

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 537.86:621.373
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-661-667>

Поступило в редакцию 20.10.2021
Received 20.10.2021

С. А. Максименко¹, А. Маффуччи², М. Е. Портной³, В. А. Сороко⁴, Г. Е. Слепян⁵

¹*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

²*Университет Кассино и Южного Лацио, Кассино, Италия*

³*Эксетерский университет, Эксетер, Великобритания*

⁴*Норвежский университет науки и технологий, Тронхейм, Норвегия*

⁵*Тель-Авивский университет, Тель-Авив, Израиль*

**ДЕТЕКТОР СРЕДНЕГО И ДАЛЬНЕГО ИК ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПЛОСКИХ МАССИВОВ ГРАФЕНОВЫХ НАНОЛЕНТ**

(Представлено академиком В. А. Орловичем)

Аннотация. Предложена принципиальная схема детектора электромагнитных волн среднего и дальнего ИК диапазона частот, основанная на использовании плоских массивов графеновых нанолент различной ширины и длины. Особенностью рассматриваемой схемы является использование для детектирования двух различных механизмов: возбуждение межзонных переходов, присущих графеновым лентам типа «armchair» в данной частотной области, и антенных резонансов поверхностных волн (плазмон-поляритонов). Показано, что совпадение двух резонансов, достигаемое путем соответствующего подбора геометрических параметров нанолент и настройки химического потенциала графена, позволяет существенно усилить сигнал, тем самым обеспечивая альтернативное решение проблемы низкой эффективности резонансных графеновых антенн. В работе предлагается возможный подход к проектированию и анализу таких детекторов, а также обсуждаются способы настройки обоих механизмов.

Ключевые слова: графен, ИК излучение, терагерцовый диапазон частот, плазмонный резонанс, детекторы ИК излучения

Для цитирования. Детектор среднего и дальнего ИК излучения на основе плоских массивов графеновых нанолент / С. А. Максименко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 661–667. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-661-667>

Sergey A. Maksimenko¹, Antonio Maffucci², Misha E. Portnoi³, Vasil A. Saroka⁴, Gregory Y. Slepyan⁵

¹*Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

²*University of Cassino and Southern Lazio, Cassino, Italy*

³*University of Exeter, Exeter, United Kingdom*

⁴*Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*

⁵*Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*

**MIDDLE- AND FAR-INFRARED DETECTOR BASED ON THE PLANE COLLECTION
OF GRAPHENE STRIPS**

(Communicated by Academician Valentin A. Orlovich)

Abstract. A concept of a middle- and far-infrared detector has been proposed. The detector is built as a planar collection of parallel graphene strips of different length and width. The feature of the detector scheme is the concurrent utilization of two different detection mechanisms: excitation in the given frequency range of low-frequency interband transitions inherent in armchair graphene strips and antenna resonances of strongly slowed-down surface waves (plasmon polaritons). It has been shown that matching these two resonances results in the essential detector signal amplification, thus providing an alternative way how to solve the problem of the low efficiency of resonant graphene antennas. An approach is proposed to analyze the design of such detectors, as well as to discuss the ways of tuning the both mechanisms.

Keywords: graphene, infrared radiation, terahertz frequency domain, plasmon resonance, infrared detectors

For citation. Maksimenko S. A., Maffucci A., Portnoi M. E., Saroka V. A., Slepyan G. Y. Middle- and far-infrared detector based on the plane collection of graphene strips. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 661–667 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-6-661-667>

Введение. В настоящее время одним из базовых направлений развития электроники и электромагнетизма является активное технологическое освоение среднего и дальнего инфракрасного (терагерцового) диапазонов частот, 0,1–10 ТГц [1]. Растущий интерес к этой технологической области связан с развитием 5G-технологии беспроводной связи, спектроскопии сложных органических молекул и, соответственно, фармацевтических и биомедицинских разработок, а также неинвазивных технологий визуализации в медицине и сфере безопасности.

Сложность освоения этой области заключается в том, что терагерцовый диапазон является «пограничной» областью, где классические электронные и оптические технологии оказываются малопригодными. Классические электронные устройства демонстрируют резкое снижение производительности для частот выше 0,1 ТГц из-за ухудшения транспортных свойств. Действительно, трудно спроектировать сосредоточенные элементы, характерные размеры которых становятся сопоставимыми или даже меньше длины волны. Кроме того, полые одномодовые волноводы и резонаторы становятся нереалистичными, поскольку для них потребуется недоступная чистота поверхности, чтобы избежать потерь из-за рассеяния мод на нерегулярных поверхностях. И наоборот, классические оптические устройства выходят из строя на частотах ниже 10 ТГц из-за резкого увеличения преобразования энергии фотонов в тепловую энергию. Поэтому термин «терагерцовая щель» (THz gap) в настоящее время используется для указания на тот факт, что, по сравнению с хорошо зарекомендовавшими себя технологиями ВЧ/СВЧ диапазона (электроника) и оптикой ближнего инфракрасного диапазона, в данной области отсутствует или же недостаточно развит необходимый набор технических средств ее освоения (источники излучения, детекторы, антенны, межэлементные соединения и др.).

Сравнительно недавно альтернативный путь к освоению терагерцового диапазона был открыт впечатляющим прогрессом нанотехнологий, который привел к синтезу различных наноструктурированных материалов с необычными механическими, электронными и оптическими свойствами, несводимыми к свойствам классических объемных материалов. Одномодовые компоненты (фотонные кристаллы, линии передачи, микрорезонаторы, антенны) и сосредоточенные элементы (конденсаторы, индуктивности, резисторы, межкомпонентные соединения) были изготовлены с помощью наноразмерных элементов, используя их особые электромагнитные свойства. В частности, особый интерес для указанных целей представляют собой углеродные наноструктуры [2], такие как углеродные нанотрубки или графеновые наноленты, которые демонстрируют выдающиеся электрические, тепловые и механические свойства. Таким структурам присущи высокая подвижность носителей, независимое от частоты поглощение в среднем и дальнем ИК диапазонах, а также распространение сильно замедленных поверхностных волн (поверхностных плазмон-поляритонов), которые характеризуются сильной локализацией вблизи поверхности и умеренными потерями и резонансы которых проявляются в рассматриваемом частотном диапазоне. Многообещающей особенностью таких материалов является возможность перестройки с помощью электрического и/или магнитного смещения или химического легирования [3].

Антенные резонансы поверхностных волн и межзонные переходы в терагерцовой области. В данном сообщении мы сосредоточимся на детекторах для среднего и дальнего ИК диапазонов, основанных на использовании графеновых нанолент в качестве антенных элементов. Существует несколько механизмов использования таких элементов для детектирования падающей на них электромагнитной волны: в [4] предлагаемый детектор основан на возбуждении межзонных (оптических) переходов между несколькими слоями графена. В [5] предложен детектор на основе антенной связи с графеновым полевым транзистором. Использование туннельных резонансов – еще один способ создания таких детекторов [6].

На наш взгляд, на данный момент наиболее перспективным механизмом детектирования представляется возбуждение в графеновых слоях поверхностных плазмон-поляритонов, сильно локализованных вблизи поверхности электромагнитных мод в ИК и терагерцовом диапазонах [7]. Преимуществом использования материалов на основе графена является возможность настройки резонансных условий с помощью электрического и магнитного поля. С другой стороны, основным недостатком детекторов с возбуждением поверхностных мод является низкая эффективность связи между падающим излучением и самим детектором. Решения, предложенные до сих пор для повышения производительности (например, с точки зрения уровня сигнала), основаны на использовании многослойных структур [3; 8]. Несмотря на достигнутый успех в этой области [9], с технологической точки зрения реализация наноразмерных многослойных систем графен/изолятор или графен/металл является серьезной проблемой, не позволяющей выйти за рамки изготовления экспериментальных образцов графеновых устройств.

Мы предлагаем решение, которое могло бы повысить производительность плоского графенового детектора без перехода к трехмерной многоуровневой архитектуре [10]. Модель детектора представляет собой плоскую матрицу графеновых лент переменной ширины и длины на диэлектрическом слое (рис. 1). Ниже будет показано, что подходящий подбор длин и ширин лент позволяет настраивать резонансы, исходящие от двух различных механизмов: возбуждение поверхностных волн и межзонные переходы. Предлагаемое двумерное решение не только проще для реализации по сравнению с многослойным, но оно также облегчает организацию электрических контактов и управление положением уровня Ферми, который должен находиться в пределах запрещенной зоны.

Существование поверхностных волн связано с квантовой природой электромагнитных эффектов в углеродных наноструктурах и может быть теоретически продемонстрировано путем оценки их электропроводности с учетом как внутри-, так и межзонных переходов, как это сделано, например, в [11] для УНТ и в [3] для графена.

Давайте рассмотрим графеновую ленту длиной L и шириной W , как показано на рис. 1, и с проводимостью σ , расположенную на слое диэлектрика с относительной проницаемостью ϵ_r . Диэлектрическую проницаемость окружающего воздуха обозначим ϵ_0 . Как уже указывалось, такая структура может поддерживать распространение поверхностных волн. Дисперсионное соотношение для таких волн может быть получено из модели резонатора Фабри–Перо в следующем виде:

$$\frac{1}{\sqrt{(\beta/k_0)^2 - 1}} + \frac{1}{\sqrt{(\beta/k_0)^2 - \epsilon_r}} = -i \frac{\sigma(\omega)}{W\epsilon_0} k_0, \quad (1)$$

где k_0 – волновое число в свободном пространстве; β и ω – волновое число и частота поверхностной волны. Налагая на уравнение (1) классическое условие антенных резонансов

$$L = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{\pi}{\beta}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

мы приходим к серии комплексных частот ω_n , связанных с существующими резонансами поверхностных волн. Из (1) и (2) следует, что, как и в классическом случае, положение резонансов на шкале частот определяется длиной графеновой ленты L и ее проводимостью σ . Заметим, что в силу эффекта пространственного ограничения движения заряда, присущего наноструктурам, удельная проводимость графеновой ленты зависит и от ее ширины, так что резонансная частота поверхностной волны также зависит и от W . В углеродных нано-

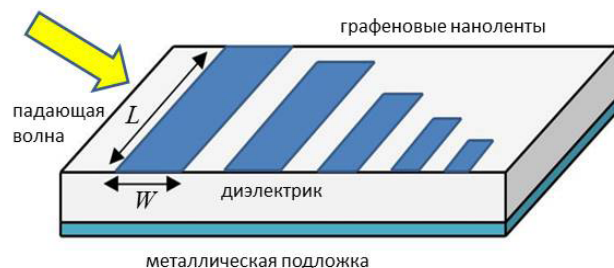


Рис. 1. Элемент предлагаемого широкополосного ИК детектора: массив графеновых лент различной длины и ширины, расположенных на диэлектрическом слое

Fig. 1. Element of the proposed broadband IR detector: collection of different length and width graphene strips located on the dielectric layer

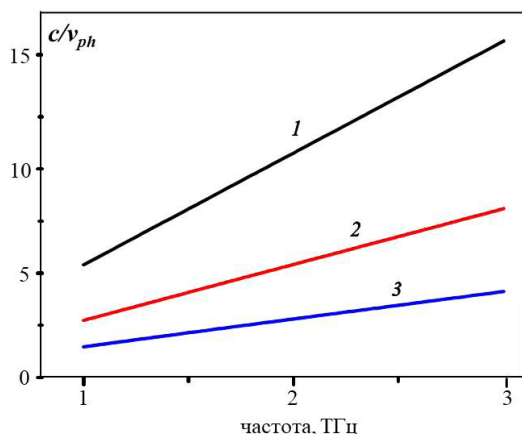


Рис. 2. Замедление поверхностной волны в монослое графена при различных значениях химического потенциала: $\mu = 0,05$ эВ (1), $\mu = 0,1$ эВ (2), $\mu = 0,2$ эВ (3)

Fig. 2. Slowing down of the surface wave in the graphene monolayer at different values of the chemical potential: $\mu = 0.05$ eV (1), $\mu = 0.1$ eV (2), $\mu = 0.2$ eV (3)

перехода пропорциональна квадрату матричного элемента оператора скорости, рассчитанного между соответствующими состояниями [12]. Этот резкий пик в матричном элементе терагерцового перехода в сочетании с сингулярностью ван Хова в квазиодномерном спектре графеновых лент приводит к высокой чувствительности фототока к частоте возбуждения, что и обеспечивает возможность создания предлагаемого детектора. Дополнительное регулирование запрещенной зоны нанолент может быть достигнуто за счет приложения электрического поля в плоскости детектора.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим межзонные переходы в графеновых нанолентах, изображенных на рис. 1, при различных значениях их ширины W . В дальнейшем мы ограничимся анализом графеновых лент типа armchair, ширина которых определяется соотношением $W = Nb$, в котором $b = 0,142$ нм – величина C–C связи в графене, и $N = 3p + 2$, где p – целое число, а N определяет количество димеров в ширине ленты W . Используя уравнение (10) из [12] с прыжковым интегралом третьего порядка $t_3 = -0,3$ эВ и коррекцией по краям $dt = -0,2$ эВ, мы можем оценить частоту межзонных переходов с наименьшей энергией, происходящих в рассматриваемом семействе нанолент.

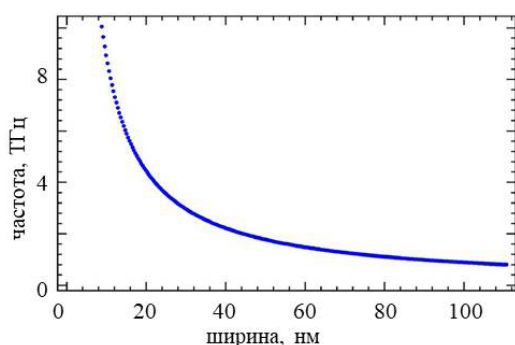


Рис. 3. Частота межзонного оптического перехода через узкую полосу пропускания бесконечно длинной графеновой ленты типа «armchair» в зависимости от ширины W

Fig. 3. Frequency of the interband optical transition through a narrow bandwidth of an armchair infinitely long graphene strip depending on the width W

трубках это приводит к существованию в них – в зависимости от радиуса – как металлического, так и полупроводникового типа проводимости.

В графеноподобных материалах фазовая скорость поверхностной волны v_{ph} оказывается намного меньше скорости света в вакууме (примерно на один-два порядка). В углеродных нанотрубках данный эффект подробно описан в [11] и экспериментально подтвержден в [9]. В монослое графена этот эффект не так выражен [3] (рис. 2), однако может быть существенно усилен за счет изменения химического потенциала и использования многослойных структур. Так или иначе, но сильное замедление поверхностных волн в графене отвечает за возможность возникновения антенных (связанных с эффектом конечной длины) резонансов в ИК или ТГц диапазонах для субмикронных значений L .

Межзонные переходы могут быть индуцированы в графеновых нанолентах, а также в УНТ, которые имеют узкие энергетические зоны в терагерцовом диапазоне. Вероятность межзонного дипольного пе-

рехода пропорциональна квадрату матричного элемента оператора скорости, рассчитанного между соответствующими состояниями [12]. Этот резкий пик в матричном элементе терагерцового перехода в сочетании с сингулярностью ван Хова в квазиодномерном спектре графеновых лент приводит к высокой чувствительности фототока к частоте возбуждения, что и обеспечивает возможность создания предлагаемого детектора. Дополнительное регулирование запрещенной зоны нанолент может быть достигнуто за счет приложения электрического поля в плоскости детектора.

Результаты представлены на рис. 3 и относятся к бесконечно длинным графеновым лентам. Матричный элемент этих переходов имеет универсальное значение и равен скорости Ферми в графене v_F [13]. Чтобы отделить явление межзонного перехода от явления плазмонного резонанса, полезно подчеркнуть, что длина L графеновой ленты не оказывает большого влияния на спектр поглощения при высоких значениях соотношения сторон, таких как $L / W > 30$ [14].

Перейдем теперь к исследованию значений резонанса поверхностной волны, которые мы можем получить из уравнений (1) и (2). Приближенное выражение для проводимости графеновой наноленты типа «armchair» задается следующим выражением [15]:

$$\sigma(\omega) = \frac{2\nu_F M(W, T)}{\pi \nu R_0 W} \frac{1}{1 + i\omega/\nu}, \quad (3)$$

где M – эквивалентное количество проводящих каналов, которое зависит от киральности ленты, ее ширины и температуры T ; $R_0 = 12,9$ КОм – квантовое сопротивление; ν – частота столкновений. Предполагая, что система находится при комнатной температуре, $T = 300$ К, и вычисляя M согласно процедуре, указанной в [15], мы можем использовать (3) вместе с условием (2) в уравнении (1) для получения антенных резонансов поверхностных волн для графеновых лент типа «armchair». Частотная зависимость первого резонанса как функция длины наноленты изображена на рис. 4.

При расчетах использовались следующие типичные значения для параметров нанолент: $\nu_F = 8,7 \cdot 10^5$ м/с и $\nu = 10^{12}$ Гц. Предполагалось также, что графеновая лента расположена на кремниевой подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 12$. Следует отметить, что при выбранных параметрах первый антенный резонанс слабо зависит от ширины W , поскольку связанное с W изменение проводимости (3) незначительно влияет на дисперсионное соотношение (1). Поэтому для этих значений входных параметров антенные резонансы отделяются на частотной шкале от межзонных переходов. Из сравнения результатов, представленных на рис. 3 и рис. 4, становится ясно, что существуют диапазоны значений, в которых могут реализовываться оба механизма: как антенные резонансы, так и межзонные переходы. В таблице приведены размеры графеновых лент, допускающие одновременное возбуждение обоих механизмов на заданной частоте. Подчеркнем, что такой эффект возможен только при соотношении сторон ленты $L/W > 60$.

Ширина и длина графеновых нанолент, обеспечивающих совпадение частот межзонных переходов и антенных резонансов

Width and length of graphene strips providing the matching of the frequencies of interband transitions and antenna resonances

Ширина, нм Width, nm	Длина, мкм Length, micron	Частота, ТГц Frequency, THz
44,0	76,3	2,0
24,0	37,2	4,0
12,0	24,6	6,0
15,0	19,1	8,0
8,0	14,3	10,0

Закключение. В настоящей работе мы представили идею нового типа детектора среднего и дальнего ИК диапазона, основанного на одновременном использовании двух резонансных механизмов электромагнитного отклика: возбуждение низкочастотных межзонных переходов в графеновых нанолентах типа «armchair» конечной ширины и возбуждение антенных резонансов поверхностных волн (плазмон-поляритонов) в графеновых лентах конечной длины. Наши оценки показывают, что совпадение частот этих двух типов резонансов, которое обеспечивает существенный рост сигнала детектора, может быть достигнуто в зависимости от входных параметров в среднем и дальнем ИК диапазонах. Следует также подчеркнуть, что данный тип детектора предоставляет возможность его тонкой настройки посредством допирования и/или наложения внешнего электрического или магнитного поля. Конечно, на пути от идеи до экспериментального образца детектора предстоит решить множество проблем, как теоретических, так и технологических. В частности, одним из направлений дальнейшей работы будет расчет эффективности антенны в рассматриваемом диапазоне в условиях действия двух механизмов. Зная эффективность,

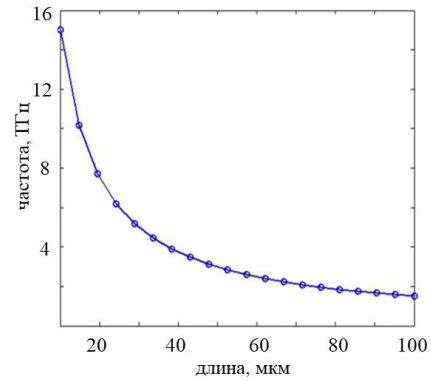


Рис. 4. Первый антенный резонанс в ячейке детектора, изображенной на рис. 1, при различных значениях L

Fig. 4. First antenna resonance in the detector cell shown in Fig. 1 at different values of L

полученный в настоящей работе результат можно использовать двумя способами: либо мы выбираем систему одинаковых графеновых лент с заданными величинами L и W и получаем узкополосный детектор с усиленным сигналом, либо строим детектор с заданным набором длин и шириной лент, расширяя таким образом полосу детектирования.

Благодарности. Работа была поддержана проектом EU-H2020-MSCA-RISE «TERASSE», грант № 823878 (2019–2023).

Acknowledgements. The work is supported by the project EU-H2020-MSCA-RISE “TERASSE”, grant № 823878 (2019–2023).

Список использованных источников

1. The 2017 terahertz science and technology roadmap / S. S. Dhillon [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 50, N 4. – Art. 043001 (1–49). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>
2. Hartmann, R. R. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials / R. R. Hartmann, J. Kono, M. E. Portnoi // *Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 25, N 32. – Art. 322001 (1–16). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/32/322001>
3. Batrakov, K. Graphene layered systems as a terahertz source with tuned frequency / K. Batrakov, S. Maksimenko // *Phys. Rev. B*. – 2017. – Vol. 95, N 20. – Art. 205408 (1–8). <https://doi.org/10.1103/physrevb.95.205408>
4. Terahertz and infrared detectors based on graphene structures / V. Ryzhii [et al.] // *Infrared Phys. And Technology*. – 2011. – Vol. 54, N 3. – P. 302–305. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.12.034>
5. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors / L. Vicarelli [et al.] // *Nature Materials*. – 2012. – Vol. 11, N 10. – P. 865–871. <https://doi.org/10.1038/nmat3417>
6. Maffucci, A. A new mechanism for THz detection based on the tunneling effect in bi-layer graphene nanoribbons / A. Maffucci // *Appl. Sci.* – 2015. – Vol. 5, N 4. – P. 1102–1116. <https://doi.org/10.3390/app5041102>
7. Maffucci, A. Carbon-based terahertz resonant antennas / A. Maffucci, S. Maksimenko // *Fundamental and Applied Nanoelectromagnetics II*. – Dordrecht, 2019. – P. 175–200. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1687-9_10
8. Tunable terahertz plasmonic sensor based on graphene/insulator stacks / Y. Huang [et al.] // *IEEE Photonics Journal*. – 2017. – Vol. 9, N 1. – Art. 5900210 (1–10). <https://doi.org/10.1109/jphot.2017.2656242>
9. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes / M. V. Shuba [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2012. – Vol. 85, N 16. – Art. 165435 (1–6). <https://doi.org/10.1103/physrevb.85.165435>
10. Graphene THz Detector based on Plasmon Resonances and Interband Transitions / A. Maffucci [et al.] // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). – 2021. – P. 1–3. <https://doi.org/10.23919/ursigass51995.2021.9560421>
11. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions and surface wave propagation / G. Y. Slepyan [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1999. – Vol. 60, N 24. – P. 17136–17149. <https://doi.org/10.1103/physrevb.60.17136>
12. Hartmann, R. R. Interband transitions in narrow-gap carbon nanotubes and graphene nanoribbons / R. R. Hartmann, V. A. Saroka, M. E. Portnoi // *J. Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 125, N 15. – Art. 151607 (1–9). <https://doi.org/10.1063/1.5080009>
13. Tight-binding energy dispersions of armchair-edge graphene nanostrips / D. Gunlycke, C. T. White // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 77, N 11. – Art. 115116 (1–6). <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.115116>
14. Hidden correlation between absorption peaks in achiral carbon nanotubes and nanoribbons / V. A. Saroka [et al.] // *J. Saudi. Chem. Soc.* – 2018. – Vol. 22, N 8. – P. 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.03.001>
15. Maffucci, A. Number of conducting channels for armchair and zig-zag graphene nanoribbon / A. Maffucci, G. Miano // *IEEE Trans. on Nanotechn.* – 2013. – Vol. 12, N 5. – P. 817–823. <https://doi.org/10.1109/tnano.2013.2274901>

References

1. Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., Davies A. G., Hoffmann M. C., Booske J., Paoloni C., Gensch M., Weightman P., Williams G. P., Castro-Camus E., Cumming D. R. S., Simoens F., Escorcía-Carranza I., Grant J., Lucyszyn S., Kuwata-Gonokami M., Konishi K., Koch M., Schmuttenmaer C. A., Cocker T. L., Huber R., Markelz A. G., Taylor Z. D., Wallace V. P., Zeitler J. A., Sibik J., Korter T. M., Ellison B., Rea S., Goldsmith P., Cooper K. B., Appleby R., Pardo D., Huggard P. G., Krozer V., Shams H., Fice M., Renaud C., Seeds A., Stöhr A., Naftaly M., Ridler N., Clarke R., Cunningham J. E., Johnston M. B. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 50, no. 4, art. 043001 (1–49). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>
2. Hartmann R. R., Kono J., Portnoi M. E. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials. *Nanotechnology*, 2014, vol. 25, no. 32, art. 322001 (1–16). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/32/322001>
3. Batrakov K., Maksimenko S. Graphene layered systems as a terahertz source with tuned frequency. *Physical Review B*, 2017, vol. 95, no. 20, art. 205408 (1–8). <https://doi.org/10.1103/physrevb.95.205408>
4. Ryzhii V., Ryzhii M., Ryabova N., Mitin V., Otsuji T. Terahertz and infrared detectors based on graphene structures. *Infrared Physics & Technology*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 302–305. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.12.034>
5. Vicarelli L., Vitiello M. S., Coquillard D., Lombardo A., Ferrari A. C., Knap W., Polini M., Pellegrini V., Tredicucci A. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors. *Nature Materials*, 2012, vol. 11, no. 10, pp. 865–871. <https://doi.org/10.1038/nmat3417>
6. Maffucci A. A new mechanism for THz detection based on the tunneling effect in bi-layer graphene nanoribbons. *Applied Sciences*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 1102–1116. <https://doi.org/10.3390/app5041102>

7. Maffucci A., Maksimenko S. Carbon-based terahertz resonant antennas. *Fundamental and applied nano-electromagnetics II*, Dordrecht, Springer, 2019, pp. 175–199. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1687-9_10
8. Huang Y., Zhong S., Yao H., Cui D. Tunable Terahertz Plasmonic Sensor Based on Graphene/Insulator Stacks. *IEEE Photonics Journal*, 2017, vol. 9, no. 1, art. 5900210 (1–10). <https://doi.org/10.1109/jphot.2017.2656242>
9. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Plyushch A. O., Kuzhir P. P., Slepyan G. Ya., Maksimenko S. A., Ksenevich V. K., Buka P., Seliuta D., Kasalynas I., Macutkevicius J., Valusis G., Thomsen C., Lakhtakia A. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes. *Physical Review B*, 2012, vol. 85, no. 16, art. 165435 (1–6). <https://doi.org/10.1103/physrevb.85.165435>
10. Maffucci A., Maksimenko S. A., Portnoi M. E., Saroka V. A., Slepyan G. Y. A Graphene THz Detector based on Plasmon Resonances and Interband Transitions. *XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 2021, pp. 1–3. <https://doi.org/10.23919/ursigass51995.2021.9560421>
11. Slepyan G. Ya., Maksimenko S. A., Lakhtakia A., Yevtushenko O. M., Gusakov A. V. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamics conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation. *Physical Review B*, 1999, vol. 60, no. 24, p. 17136–17149. <https://doi.org/10.1103/physrevb.60.17136>
12. Hartmann R. R., Saroka V. A., Portnoi M. E. Interband transitions in narrow-gap carbon nanotubes and graphene nanoribbons. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, no. 15, art. 151607 (1–9). <https://doi.org/10.1063/1.5080009>
13. Gunlycke D., White C. T. Tight-binding energy dispersions of armchair-edge graphene nanostrips. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 11, art. 115116 (1–6). <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.115116>
14. Saroka V. A., Pushkarchuk A. L., Kuten S. A., Portnoi M. E. Hidden correlation between absorption peaks in achiral carbon nanotubes and nanoribbons. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2018, vol. 22, no. 8, pp. 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.03.001>
15. Maffucci A., Miano G. Number of Conducting Channels for Armchair and Zig-Zag Graphene Nanoribbon Interconnects. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2013, vol. 12, no. 5, pp. 817–823. <https://doi.org/10.1109/tnano.2013.2274901>

Информация об авторах

Максименко Сергей Афанасьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт ядерных проблем БГУ (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.maksimenko@gmail.com.

Маффуччи Антонио – д-р философии, профессор. Университет Кассино и Южного Лацио (Via G. Di Biasio 43 03043 Cassino – FR, Italy). E-mail: maffucci@unicas.it.

Портной Миша – д-р философии, профессор. Эксетерский университет (Physics Building, Stocker Road, Exeter EX4 4QL, United Kingdom). E-mail: m.e.portnoi@exeter.ac.uk.

Сарока Василий Аркадьевич – д-р философии. Норвежский университет науки и технологий (Høgskoleringen, 5, 7034 Trondheim, Norway). E-mail: vasil.saroka@ntnu.no.

Слепьян Григорий – д-р физ.-мат. наук, профессор. Тель-Авивский университет (Tel Aviv 69978, Israel). E-mail: gregory_slepyan@yahoo.com.

Information about the authors

Maksimenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.maksimenko@gmail.com.

Maffucci Antonio – Professor, Ph. D. Università di Cassino e del Lazio Meridionale (Via G. Di Biasio 43 03043 Cassino – FR, Italy). E-mail: maffucci@unicas.it.

Portnoi Misha – Ph. D., Professor. University of Exeter (Physics Building, Stocker Road, Exeter EX4 4QL, United Kingdom). E-mail: m.e.portnoi@exeter.ac.uk.

Saroka Vasil A. – Ph. D. Norwegian University of Science and Technology (Høgskoleringen 5, 7034 Trondheim, Norway). E-mail: vasil.saroka@ntnu.no

Slepyan Gregory – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Tel Aviv University (Tel Aviv 69978, Israel). E-mail: gregory_slepyan@yahoo.com.