

УДК 621.371.334:537.874.6
doi: 10.21685/2072-3040-2024-4-10

Магнитоплазмоника графена как платформа для создания устройств терагерцового и среднего инфракрасного диапазонов с комбинированной электрической и магнитной перестройкой (обзор проблемы)

Г. С. Макеева

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
radiotech@pnzgu.ru

Аннотация. Представлен обзор современного состояния магнитоплазмоники графена, включая основы и приложения. Рассматриваются физические эффекты, в том числе «гигантский» эффект Фарадея в электрически и магнитно-управляемых графеновых магнитоплазмонных метаповерхностях, а также их использование для создания новых динамически перестраиваемых внешним магнитным полем плазмонных устройств терагерцового (ТГц), среднего инфракрасного (ИК) диапазонов на основе графена. Представлены принципы функционирования электрически и магнитно-перестраиваемых графеновых ТГц-, ИК-устройств: ТГц-поглотители, переключатели, поляризаторы, фильтры, сенсоры, модуляторы и интегральные манооптические элементы, такие как ИК-клапаны и циркуляторы. Обсуждается их применение в фотонике и оптоэлектронике, телекоммуникациях, ТГц-спектроскопии и биомедицинских технологиях.

Ключевые слова: магнитоплазмоника, графен, магнитное поле, «гигантский» эффект Фарадея, электрически и магнитно-перестраиваемые устройства

Для цитирования: Макеева Г. С. Магнитоплазмоника графена как платформа для создания устройств терагерцового и среднего инфракрасного диапазонов с комбинированной электрической и магнитной перестройкой (обзор проблемы) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2024. № 4. С. 118–140. doi: 10.21685/2072-3040-2024-4-10

Graphene magnetoplasmonics as a platform for creating THz and Mid-IR devices with combined electrical and magnetic tuning (overview of the problem)

G.S. Makeeva

Penza State University, Penza, Russia
radiotech@pnzgu.ru

Abstract. The purpose of this study is to provide an overview of the current state of graphene magnetoplasmonics, including fundamentals and applications. We consider the physical effects, including the “giant” Faraday effect, in electrically and magnetically controlled

© Макеева Г. С., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

graphene magnetoplasmonic metasurfaces, as well as their use for creating new graphene-based plasmonic devices in the THz and IR range that are dynamically tunable by an external magnetic field. We present the operating principles of electrically and magnetically tunable graphene THz and IR devices: THz absorbers, switches, polarizers, filters, sensors, modulators and integrated magneto-optical elements such as IR isolators and circulators. We discuss their applications in photonics and optoelectronics, telecommunications, THz spectrometry, and biomedical technologies.

Keywords: magnetoplasmonics, graphene, magnetic field, “giant” Faraday effect, electrically and magnetically tunable devices

For citation: Makeeva G.S. Graphene magnetoplasmonics as a platform for creating THz and Mid-IR devices with combined electrical and magnetic tuning (overview of the problem). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2024;(4):118–140. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2024-4-10

Введение

Магнитоплазмоника – новая междисциплинарная область, изучающая взаимодействие между магнетизмом и плазмоникой и имеющая большие перспективы для разработки новых оптических, магнитных и спинтронных устройств [1].

Развитие терагерцовых (ТГц) технологий вызвало повышенный интерес к методам управления свойствами ТГц-излучения [2]. Широкое распространение ТГц-технологий в приложениях, охватывающих безопасность и биомедицину, привело к всплеску исследовательских усилий, направленных на манипулирование амплитудой, фазой и поляризацией электромагнитного излучения на ТГц-частотах [3]. ТГц-волны активно исследуются для целей фундаментальных исследований и приложений [1–9]. Однако до недавнего времени отсутствовали материалы и технологии, позволяющие изготавливать эффективные и перестраиваемые в широкой полосе частот пассивные устройства ТГц-диапазона частот [4].

Графен, имеющий сильное взаимодействие легированных носителей заряда с ТГц-излучением и электростатически перестраиваемое легирование, перспективен для решения этой задачи [3, 4]. Более того, взаимодействие ТГц-излучения с графеном значительно усиливается, если возбуждаются поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) [4].

В то время как обычные материалы позволили реализовать множество новых функций, графен представляет собой захватывающую альтернативу из-за присущей ему реконфигурируемости, добавляя еще одну степень гибкости в управлении ТГц-излучением. Помимо высокой подвижности электронов в графене, теплопроводности и механической прочности, уровень Ферми (химический потенциал) графена можно перестраивать с помощью электрического стробирования и влиять на динамику коллективных электронов путем формирования наноструктурированного графена (паттернов), а также плазмонных резонансов [3].

Нанoeлектромагнетизм графена в последнее время привлекает огромный исследовательский интерес, поскольку он объединяет две яркие области исследований: плазмонику и наноэлектронику. В относительно неисследованной области частот от ТГц- до ИК-диапазона коллективные колебания

безмассовых фермионов Дирака в графене могут возбуждаться распространяющиеся волны плотности поверхностного заряда (ППЗ), сильно ограниченные поверхностью графена.

Графен является единственным известным материалом, равновесная (и неравновесная) проводимость которого может перестраиваться в широком диапазоне частот в зависимости от его уровня Ферми (химического потенциала). Следовательно, свойства распространения, излучения и рассеяния монослоя графена и графеновых наноструктур могут динамически перестраиваться с помощью химического легирования, электростатического стробирования или оптической накачки. Такие перестраиваемые плазмонные свойства открывают огромные возможности для создания оптоэлектронных ТГц-, ИК-устройств компактных размеров, сверхбыстродействующих и имеющих низкое энергопотребление [5].

Динамическая перестройка плазмонной характеристики графена возможна путем регулировки уровня Ферми, связанного с плотностью носителей в графене, с помощью различных внешних воздействий: электрических, магнитных, оптических полей и электрохимических сил [5].

Графен является многообещающей платформой для перестраиваемых плазмонных ТГц-устройств благодаря своей реконфигурируемости, однако большинство исследований сосредоточено на его электрической перестраиваемости [5]. Благодаря своей необычной зонной структуре и двумерной (2D) природе графен проявляет множество исключительных электрических и оптических свойств: высокая подвижность электронов, квантовый эффект Холла, сильно ограниченное плазмонное распространение, сильный нелинейный эффект Керра и «гигантский» эффект Фарадея [5, 6]. Эти свойства могут динамически перестраиваться приложением статических электрического и магнитного полей, что является еще одной важной особенностью графена [6].

Более того, проводимость графена можно регулировать с помощью статического магнитного поля. Фактически при приложении перпендикулярного статического магнитного поля графен становится гиротропным и проявляет не взаимные свойства, что приводит ко многим магнитооптическим (МО) явлениям, таким как «гигантский» эффект Фарадея и эффекты Керра [2, 3, 7–15].

Кроме того, в присутствии статического магнитного поля происходит гибридизация ППЗ и циклотронных возбуждений, что приводит к появлению поверхностных магнитоплазмонов-поляритонов (МППП) графена. Одним из больших преимуществ графена перед обычными плазмонными материалами является высокая чувствительность МППП к внешним магнитным полям, поскольку циклотронная частота сравнима с плазмонной частотой [4, 7]. Дополнительным преимуществом является то, что циклотронная масса носителей заряда мала и ее можно регулировать путем легирования [7]. Небольшая циклотронная масса делает реакцию Друде графена высокочувствительной к магнитному полю. Хотя масса обычных 2D электронных газов тоже мала, фундаментальные отличия графена в том, что носители заряда являются фермионами Дирака, циклотронная масса зависит от легирования и возможно амбиполярное стробирование [4].

Все это делает графен одним из наиболее перспективных кандидатов для использования в магнитно-перестраиваемых не взаимных плазмонных устройствах микроволнового и ТГц-диапазонов, таких например, как оптические ТГц-клапаны и поглотители [7].

С появлением концепции метаматериалов было показано, что структурирование объемных материалов для управления их электромагнитными свойствами позволяет использовать множество фантастических приложений, таких как отрицательное преломление, фотонная запрещенная зона и идеальные линзы [2]. Затем эта идея была применена к графену для управления пропусканием и другими функциями, такими как поглощение и маскировка [2].

Микроструктурирование монослоев графена можно осуществить, например, с помощью электронно-лучевой литографии и травления кислородной плазмой, что подтверждает применимость микро- и наноструктурированного графена для оптических устройств и перспективность эффекта наноструктурирования на ТГц-отклик [6].

В последнее время МППП графена широко изучаются в ряде теоретических и экспериментальных работ в графеновых структурах различных форм и конфигураций, включая протяженные слои графена [8–14], графеновые ленты (ГЛ) [2–4, 6, 7] и антиточки (АТ) [4]. Возбуждение МППП значительно усиливает МО-эффекты в графеновых структурах, а сильные магнитоплазменные резонансы наблюдаются в решетках ГЛ и АТ в наноструктурированном графене [4, 7]. В связи с этим представляет большой интерес исследование оптических свойств анизотропного наноструктурированного графена под действием магнитного поля. Среди этих структур периодические решетки ГЛ при приложении статического магнитного поля привлекли наибольший исследовательский интерес и стали одной из наиболее изученных структур на основе графена [4, 7].

Плазмонику графена могут использовать все основные компоненты оптических транзисторов: оптические переключатели, оптические волноводы и фазовращатели, модуляторы [16]. Кроме того, приложение статического магнитного поля к графену приводит к «гигантскому» эффекту Фарадея и взаимному распространению [16], и это применимо для создания новых магнитоуправляемых компонентов в ТГц- и ИК-диапазонах [16–18].

Магнитно-перестраиваемые структуры представляют собой передовую область исследований, потому что мгновенная реакция на магнитное воздействие без необходимости какого-либо контакта делает такой тип устройств с их использованием чрезвычайно перспективным [2]. К примеру, для достижения независимой перестройки в многодиапазонном ТГц-поглотителе разработана многослойная структура из наноструктурированного графена, где к каждому слою прикладываются разные напряжения, что требует добавления большего количества электродов и, следовательно, увеличивает трудности изготовления и эксплуатации [17]. Между тем перестраиваемые характеристики поглощения также могут быть достигнуты с помощью внешнего статического магнитного поля, что снижает трудности изготовления устройств из-за отсутствия электродов [17].

Цель данной работы – представить обзор современного состояния магнитоплазмоники графена, включая основы и приложения: физические эффекты, в том числе «гигантский» эффект Фарадея в электрически и магнитноуправляемых графеновых магнитоплазмонных метаповерхностях, и их использование для создания новых динамически перестраиваемых внешним магнитным полем магнитоплазмонных устройств на основе графена ТГц-, ИК-диапазонов [18].

1. Магнитоплазмоника в графеновых системах

Магнитоплазмоника – одна из областей исследований, бурно развивающихся последнее десятилетие, сочетает в себе магнетизм и плазмонику и находит применение в зондировании (датчики газа, биосенсоры), связи (наноантенны), ТГц-приложениях (перестраиваемые ТГц-клапаны, ТГц-преобразователи поляризации), в магнитной памяти (MRAM) [19]. Благородные металлы (например, Au и Ag) проявляют плазмонные свойства в чрезвычайно сильных магнитных полях, а ферромагнитные металлы обладают большой МО-активностью. Однако из-за высокого поглощения в ферромагнитных металлах связанные с ними плазмонные отклики являются широкополосными по частоте и имеют высокие потери при распространении. Хотя благородные металлы считаются лучшими доступными плазмонными материалами, ТГц-устройства, изготовленные из них, имеют большие омические потери, и в них невозможна перестройка [19].

Плазмоника графена стала альтернативой традиционной плазмонике металлов из-за чрезвычайной локализации поля, устойчивости к легированию и низким потерям [19]. Графен обладает сильным МО-откликом и, таким образом, обеспечивает дополнительные архитектуры для традиционной магнитоплазмоники, основанной на МО-активных металлах или диэлектриках. Однако на данный момент мало что известно о магнитоплазмонике графена и топологических эффектах в графеновых наноструктурах [20].

Графен в магнитном поле можно охарактеризовать 2D-тензором анизотропной проводимости, полученным из формулы Кубо [21]:

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ -\sigma_{xy} & \sigma_{xx} \end{Bmatrix},$$

где

$$\sigma_{xx} = -\frac{2D}{\pi} i \frac{\omega + iv}{\omega_B^2 - (\omega + iv)^2}, \quad \sigma_{xy} = -\frac{2D}{\pi} \frac{\omega_B}{\omega_B^2 - (\omega + iv)^2},$$

$$D = \frac{2\sigma_0 E_F}{\hbar}, \quad \sigma_0 = 6,08 \cdot 10^{-5} S; \quad E_F - \text{энергия Ферми}; \quad \omega_B = \frac{eB_0 v_F^2}{E_F} - \text{цикло-}$$

тронная частота; $v_F = 10^6 \text{ м / с}$ – скорость Ферми.

В ТГц-диапазоне 2D-материал графен имеет диагональную и холловскую проводимости в присутствии магнитного поля. Эти особые свойства обеспечивают структурам на основе графена магнитно-перестраиваемый отклик. Электрически перестраиваемая проводимость и зависящая от плотности носителей циклотронная масса графена отличают его от обычных ферромагнитных материалов [22].

Наносистемы с комбинированными магнитными и плазмонными функциями в последние годы стали предметом активных исследований. При соответствующей внутренней архитектуре составляющих компонентов МО-активность этих систем может быть значительно увеличена за счет усиления электромагнитного поля, связанного с плазмонным резонансом. В то же время магнитная функциональность позволяет управлять плазмонными свой-

ствами с помощью внешнего магнитного поля, что позволяет разрабатывать магнитоплазменные устройства, которые находят применение, например, в области обнаружения газов и биосенсоров, а также в интегральных фотонных устройствах для телекоммуникаций [23].

Благодаря сильному МО-отклику ППП в графене могут активно перестраиваться с помощью статического магнитного поля, что приводит к появлению другой квазичастицы, называемой МППП, представляют интерес для применения в плазменных и МО-устройствах [24]. Из-за многообещающих свойств МППП привлекли большой интерес в области плазмоники в последнее время. Поверхностные магнитоплазмоны-поляритоны графена, помимо гибкой модуляции плазменных свойств внешним магнитным полем, также определяют невзаимный эффект и многодиапазонный по частоте характер распространения, что применимо в разработке интегральных плазменных ТГц-, ИК-устройств для биосенсоров и телекоммуникационных приложений [25].

В видимом диапазоне требуются чрезвычайно сильные магнитные поля для манипулирования свойствами металлических плазменных материалов, отчего оптические наноразмерные устройства на основе МППП, состоящие из металлов и магнитных материалов, сложно реализовать из-за проблем изготовления устройств и больших потерь. Многообещающим является графен, показывающий большой потенциал в области ИК магнитной плазмоники.

В ИК-диапазоне благодаря более низким (в сравнении с видимым диапазоном) частотам падающих волн и плазменным частотам требуется магнитное поле также невелико, что делает перестраиваемые ИК-устройства на основе МППП в графене практически реализуемыми в среднем ИК-диапазоне [25].

2D электронные системы в квантовых материалах, находящихся в сильных магнитных полях, демонстрируют квантованную холловскую проводимость, киральные краевые токи и характерные коллективные моды – магнитоэкситоны. Возбуждение этих распространяющихся магнитоэкситонных поляритонов в графене с почти нейтральным зарядом, их визуализация на нанометровом уровне и дисперсия в ИК-диапазоне, перестраиваемая магнитным полем, экспериментально исследованы в [26].

2. Физические эффекты в электрически и магнитно-управляемых графеновых магнитоплазменных метаповерхностях в ТГц-, ИК-диапазонах

В последние годы в области метаматериалов наблюдается бурный рост, породивший потрясающий класс инженерных материалов – это метаповерхности, т.е. 2D-решетки элементов субволнового размера, позволяющие манипулировать электромагнитными волнами с беспрецедентным управлением и точностью. Метаповерхности открыли различные возможности для перспективных приложений, включая оптику, телекоммуникации и радиолокационные технологии [27].

Возможности электрооптической, магнитной, механической и тепловой перестройки оптических свойств метаповерхностей очень важны для приложений от базовой до прикладной оптики, связи, голографических дисплеев и биохимических датчиков [2]. Особенно intriguing подмножество рекон-

фигурируемых метаповерхностей. В отличие от традиционных метаматериалов, которые часто статичны по своим свойствам, реконфигурируемые метаповерхности предлагают уникальную возможность динамически перестраивать и модулировать их электромагнитные отклики [27].

Невзаимные метаповерхности на основе магнитных метаатомов могут кодировать оптические функции волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях и применимы для создания невзаимных антенн и обтекателей для полнодуплексной беспроводной связи и радиолокационных систем [28].

Оптимальным материалом для проектирования реконфигурируемых метаповерхностей является графен из-за присущей ему способности к перестройке [27–37]. При приложении внешнего магнитного поля возникают анизотропные эффекты, вызванные силой Лоренца, действующей на электроны. В результате появляется множество интересных физических явлений, в том числе гиротропия, невзаимность и поддержка МППП [27, 32]. Большой интерес представляют метаповерхности, состоящие из МО-материалов, которые могут усилить эффект Фарадея [2].

Наиболее интересной является сильная оптическая анизотропия, которая может быть вызвана в графене приложением статического магнитного поля. Даже однородные монослои графена вносят большие углы фарадеевского вращения [3]. Один лист графена при воздействии перпендикулярного статического магнитного поля обеспечивает фарадеевское вращение плоскости поляризации, которое в пересчете на атомный слой значительно превосходит любой другой известный материал [3]. Это делает графен идеальным материалом для приложений, включающих управление поляризацией ТГц-волн. Однако при этом важной проблемой является узкая полоса пропускания и низкая (порядка нескольких ТГц) частота, на которой эти углы фарадеевского вращения максимизируются. Это внутреннее ограничение, присущее однородным листам графена, вытекает из магнитоплазмонных резонансов, лежащих в основе явления фарадеевского вращения [3]. Однако разработка структур на основе графена, которые объединяют магнитные и ограниченные ППП-резонансы, может обеспечить оптимизацию для более высоких ТГц-частот [3]. И эти результаты открывают перспективу для проектирования динамически магнитно-перестраиваемых ТГц-метаповерхностей на основе графена [2].

В графене эффект Фарадея возникает из-за циклотронного резонанса безмассовых носителей, что позволяет осуществлять динамическую перестройку с помощью комбинированной внешней электрической и магнитной перестройки. Кроме того, направление вращения плоскости поляризации можно контролировать, изменяя знаки носителей в графене с помощью внешнего электрического поля [3].

Однако, несмотря на эти возможности перестройки, потребность в больших магнитных полях препятствовала применению эффекта Фарадея в реальных устройствах на основе графена, особенно на частотах выше нескольких ТГц.

В работе [3] показано, что сильный эффект Фарадея может быть достигнут в решетках графеновых микролент (ГМЛ) за счет возбуждения МППП в отдельных ГМЛ на более высоких ТГц-частотах, чем те, которые диктуются циклотронным резонансом. Экспериментально продемонстриро-

вано, что метаповерхность, состоящая из периодической решетки ГМЛ (на прозрачной для ТГц-частот подложке 4H-SiC), может сильно модулировать интенсивность и поляризацию ТГц-излучения. При изменении ширины ГМЛ резонансная частота ППП изменяется из-за пространственного ограничения. Это позволяет использовать напряженность приложенного статического магнитного поля для динамической перестройки частоты, полосы пропускания и «гигантского» эффекта Фарадея в диапазоне частот до 3 ТГц. Результаты подчеркивают огромную гибкость, которую графен обеспечивает для активного перестраиваемого управления ТГц-волнами и перспективность ТГц-устройств, которые используют сильно улучшенное взаимодействие излучения и вещества, возникающее в результате формирования паттерна в структурированном графене [3].

В статье [33] для доказательства принципа рассматривается периодическая решетка ГМЛ при нормальном падении монохроматической плоской волны. Внешнее статическое магнитное поле приложено перпендикулярно ГМЛ (рис. 1). Электрическое поле E падающей волны перпендикулярно оси ГМЛ (p -поляризация падающей волны).

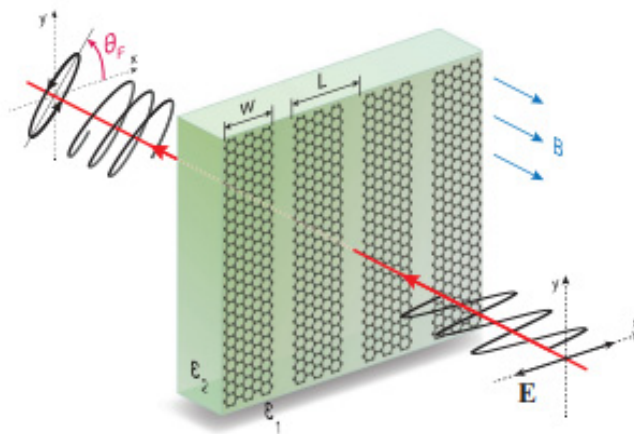


Рис. 1. Схематическое изображение изучаемой системы: плоская монохроматическая волна, нормально падающая на решетку ГМЛ в присутствии перпендикулярного статического магнитного поля с индукцией B ; θ_F – угол фарадеевского вращения [33]

На рис. 2 показаны частотные зависимости угла фарадеевского вращения θ_F для двух решеток ГМЛ при различных значениях индукции B внешнего статического магнитного поля (сплошные линии) и для сравнения для сплошного листа графена (штриховые линии).

В сплошном графене резонансная особенность связана с циклотронным резонансом, поэтому эффект «гигантского» вращения Фарадея ограничен довольно низкими ТГц-частотами (менее 10 ТГц) даже при больших значениях индукции B статического магнитного поля (рис. 3). В решетке ГМЛ частота, на которой достигается максимум угла фарадеевского вращения θ_F , сильно смещена в сторону более высоких ТГц-частот относительно частоты в сплошном листе графена (рис. 3). Эта разница особенно значительна для слабых статических магнитных полей (менее нескольких Тл) (рис. 3). В ре-

шетках ГМЛ максимум угла вращения Фарадея θ_F происходит при резонансном возбуждении МППП, которое определяется как шириной ГМЛ, так и значением B статического магнитного поля.

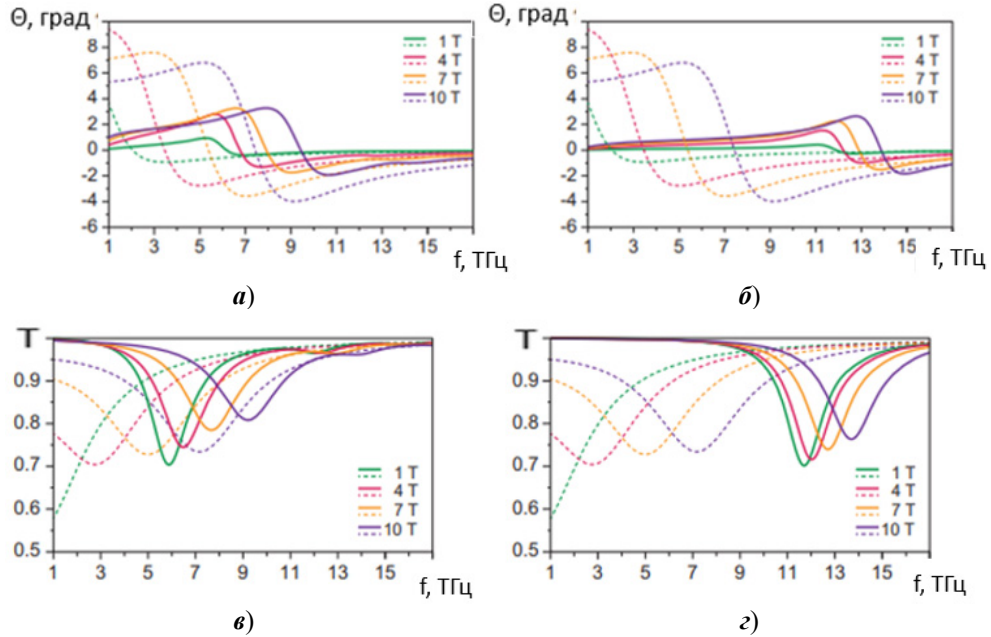


Рис. 2. Результаты моделирования для решеток ГМЛ (сплошные кривые) и сплошного графена (штриховые кривые) для времени релаксации $\tau = 0,1$ пс.

Угол фарадеевского вращения θ_F при различных значениях индукции B внешнего статического магнитного поля: **а** – для решетки ГМЛ 1 ($w = 2$ мкм, $L = 4$ мкм); **б** – для решетки ГМЛ 2 ($w = 0,5$ мкм, $L = 1$ мкм); **в**, **г** – коэффициент прохождения T (нулевого порядка) для решеток ГМЛ 1, 2 соответственно [33]

В сплошном графеновом листе максимальный угол фарадеевского вращения равен $|\theta_F|_{\max} = \pi/4$, что, конечно, уже является впечатляющим результатом, тем более для слоя толщиной в один атом. В решетках ГМЛ угол фарадеевского вращения θ_F превышает это значение. Эти свойства проиллюстрированы на рис. 3, где показаны расчетные частотные зависимости и угла фарадеевского вращения Фарадея θ_F , и коэффициента прохождения T при различных значениях индукции B статического магнитного поля для двух решеток ГМЛ для параметра графена – времени релаксации $\tau = 4,4$ пс.

На рис. 3 показано, что угол фарадеевского вращения θ_F сильно зависит от параметра графена – времени релаксации τ , и для решеток ГМЛ может превышать этот угол θ_F для сплошного листа графена на более высоких ТГц-частотах.

Более того, такие магнитоплазмонные графеновые метаповерхности могут демонстрировать значительно повышенную гибкость управления, поскольку их оптимальную рабочую частоту и глубину модуляции можно перестраивать динамически [3].

Предложен метод магнитного управления, чтобы манипулировать свойствами прохождения ТГц-волны через графеновую метаповерхность, состоящую из 2D-решетки ГМЛ-резонаторов (ГМЛ конечной длины) (рис. 4).

Вертикально ориентированное электростатическое поле E_0 отклоняет носители в графене и изменяет характеристики прохождения ТГц-волны через метаповерхность.

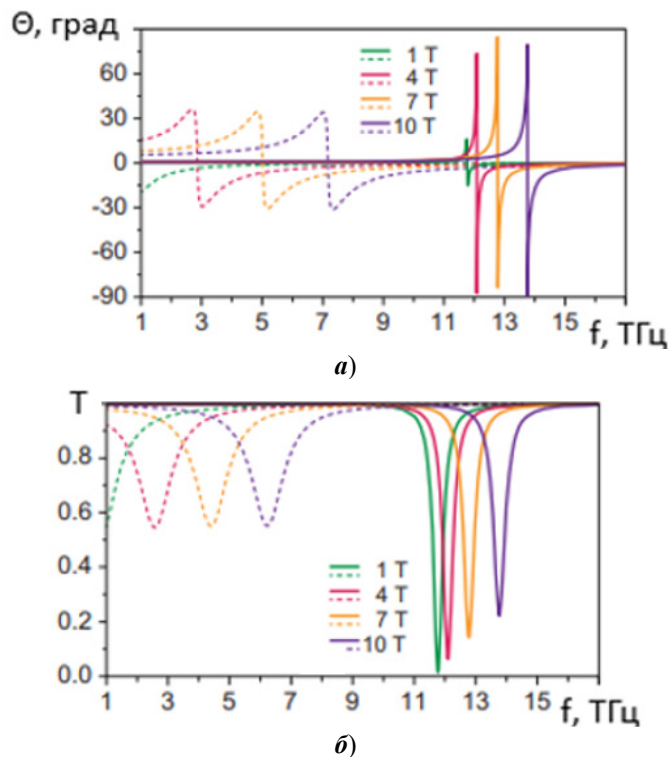


Рис. 3. Результаты моделирования для решетки ГМЛ (сплошные кривые) и сплошного графена (пунктирные кривые) для сверхвысокого значения времени релаксации $\tau = 4,4$ пс: *a* – эффект Фарадея при различных значениях индукции B внешнего статического магнитного поля; *б* – коэффициент прохождения T (нулевого порядка) для решетки ГМЛ 2 ($w = 0,5$ мкм, $L = 1$ мкм) [33]

Результаты моделирования (рис. 5) демонстрируют, что резонансные частоты графеновой ТГц-метаповерхности эффективно изменяются при приложении статического магнитного поля, что приводит к манипуляции модуля и фазы коэффициента прохождения ТГц-волны. Регулируя величину индукции приложенного магнитного поля, можно динамически управлять прохождением ТГц-волны, таким образом реализуя динамически магнитно-перестраиваемые метаповерхности [34].

Методами магнитно-электрооптической ТГц-спектроскопии показано, что эффект Фарадея в графене можно модулировать по интенсивности, перестраивать по частоте и инвертировать с использованием электростатического легирования при фиксированном магнитном поле [4].

Экспериментально наблюдались сильные магнитоплазменные резонансы в решетке графеновых АТ (рис. 6), что потенциально позволяет использовать эти МО-явления в широкой полосе частот ТГц-диапазона, и несколько новых явлений, в том числе электростатическое управление ТГц циклотронной частотой, чисто электростатическая инверсия эффекта Фарадея и силь-

ные резонансы МППП, перестраиваемые напряжением на затворе, в периодических решетках АТ в структурированном графене [4]. Эти эффекты потенциально обеспечивают широкую спектральную перестройку и включают новые функциональные возможности в пассивных ТГц-устройствах на основе графена [4].

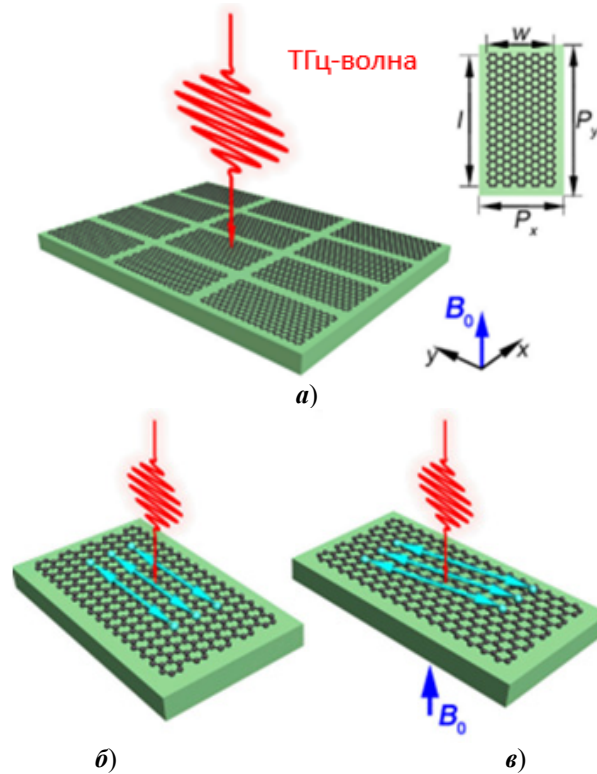


Рис. 4. ТГц-метаповерхность, состоящая из периодической 2D-решетки ГМЛ-резонаторов, со структурными параметрами $P_x = 250$ мкм, $P_y = 500$ мкм, $l = 450$ мкм, $w = 210$ мкм, $h = 50$ мкм (толщина подложки SiO_2) (а); концептуальная схематическая диаграмма колебаний электронов в элементарной ячейке решетки в отсутствие статического магнитного поля (б) и с приложенным внешним статическим магнитным полем (в). При приложении статического магнитного поля траектория колебаний электронов вдоль оси y в элементарной ячейке отклоняется на определенный угол [34]

Результаты работы [35] показывают, что магнитная перестройка может эффективно модулировать резонансные свойства метаматериалов на основе кольцевых резонаторов из структурированного графена. При объединении электрической и магнитной перестройки наблюдается увеличение коэффициента преобразования поляризации, а также достижение значительного угла фарадеевского вращения, составляющего почти 90° . Эти результаты указывают на потенциал разработки функциональных ТГц-устройств на основе графена, включая ТГц-переключатели, модуляторы, преобразователи поляризации и сенсоры [35].

В работе [38] проведено моделирование прохождения ТГц-волн в присутствии статического магнитного поля через слой графена в сочетании

с перфорированной металлической пленкой в виде периодической 2D-решетки квадратных отверстий. Имеющиеся согласно расчетам существенные изменения в спектрах фарадеевского вращения прошедшей ТГц-волны и магнитного кругового дихроизма по сравнению с монослоем графена объясняются усилением возбуждения графеновых МППП. Результаты интересны для приложений в ТГц-фотонике, таких как переключаемые ТГц-поляризаторы и вентили [38].

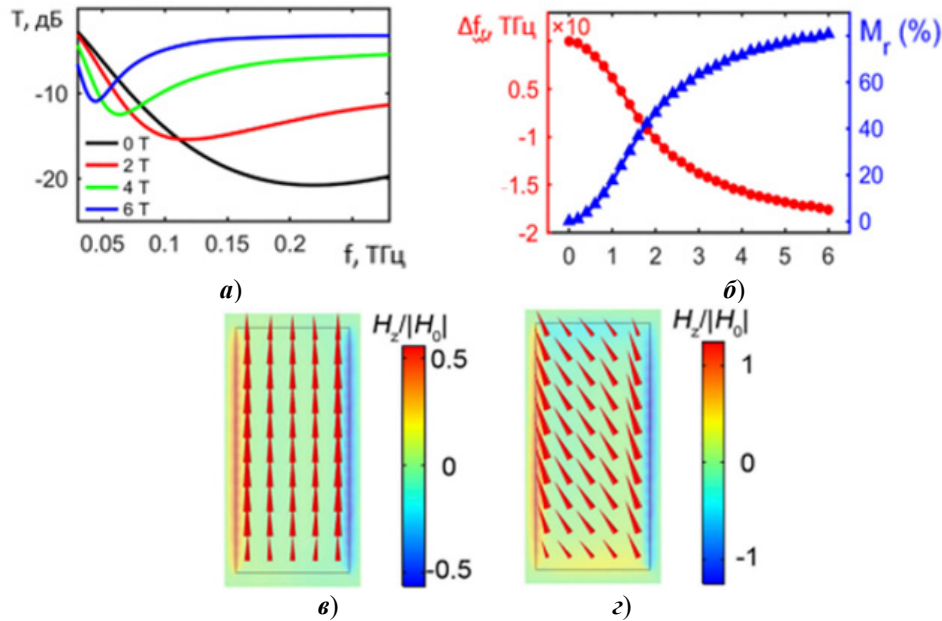


Рис. 5. Спектры прохождения ТГц-волны через графеновую метаповерхность при различных значениях индукции B внешнего статического магнитного поля (а); относительный сдвиг резонансной частоты f_r и индекс частотной модуляции M_r как функции индукции B внешнего статического магнитного поля (б). Нормированная напряженность переменного магнитного поля H_z/H_0 (H_0 – амплитуда магнитного поля падающей ТГц-волны) и распределения поверхностных токов в ГМЛ-резонаторе на резонансных частотах в отсутствие статического магнитного поля ($B = 0, f_r = 0,218$ ТГц) (в) и при приложении магнитного поля ($B_0 = 2$ Тл, $f_r = 0,118$ ТГц) (г). Внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно ГМЛ [34]

Численно исследована динамически перестраиваемая плазмон-индуцированная прозрачность π -образных метамолекул из графеновых нанолент (ГНЛ) при приложении внешнего статического магнитного поля. Показано, что для ГНЛ с энергией Ферми, соответствующей резонансной длине волны, формой линии и поляризацией проходящего излучения в среднем ИК-диапазоне можно эффективно управлять с помощью магнитного поля. Гигантское вращение поляризации, превышающее 20° , наблюдалось в асимметричных метамолекулах из ГНЛ, которое дополнительно усиливалось почти до 40° за счет эффекта Фарадея при приложении статического магнитного поля на резонансной длине волны 9 мкм. Это гораздо более высокая частота, чем в случае эффекта Фарадея, наблюдаемого в полубесконечных ГНЛ. Результаты предлагают гибкий подход к разработке компактных магнитно-перестраиваемых фотонных устройств на основе графена [21].

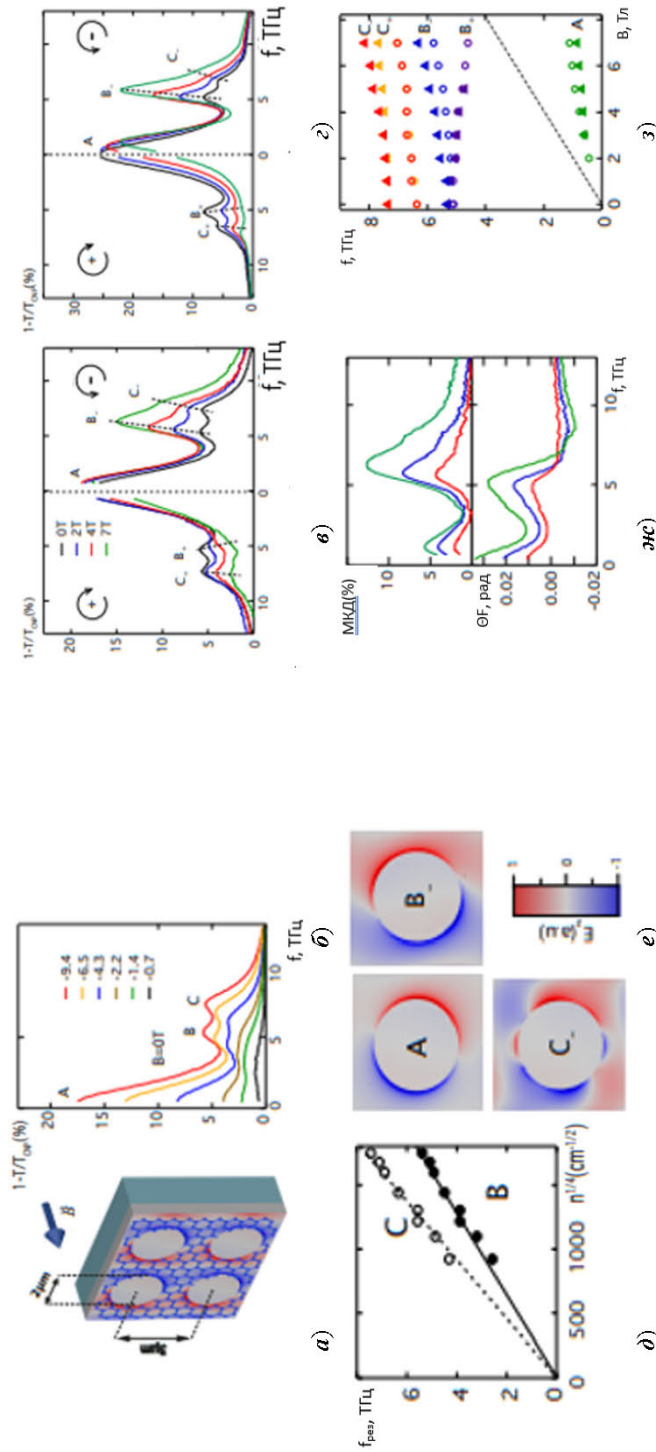


Рис. 6. Электромагнитооптический ТП-эксперимент и моделирование структурированного АТ графена: **a** – решетка АТ в структурированном графене (цветом показано распределение перпендикулярного переменного электрического поля E_z при возбуждении моды МППП (B-)); **b** – экспериментальные спектры МО-экстинкции при $B = 0$ для различных концентраций носителей заряда n (p -легирование); **c** – экспериментальные спектры МО-экстинкции при $B = 0$ для различных значений индукции B внешнего статического магнитного поля для право- и левополяризованной волны для $n = -9,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$; пунктирные линии – эволюция пиков В и С; **d** – моделирование методом конечных элементов экспериментальных данных (при том же уровне легирования n и значениях B статического магнитного поля, как на **b**); **e** – зависимость от легирования пиков Брэгга В и С из **d**); **f** – распределение E_z , соответствующее модам А-, В- и С- при $B = 7 \text{ Тл}$, как показано на **d**); **ж** – спектры магнитного кругового дихроизма (МКД) и угла фарадеевского вращения θ_F , соответствующие **e**); **з** – зависимость от индукции B статического магнитного поля экспериментальных (треугольники) и моделированных (круги) МППП частот, соответствующих **e** и **г**; пунктирная линия – объемный циклотронный резонанс при $T = 250 \text{ К}$) [4]

В работе [39] сообщается о наблюдении коллективных возбуждений плазмонного типа в решетках квазинейтральных эпитаксиальных ГНЛ под воздействием перпендикулярного статического магнитного поля в ИК-диапазоне. Показано, что возможность поддерживать МППП в узких ГНЛ позволяет исследовать закон дисперсии МППП в большом интервале параметров. Для решеток узких ГНЛ (шириной $w = 100$ нм) наблюдается уменьшение длины волны МППП примерно в 165 раз – значение, которое трудно достичь в обычных плазмонных материалах, но оно согласуется с предсказанным для графена [39].

Численно исследованы МО-отклики фотонных кристаллов на основе графена, интегрированного в микрорезонаторы, под воздействием внешнего статического магнитного поля в ИК-диапазоне [40]. Структура состоит из листа графена, заключенного между двумя зеркально-симметричными брэгговскими отражателями. Результаты показали, что можно получить линейно-поляризованное выходное ИК-излучение без эллиптичности и с высоким коэффициентом прохождения, улучшенным эффектом Фарадея. Эти результаты могут быть использованы при разработке фотонных устройств на основе графена и интегральных МО-элементов, таких как миниатюрные ИК-клапаны и циркуляторы [40, 41].

3. Динамически перестраиваемые внешним магнитным полем ТГц-, ИК-устройства на основе графена с электростатическим управлением

Проведено моделирование динамически перестраиваемого внешним магнитным полем ТГц-поглотителя, состоящего из решетки периодических металлических (золотых) дисков и графенового листа на отражающей подложке (диэлектрик/золото) [42]. Результаты показывают, что под действием перпендикулярно приложенного внешнего статического магнитного поля возникает новый пик поглощения, который при увеличении уровня Ферми E_f графена (0,1–0,3 эВ) при $B = 10$ Тл смещается по частоте от 14,22 до 4,47 ТГц. При фиксированном уровне Ферми $E_f = \text{const}$ пик поглощения смещается в сторону более низких ТГц-частот при увеличении магнитного поля. Пик поглощения можно усилить, используя многослойный графен. Эти результаты могут способствовать разработке и применению электрически и магнитно-перестраиваемых ТГц-поглотителей [42].

Узкополосные ТГц-поглотители на основе графена могут быть перестроены по частоте с помощью статического электрического поля, однако диапазон перестраиваемых частот ограничен (< 3 ТГц) [17]. Разработан многодиапазонный ТГц-поглотитель на основе графена (и слоистого диэлектрика из кремния) с магнитной перестройкой частоты в широкой полосе частот ТГц-диапазона. Частота пика поглощения для левополяризованной волны может быть динамически перестроена путем изменения внешнего статического магнитного поля в трех диапазонах частот, и поглощение волны может достигать 99,91 %, что имеет большой потенциал для различных ТГц-компонентов с переключением частоты, таких как сенсоры круговой поляризации, поляризаторы, оптические детекторы магнитного кругового дихроизма и другие оптоэлектронные устройства ТГц-диапазона [17].

Проведено моделирование плазмонного ТГц-сенсора на основе графена с фотонным спиновым эффектом Холла с использованием МО-явлений,

состоящего из германиевой призмы, диэлектрического слоя и графенового монослоя, в ТГц-диапазоне с целью получения высокочувствительного и надежного зондирования в переменном магнитном поле [43]. ТГц-сенсор может быть использован для раннего обнаружения вирусов, таких как SARS-Cov-2, и утечки радиации в ядерных реакторах, а также измерения концентрации определенного газа в заданной газовой смеси [43].

Разработан магнитный сенсор, использующий невязимное распространение ППП по слою графена, расположенного на МО-решетке [44]. В отличие от случая отсутствия статического магнитного поля из-за МО-характеристик решетки пик поглощения ТГц-волны для каждой падающей моды с невязимным поведением может быть реализован на двух разных частотах. Разность частот этих мод зависит от приложенного магнитного поля. Эта идея может обеспечить подход к измерению величины приложенного магнитного поля. Сенсор можно применить в различных оптических системах, использующих возможности магнитного поля, таких как медицинские диагностические устройства и экспериментальные установки для физиков [44].

Разработан перестраиваемый ТГц-фильтр, состоящий из слоев графена и подложки из поливинилхлорида, для перестройки резонансной частоты. Наличие магнитного поля и гиромангнитных материалов, таких как графен, позволяет в предлагаемой конфигурации иметь как ТЕ-, так и ТМ-поляризацию волны на выходе структуры. Кроме того, достигается возможность перестройки полосы пропускания около 5 ТГц, что значительно выше по сравнению с существующими разработками. Этот исключительно перестраиваемый ТГц-фильтр обладает огромным потенциалом для различных приложений, включая ТГц-спектроскопию [45].

Предложен перестраиваемый ТГц-переключатель-фильтр на основе магнитоплазмонного графенового нанодиска (ГНД), соединенного с двумя ГНЛ, ориентированными под углом 90° друг к другу. ГНД намагничивается статическим магнитным полем [46], перпендикулярным его плоскости. Физический принцип работы устройства основан на распространении ППП в ГНЛ и возбуждении дипольной моды МППП в ГНД-резонаторе. Режим выключения может быть реализован переключением статического магнитного поля на нулевое значение или химического потенциала ГНД на ноль. Это приводит к соотношению on/off лучше, чем 20 дБ. Небольшая перестройка центральной частоты переключателя химическим потенциалом возможна при фиксированном статическом магнитном поле [46].

Результаты численного моделирования магнитно-перестраиваемого ТГц-соединителя на основе графена для различных физических параметров графена показывают, что его ТГц-характеристики можно контролировать, изменяя внешнее магнитное поле и химический потенциал [47].

Исследовано влияние магнитного поля на оптическую нелинейность, наблюдаемую в слоистых графеновых структурах [48–51]. Графен, сформированный в виде плазмонных структур, таких как ГЛ, ГНД, графеновые кольца (ГК), сильно увеличивает не только линейное, но и нелинейное оптическое взаимодействие с излучением при резонансе [51, 52].

Фото возбужденный графен, в котором энергия Ферми изменяется оптической накачкой, может усилить изначально чрезвычайно слабый магнит-

ный резонанс, демонстрируя замечательную модуляцию прохождения ТГц-излучения через метаповерхности из разрезных ГК, что открывает новые возможности графеновых метаповерхностей с оптической накачкой для ТГц-модуляторов [51].

В работе [52] представлено использование расщепления плазмонного поглощения на две ветви в результате гибридизации ППП с циклотронным резонансом в магнитном поле для перестройки нелинейной оптической реакции ГНД. Показано, что в зависимости от относительной частоты по отношению к резонансной частоте ППП ГНД нелинейное поведение можно перестраивать в широком диапазоне, т.е. инвертировать вызванное накачкой увеличение пропускания при резонансе в его уменьшение приложением магнитного поля в интервале до 3 Тл [52].

МО-модуляторы используют МО-эффекты для модуляции ТГц-излучения, такие как эффект Фарадея или МО-эффект Керра. Эффект легирования и применение внешнего статического магнитного поля в графене использованы для реализации полностью оптической модуляции. Разработан модулятор на основе графена и гирозлектрического (InSb) материала на частоте 0,35 ТГц в полосе частот атмосферного окна, что перспективно для будущей беспроводной связи [53]. Максимальное значение угла вращения Фарадея (45°), коэффициента прохождения и глубины модуляции (80 и 100 % соответственно) получено на частоте 0,35 ТГц для умеренного по величине статического магнитного поля. Относительный коэффициент прохождения ТГц-сигнала может быть изменен от 0 до 80 % при изменении приложенного статического магнитного поля. Эта конструкция открывает новый путь для создания сверхтонких нанопотонных МО-устройств для реализации поляризационных модуляторов с высоким коэффициентом прохождения в ТГц-диапазоне [53].

Заключение

Последние результаты в области магнитоплазмоники графена показывают, что графен является многообещающей платформой, способной сыграть важную роль в разработке электрически и магнитно-перестраиваемых плазмонных устройств ТГц- и среднего ИК-диапазонов. Перестройка «гигантского» фарадеевского вращения в графеновых метаповерхностях с использованием как гиротропии (внешним магнитным полем), так и химического потенциала графена (химическим легированием или электрическим полем) применима для магнитного управления электромагнитным излучением в ТГц- и ИК-диапазонах.

Новый метод перестройки, открывающий возможность контролировать резонансную частоту МППП графеновых структур не через геометрии, а с помощью внешнего магнитного поля, в сочетании с возможностью изменять плотность носителей заряда с помощью внешнего электрического поля, открывает перспективы для разработки динамически перестраиваемых ТГц-, ИК-устройств, использующих исключительно МО-свойства графена, включая ТГц-поглотители, переключатели, поляризаторы, фильтры, сенсоры, модуляторы и интегральные манооптические элементы, такие как ИК-вентили и циркуляторы, для их применений в фотонике и оптоэлектронике, телекоммуникациях, ТГц-спектроскопии и биомедицинских технологиях.

Список литературы

1. Rahulkumar S. S., Prashant K. S. From fundamentals to applications: The development of magnetoplasmonics for next-generation technologies // *Materials Today Electronics*. 2023. Vol. 4. P. 100033. doi: 10.1016/j.mtelec.2023.100033
2. Santonocito A., Patrizi B., Toci G. Recent Advances in Tunable Metasurfaces and Their Application in Optics // *Nanomaterials* (Basel). 2023. Vol. 13 (10). P. 1633. doi: 10.3390/nano13101633
3. Padmanabhan P., Boubanga-Tombet S., Fukidome H. [et al.]. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 116. P. 221 107. doi: 10.1063/5.0006448
4. Poumirol J. M., Liu P., Slipchenko T. [et al.]. Electrically controlled terahertz magneto-optical phenomena in continuous and patterned graphene // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 14 626. doi: 10.1038/ncomms14626
5. Chen P.-Y., Farhat M., Sakhdari M. [et al.]. Graphene nanoelectromagnetics: From radio frequency, terahertz to mid-infrared // *Carbon-Based Nanoelectromagnetics* / ed. by A. Maffucci, S. Maksimenko, Y. Svirko. Elsevier, 2019. P. 31–59. doi: 10.1016/b978-0-08-102393-8.00002-9
6. Fallahi A., Perruisseau-Carrier J. Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. P. 1–5.
7. Ben Rhouma M., Guizal B., Bonnet P. [et al.]. Semi-analytical model for the analysis of a magnetically biased 1D subwavelength graphene-strip-grating // *Opt. Continuum*. 2022. Vol. 1. P. 1144–1156.
8. Nedoliuk I. O., Hu S., Geim, A. K. [et al.]. Colossal infrared and terahertz magneto-optical activity in a two-dimensional Dirac material // *Nat. Nanotechnol.* 2019. Vol. 14. P. 756–761. doi: 10.1038/s41565-019-0489-8
9. Researchers Confirm Strong Magneto-Optical Resonance in Graphene // *Photonics Spectra*. URL: https://www.photonics.com/Articles/Researchers_Confirm_Strong_Magneto-Optic/a64929
10. Baryshnikov K. A., Vasilyev Yu. B., Novikov S. [et al.]. Terahertz photoconductivity enhancement in graphene in magnetic fields // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1482. P. 012039. doi: 10.1088/1742-6596/1482/1/012039
11. Jahani D., Akhavan O., Alidoust Ghatar A. Magneto-tunable terahertz absorption in single-layer graphene: A general approach // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2023. Vol. 151. P. 115 728. doi: 10.1016/j.physe.2023.115728
12. Lee Jaewookand, Lee Jaebeom. Magneto-optically active magnetoplasmonic graphene // *Chem. Commun.* 2017. Vol. 53. P. 5814–5817. doi: 10.1039/C7CC01207A
13. Baryshnikov K. A., Vasilyev Yu. B., Novikov S. [et al.]. Terahertz photoconductivity enhancement in graphene in magnetic fields // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1482 (1). P. 012 039. doi: 10.1088/1742-6596/1482/1/012039
14. Crassee I., Orlita M., Potemski M. Intrinsic terahertz plasmons and magnetoplasmons in large scale monolayer graphene // *Nano Lett.* 2012. Vol. 12 (5). P. 2470–2474. doi: 10.1021/nl300572y
15. Roumi B., Abdi-Ghaleh R. Tunable polar magneto-optical Kerr rotation of light from a one-dimensional photonic crystal containing a Graphene/InAs slab at THz range // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2022. Vol. 144. P. 115 445. doi: 10.1016/j.physe.2022.115445
16. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. [et al.]. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic Applications // *Sensor*. 2020. Vol. 20 (5). P. 1401. doi: 10.3390/s20051401
17. Wei Z., Jiang Y., Wang J. Frequency Magnetically Tunable Terahertz Perfect Absorber Based on Graphene and Silica Layered Dielectric // *Crystals*. 2023. № 13 (4). P. 553. doi: 10.3390/cryst13040553

18. Hu B., Zhang Y., Wang Q. J. Surface magnetoplasmons and their applications in the infrared frequencies // *Nanophotonics*. 2015. Vol. 4, № 4. P. 383–396. doi: 10.1515/nanoph-2014-0026
19. Magnetoplasmonics in graphene systems // Honey John Research Group. URL: <https://honeycusat.org/magnetoplasmonics.php>
20. Kuzmin D. A., Bychkov I. V., Shavrov V. G. [et al.]. Plasmonics of magnetic and topological graphene-based nanostructures // *Nanophotonics*. 2018. Vol. 7, № 3. P. 597–611. doi: 10.1515/nanoph-2017-0095
21. Liu J.-Q., Zhou Y.-X., Li L. [et al.]. Controlling plasmon-induced transparency of graphene metamolecules with external magnetic field // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23. P. 12524–12532.
22. Yang L., Tian J., Giddens H. [et al.]. Magnetically tunable graphene-based reflector under linear polarized incidence at room temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 112. P. 151 103.
23. Armelles G., Cebollada A., García-Martín A. [et al.]. Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities // *Advanced Optical Materials*. 2013. Vol. 1, № 1. P. 10–35. doi: 10.1002/adom.201200011
24. Wang N., Ding L., Wang W. Chemical potential and magnetic field effects on graphene magnetoplasmons // *Phys. Rev. B*. 2023. Vol. 108, № 8. P. 085406–085415.
25. Chamanara N., Caloz C. Graphene magnetoplasmonic principles, structures and devices // 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (Portugal, Lisbon, April 13–17, 2015). Lisbon, 2015. P. 1–2.
26. Dapolito M., Tsuneto M., Zheng W. [et al.]. Infrared Nano-Imaging of Dirac Magnetoexcitons in Graphene // *Nat Nanotechnol.* 2023. Vol. 18 (12). P. 1409–1415. doi: 10.21203/rs.3.rs-2622280/v1
27. Amanatiadis S., Ohtani T., Kanai Y. [et al.]. Tuning of magnetoplasmon coupling between graphene scatterers for the optimal design of adjustable metasurfaces // *AIP Advances*. 2024. Vol. 14. P. 025 225. doi: 10.1063/9.0000808
28. Yang W., Qin J., Long J. [et al.]. A self-biased non-reciprocal magnetic metasurface for bidirectional phase modulation // *Nat Electron.* 2023. Vol. 6. P. 225–234. doi: 10.1038/s41928-023-00936-w
29. Wang D., He X., Yang B. [et al.]. Active wavefronts control with graphene-functionalized terahertz metasurfaces // *Diamond and Related Materials*. 2022. Vol. 124. P. 108919. doi: 10.1016/j.diamond.2022.108919
30. He K., Ning T., Li J. [et al.]. Wavefront reconfigurable metasurface through graphene micro-ribbons with resonant strategy // *Results in Physics*. 2023. Vol. 49. P. 106484. doi: 10.1016/j.rinp.2023.106484
31. Deop-Ruano R., Sanders S., Alabastri A. [et al.]. Optical Response of Periodic Arrays of Graphene Nanodisks // *Phys. Rev. Applied*. 2022. Vol. 18. P. 044071. doi: 10.1103/PhysRevApplied.18.044071
32. Rhouma M. B., Edee K. S., Guizal B. Modeling the Excitation of Graphene Magnetoplasmons in Periodic Grating of Magnetostatic Biased Graphene Ribbons // *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Prague, Czech Republic, 2023. URL: <https://hal.science/hal-04172452v1>
33. Tymchenko M., Nikitin A. Y., Martín-Moreno L. Faraday rotation due to excitation of magnetoplasmons in graphene microribbons // *ACS nano*. 2013. Vol. 7, № 11. P. 9780–9787.
34. Lu Y., Wang Ch., Zhao Sh. [et al.]. Magnetically Tunable Graphene-Based Terahertz Metasurface // *Frontiers in Physics*. 2020. Vol. 8. P. 622 839. doi: 10.3389/fphy.2020.62283
35. Zhou Z., Gan Z., Cao L. Enhanced polarization conversion and giant Faraday rotation in patterned terahertz graphene metamaterials with combined electrical and magnetic tuning // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2023. Vol. 56. P. 365 104. doi: 10.1088/1361-6463/acda45

36. Gonçalves P. A. D., Dias E. J. C., Bludov Yu. V. [et al.]. Modeling the excitation of graphene plasmons in periodic grids of graphene ribbons: An analytical approach // *Phys. Rev. B*. 2016. Vol. 94. P. 195421.
37. Prasankumar R. P. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 116. P. 221107. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0006448>
38. Bludov Yu. V., Vasilevskiy M. I., Peres N. M. R. Magnetic field assisted transmission of THz waves through a graphene layer combined with a periodically perforated metallic film // *Phys. Rev. B*. 2018. Vol. 97. P. 045433.
39. Poumirol J. M., Yu W., Chen X. [et al.]. Magnetoplasmons in Quasineutral Epitaxial Graphene Nanoribbons // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110. P. 246803.
40. Abdi-Ghaleh R., Sattari M. Magneto-optical responses of microcavity-integrated graphene photonic crystals in the infrared spectral region // *Superlattices and Microstructures*. 2016. Vol. 97. P. 78–84. doi: 10.1016/j.spmi.2016.06.007
41. Han Y. X., Chen B. B., Yang J. B. [et al.]. Optical absorption of suspended graphene based metal plasmonic grating in the visible range // *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5, № 5. P. 055 801. doi: 10.1088/2053-1591/aab90b
42. Cheng R., Zhou Y., Liu H. [et al.]. Tunable graphene-based terahertz absorber via an external magnetic field // *Opt. Mater. Express*. 2020. Vol. 10. P. 501–512.
43. Kumar P., Sharma A. K., Prajapati Y. K. Graphene-Based Plasmonic Sensor at THz Frequency with Photonic Spin Hall Effect Assisted by Magneto-optic Phenomenon // *Plasmonics*. 2022. Vol. 17. P. 957–963. doi: 10.1007/s11468-021-01569-5
44. Dolatabady A., Granpayeh N. Plasmonic Magnetic Sensor Based on Graphene Mounted on a Magneto-Optic Grating // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. Vol. 54, № 2. P. 1–5. doi: 10.1109/TMAG.2017.2775190
45. Parsa A. A., Tavakoli M. B., Setoudeh F. [et al.]. Design and numerical simulation of modified tunable THz filter based on periodic graphene-PVC ribbons // *Physica Scripta*. 2024. Vol. 99, № 4. P. 045519. doi: 10.1088/1402-4896/ad2e63
46. Dmitriev V., Melo G., Castro W. Tunable THz Switch-Filter Based on Magneto-Plasmonic Graphene Nanodisk // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021. Vol. 57, № 5. P. 1–9. doi: 10.1109/TMAG.2021.3061644
47. Hlali A., Houaneb Z., Zairi H. Modeling of Magnetically Biased Graphene Coupler at Terahertz Frequency Through an Improved Anisotropic WCIP Method // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020. Vol. 56, № 8. P. 1–8. doi: 10.1109/TMAG.2020.3000669
48. Mönch E., Hubmann S., Yahniuk I. [et al.]. Nonlinear intensity dependence of ratchet currents induced by terahertz laser radiation in bilayer graphene with asymmetric periodic grating gates // *J. Appl. Phys.* 2023. Vol. 134. P. 123 102. doi: 10.1063/5.0165248
49. Mönch E., Potashin S. O., Lindner K. [et al.]. Cyclotron and magnetoplasmon resonances in bilayer graphene ratchets // *Phys. Rev. B*. 2023. Vol. 107. P. 115 408.
50. Avinash K., Goswami N., Saha A. Magnetically tunable ultralow threshold optical bistability by exciting LRSPR in InAs/graphene layers at the terahertz region // *Appl. Opt.* 2023. Vol. 62. P. 3797–3805. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-62-14-3797>
51. Fan Y., Shen N., Zhang F. [et al.]. Photoexcited Graphene Metasurfaces: Significantly Enhanced and Tunable Magnetic Resonances // *ACS Photonics*. 2018. Vol. 5. P. 1612–1618.
52. Chin M. L., Matschy S., Stawitzki F. [et al.]. Observation of strong magnetoplasmonic nonlinearity in bilayer graphene discs // *Phys. Photonics*. 2021. Vol. 3. P. 1LT01. doi: 10.1088/2515-7647/abd7d0
53. Kazemi A. H., Mokhtari A., Zamani M. Graphene-based magneto-optical THz modulator with 100% depth of modulation for communication purposes // *Optical Materials*. 2022. Vol. 123. P. 111 944. doi: 10.1016/j.optmat.2021.111944

References

1. Rahulkumar S.S., Prashant K.S. From fundamentals to applications: The development of magnetoplasmonics for next-generation technologies. *Materials Today Electronics*. 2023;4:100033. doi: 10.1016/j.mtelec.2023.100033
2. Santonocito A., Patrizi B., Toci G. Recent Advances in Tunable Metasurfaces and Their Application in Optics. *Nanomaterials (Basel)*. 2023;13(10):1633. doi: 10.3390/nano13101633
3. Padmanabhan P., Boubanga-Tombet S., Fukidome H. et al. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116:221107. doi: 10.1063/5.0006448
4. Poumirol J.M., Liu P., Slipchenko T. et al. Electrically controlled terahertz magneto-optical phenomena in continuous and patterned graphene. *Nat. Commun.* 2017;8:14626. doi: 10.1038/ncomms14626
5. Chen P.-Y., Farhat M., Sakhdari M. et al. Graphene nanoelectromagnetics: From radio frequency, terahertz to mid-infrared. *Carbon-Based Nanoelectromagnetics* / ed. by A. Maffucci, S. Maksimenko, Y. Svirko. Elsevier, 2019:31–59. doi: 10.1016/b978-0-08-102393-8.00002-9
6. Fallahi A., Perruisseau-Carrier J. Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces. *Appl. Phys. Lett.* 2012;101:1–5.
7. Ben Rhouma M., Guizal B., Bonnet P. et al. Semi-analytical model for the analysis of a magnetically biased 1D subwavelength graphene-strip-grating. *Opt. Continuum*. 2022;1:1144–1156.
8. Nedoliuk I.O., Hu S., Geim, A.K. et al. Colossal infrared and terahertz magneto-optical activity in a two-dimensional Dirac material. *Nat. Nanotechnol.* 2019;14:756–761. doi: 10.1038/s41565-019-0489-8
9. Researchers Confirm Strong Magneto-Optical Resonance in Graphene. *Photonics Spectra*. Available at: https://www.photonics.com/Articles/Researchers_Confirm_Strong_Magneto-Optic/a64929
10. Baryshnikov K.A., Vasilyev Yu.B., Novikov S. et al. Terahertz photoconductivity enhancement in graphene in magnetic fields. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1482:012039. doi: 10.1088/1742-6596/1482/1/012039
11. Jahani D., Akhavan O., Alidoust Ghatar A. Magneto-tunable terahertz absorption in single-layer graphene: A general approach. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2023;151:115 728. doi: 10.1016/j.physe.2023.115728
12. Lee Jaewookand, Lee Jaebeom. Magneto-optically active magnetoplasmonic graphene. *Chem. Commun.* 2017;53:5814–5817. doi: 10.1039/C7CC01207A
13. Baryshnikov K.A., Vasilyev Yu.B., Novikov S. et al. Terahertz photoconductivity enhancement in graphene in magnetic fields. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1482(1):012039. doi: 10.1088/1742-6596/1482/1/012039
14. Crassee I., Orlita M., Potemski M. Intrinsic terahertz plasmons and magnetoplasmons in large scale monolayer graphene. *Nano Lett.* 2012;12(5):2470–2474. doi: 10.1021/nl300572y
15. Roumi V., Abdi-Ghaleh R. Tunable polar magneto-optical Kerr rotation of light from a one-dimensional photonic crystal containing a Graphene/InAs slab at THz range. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2022;144:115445. doi: 10.1016/j.physe.2022.115445
16. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. et al. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic Applications. *Sensor*. 2020;20(5):1401. doi: 10.3390/s20051401
17. Wei Z., Jiang Y., Wang J. Frequency Magnetically Tunable Terahertz Perfect Absorber Based on Graphene and Silica Layered Dielectric. *Crystals*. 2023;(13):553. doi: 10.3390/cryst13040553

18. Hu B., Zhang Y., Wang Q.J. Surface magnetoplasmons and their applications in the infrared frequencies. *Nanophotonics*. 2015;4(4):383–396. doi: 10.1515/nanoph-2014-0026
19. Magnetoplasmonics in graphene systems. *Honey John Research Group*. Available at: <https://honeycusat.org/magnetoplasmonics.php>
20. Kuzmin D.A., Bychkov I.V., Shavrov V.G. et al. Plasmonics of magnetic and topological graphene-based nanostructures. *Nanophotonics*. 2018;7(3):597–611. doi: 10.1515/nanoph-2017-0095
21. Liu J.-Q., Zhou Y.-X., Li L. et al. Controlling plasmon-induced transparency of graphene metamolecules with external magnetic field. *Opt. Express*. 2015;23:12524–12532.
22. Yang L., Tian J., Giddens H. et al. Magnetically tunable graphene-based reflector under linear polarized incidence at room temperature. *Appl. Phys. Lett.* 2018;112:151103.
23. Armelles G., Cebollada A., García-Martín A. et al. Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities. *Advanced Optical Materials*. 2013;1(1):10–35. doi: 10.1002/adom.201200011
24. Wang N., Ding L., Wang W. Chemical potential and magnetic field effects on graphene magnetoplasmons. *Phys. Rev. B*. 2023;108(8):085406–085415.
25. Chamanara N., Caloz C. Graphene magnetoplasmonic principles, structures and devices. *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (Portugal, Lisbon, April 13–17, 2015)*. Lisbon, 2015:1–2.
26. Dapolito M., Tsuneto M., Zheng W. et al. Infrared Nano-Imaging of Dirac Magnetoexcitons in Graphene. *Nat Nanotechnol.* 2023;18(12):1409–1415. doi: 10.21203/rs.3.rs-2622280/v1
27. Amanatiadis S., Ohtani T., Kanai Y. et al. Tuning of magnetoplasmon coupling between graphene scatterers for the optimal design of adjustable metasurfaces. *AIP Advances*. 2024;14:025 225. doi: 10.1063/9.0000808
28. Yang W., Qin J., Long J. et al. A self-biased non-reciprocal magnetic metasurface for bidirectional phase modulation. *Nat Electron.* 2023;6:225–234. doi: 10.1038/s41928-023-00936-w
29. Wang D., He X., Yang B. et al. Active wavefronts control with graphene-functionalized terahertz metasurfaces. *Diamond and Related Materials*. 2022;124:108919. doi: 10.1016/j.diamond.2022.108919
30. He K., Ning T., Li J. et al. Wavefront reconfigurable metasurface through graphene micro-ribbons with resonant strategy. *Results in Physics*. 2023;49:106484. doi: 10.1016/j.rinp.2023.106484
31. Deop-Ruano R., Sanders S., Alabastri A. et al. Optical Response of Periodic Arrays of Graphene Nanodisks. *Phys. Rev. Applied*. 2022;18:044071. doi: 10.1103/PhysRevApplied.18.044071
32. Rhouma M.B., Edee K.S., Guizal B. Modeling the Excitation of Graphene Magnetoplasmons in Periodic Grating of Magnetostatic Biased Graphene Ribbons. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Prague, Czech Republic, 2023. Available at: <https://hal.science/hal-04172452v1>
33. Tymchenko M., Nikitin A.Y., Martín-Moreno L. Faraday rotation due to excitation of magnetoplasmons in graphene microribbons. *ACS nano*. 2013;7(11):9780–9787.
34. Lu Y., Wang Ch., Zhao Sh. et al. Magnetically Tunable Graphene-Based Terahertz Metasurface. *Frontiers in Physics*. 2020;8:622 839. doi: 10.3389/fphy.2020.62283
35. Zhou Z., Gan Z., Cao L. Enhanced polarization conversion and giant Faraday rotation in patterned terahertz graphene metamaterials with combined electrical and magnetic tuning. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2023;56:365104. doi: 10.1088/1361-6463/acda45
36. Gonçalves P.A.D., Dias E.J.C., Bludov Yu.V. et al. Modeling the excitation of graphene plasmons in periodic grids of graphene ribbons: An analytical approach. *Phys. Rev. B*. 2016;94:195421.

37. Prasankumar R.P. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116:221107. doi: 10.1063/5.0006448
38. Bludov Yu.V., Vasilevskiy M.I., Peres N.M.R. Magnetic field assisted transmission of THz waves through a graphene layer combined with a periodically perforated metallic film. *Phys. Rev. B.* 2018;97:045433.
39. Poumirol J.M., Yu W., Chen X. et al. Magnetoplasmons in Quasineutral Epitaxial Graphene Nanoribbons. *Phys. Rev. Lett.* 2013;110:246803.
40. Abdi-Ghaleh R., Sattari M. Magneto-optical responses of microcavity-integrated graphene photonic crystals in the infrared spectral region. *Superlattices and Microstructures.* 2016;97:78–84. doi: 10.1016/j.spmi.2016.06.007
41. Han Y.X., Chen B.B., Yang J.B. et al. Optical absorption of suspended graphene based metal plasmonic grating in the visible range. *Materials Research Express.* 2018;5(5):055 801. doi: 10.1088/2053-1591/aab90b
42. Cheng R., Zhou Y., Liu H. et al. Tunable graphene-based terahertz absorber via an external magnetic field. *Opt. Mater. Express.* 2020;10:501–512.
43. Kumar P., Sharma A.K., Prajapati Y.K. Graphene-Based Plasmonic Sensor at THz Frequency with Photonic Spin Hall Effect Assisted by Magneto-optic Phenomenon. *Plasmonics.* 2022;17:957–963. doi: 10.1007/s11468-021-01569-5
44. Dolatabady A., Granpayeh N. Plasmonic Magnetic Sensor Based on Graphene Mounted on a Magneto-Optic Grating. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2018;54(2):1–5. doi: 10.1109/TMAG.2017.2775190
45. Parsa A.A., Tavakoli M.B., Setoudeh F. et al. Design and numerical simulation of modified tunable THz filter based on periodic graphene-PVC ribbons. *Physica Scripta.* 2024;99(4):045519. doi: 10.1088/1402-4896/ad2e63
46. Dmitriev V., Melo G., Castro W. Tunable THz Switch-Filter Based on Magneto-Plasmonic Graphene Nanodisk. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2021;57(5):1–9. doi: 10.1109/TMAG.2021.3061644
47. Hlali A., Houaneb Z., Zairi H. Modeling of Magnetically Biased Graphene Coupler at Terahertz Frequency Through an Improved Anisotropic WCIP Method. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2020;56(8):1–8. doi: 10.1109/TMAG.2020.3000669
48. Mönch E., Hubmann S., Yahniuk I. et al. Nonlinear intensity dependence of ratchet currents induced by terahertz laser radiation in bilayer graphene with asymmetric periodic grating gates. *J. Appl. Phys.* 2023;134:123 102. doi: 10.1063/5.0165248
49. Mönch E., Potashin S.O., Lindner K. et al. Cyclotron and magnetoplasmon resonances in bilayer graphene ratchets. *Phys. Rev. B.* 2023;107:115 408.
50. Avinash K., Goswami N., Saha A. Magnetically tunable ultralow threshold optical bistability by exciting LRSPR in InAs/graphene layers at the terahertz region. *Appl. Opt.* 2023;62:3797–3805. Available at: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-62-14-3797>
51. Fan Y., Shen N., Zhang F. et al. Photoexcited Graphene Metasurfaces: Significantly Enhanced and Tunable Magnetic Resonances. *ACS Photonics.* 2018;5:1612–1618.
52. Chin M.L., Matschy S., Stawitzki F. et al. Observation of strong magnetoplasmonic nonlinearity in bilayer graphene discs. *Phys. Photonics.* 2021;3:1LT01. doi: 10.1088/2515-7647/abd7d0
53. Kazemi A.H., Mokhtari A., Zamani M. Graphene-based magneto-optical THz modulator with 100% depth of modulation for communication purposes. *Optical Materials.* 2022;123:111 944. doi: 10.1016/j.optmat.2021.111944

Информация об авторах / Information about the authors

Галина Степановна Макеева

доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
радиотехники и радиоэлектронных
систем, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Galina S. Makeeva

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, professor
of the sub-department of radioengineering
and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.10.2024

Принята к публикации / Accepted 08.11.2024