

## Широкополосный детектор ИК-излучения на основе лазерно-индуцированного графена

© Ю.П. Сухоруков,<sup>1</sup> А.В. Телегин,<sup>1</sup> Р.Г. Зонов,<sup>2</sup> Г.М. Михеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
620108 Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
426067 Ижевск, Россия  
e-mail: telegin@imp.uran.ru

Поступило в Редакцию 25 июля 2025 г.

В окончательной редакции 1 октября 2025 г.

Принято к публикации 8 октября 2025 г.

Разработан быстродействующий широкополосный детектор инфракрасного излучения на основе лазерно-индуцированного графена, полученного методом лазерного пиролиза тонкой полиимидной пленки. Спектральная характеристика фотоотклика детектора согласуется со спектром излучения абсолютно черного тела, за исключением особенностей, обусловленных оптической схемой установки. В отличие от стандартных болометров частотная характеристика детектора на основе лазерно-индуцированного графена определена двумя различными физическими механизмами, что приводит к слабому спаду чувствительности на частотах порядка 1 – 10 kHz и выше. Высокая эффективность поглощения излучения в широком спектральном диапазоне ( $1 < \lambda < 21 \mu\text{m}$ ) и относительно высокая чувствительность ( $\sim 0.16\%/\text{W}$ ) позволили рассматривать данный детектор как перспективную основу для создания технологически простых и недорогих приемников инфракрасного излучения.

**Ключевые слова:** болометрический приемник, ИК-диапазон, лазерный пиролиз, полиимидная пленка, модуляция излучения, спектр абсолютно черного тела.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62543.197-25

### Введение

Последние два десятилетия интенсивно исследуются физико-химические свойства и развиваются физические принципы технического использования графена [1–3]. Уникальные свойства графена, такие как отсутствие запрещенной зоны, высокая подвижность носителей заряда и прозрачность, высокая теплопроводность и электропроводимость, а также низкая теплоемкость, стимулируют исследования в области транспортных и фотоиндированных явлений [4–8]. Например, особое внимание уделяется созданию тепловизоров, устройств обработки и преобразования электромагнитного излучения, матриц фокальной плоскости и т. д. [7,9–12]. Принцип действия таких устройств преимущественно основан на изменении электросопротивления графена в результате его нагрева электромагнитным излучением. Низкая теплоемкость и высокая теплопроводность графена теоретически позволяет достичь быстродействия на частотах, близких к терагерцовому диапазону ( $\sim 10^{12} \text{ Hz}$ ) [7–10]. Однако при создании фотодетекторов на основе монослойного графена возникают существенные ограничения: во-первых, доля поглощения падающего излучения крайне мала ( $\sim 2\%$  [6,12]), а во-вторых, при использовании графена в качестве фоторезистора в электрической цепи наблюдается высокая темновая плотность тока, что снижает отношение сигнал/шум и чувствительность устройства.

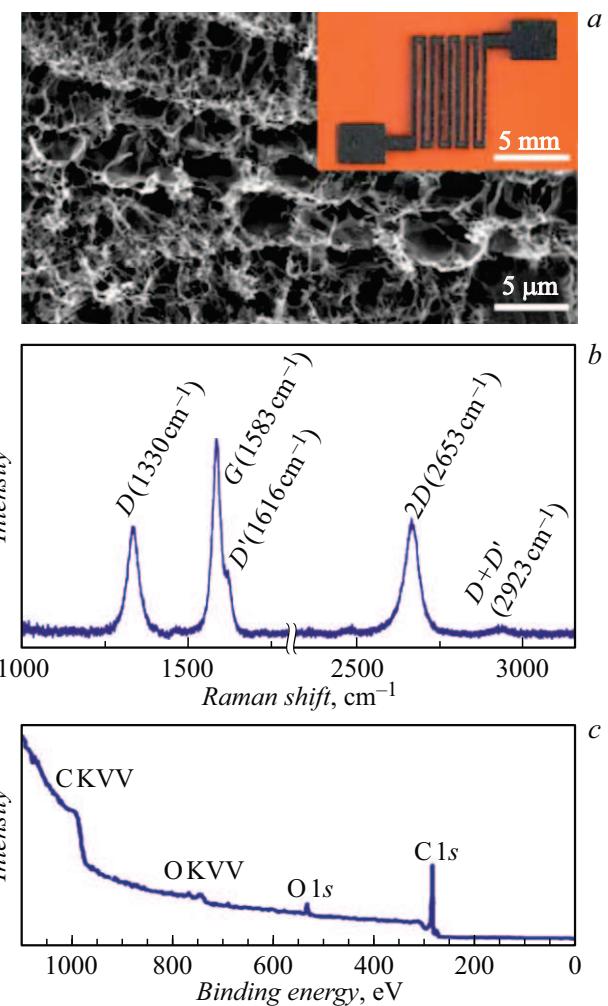
Возможным решением проблемы является использование различных пористых графеновых структур. В таких трехмерных (3D) структурах многократно увеличивается эффективная поверхность и соответственно доля поглощенного света, а большое количество случайно соединенных монослоев графена позволяет распределить электрический ток между ними и уменьшить плотность тока в контактах [10,12–14]. Перспективным методом синтеза подобных структур является прямое лазерное деструктурирование (пиролиз) полиимидных пленок, приводящее к образованию лазерно-индуцированного графена (ЛИГ) [15]. ЛИГ представляет собой высокопористый электропроводящий 3D-углеродный материал, состоящий из наноразмерных фрагментов графеноподобных слоев, хаотично ориентированных в трехмерной матрице, с большим количеством дефектов и пор [15]. Строго говоря, ЛИГ не относится ни к классическому 2D-графену, ни к упорядоченному графиту [16]. Однако в настоящее время термин „ЛИГ“ уже устоялся и широко используется в научных публикациях, связанных с лазерным пиролизом различных углеродосодержащих прекурсоров. Простота и высокая скорость получения пленок ЛИГ привела к интенсивной разработке различных датчиков на его основе [17–25], микроридкостных устройств [26–32], устройств памяти [33–40], экосистемных „умных“ устройств [26,28,41–45] и т. д. Большая толщина пленок ЛИГ ( $d \sim 20 - 300 \mu\text{m}$  [13,46,47]) обеспечивает высокие значения коэффициента погло-

щения света, а также электросопротивления и емкости [45,48–50]. Это позволило создать фотодетектор с частотными характеристиками, близкими к полупроводниковым аналогам [32,51], обнаружить эффект увлечения при облучении пленки ЛИГ лазерными импульсами наносекундной длительности [47], а также предложить детектор видимого и ближнего инфракрасного (ИК) излучения [52]. Перечисленные работы подтверждают высокий технический потенциал ЛИГ, в том числе для фотоники. Несмотря на эти успехи, детальные исследования ЛИГ-детекторов в среднем ИК-диапазоне не проводились.

В настоящей работе представлены краткие результаты исследования спектральных и частотных характеристик фотодетектора на основе пленки ЛИГ в ближнем и среднем ИК-диапазоне спектра ( $1 < \lambda < 21 \mu\text{m}$ ) в сравнении с идеальным болометром, определены параметры чувствительности ЛИГ-детектора к интенсивности падающего излучения.

## 1. Образцы и условия эксперимента

ЛИГ представляет собой высокопористую электропроводящую 3D-структуру с удельной поверхностью до нескольких сотен  $\text{m}^2/\text{g}$ , состоящую из нанокристаллитов турбостратного графита, случайным образом ориентированных друг относительно друга [53]. Синтез ЛИГ производился на воздухе при обычных условиях в результате лазерного пиролиза углеродсодержащего прекурсора в виде полиимидной пленки толщиной 125  $\mu\text{m}$ . Детектор ИК-излучения (вставка на рис. 1, a) был получен на поверхности полиимидной пленки построчным сканированием сфокусированным пучком непрерывного газового ( $\text{CO}_2$ ) лазера (длина волны  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) по заданной траектории [13,54]. Параметры лазерного излучения контролировались с помощью измерителя мощности PM100D, сопряженного с датчиком тепловой мощности S425C-L. Диаметр лазерного пучка, мощность излучения лазера, скорость сканирования и расстояние между строками составляли 190  $\mu\text{m}$ , 6 W, 220 mm/s и 25  $\mu\text{m}$  соответственно. Следует отметить, что для синтеза ЛИГ, а также в различных задачах по модификации углеродных материалов применяются как непрерывные, так и импульсные лазеры, включая фемтосекундные лазерные комплексы [15,55–58]. При этом важными параметрами являются мощность лазера (пиковая мощность в импульсе) и длина волны излучения (определяющая энергию фотонов и степень поглощения материалом). В настоящей работе использовано излучение  $\text{CO}_2$ -лазера, которое эффективно поглощается полиимидной пленкой. Это позволяет синтезировать более однородную структуру ЛИГ [59,60]. С практической точки зрения также существенно то, что непрерывные углекислотные газовые лазеры ( $\text{CO}_2$ -лазеры) отличаются относительно невысокой стоимостью и простотой в эксплуатации.

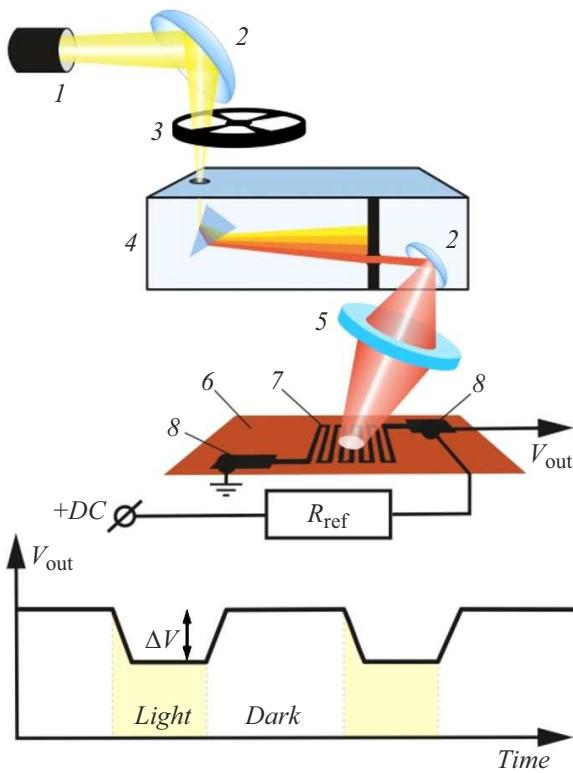


**Рис. 1.** РЭМ изображение поверхности ЛИГ (a) (на вставке приведена фотография ЛИГ-детектора в виде меандра), спектр комбинационного рассеяния света (b) и обзорный РФЭС спектр поверхности ЛИГ (c).

В результате лазерной термообработки полиимидной пленки были получены образцы (ЛИГ-детекторы) в виде меандра общей длиной 85 mm с шириной и толщиной линии 300 и 20  $\mu\text{m}$  соответственно. Концы меандра имели контактные площадки размером 2 × 2 mm. При этом освещаемая поверхность меандра составляла 5 × 8 mm. В силу механо-физических свойств (гибкости) самой полиимидной пленки (субстрата), образцы ЛИГ, полученные на ее поверхности, также являются гибкими, что было установлено и в других работах (см. например, [60–62]).

На рис. 1, a представлено изображение участка поверхности ЛИГ, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ- Thermo Fisher Scientific Quattro S).

Видно, что синтезированный материал имеет губчатую структуру, состоящую из переплетенных сетей открытых полостей разнообразной формы и различного



**Рис. 2.** Схема эксперимента: 1 — глобар, 2 — параболическое зеркало, 3 — механический обтюратор, 4 — монохроматор, 5 — линза из КВр, 6 — полимидная пленка, 7 — ЛИГ-детектор, выполненный в виде меандра на поверхности полимидной пленки, 8 — контактные площадки. Нижняя часть рисунка условно демонстрирует принцип фотоотклика ЛИГ-детектора.

размера, а также пластинчатых образований различной ориентации. Спектр комбинационного рассеяния света поверхности пленки ЛИГ, полученный при возбуждении излучением гелий-неонового лазера на длине волн 632.8 nm на спектрометре HORIBA HR800, приведен на рис. 2, б.

Представленный спектр состоит из четырех хорошо известных полос рассеяния  $D$ ,  $G$ ,  $D'$  и  $2D$ , описанных во многих работах по синтезу ЛИГ [13–18]. Кроме этих четырех полос, в области больших частотных сдвигов хорошо проявляется полоса  $D + D'$  [53]. Появление полосы рассеяния имеют дефектный графен и кристаллиты графита с дефектами, а также нанокристаллиты турбостратного графита. Анализ отношений площадей указанных полос к площади  $G$ -полосы, а также их частотного положения, ширины и формы линий подтверждает, что ЛИГ состоит из нанокристаллитов турбостратного графита с размером кристаллитов вдоль плоскости графеновых слоев около 16 nm. Для анализа химического состояния ЛИГ была применена методика рентгеновской фотоэлектронной спектрометрии (РФЭС) (спектрометр SPECS Surface Nano Analysis GmbH). На рис. 2, с приведен обзорный спектр РФЭС, который

является типичным для ЛИГ, синтезированного при вышеуказанных условиях лазерного пиролиза полимидной пленки. Видно, что в спектре кроме линии углерода C1s, имеется линия кислорода O1s. Детальные исследования спектров РФЭС указывают, что на поверхности ЛИГ также имеются следовые концентрации азота. Обработка полученного спектра РФЭС показывает, что концентрации углерода, кислорода и азота составляют 87.6 at. %, 11.1 at. % и 0.6 at. % соответственно. Разложение спектров C1s и O1s демонстрирует, что поверхность ЛИГ содержит кислород- и азотсодержащие группы ( $C - O$ ,  $C = O$ ,  $O - C = O$ ,  $C - N$  и др.), которые могут влиять на его оптические и электрические свойства. Темновое сопротивление меандра  $R$  составило  $\sim 5\text{k}\Omega$  (удельное сопротивление  $\rho \sim 0.075\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ) при комнатной температуре ( $T = 295\text{ K}$ ), что соответствует значениям удельного сопротивления графена в работах [8,63]. В формальном приближении ЛИГ в виде однородной проводящей пленки графена максимальная величина скин-слоя ( $\delta$ ) в среднем ИК-диапазоне может быть оценена как  $\delta = 2\rho\lambda/\mu_0c^{1/2} \sim 5.4\text{ }\mu\text{m}$  на длине волны  $\lambda = 20\text{ }\mu\text{m}$  ( $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $c$  — скорость света в вакууме). Эта величина показывает, на какую глубину в среднем проникает поле в структуру ЛИГ на низких частотах (радио, СВЧ частоты), где скин-эффект доминирует над диэлектрическими потерями. На высоких частотах (оптика, ИК) доминирует поглощение света самой графеновой сеткой и рассеяние на порах. В этом случае глубина проникновения света  $\delta_{opt}$  в основном определяется макроскопическим коэффициентом поглощения структуры  $\delta_{opt} = \lambda/4\pi k$ , где  $k$  — коэффициент экстинкции, который зависит от концентрации графена, морфологии пор, длины волны, интерференции света внутри структуры и т.д. Обычно  $\delta_{opt}$  значительно меньше  $\delta$ . Поскольку оцениваемая толщина синтезированного ЛИГ ( $d = 20\text{ }\mu\text{m}$ ) превышает  $\delta$  ( $d > \delta > \delta_{opt}$ ), можно считать, что в нашем случае обеспечивается практически полное поглощение падающего ИК-излучения в рабочем спектральном диапазоне при комнатной температуре.

При изготовлении электрических контактов меандра использовались три типа соединения ЛИГ с серебряными токоотводящими проводами: 1) токопроводящим kleem типа „Контактол“ на основе Ag; 2) расплавом In; 3) пленкой Cu. Все контакты имели эквивалентные свойства в течение двух-трех недель. В дальнейшем контакты типа 1 и 2 демонстрировали признаки деградации. Поэтому в настоящей работе использовались более стабильные медные контакты толщиной  $\sim 200\text{ nm}$ , полученные магнетронным распылением в вакууме при температуре подложки  $T \sim 200^\circ\text{C}$ .

Измерения напряжения фотоотклика  $\Delta V$ , наведенного ИК-излучением в ЛИГ-детекторе (меандре), производились по схеме, описанной ниже (рис. 2). Свет глобара (силитовый излучатель с рабочей температурой  $\sim 1380^\circ\text{C}$ ), промодулированный механическим обтюратором (Thorlabs MC2000B) с частотой до

10 kHz, фокусировался параболическим Al-зеркалом на входную щель модернизированного призменного ИК-монохроматора ИКС-21М. Монохроматический неполяризованный свет в интервале длин волн  $0.5 < \lambda < 21 \mu\text{m}$  фокусировался параболическим зеркалом и KBr-линзой на освещаемую поверхность меандра в виде пятна диаметром  $\sim 4 \text{ mm}$ .

Напряжение фотоотклика  $\Delta V$  определялось как изменение электросопротивления ( $\Delta R$ ) ЛИГ-детектора в результате его нагрева на величину  $\Delta T$  при поглощении света в соответствии с выражением [64]:

$$\Delta V = I_{dc} \Delta R = I_{dc} (dR/dT) \Delta T, \quad (1)$$

где  $I_{dc} = U_{dc}/(R_{\text{ref}} + R_d)$  — ток на детекторе,  $U_{dc} = 9 \text{ V}$  — напряжение источника постоянного тока,  $R_{\text{ref}}$  — сопротивление нагрузки, равное темновому сопротивлению меандра (см. выше),  $R_d$  — сопротивление освещенного меандра.

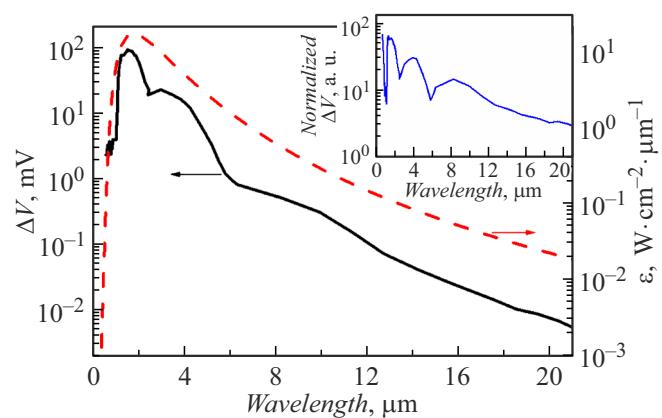
Величина  $\Delta V$  фиксировалась с помощью синхронного усилителя Stanford Research SR810 (Lock-in) и самодельного широкополосного предусилителя. Следует отметить, что достаточно высокая плотность тока ( $\sim 10^2 - 10^3 \text{ A/cm}^2$ ) не приводила к заметному разрушению контактов и образца или изменению резистивных свойств детектора. Такую термостойкость меандра можно объяснить многократным увеличением площади (количество контактов) структуры ЛИГ по сравнению с монослойным графеном [13,49]. Частотные характеристики ЛИГ-детектора определялись с использованием светодиода с  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ , работающего в постоянном или импульсном (прямоугольный меандр) режимах при подаче напряжения от генератора высокой частоты (АКИП-2141).

## 2. Результаты эксперимента

Спектральная зависимость фотоотклика ЛИГ-детектора  $\Delta V(\lambda)$  измерялась в диапазоне длин волн  $0.5 - 21 \mu\text{m}$  при частоте модуляции ИК-излучения  $f = 9.1 \text{ Hz}$ , на которой  $\Delta V$  достигает максимальных значений [52,64] (рис. 3).

Кроме того, частота  $f = 9.1 \text{ Hz}$  попадает в рабочий диапазон частот Ві-болометра с окном из KBr, что позволило далее провести сравнение параметров ЛИГ-детектора с данными штатного детектора ИК-монохроматора.

Спектр  $\Delta V$  для ЛИГ-детектора демонстрирует максимум при  $\lambda_{\text{max}} \approx 1.75 \mu\text{m}$  (рис. 3). Согласно закону смещения Вина ( $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ ), это положение соответствует температуре абсолютно черного тела (АЧТ)  $T \approx 1656 \text{ K}$ , что близко к рабочей температуре глобара в установке. Для сравнения на рис. 3 приведена спектральная зависимость плотности энергетической светимости теплового излучения АЧТ при  $T = 1656 \text{ K}$ , рассчитанная



**Рис. 3.** Спектр фотоотклика ( $\Delta V$ ) ЛИГ-детектора при  $f = 9.1 \text{ Hz}$  (левая ось ординат) и спектр излучения АЧТ ( $\varepsilon$ ) (правая ось) при  $T = 1653 \text{ K}$ . На вставке приведен спектр фотоотклика ЛИГ-детектора, нормированный на спектр АЧТ.

по формуле Планка [65]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}, \quad (2)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Нужно отметить, что в отличие, например, от фотонных детекторов (InSb, HgCdTe), спектр фотоотклика ЛИГ-детектора хорошо повторяет спектр АЧТ, что является характерным для тепловых приемников и обеспечивает корректные измерения интегральной мощности излучения в широком ИК-диапазоне без искажений за счет собственной спектральной избирательности. В длинноволновой области ( $\lambda > 21 \mu\text{m}$ ) спектр  $\Delta V(\lambda)$  ограничен поглощением света линзой из KBr. Резкое уменьшение  $\Delta V(\lambda)$  в коротковолновой области ( $\lambda < 1.7 \mu\text{m}$ ) обусловлено резким уменьшением интенсивности в спектре излучения АЧТ. Особенности на кривой  $\Delta V(\lambda)$  в области  $1 - 6 \mu\text{m}$  связаны с поглощением ИК-излучения атмосферными парами  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  [66]. Размытость этих особенностей связана с большой спектральной шириной щели ( $\Delta\nu$ ) призменного монохроматора ИКС-21М в эксперименте. Вставка на рис. 3 демонстрирует спектр фотоотклика ЛИГ-детектора, который после нормировки на спектр АЧТ напоминает или близок к спектру идеального фоторезистора. Как видно из рисунка, в результате такой обработки линии, связанные с поглощением паров  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , усиливаются, а амплитуда  $\Delta V$  — уменьшается. Необходимо отметить, что слабый монотонный спад  $\Delta V$  при увеличении длины волн света обусловлен нелинейной дисперсией показателей преломления  $dn/d\lambda$  используемых сменных призм из стекла, NaCl и KRS-5 [56].

Для сравнительной оценки фотоотклика изготовленного ЛИГ-детектора был использован заводской Ві-болометр из монохроматора ИКС-21М с обнаружительной способностью  $D = 10^9 - 10^{10} \text{ Hz}^{1/2} \cdot \text{cm/W}$  при комнатной температуре. Сравнение показало, что при

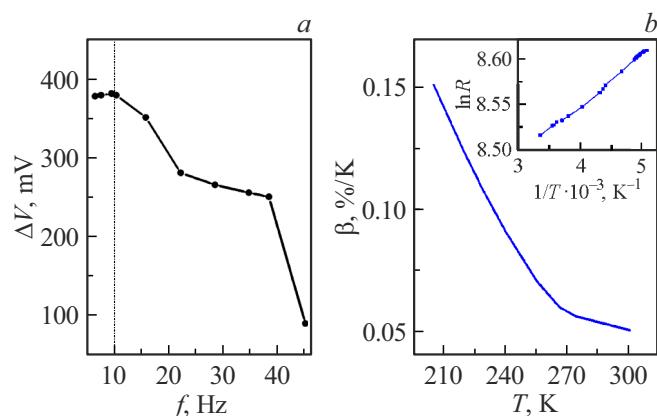
одинаковых условиях эксперимента фотоотклик неохлаждаемого металлического болометра на частоте 9.1 Hz всего в  $\sim 10^2 - 10^3$  раз выше, чем ЛИГ-детектора. Таким образом, в грубом приближении обнаружительная способность полученного ЛИГ-детектора составляет  $D \sim 10^6 \text{ Hz}^{1/2} \cdot \text{cm/W}$ . Более точное определение  $D$  для ЛИГ требует дополнительных исследований.

Предыдущие [52] и наши исследования показали, что только часть пленки ЛИГ участвует в преобразовании электромагнитной энергии, поскольку эффективная толщина скин-слоя меньше толщины пленки ЛИГ. Следовательно, одним из способов повышения  $D$  для ЛИГ-детектора может быть уменьшение толщины самой структуры ЛИГ, так как основная доля энергии света поглощается в поверхностных слоях. При этом за счет повышения концентрации энергии должны уменьшиться и шумы детектора. Отметим, что на данном этапе в текущих условиях эксперимента и для данных образцов ЛИГ величина тепловых шумов является достаточно высокой, и ее точное определение (или, например, эквивалентной мощности шума (NEP) детектора) не представляется возможным и целесообразным.

При сравнении с промышленным болометром на основе висмута (Bi) ЛИГ-детектор демонстрирует необычный характер зависимости фотоотклика  $\Delta V(f)$  от частоты модуляции света. На рис. 4, a представлен низкочастотный участок этой зависимости ( $6 < f < 45 \text{ Hz}$ ) для излучения светодиода ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ), модулированного с помощью механического обтюратора.

Наличие „полки“ на кривой  $\Delta V(f)$  при  $f \leq 10 \text{ Hz}$  и резкое уменьшение чувствительности при больших частотах указывает на болометрическую природу фотоотклика в этом частотном интервале. Оценка частоты максимума  $\Delta V$  для болометра по выражению  $f_t = 1/\tau$  дает величину  $f_t \approx 5 \text{ Hz}$ , где  $\tau \approx C/G$  [54],  $C \approx 12 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  — теплоемкость графена при  $T = 300 \text{ K}$  [1],  $G \approx 5000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  — теплопроводность графена [68,69]. Расхождение с экспериментально наблюдаемой частотой максимума  $\Delta V$  может быть обусловлено отсутствием точных данных о теплоемкости и теплопроводности пористого ЛИГ. В то же время высокая пористость (более 90 %) и низкая плотность (по разным данным, от  $\sim 4 \text{ mg/cm}^3$  [9] до  $\sim 70 \text{ mg/cm}^3$  [13]) приводят к снижению теплоемкости ЛИГ-детектора и, как следствие, к увеличению его быстродействия по сравнению с болометром. Отметим, что уменьшение толщины структуры (массы ЛИГ) также должно уменьшить тепловую инерцию и повысить скорость отклика ЛИГ-детектора.

Важным параметром для детекторов болометрического типа является коэффициент термического электросопротивления  $\beta = 1/R \cdot dR/dT$ , характеризующий относительное изменение сопротивления  $R$  рабочего элемента при его нагреве. Параметр  $\beta$  определяет чувствительность детектора к температурным изменениям, т. е. его обнаружительную способность. В работе параметр  $\beta$  для



**Рис. 4.** *a* — частотная зависимость фотоотклика ( $\Delta V$ ) для ЛИГ-детектора при  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ; *b* — температурная зависимость коэффициента термического сопротивления ЛИГ ( $\beta$ ). На вставке — обратная температурная зависимость сопротивления ЛИГ-детектора.

ЛИГ рассчитывался по наклону температурной зависимости сопротивления  $R(T)$  в диапазоне 200 – 300 K и составил  $\beta \approx 0.05 \%/\text{K}$  при  $T = 293 \text{ K}$  и  $\beta \approx 0.15 \%/\text{K}$  при  $T = 200 \text{ K}$  (рис. 4, *b*), что хорошо согласуется с данными для других полупроводников.

Вставка на рис. 4, *b* демонстрирует, что температурная зависимость электросопротивления ЛИГ удовлетворительно описывается функцией вида  $\ln R = \ln R_0 + E_a/2kT$ , где энергия активации носителей заряда  $E_a \sim 5 \text{ meV}$ ,  $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $k$  — постоянная Больцмана. Полупроводниковый ход  $\ln R$  может быть связан с высокой дефектностью ЛИГ. Например, процессами адсорбции и присутствием в пористом ЛИГ различных функциональных групп углерода и кислорода [20–23,52–63], что согласуется с данными о модификации зонной структуры графена через химическое функционализирование [13–18,63]. Подобное поведение  $\beta(T)$  и  $R(T)$  имеют также оксид графена и пленки многослойного графена, полученные аэрогель-методом [8,9]. Отметим, что классический графен обладает „металлическим ходом“ зависимостей  $\beta(T)$  и  $R(T)$  (см., например, [2,70]). Таким образом, пористая структура ЛИГ и наличие функциональных групп приводят к деградации детектора в атмосферных условиях и появлению энергетической полупроводниковой щели в спектре. Для стабилизации параметров фоточувствительности ЛИГ-детектора и повышения  $\beta$  можно варьировать методику синтеза ЛИГ [13–18,27–29,48,49] или использовать различные активные примесные группы, например, металлические наночастицы [4,20,40–42,51].

Из рис. 4 видно, что болометрический эффект в ЛИГ-детекторе сохраняется до  $f = 45 \text{ Hz}$ , при которой  $\Delta V$  почти в четыре раза меньше, чем в максимуме (рис. 3, *a*). При дальнейшем увеличении частоты модуляции света кривая  $\Delta V(f)$  демонстрирует излом, и сигнал плавно спадает вплоть до  $f = 10 \text{ kHz}$  (рис. 5).

Как было отмечено в работах [47–49, 51], наличие этой составляющей  $\Delta V(f)$  может быть связано с так называемым „photogating“ эффектом — разновидностью фотоэлектромагнитной ЭДС, обусловленной изменением подвижности и концентрации свободных носителей заряда (дырок и электронов) в процессе поглощения света [7, 71] в графеновых структурах. Данный эффект слабо зависит от частоты и связан с уникальными свойствами 2D-графена (в том числе ЛИГ), включающими малую теплоемкость, слабое электрон-фононное взаимодействие, высокую удельную электропроводимость ( $\sigma \approx 0 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [72]) и высокую подвижность носителей заряда. В исследуемом образце подвижность носителей, измеренная с точностью до константы в стандартной схеме с четырьмя холловскими контактами на участке меандра, составила  $\mu \sim 4300 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  при комнатной температуре. Эта величина гораздо меньше, чем в графене, что может быть связано с влиянием примесей, дефектов или адсорбированных молекул. Тем не менее в работе [47] был представлен термодетектор из ЛИГ, работающий на THz-частотах, что указывает на возможные перспективы расширения частотного диапазона ЛИГ-детектора.

Частотная зависимость ЛИГ-детектора  $\Delta V(f)$  (рис. 5) исследовалась при его облучении светом с длиной волны  $0.63 \mu\text{m}$ . Модуляция излучения светодиода осуществлялась двумя способами: 1) механическим-оптомеханическим обтюратором с диском и 2) электрическим-высокочастотным генератором. При частотах модуляции  $f < 0.5 \text{ kHz}$  значения  $\Delta V$  для обоих случаев практически совпадают. В диапазоне частот  $1 < f < 10 \text{ kHz}$  чувствительность ЛИГ-детектора к излучению, модули-

рованному механическим обтюратором, была на  $\sim 20\%$  выше, чем при модуляции с помощью электрического генератора. Такое расхождение можно связать с неучтенными процессами релаксации в электронной цепи регистрации сигнала от ЛИГ-детектора, поскольку при модуляции интенсивности излучения не прямоугольной, а синусоидальной формой сигнала, разница в фотоотклике  $\Delta V(f)$  для обоих типов модуляции уменьшается. Таким образом, ЛИГ-детектор позволяет хорошо воспроизводить форму импульсов на частотах до  $f = 10 \text{ kHz}$  (на рисунке не показано).

Сравним экспериментальную зависимость  $\Delta V(f)$  для ЛИГ-детектора с частотной зависимостью фоточувствительности идеального болометра  $S_{\text{Bol}}(f)$  [52]:

$$S_{\text{Bol}} \approx 3U_s\beta/(fC), \quad (3)$$

где  $U_s = 9 \text{ V}$  — напряжение смещения,  $C = 12 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  — теплоемкость ЛИГ,  $\beta = 0.05\% \cdot \text{K}^{-1}$ .

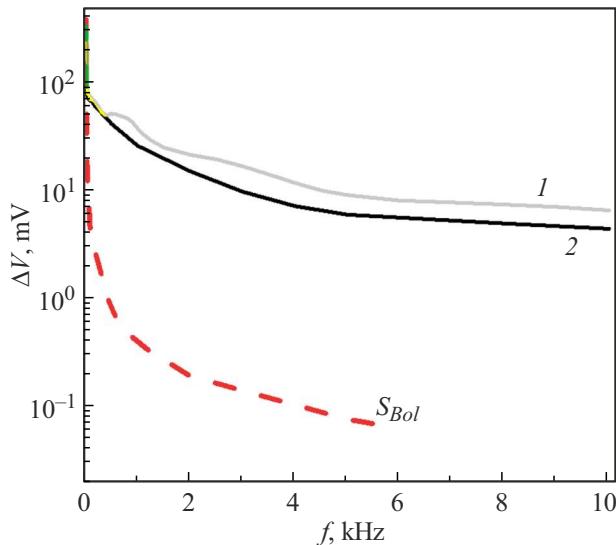
Для удобства сравнения частотная зависимость  $S_{\text{Bol}}$  может быть представлена в виде:

$$S_{\text{Bol}} = A/f, \quad (4)$$

где  $A$  — размерный множитель, определяемый из соотношения  $A/f = \Delta V$  для частоты модуляции света  $f = 10 \text{ Hz}$  и мощности излучения светодиода  $P = 200 \text{ mW}$ , при фиксированном значении внешней температуры и сопротивления ЛИГ-детектора.

Рассчитанная по выражению (4) кривая  $S_{\text{Bol}}(f)$  демонстрирует (рис. 5), что множитель  $A$  может быть использован только до частот  $f \leq 45 \text{ Hz}$ , т. е. в частотном диапазоне, где доминирует болометрический механизм. При дальнейшем увеличении частоты модуляции  $\Delta V$  более чем на два порядка величины превышает  $S_{\text{Bol}}(f)$ . Различие экспериментальных и рассчитанных зависимостей  $\Delta V(f)$  и  $S_{\text{Bol}}(f)$  в области  $f > 45 \text{ Hz}$  может быть связано с проявлением фотопроводимости в результате изменения параметров носителей заряда, например, „photogating“ эффектом [52]. Отметим, что возникновение фотогальванического эффекта на p-n-переходе (вентильная фото-ЭДС) в ЛИГ-детекторе в данной геометрии установки в пределах погрешности эксперимента не наблюдалось. Об этом, например, свидетельствует независимость величины сопротивления ЛИГ от направления тока в измерительной цепи.

Измерения угловых зависимостей  $\Delta V(\varphi)$  показали, что при углах падения света  $\varphi \leq \pm 30^\circ$  относительно нормали к поверхности меандра снижение фоточувствительности ЛИГ-детектора не превышает  $\sim 5\%$ . Таким образом, пористая структура ЛИГ обеспечивает достаточно эффективное поглощение света под различными углами. Минимальная или пороговая мощность излучателя, регистрируемая ЛИГ-детектором, составила  $P_{\min} = \vartheta dP/dR = 0.16\%/\text{W}$ , где  $\vartheta \approx 0.4 \Omega$  — стандартное отклонение сопротивления детектора без облучения и при полной мощности лазерного излучения  $dR/dP \sim -410 \Omega/\text{W}$  [51]. Полученная величина  $P_{\min}$



**Рис. 5.** Частотная зависимость фотоотклика ( $\Delta V$ ) ЛИГ-детектора при модуляции излучения светодиода  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  механическим обтюратором (кривая 1) и генератором высокой частоты (кривая 2). Штриховой линией для сравнения приведена кривая чувствительности идеального болометра ( $S_{\text{Bol}}$ ), рассчитанная по выражению (4).

на порядок ниже значений, характерных для моно- и многослойного графена [9], но соизмерима с данными, например, для нанокомпозитных пленок MoS<sub>2</sub> с высоким  $\beta$  [24,73].

Таким образом, чувствительность ЛИГ-детектора ограничена взаимодействием материала с окружающей средой и подвижностью носителей заряда. Для достижения характеристик, близких к параметрам графена, требуется дальнейшая оптимизация. Например, усовершенствование методики синтеза, подбор оптимальной толщины как самого ЛИГ-слоя, так и подложки, а также применение защитных и легирующих покрытий.

## Заключение

В работе продемонстрировано, что ЛИГ, синтезированный методом пиролиза полиимидной пленки непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером, является перспективным материалом для создания быстродействующих детекторов электромагнитного излучения видимого и ИК-диапазона. Показано, что пленка ЛИГ проявляет полупроводниковые свойства с энергией активации порядка 5 meV и подвижностью носителей заряда 4300 cm<sup>2</sup>/(V·s). Коэффициент термического сопротивления ЛИГ составляет примерно 0.05 %/К и 0.15 %/К при температурах 293 и 200 К соответственно. Пористая структура ЛИГ обеспечивает эффективное поглощение света при углах падения света до  $\pm 30^\circ$  к нормали.

Из пленки ЛИГ был изготовлен ИК-детектор в форме меандра с тонкопленочными медными контактами. Спектральная зависимость чувствительности детектора в интервале  $0.5 < \lambda < 21 \mu\text{m}$  формируется спектром излучения глобара с особенностями, связанными с поглощением света атмосферными парами H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, а также с дисперсией показателей преломления призм оптической установки.

В области максимума чувствительности сигнал ЛИГ-детектора примерно в  $10^2 - 10^3$  раз меньше, чем у промышленного неохлаждаемого металлического болометра. Однако по сравнению с промышленными тепловыми приемниками ЛИГ-детектор может работать в частотном интервале до 10 kHz. Частотная зависимость сигнала ЛИГ-детектора определяется двумя механизмами: 1) „barrier effect“ — низкочастотный (менее 45 Hz) болометрический эффект, связанный с нагревом пленки ЛИГ при поглощении света; 2) „photogating effect“ — эффект, связанный с фотоиндукционным изменением концентрации и подвижности свободных носителей заряда (на частотах порядка и выше 10 kHz).

Максимальная чувствительность ЛИГ-детектора составила около 0.16 %/W, что более чем на порядок ниже значений, характерных для моно- и многослойного графена. Тем не менее простые в изготовлении пленки ЛИГ имеют потенциал для создания гибких приемников ближнего и среднего ИК-диапазона с малым временем

отклика. Полученные технические характеристики ЛИГ-детектора позволяют рекомендовать его для применения в различных недорогих и компактных устройствах потребительской и специализированной электроники.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобразования РФ для ИФМ УрО РАН и УдмФИЦ УрО РАН (№ 1022040600237-3-1.3.2). Часть экспериментов выполнена с использованием оборудования ЦКП „Центр физических и физико-химических методов анализа и изучения свойств и поверхностных характеристикnanoструктур, материалов и изделий“ УдмФИЦ УрО РАН.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, Da Jiang, Ya. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Fetisov. *Science*, **306**, 666 (2004). DOI: 10.1126/science.1102896
- [2] D.R. Cooper, B. D'Anjou, N. Ghattamaneni, B. Harack, M. Hilke, A. Horth, N. Majlis, M. Massicotte, L. Vandsburger, E. Whiteway. *Intern. Schol. Research Notic.*, **2012** (1), 501686 (2012). DOI: 10.5402/2012/501686
- [3] V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S.I. Khondaker, S. Seal. *Prog. Mater. Sci.*, **56**, 1178 (2011). DOI: 10.1016/J.PMATSCL.2011.03.003
- [4] П.Б. Сорокин, Л.А. Чернозатонский. *УФН*, **183** (2), 113 (2013). DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302a.0113  
[P.B. Sorokin, L.A. Chernozatonskii. *Phys. Usp.*, **56**, 105 (2013). DOI: 10.3367/UFNe.0183.201302a.0113]
- [5] A.C. Ferrari, J.C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K.S. Novoselov, S. Roth, A.K. Geim. *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 187401 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.187401
- [6] A.V. Klekachev, A. Nourbakhsh, I. Asselberghs, A.L. Stesmans, M.M. Heyns, S. De Gendt. *Electrochim. Soc. Inter.*, **22** (1), 63 (2013). DOI: 10.1149/2.F07131f
- [7] F.H.L. Koppens, T. Mueller, Ph. Avouris, A.C. Ferrari, M.S. Vitiello, M. Polini. *Nat. Nanotechnol.*, **9** (10), 780 (2014). DOI: 10.1038/nnano.2014.215
- [8] C.W.J. Beenakker. *Rev. Mod. Phys.*, **80**, 1337 (2008). DOI: 10.1103/RevModPhys.80.1337
- [9] Xu Du, D.E. Prober, H. Vora, C. McKitterick. *Graphene 2D Mater.*, **1**, 1 (2014). DOI: 10.2478/gpe-2014-0001
- [10] Y. Xie, M. Han, R. Wang, H. Zobeiri, X. Deng, P. Zhang, X. Wang. *ACS Nano*, **13**, 5385 (2019). DOI: 10.1021/acsnano.9b00031
- [11] A.L. Gorkina, E.P. Gilstein, A.G. Nasibulin, A.P. Tsapenko, Y.G. Gladush. *Infrared radiation detector based on single-layered carbon nanotubes and graphene* (Patent RU162342U1, 2016)
- [12] J.E. Elwood, K.S. Ashok. *Thermal detectors using graphene and oxides of graphene and methods of making the same* (Patent US 10937914 (B1), 2021)

- [13] R.G. Zonov, K.G. Mikheev, A.A. Chulkina, I.A. Zlobin, G.M. Mikheev. Diamond Related Mater., **148**, 111409 (2024). DOI: 10.1016/j.diamond.2024.111409
- [14] S. Evlashin, P. Dyakonov, R. Khmelnitsky, S. Dagesyan, A. Klokov, A. Sharkov, P. Timashev, S. Minaeva, K. Maslakov, S. Svyakhovskiy, N. Suetin. ACS Appl. Mater. Interf., **8**, 28880 (2016). DOI: 10.1021/acsami.6b10145
- [15] J. Lin, Z. Peng, Y. Liu, F. Ruiz-Zepeda, R. Ye, E.L.G. Samuel, M.J. Yacaman, B.I. Yakobson, J.M. Tour. Nat. Commun., **5**, 5714 (2014). DOI: 10.1038/ncomms6714
- [16] A. Bianco, H.M. Cheng, T. Enoki, Y. Gogotsi, R.H. Hurt, N. Koratkar, T. Kyotani, M. Monthoux, C.R. Park, J.M.D. Tascon, J. Zhang. Carbon, **65**, 1 (2013). DOI: 10.1016/j.carbon.2013.08.038
- [17] Y. Guo, C. Zhang, Y. Chen, Z. Nie. Nanomaterials, **12**, 2336 (2022). DOI: 10.3390/nano12142336
- [18] L. Lan, X. Le, H. Dong, J. Xie, Y. Ying, J. Ping. Biosens. Bioelectron., **165**, 112360 (2020). DOI: 10.1016/j.bios.2020.112360
- [19] M.G. Stanford, C. Zhang, J.D. Fowlkes, A. Hoffman, I.N. Ivanov, P.D. Rack, J.M. Tour, A. Ho, I.N. Ivanov, P.D. Rack, J.M. Tour. ACS Appl. Mater. Interfaces., **12**, 10902 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c01377
- [20] H. Wang, H. Wang, Y. Wang, X. Su, C. Wang, M. Zhang, M. Jian, K. Xia, X. Liang, H. Lu, S. Li, Y. Zhang, Laser. ACS Nano, **14**, 3219 (2020). DOI: 10.1021/acsnano.9b08638
- [21] M. Dosi, I. Lau, Y. Zhuang, D.S.A. Simakov, M.W. Fowler, M.A. Pope. ACS Appl. Mater. Interfaces, **11**, 6166 (2019). DOI: 10.1021/acsami.8b22310
- [22] M.G. Stanford, K. Yang, Y. Chyan, C. Kittrell, J.M. Tour. ACS Nano., **13**, 3474 (2019). DOI: 10.1021/acsnano.8b09622
- [23] N.T. Garland, E.S. McLamore, N.D. Cavallaro, D. Mendivelso-Perez, E.A. Smith, D. Jing, J.C. Claussen. ACS Appl. Mater. Interfaces, **10**, 39124 (2018). DOI: 10.1021/acsami.8b10991
- [24] W. Yan, W. Yan, T. Chen, J. Xu, Q. Tian, D. Ho. ACS Appl. Nano Mater., **3**, 2545 (2020). DOI: 10.1021/acsnanm.9b02614
- [25] C. Yi, Y. Hou, K. He, W. Li, N. Li, Z. Wang, B. Yang, S. Xu, H. Wang, C. Gao, Z. Wang, G. Gu, Z. Wang, L. Wei, C. Yang, M. Chen. ACS Appl. Mater. Interfaces, **12**, 19563 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c02774
- [26] G. Li, W.-C. Law, K.C. Chan. Green Chem., **20**, 3689 (2018). DOI: 10.1039/C8GC01347K
- [27] L. Huang, L. Ling, J. Su, Y. Song, Z. Wang, B.Z. Tang, P. Westerhoff, R. Ye. ACS Appl. Mater. Interfaces, **12**, 51864 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c16596
- [28] C.M. Title, D. Yilmaz, M.A. Pope, C.J. Backhouse. Adv. Mater. Technol., **3**, 1700207 (2018). DOI: 10.1002/admt.201700207
- [29] L. Cheng, W. Guo, X. Cao, Y. Dou, L. Huang, Y. Song, J. Su, Z. Zeng, R. Ye. Mater. Chem. Front., **5**, 4874 (2021). DOI: 10.1039/d1qm00437a
- [30] J. Li, Z. Jing, F. Zha, Y. Yang, Q. Wang, Z. Lei. ACS Appl. Mater. Interfaces, **6**, 8868 (2014). DOI: 10.1021/am5015937
- [31] T. Darmanin, F. Guittard. J. Mater. Chem. A, **4**, 3197 (2016). DOI: 10.1039/C5TA09253A
- [32] C.R. Szczepanski, F. Guittard, T. Darmanin. Adv. Colloid Interface Sci., **241**, 37 (2017). DOI: 10.1016/j.cis.2017.01.002
- [33] R. Ye, D.K. James, J.M. Tour. Adv. Mater., **31**, 1803621 (2019). DOI: 10.1002/adma.201803621
- [34] W. Song, J. Zhu, B. Gan, S. Zhao, H. Wang, C. Li, J. Wang. Small, **14**, 1702249 (2018). DOI: 10.1002/smll.201702249
- [35] W. Ma, J. Zhu, Z. Wang, W. Song, G. Cao. Mater. Today Energy, **18**, 100569 (2020). DOI: 10.1016/j.mtener.2020.100569
- [36] J. Cai, C. Lv, A. Watanabe. J. Mater. Chem. A, **4**, 1671 (2016). DOI: 10.1039/C5TA09450J
- [37] P. Zaccagnini, D. di Giovanni, M.G. Gomez, S. Passerini, A. Varzi, A. Lamberti. Electrochim. Acta, **357**, 136838 (2020). DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136838
- [38] D. Yang, C. Bock. J. Power Sources, **337**, 73 (2017). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.10.108
- [39] Y. Wang, Y. Zhao, L. Qu. J. Energy Chem., **59**, 642 (2021). DOI: 10.1016/j.jechem.2020.12.002
- [40] J. Yi, J. Chen, Z. Yang, Y. Dai, W. Li, J. Cui, F. Ciucci, Z. Lu, C. Yang, Adv. Energy Mater., **9**, 1901796 (2019). DOI: 10.1002/aenm.201901796
- [41] R. Ye, Z. Peng, T. Wang, Y. Xu, J. Zhang, Y. Li, L.G. Nilewski, J. Lin, J.M. Tour. ACS Nano, **9**, 9244 (2015). DOI: 10.1021/acsnano.5b04138
- [42] D.X. Luong, K. Yang, J. Yoon, S.P. Singh, T. Wang, C.J. Arnusch, J.M. Tour. ACS Nano, **13**, 2579 (2019). DOI: 10.1021/acsnano.8b09626
- [43] Y. Chyan, R. Ye, Y. Li, S.P. Singh, C.J. Arnusch, J.M. Tour, ACS Nano, **12**, 2176 (2018). DOI: 10.1021/acsnano.7b08539
- [44] L. Huang, S. Xu, Z. Wang, K. Xue, J. Su, Y. Song, S. Chen, C. Zhu, B.Z. Tang, R. Ye. ACS Nano, **14**, 12045 (2020). DOI: 10.1021/acsnano.0c05330
- [45] R.M. Torrente-Rodríguez, H. Lukas, J. Tu, J. Min, Y. Yang, C. Xu, H.B. Rossiter, W. Gao. Matter, **3**, 1981 (2020). DOI: 10.1016/j.matt.2020.09.027
- [46] K.G. Mikheev, R.G. Zonov, T.N. Mogileva, A.E. Fateev, G.M. Mikheev. Opt. Laser Technol., **141**, 107143 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107143
- [47] X. Yu, N. Li, S. Zhang, C. Liu, L. Chen, S. Han, Y. Song, M. Han, Z. Wang. J. Power Sources, **478**, 229075 (2020). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229075
- [48] К.Г. Михеев, Р.Г. Зонов, Д.Л. Булатов, А.В. Сюгаев, Г.М. Михеев. Письма в ЖТФ, **50** (20), 3 (2024).
- [49] К.Г. Михеев, Р.Г. Зонов, Н.В. Чучкалов, Г.М. Михеев. ФТТ, **66** (2), 280 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.02.57252.5
- [50] K.G. Mikheev, R.G. Zonov, D.L. Bulatov, A.E. Fateev, G.M. Mikheev. Tech. Phys. Lett., **46**, 458 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020050119
- [51] C. Zhang, Y. Xie, H. Deng, T. Tumlin, C. Zhang, J.W. Su, P. Yu, J. Lin. Small, **13**, 1604197 (2017). DOI: 10.1002/smll.201604197
- [52] Yu.P. Sukhorukov, A.V. Telegin, K.G. Mikheev, R.G. Zonov, L.I. Naumova, G.M. Mikheev. Opt. Mater., **133**, 112957 (2022). DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112957
- [53] R.G. Zonov, K.G. Mikheev, D.L. Bulatov, T.N. Mogileva, A.V. Syugaev, G.M. Mikheev. Diam. Relat. Mater., **157**, 112529 (2025). DOI: 10.1016/j.diamond.2025.112529
- [54] K.G. Mikheev, R.G. Zonov, T.N. Mogileva, A.E. Fateev, G.M. Mikheev. Opt. Laser Technol., **141**, 107143 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107143
- [55] A.V. Kuksin, A.Y. Gerasimenko, Y.P. Shaman, E.P. Kitsyuk, A.A. Shamaeva, A.V. Sysa, E.M. Eganova, M.M. Slepchenkov, M.V. Poliakov, A.A. Pavlov, O.E. Glukhova. Appl. Surf. Sci., **664**, 160222 (2024). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160222

- [56] N.P. Nekrasov, D.T. Murashko, P.N. Vasilevsky, A.Y. Gerasimenco, V.K. Nevolin, I.I. Bobrinetskiy. Semiconductors, **58**, 1109 (2024). DOI: 10.1134/S1063782624700131
- [57] J. Zhai, Z. Yu, J. Hu. Manuf. Process, **146**, 211 (2025). DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.05.001
- [58] N.N. Nghia, D.T.C. Minh, N.H. Hieu. Microchem. J., **213**, 113713 (2025). DOI: 10.1016/j.microc.2025.113713
- [59] К.Г. Михеев, Р.Г. Зонов, А.В. Сюгаев, Д.Л. Булатов, Г.М. Михеев. ФТТ, **64**, 587 (2022). DOI: 10.21883/ftt.2022.05.52341.277
- [60] Z. Yin, S. Chen, C. Hu, J. Li, X. Yang. Opt. Laser Technol., **176**, 110998 (2024). DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110998
- [61] X. Li, W. Cai, K.S. Teh, M. Qi, X. Zang, X. Ding, Y. Cui, Y. Xie, Y. Wu, H. Ma, Z. Zhou, Q.A. Huang, J. Ye, L. Lin. ACS Appl. Mater. Interfaces, **10**, 26357 (2018). DOI: 10.1021/acsami.8b10301
- [62] A. Rabti, S. Baachaoui, M. Zouari, N. Raouafi. J. Pharm. Biomed. Anal. Open, **5**, 100069 (2025). DOI: 10.1016/j.jpba.2025.100069
- [63] I.V. Antonets, E.A. Golubev, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov. J. Radio Electron., **3**, 1684 (2020). DOI: 10.30898/1684-1719.2020.3.7
- [64] P.L. Richards. J. Appl. Phys., **76** (1), 1 (1994). DOI: 10.1063/1.357128
- [65] Б.Н. Формозов. *Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах* (СПбГУАП, СПб, 2002)
- [66] А.Н. Александров, В.А. Никитин. УФН, **56** (5), 3 (1955).
- [67] D.S.L. Abergel, V. Apalkov, J. Berashevich, K. Ziegler, T. Chakraborty. Adv. Phys., **59** (4), 261 (2010). DOI: 10.1080/00018732.2010.487978
- [68] А.В. Елецкий, И.М. Искандарова, А.А. Книжник, Д.Н. Красиков. УФН, **181** (3), 233 (2011). DOI: 10.3367/UFNe.0181.201103a.0233
- [69] Р.А. Браже, А.И. Кочаев, Р.М. Мефтахутдинов. *Графены и их физические свойства* (УлГТУ, Ульяновск, 2016)
- [70] J.I. Bae, J.H. Yoon, S. Jeong, B.H. Moon, J.T. Han, H.J. Jeong, G.W. Lee, H.R. Hwang, Y.H. Lee, S.Y. Jeong, S.C. Lim. Nanoscale, **7**, 15695 (2015). DOI: 10.1039/C5NR04039F
- [71] J. Yan, M.H. Kim, J.A. Elle, A.B. Sushkov, G.S. Jenkins, H.W.M. Milchberg, M.S. Fuhrer, H.D. Drew. Nat. Nanotechnol., **7**, 472 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.88
- [72] К.Г. Михеев, Р.Г. Зонов, Н.В. Чучкалов, Г.М. Михеев. ФТТ, **66**, 280 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.02.57252.5
- [73] Q. Wang, Y. Wu, X. Deng, L. Xiang, K. Xu, Y. Li, Y. Xie. Nanomaterials, **12**, 495 (2022). DOI: 10.3390/nano12030495