

## Средневолновая ИК-пирометрия с использованием фотодиодов на основе InAs и InAsSb (обзор)

Г. Ю. Сотникова, С. А. Александров, Г. А. Гаврилов

*Представлен обзор современного состояния мирового рынка пирометров промышленного назначения. Приводятся технические характеристики макетов специализированных пирометров, разработанных в лабораториях ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и реализованных на отечественной элементной базе фотоприемников.*

*Предложена конструкция универсального пирометрического сенсора на основе неохлаждаемых одно и двухспектральных фотодиодных сэндвич-структур с максимумами спектральной чувствительности в средневолновой (MWIR) области спектра.*

*Отработаны алгоритмы градуировки и калибровки пирометров на исследуемый объект, что позволяет минимизировать методические составляющие погрешности при измерении истинной температуры объекта с неизвестными/изменяющимися значениями излучательной способности.*

*Показано, что пирометры на основе неохлаждаемых иммерсионных InAs и InAsSb фотодиодов по совокупности параметров быстродействие, точность, чувствительность и диапазон измерения температуры соответствуют лучшим образцам ИК-радиационных термометров, представленных на мировом рынке.*

*Ключевые слова:* пирометрия, ИК-термометр, средневолновой (MWIR) инфракрасный диапазон спектра, фотодиоды на основе InAs и InAsSb гетероструктур, иммерсионный фотодиод, сэндвич-структура, излучательная способность, алгоритмы градуировки и калибровки, двухспектральный пирометр.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403

### 1. Введение

Развитие различных отраслей промышленности, науки и техники неразрывно связано с разработкой новых методов исследования теплофизических свойств различных материалов и контроля технологических процессов, базирующихся на методах бесконтактного измерения температуры (пирометрии).

В настоящем обзоре проведена оценка современного состояния рынка пирометров, перспективы его развития и место отечественной элементной базы ИК-фотоприемников в этой области.

Основное внимание уделено пирометрическим сенсорам на основе ФД среднего ИК-диа-

пазона, и не только потому, что в ФТИ исторически сложилась одна из сильнейших научных школ по физике полупроводников и имеется соответствующая технологическая база, но и потому, что, с нашей точки зрения, именно фотодиодные структуры среднего ИК-диапазона являются наиболее перспективными, открывающими возможность существенного улучшения технических параметров пирометров.

Использование неохлаждаемых иммерсионных фотодиодов на основе InAs и InAsSb гетероструктур открывает новые измерительные возможности пирометрии, связанные с:

- широким диапазоном измерений, включая область низких температур;
- высоким быстродействием;
- устойчивостью к фоновому излучению в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра;
- созданием специализированных пирометров, в том числе многоволновых, обеспечивающих стабильность и точность измерений истинной температуры в условиях неопределенности оптических свойств объекта.

Сотникова Галина Юрьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Александров Сергей Евгеньевич, н.с.

Гаврилов Геннадий Андреевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: gga\_holo@mail.ru

ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Статья поступила в редакцию 05 августа 2022 г.

© Сотникова Г. Ю., Александров С. Е., Гаврилов Г. А., 2022

## 2. Анализ рынка пирометров

Современный мировой рынок пирометров оценивается более чем в 0,5 миллиарда долларов и показывает тенденцию устойчивого развития при совокупном среднегодовом темпе роста около 5–6 % в год (рис. 1). Это связано, в первую очередь с принятой в 2011 году концепцией 4-й промышленной революции (Индустрия 4), которая в качестве основных путей развития производства предполагает полную автоматизацию промышленности и повышение экологической безопасности производства. Это вызвало повышенный спрос на специализированные пирометры для контроля технологических процессов не только в доминирующем рынке металлообработки, но и в таких бурно развивающихся отраслях как стекольная и керамическая промышленность. Пирометрия все более широко применяется в таких специализированных областях как измерение температуры пламени или

газа путем контроля линии поглощения  $\text{CO}_2$ , измерение температуры тонких полимерных пленок, кремниевых и сапфировых пластин в полупроводниковых технологических процессах. Это стало возможным в первую очередь, благодаря развитию методов спектральной пирометрии, позволяющей выбирать оптимальные спектральные области детектирования теплового излучения объекта для требуемых температурных интервалов и конкретных материалов. Чтобы измерять температуры в специализированных приложениях, необходимы достоверные знания о коэффициентах излучения, отражения и пропускания объектов, подлежащих измерению и выбрать правильные детекторы и фильтры, чтобы максимизировать обнаруженный сигнал. На рис. 2 приведены типичные спектральные диапазоны работы пирометров, выпускаемых мировым лидером в производстве специализированных пирометров для промышленного применения Advanced Energy Industries (США) [1].

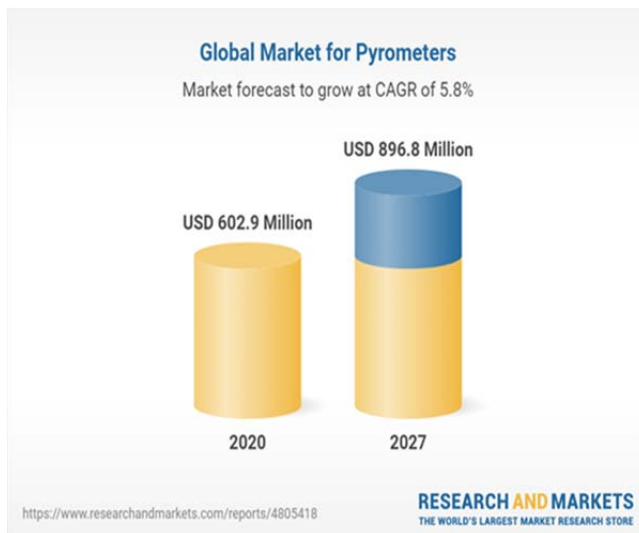


Рис. 1. Объем и тенденции мирового рынка пирометров

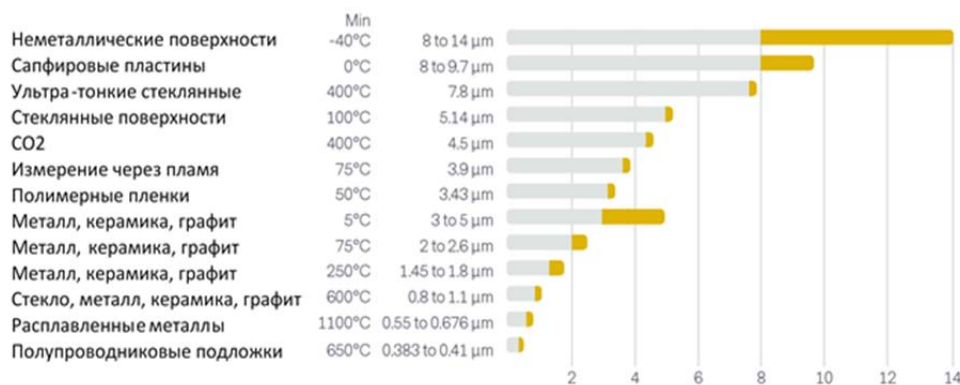


Рис. 2. Типичные спектральные диапазоны, используемые в пирометрии, для измерений температуры материалов с разным нижним порогом измерения (по данным *advancedenergy.com*)

Из диаграммы рис. 2, видно, что даже для одних и тех же материалов (металл, керамика, графит) для измерений в различных температурных диапа-

зонах используются различные спектральные области. Это связано с сильной зависимостью излучательной способности материалов как от спек-

тральной области, так и от температуры [1, 2]. Таким образом, правильный выбор спектрального диапазона измерений является одной из важнейших задач как при разработке специализированных пирометров, так и при выборе того или иного типа пирометра для решения конкретной практической задачи.

Анализируя технические параметры последних моделей пирометров промышленного назначения, отражающие достижения крупнейших транснациональных компаний Advanced Energy Industries и Fluke Process Instruments, выпускающих продукцию под такими известными торговыми марками как Raytec, Irgon, Micron, Thermalert [1, 3, 4]), можно сформулировать технические характеристики «лучшего в мире» промышленного пирометра: поле зрения 100:1, быстродействие 10–100 мс, точность измерений  $\pm 1\%$  от показания (или  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для температур выше  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 2\%$  от показания (или  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для температур ниже  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом заявляемый производителем широкий диапазон измерений температуры (например, для моделей, Raytek Marathon, Irgon Modline 7 это  $-40\text{--}2250\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]) достигается не в одном устройстве, а в нескольких моделях указанной серии, реализованных на детекторах различного спектрального диапазона. Низкотемпературный диапазон ( $-40\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обычно реализуется с использованием широкополосных длинноволновых ИК-детекторов (LWIR)  $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$  при временном разрешении 120 мс [3], для высокотемпературных измерений ( $500\text{--}2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) типичным является использование узкополосных детекторов (широкополосных фо-

тодетекторов со спектральными фильтрами) в области ближнего ИК (NIR) (спектральные линии измерения  $1\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1,6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1,58\text{--}2,2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1,58\text{--}1,8\text{ }\mu\text{m}$  [1, 3]) при временном разрешении порядка 20 мс. Использование детекторов средневолнового ИК-диапазон (MWIR) позволяет создавать пирометры с наиболее широким диапазоном измерения (например, для Thermalert 4.0 серии MT заявлен диапазон  $250\text{--}2250\text{ }^{\circ}\text{C}$  при работе в спектральной области  $3,9\text{ }\mu\text{m}$  [4]). Наибольшее быстродействие температурных измерений обеспечивают пирометры серии IMPAC HIGH SPEED IGA&IMGA740 заявленные как «сверхбыстродействующие» при временном разрешении 9 мкс и точность измерений  $\pm 0,75\%$  от показаний [1].

Новые практические задачи, в свою очередь, активизировали и научные исследования в области методов пирометрии, что проявилось в резком росте публикационной активности в начале 2000-х гг. (рис. 3 по данным библиографической базы данных рецензируемой научной литературы Scopus). Исследования направлены на повышение быстродействия, точности и надежности измерений, главным образом, за счет использования многоспектральных методов пирометрии. Ведущая роль в этих исследованиях, как и в производстве пирометров, принадлежит США. Однако, несмотря на практически полное отсутствие российских компаний среди производителей пирометрической аппаратуры, в области научной документации (статьи, патенты) Россия занимает 5 место после Китая, Франции и Германии.

Scopus, [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

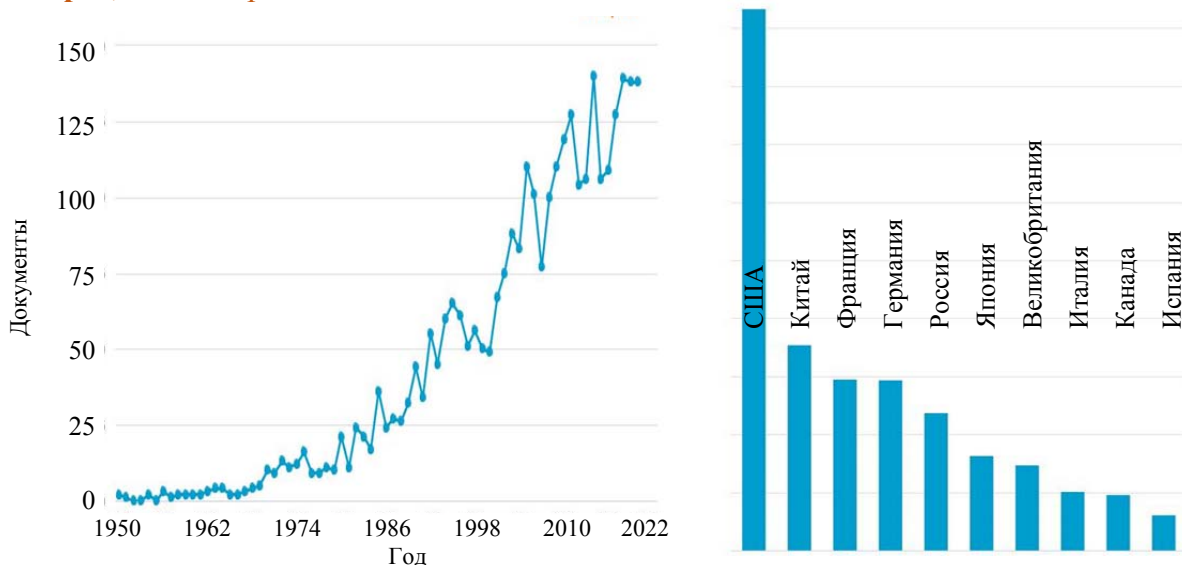


Рис. 3. Публикационная активность по годам и странам в области пирометрических измерений (по материалам базы данных Scopus, [www.scopus.com](http://www.scopus.com))

Направленность исследований показывает [3], что сегмент многоволновых пирометров будет занимать все большую долю рынка пирометров, что обусловлено широкими перспективами их применения в металлообрабатывающей промышленности, где излучательная способность поверхности металлов определяется множеством факторов и в подавляющем случае является неизвестной/меняющейся величиной в процессе измерений.

К настоящему времени на мировом рынке присутствуют только единичные предложения двухспектральных (two-color) пирометров (см., например, оптоволоконный пирометр IGAR 12-LO и Thermalert 4.0 серии E1RH [4]), реализованные в NIR спектральной области измерений с использованием узкополосных оптических фильтров. Это накладывает дополнительные ограничения на нижний порог детектирования температуры и/или быстроедействие и минимальный размер измеряемой области, а также не позволяет проводить достоверные измерения температуры объектов в условиях сильных засветок в области видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра.

### 3. Пирометр как измерительное устройство. Обоснование выбора чувствительного элемента

Пирометрия является частным случаем широкой области теории и практики измерений – фотометрии, связанной с количественной оценкой энергетических характеристик поля излучения. Основной проблемой таких измерений является необходимость обеспечить требуемую чувствительность детектора в выбранном спектральном диапазоне измерения при требуемом быстродействии и заданной эффективности оптической схемы доставки излучения. Необходимым условием создания радиационного измерительного устройства является грамотная оценка влияния мешающих факторов и/или факторов неопределенности на погрешность расчета температуры по данным измерения мощности излучения, падающего на фотодетектор. Связанная с этим методическая погрешность измерения температуры пирометром может в десятки раз превышать заявляемую производителем инструментальную погрешность, полученную при его сертификации на модели абсолютно черного тела (АЧТ) с излучательной способностью близкой к единице [6].

Основным элементом пирометра, определяющим (и ограничивающим!) его потенциальные возможности, является чувствительный элемент – детектор (рис. 4). В совокупности с электронными схемами детектирования, усиления и преобразования падающей мощности анализируемого тепло-

вого излучения в измеряемый электрический сигнал тока или напряжения он образует «Пирометрический сенсор». Иногда понятие «Пирометрический сенсор» может включать и оптическую схему, сопряженную непосредственно с чувствительным элементом или внешнюю схему, формирующую требуемый размер области измерений на заданном расстоянии до объекта. Но только в совокупности с алгоритмами градуировки, калибровки и расчета температуры по выходному сигналу пирометрического сенсора можно говорить о пирометре, как об «устройстве измерения» и рассматривать его метрологические характеристики. Основными техническими характеристиками пирометров являются: быстродействие, спектральный диапазон измерения, оптическое разрешение (коэффициент визирования), параметры выходного сигнала (токовый выход, вольтовый выход, в аналоговом или цифровом виде). К метрологическим характеристикам относятся: диапазон измерений температуры, чувствительность и неопределенность измерений. Значения этих параметров, характерные для современных пирометров промышленного назначения, мы рассмотрели в предыдущем разделе. Наибольшие вопросы вызывает указываемая производителем (причем, далеко не всегда!) погрешность или, в современной терминологии, неопределенность измерений, связанная с косвенным характером температурных измерений, основанных на законах излучения нагретых тел [5, 7].

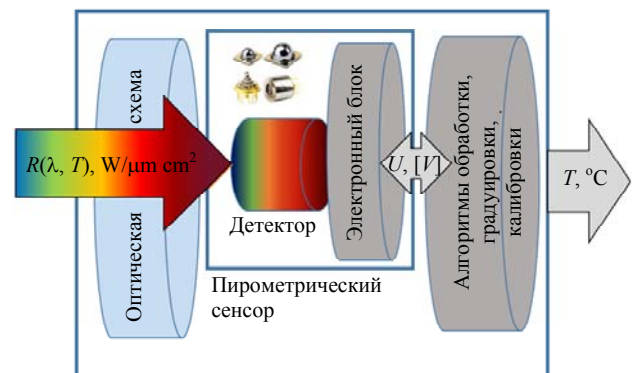


Рис. 4. Функциональная схема пирометра как измерительного устройства

Связь выходного сигнала пирометра (измеряемая величина тока или напряжения) с температурой объекта описывается его передаточной характеристикой [7], основанной на том или ином законе излучения, сформулированного для АЧТ. Только для монохроматического (квазимонохроматического) детектора передаточная характеристика пирометра может быть записана в виде непрерывной функции с использованием закона Планка для плотности мощности теплового излу-

чения  $R(\lambda, T)$  на заданной длине волне и «параметров пирометра»  $I(t_0)$  и  $A(\lambda, T, t_0)$ , определяемых температурой окружающей среды,  $t_0$ , токовой/вольтовой чувствительностью фотодетектора  $S_I(\lambda, t_0)$ , А/Вт ( $S_u(\lambda, t_0)$ , В/Вт), площадью измеряемого участка на объекте,  $B$ , см<sup>2</sup>, коэффициентов передачи оптической ( $k_{opt}(\lambda)$ ) и электрической ( $k_{el}(t_0)$ ) схем пирометра, а также излучательной способности объекта,  $\varepsilon(\lambda, T)$ :

$$\begin{aligned} I_{out}(\lambda, T, t_0) &= F(\lambda, T) = \\ &= A(\lambda, T, t_0) \times R(\lambda, T) + I_0(t_0), \\ \text{где } A(\lambda, T, t_0) &= S_I(\lambda, t_0) \times \varepsilon(\lambda, T) \times \\ &\times k_{opt}(\lambda) \times k_{el}(t_0) \times B. \end{aligned} \quad (1)$$

Как видно из выражения (1), величина выходного сигнала пирометра будет определяться не только изменением мощности теплового излучения объекта, связанным с изменением его истинной температуры,  $T$ , но и от ряда других «мешающих» факторов, связанных как с изменением температуры окружающей среды,  $t_0$ , так и неизвестных/меняющихся излучательных свойств объекта. Оценить величину погрешности измерения температуры в предположении  $t_0 = \text{const}$  можно путем нахождения полного дифференциала его передаточной функции, что для случая монохроматических измерений и выполнения условий приближения Вина для  $R(\lambda, T)$  приводит к следующим выражениям:

$$\frac{dI_{out}}{I_{out}} = \frac{dA}{A} + \frac{C_2}{\lambda \times T} \times \frac{dT}{T}, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{\lambda \times T}{C_2} \times \left( \frac{dA}{A} + \frac{dI_{out}}{I_{out}} \right) \quad (3)$$

где  $C_2$  – вторая постоянная Планка;  $A$  – параметр пирометра, определяемый условиями измерений (см. выражение (1));  $\lambda$  – длина волны спектральной линии измерений пирометра.

При градуировке пирометров производителем определяется только второе слагаемое в выражении для относительной погрешности измерения температуры (3), которое представляет собой «инструментальную» погрешность прибора и ограничено только чувствительностью (собственными шумами) фотодетектора при выбранной электрической схеме детектирования сигнала фотоприемника и заданном быстродействии. Хорошими для современных пирометров считаются значения относительной погрешности на уровне  $\pm 1\%$  от показания (или  $\pm 1,0^\circ\text{C}$ ) при быстродействии доли се-

кунды и коэффициенте визирования оптической схемы 100:1 при измерении температур выше  $350^\circ\text{C}$  [1, 3, 4]. При более низких температурах точность измерений снижается. Таким образом, погрешность измерений температуры, соответствующая «инструментальной, то есть заявляемой производителем, может быть обеспечена только в случае, когда первым слагаемым в выражении (3) можно пренебречь, что может быть обеспечено только при условии  $dA/A \approx d\varepsilon/\varepsilon < 0,01$ .

Перспективы повышения достоверности и точности пирометрических измерений температуры связаны с разработкой так называемых «умных сенсоров» (smart sensors) которые предполагают возможность их градуировки и периодической калибровки непосредственно на рабочем месте [1, 8–10]. Такой подход успешно зарекомендовал себя в разработанном нами ранее пирометре для контроля температуры подложек в ростовом модуле молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), где использовался кремниевый фотоприемник с интерференционным фильтром ( $\Delta\lambda \approx 50$  нм) [11]. Использование узкополосного фильтра с максимумом пропускания на спектральной линии  $\lambda_m$  позволяет описать передаточную функцию пирометра аналитическим выражением в виде (1) с использованием экспоненциальной функции Вина и параметрами  $I(t_0)$ ,  $\lambda_m$ , и  $A(\lambda_m, T, t_0)$ , определяемыми при градуировке – построение экспериментальной зависимости выходного сигнала пирометра от температуры произвольного объекта (включая модель АЧТ), контролируемой эталонной термопарой. Обычно такая градуировка осуществляется при медленном нагреве и стабилизации температуры объекта в виде модели АЧТ в муфельной печи. Последующая «привязка» показаний пирометра к исследуемому объекту и текущим условиям измерений (изменение расстояния до подложки, запыление смотрового окна установки МПЭ и т. п.) возможно путем «калибровки» коэффициента  $A(\lambda_m, T, t_0)$  в передаточной функции пирометра по одной температурной точке, контролируемой косвенным методом (например, привязке показаний прибора к фиксированной температуре сгона окисла, регистрируемого по дифракции электронов [11, 12]).

Одним из наиболее перспективных решений для повышения точности пирометрических измерений температуры объектов с неизвестными/меняющимися излучательными свойствами является использование метода спектрального отношения. В этом случае значение температуры находится из отношения сигналов в двух близких спектральных каналах, где ожидаемые изменения величины излучательной способности можно считать одинаковыми. Примером такого решения является стацио-

нарный пирометр серии Impac IGAR 6 Smart ([1], производитель Advanced Energy), предназначенный для измерения температуры различных поверхностей в диапазоне температур от 100 до 2250 °С. Он может работать в одноцветном режиме (от 100 до 2000 °С), в двухцветном режиме (от 250 до 2000 °С) или в специальном «интеллектуальном режиме». В двухцветном режиме (метод отношения) для определения температуры используются две смежные спектральные линии (длины волн): 1,5–1,6 мкм и 2,0–2,5 мкм. В «интеллектуальном режиме» измерения от 100 до 250 °С проводятся в одноцветном режиме, а в диапазоне от 250 до 280 °С происходит непрерывный автоматический переход из одноцветного в двухцветный режим. При таком подходе измерение температуры в значительной степени не зависит от излучательной способности объекта и в широком диапазоне не зависит от пыли и других загрязняющих веществ на пути прохождения теплового излучения от исследуемого объекта.

Выбор спектрального диапазона измерений пирометра важен не только с точки зрения обеспечения требуемой чувствительности пирометра в заданном температурном интервале, но и пропускания «смотровых окон» технологических установок, наличия поглощающей среды на пути теплового сигнала, наличие специфических засветок (например, при лазерной обработке материалов), свойства оптических, в том числе волоконнооптических элементов, имеющих хорошее пропускание в выбранном спектральном интервале. Отсутствие необходимости громоздких и энергозатратных систем охлаждения ИК-детекторов, а также электрические характеристики чувствительного элемента и схем его электронного обрамления также играют важную роль при выборе чувствительного элемента пирометра.

Рисунок 5 позволяет наглядно оценить потенциальные возможности пирометров, выполненных на различной элементной базе ИК-фотоприемников, доступных в настоящее время. На рисунке представлены теоретические зависимости удельной спектральной плотности излучения с 1 см<sup>2</sup> поверхности АЧТ, имеющего температуру от –100 до 3000 °С. Области, ограниченные серыми прямоугольниками соответствуют спектральным областям NIR, MWIR и LWIR, в соответствии с терминологией, принятой для ИК-фотодетекторов. Красные линии со стрелками соответствуют значениям пороговой детектируемой мощности (обратно пропорциональна величине детектирующей способности  $D^*$ ) для неохлаждаемых фотоприемников в указанных спектральных областях (по данным Hamamatsu, [13]). Голубым цветом выделен допустимый диапазон изменения входного сигнала (теплового излучения), который может

быть оцифрован с помощью 16-разрядного АЦП (диапазон преобразования 6,55 Е4).

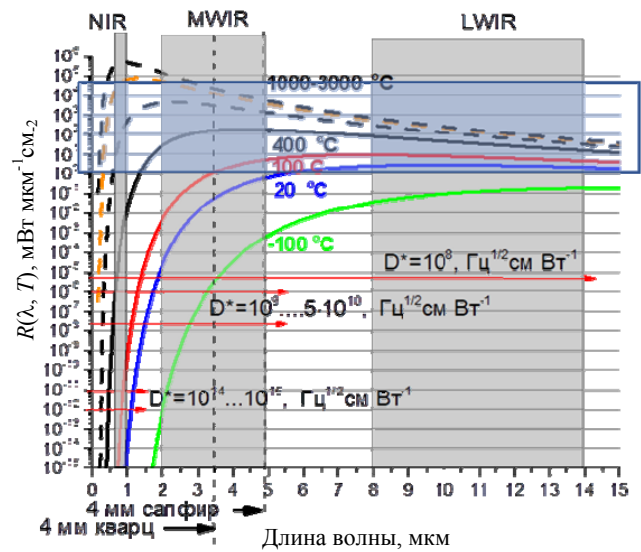


Рис. 5. Удельная спектральная плотность мощности излучения АЧТ,  $R(\lambda, T)$ , для различной температуры АЧТ, типичные значения детектирующей способности ( $D^*$ ) фотодетекторов различной спектральной чувствительности и область значений регистрируемой мощности, попадающая в динамический диапазон 16-разрядного АЦП

Рынок ИК-детекторов является одним из наиболее быстро развивающихся (ожидаемый ежегодный прирост почти 9%), что связано с их востребованностью для линий оптической связи и оптических сенсоров различного назначения. До последнего времени более половины рынка было занято длинноволновыми (LWIR) ИК-детекторами, что обусловлено широким спектром их применения, в том числе и в пирометрии, так как позволяет детектировать низкие температуры (включая отрицательные). При этом относительно низкая детектирующая способность ( $D^*$ , Вт<sup>-1</sup> Гц<sup>1/2</sup>/см) неохлаждаемых ИК-детекторов в этой области компенсируется широким спектральным диапазоном измерения. В то же время высокая чувствительность, быстродействие и широкая доступность (низкая цена) неохлаждаемых детекторов в области ближнего ИК (NIR) позволяет создавать быстродействующие пирометры с высоким оптическим разрешением, однако, нижний предел измерения температуры ограничен сотнями градусов Цельсия. Кроме того, наличие большого числа неконтролируемых засветок в видимой области спектра существенно ограничивает область специальных применений таких пирометров.

Из рис. 5 хорошо видно, что спектральный диапазон среднего ИК (MWIR) объединяет в себе преимущества ближнего и дальнего ИК-диапазонов спектра. При этом существующий уже сейчас широкий «спектральный ряд» неохлаждаемых

детекторов, в первую очередь – неохлаждаемых ФД на основе InAs и InAsSb [13–16] – позволяет разрабатывать специализированные пирометры, объединяющие широкий диапазон измерений температуры, высокую чувствительность и быстродействие. Кроме того, они обеспечивают возможность дистанционного измерения температуры объектов в сложных условиях высоких засветок в видимой области (важно для применений в лазерных технологиях и при использовании лазерных термоволновых методик исследования свойств материалов) и технологическую возможность создания многоволновых детекторов. Использование MWIR-диапазона для реализации двухцветных пирометров (пирометров отношения) также можно считать более предпочтительным, чем в NIR области спектра, так как позволяет использовать более широкополосные фильтры для выделения независимых, но близко расположенных спектральных каналов, при соблюдении условия квазимонохроматичности измерений ( $\Delta\lambda/\lambda \leq 0,1$ ), при которых возможно аналитическое описание функции преобразования пирометра с достаточной точностью (в пределах 1 %, [11]).

Вместе с тем, высокая цена и инвестиционные затраты до настоящего времени сдерживали темпы роста MWIR сегмента рынка ИК-детекторов, однако в последние годы ситуация существенно изменилась. В настоящее время рынок MWIR фотодетекторов переживает переломный момент: наблюдается значительный прогресс в разработке новых фотодетекторов на основе материалов III-V с меньшими затратами и более высокой чувствительностью [16–18]. Мировой рынок MWIR сенсоров в 2019 оценивался в US\$ 9.8Bn, а в настоящее время прогнозируемый среднегодовой рост (CAGR) показывает рекордную цифру в 35,7 % и предполагает достигнуть объема в US\$ 112.4 Bn к 2027 [14, 16]. Ряд лидеров рынка недавно обнародовали инвестиционные проекты, что также свидетельствует о высокой востребованности элементной базы в диапазоне среднего ИК-спектра в таких важных областях как медицинские сенсоры, датчики контроля качества воздуха, экология, датчики движения и т. п.

#### 4. Фотодиоды MWIR диапазона спектра в качестве чувствительного элемента пирометров

Средневолновый инфракрасный диапазон – это область спектра, в которой создается большая часть фундаментальной информации, о чем свидетельствует и наблюдаемый рост публикационной активности. Лидирующая позиция по числу публикаций и патентов принадлежит США, однако,

Россия не сильно уступает другим ведущим игрокам – Германии, Франции и Великобритании, немного опережая Китай [по данным библиографической базы данных рецензируемой научной литературы Scopus].

Одним из немногих предприятий, выпускающих широкую номенклатуру MWIR фотодиодов в России является малое инновационное предприятие ООО «ИюффеЛЕД» (Санкт-Петербург, Россия, [15]). Высокие характеристики быстродействия (десятки нс) и детектирующей способности  $D^* \approx 10^9\text{--}10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ Гц}^{1/2} \text{ см}$  иммерсионных фотодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов InAs и InAsSb, выпускаемых ООО «ИюффеЛЕД», не уступают по своим значениям продукции лидеров рынка Hamamatsu Photonics (Япония), FLIR Systems (США) и Lynred (Франция), что в совокупности с отсутствием необходимости охлаждения, делают их весьма привлекательными для решения задач пирометрии. Основным сдерживающим фактором внедрения MWIR фотодиодов в приборостроение можно считать низкое темновое сопротивление структур на основе широкозонных полупроводников (на 3–5 порядков ниже, чем для ФД ближнего ИК-диапазона), что существенно повышает порог детектирования фотоприемника за счет значительных тепловых шумов и накладывает существенные ограничения на электронные компоненты, используемые в схемах детектирования тока в MWIR фотодиодных сенсорах. Исследования в этой области направлены как на совершенствование электронной элементной базы схем детектирования фототока низкоомных ФД, так и на поиск оптимальных режимов включения и алгоритмов обработки сигнала ФД для конкретных измерительных задач [17, 19, 20].

Кроме отмеченных выше преимуществ и проблем, общих для всех производителей MWIR фотоприемников, фотодиоды ООО «ИюффеЛЕД» [15] обладают рядом дополнительных конкурентных преимуществ, важных для применения в пирометрических сенсорах.

- Флип-чип дизайн фотодиодов обеспечивает их относительную спектральную узкополосность ( $\Delta\lambda/\lambda \sim 0,1$ ), что позволяет использовать квазимонохроматическую модель передаточной характеристики пирометра в виде (1). Расчеты показывают, что отличие передаточной характеристики рассматриваемых диодных сенсоров от идеальной монохроматической зависимости лежит в пределах 0,1–1 % и приводит к незначительной дополнительной погрешности ( $\Delta T/T$ ) не превышающей 0,1 % от измеряемой величины для температур выше 0 °С.

- Отработана технология создания двухволновых InAs/InAsSb фотодиодных структур.

• Оптическое сопряжение чипа с кремниевой линзой (полусфера) с помощью халькогенидного стекла с высоким показателем преломления обеспечивает 10-и кратное увеличение детектирующей способности по сравнению с фотодиодами без иммерсии и подавление засветок в области NIR до 120 дБ [21].

На рис. 6 приведены спектральные характеристики фотодиодов, выпускаемых ООО «ИоффеЛЕД», чувствительных в различных областях MWIR спектра и образца сдвоенной фотодиодной сэндвич-структуры с максимумами чувствительности в области 3 и 4 мкм, разработанного специально для двухспектрального пирометрического сенсора.

Одиночные и сдвоенные фотодиоды для пирометрических сенсоров монтируются в корпусе

ТО8 с встроенным термоэлементом Пельтье с откачкой и сапфировым окном для ввода теплового излучения (рис. 6в). Это позволяет стабилизировать температуру чувствительного элемента на произвольном заданном уровне с точностью до 0,1 °С и обеспечить стабильность токовой/вольтовой чувствительности  $S_I(\lambda, t_0)$ , А/Вт ( $S_U(\lambda, t_0)$ , В/Вт) и темнового тока фотоприемника, необходимую для достижения высокой точности измерения температуры.

В таблице 1 приведены основные характеристики иммерсионных MWIR фотодиодов ООО «ИоффеЛЕД» [15] с диаметром чувствительной области (Si-линзы), необходимые для оценки потенциальных параметров цветковых пирометров, построенных на их основе.

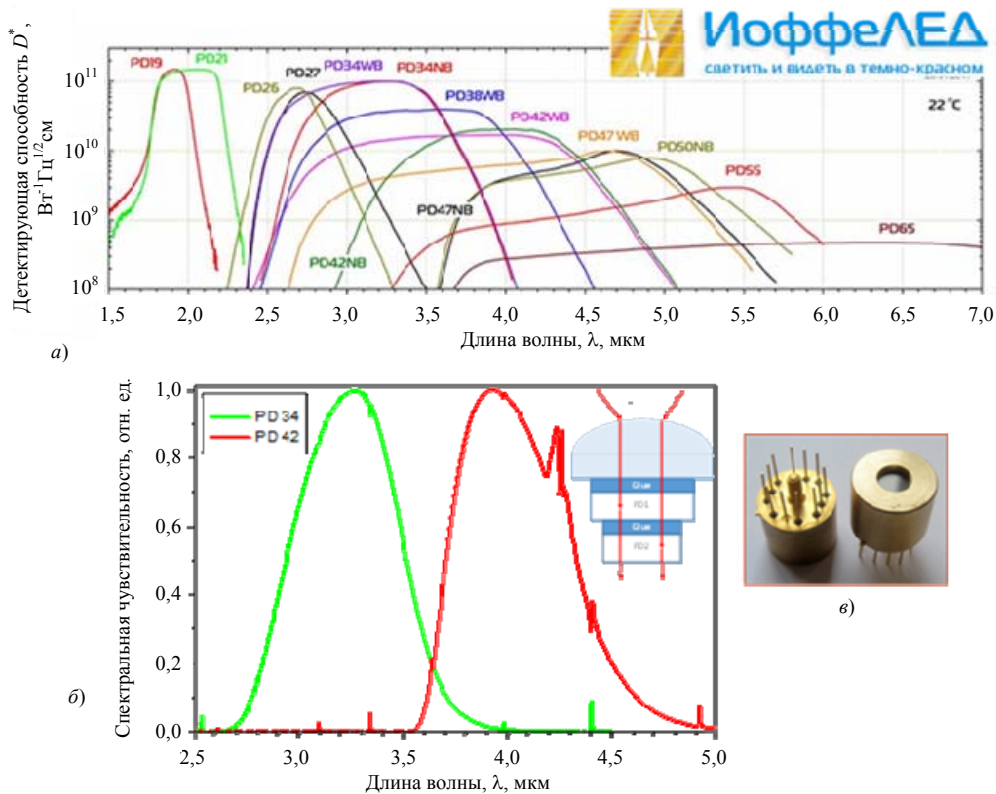


Рис. 6. Спектральные характеристики MWIR фотодиодов, выпускаемых ООО «ИоффеЛЕД» (а) и образца сдвоенного фотодиода на 3 и 4 мкм (б), разработанного специально для двухспектрального пирометрического сенсора. Фотография корпуса ТО8 с встроенным термоэлектрическим охладителем (элемент Пельтье) для стабилизации характеристик ФД (в)

Таблица 1

Основные характеристики MWIR фотодиодов, выпускаемых ООО «ИоффеЛЕД»

Тип ФД	Токовая/вольтовая чувствительность $S_I, S_U$ , А Вт <sup>-1</sup> / Sv, В Вт <sup>-1</sup>	Детектирующая способность $D^*$ , 20 °С Вт <sup>-1</sup> Гц <sup>1/2</sup> см	Область спектральной чувствительности (по уровню 0,5) $\lambda_{max} \pm \Delta\lambda$ , мкм	Спектральная плотность шума ФД $i_n, e_n$ , пА Гц <sup>-1/2</sup> / нВ Гц <sup>-1/2</sup>
PD29Sr	0,5/ 500	$2 \times 10^{10}$	$2,9 \pm 0,15$	$7,5 \text{ пА Гц}^{-1/2} / 4,5 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$
PD34Sr	1/ 1500	$1 \times 10^{11}$	$3,4 \pm 0,2$	$3 \text{ пА Гц}^{-1/2} / 4,5 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$
PD42Sr	1/ 90	$1 \times 10^{10}$	$4,15 \pm 0,22$	$30 \text{ пА Гц}^{-1/2} / 2,7 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$
PD47Sr	1,5/ 10	$2 \times 10^9$	$4,65 \pm 0,25$	$225 \text{ пА Гц}^{-1/2} / 1,5 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$



Пороговая чувствительность пирометрического сенсора определяется суммой шумовых характеристик фотоприемника (ФД) и первого каскада преобразования/усиления его тока. Очевидно, что при низких значениях темнового сопротивления ФД, вклад шумовой составляющей операционных усилителей, может стать определяющим. Минимальные значения спектральной плотности вольтовых шумов, достигнутые на настоящий момент для прецизионных малошумящих операционных усилителей, составляют около  $1 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$ , что проявляется в дополнительном токовом шуме на уровне единиц  $\text{пА Гц}^{-1/2}$  для ФД с сопротивлением менее  $1 \text{ кОм}$  и для ФД с темновым сопротивлением менее  $100 \text{ Ом}$  шум ОУ становится определяющим. Учитывая приведенные в последнем столбце таблицы эквивалентные значения собственных шумов MWIR ФД, необходимо иметь в виду, что шумы предусилителя могут вносить заметный вклад в пороговую чувствительность пирометрического сенсора. Подробный анализ влияния шумов ОУ на предельную чувствительность средневолновых ФД приведен в работах [19, 20].

### 5. Универсальный пирометрический сенсор

В результате совместной работы специалистов в области оптоэлектроники, теории и технологии полупроводниковых гетероструктур, была разработана универсальная конструкция пирометрического сенсора на основе неохлаждаемых иммерсионных ФД типа PD34Sr, PD42Sr, PD47Sr и двухспектрального ФД типа PD34/4.2Sr которая была использована в качестве базового элемента специализированных пирометров различного назначения. Сенсор включает предварительный усилитель с коэффициентом преобразования  $K = 10^4 \text{ В А}^{-1}$ , выполненный по схеме трансимпедансного преобразователя тока в напряжение на базе прецизионного малошумящего ОУ AD797 (сдвоенный усилитель ADA 4895 для двухспектрального сенсора) с уровнем собственных шумов  $1 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$ . Микросхема ОУ устанавливается на элементе Пельтье в корпусе ТО8 в непосредственной близости с ФД структурой, что обеспечивает температурную стабильность не только чувствительности ФД, но и параметров усилителя, что позволяет обеспечить высокую точность температурных измерений в соответствии с (3). Корпус ФД с предусилителем закрыт сапфировым окном для ввода теплового излучения. Он устанавливается на внешнюю электронную плату, обеспечивающую дополнительное усиление (при необходимости), частотную фильтрацию и управление термоэлементом. Температура стабилизации ФД и ОУ (обычно, около  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  для минимального энер-

гопотребления) задается микропроцессором и поддерживается с точностью  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , что обеспечивает стабильность передаточной характеристики пирометрического сенсора в диапазоне температур окружающей среды от  $-25$  до  $+65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для удобства настройки пирометров, реализованных на основе данного сенсора в нем предусмотрен оптический визир. Визир выполненный в виде кольца из 6 ярких светодиодов, установленных в плоскости «водного зрачка» сенсора, то есть непосредственно в корпусе ФД вокруг кремниевой линзы (полусфера, диаметр  $3,2 \text{ мм}$ ), сопряженной через иммерсионный слой с фоточувствительной структурой (мезой, диаметром  $300 \text{ мкм}$ ). Такая конструкция визира позволяет не только наводить пирометры на требуемый участок объекта измерения, но и визуализировать истинные размеры измеряемого участка, определяемые различными внешними оптическими схемами.

На рис. 7 приведена фотография пирометрического сенсора где на вставке показан пример монтажа ФД структуры с иммерсионной линзой и схемы предварительного усилителя на термохолодильнике внутри корпуса ФД.



Рис. 7. Внешний вид пирометрического сенсора (а) и встроенного в корпус ФД оптического визира в режиме выкл./вкл. и в плоскости фокусировки на объект в оптических схемах с линзовым или зеркальным объективами

Управление включением/выключением питания визира (источник питания помещен на внешней электронной плате) осуществляется либо механически (кнопка, тумблер), либо от компьютера. Управление от компьютера предусмотрено во всех макетах пирометров, рассмотренных ниже, и обеспечивается дополнительной платой оцифровки и обмена данными с удаленным компьютером.

Оригинальные методические, схемотехнические и конструктивные решения фотодиодного пирометрического сенсора, обеспечивающие стабильность и воспроизводимость температурных измерений, защищены патентами на изобретения [22, 23].

Относительна узкополосность рассматриваемых SWIR фотодиодов (см. данные в табл. 1) позволяет использовать квазимонохроматическую модель передаточной функции (выражение (1)) для пирометров, выполненных на их основе. Такой подход позволяет осуществлять привязку пе-





редаточной функции пирометра (калибровку) к характеристикам исследуемого объекта и текущим условиям измерений. Он был использован нами ранее в пирометре для ростовой установки МПЭ, выполненном на кремниевом фотодиоде с интерференционным фильтром с  $\Delta\lambda = 50$  нм [11, 12].

Универсальная конструкция MWIR пирометрического сенсора и отработанные методики градуировки и калибровки пирометров на одну температурную точку в совокупности с различными

оптическими схемами ввода излучения (зеркала, линзы, оптоволокно) позволили реализовать ряд уникальных измерительных систем для контроля динамики изменения температуры с высоким быстродействием в экспериментальных научно-исследовательских и технологических установках различного назначения. Примеры практической реализации макетов таких пирометров, разработанных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе сведены в таблице 2.

Таблица 2

Макеты пирометров, разработанные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН

Тип пирометра	Фотоприемник/ Спектральные линии измерения/быстродействие/выходной сигнал	Диапазон измерения температуры/ погрешность измерений	Оптическая схема/ оптическое разрешение	Назначение
Пирометр для ростовых установок МПЭ 	кремниевый ФД с интерференционными фильтрами: 950±25 нм / 880±25 нм 100 мс цифровой индикатор, RS485 интерфейс	450–1200 °С ±0,25 % от отсчета (или 1 °С)	Кварцевое оптоволокно (диаметр 200 мкм, длина 6 метров)  150:1	Контроль температуры подложки (GaAs, InP, Si, сапфир с нанесенным слоем металла) в условиях эпитаксиального роста лазерных гетероструктур методом МПЭ на установке ЭП1203 [11, 12]
Одноканальный прецизионный 	ФД типа PD4.2Sg 4,2±0,25 мкм  2 мс  Аналоговый выход	20–1000 °С  50 мК при ≥ 20 °С 5 мК при ≥ 100 °С ≤ 2мК при > 200 °С	Сапфировая линза, диаметр 25 мм  100:1	Контроль динамики температурного отклика образцов при исследовании теплофизических свойств материалов методом лазерного термоволнового воздействия [29–32]
Оптоволоконный двухспектральный 	PD34/4.2Sg двухспектральная сэндвич-структура (3,3±0,2)мкм/ (4,1±0,25)мкм ~30 мкс 2 аналоговых выхода	80–300 °С ±1 % от отсчета (или 2 °С)	Халькогенидное (PIR, диаметр 600 мкм) или сапфировое (диаметр 450 мкм) оптоволокно Диаметр области измерений – от 450 мкм	Контроль технологического процесса и исследования материалов для печатной электроники (ink-jet технологии) [24]
Сверхбыстрый двухспектральный 	PD34/4.2Sg двухспектральная сэндвич-структура (3,3±0,2)мкм/ (4,1±0,25)мкм до 1 мкс 2 аналоговых выхода	100–3000 °С ± 0,5 % от отсчета (или 2 °С)	Зеркальный объектив (схема Кассегрена) Диаметр главного зеркала 60 мм  100:1	Контроль температуры элементов конструкции термоядерных установок непосредственно в процессе плазменного разряда [28]

## 6. Примеры практической реализации макетов пирометров на основе неохлаждаемых иммерсионных MWIR фотодиодов

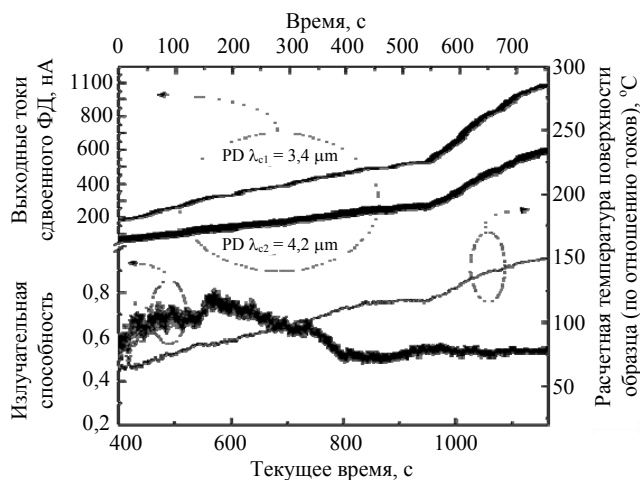
### 6.1. Оптоволоконный двухспектральный пирометр

Система измерения температуры для контроля технологии печатной электроники на гибких

подложках [25] представляет собой двухспектральный оптоволоконный пирометр и была разработана по техническому заданию международного центра исследования/обучения новых технологий микроэлектроники в Экс эн Провансе (Франция). Система предназначена для контроля динамики изменения температуры образцов на гибких подложках (материалы PET, Capton) в про-

цессе СВЧ-нагрева при обработке технологии спекания наночастиц в «чернилах» для электрических контактов печатной электроники. В качестве чувствительного элемента пирометра использовалась PD34/4.2Sr двухспектральная сэндвич-структура, обеспечивающая измерение мощности теплового излучения объекта на спектральных линиях  $(3,3 \pm 0,2)$  мкм и  $(4,1 \pm 0,25)$  мкм. В качестве оптической системы доставки теплового излучения использовалось сапфировое волокно с диаметром внутренней светопроводящей жилы 450 мкм и длиной 1 метр. Это позволило осуществить контроль температуры поверхности пленки внутри СВЧ-камеры при различных мощностях нагрева и определить температуру спекания токопроводящих слоев по скачку изменения излучательной способности (фазовому переходу) поверхности исследуемого образца. В соответствии с техническим заданием диапазон измерений температуры составлял 80–300 °С при быстроедействии 30 мкс и линейных размерах участка измерения 5 мм. Пирометр имеет 2 аналоговых вольтовых выхода для регистрации сигналов по двум спектральным каналам в полосе частот 100 кГц. Оцифровка сигналов пирометра и ввода данных в ПК для последующего расчета температуры и значения излучательной способности объекта измерения использовалась стандартная многоканальная плата сбора, оцифровки и передачи данных фирмы National Instruments.

На графике рис. 7 приведен пример результата эксперимента по мониторингу температуры и излучательной способности образца по измеряемым токам ФД в двух спектральных каналах и рассчитанных в соответствии с принципом пирометрии спектрального отношения.



**Рис. 8.** Динамика изменения выходных сигналов двухспектрального пирометра и результаты расчета температуры и излучательной способности поверхности исследуемого образца в процессе СВЧ-нагрева при исследовании процессов спекания токопроводящих покрытий в ink-jet технологии

Из графиков хорошо виден момент начала процесса спекания (температура остается неизменной на уровне 125 °С) и соответствующий ему процесс изменения излучательной способности объекта. Исследования проводились при различных мощностях СВЧ нагрева и позволили получить температурные зависимости процесса спекания для различных подложек, состава чернил и мощности СВЧ-излучения, необходимые для его оптимизации [24].

## 6.2. Специализированный пирометр для изучения циклического воздействия плазмы на конструкционные материалы термоядерной установки

Вопросы взаимодействия плазмы с веществом, включая воздействие плазмы на конструкционные материалы термоядерных установок, представляют не только фундаментальный научный интерес, но и являются одной из важнейших задач обеспечения безопасности термоядерных реакторов [25–28]. Ранее, в процессе эксплуатации научно-исследовательской термоядерной установки Глобус-М в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН [28] были обнаружены изменения структуры поверхности вольфрама на внутренней стенке реактора после многократного воздействия импульсной плазмы. Очевидно, что такие изменения могут приводить к изменению теплопроводящих свойств конструкционных материалов и повышению опасности их использования. Для изучения температурных процессов на внутренней поверхности реактора была поставлена задача создания системы контроля температуры объектов непосредственно во время действия плазменного разряда. Основными требованиями к такой системе являлось высокое быстроедействие, широкий диапазон изменения температуры и регистрация теплового излучения объекта в условиях мощных засветок в видимом спектральном диапазоне. Очевидно, что изменение структуры поверхности материала однозначно связано с неконтролируемым изменением его излучательной способности, поэтому измерения возможны только с использованием методов двухспектральной пирометрии в области, лежащей за пределами видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра. Для проведения этих исследований в рамках международного проекта ИТЭР был разработан экспериментальный макет плазменной пушки для изучения циклического воздействия плазмы на конструкционные материалы термоядерной установки [28]. Для регистрации динамики изменения температуры поверхности объектов непосредственно во время воздей-

ствия плазмы были изготовлены макеты пирометров на основе двухспектрального пирометрического сенсора, описанного ранее в разделе 5 данной работы на основе двухспектральной сэндвич-структуры PD34/4.2Sr и различных оптических схемы пирометра: на базе линзового объектива (ZnSe), который формирует параллельный пучок диаметром 2 см на расстоянии до 2 метров и зеркального объектива, выполненного по схеме Кассегрена с главным сферическим зеркалом диаметром 60 мм (радиус кривизны  $R = 120$  мм) и плоским вторичным зеркалом диаметром 32 мм. Пирометры имеют 2 аналоговых вольтовых выхода для регистрации сигналов по двум спектральным каналам. Для оцифровки, сбора и передачи информации на ПК для последующей обработки использовался цифровой осциллограф с 12 разрядным АЦП и полосой пропускания 100 МГц и программа «Сомбископ» (АСК-3107 фирмы Актаком). Быстродействие пирометра определялось полосой фильтрации в электронном канале пирометрического сенсора и варьировалось в зависи-

мости от длительности эксперимента. Было реализовано максимальное быстродействие пирометра порядка 1 мкс, что позволило провести испытания материалов на макете плазменной пушки, в которой длительность импульса существования плазмы ограничена 15 мкс.

На графиках рис. 8 представлены результаты мониторинга температуры поверхности металла (вольфрама) при воздействии на него плазмы внутри камеры Глобус М и на макете водородной плазменной пушки. Параметры плазмы отличаются по мощности теплового воздействия и времени импульсов более чем на 5 порядков.

Таким образом, впервые методики высокоскоростной пирометрии были использованы для контроля температуры элементов конструкции термоядерных установок непосредственно в процессе плазменного разряда. По совокупности параметров быстродействие, точность, чувствительность и диапазон измерения температуры разработанный пирометр превосходит известные двухспектральные аналоги.

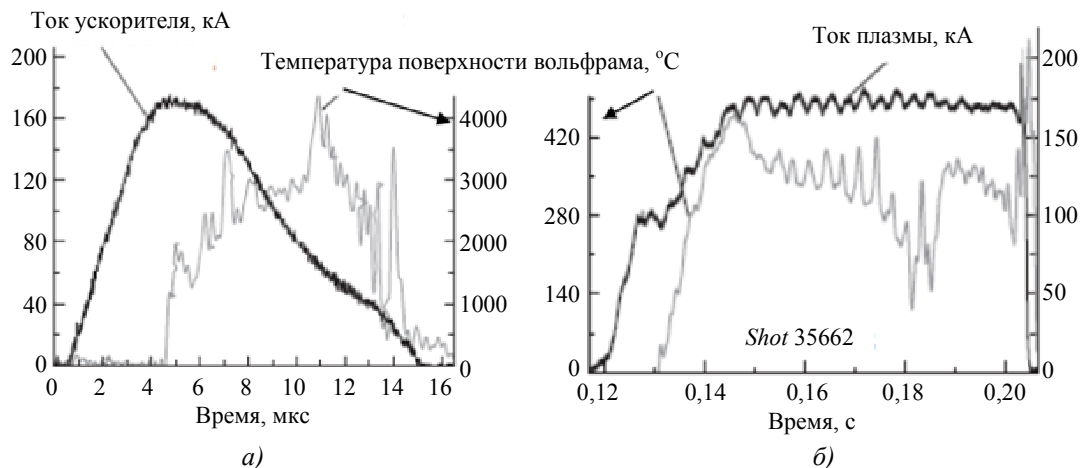


Рис. 9. Динамика изменения температуры поверхности вольфрама под воздействием плазменной струи на стенде плазменной пушки (а, длительность импульса 15 мкс, тепловая нагрузка  $100 \text{ ГВт}\cdot\text{м}^2$ ) и в процессе плазменного разряда в термоядерной установке Глобус-М (б, длительность импульса 70 мс, тепловая нагрузка  $2,5 \text{ МВт}\cdot\text{м}^2$ )

### 6.3. Прецизионный пирометр для фундаментальных научных исследований

Быстродействующий низкотемпературный пирометр с использованием пирометрического сенсора на основе MWIR фотодиода типа PD42Sr ( $\lambda = 4,15 \pm 0,25$  мкм) позволил реализовать новый метод исследования тепловых, пироэлектрических и электрокалорических свойств объемных и пленочных сегнетоэлектрических материалов [29–32]. Метод основан на прямых измерениях динамики изменения температуры образцов от  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  с высокой точностью (не хуже 50 мК) и при высоком быстродействии от 1,5 мс. Впервые реализована возможность совмещения лазерных термоволно-

вых методик (Laser Intensity Modulation Method, LIMM) и прямых методов бесконтактного контроля температуры объемных и пленочных материалов непосредственно в области теплового лазерного воздействия для количественной оценки пироэлектрического коэффициента материала. Достигнута высокая достоверность и точность определения пирокоэффициента – единицы процентов от измеряемой величины в широком диапазоне значений от единиц  $\text{пС}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  до десятков  $\text{мкС}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [31]. В качестве примера результатов пироэлектрических измерений с использованием прямых бесконтактных методов измерения температуры образца непосредственно в области модулированного теплового лазерного воздействия на

рис. 9 приведены эпюры изменения температуры пленочного образца органического материала на основе  $\alpha$ -glycine (кривая 1), полученные синхронно с регистрацией мощности лазерного излучения ( $\lambda = 0,68$  мкм), падающего на образец (кривая 2) и вызванного этим тепловым воздействием электрического тока вследствие изменения поляризации образца (кривая 3). Из приведенного рисунка хо-

рошо видно, что разработанный пирометр обеспечивает измерение колебаний температуры на уровне единиц градусов с высоким отношением сигнал/шум (размах шума не превышает 0,1 К) при быстродействии единицы миллисекунд. Очевидно, что при усреднении данных (например, при снижении быстродействия до 100 мс) точность температурных измерений может быть повышена на порядок.

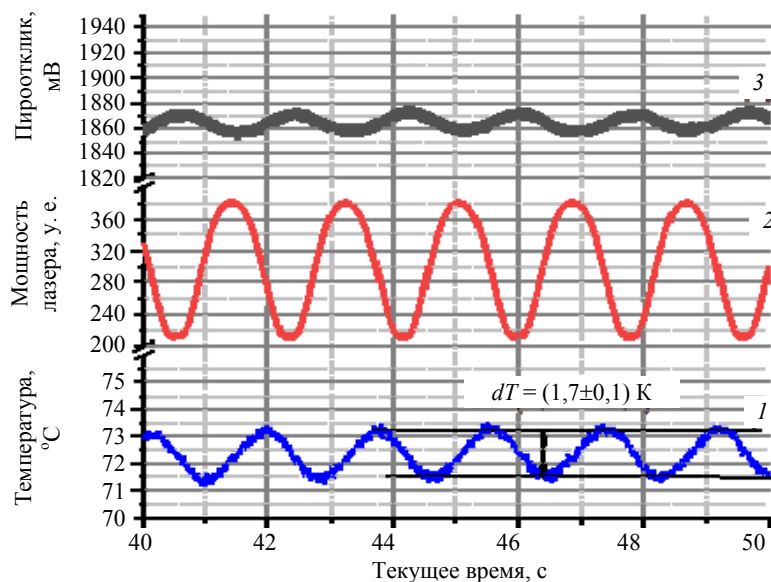


Рис. 10. Динамика изменения температуры пленочного образца органического материала на основе  $\alpha$ -glycine при пирозлектрических измерениях

Высокие чувствительность, быстродействие и отсутствие инерционности пирометра на основе MWIR фотодиода позволили реализовать прямые методы измерения величины электрокалорического эффекта – изменения температуры материала под воздействием электрического поля [30, 32]. Реализованный бесконтактный метод количественной оценки характеристик взаимобратных электрокалорического и пирометрического эффектов в одинаковых (произвольных) термодинамических [30] условиях имеет большое практическое значение, так как позволяет существенно повысить достоверность полученных результатов.

Экспериментально полученная точность измерений температуры не хуже  $\pm 100$  мК при температуре образца  $\sim 20$  °C при временном разрешении 1,5 мс и размерах объекта менее  $1 \text{ см}^2$  в настоящее время являются рекордными параметрами для бесконтактных методов ИК-термометрии.

## 7. Заключение

Отечественная элементная база MWIR фотодиодов позволяет не только разрабатывать пирометры, отвечающие требованиям промышленности, но и создавать новые оригинальные измерительные методики.

Высокая чувствительность и относительная узкополосность рассмотренных фотодиодов позволяет реализовать на их основе профессиональные двухцветные пирометры для диапазона температур 50–1000 °C, обладающие точностью не хуже 1 % от шкалы при малых полях зрения (коэффициент визирования 1:100), с быстродействием от единиц мс до 1 с.

Экспериментально подтверждена квазимонохроматическая модель для описания передаточной характеристики пирометрического сенсора на основе иммерсионных MWIR фотодиодов. Это позволяет реализовать методы градуировки и автокалибровки температурного сенсора в лабораторных условиях на произвольный объект, что существенно уменьшает методическую составляющую погрешности пирометрических измерений.

Впервые представлен двухволновой пирометр MWIR диапазона с временным разрешением 1 мс и диапазоном измерения температуры от 200 до 3500 °C, предназначенный для контроля температуры материалов непосредственно во время воздействия плазменного разряда. По совокупности параметров такой пирометр превосходит известные двухспектральные аналоги.

С помощью разработанных и реализованных макетов пирометров на основе InAs InAsSb фотодиодов впервые в практике научных исследований

проведены измерения динамики изменения температуры с высоким быстродействием и точностью для объектов с неизвестными и/или изменяющимися в процессе эксперимента значениями излучательной способности:

- в исследованиях электрокалорических и пироэлектрических свойств сегнетоэлектрических керамик;
- при отработке «ink-jet» технологии для печатной электроники;
- при исследовании теплофизических свойств конструкционных материалов в экспериментальной термоядерной установке Глобус-М.

Работа выполнена в рамках Госзадания,  
научная тема 0040-2019-0019.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Highly Accurate Infrared Thermometers for Non-contact Temperature Measurements (PYROMETER OVERVIEW) | Advanced Energy/ <https://www.advancedenergy.com>
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978.
3. Pyrometer Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2017–2025 <https://www.transparencymarketresearch.com/pyrometer-market.html>
4. FLUKE: [Flukeprocessinstruments.com](http://Flukeprocessinstruments.com)
5. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982.
6. Saunders P. // Meas. Sci. Technol. 2009. Vol. 20. P. 025104.
7. Новицкий П. В. Электрические измерения неэлектрических величин. – Л.: Энергия, 1975.
8. Manoi A., Wongnut P., Lu X., Bloembergen P., Saunders P. // Metrologia. 2020. Vol. 57(1). P. 014002.
9. Saunders P., Manoi A. // Metrologia. 2020. Vol. 57(2). P. 014002.
10. Liang M., Wang Y., Wang C., Wang Y. // Measurement Science and Technology. 2022. Vol. 33(6). P. 065004.
11. Sotnikova G. Yu., Aleksandrov S. E., Gavrilov G. A., Zabrodskiy V. V., Suchanov V. L. // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8073. P. 80731D.
12. Сотникова Г. Ю., Гаврилов Г. А., Суханов В. Л., Черных Д. Ф., Александров С. Е., Капралов А. А., Алексеев А. Н., Шкурко А. П. // ПТЭ. 2007. № 4. С. 151.
13. Selection guide/Infrared detectors <https://www.hamamatsu.com/>
14. Infrared Detector Market Research Report: ID: MRFR/ICT/9311-HCR | March 2022 | [<https://www.marketresearchfuture.com/>]
15. ООО «ИюффеЛЕД», [www.ioffeled.com/](http://www.ioffeled.com/)
16. Mid-IR Photodetectors and Systems: Applications & Markets <https://www.marketsandmarkets.com/>
17. Bielecki Z., Achtenberg K., Kopytko M., Mikolajczyk J., Wojtas J., Rogalski A. // Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci. 2022. Vol. 70(2). P. 140534.
18. Chen J., Wang J., Li X., Chen Jin, Yu F., He J., Wang J., Zhao Z., Li G., Chen X., Lu Wei // Sensors. 2022. Vol. 22. P. 677.
19. Гаврилов Г. А., Матвеев Б. А., Сотникова Г. Ю. // Письма ЖТФ. 2011. Т. 37. № 18. С. 50.
20. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Сотникова Г. Ю. // Письма ЖТФ. 2014. Т. 40. № 16. С. 58.
21. Sotnikova G. Yu., Aleksandrov S. E., Gavrilov G. A. // Proc. of SPIE Optical Sensors. 2011. Vol. 8073. P. 80731A-1.
22. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Капралов А. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Сотникова Г. Ю. / Устройство для бесконтактного измерения температуры объекта. Патент РФ № 2622239.
23. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Сотникова Г. Ю. / Фотометр. Патент РФ № 2610073.
24. Zymelka D., Matveev B., Aleksandrov S., Sotnikova G., Gavrilov G., Saadaoui M. // Flex. Print. Electron. 2017. Vol. 2. P. 045006.
25. Leonova K., Konstantinidis S., Britun N. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55(34). P. 345202.
26. Irace P. H., Gopan A., Axelbaum R. L. // Combustion and Flame. 2022. Vol. 242. P. 112158.
27. Woodruff C., Dean S. W., Cagle C., Croessmann C. L., Dubé P. L., Pantoya M. L. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 187. P. 122565.
28. Воронин А. В., Александров С. Е., Бер Б. Я., Брунков П. Н., Борматов А. А., Гусев В. К., Демина Е. В., Новохацкий А. Н., Павлов С. И., Прусакова М. Д., Сотникова Г. Ю., Яговкина М. А. // ЖТФ. 2016. Т. 86(3). С. 51.
29. Sotnikova G. Yu., Gavrilov G. A., Kapralov A. A., Muratkov K. L., Smirnova E. P. // Rev. Sci. Instrum. 2020. Vol. 91(1). P. 015119.
30. Сотникова Г. Ю., Гаврилов Г. А., Капралов А. А., Смирнова Е. П. // Письма ЖТФ. 2019. Т. 45(19). С. 7.
31. Sotnikova G. Yu., Gavrilov G. A., Kapralov A. A., Muratkov K. L., Passet R. S., Smirnova E. P., Sotnikov A. V. // Ferroelectrics. 2022. Vol. 591(1). P. 166.
32. Sotnikova G. Yu., Gavrilov G. A., Kapralov A. A., Muratkov K. L., Passet R. S., Smirnova E. P., Sotnikov A. V. // Ferroelectrics. 2022. Vol. 591(1). P. 157.

PACS: 07.20.Ka

## Mid- Infrared Pyrometry based on InAs and InAsSb Photodiodes (a review)

G. Yu. Sotnikova, S. E. Alexandrov, and G. A. Gavrilov

Ioffe Institute

26 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 194021, Russian

E-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Received August 05, 2022

**An overview of the current state of the world market for industrial pyrometers is presented. The technical characteristics of specialized pyrometers prototypes implemented on the domestic photo-**

*detectors components and developed in the laboratories of the Ioffe Institute (St. Petersburg, Russia) are given.*

*A design of a universal pyrometric sensor based on uncooled one- and two-color photodiode sandwich structures with spectral sensitivity maxima in the mid-IR wavelength (MWIR) spectrum range is proposed.*

*Pyrometers calibration algorithm on the object under study have been worked out, which makes it possible to minimize the error components when measuring the true temperature of an object with unknown / changing values of emissivity.*

*It is shown that pyrometers based on domestic uncooled immersion InAs and InAsSb photodiodes, in terms of the combination of parameters, speed, accuracy, sensitivity, and temperature measurement range, correspond to the best examples of IR radiation thermometers on the world market.*

*Keywords:* pyrometry, IR thermometer, medium-wavelength (MWIR) infrared spectral range, photodiodes based on InAs and InAsSb heterostructures, immersion photodiode, sandwich structure, emissivity, calibration algorithm, two-color pyrometer.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403

#### REFERENCES

1. *Highly Accurate Infrared Thermometers for Non-contact Temperature Measurements (PYROMETER OVERVIEW)*, [www.advancedenergy.com](http://www.advancedenergy.com)
2. L. Z. Kriksunov, *Reference book on the basics of infrared technology*, (Moscow: Soviet radio, 1978) [in Russian].
3. *Pyrometer Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2017–2025*, [www.transparencymarketresearch.com/pyrometer-market.html](http://www.transparencymarketresearch.com/pyrometer-market.html)
4. FLUKE, [Flukeprocessinstruments.com](http://Flukeprocessinstruments.com)
5. D. Ya. Svet, *Optical methods for measuring true temperatures* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
6. P. Saunders, *Meas. Sci. Technol.* **20**, 025104 (2009).
7. P. V. Novitsky, *Electrical measurements of non-electric quantities*. (Energy, Leningrad, 1975) [in Russian].
8. A. Manoi, P. Wongnut, X. Lu, P. Bloembergen, and P. Saunders, *Metrologia* **57**(1), 014002 (2020).
9. P. Saunders and A. Manoi, *Metrologia* **57**(2), 014002 (2020).
10. M. Liang, Y. Wang, C. Wang, and Y. Wang, *Measurement Science and Technology* **33**(6), 065004 (2022).
11. G. Yu. Sotnikova, S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, V. V. Zabrodskiy, V. L. Suchanov, *Proc. SPIE* **8073**, 80731D (2011).
12. S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, G. Y. Sotnikova, D. F. Chernykh, A. N. Alekseev, A. L. Dudin, I. V. Kogan, and A. P. Shkurko, *Instrum. Exp. Tech.* **50**(4), 572 (2007).
13. *Selection guide/Infrared detectors* [www.hamamatsu.com/](http://www.hamamatsu.com/)
14. *Infrared Detector Market Research Report: ID: MRF/ICT/9311-HCR | March 2022* | [www.marketresearchfuture.com](http://www.marketresearchfuture.com)
15. IoffeLED, [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)
16. *Mid-IR Photodetectors and Systems: Applications & Markets* [www.marketsandmarkets.com/](http://www.marketsandmarkets.com/)
17. Z. Bielecki, K. Achtenberg, M. Kopytko, J. Mikolajczyk, J. Wojtas, and A. Rogalski, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* **70**(2), 140534 (2022).
18. J. Chen, J. Wang, X. Li, Jin Chen, F. Yu, J. He, J. Wang, Z. Zhao, G. Li, X. Chen, and Wei Lu, *Sensors* **22**, 677 (2022).
19. G. A. Gavrilov, B. A. Matveev, and G. Yu. Sotnikova, *Tech. Phys. Lett.* **37**(9), 866 (2011).
20. S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, and G. Yu. Sotnikova, *Tech. Phys. Lett.* **40**(8), 704 (2014).
21. G. Yu. Sotnikova, S. E. Aleksandrov, and G. A. Gavrilov, *Proc. of SPIE Optical Sensors*, **8073**, 80731A-1 (2011).
22. S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, B. A. Matveev, M. A. Remenny, and G. Yu. Sotnikova, *Device for non-contact measurement of object temperature* RF patent No. 2622239 [in Russian].
23. S. E. Aleksandrov, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, B. A. Matveev, M. A. Remenny, and G. Yu. Sotnikova, *Photometer*, RF patent No. 2610073 [in Russian].
24. D. Zymelka, B. Matveev, S. Aleksandrov, G. Sotnikova, G. Gavrilov, and M. Saadaoui, *Flex. Print. Electron.* **2**, 045006 (2017).
25. K. Leonova, K., S. Konstantinidis, and N. Britun, *Journal of Physics D: Applied Physics* **55**(34), 345202 (2022).
26. P. H. Irace, A. Gopan, and R. L. Axelbaum, *Combustion and Flame* **242**, 112158 (2022).
27. C. Woodruff, S. W. Dean, C. Cagle, C. L. Croessmann, P. L. Dubé, and M. L. Pantoya, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **187**, 122565 (2022).
28. A. V. Voronin, S. E. Aleksandrov, B. Y. Ber, P. N. Brunkov, A. A. Bormatov, V. K. Gusev, E. V. Demina, A. N. Novokhatskii, S. I. Pavlov, M. D. Prusakova, G. Y. Sotnikova, and M. A. Yagovkina, *Tech. Phys.* **61**(3), 370 (2016).
29. G. Yu. Sotnikova, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, K. L. Muratkov, and E. P. Smirnova, *Rev. Sci. Instrum.* **91**(1), 015119 (2020).
30. G. Yu. Sotnikova, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, and E. P. Smirnova, *Tech. Phys. Lett.* **45**(10), 963 (2019).
31. G. Yu. Sotnikova, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, K. L. Muratkov, R. S. Passet, E. P. Smirnova, and A. V. Sotnikov, *Ferroelectrics* **591**(1), 166 (2022).
32. G. Yu. Sotnikova, G. A. Gavrilov, A. A. Kapralov, K. L. Muratkov, R. S. Passet, E. P. Smirnova, and A. V. Sotnikov, *Ferroelectrics*, **591**(1), 157 (2022).