

## Детектор ИК диапазона на основе графеновых нанополос

© И.В. Ивашенцева,<sup>1</sup> П.В. Федотов,<sup>2,3</sup> Н.С. Каурова,<sup>1</sup> М.Г. Рыбин,<sup>2</sup> Е.Д. Образцова,<sup>2,3</sup>  
И.В. Третьков,<sup>4</sup> Г.Н. Гольцман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет,  
119435 Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр „Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН“,  
119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
117997 Москва, Россия

email: ivantretkov@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 6 мая 2024 г.

Принято к публикации 14 мая 2024 г.

Представлена технология сенсibilизации структуры, состоящей из нанополоски графена на кремниевой подложке Si/GNR в ближнем IR-диапазоне электромагнитного спектра, основанная на легировании графеновой нанополоски GNR с помощью He<sup>4</sup>. Экспериментально продемонстрировано увеличение отклика более чем 25 раз на длине волны 1.35  $\mu\text{m}$  в структуре Si/GNR/He<sup>4</sup>, по сравнению с Si/GNR не легированной He<sup>4</sup>. Также Si/GNR\_He<sup>4</sup> структура проявляет ярко выраженные многоуровневые мемристорные свойства под действием инфракрасного излучения.

**Ключевые слова:** графен, нанополоска графена, инфракрасный диапазон, детектор.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58568.31-24

### Введение

Как полупроводниковый материал кремний (Si) наиболее освоено технологически и является основой современной интегральной микроэлектроники, а использование планарных фотонных Si-волноводов открывает совершенно новые возможности в области современной интегральной оптики. Высокий коэффициент преломления кремния позволяет изготавливать малые по размерам оптические компоненты, чьи типичные размеры на порядок меньше чем у их оптоволоконных аналогов; кроме того, удается достичь несравнимо высокой оптической плотности излучения в сечении Si-волноводов. Кремниевая фотоника предоставляет возможность плотной интеграции на одном относительно небольшом чипе большого количества оптических элементов, составляющих оптическую схему конечного устройства. Si имеет ширину запрещенной зоны  $\Delta E = 1.12 \text{ eV}$ , по этой причине он прозрачен для инфракрасного инфракрасного (ИК) излучения начиная с длины волны  $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$ , кроме того, его  $\epsilon$  неизменна в широком диапазоне мощностей ИК излучения. Эти свойства позволяют изготавливать диэлектрические одномодовые волноводы и пассивные элементы с малыми потерями, однако не дают возможности легко создавать из Si активные оптические элементы ИК диапазона, такие как детекторы излучения, оптические элементы памяти, модуляторы, газовые сенсоры и пр. Для этого требуется либо ло-

кальное легирование Si, либо интеграция не кремниевых электрооптических материалов.

Так, для создания детекторов ИК излучения современные подходы предполагают высокотемпературное легирование Si атомами S, Se, Te [1–4] и некоторыми переходными металлами (Au, Ag, Ti и др.) [5–12]. Ярким примером является высокотемпературное легирование Si частицами серебра Ag, при этом удается достичь улучшения чувствительности фотодетектора в 2.5 раза по сравнению с чистым Si [13]. Однако метод ионной имплантации сопряжен с высокими температурами, что зачастую является принципиальным ограничением в современных схемах интегральной оптики.

Крайне перспективным для создания активных элементов интегральных оптических схем является использование двумерных материалов, поскольку 2D-материалы могут быть легко перенесены на любую подложку. Графен (Gr) и родственные 2D-материалы ярко демонстрируют свои преимущества для широкого спектра оптоэлектронных приложений [14], таких как передача данных [15–17], высокопроизводительные светодиоды [18], сверхбыстрая оптическая модуляция [19] и фотодетектирование со скоростью до 80 GHz [20] и с верхширокополосное фотодетектирование [21–28]. Также на основе двумерных материалов были продемонстрированы работы несколько высокопроизводительных электронных устройств и датчиков, таких как сверхчувствительные датчики Холла [29,30], датчики

деформации [31], биосенсоры [32], газовые датчики [33] и высокочастотные транзисторы [34,35].

Структуры графен/квантовые точки QD из сульфида свинца PbS успешно используются в CMOS-матрицах как альтернатива Si-фотодетекторам [36]. Использование QD различного состава в сочетании с Gr позволяет тонко настраивать спектральный диапазон детектора в зависимости от области поглощения QD [37–41]. Процесс изготовления высококачественных QD основан на методах молекулярно-лучевой эпитаксии и сопряжен с высокой стоимостью изготовления. Изготовление коллоидных QD, таких как Ag<sub>2</sub>S, PbS и др., является более дешевым способом, однако получаемые чистота коллоидного раствора и качество QD существенно ниже, что существенно ограничивает их использование. Кроме того, до конца не решена задача с мерцанием QD. Графеновые нанополосы (GNRs) привлекают интерес своей ярко выраженной зависимостью электронных и оптических свойств от структуры GNR, в особенности от типа края и ширины полоски [42]. Запрещенная зона отсутствует в электронной структуре графена. Но, несмотря на это, в узких нанополосах графена (GNR) с определенным типом края запрещенная зона появляется. Запрещенная зона увеличивается с уменьшением ширины нанополосы [43]. GNRs имеют много прикладных применений, особенно в качестве полевого транзистора [44–46]. Сильное электронно-дырочное взаимодействие в нанополосах графена было открыто в теоретических работах [47,48]. Структурные параметры определенного типа GNR (тип края и ширина полоски) определяют спектральное положение сингулярностей в спектрах. Графеновые нанополосы AGNR с краями типа кресло (фенантреновые края) характеризуются числом  $N$  линий углеродных димеров, расположенных вдоль ширины нанополосы. Они делятся на три разные группы, для каждой из которых число  $N$  может быть представлено в виде  $3p$ ,  $3p + 1$  или  $3p + 2$  ( $p$  — натуральное число). Например, графеновые нанополосы 7-AGNR относятся к группе  $3p + 1$ , для которой ширины запрещенной зоны нанополос GNR являются самыми большими среди этих трех групп.

В настоящей работе мы исследовали спектральный отклик кремниевой Si-структуры, покрытой GNR в атмосфере He<sup>4</sup> при десятых долях единицы ррт. He<sup>4</sup> использовался для легирования GNR вместо квантовых точек. Использование газов позволяет точно контролировать необходимый уровень легирования. При необходимости Si/GNR полностью очищались He<sup>4</sup>, для этого структура нагревалась до 120 – 150°C и выдерживалась в вакууме.

## 1. Технология изготовления графеновых нанополос

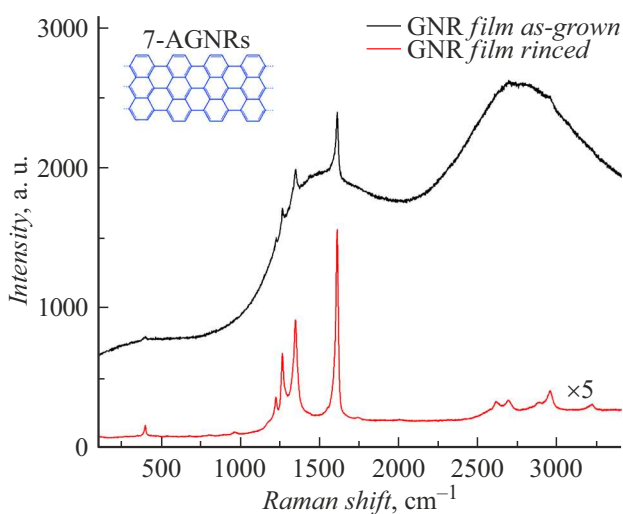
Пленки нанополос графена 7-AGNR были синтезированы из молекул 10,10-дибром-9,9-биантрацен (DBBA) на никелевой (Ni) фольге методом модифицированного

химического осаждения из газовой фазы (CVD), на основе нанотехнологии типа „снизу–вверх“ [49]. Этот метод был уже ранее использован для производства пленок 7-AGNR [49,50] и 3-AGNR [51]. В качестве подготовки Ni фольга была сначала отожжена при температуре 1000°C потоком 100 sccm водорода (H<sub>2</sub>) в течение 15 min, а далее охлаждена в среднем вакууме. Затем Ni-фольга была помещена в стеклянную трубку с порошком DBBA ( $\approx 1$  mg). Далее стеклянная трубка вместе с Ni-фольгой была запаяна при откачке вакуумным насосом (10–3 mbar). Герметично запаянная стеклянная трубка была помещена в кварцевый трубчатый реактор и отожжена в двухэтапном процессе. Первый этап включает в себя дегалогенирование и полимеризацию молекул DBBA. Это происходит во время отжига образцов при температуре 190°C в течение 12–24 h. Пленки из полиантриленовых (PA) олигомеров могут быть получены на этой стадии синтеза. Второй этап состоит из внутримолекулярного циклодегидрирования PA во время отжига при температуре 340°C в течение 1–3 h. Этот этап синтеза трансформирует PA олигомеры в 7-AGNR. Уже после этих двух этапов синтеза можно получить тонкие пленки из нанополос графена на никелевой фольге.

Как правило, синтезированные пленки состоят из графеновых нанополос GNR, а полиантриленовые олигомеры — лишь промежуточный результат. После процесса синтеза пленки GNR тщательно промывались в изопропанол. Этот этап необходим для того, чтобы очистить пленки нанополос от остатков PA олигомеров, которые могут еще в них присутствовать. Для того чтобы получить суспензию оптического качества, пленка из нанополос графена, синтезированная на никелевой фольге, помещалась в толуол и аккуратно перемешивалась в течение 10 min. При этом часть нанополос переходило в раствор толуола. После этого оставшаяся часть пленки нанополос на фольге извлекалась из раствора. Далее для лучшей индивидуализации нанополос суспензия нанополос графена в толуоле подвергалась ультразвуковой обработке в течение 10 min при низкой мощности ультразвука. Характерный размер пленки нанополос графена на никелевой фольге 1 см<sup>2</sup>. Ширина нанополос графена 7-AGNR приблизительно 0.75 nm [43]. Осаждение нанополос графена (GNR) из суспензии на подложку из кремния Si было осуществлено капельным методом.

## 2. Спектроскопия комбинационного рассеяния света GNR-нанополос

Спектры комбинационного рассеяния (КР) света и спектры фотолюминесценции были получены с помощью спектрометра LabRAM HR Evolution, оснащенного одиночным монохроматором и набором фильтров для измерения сверхнизких частот. Для оптимизации измерений применялась конфокальная оптическая схема. Для оптического возбуждения был использован диодный



**Рис. 1.** Типичные спектры КР синтезированных (черный спектр) и промытых толуолом (красный спектр) пленок 7-AGNR. Спектры получены при возбуждении 532 nm. Интенсивность спектра КР пленок 7-AGNR, промытых толуолом, увеличена в 5 раз для наглядности. На вставке изображена схема нанополос графена типа 7-AGNR.

лазер (532 nm). В спектрах КР спектральное разрешение было порядка  $1.0 \text{ cm}^{-1}$ . В спектрах фотолюминесценции спектральное разрешение было равно  $0.5 \text{ nm}$ .

Синтезированные и промытые в толуоле пленки из графеновых нанополос обладают уникальными характеристическими маркерами КР, которые свойственны 7-AGNR, согласно разным экспериментальным и теоретическим работам (рис. 1) [52–55].

Полосой с наибольшей интенсивностью в спектрах КР является G-мода пленок 7-AGNR, на частоте  $1606 \text{ cm}^{-1}$ . G-мода типична для  $sp^2$ -углеродных материалов, включая графен и углеродные нанотрубки. G-мода графена и нанополос графена GNR похожи, однако обычно G-мода нанополос графена разделена на две компоненты:  $G^+$  и  $G^-$  моды. Опираясь на теоретические работы, в GNR типа „кресло“ наблюдается  $G^+$  компонента  $G^-$  моды, которая является поперечной в плоскости нанополосы графена оптической основной модой [56]. Мода  $G^+$  обладает более высокой частотой КР. В экспериментальных работах в пленках 7-AGNR наблюдается интенсивная мода  $G^+$ , а интенсивность моды  $G^-$ , как правило, бывает достаточно низкой.

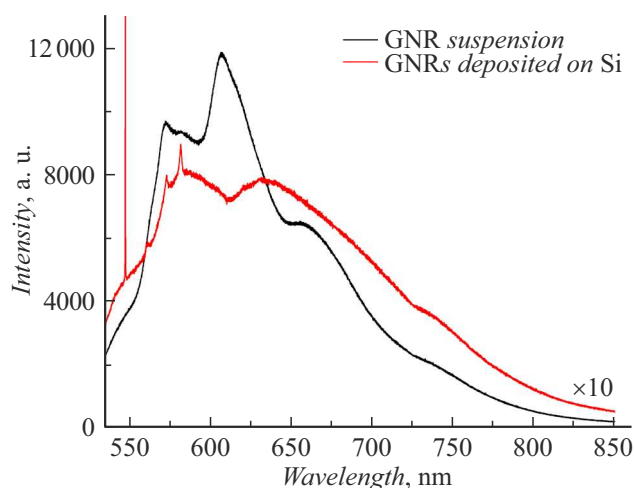
Второй по интенсивности особенностью в спектрах пленок 7-AGNR является так называемая D-мода с частотой  $1343 \text{ cm}^{-1}$ . D-мода часто встречается в графене и углеродных нанотрубках, для которых эта КР мода является междолинным процессом с двойным резонансом. Как правило, она активируется дефектами в материале. Для графена и углеродных нанотрубок высокая интенсивность D-моды является признаком высокой концентрации дефектов. В то же время интенсивность D-моды в спектрах КР нанополос графена GNR типа „кресло“

может быть высокой, вне зависимости от концентрации дефектов [52–55]. Высокая интенсивность D-моды типична для атомарно-точных нанополос графена [52–54].

Одной из наиболее характерных мод КР узких графеновых нанополос является радиальная дыхательно-подобная мода (RBLM), которая обладает разными резонансными частотами, в зависимости от ширины полоски. Резонансная частота RBLM увеличивается с уменьшением ширины GNR. В случае синтезированных пленок GNR резонансная частота радиальной дыхательно-подобной моды была определена на частоте  $397 \text{ cm}^{-1}$ , что хорошо соответствует ожидаемой частоте RBLM моды 7-AGNR.

В спектре КР пленок 7-AGNR также зарегистрированы две моды, которые находятся на частотах  $1220$  и  $1260 \text{ cm}^{-1}$ , которые ассоциированы с химическими связями C-H на краях нанополос графена. Эти спектральные моды ассоциированы со специфическими колебаниями изгиба связей C-H в плоскости нанополос. Другие типичные моды КР 7-AGNR также могут наблюдаться: набор мод второго порядка в спектральном диапазоне частот  $2580\text{--}3250 \text{ cm}^{-1}$ , которые связаны с комбинациями мод, наблюдаемых на более низких резонансных частотах [54].

На спектрах КР синтезированных пленок нанополос графена (рис. 1) наблюдается фоновая фотолюминесценция (ФЛ). Интенсивность ФЛ пленок нанополос значительно уменьшается после частичного удаления GNR в суспензию методом промывания в толуоле или ультразвуковой обработки пленок в толуоле. При возбуждении длиной волны 532 nm полученная суспензия из 7-AGNR в толуоле показывает яркую ФЛ в диапазоне  $560\text{--}660 \text{ nm}$  (рис. 2). После осаждения 7-AGNR на



**Рис. 2.** Типичные спектры ФЛ суспензии нанополос графена 7-AGNR (черный спектр) и нанополос графена 7-AGNR, осажденных на подложку кремния (красный спектр). Спектры получены при возбуждении 532 nm. Интенсивность ФЛ нанополос 7-AGNR, осажденных на подложку кремния, увеличена в 10 раз для наглядности. Спектрально узкая особенность на длине волны 547 nm ассоциирована с подложкой кремния.

субстрат кремния Si капельным методом интенсивность ФЛ графеновых нанополос в диапазоне 540–720 nm существенно уменьшается. ФЛ пик 7-AGNR, осажденных на субстрат кремния, заметно шире, и наблюдается небольшое красное смещение полосы ФЛ. Высокая интенсивность ФЛ 7-AGNR в суспензии связана с индивидуализацией нанополос в растворе толуола (рис. 2). Уменьшение интенсивности осажденных GNR ассоциируется с агрегированием нанополос в результате осаждения и взаимодействием с субстратом кремния.

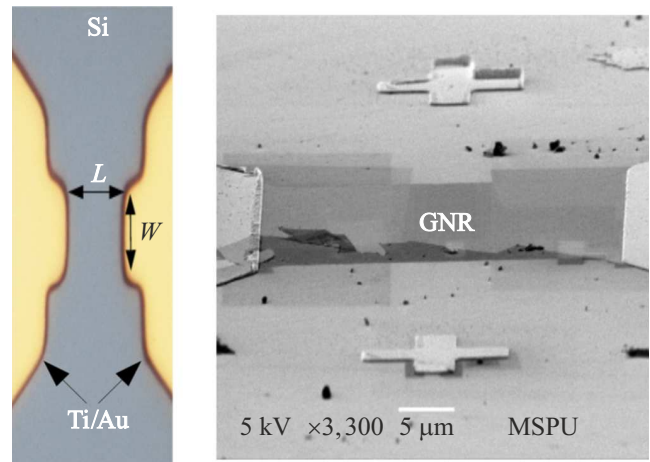
### 3. Структура и методика измерения детектора на основе GNR нанополос графена

Si-структуры изготавливались стандартными методами лазерной литографии, термического осаждения металлов и lift-off процессом на основе высокоомного Si, толщина подложки составляла 350  $\mu\text{m}$ . Контакты Si-структуры формировались последовательным термическим осаждением Ti и Au. С помощью лазерной литографии задавалась ширина Ti/Au контактов  $W$  и расстояние между ними  $L$ , тем самым определялись геометрические размеры исходной Si-структуры. В настоящей работе было выбрано  $W$  и  $L$  равными 10  $\mu\text{m}$ . На рис. 3 представлены оптическое изображение и устройство исследуемых образцов. При создании структуры Si/GNR важным является момент подготовки Si-поверхности образца между Ti/Au-контактами. Поверхность Si-пластины подготавливалась последовательно методами ионного травления в атмосфере Ar и O<sub>2</sub> и жидкостного травления во фтороводородной кислоте. Последовательность процессов чистки позволяет избавиться от загрязнений и природного оксида на поверхности Si.

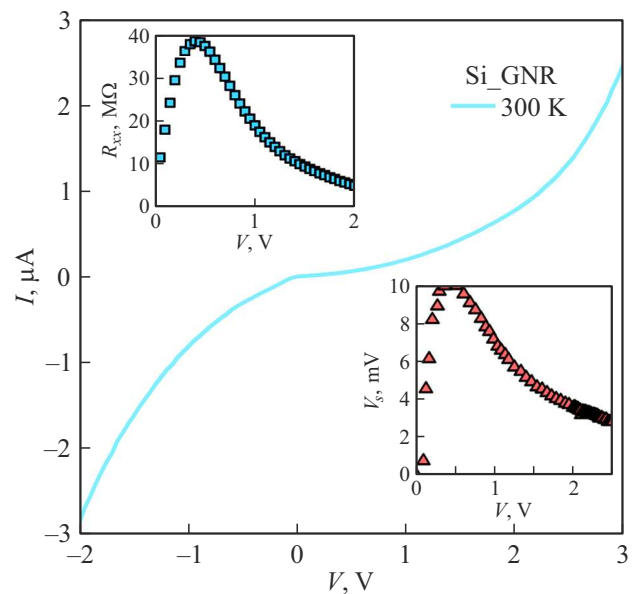
На рис. 3 (слева) показано изображение поверхности Si между Ti/Au-контактами, полученное при помощи оптического микроскопа до нанесения Gnr-нанополосок (GNR), справа SEM-изображение с кластером Gnr-нанополосок. Как видно, кластер Gnr-нанополосок — более темная структура расположена на поверхности Si — не взаимодействует с другими нанополосками.

Для прямого согласования исследуемых образцов с ИК излучением использовалась гиперполусферическая кремниевая линза. Падающее на линзу излучение собиралось в пятно Эйри на поверхности Si-площадки между Ti/Au-контактами. Образцы экранировались от фонового излучения оптическим окном из высокоомного Si толщиной 500  $\mu\text{m}$ , при отсутствии ИК-излучения, сопротивление образцов  $R$  составляло порядка 20 М $\Omega$ . На рис. 4 представлена характерная вольт-амперная характеристика исследуемых Si/GNR-структур в вакууме 1 · 10<sup>-6</sup> mBar.

Исследования амплитуды отклика образцов как функции длины волны ИК-излучения  $S_V(\lambda)$  были выполнены на ИК спектрометре в диапазоне 1 – 2  $\mu\text{m}$ . В процессе



**Рис. 3.** Изображение Ti/Au-контактов на поверхности подложки из высокоомного Si, полученное при помощи оптического микроскопа до нанесения Gnr-нанополосок (слева),  $L$  — расстояние между контактами,  $W$  — ширина контактов ( $L = W = 10 \mu\text{m}$ ); SEM-изображение нанесенного кластера Gnr-нанополосок между Ti/Au-контактами структуры (справа). Излучение с помощью эллиптической линзы собиралось на поверхности Si между Ti/Au-контактами.



**Рис. 4.** Вольт-амперная характеристика Si/GNR-структуры, полученная в вакууме.

измерений образец находился при комнатной температуре 300 K в оптическом вакуумном объеме, смещенный по постоянному току. Процесс легирования проводился путем напуска He<sup>4</sup> в вакуумный объем, He<sup>4</sup> взаимодействовал со смещенной по постоянному току Si/GNR в течение 10 min, после чего вакуумный объем снова откачивался до давления 1 · 10<sup>-6</sup> mBar.

Легирование нанополос графена может приводить к перестройке электронных уровней нанополос и приво-

дит к появлению оптической активности 7-AGNR в ИК области спектра [50]. В легированных 7-AGNR могут появляться трионы, которые наблюдаются в спектрах ФЛ в ИК области спектра [50].

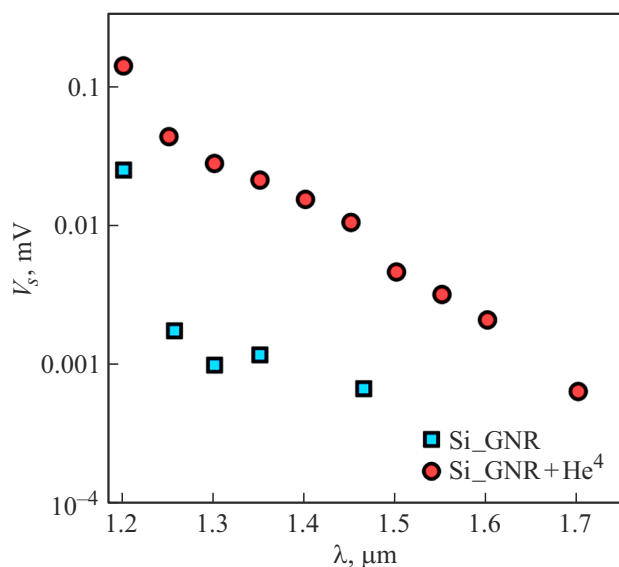
#### 4. Результаты исследования амплитуды отклика

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования  $S_v(\lambda)$  для Si/GNR и Si/GNR/He<sup>4</sup>. Зависимость  $S_v(\lambda)$  Si/GNR-структуры приведена для оценки эффекта расширения полосы поглощения при легировании He<sup>4</sup> гетероструктуры Si/GNR.

Из рис. 5 для Si/GNR-структуры видно, что зависимость  $S_v(\lambda)$ , имея максимум на  $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$ , резко падает уже при  $\lambda = 1.25 \mu\text{m}$ , такие же данные были получены и для Si-образца, не покрытого графеновыми нанополосками. После легирования графеновых нанополосок Si/GNR  $S_v(\lambda)$  демонстрирует монотонный характер падения вплоть до  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ . Большой отклик для Si/GNR\_He<sup>4</sup> по сравнению с Si/GNR-структурой на длинах волн более  $1.1 \mu\text{m}$  может быть объяснен модификацией энергетического спектра GNR при взаимодействии с He<sup>4</sup>. Для количественной оценки эффекта легирования удобно привести величину отношения сигнала для Si/GNR\_He<sup>4</sup>-структуры к сигналу для Si/GNR-структуры, взятого на заданной  $\lambda$ . В нашем эксперименте это отношение составило более 25 раз на  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ . Можно с уверенностью сказать, что определяющий вклад в детектирование ИК излучения на длинах волн выше  $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$  в комплементарной структуре Si/GNR\_He<sup>4</sup>

вносят именно GNR\_He<sup>4</sup> на поверхности Si, уровень легирования определяет фотопроводимость GNR.

Так, при поглощении IR-фотонов происходит локальный разогрев GNR, учитывая низкую теплопроводность Gr, можно предположить, что его температура локально поднимается так высоко, что это приводит к уходу He<sup>4</sup> из GNR. Такое поведение наблюдалось при изучении зависимости отклика Si/GNR\_He<sup>4</sup> как функции воздействующей IR-мощности,  $V/W$ .  $V/W$ -чувствительность исследуемых в настоящей работе гетероструктур в единицах  $V/W$  измерялась отдельно на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ . В качестве источника ИК излучения использовался термостабилизированный лазерный диод. При измерении  $V/W$ -чувствительности мощность излучения лазерного диода выбиралась так, что отношение сигнал/шум  $V_s/V_n$  не превышало 1.5-2 раза, это должно было гарантировать линейный режим работы исследуемых структур. Величины сигнала  $V_s$  и шума  $V_n$  структуры измерялись на частоте модуляции излучения лазерного диода  $f$  от 5 до 100 Hz. При увеличении частоты модуляции до 60 Hz амплитуда отклика уже падала в два раза. Экспериментально полученные значения эквивалентной мощности шума NEP для Si/GNR\_He<sup>4</sup>-гетероструктур были  $2.5 \cdot 10^{-9} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Кроме того, наблюдался ярко выраженный эффект „запоминания состояния“, т.е. при выключении лазерного диода сопротивление Si/GNR\_He<sup>4</sup> не возвращалось к начальному значению. Остаточное сопротивление Si/GNR\_He<sup>4</sup> зависело от поданной на нее мощности IR-излучения. Si/GNR\_He<sup>4</sup>-гетероструктура проявляет ярко выраженные многоуровневые мемристорные свойства. Время сохранения состояния превышало 1.5-2 min в зависимости от изначального уровня легирования.



**Рис. 5.** Спектральный отклик гетероструктур Si/GNR при нулевом смещении. Квадратные символы соответствуют спектральному отклику чистой, отожженной в вакууме структуре Si/GNR. Круглые символы отображают спектральный отклик легированной He<sup>4</sup>-структуры Si/GNR.

#### Заключение

В работе продемонстрирована технология сенсibilизации Si/GNR в ближнем ИК диапазоне электромагнитного спектра, основанная на легировании GNR с помощью He<sup>4</sup>. Показано увеличение отклика более чем 25 раз на длине волны  $1.35 \mu\text{m}$  в структуре Si/GNR/He<sup>4</sup>, по сравнению с Si/GNR не легированной He<sup>4</sup>. Si/GNR\_He<sup>4</sup>-структура проявляет ярко выраженные многоуровневые мемристорные свойства под действием IR-излучения. Дальнейшее развитие работы может пойти по пути подробного изучения спектров поглощения Si/GNR/He<sup>4</sup> в ИК диапазоне, а также исследования других материалов для легирования.

#### Финансирование работы

Настоящие исследования, а именно постановка задачи, обсуждение результатов и синтез графеновых нанополос, были выполнены в рамках работы по гранту и за счет гранта Российского Научного Фонда № 21-72-10164, <https://rscf.ru/project/21-72-10164/>. Изготовле-



ние металлических Ti/Au контактов методами фотолитографии, термического испарения и процесса Lift-off, выполнено в рамках проекта по участию университетов в развитии высокотехнологического производства при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 06.04.2022 № 075-11-2022-026). Исследование изготовленных образцов Si/GRN методом электронной микроскопии и измерение их спектрального отклика выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 23-12-00187, <https://www.rscf.ru/project/23-12-00187/>. Исследования графеновых нанополос методом комбинационного рассеяния света выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 24-42-10001, <https://rscf.ru/project/24-42-10001/>.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] L. Du, Z. Wu, R. Li, F. Tang, Y. Jiang. *Opt. Lett.*, **41** (1), 5031 (2016). DOI: 10.1364/OL.41.005031
- [2] H. Zhang, J.-H. Choi, Y. Xu, X. Wang, X. Zhai, B. Wang, C. Zeng, J.-H. Cho, Z. Zhang, J. G. Hou. *Phys. Rev. Lett.*, **106** (2–14), 026801 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.026801
- [3] X.Y. Wang, Y.G. Huang, D.W. Liu, X.N. Zhu, H.L. Zhu. *Chin. Phys. Lett.*, **30** (3), 036101 (2013). DOI: 10.1088/0256-307X/30/3/036101
- [4] S. Hu, P. Han, S. Wang, X. Mao, X. Li, L. Gao. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 102002 (2012). DOI: 10.1088/0268-1242/27/10/102002
- [5] J.P. Mailoa, A.J. Akey, C.B. Simmons, D. Hutchinson, J. Mathews, J.T. Sullivan, D. Recht, M.T. Winkler, J.S. Williams, J.M. Warrender, P.D. Persans, M.J. Aziz, T. Buonassisi. *Nat. Commun.*, **5**, 3011 (2013). DOI: 10.1038/ncomms4011
- [6] E. Garcia-Hemme, R. Garcia-Hernansanz, J. Olea, D. Pastor, A. del Prado, I. Martil, G. Gonzalez-Diaz. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **104**, 211105 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/49/27/2751
- [7] C.B. Simmons, A.J. Akey, J.P. Mailoa, D. Recht, M.J. Aziz, T. Buonassisi. *Adv. Functional Mater.*, **24**, 2852 (2014). DOI: 10.1002/adfm.201303820
- [8] E. Pérez, H. Castán, H. Garcia, S. Dueñas, L. Bailón, D. Montero, R. Garcia-Hernansanz, E. Garcia-Hemme, J. Olea, G. González-Díaz. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 022105. DOI: 10.1063/1.490578
- [9] C.B. Simmons, A.J. Akey, J.J. Krich, J.T. Sullivan, D. Recht, M.J. Aziz, T. Buonassisi. *J. Appl. Phys.*, **114**, 243514 (2013). DOI: 10.1063/1.4854835
- [10] A.J. Said, D. Recht, J.T. Sullivan, J.M. Warrender, T. Buonassisi, P.D. Persans, M.J. Aziz. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 073503 (2011). DOI: 10.1063/1.3609871
- [11] X. Li, J.E. Carey, J.W. Sickler, M.U. Pralle, C. Palsule, C.J. Vineis. **20** (5), 5518 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.005518
- [12] Z. Yan, C. Li, Y. Luo, J. Zhao, H. Yang, P. Verma, S. Kawata. *Chin. Opt. Lett.*, **13** (10), 102401 (2015). DOI: 10.3788/COL201513.102401
- [13] X. Qiu, X. Yu, S. Yuan, Y. Gao, X. Liu, Y. Xu, D. Yang. **6**, 1700638 (2018). DOI: 10.1002/adom.201700638
- [14] A.C. Ferrari, F. Bonaccorso, V. Falco, K.S. Novoselov, S. Roche, P. Bøggild, S. Borini, F.H. L. Koppens, V. Palermo, N. Pugno, J.A. Garrido, R. Sordano, A. Bianco, L. Ballerini, M. Prato, E. Lidorikis, J. Kivioja, C. Marinelli, T. Ryhänen, A. Morpurgo, J.N. Coleman, V. Nicolosi, L. Colombo, A. Fert, M. Garcia-Hernandez, A. Bachtold, G.F. Schneider, F. Guinea, C. Dekker, M. Barbone, Z. Sun, C. Galiotis, A.N. Grigorenko, G. Konstantatos, A. Kis, M. Katsnelson, L. Vandersypen, A. Loiseau, V. Morandi, D. Neumaier, E. Treossi, V. Pellegrini, M. Polini, A. Tredicucci, G.M. Williams, B.H. Hong, Jong-Hyun, J.M. Kim, H. Zirath, B.J. van Wees, H. van der Zant, L. Occhipinti, A. Di Matteo, I.A. Kinloch, T. Seyller, E. Quesnel, X. Feng, K. Teo, N. Rupesinghe, P. Hakonen, S.R.T. Neil, Q. Tannock, T. Löfwander, J. Kinaret. *Nanoscale*, **7**, 4598 (2015). DOI: 10.1039/C4NR01600A
- [15] A. Pospischil, M. Humer, M.M. Furchi, D. Bachmann, R. Guider, T. Fromherz, T. Mueller. *Nature Photon.*, **7** (11), 892 (2013). DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.240
- [16] X. Gan, R.-J. Shiue, Y. Gao, I. Meric, T.F. Heinz, K. Shepard, J. Hone, S. Assefa, D. Englund. *Nature Photon.*, **7**, 883 (2013). DOI: 10.1038/nphoton.2013.253
- [17] X. Wang, Z. Cheng, K. Xu, H.K. Tsang, J.B. Xu. *Nature Photon.*, **7** (11), 888 (2013). DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.241
- [18] F. Withers, O. Del Pozo-Zamudio, A. Mishchenko, A.P. Rooney, A. Gholinia, K. Watanabe, T. Taniguchi, S.J. Haigh, A.K. Geim, A.I. Tartakovskii, K.S. Novoselov. *Nat Mater.*, **14** (3), 301 (2015). DOI: 10.1038/nmat4205
- [19] M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, X. Zhang. *Nature*, **4474** (7349), 64 (2011). DOI: 10.1038/nature10067
- [20] D. Schall, D. Neumaier, M. Mohsin, B. Chmielak, J. Bolten, C. Porschatis, A. Prinzen, C. Matheisen, W. Kuebart, B. Junginger, W. Templ, A.L. Giesecke, H. Kurz. *ACS Photon.*, **1** (9), 781 (2014). DOI: 10.1021/ph5001605
- [21] F.H. Koppens, T. Mueller, P. Avouris, A.C. Ferrari, M.S. Vitiello, M. Polini. *Nat. Nanotechnol.* **9** (10), 780 (2014). DOI: 10.1038/nnano.2014.215
- [22] W. Guo, S. Xu, Z. Wu, N. Wang, M.M. T. Loy, S. Du. **9**, 3031 (2013). DOI:10.1002/sml.201370110
- [23] Z. Sun, Z. Liu, J. Li, G.-an Tai, S.-P. Lau, F. Yan. *Adv. Mater.*, **24** (43), 5878 (2012), DOI: 10.1002/adma.201202220
- [24] G. Konstantatos, M. Badioli, L. Gaudreau, J. Osmond, M. Bernechea, F.P. Garcia de Arquer, F. Gatti, F.H. Koppens. *National Nanotechnol.*, **7** (6), 363 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.60
- [25] M. Freitag, T. Low, W. Zhu, H. Yan, F. Xia, P. Avouris. *Nature Commun.*, **4**, 1951 (2013). DOI: 10.1038/ncomms2951
- [26] M. Badioli, A. Woessner, K.J. Tielrooij, S. Nanot, Navickaite, T. Stauber, F.J. Garcia de Abajo, F.H.L. Koppens. *Nano Lett.*, **14** (11), 6374 (2014). DOI: 10.1021/nl502847v
- [27] X. Cai, A.B. Sushkov, R.J. Suess, M.M. Jadidi, G.S. Jenkins, L.O. Nyakiti, R.L. Myers-Ward, S. Li, J. Yan, D.K. Gaskill, T.E. Murphy, H.D. Drew, M.S. Fuhrer. *National Nanotechnol.*, **9**, 814 (2014). DOI: 10.1038/nnano.2014.182
- [28] L. Vicarelli, M.S. Vitiello, D. Coquillat, A. Lombardo, A.C. Ferrari, W. Knap, M. Polini, V. Pellegrini, A. Tredicucci. *Nature Mater.*, **11**, 865 (2012). DOI: 10.1038/nmat3417

- [29] J. Dauber, A.A. Sagade, M. Oellers, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Neumaier, C. Stampfer, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (19), (2015). DOI: 10.1063/1.4919897
- [30] L. Huang, H. Xu, Z. Zhang, C. Chen, J. Jiang, X. Ma, B. Chen, Z. Li, H. Zhong, L.-M. Peng. *Sci. Rep.*, **4**, 5548 (2014). DOI: 10.1038/srep05548
- [31] Q. Wang, W. Hong, L. Dong. *Nanoscale*, **8**, 7663 (2016). DOI: 10.1039/C5NR09274D
- [32] M. Pumera, A. Ambrosi, A. Bonanni, E.L.K. Chng, H.L. Poh. *Trends Analyt. Chem.*, **29** (9), 954 (2010). DOI: 10.1016/j.trac.2010.05.011
- [33] A.D. Smith, K. Elgammal, F. Niklaus, A. Delin, A.C. Fischer, S. Vaziri, F. Forsberg, M. Rålander, H. Hugosson, L. Bergqvist, S. Schröder, S. Kataria, M. Östling, M.C. Lemme. *Nanoscale*, **7**, 19099 (2015). DOI: 10.1039/C5NR06038A
- [34] Y. Wu, Y.-m. Lin, A.A. Bol, K.A. Jenkins, F. Xia, D.B. Farmer, Y. Zhu, P. Avouris. *Nature*, **472**, 74 (2011). DOI: 10.1038/nature09979
- [35] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis. *National Nanotechnol.*, **6** (3), 147 (2011). DOI: 10.1038/nnano.2010.279
- [36] S. Goossens, G. Navickaite, C. Monasterio, S. Gupta, J.J. Piqueras, R. Pérez, G. Burwell, I. Nikitskiy, T. Lasanta, T. Galán, E. Puma, A. Centeno, A. Pesquera, A. Zurutuza, G. Konstantatos, F. Koppens. *Nature Photon.*, **11**, 366 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2017.75
- [37] G. Konstantatos, M. Badioli, L. Gaudreau, J. Osmond, M. Bernechea, F.P. Garcia de Arquer, F. Gatti, F.H. Koppens. *National Nanotechnol.*, **7** (6), 363 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.60
- [38] Z. Sun, Z. Liu, J. Li, G.-A. Tai, S.-P. Lau, F. Yan. *Adv. Mater.*, **24** (43), 5878 (2012). DOI: 10.1002/adma.201202220
- [39] A.V. Klekachev, M. Cantoro, M.H. Van Der Veen, A.L. Stesmans, M.M. Heyns, S. De Gendt. *Phys. E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **43** (5), 1046 (2011). DOI: 10.1016/j.physe.2010.12.012
- [40] W. Guo, S. Xu, Z. Wu, N. Wang, M.M.T. Loy, S. Du. *Small*, **9** (18), 3031 (2013). DOI: 10.1002/sml.201370110
- [41] S.A. McDonald, G. Konstantatos, S. Zhang, P.W. Cyr., E.J.D. Klem, L. Levina, E.H. Sargent. *Nature Mater.*, **4**, 138 (2005).
- [42] V. Barone, O. Hod, G.E. Scuseria. *Nano Lett.*, **6** (12), 2748 (2006). DOI: 10.1021/nl0617033
- [43] L. Yang, C.H. Park, Y.W. Son, M.L. Cohen, S.G. Louie. *Phys. Rev. Lett.*, **99** (18), 186801 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.186801
- [44] P.B. Bennett, Z. Pedramrazi, A. Madani, Y.-C. Chen, D.G. de Oteyza, C. Chen, F.R. Fischer, M.F. Crommie, J. Bokor. *J. Appl. Phys. Lett.*, **103** (25), (2013). DOI: 10.1063/1.4855116
- [45] J.P. Llinas, A. Fairbrother, G. Borin Barin, W. Shi, K. Lee, S. Wu, B.Y. Choi, R. Braganza, J. Lear, N. Kau, W. Choi, C. Chen, Z. Pedramrazi, T. Dumslaff, A. Narita, X. Feng, K. Müllen, F. Fischer, A. Zettl, P. Ruffieux, E. Yablonovitch, M. Crommie, R. Fasel, J. Bokor. *Nature Commun.*, **8** (1), 633 (2017). DOI: 10.1038/s41467-017-00734-x
- [46] B. Jeong, M. Wuttke, Y. Zhou, K. Müllen, A. Narita, K. Asadi. *ACS Appl. Electron. Mater.*, **4**, 2667 (2022). DOI: 10.31613/ceramist.2022.25.4.05
- [47] D. Prezzi, D. Varsano, A. Ruini, A. Marini, E. Molinari. *Phys. Rev. B*, **77**, 041404 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevB.77.041404
- [48] X. Zhu, H. Su. *J. Phys. Chem. A*, **115**, 11998 (2011). DOI: 10.1021/jp202787h
- [49] P.V. Fedotov, D.V. Rybkovskiy, A.I. Chernov, E.A. Obraztsova, E.D. Obraztsova. *J. Phys. Chem. C*, **124**, 25984 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c07369
- [50] P.V. Fedotov, E.D. Obraztsova. *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 013101 (2023). DOI: 10.1063/5.0131405
- [51] P.V. Fedotov, D.V. Rybkovskiy, I.V. Novikov, E.D. Obraztsova. *Phys. Status Solidi (b)*, **259**, 2100501 (2022). DOI: 10.1002/pssb.202100501
- [52] J. Cai, P. Ruffieux, R. Jaafar, M. Bieri, T. Braun, S. Blankenburg, M. Muoth, A.P. Seitsonen, M. Saleh, X. Feng, K. Müllen, R. Fasel. *Nature*, **466**, 470–3 (2010). DOI: 10.1038/nature09211
- [53] G. Borin Barin, A. Fairbrother, L. Lukas Rotach, M. Bayle, M. Paillet, L. Liang, V. Meunier, R. Hauert, T. Dumslaff, A. Narita, K. Müllen, H. Sahabudeen, R. Berger, X. Feng, R. Fasel, P. Ruffieux. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2**, 2184 (2019). DOI: 10.1021/acsanm.9b00151
- [54] H. Huang, D. Wei, J. Sun., S.L. Won, Y. P. Feng, A.C. Neto, A.T.S. Wee, *Scientific Reports*, **2** (1), 983 (2012). DOI: 10.1038/srep00983
- [55] J. Zhou, J. Dong. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (17), (2007). DOI: 10.1063/1.2800796
- [56] R. Gillen, M. Mohr, C. Thomsen, J. Maultzsch. *Phys. Rev. B*, **80** (15), 155418 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.155418