

07

Широкополосный детектор ИК-излучения на основе лазерно-индуцированного графена

© Ю.П. Сухоруков,¹ А.В. Телегин,¹ Р.Г. Зонов,² Г.М. Михеев²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
620108 Екатеринбург, Россия

²Удмуртский 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 ($\sim 0.16 \text{ \%}/\text{W}$) 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 фотоиндуцированных 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 ($\sim 10^{12}$ 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], микрожидкостных 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 m^2/g , состоящую из нанокристаллитов турбоэпитакциального графита, случайным образом ориентированных друг относительно друга [53]. Синтез ЛИГ производился на воздухе при обычных условиях в результате лазерного пиролиза углеродосодержащего прекурсора в виде полиимидной пленки толщиной $125 \mu\text{m}$. Детектор ИК-излучения (вставка на рис. 1, а) был получен на поверхности полиимидной пленки построчным сканированием сфокусированным пучком непрерывного газового (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 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 (CO_2 -лазеры) отличаются относительно невысокой стоимостью и простотой в эксплуатации.

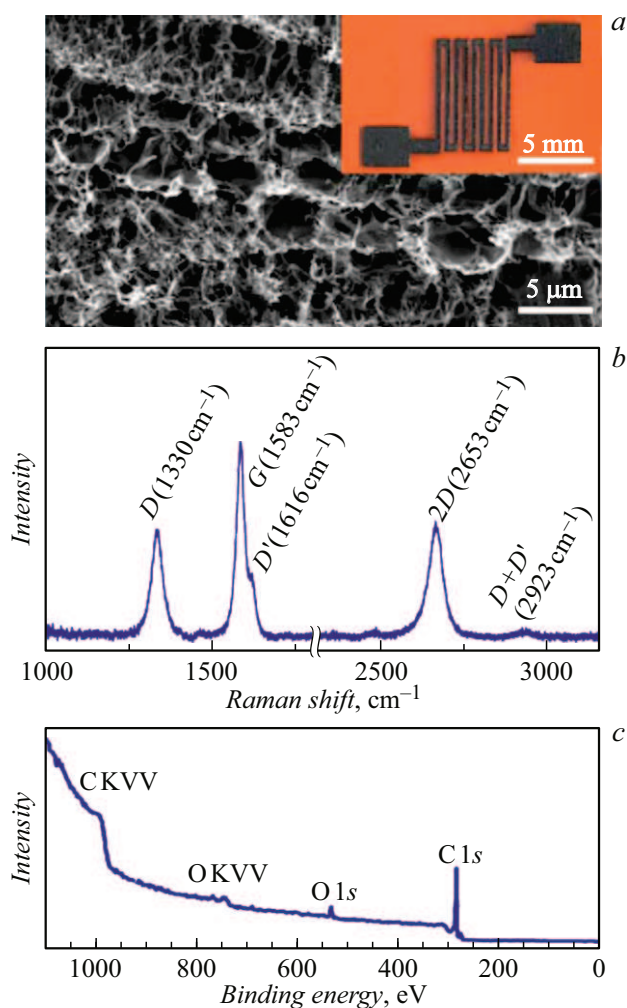


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности ЛИГ (а) (на вставке приведена фотография ЛИГ-детектора в виде меандра), спектр комбинационного рассеяния света (b) и обзорный РФЭС спектр поверхности ЛИГ (c).

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 $2 \times 2 \text{ mm}$. При этом освещаемая поверхность меандра составляла $5 \times 8 \text{ mm}$. 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, а 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

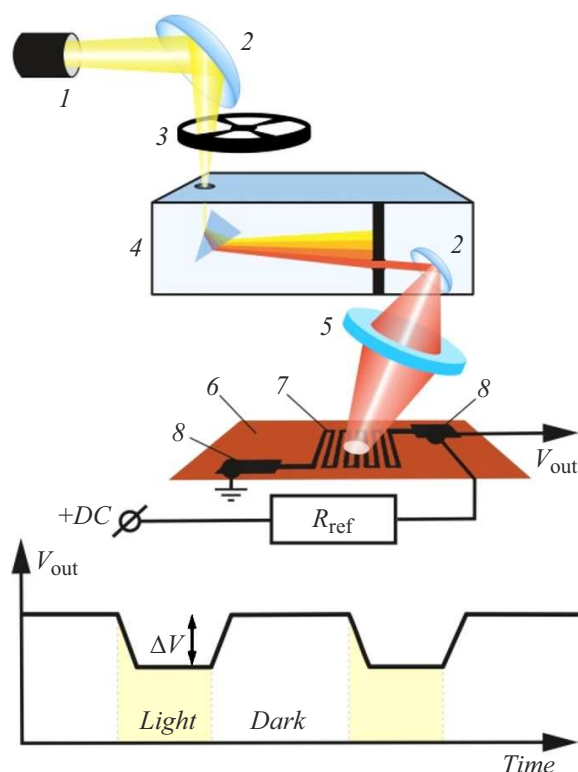


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — глобар, 2 — параболическое зеркало, 3 — механический обтюратор, 4 — монохроматор, 5 — линза из KBr, 6 — полиимидная пленка, 7 — ЛИГ-детектор, выполненный в виде меандра на поверхности полиимидной пленки, 8 — контактные площадки. Нижняя часть рисунка условно демонстрирует 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 волны 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]. Похожие 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 спектроскопии (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 полиимидной 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 $\rho \sim 0.075 \Omega \cdot \text{cm}$) 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 (δ) в среднем ИК-диапазоне может быть оценена как $\delta = 2\rho\lambda/\mu_0 c^{1/2} \sim 5.4 \mu\text{m}$ на длине волны $\lambda = 20 \mu\text{m}$ (μ_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 δ_{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 δ_{opt} значительно меньше δ . Поскольку оцениваемая толщина синтезированного ЛИГ ($d = 20 \mu\text{m}$) превышает δ ($d > \delta > \delta_{opt}$), 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 клеем 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 ΔV , 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 призмного 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 ΔV определялось как изменение электросопротивления (ΔR) ЛИГ-детектора в результате его нагрева на величину ΔT 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_{ref} — сопротивление нагрузки, равное темновому сопротивлению меандра (см. выше), R_d — сопротивление освещенного меандра.

Величина ΔV 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 (количества 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 ΔV достигает максимальных значений [52,64] (рис. 3).

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

Спектр ΔV 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

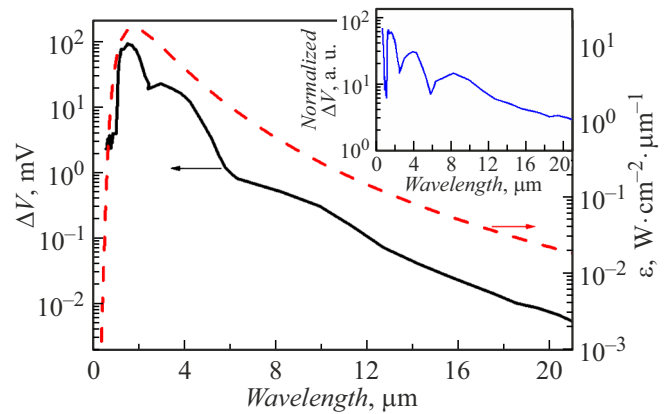


Рис. 3. Спектр фотоотклика (ΔV) ЛИГ-детектора при $f = 9.1 \text{ Hz}$ (левая ось ординат) и спектр излучения АЧТ (ε) (правая ось) при $T = 1653 \text{ K}$. На вставке приведен спектр фотоотклика ЛИГ-детектора, нормированный на спектр АЧТ.

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 H_2O и CO_2 [66]. Размытость этих особенностей связана с большой спектральной шириной щели ($\Delta\lambda$) призмного 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 H_2O и CO_2 , усиливаются, а амплитуда ΔV — уменьшается. Необходимо отметить, что слабый монотонный спад ΔV при увеличении длины волны 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 Ви-болметр 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 обтюлятора.

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 ΔV для болометра по выражению $f_t = 1/\tau$ дает величину $f_t \approx 5 \text{ Hz}$, где $\tau \approx C/G$ [54], $C \approx 12 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ — теплоемкость графена при $T = 300 \text{ K}$ [1], $G \approx 5000 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ — теплопроводность графена [68,69]. Расхождение с экспериментально наблюдаемой частотой максимума ΔV 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 β определяет чувствительность детектора к температурным изменениям, т.е. его обнаружительную способность. В работе параметр β для

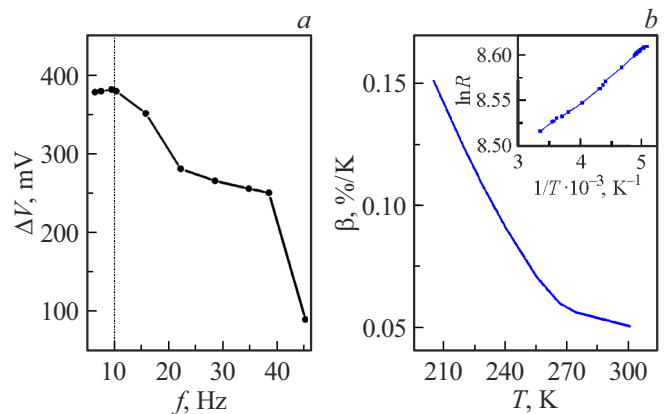


Рис. 4. *a* — частотная зависимость фотоотклика (ΔV) для ЛИГ-детектора при $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$; *b* — температурная зависимость коэффициента термического сопротивления ЛИГ (β). На вставке — обратная температурная зависимость сопротивления ЛИГ-детектора.

ЛИГ рассчитывался по наклону температурной зависимости сопротивления $R(T)$ в диапазоне 200 – 300 K и составил $\beta \approx 0.05 \text{ \%}/\text{K}$ при $T = 293 \text{ K}$ и $\beta \approx 0.15 \text{ \%}/\text{K}$ 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 β 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 ΔV 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), включающих 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 ΔV 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_{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 ΔV 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 р-п-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 разными углами. Минимальная или пороговая мощность излучателя, регистрируемая ЛИГ-детектором, составила $P_{\text{min}} = \vartheta dP/dR = 0.16\%/\text{W}$, 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}

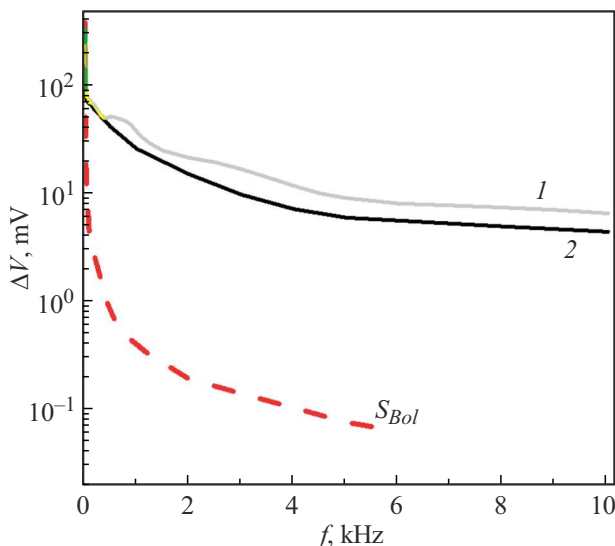


Рис. 5. Частотная зависимость фотоотклика (ΔV) ЛИГ-детектора при модуляции излучения светодиода $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ механическим обтюратором (кривая 1) и генератором высокой частоты (кривая 2). Штриховой линией для сравнения приведена кривая чувствительности идеального болометра (S_{Bol}), рассчитанная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

на порядок ниже значений, характерных для моно- и многослойного графена [9], но соизмерима с данными, например, для нанокompозитных пленок MoS_2 с высоким β [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_2 -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 $4300 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Коэффициент термического сопротивления ЛИГ составляет примерно 0.05 %/K и 0.15 %/K при температурах 293 и 200 K 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_2O и CO_2 , 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 фотоиндуцированным 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 Минобрнауки 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 характеристик наноструктур, 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, D. 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.pmatsci.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. *Electrochem. Soc. Inter.*, **22** (1), 63 (2013). DOI: 10.1149/2.F07131if
- [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. Khmel'nitsky, S. Dagesyan, A. Klovov, 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. Monthieux, 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/acsanm.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. Tittle, D. Yilman, 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. Shamanaev, 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. Gerasimenko, 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. Красников. *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.J. 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