, кото-

<sup>†</sup> E-mail: [g.sotnikova@mail.ioffe.ru](mailto:g.sotnikova@mail.ioffe.ru)

рая может достигать 30 Вт при диаметре светового пятна излучения (диаметр ОВ) 200–600 мкм, и режимом излучения (непрерывный и импульсный с длительностью импульсов от 100 мкс до 10 с). Большие мощности лазерного излучения при неконтролируемом „загрязнении“ рабочего торца ОВ могут приводить к его быстрому разогреву до температур, приводящих к деформации, ухудшению светопроводящих характеристик или даже разрушению: 900 °С — „точка превращения“, а 1100 °С — начало трансформации кварцевого стекла.

Режим лазерного „скальпеля“ предполагает следующие технические требования к устройству контроля температуры торца ОВ, которые должны обеспечиваться в условиях непрерывного и импульсного режимов накачки лазерных диодов с мощностью излучения до 30 Вт: диапазон измерения температуры 600–1100 °С; быстродействие (время отклика)  $\sim 1$  мс; линейный размер области измерения от 400 мкм (диаметр оптоволокна); точность измерения температуры не хуже 1% от измеряемого значения; подавление рассеянного лазерного излучения в диапазоне длин волн 670–980 нм не менее 5 порядков.

Конструктивно сенсор должен легко интегрироваться в существующие драйверы твердотельных и полупроводниковых лазеров. Современные драйверы лазерных диодов, предназначенных для применения в том числе в медицинской лазерной аппаратуре, представляют собой сложные „интеллектуальные“ устройства на основе микропроцессоров, использующих сигналы от различных датчиков (мощности лазерного излучения, температуры полупроводникового кристалла, расстояния до обрабатываемого объекта и т.п.) для управления источником тока накачки лазерного диода. Выходной сигнал пирометрического сенсора, несущий информацию о температуре рабочего торца оптоволокна, используется как дополнительный управляющий сигнал для источника тока накачки лазерного диода.

### 3. Принципы построения пирометрического сенсора

Для измерения температуры торца ОВ выбран бесконтактный метод радиационный пирометрии с использованием рабочего оптоволокна лазерного диода для доставки части теплового излучения, распространяющегося в ОВ от его торца к чувствительному элементу пирометрического сенсора в направлении, обратном лазерному излучению. С этой целью между разъемом для подключения к прибору рабочего ОВ и оптическим разъемом лазерного модуля вводится разветвитель ОВ. Таким образом, пирометрический сенсор конструктивно легко интегрируется в драйвер лазерного диода, а его выходной сигнал (в цифровом или аналоговом виде) может быть использован для управления током накачки лазера.

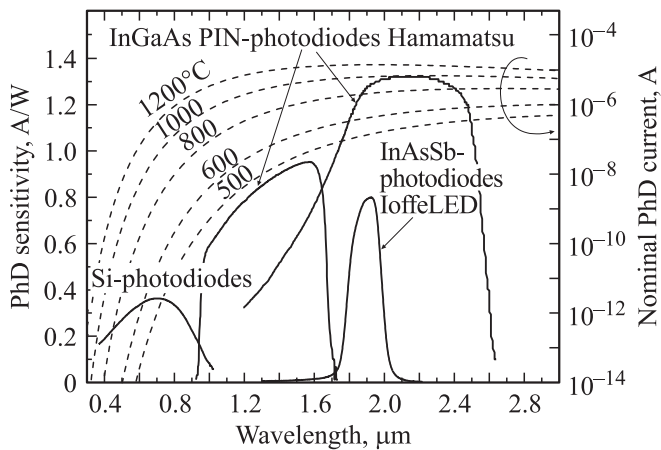
В предыдущих работах [1–3] было показано, что наилучшими характеристиками с точки зрения точности и воспроизводимости результатов измерения температуры обладают квазимонохроматические пирометры. В них

используется зависимость энергетической яркости излучения от температуры объекта в узком диапазоне длин волн  $\lambda_{\max} \pm \Delta\lambda/2$ , которая может быть описана аналитически фундаментальным законом Планка для спектральной составляющей с длиной волны  $\lambda_{\max}$ . Критерием квазимонохроматичности (адекватности использования закона Планка) может служить параметр  $\Delta\lambda/\lambda_{\max} \leq 0.1$ , где  $\lambda_{\max}$  — длина волны в максимуме спектральной линии измерения. С другой стороны, сужение спектральной линии измерения требует более чувствительных детекторов. Максимальной чувствительностью и максимальным быстродействием по сравнению со всеми известными тепловыми детекторами излучения обладают фотодиодные сенсоры.

#### 3.1. Выбор чувствительного элемента

Расчеты показывают, что для каждой спектральной составляющей,  $R(\lambda, T)$  в Вт/мкм·см<sup>2</sup>, теплового излучения объекта, находящегося при некоторой температуре  $T$ , эффективность ее передачи с торца ОВ диаметром  $d = 400$  мкм при числовой апертуре  $NA = 0.22$  составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ . Для требуемого диапазона температур 600–1100 °С при выполнении условия квазимонохроматичности  $\Delta\lambda \approx 0.1\lambda_{\max}$  на чувствительный элемент пирометра попадает мощность теплового излучения, изменяющаяся от  $10^{-4}$  до единиц мкВт в спектральной области до 1 мкм (область чувствительности Si-фотоприемников, обычно применяемых в данном диапазоне измеряемых температур). При наличии в оптической схеме ОВ разветвителя часть мощности рассеянного лазерного излучения, лежащая в этом же спектральном диапазоне и попадающая на фотодетектор, может достигать единиц мВт, что требует специальных мер для ее подавления. Подавление рассеянного излучения может быть выполнено различными способами: использованием оптических фильтров на линии излучения лазерных диодов с высокой оптической плотностью,  $D > 6$ ; реализацией временного разделения процессов измерения температуры и излучения лазера при его импульсной работе; использованием спектрального разделения измеряемого теплового сигнала и рассеянного лазерного излучения. Эффективность последнего способа существенно возрастает, если выбранный приемник имеет максимальную чувствительность к тепловому излучению и нечувствителен к лазерному. Это условие является одним из основных критериев при выборе чувствительного элемента пирометрического сенсора.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики чувствительности фотодиодов (ФД) различных типов (сплошные кривые) и спектральные зависимости мощности теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ) в диапазоне температур 500–1200 °С (штриховые кривые), выраженные в токе „условного“ ФД с равномерной спектральной чувствительностью  $S = 1$  А/Вт при эффективности передачи теплового излучения  $\sim 0.1$ . Из рис. 1 видно, что оптимальным решением для выбора чувствительного элемента пирометрического сен-



**Рис. 1.** Области спектральной чувствительности фотодиодов (ФД), удовлетворяющих требованиям к разрабатываемому пирометрическому сенсору (сплошная линия), и значения тока „условного“ фотодиода ( $S = 1 \text{ A/Wt}$ ) для различных спектральных диапазонов при детектировании 10% теплового излучения объекта (АЧТ).

сора на выходе кварцевого ОВ с границей пропускания  $\sim 2.5 \text{ мкм}$  является ФД на основе соединений  $\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$  типа PD19Su/Sr ([www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)) с максимумом чувствительности при  $\lambda_{\text{max}} = 1.9 \text{ мкм}$  и относительно узкой спектральной полосой чувствительности,  $\Delta\lambda \approx 0.2 \text{ мкм}$ , определяемой „флип-чип“ конструкцией ФД. В такой конструкции чип ФД облучается со стороны подложки, которая в данном применении выполняет функцию эффективного фильтра лазерного излучения. Резкий спад чувствительности в коротковолновой области и максимальное смещение области чувствительности от спектра излучения лазера практически до границы пропускания кварцевого волокна обеспечивают наибольшее подавление лазерного излучения. Указанный фотодиод обладает детектирующей способностью  $D^* \approx 10^{10} - 10^{11} \text{ см} \cdot \sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$ , наилучшей для известных фотоприемников данного спектрального диапазона, что обусловлено, в частности, оптическим сопряжением чувствительной поверхности фотодиода диаметром 300 мкм со сферической иммерсионной Si-линзой диаметром 3.2 мм. Динамическое сопротивление ФД PD19Su/Sr равно нескольким кОм, что при использовании современных малошумящих операционных усилителей позволяет создать фотоприемное устройство, реализующее пороговую чувствительность самого ФД, т.е. не вносящее дополнительных шумов в измерительный канал сенсора [4]. Наличие линзы фотодиода существенно упрощает сопряжение ОВ с фотодиодом без излишних потерь тепловой мощности.

### 3.2. Передаточная функция пирометрического сенсора

Для описания работы квазимонохроматического фотодиодного сенсора целесообразно использовать переда-

точную функцию, связывающую измеряемый выходной ток фотодиода ( $I_{\text{PhD}}$ , нА) и температуру исследуемого объекта ( $T$ , К) [2,3]:

$$I_{\text{PhD}}(T) = \gamma \frac{C_1}{\lambda_{\text{max}}^5 \exp(C_2/\lambda_{\text{max}}T)}, \quad (1)$$

где  $\gamma = k_p \varepsilon(\lambda_{\text{max}}) \tau(\lambda_{\text{max}}) S_1(\lambda_{\text{max}}) \Delta\lambda B$  — параметр сенсора, определяемый спектральной характеристикой фотодиода ( $\lambda_{\text{max}} \pm \Delta\lambda/2$ ), значением его токовой чувствительности  $S_1$ , коэффициентом излучающей способности  $\varepsilon(\lambda_{\text{max}})$  и площадью объекта  $B$ , спектральным коэффициентом пропускания  $\tau(\lambda_{\text{max}})$  и эффективностью сбора излучения в оптоволоконне  $k_p$ ;  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные Планка.

Первоначальные значения параметров  $\lambda_{\text{max}}$  и  $\gamma$  определяются в процессе индивидуальной градуировки сенсора: построением экспериментальных значений тока фотодиода от температуры калиброванного источника (АЧТ) и их аппроксимацией функцией вида (1). При дальнейшей эксплуатации значение  $\lambda_{\text{max}}$  остается неизменным для каждого конкретного ФД, если не изменяется его рабочая температура, а параметр  $\gamma$  может изменяться при изменении условий на торце ОВ (новый скот, смена ОВ).

Использование передаточной функции для описания работы сенсора позволяет не только реализовать непрерывный расчет значений температуры объекта по измеряемому току фотодиода, но и провести теоретические оценки чувствительности пирометрического сенсора в различных условиях измерений. Дифференцирование (1) по любому из параметров передаточной функции определяет точность сенсора, которая обычно характеризуется относительной погрешностью измерения температуры:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{\lambda_{\text{max}} T}{C_2} \left[ \sum \frac{\partial \gamma}{\partial (\varepsilon, \tau, S_1, k_p, B)} + \frac{1}{\Psi} \right], \quad (2)$$

где  $\Psi = dI/I_{\text{PhD}}(T)$  — отношение сигнал/шум при измерении тока фотодиода.

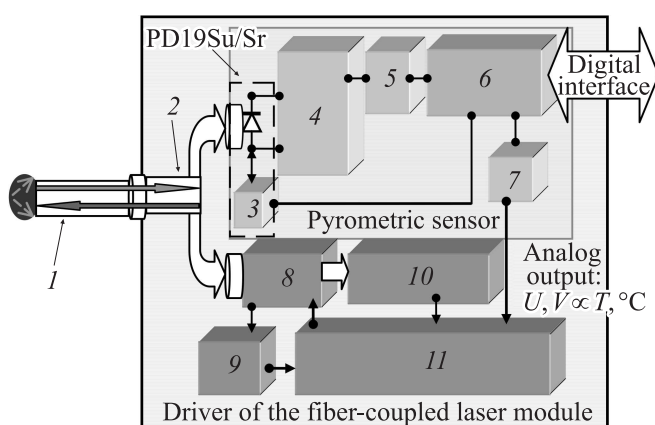
Первое слагаемое в скобках выражения (2) определяет так называемые методическую составляющую погрешности измерения температуры, которая связана с неопределенностью параметра сенсора  $\gamma$  и может быть сведена к минимуму стабилизацией параметров фотодиода и периодической калибровкой сенсора при нарушении условий работы, например, при возможном изменении значений параметров  $\tau$ ,  $B$  и  $k_p$  при замене оптоволоконна или изменении чувствительности фотодиода  $S$  при нестабильной рабочей температуре сенсора. Описание работы пирометрического сенсора с помощью квазимонохроматической модели (1) обеспечивает возможность его калибровки (корректировки параметра  $\gamma$ ) непосредственно „на рабочем месте“ по одной известной температурной точке, выбранной в качестве температуры калибровки [1].

Второе слагаемое в скобках выражения (2) определяет инструментальную составляющую погрешности измерения температуры, которая связана с шумами фотоприемного устройства. Именно эта составляющая погрешности определяет чувствительность сенсора к изменению температуры и нижний порог детектирования. Из (2) следует, что для достижения требуемой точности измерения температуры не хуже 1% в диапазоне температур 600–1100°C необходимо обеспечить отношение сигнал/шум при измерениях тока фотодиода не хуже 50 для  $\lambda_{\max} \approx 2$  мкм.

Оценка мощности теплового излучения, доставляемого с торца кварцевого ОВ при выполнении условия квазимонохроматичности  $\Delta\lambda \approx 0.1\lambda_{\max}$  в спектральной области вблизи 2 мкм, дает величину  $\sim 1$  мкВт для 600°C и 20 мкВт для 1100°C. При значениях детектирующей способности  $D^* \sim 10^{10}$  см $\cdot\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$  и размерах чувствительной поверхности ФД с иммерсионной линзой 3 мм эквивалентная мощность шума ФД составит  $10^{-4}$  мкВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , что доказывает теоретическую возможность создания на его основе пирометрического сенсора для измерения температуры торца оптоволоконка с точностью не хуже 1% при быстродействии до 100 мкс (полоса частот детектирования сигнала 20 кГц).

#### 4. Драйвер лазерного диода с устройством контроля температуры торца оптического волокна

Блок-схема драйвера с встроенным пирометрическим сенсором представлена на рис. 2. Для обеспечения



**Рис. 2.** Блок-схема драйвера лазерного модуля с оптоволоконным выводом излучения и встроенным пирометрическим сенсором: 1 — рабочее ОВ; 2 — Y-образный разветвитель ОВ; 3 — термоэлектрический модуль (ТЭМ); 4 — усилитель-преобразователь ток–напряжение; 5 — АЦП; 6 — блок управления и обработки; 7 — ЦАП; 8 — лазерный диод; 9 — датчик тока; 10 — датчик мощности излучения; 11 — управляемый источник стабилизированного тока накачки лазера.

непрерывного детектирования теплового излучения торца ОВ, расчета и индикации температуры, реализации алгоритма калибровки, а также возможности передачи данных на удаленный компьютер в пирометрическом сенсоре используется микропроцессор с цифровым и аналоговым входами/выходами.

Аналоговый сигнал сенсора используется для управления током накачки лазера. Таким образом, открывается возможность реализации дополнительных функций в медицинской лазерной аппаратуре: аварийного отключения тока накачки лазера при превышении температуры на торце ОВ предельно допустимой, приводящей к его разрушению; поддержания температуры торца ОВ на некотором заданном уровне; непрерывного мониторинга значений температуры торца ОВ (лазерного „скальпеля“).

#### 4.1. Экспериментальный макет пирометрического сенсора

Экспериментальный макет пирометрического сенсора состоит из фотодиода PD19Su/Sr, подключенного к схеме управления, детектирования и обработки сигнала. ФД смонтирован на термоэлектрическом модуле (ТЭМ) и расположен в корпусе, обеспечивающим подключение ОВ посредством разъема типа SMA-905. Для герметичности корпуса ФД его вход закрыт сапфировым окном. Для стабилизации температуры ФД в его корпус встроены температурный датчик. Схема управления по сигналу термодатчика осуществляет управление током ТЭМ для поддержания температуры фотодиода на уровне  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , что позволяет обеспечить стабильность его спектральной характеристики ( $\lambda_{\max}$ ,  $\Delta\lambda$ ) и коэффициента токовой чувствительности ( $S_I$ ) при минимальном энергопотреблении. Усилитель-преобразователь тока ФД выполнен на прецизионных операционных усилителях, обладающих низкими уровнями шумов по напряжению и току ( $e_n = 1$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ,  $i_n = 2.1$  пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ). Регистрация тока осуществляется в полосе 2 кГц с коэффициентом преобразования ток–напряжения  $K = 3 \cdot 10^5$  В/А. Блок обработки сигнала ФД выполнен на Evaluation Board EVAL-ADuC 7026QS фирмы Analog Device ([www.analog.com](http://www.analog.com)). Микроконтроллер ADuC 7026 представляет собой законченную интегральную систему сбора данных, разработанную для промышленных систем управления и автоматизации, „smart“-сенсоров, оптических сетей и т. п. Она включает высокопроизводительный микропроцессор ARM7TDMI, многоканальную АЦП (12 бит, частота выборки до 1 МГц), встроенную память, 4 выхода ЦАП, последовательный порт UART. В микропроцессоре осуществляется расчет температуры в соответствии с выражением (1) с коэффициентами, определяемыми в процессе градуировки (в данной реализации  $\lambda_{\max} = 1.89$  мкм и  $\gamma = 1.6 \cdot 10^2$ ), формирование аналогового сигнала напряжения, пропорционального рассчитанной температуре, и передача значений

температуры на цифровой выход — последовательный порт UART — для передачи в блок индикации или на удаленный компьютер. Скорость передачи 115 200 бит/с.

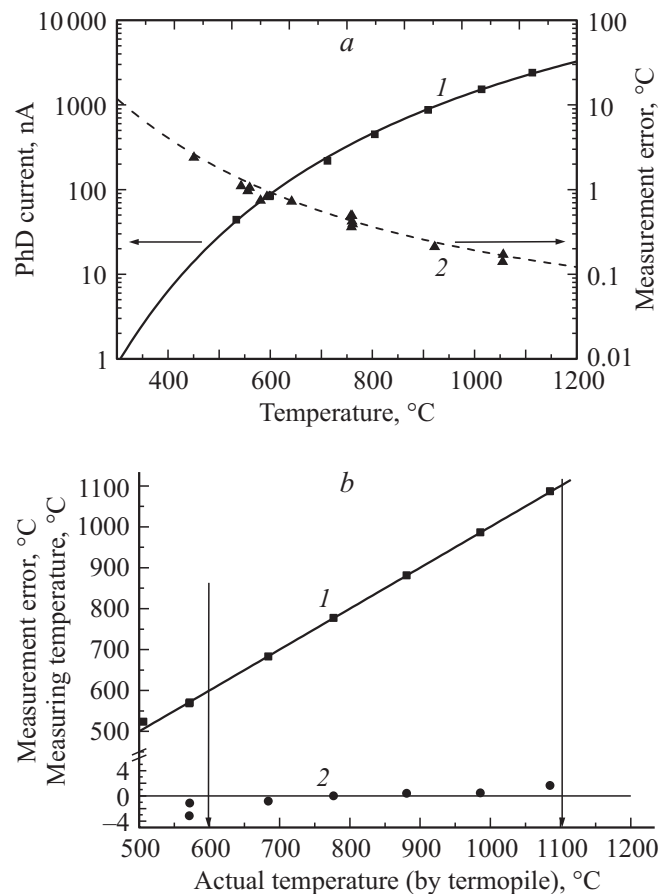
## 5. Эксперимент

В эксперименте был использован лазерный медицинский аппарат ЛАТУС-К ([www.atcus.ru](http://www.atcus.ru)) с выходной оптической мощностью до 30 Вт и длиной волны излучения  $(940 \pm 10)$  нм. Доставка лазерного излучения к объекту осуществляется с помощью кварцевого оптического волокна диаметром 400 мкм и числовой апертурой  $NA = 0.22$ , подключаемого к оптическому выходу лазерного модуля через оптический разъем SMA-905, установленный на корпусе прибора. Такая конструкция аппарата обеспечивает возможность и удобство подключения/замены „рабочего“ ОВ произвольной длины и с произвольной конфигурацией выходного торца.

Оптический разветвитель выполнен в виде простейшего бескорпусного сплавного Y-образного отрезка ОВ и обеспечивает однонаправленный отвод  $\sim 20\%$  мощности теплового излучения, распространяющегося по ОВ в направлении, противоположном направлению распространения излучения лазера.

Особенностью экспериментальных испытаний пирометрического сенсора являлась необходимость их проведения в статическом и динамическом режимах. В статическом режиме для контактного нагрева торца ОВ использовался тепловой источник (излучатель, аналог АЧТ), который с помощью регулируемого источника питания позволяет устанавливать и поддерживать постоянную его температуру и соответственно температуру торца ОВ при контакте с поверхностью излучателя в диапазоне  $600\text{--}1100^\circ\text{C}$ . Независимый контроль температуры излучателя осуществляется цифровым термометром с термопарой К-типа. Экспериментальная установка совместно с разработанным пакетом программ позволяет снимать передаточную характеристику пирометрического сенсора (осуществлять его градуировку), исследовать его шумовые характеристики, стабильность и воспроизводимость показаний. Результаты текущих экспериментов передавались через последовательный цифровой выход пирометрического сенсора на персональный компьютер, отображались на мониторе и записывались в файл для последующей статистической обработки.

Для исследования динамических характеристик (быстродействия) сенсора был создан „имитатор теплового объекта“ с возможностью модуляции температуры вплоть до частот  $\sim 10$  кГц. В качестве такого „имитатора“ использовался согласованный с ФД по спектру светодиод (СД) типа LED 19Su/Sr того же производителя ([www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)). Управляемый источник тока СД обеспечивает требуемую мощность и модуляцию излучения, эквивалентную заданному изменению температуры объекта.

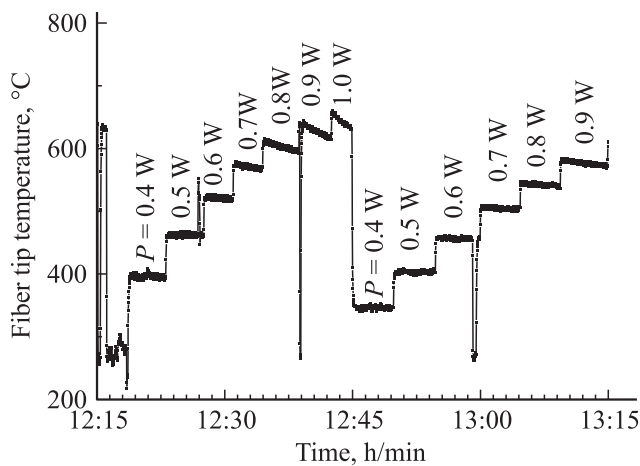


**Рис. 3.** *a* — экспериментальные значения (точки 1) тока ФД (PhD), расчетная передаточная функция пирометрического сенсора (сплошная линия 1), экспериментальные (точки 2) и расчетные (штриховая линия 2) значения инструментальной погрешности пирометрического сенсора. *b* — показания ФД сенсора (1) при измерении температуры на торце ОВ при его контакте с излучателем и их отклонения (2) от температуры излучателя, контролируемой по термопаре.

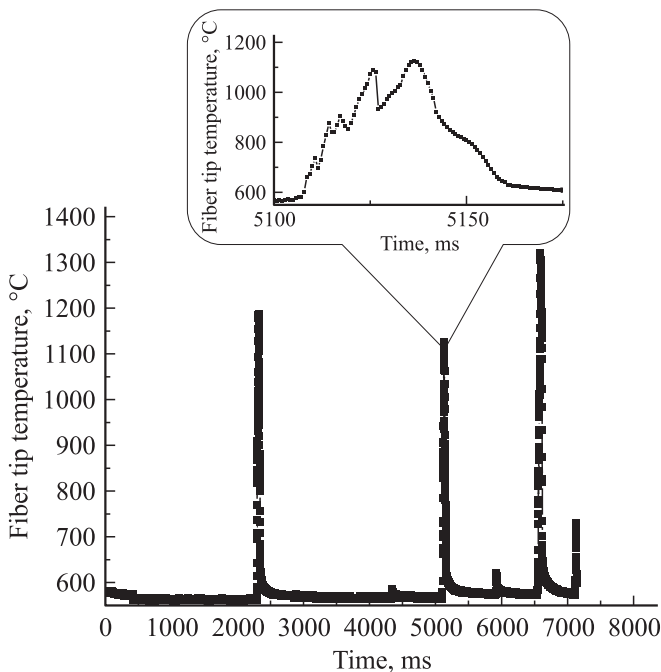
## 6. Экспериментальные результаты

На рис. 3, *a* представлены экспериментальные значения тока фотодиода и рассчитанная по ним передаточная функция пирометрического сенсора (кривая 1), а на рис. 3, *b* соответствующие ей расчетные значения температуры на торце ОВ (данные 1) и их отклонения (данные 2) от температуры излучателя, контролируемой термопарой. На рис. 3, *a* также приведены экспериментальные (точки 2) и расчетные (штриховая линия) значения инструментальной погрешности измерения температуры, вызванной шумами ФД детектора. Инструментальная погрешность сенсора оценивалась по дисперсии выходного сигнала ( $\sigma$ ) при различных значениях температуры излучателя, поддерживаемой на постоянном уровне. Экспериментально измеренные значения дисперсии выходного тока не зависели от уровня сигнала и составили величину  $\sigma = 1.4$  нА в полосе детектирования тока фотодиода 2 кГц, что при расчетах температуры в





**Рис. 4.** Эксперимент по измерению температуры торца ОВ при его нагреве излучением лазера при накачке различной мощности  $P$ .



**Рис. 5.** Регистрация процесса прожигания черной бумаги излучением мощного полупроводникового лазера ( $P = 4$  Вт). На вставке — один из пиков в увеличенном временном масштабе.

соответствии с (2) обеспечивает погрешность, изменяющуюся от  $\sim 2^\circ\text{C}$  при  $600^\circ\text{C}$  до  $\sim 0.2^\circ\text{C}$  при  $1100^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 3, *b*, полученные значения методической погрешности, вызванной отклонением модели сенсора от идеального монохроматического детектора, используемого для расчетов температуры, не превышают  $\pm 2^\circ\text{C}$  (менее 0.5% от измеряемой величины) во всем рабочем диапазоне измеряемых температур. Таким образом, суммарная относительная погрешность показаний пирометрического сенсора не превышает  $\pm 4^\circ\text{C}$ ,

т.е. составляет  $< 1\%$  в требуемом диапазоне измерения температур торца ОВ.

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты эксперимента по измерению температуры торца ОВ при его нагреве излучением накачки различной мощности при нанесении на торец ОВ поглощающего свет материала. Видно, что температура на торце ОВ изменяется со временем, причины этих изменений требуют дополнительных исследований. Очевидно, что разработанный пирометрический сенсор может служить универсальным инструментом для контроля разрушения и исследования процессов разогрева торца ОВ. Рис. 5 иллюстрирует возможности сенсора регистрировать температуру быстропротекающих процессов на торце ОВ. В этом эксперименте торец ОВ подносился к листу бумаги и при достаточной мощности излучения лазера прожигал в нем отверстие.

## 7. Заключение

Введение в драйвер дополнительного канала обратной связи, несущего информацию о температуре рабочего торца ОВ, придает медицинской лазерной аппаратуре с оптоволоконным выводом новую функциональность, в частности исключает неконтролируемый разогрев оптоволоконного волокна до температур, приводящих к его деформации и разрушению, обеспечивает возможность управления температурой лазерного „скальпеля“ для оптимизации процесса коагуляции биоткани.

Лабораторные испытания драйвера лазерного диода с вводом излучения в оптическое волокно и встроенным пирометрическим сенсором доказали возможность измерения, расчета и передачи данных, соответствующих температуре торца оптоволоконного диаметром 400 мкм в диапазоне  $600\text{--}1100^\circ\text{C}$  с точностью не хуже 1% от измеренного значения при быстродействии не менее 1000 отсчетов в секунду. Анализ сайтов ведущих мировых производителей пирометров показывает, что разработанная система контроля температуры объединяет все последние достижения в области разработки специализированных пирометров, характеризующихся наличием цифрового интерфейса, высокой точностью при малых областях измерения и высоким быстродействием. На сегодняшний день уровень мировых разработок, реализованный в различных пирометрах, можно охарактеризовать следующими количественными характеристиками: быстродействие 1 мс, область измерения от  $1\text{ мм}^2$  при точности  $0.2\% \pm 2^\circ\text{C}$  (для большинства — 1% от диапазона).

Таким образом, характеристики разработанного пирометрического сенсора, предназначенного для интегрирования в драйвер лазерного диода с оптоволоконным выходом, не уступают лучшим мировым образцам пирометров и обеспечивают новые функциональные возможности драйвера — измерение, управление и стабилизацию температуры объекта на торце оптоволоконного,

пользуемого для доставки мощного монохроматического лазерного излучения к объекту. Повышение надежности и функциональности лазерных систем с вводом излучения в оптическое волокно достигаются за счет использования в драйвере иммерсионного фотодиода среднего ИК диапазона PD19Su/Sr в качестве быстродействующего пирометрического сенсора для непрерывного контроля температуры на торце оптоволокна, подключаемого для доставки излучения лазерного модуля к облучаемой площадке или объекту. Высокая спектральная селективность фотодиода, спектр чувствительности которого не перекрывает возможные длины волн излучения лазерных диодов, лежащих в области 800–1000 нм ( $\lambda_{\max} = 1.9$  мкм, ослабление чувствительности в области 0.9 мкм не менее 120 дБ), обеспечивает возможность измерения малых потоков мощности теплового излучения от объекта, нагреваемого излучением лазера, как при импульсном, так и при непрерывном режиме генерации, характеризуемом наличием сильного рассеянного излучения на длине волны генерации лазерного диода.

Публикация подготовлена по материалам доклада на 3-ем симпозиуме „Полупроводниковые лазеры: физика и технологии“, Санкт-Петербург, 13–16 ноября 2012 г. Получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке 2013110620/28(015718) от 07.03.2013 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор № 02.G25.31.0064).

## Список литературы

- [1] G.Yu. Sotnikova, S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, V.V. Zaborodskiy, V.L. Suchanov. Proc. SPIE, **8073**, 80731D-1 (2011).
- [2] S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, G.Yu. Sotnikova. Proc. SPIE, **8073**, 80731A-1 (2011).
- [3] Г.Ю. Сотникова, С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов. В сб.: *Тр. 10-й Междунар. конф. „Прикладная оптика-2012“* (2012) т. 2, с. 8.
- [4] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. Письма ЖТФ, **37** (18), 50 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

## Fiber tip temperature controlling system for fiber output laser modules in medical equipment

S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, G.Yu. Sotnikova, A.L. Ter-Martirosyan\*

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* JSC „ATC-Semiconductor Devices“,  
194156 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The paper presents an optoelectronic fiber tip temperature controlling device embedded in drivers of high power fiber-coupled laser diodes and modules designed for medical laser equipment. The  $A^{III}B^V$  mid-infrared photodiode developed at the Ioffe Physicotechnical Institute was chosen as a sensitive element. Its parameters have been optimized for the creation of various-application thermal radiation detectors (pyrometric sensors). The developed device allows to control the temperature of the working fiber tip of a laser „knife“ in the temperature range 600–1100°C with an accuracy better than 1% at the time of response equal to 1 ms. The device has a digital and analog outputs of the temperature signal that can be used to control the pump laser current, thus extending the functionality of the medical laser equipment in a variety of surgical applications and increasing its efficiency, safety and service life.