

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 621.371.334:537.874.6

doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-10

ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ УСТРОЙСТВА ДАЛЬНОГО И СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ПЛАТФОРМЕ ГРАФЕНОВОЙ ПЛАЗМОНИКИ. ОБЗОР

Г. С. Макеева

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность тематики обусловлена необходимостью освоения инфракрасного (ИК) диапазона для оптических телекоммуникационных систем, ИК-спектроскопии и приложений биофотоники и диктуется потребностями нелинейной ИК-оптики в реализации активных оптических функций на основе графена, таких как генерация ИК-излучения, преобразование частоты для применений в оптической связи, обработке материалов, точных измерениях, спектроскопическом зондировании и биологических сенсорах. Цель данной работы – представить принципы построения и функционирования электрически перестраиваемых нелинейных устройств дальнего и среднего ИК-диапазона: генераторов гармоник и умножителей, преобразователей частоты и смесителей на основе графеновых ей, основываясь на новейших достижениях графеновой плазмоники. *Материалы и методы.* Графеновая плазмоника. *Результаты и выводы.* Уникальные свойства делают электронно-управляемые нелинейные устройства дальнего и среднего ИК-диапазона перспективным выбором для будущего нелинейного преобразователя частоты, оптического управления и обработки информации на платформе графеновой плазмоники.

Ключевые слова: инфракрасный диапазон, генераторы гармоник, преобразователи частоты, метаповерхность, графеновая плазмоника

Для цитирования: Макеева Г. С. Электронно-управляемые нелинейные устройства дальнего и среднего инфракрасного диапазона на платформе графеновой плазмоники. Обзор // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 90–103. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-10

ELECTRONICALLY CONTROLLED NONLINEAR DEVICES BASED ON THE GRAPHENE PLASMONICS PLATFORM IN THE FAR AND MID-INFRARED RANGE. REVIEW

G.S. Makeeva

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

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the need to master the infrared (IR) range for optical telecommunication systems, IR spectroscopy and biophotonics applications and is dictated by the needs of nonlinear IR optics for the implementation of active optical functions based on graphene, such as generation of IR radiation, frequency conversion for applications in optical communications, materials processing, precision measurements, spectroscopic sensing and biological sensors. The purpose of this work is to present the principles of construction and operation of electrically tunable nonlinear devices in the far and mid-IR range: harmonic generators and multipliers, frequency converters and mixers based on graphene metasurfaces using the latest achievements of graphene plasmonics. *Materials and methods.* Graphene plasmonics. *Results and conclusions.* The unique properties make electronically controlled nonlinear devices in the far and medium IR range a promising choice for the future nonlinear frequency converter, optical control and information processing on a graphene plasmonics board.

Keywords: infrared range, harmonic generators, frequency converters, metasurface, graphene plasmonics

For citation: Makeeva G.S. Electronically controlled nonlinear devices based on the graphene plasmonics platform in the far and mid-infrared range. Review. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):90–103. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-10

Введение

Освоение инфракрасного (ИК) диапазона актуально для оптических телекоммуникационных систем, ИК-спектроскопии и приложений биофотоники [1]. В том числе ИК-визуализация является важным методом во множестве приложений, включая ночное видение, автономную навигацию транспортных средств, оптическую томографию и контроль качества пищевых продуктов [1, 2]. Исследования в ИК-диапазоне имеют большой потенциал для многих областей применения, таких как оптическая беспроводная связь, химическое и биомолекулярное зондирование [3].

ИК-излучение находит применение в ряде областей, включая спектроскопию, медицину и безопасность. Кроме того, недавние разработки в ИК-технологиях привели к появлению нелинейной ИК-оптики, где интенсивные электромагнитные поля перспективны для исследования сверхбыстродействующих электронных явлений и для изучения новых оптических нелинейностей [4].

Нелинейная оптика является важной областью исследований в ИК-диапазоне для реализации активных оптических функций, таких как генерация ИК-излучения, преобразование частоты и сверхбыстродействующее оптическое переключение для применений в оптической связи, обработке материалов, точных измерениях, спектроскопическом зондировании и биологических сенсорах [5].

С момента первого получения в 2004 г. графен (одноатомный слой углерода, упакованный в гексагональную решетку) привлек внимание благодаря своим замечательным электрическим, оптическим и физическим свойствам [1]. Исследован необычайно большой нелинейно-оптический отклик графена. Нелинейные процессы третьего порядка, такие как оптический эффект Керра, генерация третьей гармоники и четырехволновое смешение (ЧВС) [6], экспериментально проверены на тонких пленках графена с одним или несколькими слоями [7, 8]. Нелинейные процессы второго порядка, такие как генерация разностной частоты, обычно считаются запрещенными в изотропной среде, но возможны в графене из-за явно нелокального пространственного характера взаимодействия [1].

Графен является выдающимся плазмонным материалом из-за его низких потерь и способности поддерживать перестраиваемые поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), в особенности в графеновых нанолентах (ГНЛ) и других ограниченных морфологиях в ТГц и среднем ИК-диапазонах [4]. Благодаря значительному увеличению поля ППП в графене могут усиливать присущую графену высокую нелинейность. Поскольку графен обладает уникальным свойством сверхвысокой нелинейности, особенно нелинейности третьего порядка, в широком спектральном диапазоне графен естественным образом адаптируется к нелинейным процессам преобразования частоты [9–13]. Графеновая плазмоника обеспечивает уникальную и превосходную платформу для типичных функций нелинейной оптической обработки сигналов в дальнем, среднем и ближнем ИК-диапазонах благодаря высокой нелинейной проводимости графена и жесткой локализации поля ППП [10].

Графеновая плазмоника возникла как платформа для реализации сильного взаимодействия излучения с материалами на сверхмалых масштабах длины (наноуровне) [11]. Возбуждение, детектирование и манипулирование ППП в графене с помощью зондов ближнего поля продемонстрированы на инфракрасных и терагерцевых частотах [11]. Высокая концентрация электрического поля как ключевой фактор нелинейных оптических явлений достигнута за счет возбуждения ППП с длиной волны всего несколько сотен нанометров, что примерно на два порядка короче длины электромагнитной волны в вакууме на этих же частотах [11].

ППП в графене обеспечивают стратегию для передовых ИК-технологий благодаря жесткому ограничению, сверхбыстродействующему отклику и возможности перестройки. Последние дости-

жения в области полностью оптической генерации ППП в графеновых планарных волноводах предлагают многообещающий метод высокоскоростной обработки сигналов в наноразмерных интегрированных оптоэлектронных устройствах [12].

Графен стал материалом, способным расширить область нелинейной плазмоники не только до ТГц, но и ИК-диапазона длин волн благодаря плазмонному отклику, исключительно высокой нелинейности третьего порядка, низким потерям в этих диапазонах, однослойной 2D-структуре, которая уменьшает объем взаимодействия излучения с веществом до чрезвычайно малых субволновых масштабов [14, 15]. ППП, возбуждаемые в графене, обеспечивают беспрецедентные уровни локализации излучения. Плазмонные резонансы в графене могут динамически перестраиваться с помощью электростатического смещения и позволяют создавать новое поколение реконфигурируемых плазмонных устройств, в частности ИК-биосенсоров, модуляторов, метаповерхностей и идеальных поглотителей [14]. Благодаря уникальному ограничению и частотной перестраиваемости графеновая плазмоника подходит для многих применений, включая ИК-детектирование, высокоэффективное ИК-поглощение, метаматериалы и химическое зондирование. В частности, графеновая плазмоника продемонстрировала большой потенциал в среднем ИК-диапазоне, где позволяет с высокой чувствительностью и избирательностью обнаруживать, например, молекулярные частицы по их колебательным спектрам и тепловому излучению [16].

Графен является самым нелинейным оптоэлектронным материалом из известных. Недавние эксперименты по терагерцевой, инфракрасной генерации высших гармоник в графене обеспечили непосредственное измерение коэффициентов нелинейности вплоть до седьмого порядка [17]. Обнаружено, что эти нелинейные коэффициенты на много порядков превышают соответствующие коэффициенты всех других известных электронных материалов [17]. Показано, что нелинейность графена как для сверхкоротких однопериодных, так и для квазимонохроматических многопериодных входных ТГц-, ИК-сигналов может эффективно управляться и контролироваться с помощью электрического стробирования с напряжением стробирования всего несколько вольт [17]. Показано, что нелинейность третьего порядка графена исключительно велика и может изменяться на порядки с помощью контролируемого легирования или сдвига химического потенциала [18]. Возникающая в результате гигантская нелинейность графена может найти большое применение в будущих оптоэлектронных устройствах. Действительно, в графене наблюдаются такие нелинейные эффекты, как генерация третьей гармоники, ЧВС, оптический эффект Керра, фазовая самомодуляция, двухчастотная когерентная оптическая инжекция тока и даже генерация высших гармоник [18].

В настоящее время продолжающиеся исследования нелинейных явлений в 2D материалах в основном сосредоточены на генерации гармоник. ЧВС в ближнем ИК-диапазоне осуществлено в монослое графена [19]. Недавно еще большее значение нелинейной восприимчивости третьего порядка получено в ГНЛ на частотах среднего ИК-диапазона, близких к поперечному плазмонному резонансу [5, 20].

Новой темой в исследованиях нелинейной оптики является реализация высокоэффективных оптических функций в сверхмалых субволновых структурах путем использования интересных оптических резонансов в метаповерхностях [21]. Усовершенствованные оптические элементы, состоящие из графеновых метаповерхностей, функционирующих в телекоммуникационном ИК-диапазоне, обещают уменьшить занимаемую площадь и раскрыть новые функциональные возможности оптических ИК-устройств [22, 23]. Результаты эксперимента, в котором ППП сильно влияют на нелинейные свойства графеновых метаповерхностей, подчеркивают потенциал графеновой плазмоники для разработки модуляторов, мультиплексоров, световой логики, которые можно использовать в оптических межсоединениях [20].

Метаповерхности открыли беспрецедентные возможности для необычных процессов волновой инженерии [24]. В нелинейных поляритонных метаповерхностях – субволновых структурах – эффективность, спектральный диапазон и локальная фаза при нелинейном смещении волн не зависят от фазового согласования, а только от нелинейного отклика составляющих метаатомов [25].

Визуализация на основе конверсии с повышением частоты – это успешный инновационный метод ИК-визуализации с точки зрения чувствительности, скорости и шумовых характеристик [26–31]. В этом подходе ИК-изображение преобразуется с повышением частоты для формирования видимого/ближнего ИК-изображения посредством параметрического трехволнового смешения с последующим обнаружением с помощью детектора или камеры на основе кремния [27]. Продемонстрировано усиление ЧВС в компактном микрорезонаторе из кремния и графена в резонаторе [28]. Представлены два нелинейных многоканальных компонента на основе графена [32], включающие усиленный графеном кремниевый дисковый резонатор для полностью оптической маршрутизации

в ближнем ИК вместе с графеновым микрополосковым резонатором для ЧВС в дальнем ИК-диапазоне [29, 30]. Показано, что значительная эффективность квантового преобразования СВЧ в оптический диапазон в многослойном графене достигается для микровольтовых СВЧ-возбуждающих напряжений [31, 33].

Принципы построения нелинейных устройств преобразования частоты среднего ИК-диапазона

Нелинейные оптические материалы используются для преобразования когерентного монохроматического излучения в другие требуемые длины волн в ультрафиолетовом, видимом, ИК- и ТГц-диапазонах. Преобразование происходит посредством ряда нелинейных процессов преобразования с повышением и понижением частоты, таких как генерация гармоник и генерация комбинационных частот [34].

Преобразование частоты с помощью нелинейных электронных компонентов – распространенный подход к обработке сигналов, необходимый в различных приложениях связи, выявил узкое место в рабочей полосе частот в ИК-диапазоне из-за ограниченной подвижности носителей заряда в традиционных материалах. Между тем волоконно-оптическая связь играет значительную роль в услугах связи благодаря своим превосходным характеристикам передачи сигналов. Однако передаваемые оптические сигналы должны быть преобразованы в электрические сигналы с помощью фотодетекторов до того, как преобразование частоты выполнено с помощью обычных электронных устройств, что делает эту систему преобразования очень сложной и дорогостоящей. Следовательно, разработка компактных оптических устройств, которые могут одновременно выполнять функции и преобразования частоты и фотодетектирования, имеет большое значение [35].

Полностью оптические преобразователи длин волн, использующие сверхбыстрые нелинейные эффекты, являются важными компонентами оптических сетей связи из-за их преимуществ высокой скорости, прозрачности, скорости передачи данных, низкого чирпа по сравнению с современными электронными системами обработки сигналов [3].

Разработка универсальных смесителей частоты для оптических частот остается сложной задачей: такие устройства обычно основаны на слабых нелинейных оптических процессах и, следовательно, должны удовлетворять условиям фазового синхронизма [36, 37.]. Хотя эффективность преобразования для оптических метасмесителей низкая, показано, что эффективность может быть значительно улучшена путем наложения нескольких слоев метаматериала [38].

Преобразователи частоты среднего ИК-диапазона на основе графеновых метаповерхностей

Нелокальная оптическая нелинейность, контролируемая ППП в структурированной графеновой среде, где наблюдается эффект электропоглощения, генерирует эффективное нелинейное смешение волн в среднем ИК-диапазоне, которое зависит от легирования графена, геометрии структуры, температуры и может быть на порядок больше, чем на обычной локальной оптической нелинейности графена. На рис. 1 схематически иллюстрируется принцип нелинейного смешения волн на основе графеновой метаповерхности в среднем ИК-диапазоне [20]. Волна сигнала, падающая на графеновую структуру (рис. 1,а), возбуждает колебания электронов в графене и поверхностные электрические токи (рис. 1,б), достаточно сильные для поля, находящегося в резонансе с «локализованным» ППП в ГНЛ [39].

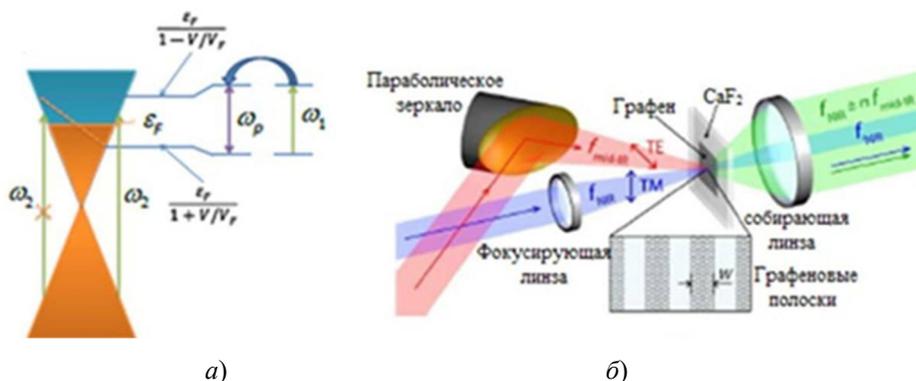


Рис. 1. Изменение поглощения волн графеном вследствие возбуждения ППП в ГНЛ (а) и принцип нелинейного смешения волн на основе графеновой метаповерхности в среднем ИК-диапазоне (б) [20]

Когда волна сигнала с частотой ω_2 проходит через ГНЛ, она частично поглощается при условии, что энергия фотона с частотой ω_2 более чем в два раза больше энергии Ферми (рис. 1,а). Если на ГНЛ падает волна накачки с частотой ω_1 (рис. 1,б), близкой к плазмонной частоте ω_p , токи в графене изменяют уровень Ферми (пунктирная желтая линия), при этом некоторые квантовые переходы становятся запрещенными (согласно принципу запрета Паули) (рис. 1,а).

В спектральной области квантовые переходы могут быть заблокированы или разблокированы, при этом рабочая частота определяется следующим образом [20]:

$$\frac{2E_F/h}{1+v_y/v_F} \ll \omega \ll \frac{2E_F/h}{1-v_y/v_F},$$

где v_y – скорость дрейфа, пропорциональная индуцированному току; E_F – уровень Ферми.

Поскольку ток и, следовательно, дрейфовая скорость периодически изменяются волной накачки, то поглощение волны сигнала модулируется с частотой волны накачки ω_1 , что приводит к эффективному нелинейному нелокальному смещению волн в среднем ИК-диапазоне [20].

Модель, позволяющая получить улучшенное нелинейное преобразование волн среднего ИК-диапазона через генерацию разностной частоты на основе нелинейности графенового листа, расположенного на подложке с металлической дифракционной решеткой (МДР) из полосок золота [1], представлена на рис. 2. Модель позволяет объединить ППП в благородных металлах и ППП в графене и предназначена для преобразования частоты волн среднего ИК-диапазона, улучшенного плазмонными резонансами высших мод ППП [1]. Слой графена наносится на подложку с МДР (периодом p) из полосок золота (толщиной h и шириной d) на диэлектрической подложке (рис. 2).

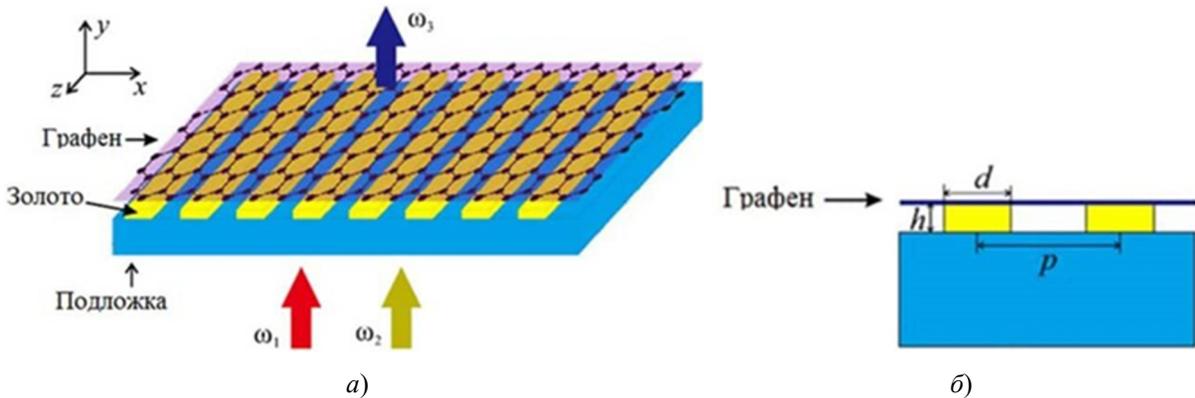


Рис. 2. Модель нелинейного преобразования частоты волн среднего ИК-диапазона (а) и проекция метаповерхности (б) на основе графенового листа на подложке с МДР из полосок золота [1]

В процессе генерации разностной частоты две волны с частотами ω_1 и ω_2 , нормально падающие на структуру (рис. 2), взаимодействуют в графеновом листе, генерируя волну на комбинационной частоте $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ [8]. В данной структуре волна накачки и волна сигнала дальнего ИК-диапазона формируют плазмонные резонансы на поверхности золота, в то время как генерация волны на комбинационной частоте в среднем ИК-диапазоне формирует плазмонный резонанс на поверхности графена. В результате локальные электрические поля всех трех волн резонансно возрастают, что приводит к резкому усилению процесса генерации волны на комбинационной частоте [1].

Модуляторы среднего ИК-диапазона на основе метаповерхностей из легированных ГНЛ

За последние годы предприняты значительные усилия по созданию модуляторов на основе ППП в графене, функционирующих в диапазонах от ТГц до среднего ИК [40]. Эти устройства используют уникальное дисперсионное соотношение для ППП в графене, и основаны на геометриях, в которых используется резонансное поглощение в графеновых структурах. ППП моды могут быть электрически перестроены на контролируемую интенсивность и частоту либо путем оптического поглощения, либо излучения [41].

Однослойная атомная толщина и низкая плотность свободных носителей в графене ограничивают эффективность ТГц-, ИК-модуляторов, особенно на частотах среднего ИК-диапазона, где амплитуда ППП мод в графене низка [14, 42]. Для преодоления этих трудностей принят ряд стратегий, включая использование ионного геля или химического легирования для увеличения плотности носителей заряда в графене, а также включение металлического отражателя [43].

Конструкция модуляторов на основе метаповерхностей с легированными ГНЛ основана на тройной резонансной структуре, где плазмонные резонансы в ГНЛ согласованы с резонансами Фабри – Перо в диэлектрической подложке, а также с оптическими резонансами в субволновой щелевой МДР, которая предназначена для проявления экстраординарного оптического прохождения в среднем ИК-диапазоне [41]. В связанной структуре ГНЛ расположены внутри металлических щелей для модуляции связи между ППП модами на верхней и нижней металлических поверхностях. Ряд параметров обуславливают конструкцию щелевой МДР [41]: материал и толщина металла, ширина щели и период МДР.

Модель и принцип работы модулятора на основе графеновой метаповерхности с щелевой МДР показаны на рис. 3, конструкция метаповерхности – на рис. 4.

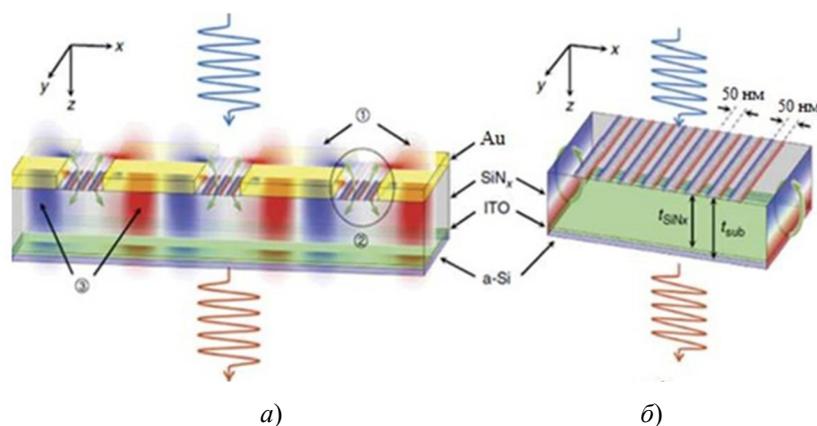


Рис. 3. Модель и принцип работы модулятора ИК-диапазона на основе метаповерхности с легированными ГНЛ [42]

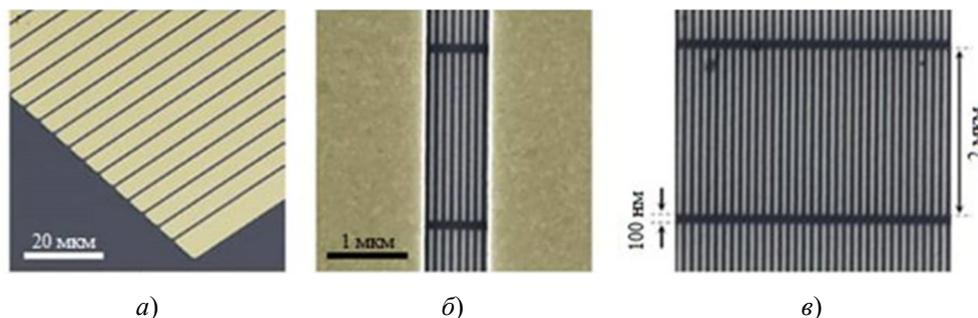


Рис. 4. Конструкция метаповерхности с легированными ГНЛ [41]

Падающая волна дифрагирует на периодической структуре, возбуждая ППП на верхней поверхности металла. Затем ППП через щели в металле субволновой длины возбуждают ППП на нижней поверхности металла, которые переизлучаются, в результате чего возникает дифракционный пик прохождения с сильной интенсивностью на резонансной частоте. ГНЛ помещаются в щели в металле для модуляции резонансной связи, что достигается электрической перестройкой плазмонных резонансов в ГНЛ в соответствии с частотой резонанса прохождения [41]. При совпадении электрические поля в щелях в металле порождают плазмонный резонанс в ГНЛ, что приводит к блокировке канала связи (4) для резонанса прохождения.

На рис. 5 представлены зависимости коэффициентов поглощения P , прохождения T , отражения R в зависимости от толщины подложки для уровня Ферми графена $E_F = 0,465$ эВ. Распределение электрического поля вокруг ГНЛ при $E_F = 0,465$ эВ для толщин подложки (б) 2,02 мкм и (в) 0,87 мкм; (г, д) зависимости – P и T от частоты.

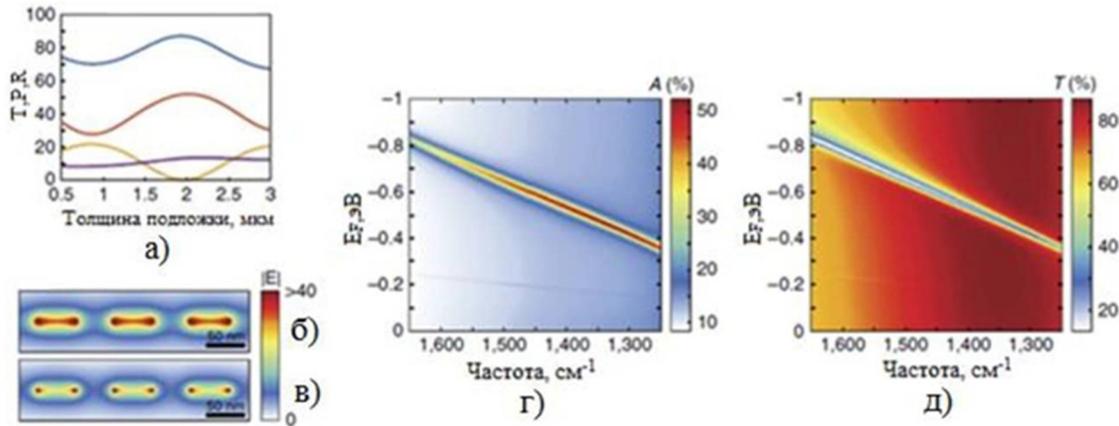


Рис. 5. Характеристики модулятора ИК-диапазона на основе метаповерхности с легированными ГНЛ [41]

Когда резонансные частоты ГНЛ и системы экстраординарного оптического прохождения сближаются, плазмонные резонансы могут изменять локальную диэлектрическую среду. Для значений E_F намного выше или ниже $E_F = 0,465$ эВ резонанс поглощения в ГНЛ находится далеко от резонанса прохождения щелевой МДР, и эти два эффекта ведут себя независимо. Однако при приближении E_F к значению $E_F = 0,465$ эВ плазмонный резонанс в ГНЛ создает расщепление, или антипересекающееся поведение между резонансной ППП модой графена и резонансной модой экстраординарного оптического прохождения [44–49].

Перестраиваемые генераторы гармоник и умножители частоты ИК-диапазона на основе плазмонных графеновых метаповерхностей

Генерация когерентного и перестраиваемого ТГц-излучения остается серьезной проблемой [50]. Фотомикширование с его преимуществами в виде сверхширокой полосы пропускания и точной перестройки стало важным методом генерации ТГц-, ИК-волн [50–52].

Генераторы гармоник среднего и дальнего ИК-диапазона на основе графеновых листов на кремниевой дифракционной решетке

Нелинейная восприимчивость графена третьего порядка и значительно увеличенная напряженность поля ППП в графене продемонстрировали большие возможности для повышения эффективности генерации третьей гармоники [53–55]. В работе [53] предложена кремниевая ДР на графене для генерации ППП с частотой третьей гармоники [53]. Графеновые ППП частоты ω_0 эффективно возбуждаются нормально падающей плоской волной (рис. 6) из-за резонанса основной моды ППП, а затем преобразуются в ППП с частотой третьей гармоники $3\omega_0$ с большой эффективностью, возникающей из-за высокой напряженности поля ППП частоты ω_0 благодаря кремниевой ДР под листом графена (p – период решетки, а w – ширина кремния) [53].

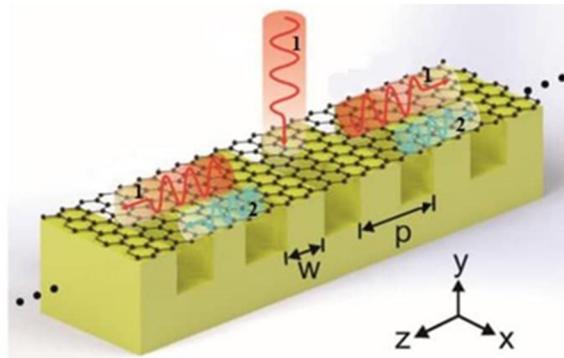


Рис. 6. Генерация третьей гармоники на основе графена на кремниевой ДР [54]

Рассмотренный принцип может стимулировать создание источников излучения на основе графена для фотоники среднего и дальнего ИК-диапазона на кремниевой подложке и, следовательно, расширить функциональные возможности кремниевой фотоники, такие как обработка сигналов, спектроскопия и зондирование.

Перестраиваемые генераторы второй и третьей гармоник ИК-диапазона на основе многослойных метаповерхностей из графеновых дифракционных решеток

Рассмотрим схему (рис. 7), позволяющую усилить генерацию второй и третьей гармоники многослойной метаповерхностью графен-диэлектрик-графен (ГДГ). В работе [54] разработана ГДГ-структура с уникальными оптическими свойствами, которые не могут быть достигнуты с помощью плазмонных наноструктур на основе металлов.

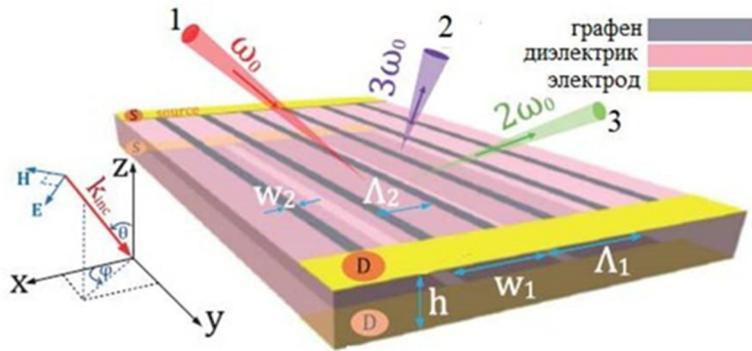


Рис. 7. Принцип функционирования перестраиваемого генератора ИК-диапазона на основе ГДГ-нанорезонатора, состоящего из двух ДР ГНЛ различной ширины, размещенных на противоположных гранях слоя диэлектрика:
 1 – излучение первой гармоники частоты ω_0 ; 2 – третьей гармоники частоты $3\omega_0$;
 3 – второй гармоники частоты $2\omega_0$) [54]

Конструкция генератора ИК-диапазона на основе многослойной метаповерхности – периодической ГДГ-структуры [54] – состоит из двух ДР ГНЛ, расположенных на противоположных гранях диэлектрической подложки (рис. 7). Электроды находятся в контакте с ГНЛ, что позволяет перестроить их уровень Ферми E_F . ТМ-поляризованная плоская волна с частотой ω_0 падает на ГДГ структуру (рис. 7). Поскольку ППП в ГНЛ зависят от геометрии, ширина ГНЛ выбирается таким образом, чтобы ГНЛ в двух ДР имели резонансы основной моды ППП как на частоте первой гармоники $\omega_{ППП} = \omega_0$, так и высших гармоник ($\omega_{вр} = 2\omega_0$ для генерации второй гармоники и $\omega_{вр} = 3\omega_0$ для генерации третьей гармоники), как показано на рис. 7. Кроме того, нелинейно-оптический отклик ГДГ-структуры может быть дополнительно оптимизирован, требуя, чтобы ГНЛ в первой (нижней) ДР также имели резонансы мод ППП более высокого порядка.

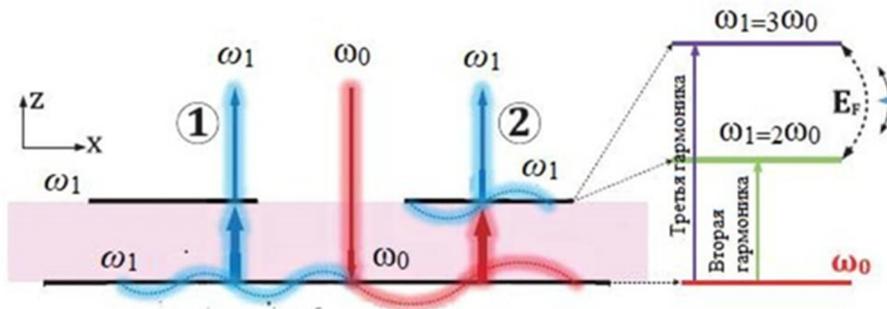


Рис. 8. Физический механизм увеличения генерации второй и третьей гармоники ГДГ метаповерхностью: ω_1 – частота ППП мод более высокого порядка; ω_0 – частота первой гармоники [54]

Существуют два ключевых механизма, которые способствуют заметному увеличению нелинейно-оптического отклика ГДГ структуры на несколько порядков по сравнению с графеновым слоем. Первый из них, обозначенный 1 на рис. 8, требует, чтобы существовали основная мода ППП в ГНЛ в первой (нижней) ДР при ω_0 и ППП моды более высокого порядка при ω_1 . Поле на частоте ω_0 , падающее на ГНЛ в первой ДР, генерирует сильное поле на этих ГНЛ при ω_0 через резонансное возбуждение основной моды ППП, а затем ППП мод более высокого порядка резонансно генерируются нелинейной поляризацией в этих же ГНЛ в первой решетке.

Гораздо более эффективный механизм, способствующий увеличению нелинейного резонанса ГДГ структуры, схематично обозначен 2 на рис. 8. ГНЛ во второй (верхней) ДР имеют основную моду ППП на высших гармониках. Усиленное оптическое поле за счет возбуждения основной моды ППП на ГНЛ в первой ДР индуцирует на ГНЛ во второй ДР сильную нелинейную поляризацию через взаимодействие ближнего поля. Это, в свою очередь, резонансно возбуждает основную моду ППП на ГНЛ во второй ДР. Кроме того, основная мода ППП на высших гармониках также генерируется через оптическую связь ближнего поля с модами ППП более высокого порядка ГНЛ в первой ДР [54].

На заключительном этапе моды более высокого порядка на нижних ГНЛ в первой ДР основная мода ППП ГНЛ во второй ДР связывается с излучательными модами для генерации сильного сигнала второй гармоники. Фактически эта система ГНЛ действует как нелинейная наноантенна Яги-Уда: нижняя и верхняя графеновые ДР являются рефлектором при ω_0 и директором при ω_{2g} соответственно.

Важным свойством ГДГ метаповерхности является усиление второй гармоники на широкополосной нелинейности, достигаемое путем перестройки энергии Ферми E_F в двух ДР. Причина этого уникального свойства раскрывается дисперсионной зависимостью поглощения оптимизированной ГДГ структуры, представленной на рис. 9,а.

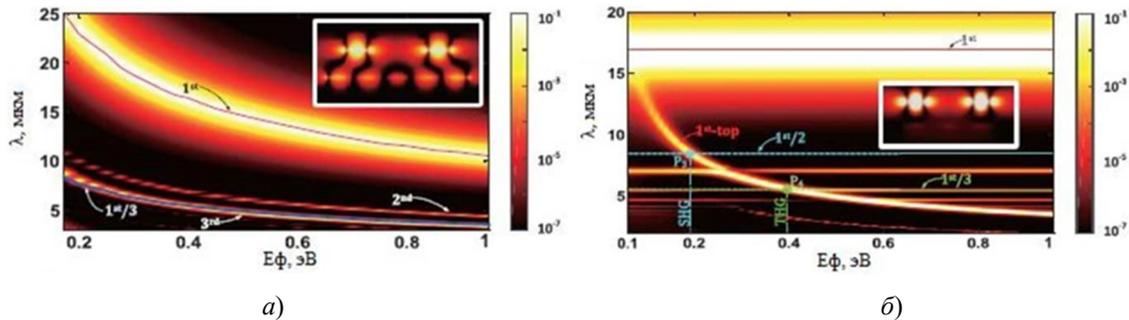


Рис. 9. Спектры поглощения оптимизированной ГДГ структуры в зависимости от энергии Ферми E_F двух графеновых ДР (а); спектры поглощения оптимизированной ГДГ структуры в зависимости от энергии Ферми E_F двух графеновых ДР, для случая когда изменяется только E_F во второй (верхней) ДР и $E_F = 0,4$ эВ в первой (нижней) ДР (б)

Соотношение между длинами волн основной моды ППП и моды третьего порядка в ГНЛ в первой ДР и основной моды ППП в ГНЛ во второй ДР остается постоянным при изменении E_F . Следовательно, свойство двойного резонанса сохраняется при изменении E_F . Как показано на рис. 9,а, при изменении E_F от 0,2 до 1 эВ резонансная длина волны моды ППП первого порядка ГНЛ в первой ДР и неявно рабочая длина волны на второй гармонике изменяются от 25 до 10 мкм [54].

Еще одним важным свойством ГДГ структуры является то, что она может увеличивать генерацию как третьей гармоники, так и второй. В частности, эта функциональность может быть реализована путем перестройки энергии Ферми E_F только во второй ДР так, что резонансная длина волны основной моды ППП ГНЛ в этой решетке смещается от третьей гармоники к второй. Об этом свидетельствует график поглощения ГДГ структуры, представленный на рис. 9,б, где показаны два типа плазмонных полос, а именно плоские полосы, соответствующие ППП в первой ДР, которые не зависят от E_F во второй ДР, и плазмонные полосы, связанные со второй ДР, резонансная длина волны которых зависит от E_F , в то время как резонансная длина волны основной моды ППП первой ДР остается постоянной, $\lambda_{FF} = 15,75$ мкм, резонансная длина волны основной моды ППП на второй ДР варьируется от $\lambda(P4) = \lambda_{FF} / 3 = 5,25$ мкм до $\lambda(P3) = \lambda_{FF} / 2 = 7,875$ мкм при перестройке E_F от 0,4 до 0,2 эВ соответственно.

Метаповерхность на основе ГДГ может быть использована для достижения перестраиваемого широкополосного увеличения как нелинейно-оптических, так и линейно-оптических взаимодействий; свойство, следующее из того факта, что система обладает перестраиваемыми двойными резонансами. Новый тип графеновых метаповерхностей открывает новое направление исследований в области разработки новых ультракомпактных и многочастотных активных фотонных наноприборов.

Заключение

Недавно появившийся графен стал материалом, способным расширить область нелинейной плазмоники не только до ТГц-, но и ИК-диапазона благодаря плазмонному отклику, исключительно высокой нелинейности третьего порядка, низким потерям в этих диапазонах, однослойной 2D-структуре, которая уменьшает объем взаимодействия света с веществом до чрезвычайно субволновых масштабов [14, 15]. ППП, возбуждаемые в графене, обеспечивают беспрецедентные уровни ограничения излучения. Плазмонные резонансы в графене могут динамически перестраиваться с помощью электростатического смещения и позволяют создавать новое поколение реконфигурируемых плазмонных устройств, в частности ИК-модуляторов, биосенсоров, метаповерхностей и идеальных поглотителей [14]. Благодаря уникальному ограничению и частотной перестраиваемости графеновая плазмоника подходит для многих применений, включая ИК-детектирование, высокоэффективное ИК-поглощение, метаматериалы и химическое зондирование. Графеновая плазмоника продемонстрировала большой потенциал в среднем ИК-диапазоне, где она позволяет, например, с высокой чувствительностью и избирательностью обнаруживать молекулярные частицы по их колебательным спектрам и тепловому излучению [47].

Нелинейно-оптические свойства многослойного графена, экспериментально изученные в широком спектре длин волн ИК-диапазона [20], определяют графен как перспективную среду для визуализации со сверхразрешением [56]. Плазмонный ИК-отклик многослойных графеновых структур, в частности двухслойного графена, обеспечивает более широкие спектральные диапазоны перестройки по сравнению с однослойным, в дополнение к поддержанию резонансов ППП мод на более высоких частотах вплоть до среднего ИК-диапазона и с более высоким поглощением [14]. Многослойный метаматериал из структурированного гиперболического графена может значительно улучшить нелинейные эффекты на ИК-частотах [15]. Исследованные спектральные, ближнепольные и свойства перестройки многослойных плазмонных ГНЛ показали, что большее плазмонное усиление связано с многослойной геометрией [14]. Экспериментально обнаружено улучшенное нелинейное смещение ближнего и среднего ИК-излучения в решетках ГНЛ, изучен отклик широкополосного ЧВС в графене с нанометровым и фемтосекундным пространственно-временным разрешением и обнаружено нелинейное усиление сигнала на краях ГНЛ в зависимости от количества слоев [6].

Это наряду с другими уникальными свойствами, такими как сильное нелинейное взаимодействие волн среднего ИК-диапазона с многослойными решетками ГНЛ, перестраиваемость эффективности нелинейного смещения волн и угловая нечувствительность, делают электронно-управляемые нелинейные устройства дальнего и среднего ИК-диапазона перспективным выбором для будущего нелинейного преобразования частоты, оптического управления и обработки информации на платформе графеновой плазмоники [6].

Список литературы

1. Cao Y., Kong, Gao S. [et al.]. Plasmon resonance enhanced mid-infrared generation by graphene on gold gratings through difference frequency mixing // *Optics Communications*. 2018. Vol. 406. P. 183–187. doi: 10.1016/j.optcom.2017.04.023.7
2. Barh A., Rodrigo P. J., Meng L., [et al.]. Parametric upconversion imaging and its applications // *Adv. Opt. Photon.* 2019. Vol. 11. P. 952–1019.
3. Du L., Ding X., Han D. [et al.]. 1.9 μm all-optical wavelength converter based on a graphene oxide coated microfiber // *Opt. Express*. 2021. Vol. 29. P. 40286–40293.
4. Houver S., Cavalie P., Meng L. [et al.]. Terahertz nonlinear optics with a compact semiconductor device // *SPIE news*. 2017. URL: <https://www.spie.org/news/6803-terahertz-nonlinear-optics-with-a-compact-semiconductor-device>
5. Raghunathan V., Deka J., Menon S. [et al.]. Nonlinear Optics in Dielectric Guided-Mode Resonant Structures and Resonant Metasurfaces // *Micromachines*. 2020. Vol. 11. P. 449. doi: 10.3390/mi11040449
6. Jiang T., Kravtsov V., Tokman M., [et al.]. Ultrafast coherent nonlinear nanooptics and nanoimaging of graphene // *Nature Nanotechnology*. 2019. Vol. 14. P. 838–843.

7. Головачева Е. В., Грибникова Е. И., Лерер А. М. [и др.]. Расчет электродинамических характеристик графеновых решеток // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 3.
8. Романенко П. М., Микаева С. А. Оптоэлектронные модуляторы излучения терагерцового диапазона на основе однослойного графена как перспективного компонента наноструктурированных метаповерхностей // *Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике : сб. докл. конф. МИРЭА – Российский технологический университет. М., 2019. Т. 2. С. 268–274.*
9. Jiang Z., Wang Y., Chen L. [et al.]. Antenna-integrated silicon–plasmonic graphene sub-terahertz emitter // *APL Photonics*. 2021. Vol. 6. P. 066102.
10. Manabe S., Otsuji T., Satou A. Optical-to-THz Frequency Down-Conversion Utilizing Two-Dimensional Plasmons // *2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 2019. P. 1–2.
11. Sun Z., Basov D. N., Fogler M. M. Graphene as a source of entangled plasmons // *Phys. Rev. Research*. 2022. Vol. 4. P. 023208.
12. Li Y., An N., Lu Z. [et al.]. Nonlinear co-generation of graphene plasmons for optoelectronic logic operations // *Nature Communications*. 2022. Vol. 3. P. 3138.
13. Mikhailov S. A. Quantum theory of the third-order nonlinear electrodynamic effects of graphene // *Phys. Rev*. 2016. Vol. 93, № 8. P. 085403.
14. Rodrigo D., Tittl A., Limaj O. [et al.]. Double-layer graphene for enhanced tunable infrared plasmonics // *Light: Science & Applications*. 2017. Vol. 6. P. e16277.
15. Jin B., Argyropoulos C. Nonlinear Graphene Metasurfaces with Advanced Electromagnetic Functionalities // *Proc. of SPIE – the International Society for Optical Engineering 16, Design, Materials Fabrication, Characterization, and Applications*. 2018. P. 107221R.
16. Gopalan K. K., Paulillo B., Mackenzie D. [et al.]. Scalable and Tunable Periodic Graphene Nanohole Arrays for Mid-Infrared Plasmonics // *Nano Lett*. 2018. Vol. 18, № 9. P. 5913–5918.
17. Kovalev S., Hafez H. A., Tielrooij K. J. [et al.]. Electrical tunability of terahertz nonlinearity in graphene // *Sci. Adv*. 2021. Vol. 7. eabf9809. doi: 10.1126/sciadv.abf9809
18. Jiang T., Huang D., Cheng J. [et al.]. Gate-tunable third-order nonlinear optical response of massless Dirac fermions in graphene // *Nature Photon*. 2018. Vol. 12. P. 430–436. doi: 10.1038/s41566-018-0175-7
19. Hendry E., Hale P. J., Moger J. [et al.]. Coherent Nonlinear Optical Response of Graphene // *Phys. Rev. Lett*. 2010. Vol. 105. P. 097401.
20. Kundys D., Van Duppen B., Marshall O. P. [et al.]. Nonlinear light mixing by graphene plasmons // *Nano Lett*. 2018. Vol. 18, № 1. P. 282–287.
21. Kislyakov M., Nunzi J.-M., Zhang X. [et al.]. Stimulated Brillouin scattering in dispersed graphene // *Opt. Express*. 2018. Vol. 26. P. 34346–34365.
22. Paterova A. V., Kalashnikov D. A., Khaidarov E. [et al.]. Non-linear interferometry with infrared metasurfaces // *Nanophotonics*. 2021. Vol. 10, № 6. P. 1775–1784.
23. Morales M. C., Rocco D., Xu L. [et al.]. Infrared imaging in nonlinear As metasurfaces // *SPIE Proceedings*. 2019. Vol. 11201: SPIE Micro + Nano Materials, Devices, and Applications. P. 112011S. doi: 10.1117/12.2541224/
24. Wu Y., Yao B. C., Feng Q. Y. [et al.]. Generation of cascaded four-wave-mixing with graphene-coated microfiber // *Photon. Res*. 2015. Vol. 3. P. A64–A68.
25. Deng H., Huang C., He Y. [et al.]. Quantum plasmon enhanced nonlinear wave mixing in graphene nanoflakes // *Chinese Physics B*. 2021. Vol. 30, № 4.
26. Guo T., Argyropoulos C. Recent advances in terahertz photonic technologies based on graphene and their applications // *Adv. Photonics Res*. 2021. Vol. 2. P. 2000168.
27. Li Y., An N., Lu Z. [et al.]. Nonlinear co-generation of graphene plasmons for optoelectronic logic operations // *Nature communications*. 2022. Vol. 3. P. 3138.
28. Pfeiffer T., Kutas M., Haase B. [et al.]. Terahertz detection by upconversion to the near-infrared using picosecond pulses // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28. P. 29419–29429.
29. Salmon A., Bouchon P. Rapid prototyping of a bispectral terahertz-to-infrared converter // *Opt. Express*. 2021. Vol. 29. P. 18437–18445.
30. Pei S., Duan S., Yang N. [et al.]. Second-order nonlinear optical response of graphene irradiated by two-color lights: ellipticity and phase modulation // *J. Opt. Soc. Am*. 2021. Vol. 38. P. 2594–2602.
31. Sun Z., Basov D. N., Fogler M. M. Graphene as a source of entangled plasmons // *Phys. Rev. Research*. 2022. Vol. 4. P. 023208.
32. Christopoulos T., Tsilipakos O., Ataloglou V. G., Kriezis E. E. A Theoretical Study of Nonlinear Multi-Channel Graphene Components for the Near and Far-Infrared // *Frontiers in Optics. Laser Science / ed. by B. Lee, C. Mazzali, K. Corwin, R. Jason Jones. OSA Technical Digest (Optica Publishing Group)*. 2020. Paper JTh4B.17.
33. Qasymeh M., Eleuch H. Quantum microwave-to-optical conversion in electrically driven multilayer graphene // *Opt. Express*. 2019. Vol. 27. P. 5945–5960.
34. <https://www.materialstoday.com/metals-alloys/news/journal-of-alloys-and-compounds-call-for-papers>

35. Cheng C., Huang B., Mao X. [et al.]. Frequency conversion with nonlinear graphene photodetectors // *Nanoscale*. 2017. Vol. 9. P. 4082–4089.
36. Ji M., Cai H., Deng L. [et al.]. Enhanced parametric frequency conversion in a compact silicon-graphene microring resonator // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23. P. 18679–18685.
37. Sheng L., Vaskin A., Reno J. L. [et al.]. An optical metamixer. arXiv:1711.0009010. doi.1038/s41467-018-04944-9
38. Liu S., Vaskin A., Reno J. L. [et al.]. An all-dielectric metasurface as a broadband optical frequency mixer // *Nat. Commun*. 2018. Vol. 9. P. 2507. doi: 10.1038/s41467-018-04944-9
39. Ooi K. J. A., Tan D. T. H. Nonlinear graphene plasmonics // *Proc. R. Soc.* 2017. Vol. 473. P. 20170433.
40. Ginis V., Tassin P., Koschny T. [et al.]. Tunable terahertz frequency comb generation using time-dependent graphene sheets // *Physical Review*. 2015. Vol. 91, № 16.
41. Kim S., Jang M., Brar V. [et al.]. Electronically tunable extraordinary optical transmission in graphene plasmonic ribbons coupled to subwavelength metallic slit arrays // *Nat Commun*. 2016. Vol. 7. P. 12323. doi: 10.1038/ncomms12323
42. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. [et al.]. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 5. P. 1401.
43. Gopalan K. K., Paulillo B., Mackenzie D. M. A. [et al.]. Tunable Periodic Graphene Nanohole Arrays for Mid-Infrared Plasmonics // *Nano Lett*. 2018. Vol. 18, № 9. P. 5913–5918.
44. Cox J. D., Garcia de Abajo F. J. Plasmon-enhanced nonlinear wave mixing in nanostructured graphene // *ACS Photonics*. 2015. Vol. 2. P. 306–312.
45. Deinert J. C., Iranzo D. A., Perrez R. [et al.]. Grating-graphene metamaterial as a platform for terahertz nonlinear photonic // *ACS Nano*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 1145–1154.
46. Menendez G. A., Maes B. Frequency comb generation in a time-dependent graphene ribbon array // *Phys. Rev*. Vol. 95. P. 144307.
47. Cox J. D., Garcia de Abajo F. J. Nonlinear Graphene Nanoplasmonics // *Acc. Chem. Res*. 2019. Vol. 52, № 9. P. 2536–2547.
48. Sherrott M. C., Hon P. W. C., Fountaine K. T. [et al.]. Experimental Demonstration of $>230^\circ$ Phase Modulation in Gate-Tunable Graphene-Gold Reconfigurable Mid-Infrared Metasurfaces // *Nano Lett*. 2017. Vol. 17, № 5. P. 3027–3034.
49. An N., Tan T., Peng Z. [et al.]. Electrically Tunable Four-Wave-Mixing in Graphene Heterogeneous Fiber for Individual Gas Molecule Detection // *Nano Lett*. 2020. Vol. 20, № 9. P. 6473–6480.
50. Verma N., Govindan A. Nonlinear Mixing of Two Laser Beams and THz plasmons generation in graphene coated optical Fibre : preprint from Research Square. 2022. doi: 10.21203/rs.3.rs-1079347/v1 PPR: PPR438413
51. Kowligy A. S., Hickstein D. D., Lind A. [et al.]. Tunable mid-infrared generation via wide-band four-wave mixing in silicon nitride waveguides // *Optics Letters*. 2018. Vol. 43. P. 4220.
52. Menendez G. A., Maes B. Frequency comb generation in a time-dependent graphene ribbon lattice // *Phys. Rev*. 2017. Vol. 95. P. 144307.
53. Li J., Zhang T., Chen L. High-Efficiency Plasmonic Third-Harmonic Generation with Graphene on a Silicon Diffractive Grating in Mid-Infrared Region // *Nanoscale Research Letters*. 2018. Vol. 13. P. 338.
54. You J. W., Panoiu N. C. Tunable and dual-broadband giant enhancement of second-harmonic and third-harmonic generation in an optimized graphene-insulator-graphene metasurface // *Phys. Rev*. 2020. Vol. 102. P. 121403(R).
55. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. [et al.]. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 5. P. 1401.
56. Demetriou G., Bookey H. T., Biancalana F. [et al.]. Nonlinear optical properties of multilayer graphene in the infrared // *Opt. Exp*. 2016. Vol. 24. P. 13033–13043.

References

1. Cao Y. Kong, Gao S. et al. Plasmon resonance enhanced mid-infrared generation by graphene on gold gratings through difference frequency mixing. *Optics Communications*. 2018;406:183–187. doi: 10.1016/j.optcom.2017.04.023.7
2. Barh A., Rodrigo P. J., Meng L. et al. Parametric upconversion imaging and its applications. *Adv. Opt. Photon*. 2019;11:952–1019.
3. Du L., Ding X., Han D. et al. 1.9 μm all-optical wavelength converter based on a graphene oxide coated microfiber. *Opt. Express*. 2021;29:40286–40293.
4. Houver S., Cavalié P., Meng L. et al. Terahertz nonlinear optics with a compact semiconductor device. *SPIE news*. 2017. Available at: <https://www.spie.org/news/6803-terahertz-nonlinear-optics-with-a-compact-semiconductor-device>
5. Raghunathan V., Deka J., Menon S. et al. Nonlinear Optics in Dielectric Guided-Mode Resonant Structures and Resonant Metasurfaces. *Micromachines*. 2020;11:449. doi: 10.3390/mi11040449

6. Jiang T., Kravtsov V., Tokman M. et al. Ultrafast coherent nonlinear nanooptics and nanoimaging of graphene. *Nature Nanotechnology*. 2019;14:838–843.
7. Golovacheva E.V., Gribnikova E.I., Lerer A.M. et al. Calculation of electrodynamic characteristics of graphene gratings. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2017;(3). (In Russ.)
8. Romanenko P.M., Mikaeva S.A. Optoelectronic modulators of terahertz radiation based on single-layer graphene as a promising component of nanostructured metasurfaces. *Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike: sb. dokl. konf. MIREA – Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet = Informatics and Technologies. Innovative technologies in industry and computer science : sat. dokl. konf. MIREA – Russian Technological University*. Moscow, 2019;2:268–274. (In Russ.)
9. Jiang Z., Wang Y., Chen L. et al. Antenna-integrated silicon–plasmonic graphene sub-terahertz emitter. *APL Photonics*. 2021;6:066102.
10. Manabe S., Otsuji T., Satou A. Optical-to-THz Frequency Down-Conversion Utilizing Two-Dimensional Plasmons. *2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 2019:1–2.
11. Sun Z., Basov D.N., Fogler M.M. Graphene as a source of entangled plasmons. *Phys. Rev. Research*. 2022;4:023208.
12. Li Y., An N., Lu Z. et al. Nonlinear co-generation of graphene plasmons for optoelectronic logic operations. *Nature Communications*. 2022;3:3138.
13. Mikhailov S.A. Quantum theory of the third-order nonlinear electrodynamic effects of graphene. *Phys. Rev.* 2016;93(8):085403.
14. Rodrigo D., Tittl A., Limaj O. et al. Double-layer graphene for enhanced tunable infrared plasmonics. *Light: Science & Applications*. 2017;6:e16277.
15. Jin B., Argyropoulos C. Nonlinear Graphene Metasurfaces with Advanced Electromagnetic Functionalities. *Proc. of SPIE – the International Society for Optical Engineering 16, Design, Materials Fabrication, Characterization, and Applications*. 2018:107221R.
16. Gopalan K.K., Paulillo B., Mackenzie D. et al. Scalable and Tunable Periodic Graphene Nanohole Arrays for Mid-Infrared Plasmonics. *Nano Lett.* 2018;18(9):5913–5918.
17. Kovalev S., Hafez H.A., Tielrooij K.J. et al. Electrical tunability of terahertz nonlinearity in graphene. *Sci. Adv.* 2021;7:eabf9809. doi: 10.1126/sciadv.abf9809
18. Jiang T., Huang D., Cheng J. et al. Gate-tunable third-order nonlinear optical response of massless Dirac fermions in graphene. *Nature Photon.* 2018;12:430–436. doi: 10.1038/s41566-018-0175-7
19. Hendry E., Hale P.J., Moger J. et al. Coherent Nonlinear Optical Response of Graphene. *Phys. Rev. Lett.* 2010;105:097401.
20. Kundys D., Van Duppen B., Marshall O.P. et al. Nonlinear light mixing by graphene plasmons. *Nano Lett.* 2018;18(1):282–287.
21. Kislyakov M., Nunzi J.-M., Zhang X. et al. Stimulated Brillouin scattering in dispersed graphene. *Opt. Express*. 2018;26:34346–34365.
22. Paterova A.V., Kalashnikov D.A., Khaidarov E. et al. Non-linear interferometry with infrared metasurfaces. *Nanophotonics*. 2021;10(6):1775–1784.
23. Morales M.C., Rocco D., Xu L. et al. Infrared imaging in nonlinear As metasurfaces. *SPIE Proceedings*. 2019;11201(SPIE Micro + Nano Materials, Devices, and Applications):112011S. doi: 10.1117/12.2541224/
24. Wu Y., Yao B. C., Feng Q.Y. et al. Generation of cascaded four-wave-mixing with graphene-coated microfiber. *Photon. Res.* 2015;3:A64–A68.
25. Deng H., Huang C., He Y. et al. Quantum plasmon enhanced nonlinear wave mixing in graphene nanoflakes. *Chinese Physics B*. 2021;30(4).
26. Guo T., Argyropoulos C. Recent advances in terahertz photonic technologies based on graphene and their applications. *Adv. Photonics Res.* 2021;2:2000168.
27. Li Y., An N., Lu Z. et al. Nonlinear co-generation of graphene plasmons for optoelectronic logic operations. *Nature communications*. 2022;3:3138.
28. Pfeiffer T., Kutas M., Haase B. et al. Terahertz detection by upconversion to the near-infrared using picosecond pulses. *Opt. Express*. 2020;28:29419–29429.
29. Salmon A., Bouchon P. Rapid prototyping of a bispectral terahertz-to-infrared converter. *Opt. Express*. 2021;29:18437–18445.
30. Pei S., Duan S., Yang N. et al. Second-order nonlinear optical response of graphene irradiated by two-color lights: ellipticity and phase modulation. *J. Opt. Soc. Am.* 2021;38:2594–2602.
31. Sun Z., Basov D.N., Fogler M.M. Graphene as a source of entangled plasmons. *Phys. Rev. Research*. 2022;4:023208.
32. Christopoulos T., Tsilipakos O., Ataloglou V.G., Kriezis E.E. A Theoretical Study of Nonlinear Multi-Channel Graphene Components for the Near and Far-Infrared. *Frontiers in Optics. Laser Science*. Ed. by B. Lee, C. Maz-zali, K. Corwin, R. Jason Jones. OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper JTh4B.17.

33. Qasymeh M., Eleuch H. Quantum microwave-to-optical conversion in electrically driven multilayer graphene. *Opt. Express*. 2019;27:5945–5960.
34. Available at: <https://www.materialstoday.com/metals-alloys/news/journal-of-alloys-and-compounds-call-for-papers>
35. Cheng C., Huang B., Mao X. et al. Frequency conversion with nonlinear graphene photodetectors. *Nanoscale*. 2017;9:4082–4089.
36. Ji M., Cai H., Deng L. et al. Enhanced parametric frequency conversion in a compact silicon-graphene microring resonator. *Opt. Express*. 2015;23:18679–18685.
37. Sheng L., Vaskin A., Reno J.L. et al. *An optical metamixer*. arXiv:1711.0009010. doi:10.38/s41467-018-04944-9
38. Liu S., Vaskin A., Reno J.L. et al. An all-dielectric metasurface as a broadband optical frequency mixer. *Nat. Commun*. 2018;9:2507. doi: 10.1038/s41467-018-04944-9
39. Ooi K.J.A., Tan D.T.H. Nonlinear graphene plasmonics. *Proc. R. Soc.* 2017;473:20170433.
40. Ginis V., Tassin P., Koschny T. et al. Tunable terahertz frequency comb generation using time-dependent graphene sheets. *Physical Review*. 2015;91:16.
41. Kim S., Jang M., Brar V. et al. Electronically tunable extraordinary optical transmission in graphene plasmonic ribbons coupled to subwavelength metallic slit arrays. *Nat Commun*. 2016;7:12323. doi: 10.1038/ncomms12323
42. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. et al. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic. *Sensors*. 2020;20(5):1401.
43. Gopalan K.K., Paulillo B., Mackenzie D.M.A. et al. Tunable Periodic Graphene Nanohole Arrays for Mid-Infrared Plasmonics. *Nano Lett*. 2018;18(9):5913–5918.
44. Cox J.D., Garcia de Abajo F. J. Plasmon-enhanced nonlinear wave mixing in nanostructured graphene. *ACS Photonics*. 2015;2:306–312.
45. Deinert J.C., Iranzo D.A., Perez R. et al. Grating-graphene metamaterial as a platform for terahertz nonlinear photonic. *ACS Nano*. 2021;15(1):1145–1154.
46. Menendez G.A., Maes B. Frequency comb generation in a time-dependent graphene ribbon array. *Phys. Rev.* 95:144307.
47. Cox J.D., Garcia de Abajo F. J. Nonlinear Graphene Nanoplasmonics. *Acc. Chem. Res.* 2019;52(9):2536–2547.
48. Sherrott M.C., Hon P.W.C., Fountaine K.T. et al. Experimental Demonstration of >230° Phase Modulation in Gate-Tunable Graphene-Gold Reconfigurable Mid-Infrared Metasurfaces. *Nano Lett*. 2017;17(5):3027–3034.
49. An N., Tan T., Peng Z. et al. Electrically Tunable Four-Wave-Mixing in Graphene Heterogeneous Fiber for Individual Gas Molecule Detection. *Nano Lett*. 2020;20(9):6473–6480.
50. Verma N., Govindan A. *Nonlinear Mixing of Two Laser Beams and THz plasmons generation in graphene coated optical Fibre: preprint from Research Square*. 2022. doi: 10.21203/rs.3.rs-1079347/v1 PPR: PPR438413
51. Kowligy A.S., Hickstein D.D., Lind A. et al. Tunable mid-infrared generation via wide-band four-wave mixing in silicon nitride waveguides. *Optics Letters*. 2018;43:4220.
52. Menendez G.A., Maes B. Frequency comb generation in a time-dependent graphene ribbon lattice. *Phys. Rev.* 2017;95:144307.
53. Li J., Zhang T., Chen L. High-Efficiency Plasmonic Third-Harmonic Generation with Graphene on a Silicon Diffractive Grating in Mid-Infrared Region. *Nanoscale Research Letters*. 2018;13:338.
54. You J.W., Panoiu N.C. Tunable and dual-broadband giant enhancement of second-harmonic and third-harmonic generation in an optimized graphene-insulator-graphene metasurface. *Phys. Rev.* 2020;102:121403(R).
55. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I. et al. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic. *Sensors*. 2020;20(5):1401.
56. Demetriou G., Bookey H.T., Biancalana F. et al. Nonlinear optical properties of multilayer graphene in the infrared. *Opt. Exp.* 2016;24:13033–13043.

Информация об авторах / Information about the authors

Галина Степановна Макеева

доктор технических 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 technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radio-electronic 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 15.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 26.07.2024

Принята к публикации/Accepted 31.08.2024