

Пьезопреобразователи для возбуждения упругих волн терагерцевого диапазона в графеноподобных 2D-супракристаллах

Р.А. Браже, А.И. Кочаев, А.А. Советкин

Ульяновский государственный технический университет
432027, Российская Федерация, г. Ульяновск
ул. Северный Венец, 32

Показана принципиальная возможность возбуждения упругих волн терагерцевого диапазона частот в графене и графеноподобных 2D-супракристаллах. В качестве пьезоэлектрического преобразователя, находящегося в акустическом контакте со звукопроводом, рекомендуется использовать его конец, перфорированный отверстиями определенной формы, размера и ориентации. Приведенные расчеты показывают, что изготовление подобных пьезопреобразователей соответствует возможностям современных нанотехнологий.

Ключевые слова: графен, графеноподобные 2D-супракристаллы, пьезоэлектрический преобразователь, упругие волны, терагерцевый диапазон, коэффициент преобразования.

Введение

Анализ состояния разработок ведущих зарубежных исследовательских учреждений в области СВЧ-электроники [1] показывает, что так называемая «терагерцевая щель» (THz Gap) от 0.3 ТГц до 3.0 ТГц, отделяющая электронику от фотоники, в настоящее время начинает интенсивно осваиваться. Уже созданы малогабаритные вакуумные электронно-лучевые приборы (клистроны и лампы бегущей волны), работающие на частотах от 220 ГГц до 1030 ГГц. Широкая полоса частот терагерцевого излучения, спо-

собность проникать через непрозрачные среды (дым, туман, пыль, одежду, упаковку и т. п.) определяют перспективы его применения в высокоскоростных линиях связи, радиолокационных системах высокого разрешения, антитеррористических системах обнаружения оружия, взрывных устройств и т. д. Кроме того, переход на терагерцевые частоты позволит поднять быстроедействие микропроцессорной техники на несколько порядков.

Вместе с тем для практического освоения терагерцевого диапазона, помимо создания компактных источников терагерцевого излучения, необходимо разработать соответствующие элементы волноводного тракта и устройства обработки сигналов. В сочетании с терагерцевой электроникой и плазмоникой весьма перспективным представляется также развитие терагерцевой наноакустоэлектроники. В работах [5–6] нами рассчитаны упругие характеристики и скорости распространения продольных, поперечных и изгибных упругих волн в графене и графеноподобных 2D-супракристаллах. Высказаны перспективы использования таких волн в устройствах двумерной, в т. ч. терагерцевой, акустоэлектроники и акустооптики. В этой связи обнадеживающим фактором является экспериментальное обнаружение акустических колебаний терагерцевого диапазона частот в наноразмерных структурах [7].

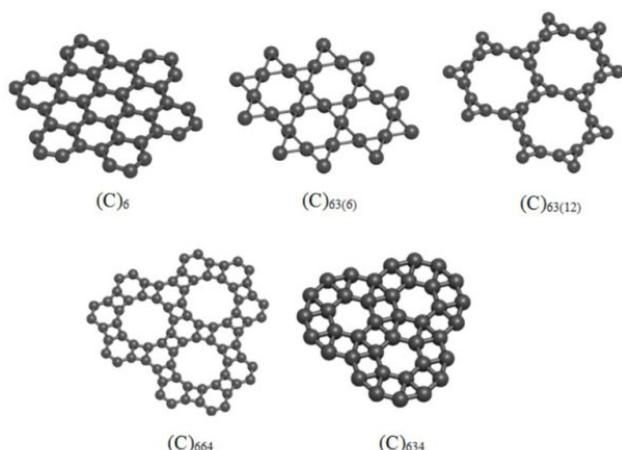


Рис. 1. Атомные модели исследуемых графеноподобных наноразмерных структур: графен $(C)_6$ и углеродные 2D-супракристаллы. Первый индекс обозначает вид супраячейки (гексагональная), последующие – вид ячеек вложения. Индексы в скобках определяют вид многоугольника в центре ячейки в случае одинаковых ячеек вложения

Важнейшим элементом любого акустоэлектронного устройства является электроакустический преобразователь, предназначенный для преобразования электромагнитного сигнала в упругую волну той же частоты и наоборот. В СВЧ-диапазоне наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи. Принципы их конструирования и расчета были разработаны еще в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века [8–12], однако особенности возбуждения упругих волн терагерцевого диапазона в графеноподобных 2D-структурах требует отдельного рассмотрения. Этому и посвящена настоящая работа.

1. Исследуемые материалы и их пьезоэлектрические характеристики

На рис. 1 представлены атомные модели графена (C)₆ и предложенных нами [5; 13] графеноподобных 2D-супракристаллов. Их отличительной особенностью является то, что в узлах шестиугольников находятся не отдельные атомы, а их симметричные комплексы. Некоторые из них, например (C)₆₃₍₁₂₎ и (C)₆₆₄, как и графен, характеризуются sp²-гибридизацией орбиталей валентных электронов и являются полуметаллами. Другие – (C)₆₃₍₆₎ и (C)₆₃₄ – sp³-гибридизацией и отличной от нуля шириной запрещенной зоны.

Все приведенные 2D-кристаллы принадлежат к классу точечной симметрии 6/mmm, т. е. обладают центром симметрии и не являются пьезоэлектриками. В работе [14] предлагается решить эту проблему путем создания в графене отверстий треугольной формы. При этом симметрия кристалла понижается до нецентросимметричного класса 3m, характеризуемого наличием полярной оси симметрии. При взаимном смещении подрешеток кристалла вдоль этого направления в результате механических деформаций возникает электрическая поляризация (пьезоэффект).

Уравнение пьезоэффекта для полученных таким образом двумерных пьезоэлектриков может быть записано в виде

$$P_i = e_{ijk} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \quad (i, j, k = 1, 2). \quad (1)$$

Здесь P_i – вектор электрической поляризации, определяемый как дипольный момент, приходящийся на единицу площади, величина которого измеряется в системе СИ в кулонах на метр (Кл/м); e_{ijk} – тензор пьезоэлектрических

коэффициентов, также измеряемых в Кл/м; $\partial u_j / \partial x_k$ – тензор деформаций, выраженный через производные от смещений по координатам.

Элементарные ячейки исследуемых перфорированных двумерных кристаллических структур в сравнении с ячейкой графена показаны на рис. 2. Для получения максимального дипольного момента на единицу площади плотность «оборванных» электронных связей должна быть как можно больше, поэтому треугольные «атомные дырки» сделаны минимальными по размеру и расположены периодически. Их рекомендуется создавать при помощи пучка электронов высокой энергии [14].

Матрицы упругих жесткостей (c_{ij}) и пьезоконстант (e_{ij}) для этих структур могут быть легко получены путем редукции соответствующих матриц для трехмерных кристаллов [15; 16] и имеют вид

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -e_{22} \\ -e_{22} & e_{22} & 0 \end{pmatrix}$$

Здесь использованы матричные представления тензоров c_{ijkl} и e_{ijk} путем свертки по парам симметричных индексов: 11 → 1; 22 → 2; 12, 21 → 3.

Из матрицы пьезоконстант видно, что в перфорированных вышеуказанным образом графеноподобных 2D-супракристаллах электрическое поле, приложенное вдоль направления x_1 , вызывает деформацию сдвига в плоскости (x_1, x_2). Если же электрическое поле приложено в направлении x_2 , то возникает деформация растяжения вдоль оси x_1 и сжатия вдоль оси x_2 , а при смене полярности поля – наоборот.

Единственный независимый компонент вектора поляризации в (1) может быть найден согласно его определению как

$$P_2 = \frac{Zea}{S} \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad (2)$$

где Z – число «оборванных» электронных связей в элементарной ячейке; e – элементарный заряд; a – длина ребра супраячейки; S – площадь элементарной ячейки. Выражения для этих параметров приведены в табл. 1. Используя их и приравнивая правые части выражений (1) и (2), получаем для пьезоэлектрического коэффициента e_{22} следующую формулу:

$$e_{22} = F \frac{e}{l}, \quad (3)$$

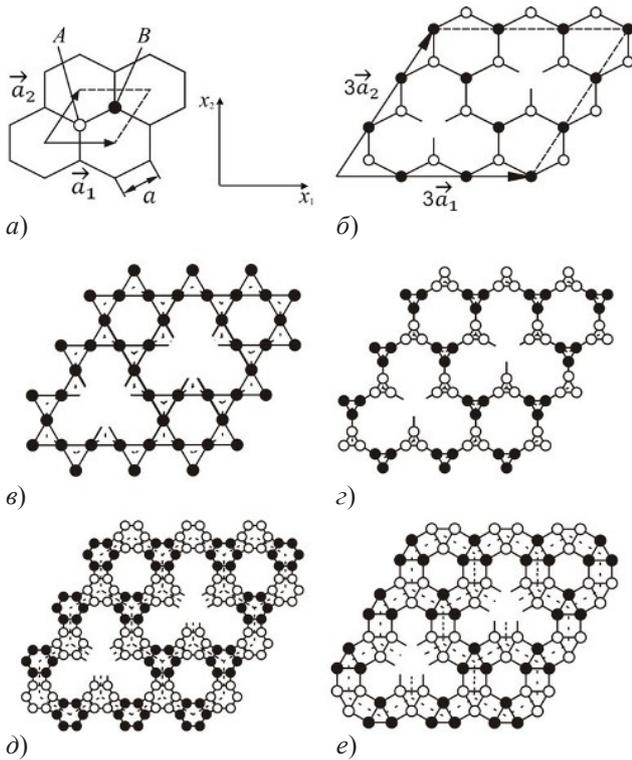


Рис. 2. Элементарные ячейки графена (а), перфорированного графена (б) и углеродных 2D-супракристаллов (C)₆₃₍₆₎ (в), (C)₆₃₍₁₂₎ (г), (C)₆₄ (д), (C)₆₃₄ (е). Атомы, образующие подрешетки типов А и В, показаны соответственно в виде светлых и темных кругов

где F – форм-фактор, определяемый параметрами структуры (см. табл. 1.), а l – длина межатомной связи. Вычисленные по формуле (3) значения пьезоконстанты e_{22} для перфорированного графена и графеноподобных 2D-супракристаллов также представлены в табл. 1. При этом значения l брались из работы [17].

Значение $e_{22} = 2.83 \cdot 10^{-10}$ Кл/м для графена характеризует двумерный пьезоэффект. Поделив эту величину на эффективную толщину графенового листа, обычно принимаемую за расстояние между слоями в графите 3,35 Å, получаем для эквивалентной пьезоконстанты, описывающей трехмерный пьезоэффект, значение $e_{22}^{(3)} = 0.84$ Кл/м². Для сравнения: в цитируемой работе [14] получено значение $e_{22}^{(3)} = 0.124$ Кл/м². Однако оно получено для единичного отверстия в графеновой наноленте. В случае регулярных отверстий оптимального размера, естественно, должен наблюдаться более сильный пьезоэффект.

Обратим также внимание на то, что значения e_{22} для углеродных 2D-супракристаллов с sp^3 -гибридизацией примерно вдвое меньше, чем в графене и sp^3 -наноаллотропах. Это связано, как видно из табл. 1, с меньшими значениями их

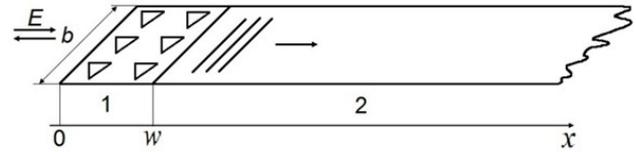


Рис. 3. Анализируемая модель пьезоэлектрического преобразователя, находящегося в акустическом контакте со звукопроводом: 1 – пьезопреобразователь (перфорированный графен); 2 – звукопровод (графен)

форм-фактора, т. е. фактически с большей рыхлостью структуры.

2. Вносимый импеданс пьезопреобразователя

На рис. 3 изображена анализируемая модель пьезоэлектрического преобразователя (ПП) (1), нагруженного на звукопровод (2). И сам ПП, и звукопровод выполнены из одной графеновой наноленты, ориентированной вдоль кристаллофизической оси x_2 . Та часть конструкции, которая является ПП, перфорирована периодически расположенными треугольными отверстиями, причем основания треугольников также ориентированы вдоль оси x_2 . Как отмечалось выше, периодическое электрическое поле, приложенное к ПП в направлении x_2 , будет возбуждать колебания растяжения-сжатия, которые будут распространяться вдоль звукопровода в виде продольных упругих волн. Такая стыковка ПП со звукопроводом обеспечивает наилучший акустический контакт между ними, что очень важно на терагерцевых частотах.

Состояние пьезоэлектрика при выбранной ориентации ПП описывается следующими уравнениями:

$$t_{22} = c_{2222} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - e_{222} E_2, \tag{4}$$

$$D_2 = e_{222} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \epsilon_{22} E_2, \tag{5}$$

где t_{22} , c_{2222} , e_{222} , ϵ_{22} – соответствующие компоненты тензоров упругих напряжений, упругих жесткостей, пьезоэлектрических констант и диэлектрических проницаемостей; u_2 – механическое смещение; E_2 и D_2 – соответственно компоненты векторов напряженности и индукции электрического поля. Обозначив ось x_2 как x и опустив индексы, перепишем систему (4)–(5) в более простом виде:

$$t = c \frac{\partial u}{\partial x} - eE, \tag{6}$$

$$D = e \frac{\partial u}{\partial x} - \epsilon E. \tag{7}$$

Подробные практические рекомендации по расчету параметров ПП для возбуждения СВЧ-акустических волн в кристаллах изложены в работе [18]. Здесь мы будем следовать предложенной в ней методике, принимая во внимание двумерный характер задачи. В частности, величины, входящие в формулы (6), (7), измеряются в следующих единицах СИ: $[t] = 1 \text{ Н / м}$, $[c] = 1 \text{ Н / м}$, $[\partial u / \partial x] = 1$, $[e] = 1 \text{ Кл / м}$, $[E] = 1 \text{ В / м}$, $[D] = 1 \text{ Кл / м}$, $[\varepsilon] = 1 \text{ Ф}$.

Импеданс, вносимый ПП в электрическую цепь, в квазистатическом приближении можно найти как

$$Z(\omega) = \frac{U}{I} = \frac{\int_0^w E(x, t) dx}{b \partial D / \partial t} = \frac{\int_0^w E(x, t) dx}{i \omega b D(t)}, \quad (8)$$

где U и I – соответственно мгновенные значения приложенного к ПП напряжения и силы протекающего в нем тока; w и b – двумерная «толщина» и ширина ПП.

Выражая E из (7) и подставляя результаты в (8), получаем

$$Z(\omega) = \frac{w}{i \omega \varepsilon b} - \left(\frac{e}{i \omega \varepsilon b D} \right) u(x, t) \Big|_0^w. \quad (9)$$

Здесь

$$\frac{w}{i \omega \varepsilon b} = -\varepsilon \frac{1}{\omega C_0} = -iX(\omega)$$

– емкостное сопротивление ПП, определяемое его статической двумерной емкостью $C_0 = \varepsilon b / w$. Действительная часть второго слагаемого показывает активное сопротивление излучения ПП, которое мы обозначим $R(\omega)$, а мнимая – малую добавку к реактивному емкостному сопротивлению, обусловленную пьезоэффектом.

Смещение частиц упругой волны в пьезослое можно представить в виде

$$u(x, t) = u_{0+} \exp[-i(kx - \omega t)] + u_{0-} \exp[i(kx + \omega t)], \quad (10)$$

где u_{0+} и u_{0-} – комплексные амплитуды, определяемые граничными условиями, а k – волновое число:

$$k = \frac{\omega}{v_1} = w \left[\frac{\rho_1}{c(1 + K^2)} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

В выражении (11) v_1 – скорость упругой волны в ПП; ρ_1 – его двумерная плотность; K – коэффициент электромеханической связи в материале ПП:

$$K = \left(1 - \frac{c}{\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

определяемый величиной пьезоэлектрического «ужесточения» его модулей упругости продольной компонентой электрического поля [5; 6; 18–20]:

$$\bar{c} = c + \frac{e^2}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Граничные условия задачи выглядят следующим образом:

$$t_1(x=0) = 0 \quad (14)$$

– напряжение на свободной границе ПП равно нулю;

$$t_1(x=w) = t_2(x=w) \quad (15)$$

– напряжения на границе раздела ПП и звукопровода одинаковы.

Подставляя (7) в (8), а результат в (14), (15), можно получить два линейных алгебраических уравнения для u_{0+} и u_{0-} . Тогда (9) удается привести к виду

$$Z(\omega) = R(\omega) - iX(\omega), \quad (16)$$

Удобно ввести $R(\omega) \omega C_0 = \delta(kw)$ – безразмерное активное сопротивление излучения, описываемое уравнением

$$\begin{aligned} \delta(kw) &= \\ &= \frac{4K^2 \sin^4(kw/2)}{kw (Z_{01}/Z_{02}) \sin^2 kw + (Z_{02}/Z_{01}) \cos^2 kw}. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь опущена упомянутая выше малая добавка к реактивному емкостному сопротивлению, обусловленная пьезоэффектом. Входящие в (17) величины $Z_{01} = \rho_1 v_1$ и $Z_{02} = \rho_2 v_2$ представляют собой характеристические акустические импедансы ПП и звукопровода соответственно.

На рис. 4 представлены универсальные для всех ПП рассматриваемого типа зависимости $\delta(kw) / K^2$ от постоянной распространения kw для различных значений отношения Z_{01} / Z_{02} : 1–1.2; 2–1.1; 3–1.0; 4–0.9; 5–0.8. Приведенные кривые позволяют для заданной частоты сигнала ω_0 выбрать оптимальные значения двумерной толщины ПП w_{opt} . Затем, зная ширину ПП b , легко найти его емкостное сопротивление на данной частоте $X(\omega_0) = w_{opt} / \varepsilon b w$ и сопротивление излучения $R(\omega_0) = \delta(k_0 w_{opt}) X(\omega_0)$.

3. Численные оценки

Произведем численные оценки параметров ПП на основе графена, для которого известны значения упругой жесткости $c_{22} = c_{11} = 533 \text{ Н / м}$ [2], относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{22}^{(r)} = \varepsilon_{11}^{(r)} = \varepsilon_{\parallel}^{(r)} = 1.8$ [21] и с исполь-

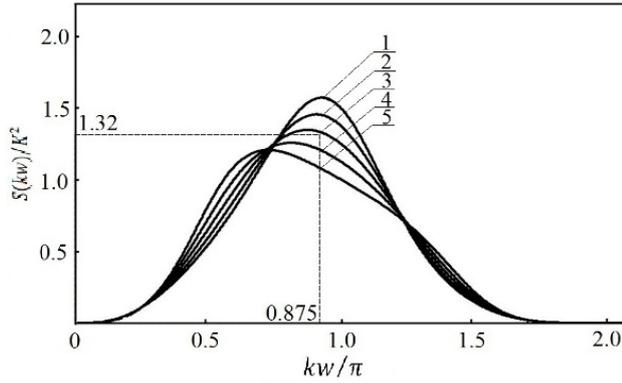


Рис. 4. Зависимость безразмерного сопротивления излучения пьезопреобразователя от постоянной распространения акустической волны для различных значений Z_{01}/Z_{02} : 1–1.2; 2–1.1; 3–1.0; 4–0.9; 5–0.8

зованием результатов табл. 1 могут быть вычислены значения двумерных плотностей ρ_1, ρ_2 ; жесточенного модуля упругости \bar{c}_1 ; скоростей распространения продольных упругих волн v_1 и v_2 ; характеристических акустических импедансов Z_{01} и Z_{02} .

Площадь элементарной ячейки неперфорированного графена $S_2 = (\sqrt{3}/2)l^2$ ($l = 1.42E$). В ней находятся 2 атома углерода. Площадь элементарной ячейки перфорированного графена $S_1 = (27\sqrt{3}/2)l^2$ (см. табл. 1). После удаления 2 атомов из приходящихся на ячейку 18 атомов в ней остается 16 атомов углерода. Это позволяет нам найти ρ_1 и ρ_2 (см. табл. 2).

Абсолютная двумерная диэлектрическая проницаемость графена $\epsilon_{22} = 1.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \times 3.35 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 5.34 \cdot 10^{-21} \text{ Ф}$. С использованием ϵ_{22} из табл. 2 и ϵ_{22} из табл. 1 по формуле (13) можем найти \bar{c}_1 и записать в табл. 2. Затем вычисляем $v_1 = \sqrt{\bar{c}_1/\rho_1}$, $v_2 = \sqrt{c_2/\rho_2}$, Z_{01} и Z_{02} . Записываем результаты в табл. 2. По формуле (12) находим $K = 0.26$.

Для $Z_{01}/Z_{02} = 0.96$ из рис. 4 находим $kw_{opt} = 0.875\pi$ и $\delta(kw_{opt})/K^2 = 1.32$, откуда $\delta(kw_{opt}) = 0.089$.

Дальнейшие расчеты произведем для частоты $\nu_0 = \omega_0/2\pi = 1$ ТГц. Соответствующее ей волновое число $k = 2\pi\nu_0/v_1 = 2.20 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$. Тогда оптимальная двумерная толщина ПП $w_{opt} = 0.875\pi/2.20 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1} = 12.4 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 12.4 \text{ нм}$.

Величина вносимого импеданса ПП обратно пропорциональна его ширине b , которая, в свою очередь, должна находиться в разумном соотношении с длиной звукопровода. Максимальная длина звукопровода ограничена сильным затуханием упругих волн на терагерцевых частотах. Грубая оценка величины этого затухания

может быть сделана на основе того факта, что затухание продольных звуковых волн в Z-срезе сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) – типичного материала для СВЧ-акустоэлектроники – составляет $0.2 \text{ дБ/см} \cdot \text{ГГц}^2$ [22], или, в пересчете на терагерцы, $20 \text{ дБ/мкм} \cdot \text{ТГц}^2$.

Отсюда ясно, что длина звукопровода вряд ли может быть больше нескольких микрометров. Тогда ширина ПП, скорее всего, должна составлять доли микрометра. Примем ее равной $10w_{opt} = 0.124 \text{ мкм}$. В этом случае емкостное сопротивление ПП будет $X(\omega_0) = 2.98 \text{ МОм}$, а сопротивление излучения $R(\omega_0) = 0.26 \text{ МОм}$. Для сравнения: типичные значения этих сопротивлений на гигагерцевых частотах составляют десятые и сотые доли ома соответственно [18]. Причина здесь в том, что для возбуждения объемных упругих волн в кристаллах на гигагерцевых частотах используются ПП, в которых электрическое поле прикладывается перпендикулярно к пленочному пьезоэлементу толщиной в доли микрометра. В результате емкость такого ПП велика, а емкостное сопротивление мало. В нашем случае электрическое поле прикладывается вдоль ПП, площадь эффективного сечения которого исключительно мала. По этой причине емкость ПП мала, а емкостное сопротивление и, как следствие, сопротивление излучения очень велики по сравнению с волновым сопротивлением стандартной линии передачи.

4. Коэффициент электроакустического преобразователя

Под коэффициентом электроакустического преобразования ПП понимают отношение мощности возбуждаемой им акустической волны к мощности подаваемой на него прямой электромагнитной волны:

$$\eta = \frac{P_a}{P_+}. \quad (18)$$

Поскольку вся выделяемая в нагрузке, каковой является ПП, СВЧ-мощность

$$P = (1 - |\Gamma|^2) P_+, \quad (19)$$

где $|\Gamma|$ – модуль коэффициента отражения в передающей линии, расходуется на мощность P_a возбуждаемой акустической волны и мощность потерь P_s в ПП:

$$P = P_a + P_s, \quad (20)$$

то из (18)–(20) следует, что

$$\eta = (1 - |\Gamma|^2) \frac{R(\omega)}{R(\omega) + R_s(\omega)}. \quad (21)$$

При выводе формулы (21) учтено, что $P_a \propto R(\omega)$, а $P_s \propto R_s(\omega)$, где $R_s(\omega)$ – сопротивление потерь в ПП, обусловленное главным образом конечной величиной электропроводности ПП.

При комнатной температуре подвижность носителей заряда в графене $\mu = 25 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ [23]. В его элементарной ячейке, площадь которой приведена в табл. 1, находится 2 свободных электрона, таким образом, их поверхностная концентрация составляет $n = 4.32 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Тогда коэффициент двумерной электропроводности графена $\sigma = en\mu = 1.73 \text{ Ом}^{-1}$.

Поскольку толщина графеновой наноленты заведомо меньше глубины скин-слоя, то для $b = 10w_{opt}$, $R_s(\omega) = R_s = w_{opt} / (\sigma b) = 0.058 \text{ Ом}$. Следовательно, $R_s(\omega) \ll R(\omega)$ и, согласно формуле (21), коэффициент преобразования предложенного ПП практически полностью определяется степенью согласованности его импеданса с линией передачи.

Так как

$$|\Gamma|^2 = \left| \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right|^2 = \frac{(R(\omega) - Z_0)^2 + X^2(\omega)}{(R(\omega) + Z_0)^2 + X^2(\omega)}, \quad (22)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии передачи, то из (21), (22) ясно, что наименьшие потери энергии на преобразование электромагнитного сигнала в акустический будут при $Z_0 = R(\omega)$. В акустоэлектронных устройствах гигагерцевого диапазона, где $R(\omega)$ значительно меньше волнового сопротивления стандартной передающей линии, для понижения величины Z_0 обычно применяют трансформаторы сопротивления [18]. В нашем случае, когда $R(\omega) \gg Z_0$, по видимому, придется отказаться от идеи использования даже повышающих трансформаторов. Разумной альтернативой здесь представляется прямое «оптическое» возбуждение ПП сигналом терагерцевой частоты с выхода генератора.

Заключение

Из вышеизложенного следует, что возбуждение упругих волн терагерцевого диапазона в графеноподобных наноразмерных материалах вполне реализуемо, хотя и на пределе возможностей современных нанотехнологий. При этом

наибольшие трудности вызывает даже не изготовление электроакустических пьезопреобразователей, а их согласование как электрической нагрузки с генератором терагерцевого излучения.

Следует отметить, что недавно был предложен еще один способ превращения графена в пьезоэлектрик – его допирование электроположительными или/и электроотрицательными атомами [24]. В этом случае деформации растяжения-сжатия вдоль наноленты создаются поперечным к ней электрическим полем. Это позволяет резко уменьшить импеданс электроакустического ПП и, казалось бы, облегчить проблему его согласования с передающей линией. Однако использование микрополосковых линий передачи в данном случае затруднено в связи с большими потерями на излучение и затухание на терагерцевых частотах. Плазмонные волноводы ввиду отсутствия в них поперечных электрических полей здесь не могут быть использованы. Как вариант могут быть предложены волноводы на электрогидродинамических волнах свободных носителей заряда, физическая природа и свойства которых описаны нами в работах [25–28].

В целом авторы выражают уверенность в том, что акустические волны терагерцевого диапазона в графеноподобных 2D-супракристаллах в скором времени найдут применение в высокоинформативных быстродействующих линиях задержки, фильтрах, корреляторах и других привычных для СВЧ-акустоэлектроники устройствах обработки сигналов. Более того, использование их взаимодействия со сфокусированным лазерным излучением позволит разработать широкий круг терагерцевых аналогов классических акустооптических устройств: модуляторов, дефлекторов, сканеров, анализаторов спектра и т. п.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Соглашения №№ 14.В37.21.1083, 14.В37.21.1285, 14.В37.21.1653) Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-31054) и Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственное задание № 2014/232).

Таблица 1

Расчетные параметры и пьезоэлектрические константы перфорированных графеноподобных углеродных 2D-супракристаллов

Параметры	(C) ₆	(C) ₆₃₍₆₎	(C) ₆₃₍₁₂₎	(C) ₆₆₄	(C) ₆₃₄
Z	6	12	6	12	12
a	1	$\frac{2\sqrt{3}}{3}l$	$\frac{(2+\sqrt{3})\sqrt{3}}{3}l$	$\frac{(3+\sqrt{3})\sqrt{3}}{3}l$	$\frac{(1+\sqrt{3})\sqrt{3}}{3}l$
S	$\frac{27\sqrt{3}}{2}l^2$	$18\sqrt{3}l^2$	$\frac{9\sqrt{3}(2+\sqrt{3})^2}{2}l^2$	$\frac{9\sqrt{3}(3+\sqrt{3})^2}{2}l^2$	$\frac{9(1+\sqrt{3})^2}{2}l^2$
F	$\frac{4\sqrt{3}}{27}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{4}{9(2+\sqrt{3})}$	$\frac{8}{9(3+\sqrt{3})}$	$\frac{8}{9(1+\sqrt{3})}$
l, Å	1.42	1.86	1.71	1.56	2.17
e ₂₂ , 10 ⁻¹⁰ Кл / м	2.83	3.69	1.12	1.89	2.39

Таблица 2

Механические и акустические параметры пьезопреобразователя и звукопровода

Параметры	$\rho, 10^{-7}$ кг / м ²	c, Н / м	v, 10 ³ м / с	Z ₀ , 10 ⁻² кг / (м · с)
пьезопреобразователь	6.77	548	28.5	1.93
звукопровод	7.60	533	26.5	2.01

Список литературы

1. Викулов И. Вакуумная СВЧ-электроника в 2010 году: к миллиметровому и терагерцевому диапазонам // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 2. С. 108–119.
2. Браже Р.А., Кочаев А.И., Мефтахутдинов Р.М. Упругие волны в углеродных 2D-супракристаллах // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. Вып. 8. С. 1614–1618.
3. Браже Р.А., Кочаев А.И. Изгибные волны в графене и 2D-супракристаллах // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. Вып. 8. С. 1512–1514.
4. 2D-supracrystals as a promising materials for planar nanoacoustoelectronics / A.I. Kochaev [et al.] // Journal of Physics: Conference. Series. 2012. V. 345. P. 012007–012017.
5. Браже Р.А. Физика супракристаллов. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 162 с.
6. Кочаев А.И. Чистые моды упругих волн в кристаллах и супракристаллах. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 116 с.
7. Probing elasticity at the nanoscale: terahertz acoustic vibration of small metal nanoparticles / V. Juvé [et al.] // Nano Letters: ACS Publications. 2010. V. 10. № 5. P. 1853–1858.
8. Jaffe H., Berlincourt D.A. Piezoelectric transducer materials // Proceeding of the IEEE. 1965. V. 53. P. 1372–1386.
9. Reeder T.M., Winslow D.K. Characteristics of microwave acoustic transducers for volume wave excitation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1969. V. 1.17. № 11. P. 927–941.
10. Зюрюкин Ю.А., Наянов В.И., Полотнягин В.А. К теории возбуждения гиперзвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15. № 4. С. 797–805.
11. Зюрюкин Ю.А., Наянов В.И., Полотнягин В.А. К теории возбуждения гиперзвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями (тонкопленочные преобразователи) // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15. № 5. С. 1059–1067.
12. Предельная интенсивность ультразвуковых колебаний, возбуждаемых тонкослойными пьезопреобразователями на сверхвысоких частотах / Р.А. Браже [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1973. № 6. С. 35–44.
13. Браже Р.А., Каренин А.А. Компьютерное моделирование физических свойств супракристаллов // Известия вузов. Поволжский регион. Физ.-мат. науки. 2011. № 2. С. 105–112.

14. Chandratre S., Sharma P. Coaxing graphene to be piezoelectric // *Applied Physics. Letters*. 2012. V. 100. P. 023114–023117.
15. Современная кристаллография. Т. 4. Физические свойства кристаллов / Л.А. Шувалов [и др.]. М.: Наука, 1981. 496 с.
16. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Задачник по кристаллофизике / под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1972. 192 с.
17. Упругие характеристики углеродных 2D-супракристаллов в сравнении с графеном / Р.А. Браже [и др.] // *Физика твердого тела*. 2011. Т. 53. Вып. 7. С. 1406–1408.
18. Григорьев М.А. Пьезоэлектрический преобразователь СВЧ электромагнитных колебаний в объемные акустические волны: учебное пособие для спецпрактикума. Саратов: СГУ, 1999. 51 с.
19. Kochaev A.I., Brazhe R.A. Pure modes for elastic waves in crystals: mathematical modeling and search // *Acta Mechanica*. 2011. V. 220. № 14. P. 199–207.
20. Kochaev A.I., Brazhe R.A. Mathematical modeling of elastic wave propagation in crystals: 3D-wave surfaces // *Acta Mechanica*. 2011. V. 222. № 1–2. P. 193–198.
21. Santos E.J.G., Kaxiras E. Electric-field dependence of the effective dielectric constant in graphene // *Nano Letters: ACS Publications*. 2013. V. 13. P. 898–902.
22. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
23. Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov [et al.] // *Science*. 2004. V. 306. P. 666–669.
24. Ong M.T., Reed E.J. Engineered piezoelectricity in graphene // *ACS Nano*. 2012. V. 6. № 2. P. 1387–1394.
25. Браже Р.А., Садулин В.В. Контактные электрогидродинамические волны свободных носителей заряда на границе раздела двух полупроводниковых слоев // *Известия вузов. Радиофизика*. 1997. Т. 40. № 9. С. 1164–1171.
26. Браже Р.А. Внутренние волны свободных носителей заряда в полупроводниках // *Известия вузов. Радиофизика*. 1997. Т. 40. № 3. С. 370–377.
27. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Волновое распространение внутренних электрогидродинамических волн в гетеропереходах // *Известия вузов. Радиофизика*. 2000. Т. 63. № 5. С. 452–455.
28. Браже Р.А., Новикова Т.А. Взаимодействие контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках с токами // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 1–4.

Nanoscale piezoelectric transducers for elastic waves of terahertz range excitation in graphene-like 2D-suprakristals

R.A. Brazhe, A.I. Kochaev, A.A. Sovetkin

The opportunity for elastic waves of terahertz range excitation in graphene and graphene-like 2D-suprakristals is demonstrated. As the piezoelectric transducer which is in acoustic contact with a sound wire it is recommended to use its own end perforated by the holes of a certain form, size and orientation. The given calculations show that production of similar piezoelectric transducers corresponds to opportunities of modern nanotechnology.

Keywords: graphene, graphene-like 2D-suprakristals, piezoelectric transducer, elastic wave, transformation efficiency.
