

Низкотемпературные электрические свойства CVD графена на LiNbO_3 : акустические исследования

© И.Л. Дричко¹, И.Ю. Смирнов^{1,¶}, Ю.М. Гальперин^{1,2}, П.А. Дементьев¹, М.Г. Рыбин³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Department of Physics, University of Oslo, P. O. Box 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

¶ E-mail: ivan.smirnov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30 августа 2021 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2021 г.

Принята к публикации 8 сентября 2021 г.

Акустические бесконтактные методы были использованы для определения электрических параметров — электропроводности, подвижности носителей тока и их концентрации в однослойном графене — высаженном на поверхность ниобата лития.

Ключевые слова: графен, акустоэлектронные эффекты, низкие температуры, высокочастотный магнетотранспорт.

DOI: 10.21883/FTP.2022.01.51822.9733

1. Введение

Графен — уникальный двумерный материал XXI века. Основным его преимуществом является рекордная подвижность зарядов, обусловленная наличием свободного электрона на p -орбитали, который делокализован по всему графеновому монослою и может двигаться с большой скоростью как безмассовый фермион. Именно благодаря этому уникальному свойству графена ему предрекали большое будущее для применений в нанoeлектронике. Однако на практике оказалось, что достичь рекордно высоких значений подвижности зарядов в графене достаточно сложно, а тем более сделать образцы, воспроизводимые в промышленном масштабе. Качество графена и его возможность использования в нанoeлектронике зачастую характеризуется подвижностью носителей тока в этом материале. Таким образом, задача контроля качества посредством анализа подвижности зарядов в графене весьма актуальна. Самые высокие значения подвижности носителей зарядов, до $10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, были достигнуты в свободно подвешенном квазинейтральном графене, полученным методом эпитаксиального роста на карбиде кремния в вакууме при низких температурах [1]. Однако данный метод получения графена плохо масштабируем и является дорогостоящим. Для массового коммерческого синтеза графена используется метод химического газофазного осаждения графена на поверхности медной фольги (Chemical Vapor Deposition, CVD). Этот метод проще в реализации и экономичнее эпитаксиального роста. Подвижность зарядов в графене, полученном CVD-методом, ниже, но тоже может быть высокой при определенных условиях и достигать до $3.5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [2].

Для оптимизации материала очень важно иметь достоверную методику измерения подвижности. Наиболее популярный подход для измерения подвижности зарядов — это изготовление полевого транзистора с графеновым каналом [3]. Этот метод позволяет провести измерения с высокой точностью, но подготовка к измерениям требует больших усилий, а именно литографии и травления графена, а также напыления металлических контактов на графен. Другой метод — 4-контактный, по Ван дер Пау в магнитном поле [4] — является альтернативным вариантом измерения подвижности. Однако приведение зондов в контакт к образцу может привести к повреждению последнего.

Третьим методом измерения подвижности является терагерцовая спектроскопия [5]. Это — бесконтактный метод, позволяющий определить подвижность зарядов в графене. Метод интересен тем, что позволяет исследовать распределение проводимости и подвижности по поверхности образца. Однако чувствительность метода относительно невелика ($\sigma < 0.1 \text{ мСм}$).

В настоящей работе мы используем бесконтактный метод измерения подвижности зарядов в графене при низких температурах с помощью анализа распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) вдоль границы раздела пьезодиэлектрика (LiNbO_3) и графена. Одновременное измерение скорости и затухания ПАВ позволяет определить комплексный кондактанс графена на частоте ПАВ (см., например, обзор [6]).

В данной работе демонстрируются результаты измерения двух образцов графена, полученных методом химического газофазного осаждения на поверхности медной фольги, и перенесенного на пьезодиэлектрик LiNbO_3 . С помощью указанной выше методики [6]

были изучены электрофизические свойства графена и вычислена подвижность носителей заряда в нем. В работе использовались образцы графена, отличающиеся морфологией поверхности, которая обусловлена особенностями синтеза графена и возможностью контролировать процесс с большой точностью. Образцы отличаются температурой медной фольги во время синтеза, а именно, различия в температуре на $10\text{--}20^\circ\text{C}$ между образцами приводят к возникновению различного количества зерен в поликристаллическом образце графена и, как следствие, различному рассеянию зарядов на их границах. В работе подробно описана методика проведения измерений и описаны различия в электрофизических параметрах образцов с различной морфологией поверхности.

2. Образцы и методика эксперимента

В данной работе исследовались два образца графена, полученные методом химического газофазного осаждения на поверхность медной фольги из смеси газов аргона, водорода и метана при температуре 850°C и пониженном давлении 100 мбар. Основной отличительной особенностью метода синтеза графена является способ нагрева медной фольги прямым пропусканием тока через нее. Таким способом можно контролировать скорость нагрева и охлаждения с большой точностью, а температура измеряется пирометром через смотровое окно в вакуумной камере. Подробнее о методе синтеза написано в работах [7,8]. К минусам данного метода можно отнести возникновение небольшого градиента температуры медной фольги в $10\text{--}20^\circ\text{C}$ на расстоянии 10 мм (в образце размером 20×20 мм температура колеблется от 850°C в центре образца до 830°C на краях образца). В работе использовался один синтезированный образец размером 20×20 мм, поделенный на несколько частей с размером 7×10 мм, две из которых были перенесены на пьезоэлектрик (ниобат лития). В данной работе образец 1 имел пониженную температуру во время синтеза, равную 830°C , а образец 2 при синтезе имел температуру 850°C . Оба образца графена с медной фольги были перенесены на поверхность ниобата лития стандартным методом „мокрого“ переноса с использованием полиметилметакрилата в качестве поддерживающего полимера и аммония персульфата в качестве травителя для меди.

Пьезоэлектрические свойства и высокое качество кристаллов LiNbO_3 дают существенные преимущества для исследования двумерных и квазидвумерных материалов. А именно, сильный пьезоэлектрический эффект LiNbO_3 позволяет использовать переменные электрические поля, генерируемые поверхностной акустической волной (ПАВ) при ее распространении по пьезокристаллу и проникающие в низкоразмерную систему, помещенную на его поверхности [9]. В результате поглощение, Γ , и скорость, v , ПАВ зависят от электрических характери-

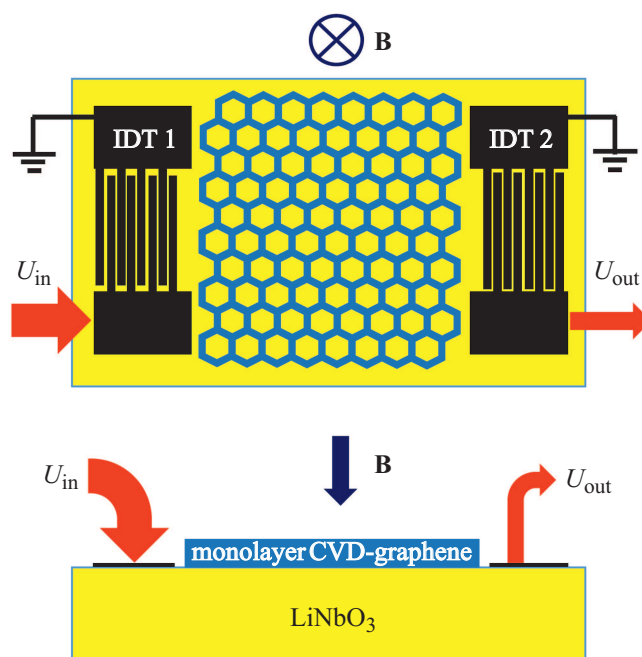


Рис. 1. Схема акустического эксперимента. U_{in} и U_{out} — входной и выходной сигналы, B — магнитное поле.

стик поверхностного слоя и могут быть использованы для количественного определения последних. В этом и состоит главная идея акустического метода анализа низкоразмерных материалов, используемого нами применительно к различным системам (для обзора см., например, [6]).

Три кардинальных преимущества делают указанную методику весьма перспективной.

(1) Метод не требует электрических контактов, и поэтому результаты от них не зависят.

(2) Электронные вклады в поглощение и скорость ПАВ зависят от магнитного поля, и эти зависимости позволяют отделить электронные вклады от решеточных вкладов.

(3) Связь между динамической высокочастотной (ВЧ) проводимостью, поглощением и скоростью звука содержит величины, непосредственно измеряемые экспериментально.

Для данного эксперимента однослойная пленка графена была высажена на полированную поверхность ниобата лития, на которой предварительно были сформированы преобразователи IDT 1 и IDT 2 (из золота) для генерации и приема поверхностных акустических волн. Рис. 1 демонстрирует схему эксперимента. Частоты ПАВ были 28, 85, 140, 197 и 252 МГц (нечетные гармоники основной частоты преобразователя 28 МГц). Держатель с образцом помещался в криостат со сверхпроводящим магнитом и охлаждался до температур 1.7–4.2 К. В эксперименте измерялись поглощение и изменение скорости ПАВ разных частот в зависимости от магнитного поля до 8 Тл.

Поглощение и изменение скорости распространения ПАВ определяются суммой двух вкладов, обусловленных кристаллической решеткой и носителями заряда. Поскольку решеточные вклады в немагнитных материалах не зависят от магнитного поля, для разделения этих вкладов естественно использовать зависимости акустических характеристик от магнитного поля.

В линейном по амплитуде ПАВ приближении вклады носителей заряда определяются комплексным динамическим кондактансом, $\sigma(\omega, \mathbf{k}) \equiv \sigma_1(\omega, \mathbf{k}) - i\sigma_2(\omega, \mathbf{k})$, который в общем случае зависит от частоты ПАВ ω , и его волнового вектора \mathbf{k} . Связь между характеристиками распространения ПАВ и кондактансом имеет вид (см., например, [6]):

$$\Gamma = k \cdot (K^2/2) \cdot (\sigma_1/\sigma_M) / [(1 + \sigma_2/\sigma_M)^2 + (\sigma_1/\sigma_M)^2], \quad (1)$$

$$\Delta v/v = (K^2/2) \cdot ((1 + \sigma_2/\sigma_M) / [(1 + \sigma_2/\sigma_M)^2 + (\sigma_1/\sigma_M)^2]).$$

Здесь $k \equiv |\mathbf{k}|$, $K^2/2 = 2.25 \cdot 10^{-2}$ — электромеханическая константа ниобата лития, $\sigma_{1,2}$ — вещественная и мнимая части динамической проводимости $\sigma(\omega)$ на квадрат (кондактанса); $\sigma_M = v_0 \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_{gr})$, v_0 — скорость ПАВ при $B = 0$; $\varepsilon_1, \varepsilon_{gr}$ — диэлектрические постоянные ниобата лития и графена соответственно. При расчетах мы использовали величины $\varepsilon_1 = 50$, $\varepsilon_{gr} = 6.9$ [10].

Из измеренных одновременно поглощения и изменения скорости ПАВ можно вычислить комплексный кондактанс графена, $\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) - i\sigma_2(\omega)$. Из анализа этих величин следует, что σ_1 и σ_2 слабо зависят от частоты во всей изученной области частот, причем $\sigma_2(\omega) \ll \sigma_1(\omega)$. Такое соотношение свидетельствует в пользу металлического характера проводимости слоя графена, причем динамический кондактанс $\sigma_1(\omega)$ близок к статическому кондактансу $\sigma(B) \equiv \sigma_{xx}(\omega = 0, B)$.

Следует отметить, что в изученной системе графеновый слой является поликристаллическим материалом с заметным рассеянием электронов на границах зерен. Об этом свидетельствует, в частности, измеренная величина проводимости. Мы предполагаем, что такой материал уже не характеризуется дираковскими конусами, а скорее может быть охарактеризован как система электронов проводимости с концентрацией n и квадратичным спектром при эффективной массе m^* и временем релаксации импульса τ .

В некантованном магнитном поле проводимость такого поверхностного слоя определяется формулой

$$\sigma(B) = \sigma_0 / [1 + (\omega_c \tau)^2], \quad (2)$$

где σ_0 — проводимость в отсутствие магнитного поля, ω_c — циклотронная частота. Если воспользоваться формулой Друде для электронов с изотропным квадратичным спектром, то $\omega_c = eB/m^*c$, где c — скорость света. В сильном магнитном поле, когда выполняется условие

$$(\omega_c \tau)^2 = (\mu B/c)^2 \gg 1, \quad (3)$$

где μ — подвижность носителей заряда, $\sigma(B) \sim B^{-2}$. Если построить зависимость экспериментально определенной проводимости от $1/B^2$, и она окажется линейной, то из этой линейной зависимости можно определить наклон A и отношение

$$\mu^2/c^2 = \sigma_0/A. \quad (4)$$

Если взять точку на экспериментальной кривой $\sigma(B)$, где не выполняется условие сильного поля (3), то после несложных вычислений получим

$$\sigma(0) = \sigma(B) / [1 - \sigma(B) \cdot B^2/A]. \quad (5)$$

Таким образом, нахождение электронных характеристик акустическими методами сводится к следующему:

- 1) построение экспериментальной зависимости $\sigma(1/B^2)$ в области сильных магнитных полей, вычисление наклона A линейной зависимости $\sigma = A/B^2$;
- 2) определение $\sigma(0)$ по формуле (5);
- 3) определение подвижности по формуле (4) и концентрации тока по формуле

$$n = \sigma(0)/e\mu. \quad (6)$$

Этот способ определения характеристик графена является весьма приближенным, так как длину пленки графена (~ 7 мм) мы знаем лишь приблизительно. Кроме того, на точность влияет ограниченная воспроизводимость результатов разных экспериментов на одном и том же образце.

3. Экспериментальные результаты

В работе были изучены 2 образца, с однослойным CVD графеном, высаженным на поверхность ниобата лития одним и тем же способом, описанным выше. Однако характеристики образцов заметно различаются. Измерения поглощения Γ и $\Delta v/v$ проводились в интервале температур (1.7–4.2) К, в частотном диапазоне (28–300) МГц в магнитных полях до 8 Тл. Температурное изменение Γ и $\Delta v/v$ в нулевом магнитном поле было исследовано для образца 2 на частотах 30 и 140 МГц.

3.1. Поглощение ПАВ при $B = 0$

В образце 1 уже при комнатной температуре наблюдается большое поглощение ПАВ, ~ 30 дБ/см, которое растет с понижением температуры.

В образце 2 при комнатной температуре коэффициент поглощения Γ , составляет ~ 15 дБ/см, и также возрастает с уменьшением температуры. На рис. 2 представлены зависимости поглощения и изменения скорости ПАВ в отсутствие магнитного поля в образце 2.

На рис. 3 представлены зависимости $\Delta\Gamma = \Gamma(4.2 \text{ К}) - \Gamma(300 \text{ К})$ и $\Delta v/v$ от B для образца 1.

Как видно из рисунка, величина электронного поглощения ПАВ для образца 1 в магнитном поле 8 Тл очень

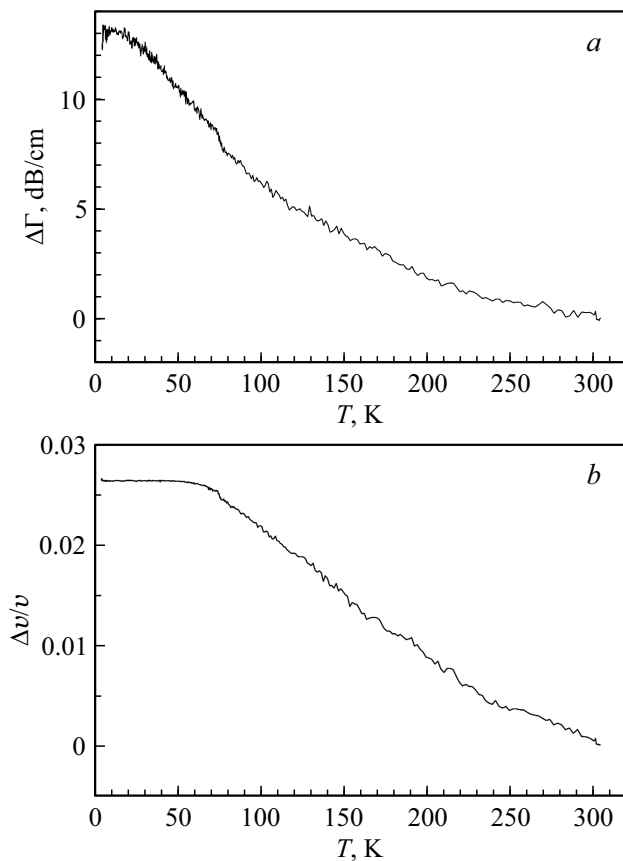


Рис. 2. Зависимость (а) коэффициента поглощения $\Delta\Gamma$ и (б) $\Delta\nu/\nu$ от температуры T ; $f = 30$ МГц, $B = 0$ Тл.

мала и не превышает величины 1.2 дБ/см, а скорость ПАВ практически не зависит от B . Значения Γ и $\Delta\nu/\nu$ для образца 2 значительно больше по величине, чем для образца 1.

Для определения электрических характеристик применяем методику обработки экспериментальных результатов, описанную выше.

Образец 1

На рис. 4,а представлена зависимость экспериментально определенной σ_1 от $1/B^2$. В области магнитных полей 8–5 Тл эта зависимость является линейной с наклоном $d\sigma/d(1/B^2) = 4 \cdot 10^{18}$ (σ — в единицах СГС, а B — в Гс).

Для образца 1 с использованием формул (4)–(6) были получены следующие характеристики: $\sigma(B=0) = 0.013 \text{ Ом}^{-1}$, $\mu = 5.4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 4,б представлены зависимости экспериментально определенной проводимости от магнитного поля (черная) и вычисленной по формуле (2) (красная) с величинами, указанными выше. Видно, что красная кривая хорошо описывает эксперимент.

Образец 2

На рис. 5,а представлена экспериментальная зависимость σ_1 от $1/B^2$. В области магнитных полей 8–2 Тл зависимость линейная с наклоном в $d\sigma/d(1/B^2) = 4.9 \cdot 10^{17}$ (σ — в единицах СГС, а B — в Гс).

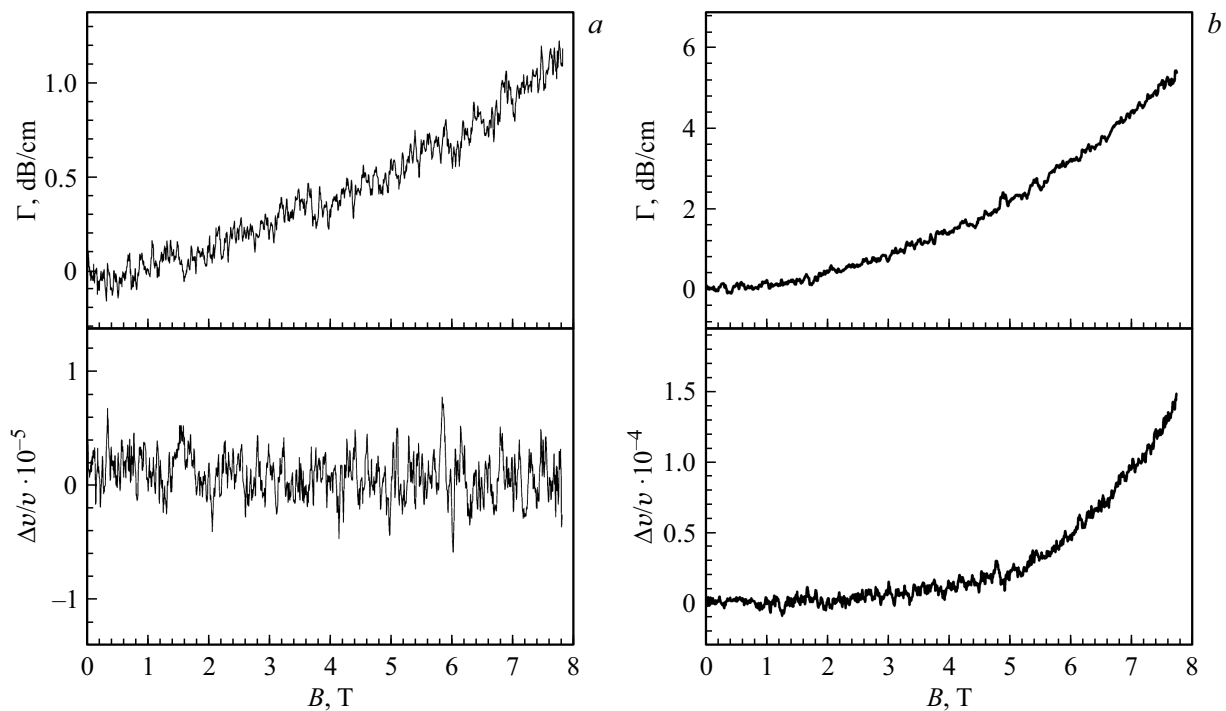


Рис. 3. а — зависимость Γ и $\Delta\nu/\nu$ от магнитного поля B ; $f = 140$ МГц, $T = 1.7$ К; образец 1. б — зависимость Γ и $\Delta\nu/\nu$ от магнитного поля B ; $f = 85$ МГц, $T = 1.7$ К; образец 2.

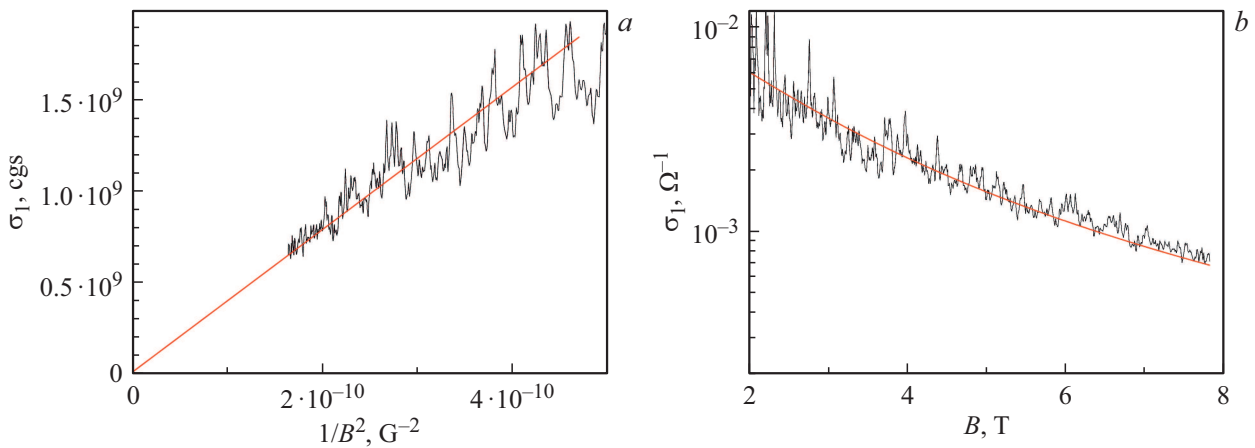


Рис. 4. *a* — зависимость σ_1 (СГС) от $1/B^2$ ($\text{Г} \cdot \text{с}^{-2}$); *b* — зависимость σ_1 (Ом^{-1}) от B (Тл) для образца 1, $f = 140$ МГц, $T = 1.7$ К.

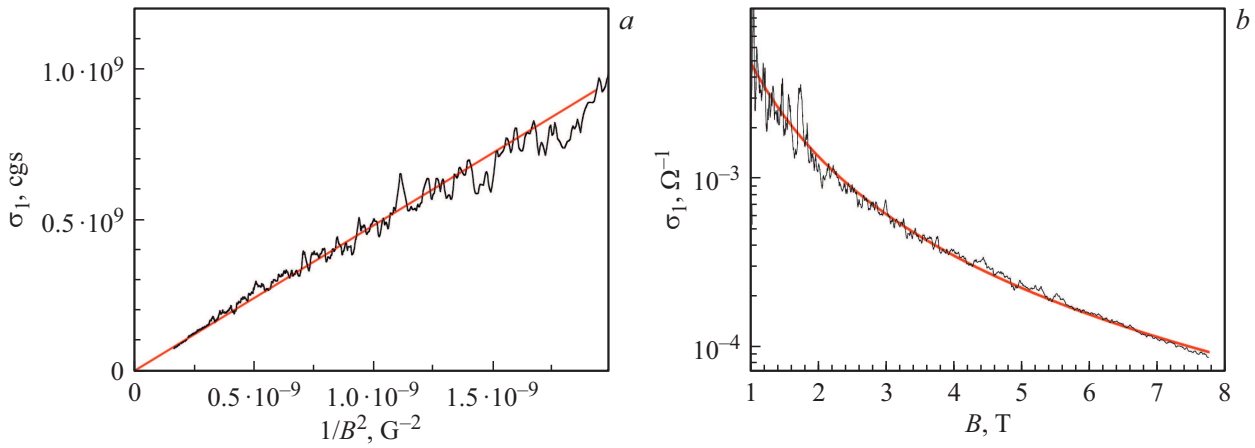


Рис. 5. *a* — зависимость σ_1 (СГС) от $1/B^2$ (Гс^{-2}); *b* — зависимость σ_1 (Ом^{-1}) от B (Тл) для образца 2, $f = 85$ МГц, $T = 1.7$ К.

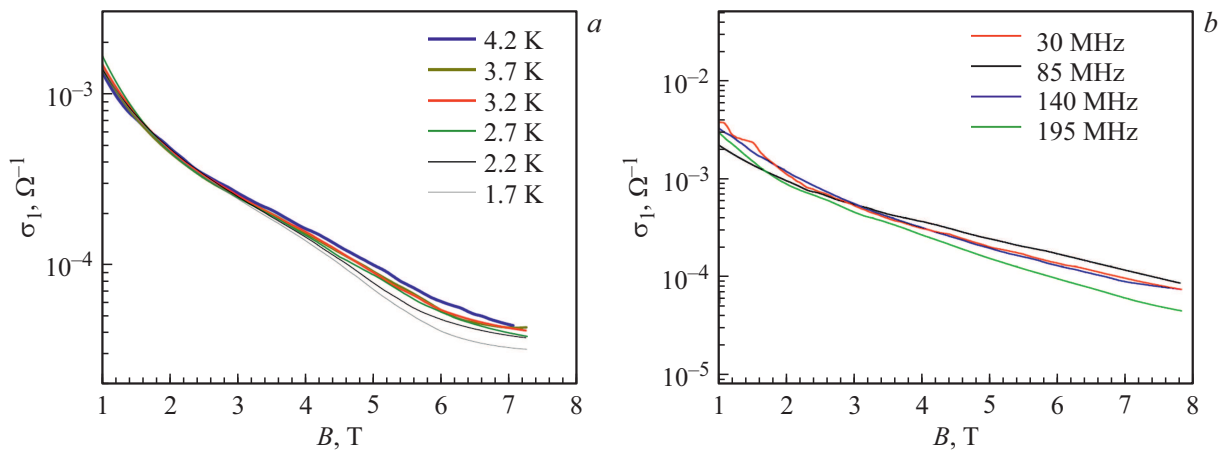


Рис. 6. *a* — зависимость σ_1 от магнитного поля B при разных температурах, $f = 140$ МГц; *b* — зависимость σ_1 от B для разных частот ПАВ при $T = 1.7$ К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

Для образца 2 с использованием формул (4)–(6) были получены следующие характеристики (1.7 К, 85 МГц):

$$\sigma(B=0) = 0.043 \text{ Ом}^{-1}, \quad \mu = 2.8 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с},$$

$$n = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

На рис. 5, *b* представлены экспериментальная зависимость проводимости от магнитного поля (черная) и вычисленная (красная) по формуле (2) с величинами, определенными описанным выше методом. Видно, что красная кривая с этими параметрами хорошо описывает эксперимент.

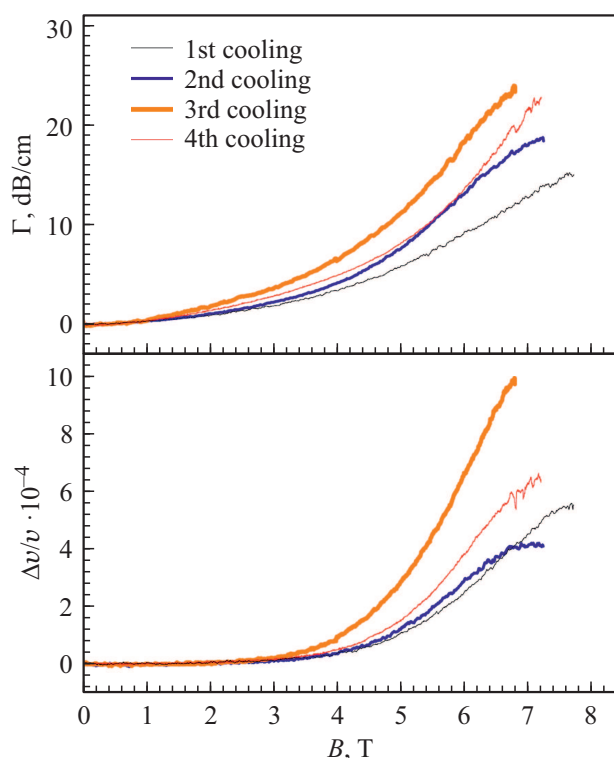


Рис. 7. Зависимость Γ и $\Delta\nu/\nu$ от магнитного поля B ; $f = 140$ МГц, $T = 1.7$ К в разных циклах охлаждения.

Рис. 6 иллюстрирует экспериментальные зависимости проводимости σ_1 от магнитного поля B при разных температурах, измеренные на частоте $f = 140$ МГц (*a*), и зависимости σ_1 от B для разных частот ПАВ при $T = 1.7$ К (*b*).

Из рисунков видно, что проводимость слабо зависит от T и f , причем средние величины для температурной зависимости в магнитном поле 7 Тл равны $\sigma_1 = (4.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$, а для частотной зависимости $\sigma_1 = (7.6 \pm 1.0) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$ в пределах погрешности измерений. Однако видно, что средние величины отличаются почти в 2 раза. Дело в том, что измерения температурной зависимости проводились в один день (в одном цикле охлаждения), а частотные зависимости — в разные дни (в разных циклах охлаждения).

Нами было установлено, что при каждом новом цикле охлаждения образца графена, высаженного на ниобат лития, зависимости величин поглощения и изменения скорости звука от магнитного поля не воспроизводились. Это показано на рис. 7 для $f = 140$ МГц и $T = 1.7$ К.

Расчет по формулам (3)–(5) показал, что проводимость $\sigma(0)$, определенная из этих кривых, находится в пределах от $4 \cdot 10^{-3}$ до $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$, подвижность μ в пределах $9.4 \cdot 10^3$ до $1.8 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а концентрация n от $2 \cdot 10^{12}$ до $4.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

3.2. Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

Образцы были исследованы методами атомно-силовой и кельвин-зонд микроскопии. Основное внимание было обращено на области относительно большого (30×30 мкм) размера. Типичные изображения для образцов 1 и 2 приведены на рис. 8.

Хорошо заметно, что образец 1 покрыт большим количеством линейных дефектов, которые, вероятнее всего, представляют собой складки графена, возникшие после циклов охлаждения и нагревания образца. На образце 2 такие особенности также присутствуют, однако в заметно меньшем количестве. Указанное различие между

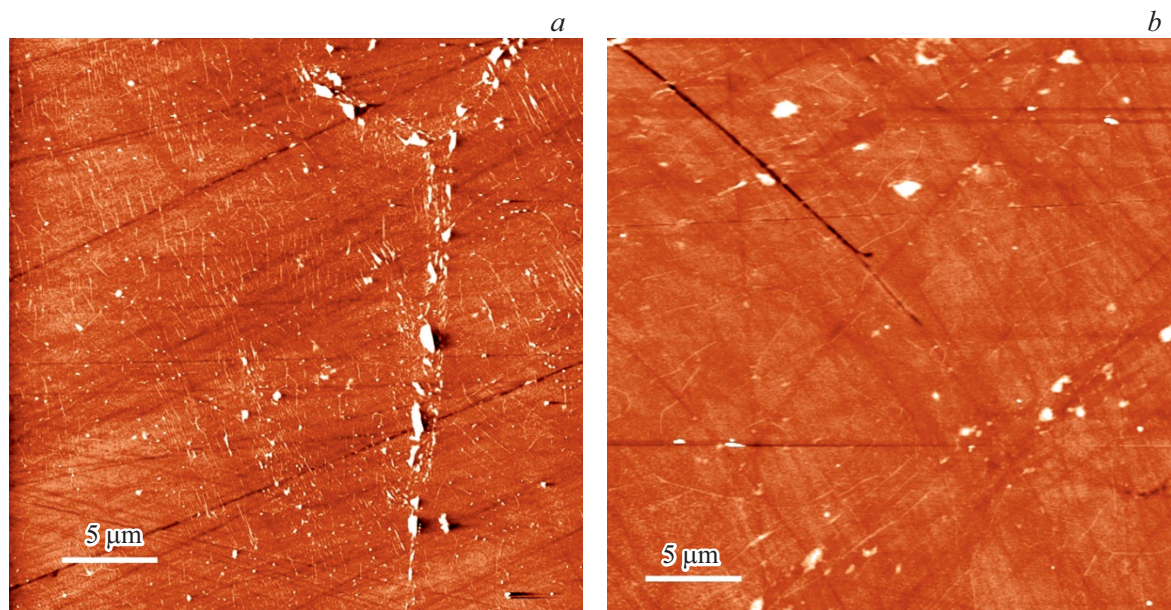


Рис. 8. Топография областей 30×30 мкм для образца 1 (*a*) и образца 2 (*b*).

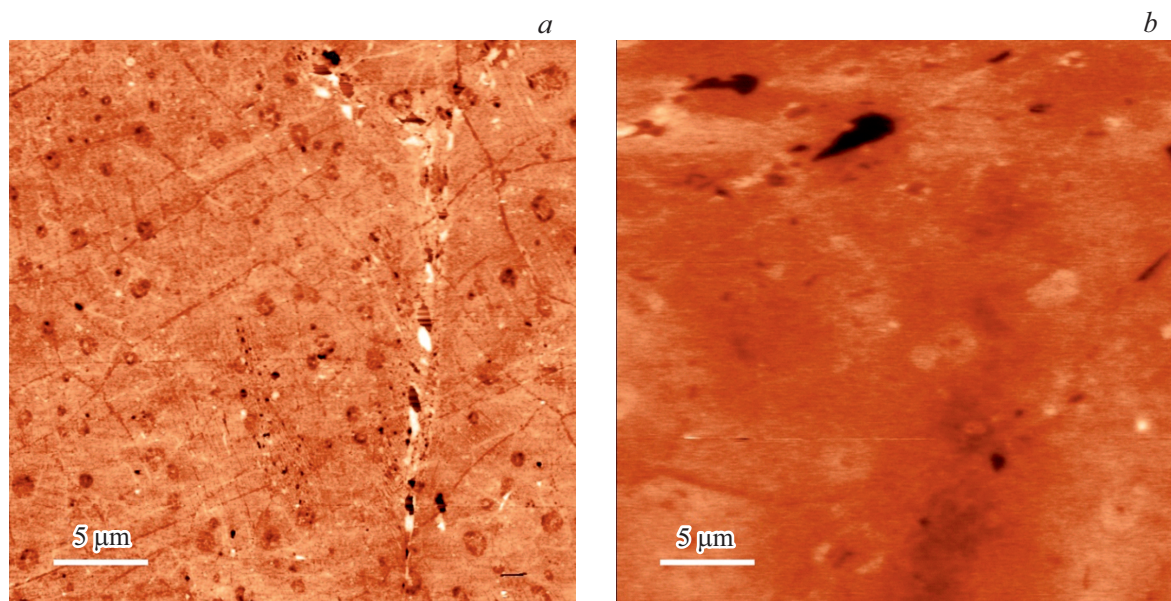


Рис. 9. Распределение поверхностного потенциала областей 30×30 мкм для образца 1 (a) и образца 2 (b). Более темным оттенкам цвета соответствуют более низкие значения поверхностного потенциала.

образцами еще более заметно в картинах распределения потенциала (рис. 9).

Видно, что на образце 1 наблюдаются два типа дефектов. Протяженные, связанные в единую сеть особенности, вероятно, соответствуют границам зерен поликристаллического графена. Кроме того, наблюдаются округлые особенности, которые мы ассоциируем с островками второго слоя графена. Отметим, что большая часть линейных объектов, наблюдаемых на изображении топографии, не отображается в распределении поверхностного потенциала.

Распределение потенциала на образце 2 гораздо более равномерно. Наблюдаются несколько областей с пониженным потенциалом, которые мы также связываем с островками второго слоя графена. Наблюдаемый в верхней части каплевидный дефект соответствует разрыву в графеновой пленке.

4. Обсуждение результатов

Начнем обсуждение результатов с зависимости коэффициента поглощения ПАВ Γ от температуры при $B = 0$. В работе [8] указывалось, что для однослойного нелегированного графена, высаженного на SiO_2/Si , сопротивление при комнатной температуре в отсутствие магнитного поля было порядка 300–1000 Ом на квадрат. При таком сопротивлении поглощение ПАВ носителями тока очень мало, $\Gamma < 1$ дБ/см, поэтому наблюдаемое в эксперименте большое поглощение ПАВ и его слабая зависимость от температуры указывают, скорее всего, на поглощение (рассеяние) ПАВ структурными дефектами в поликристаллической пленке графена. Поглощение в образце 1 было гораздо больше, чем в образце 2, что,

по-видимому, связано с тем, что дефектов в образце 1 гораздо больше, чем во втором. Это подтверждается результатами по исследованию образцов методами атомно-силовой и кельвин-зонд микроскопии при комнатной температуре.

Как видно из рис. 8 и 9, на образце 1 хорошо визуализируются отдельные зерна графена в составе поликристаллической пленки. Кроме того, на поверхности наблюдаются складки, возникшие в процессе последовательных процессов охлаждения и нагрева образца. Несмотря на такую же поликристаллическую природу образца 2, на нем границ зерен не наблюдается.

Мы полагаем, что рост поглощения (рассеяния) ПАВ при охлаждении образца связан с увеличением количества дефектов, например, появления разрывов в пленке, которые „залечиваются“ при нагревании образца после измерений. Рост же концентрации дефектов при охлаждении образцов происходит случайным образом, о чем свидетельствует рис. 7.

Зависимости σ_1 от магнитного поля, температуры и частоты свидетельствует о металлическом характере проводимости при низких температурах, причем в образце 1 с большим количеством дефектов подвижность носителей оказывается меньше, чем в образце 2. О металлическом характере проводимости свидетельствует также и соотношение $\sigma_1 > \sigma_2$.

Оказалось, что величины подвижности носителей заряда в графене (5400 и 28000 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), полученные бесконтактным акустическим методом, гораздо больше величин подвижности (1100–1500 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), полученных с помощью измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) графенового полевого транзистора (ГПТ), изготовленного из аналогичных образцов [11,12]. По-

видимому, это объясняется несколькими факторами. Во-первых, измерения вольт-амперных характеристик в ГПТ проводились при комнатной температуре. Во-вторых, подготовка этих измерений подразумевает многократную литографию и нанесение полимера, а также другие технологические манипуляции с образцами, что приводит к их деградации. В-третьих, при измерениях ВАХ в ГПТ происходит контакт графена с металлом, который может существенно изменить электронную структуру графена и внести вклад в подвижность его носителей заряда.

5. Заключение

Использование бесконтактных акустических методов при исследовании низкотемпературных электрических свойств однослойного CVD-графена, высаженного на поверхность ниобата лития, позволило определить его новые характеристики. Такими характеристиками являются изменение (увеличение) числа дефектов при охлаждении образцов от комнатной температуры до 4.2 К и случайность в образовании этих дефектов при разных циклах охлаждения. Последнее свойство выражалось в ограниченной воспроизводимости измеряемых поглощения и изменения скорости ПАВ. Наряду с определением электрических характеристик материала был установлен механизм низкотемпературной проводимости.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-02-00124.

Образцы графена были подготовлены в ИОФ РАН в рамках выполнения работ по гранту и за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10164.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Orlita, C. Faugeras, R. Grill, A. Wyszomolka, W. Strupinski, C. Berger, W.A. de Heer, G. Martinez, M. Potemski. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 216603 (2011).
- [2] L. Banszerus, M. Schmitz, S. Engels, J. Dauber, M. Oellers, F. Haupt, K. Watanabe, Takashi Taniguchi, Bern Beschoten, C. Stampfer. *Sci. Adv.*, **1**, e1500222 (2015).
- [3] Nianduan Lu, Lingfei Wang, Ling Li, Ming Liu. *Chinese Phys. B*, **26**, 036804 (2017).
- [4] Rui-Song Ma, Qing Huan, Liang-Mei Wu, Jia-Hao Yan, Yu-Yang Zhang, Li-Hong Bao, Yun-Qi Liu, Shi-Xuan Du, Hong-Jun Gao. *Chinese Phys. B*, **26**, 066801 (2017).
- [5] J.D. Buron, F. Pizzocchero, P.U. Jepsen, D.H. Petersen, J.M. Caridad, B.S. Jessen, T.J. Booth, P. Boggild. *Sci. Rep.*, **5**, 12305 (2015).
- [6] I.L. Drichko, I.Yu. Smirnov, A.V. Suslov, Y.M. Galperin, L.N. Pfeiffer, K.W. West. *Low Temperature Phys.*, **43**, 86 (2017); doi: 10.1063/1.4975107
- [7] M. Rybin, A. Pereyaslavtsev, T. Vasilieva, V. Myasnikov, I. Sokolov, A. Pavlova, E. Obratsova, A. Khomich, V. Ralchenko, E. Obratsova. *Carbon*, **96**, 196 (2016).
- [8] M.G. Rybin, V.R. Islamova, E.A. Obratsova, E.D. Obratsova. *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 033107 (2018).
- [9] A. Wixforth, J.P. Kotthaus, G. Weinmann. *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 2104 (1986).
- [10] J. Fang, W.G. Vandenberghe, M.V. Fischetti. *Phys. Rev. B*, **94**, 045318 (2016).
- [11] Y. Matyushkin, S. Danilov, M. Moskotin, V. Belosevich, N. Kaurova, M. Rybin, E.D. Obratsova, G. Fedorov, I. Gorbenko, V. Kachorovskii, S. Ganichev. *Nano Lett.*, **20**, 7296 (2020).
- [12] A. Gayduchenko, G.E. Fedorov, M.V. Moskotin, D.I. Yagodka, S.V. Seliverstov, G.N. Goltsman, A.Yu. Kuntsevich, M.G. Rybin, E.D. Obratsova, V.G. Leiman, M.S. Shur, T. Otsuji, V.I. Ryzhii. *Nanotechnology*, **29**, 245204 (2018).

Редактор Г.А. Оганесян

Low Temperature Electrical Properties of CVD Graphene on LiNbO_3 : Acoustic Studies

I.L. Drichko¹, I.Yu. Smirnov¹, Yu.M. Galperin^{1,2}, P.A. Dementev¹, M.G. Rybin³

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Department of Physics, University of Oslo,
P.O. Box 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway

³ Prokhorov General Physics Institute
of the Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract Contactless acoustic methods were used to determine electrical parameters — electrical conductivity, carrier mobility and their concentration — in single-layer graphene deposited on the surface of lithium niobate.