

# Низкотемпературные электрические свойства CVD графена на $\text{LiNbO}_3$ : акустические исследования

© И.Л. Дричко<sup>1</sup>, И.Ю. Смирнов<sup>1,¶</sup>, Ю.М. Гальперин<sup>1,2</sup>, П.А. Дементьев<sup>1</sup>, М.Г. Рыбин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Oslo, P. O. Box 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway

<sup>3</sup> 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 ( $\text{LiNbO}_3$ ) и графена. Одновременное измерение скорости и затухания ПАВ позволяет определить комплексный кондактанс графена на частоте ПАВ (см., например, обзор [6]).

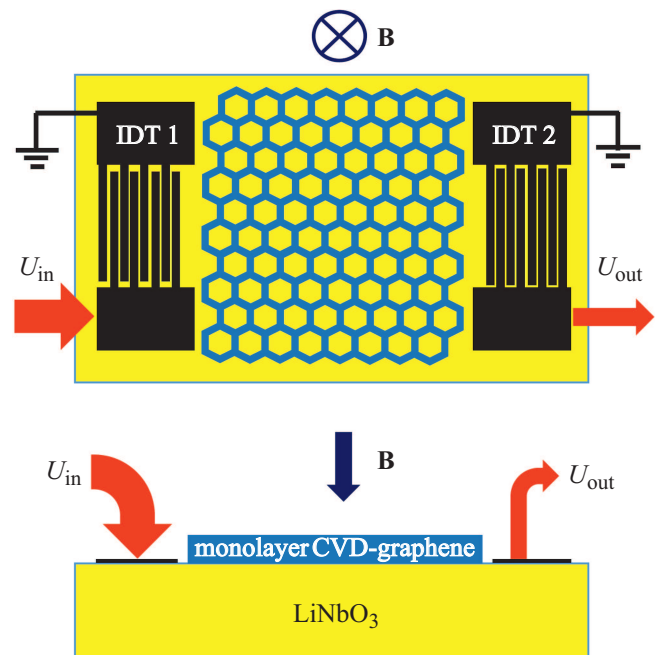
В данной работе демонстрируются результаты измерения двух образцов графена, полученных методом химического газофазного осаждения на поверхности медной фольги, и перенесенного на пьезодиэлектрик  $\text{LiNbO}_3$ . С помощью указанной выше методики [6]

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  $850^\circ\text{C}$  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  $20 \times 20$  мм температура колеблется от  $850^\circ\text{C}$  в центре образца до  $830^\circ\text{C}$  на краях образца). В работе использовался один синтезированный образец размером  $20 \times 20$  мм, поделенный на несколько частей с размером  $7 \times 10$  мм, две из которых были перенесены на пьезоэлектрик (ниобат лития). В данной работе образец 1 имел пониженную температуру во время синтеза, равную  $830^\circ\text{C}$ , а образец 2 при синтезе имел температуру  $850^\circ\text{C}$ . 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  $\text{LiNbO}_3$  дают существенные преимущества для исследования двумерных и квазидвумерных материалов. А именно, сильный пьезоэлектрический эффект  $\text{LiNbO}_3$  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,  $\Gamma$ , и скорость,  $v$ , ПАВ зависят от электрических характери-



**Рис. 1.** Схема акустического эксперимента.  $U_{in}$  и  $U_{out}$  — входной и выходной сигналы,  $\mathbf{B}$  — 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  $252\text{ МГц}$  (нечетные гармоники основной частоты преобразователя  $28\text{ МГц}$ ). Держатель с образцом помещался в криостат со сверхпроводящим магнитом и охлаждался до температур  $1.7\text{--}4.2\text{ К}$ . В эксперименте измерялись поглощение и изменение скорости ПАВ разных частот в зависимости от магнитного поля до  $8\text{ Тл}$ .

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  $\omega$ , 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  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  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  $\tau$ .

В некантованном магнитном поле проводимость такого поверхностного слоя определяется формулой

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

где  $\sigma_0$  — проводимость в отсутствие магнитного поля,  $\omega_c$  — 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  $\mu$  — 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 ( $\sim 7$  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  $\Gamma$  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  $\Gamma$  и  $\Delta v/v$  в нулевом магнитном поле было исследовано для образца 2 на частотах 30 и 140 МГц.

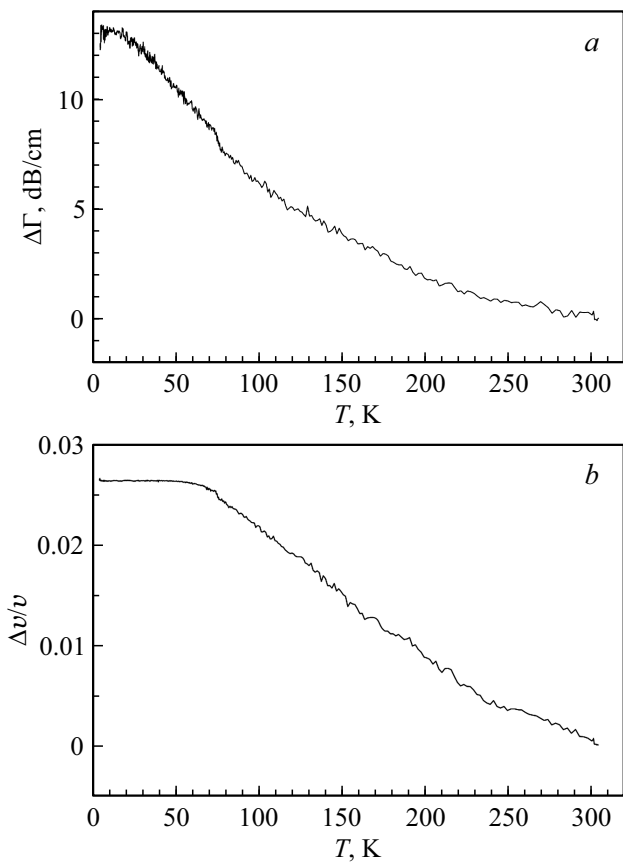
#### 3.1. Поглощение ПАВ при $B = 0$

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

В образце 2 при комнатной температуре коэффициент поглощения  $\Gamma$ , составляет  $\sim 15$  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 (b)  $\Delta v/v$  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  $\Gamma$  и  $\Delta v/v$  для образца 2 значительно больше по величине, чем для образца 1.

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

**Образец 1**

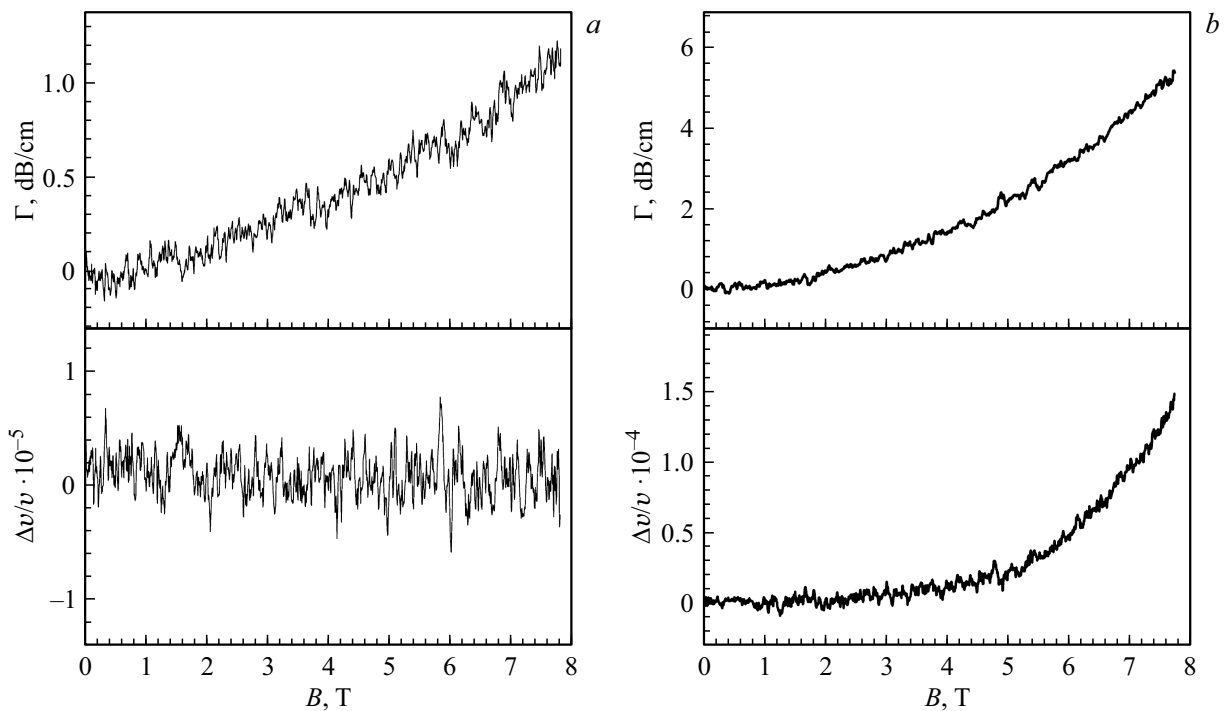
На рис. 4,а представлена зависимость экспериментально определенной  $\sigma_1$  от  $1/B^2$ . В области магнитных полей 8–5 Тл эта зависимость является линейной с наклоном  $d\sigma/d(1/B^2) = 4 \cdot 10^{18}$  ( $\sigma$  — в единицах СГС, а  $B$  — в Гс).

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, b 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  $\sigma_1$  от  $1/B^2$ . В области магнитных полей 8–2 Тл зависимость линейная с наклоном в  $d\sigma/d(1/B^2) = 4.9 \cdot 10^{17}$  ( $\sigma$  — в единицах СГС, а  $B$  — в Гс).



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

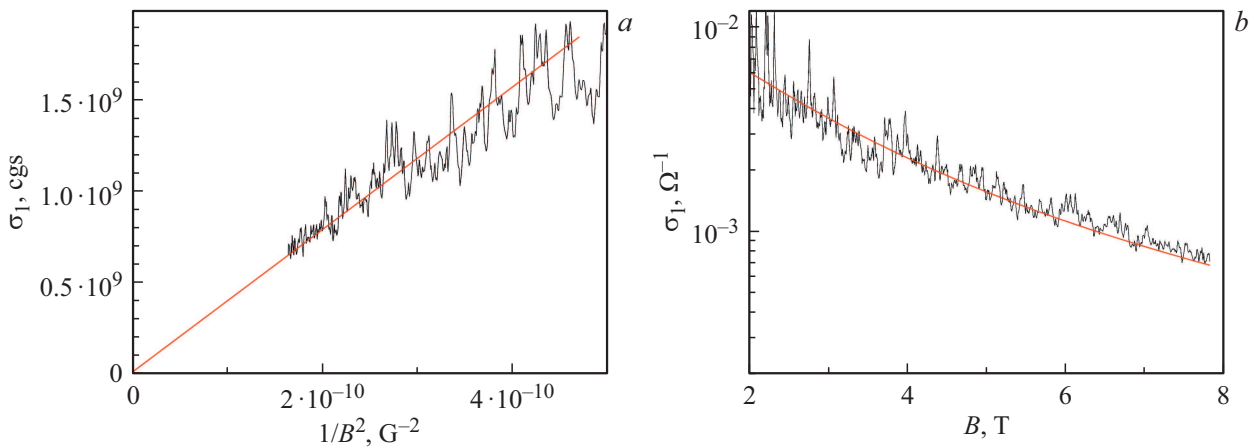


Рис. 4. *a* — зависимость  $\sigma_1$  (СГС) от  $1/B^2$  ( $\text{Г} \cdot \text{с}^{-2}$ ); *b* — зависимость  $\sigma_1$  ( $\text{Ом}^{-1}$ ) от  $B$  (Тл) для образца 1,  $f = 140$  МГц,  $T = 1.7$  К.

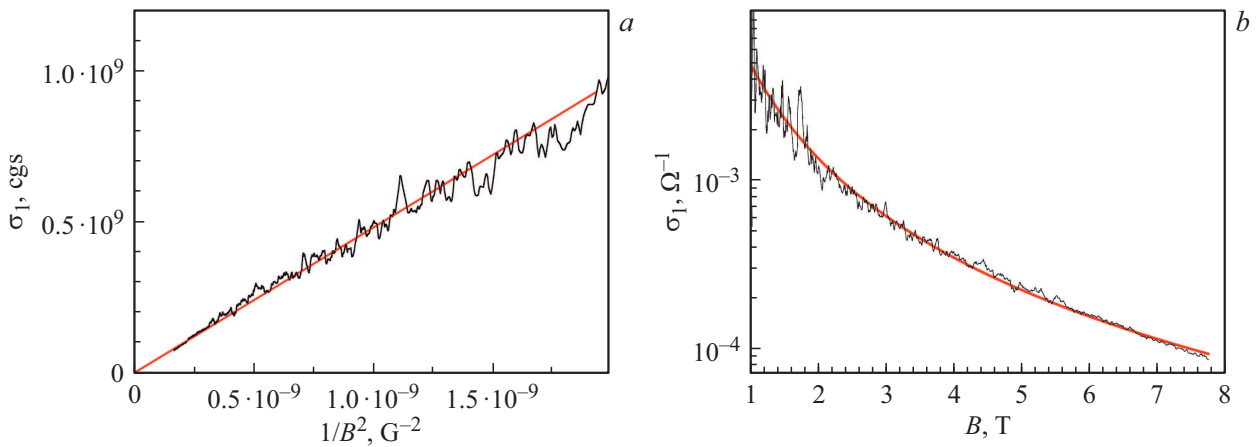


Рис. 5. *a* — зависимость  $\sigma_1$  (СГС) от  $1/B^2$  ( $\text{Гс}^{-2}$ ); *b* — зависимость  $\sigma_1$  ( $\text{Ом}^{-1}$ ) от  $B$  (Тл) для образца 2,  $f = 85$  МГц,  $T = 1.7$  К.

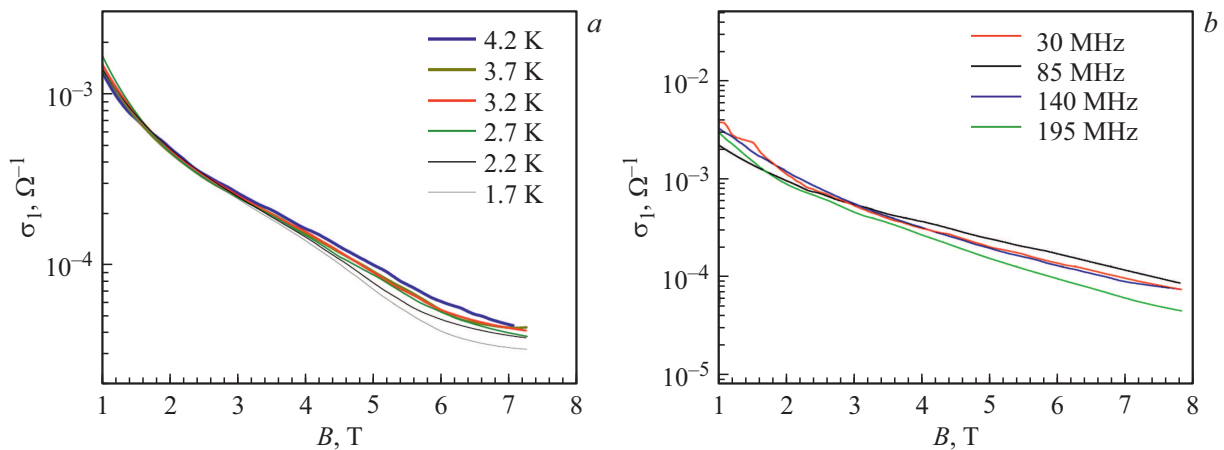


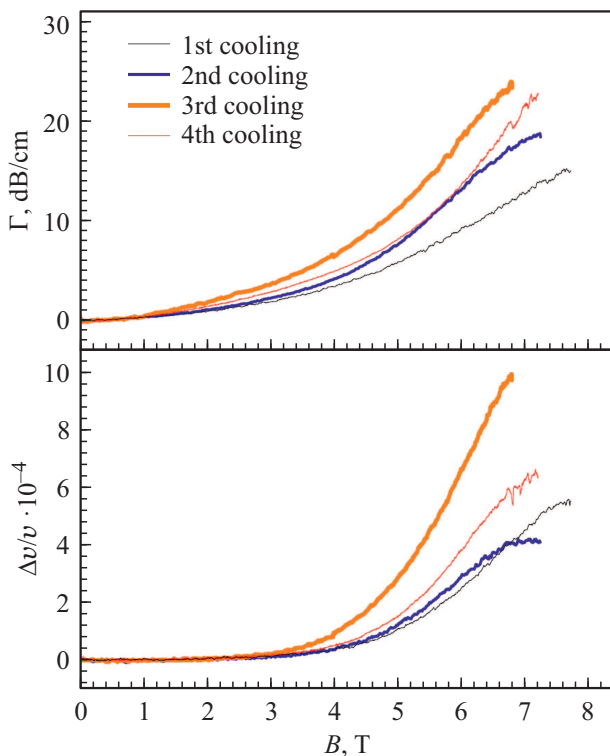
Рис. 6. *a* — зависимость  $\sigma_1$  от магнитного поля  $B$  при разных температурах,  $f = 140$  МГц; *b* — зависимость  $\sigma_1$  от  $B$  для разных частот ПАВ при  $T = 1.7$  К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

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

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

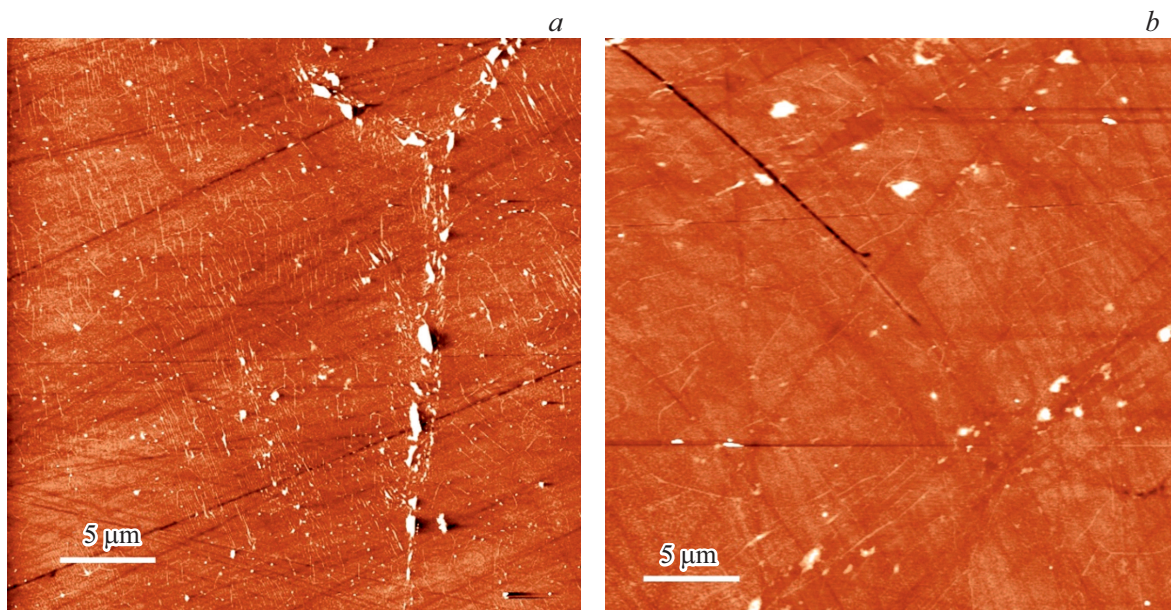
$$n = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

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  $\Gamma$  и  $\Delta v/v$  от магнитного поля  $B$ ;  $f = 140$  МГц,  $T = 1.7$  К в разных циклах охлаждения.

Рис. 6 иллюстрирует экспериментальные зависимости проводимости  $\sigma_1$  от магнитного поля  $B$  при разных температурах, измеренные на частоте  $f = 140$  МГц (а), и зависимости  $\sigma_1$  от  $B$  для разных частот ПАВ при  $T = 1.7$  К (б).



**Рис. 8.** Топография областей  $30 \times 30$  мкм для образца 1 (а) и образца 2 (б).

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).

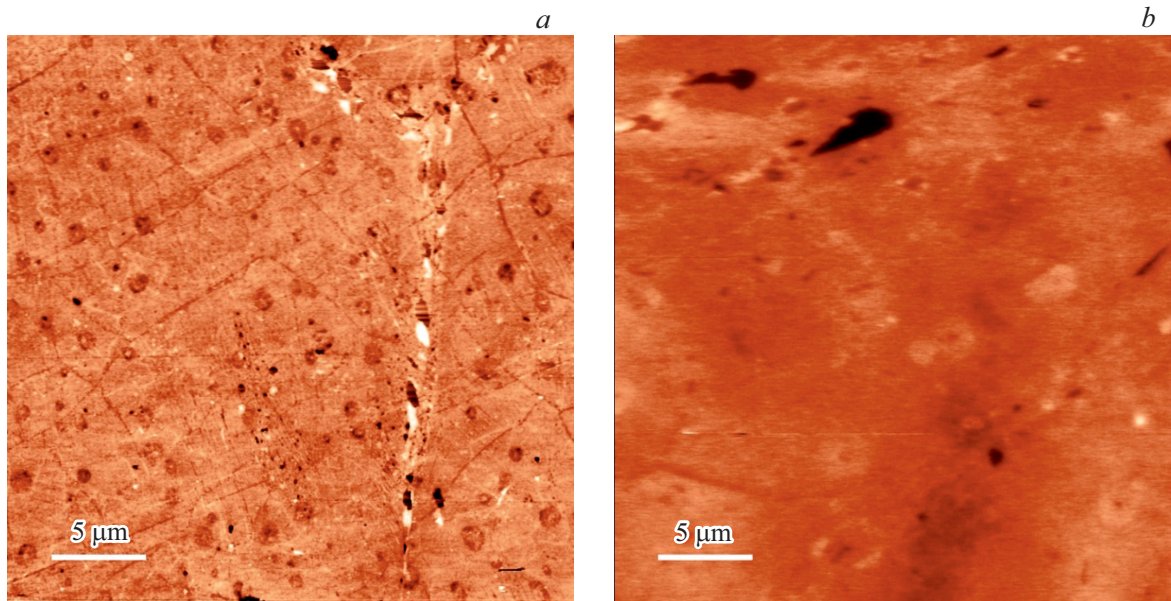
Нами было установлено, что при каждом новом цикле охлаждения образца графена, высаженного на ниобат лития, зависимости величин поглощения и изменения скорости звука от магнитного поля не воспроизводились. Это показано на рис. 7 для  $f = 140$  МГц и  $T = 1.7$  К.

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  $\mu$  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 ( $30 \times 30$  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. 9.** Распределение поверхностного потенциала областей  $30 \times 30$  мкм для образца 1 (а) и образца 2 (б). 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  $\Gamma$  от температуры при  $B = 0$ . В работе [8] указывалось, что для однослойного нелегированного графена, высаженного на  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , сопротивление при комнатной температуре в отсутствие магнитного поля было порядка  $300\text{--}1000$  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  $\sigma_1$  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 ( $1100\text{--}1500$   $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ), 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 выразалось 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. Obraztsova, A. Khomich, V. Ralchenko, E. Obraztsova. *Carbon*, **96**, 196 (2016).
- [8] M.G. Rybin, V.R. Islamova, E.A. Obraztsova, E.D. Obraztsova. *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. Obraztsova, G. Fedorov, I. Gorbunov, V. Kachorovskii, S. Ganichev. *Nano Lett.*, **20**, 7296 (2020).
- [12] A. Gayduchenko, G.E. Fedorov, M.V. Moskotin, D.I. Yagodkin, S.V. Seliverstov, G.N. Goltsman, A.Yu. Kuntsevich, M.G. Rybin, E.D. Obraztsova, 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 $\text{LiNbO}_3$ : Acoustic Studies

I.L. Drichko<sup>1</sup>, I.Yu. Smirnov<sup>1</sup>, Yu.M. Galperin<sup>1,2</sup>, P.A. Dementev<sup>1</sup>, M.G. Rybin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Oslo,  
P.O. Box 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway

<sup>3</sup> 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.