

10

Фотоотклик в мультислойном графене при прохождении поверхностной акустической волны

© О.В. Кононенко, Е.В. Емелин, В.Н. Матвеев, Д.В. Рошупкин

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия
E-mail: oleg@iptm.ru

Поступило в Редакцию 28 октября 2019 г.

В окончательной редакции 28 октября 2019 г.

Принято к публикации 28 ноября 2019 г.

Исследован фотоотклик в мультислойном графене на кристалле ниобата лития (LiNbO_3) в условиях приложенного к графену электрического потенциала и пропускания поверхностной акустической волны. Показано, что акустоэлектрический ток в графене при облучении светом либо возрастает, либо уменьшается в зависимости от полярности приложенного к графену потенциала. Поверхностная акустическая волна вызывает появление в графене периодической решетки зарядов, усиливающей взаимодействие с падающим светом, что приводит к увеличению фотоотклика.

Ключевые слова: графен, поверхностная акустическая волна, акустоэлектрический ток, фотоотклик.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.05.49102.18087

Акустоэлектронные устройства активно используются в качестве датчиков физических величин, принцип работы которых основан на изменении резонансных частот возбуждения акустических волн в конкретных физических условиях (давление, ускорение, температура, влажность и др.). Недавно в работах [1,2] сообщалось о датчиках влажности и газовых датчиках на основе оксида графена и графена, в которых использовались поверхностные акустические волны (ПАВ). В последнее время взаимодействие ПАВ с носителями заряда в графене вызывает интерес исследователей. Взаимодействие электрических зарядов и ПАВ приводит к появлению акустоэлектрического (АЭ) тока в графене [3–7]. Была также показана возможность управления акустической волной в условиях приложенного к пленке графена электрического потенциала [8] и продемонстрирован фотоотклик в графене и графеновых нанолентах в условиях протекания АЭ-тока [9,10]. В настоящей работе исследуется фотоотклик в пленке мультислойного графена в условиях приложения к пленке электрического потенциала различной полярности и взаимодействия с ПАВ.

Образцы для исследования фотоотклика изготавливались следующим образом. На поверхности YZ -среза кристалла LiNbO_3 для возбуждения и регистрации ПАВ с длиной волны $30 \mu\text{m}$ на резонансной частоте 114.7 MHz методом фотолитографии и электронно-лучевого осаждения были изготовлены алюминиевые встречно-штыревые преобразователи (ВШП). ВШП состояли из 50 пар штырей. Пленки графена были синтезированы методом химического парофазного осаждения при низком давлении с однократным напуском ацетилена. В качестве катализатора использовались пленки чистого никеля толщиной $0.3 \mu\text{m}$, напыленные на пластины окисленного кремния методом лазерного импульсного

осаждения. После синтеза на поверхность пленок никеля с выращенным графеном был нанесен слой полиметилметакрилата (PMMA) толщиной $0.8 \mu\text{m}$, который в дальнейшем служил поддерживающей пленкой для графена. Образцы погружались в однопроцентный водный раствор соляной кислоты для растворения никелевой пленки. В процессе травления графен вместе с поддерживающей пленкой PMMA отделялся от подложки. После полного растворения никеля графен с PMMA промывался в деионизованной воде и переносился на поверхность кристаллов LiNbO_3 между двумя ВШП. PMMA удалялся с поверхности графена растворением в ацетоне.

Для характеристики пленок графена использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния. Спектры измерялись в 8–10 разных точках на поверхности образцов с помощью рамановского микроскопа SENTERRA Bruker с длиной волны лазера 488 nm . Диаметр лазерного пучка был порядка $1 \mu\text{m}$. На рис. 1 приведен типичный спектр комбинационного рассеяния, полученный для графеновой пленки. В спектре видны четкие пики G и $2D$, указывающие на наличие графена. Слабый пик D свидетельствует о низком содержании дефектов. Отношение интенсивностей пиков $2D$ и G , равное 0.75 , и ширина на полувысоте пика $2D$, равная 65 cm^{-1} , указывают на то, что пленка содержит 3–4 монослоя графена.

Для исследования электрических свойств графена в условиях распространения ПАВ методом электронно-лучевой литографии на поверхности пленки графена были сформированы два платиновых электрода. Расстояние между электродами составляет $\sim 3 \text{ nm}$. Один электрод находился ближе к ВШП, генерирующему ПАВ, другой — дальше от него. Измерения проводились

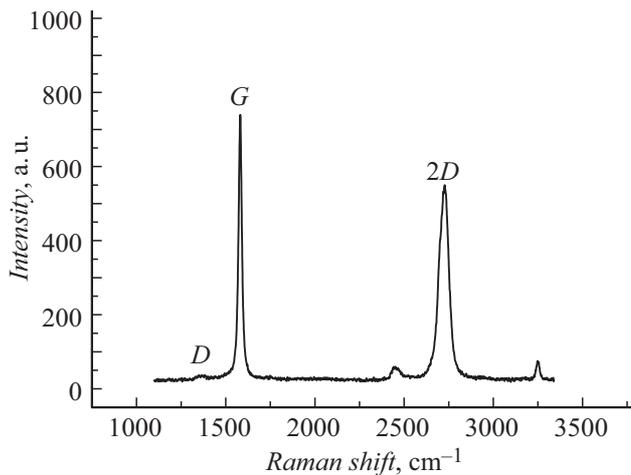


Рис. 1. Типичный спектр комбинационного рассеяния пленки графена, выращенной на пленке никелевого катализатора.

с помощью источника-измерителя Keithley 2400. Вольт-амперные характеристики, измеренные между электродами, показали омическое поведение, что указывает на омичность контактов к графену.

В качестве источника света использовалась ртутная лампа высокого давления, излучавшая свет в диапазоне примерно 300 нм. УФ-диапазон света был выбран из-за того, что монослой графена поглощает в видимом диапазоне только 2.3%, а в УФ-диапазоне — около 6%.

Перед тем как возбуждать в образцах ПАВ, в графеновой пленке был исследован фотоотклик при приложении к электродам электрического потенциала 5 мВ. Независимо от полярности прикладываемого потенциала в пленках наблюдался фототок. На рис. 2, *a* и *b* кривые 1 показывают сопротивление пленки графена при закрытой и открытой заслонке, регулирующей световой поток. При облучении светом ток в графене увеличивался на 3%. При генерации ПАВ в графене наблюдается отрицательный АЭ-ток, вызванный захватом электронов бегущей акустической волной. Величина АЭ-тока зависит от амплитуды волны. Чем выше амплитуда, тем больше ток. Это обусловлено тем, что с увеличением амплитуды ПАВ из-за пьезоэлектрического эффекта происходит увеличение потенциала в минимумах и максимумах акустической волны, что соответственно приводит к увеличению сбора зарядов в пленке графена и их переносу акустической волной между электродами [6]. При облучении светом в условиях бегущей ПАВ ток в графене ведет себя иначе, чем при ее отсутствии. Изменение тока при облучении светом примерно в 8 раз больше и достигает примерно 24%. Однако величина тока зависит от полярности электрического потенциала, приложенного к графену. Если полярность потенциала, приложенного к электродам, такова, что электроны движутся в направлении бегущей ПАВ, то облучение светом приводит к увеличению тока в графене и сопротивление графена падает (рис. 2, *a*, кривая 2).

Если же полярность приложенного потенциала такова, что электроны в графене движутся навстречу бегущей ПАВ, то облучение светом приводит к уменьшению тока в графене и сопротивление графена увеличивается (рис. 2, *b*, кривая 2).

В работе [8] было показано, что электрический потенциал, приложенный к графену, оказывает влияние на амплитуду бегущей ПАВ. Электрический потенциал, вызывающий ток электронов в направлении ПАВ, приводит к усилению ПАВ и увеличению ее амплитуды. Если же приложенный потенциал направляет электроны в графене навстречу ПАВ, то происходит ее ослабление и уменьшение амплитуды. От амплитуды ПАВ зависит величина АЭ-тока. Поэтому фототок, возникающий в графене при облучении светом, либо усиливает, либо ослабляет амплитуду акустической волны (в зависимости от полярности приложенного электрического потенциала) и соответственно либо усиливает, либо ослабляет АЭ-ток в графене. Таким образом, обнаруженный нами положительный и отрицательный акустоэлектрический

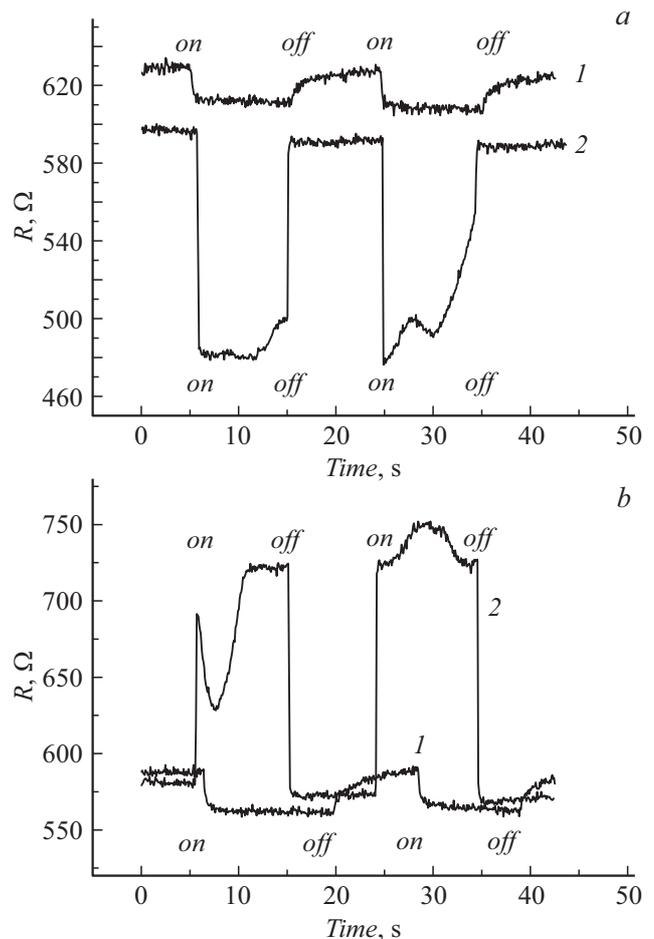


Рис. 2. Изменение сопротивления пленки графена при освещении УФ-излучением без ПАВ (1) и при прохождении ПАВ (2). Данные, представленные на частях *a* и *b*, отличаются полярностью приложенного к графену электрического напряжения (см. текст).

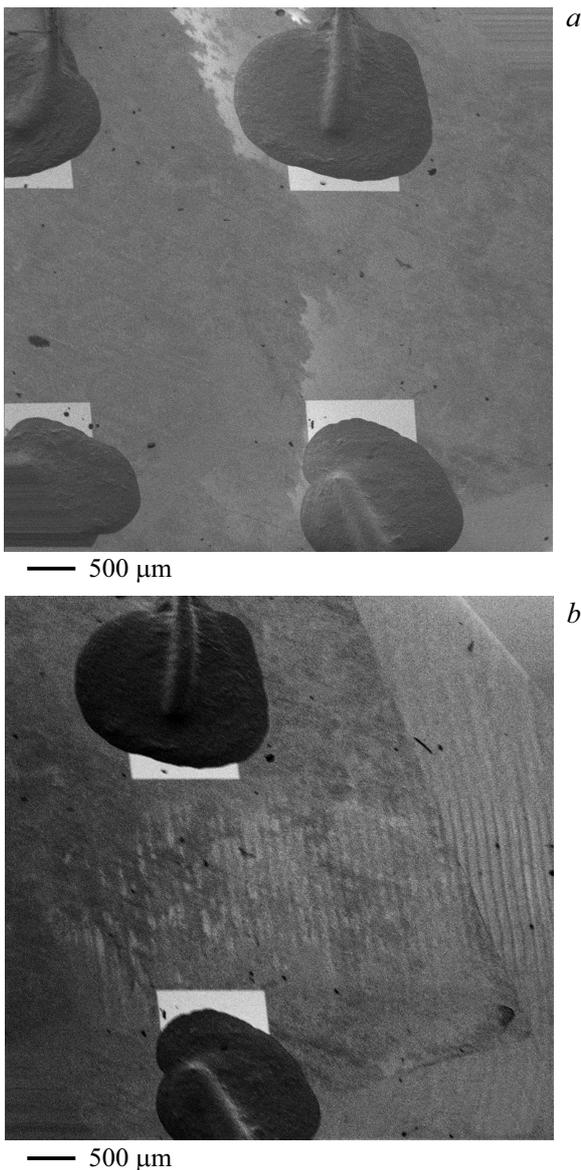


Рис. 3. СЭМ-изображения пленки графена на кристалле ниобата лития без ПАВ (а) и с бегущей ПАВ (b).

фотоотклик связан с увеличением или уменьшением амплитуды ПАВ в зависимости от полярности электрического потенциала, приложенного к графену.

Усиление фотоотклика в графене при прохождении ПАВ связано, по-видимому, с плазмонными колебаниями, возникновению которых способствует ПАВ. В работе [11] было показано, что сочетание графена с плазмонными наноструктурами позволяет увеличить эффективность фотоприемников на основе графена в 20 раз благодаря эффективной концентрации поля в области $p-n$ -перехода. Такие $p-n$ -переходы часто возникают вблизи металлических контактов из-за разницы в работах выхода металла и графена. В работах [12,13] было показано, что под действием падающего электромагнитного поля в графене, лежащем на подложке, можно

эффективно возбуждать поверхностные плазмоны. Если в графене с помощью изгибающей волны, например ПАВ, возбудить упругие колебания, то они действуют как решетка, которая позволяет электромагнитному полю связываться с распространяющимися в графене плазмонами. По расчетам [12] можно связать до 45% энергии света (в отличие от 2% для немодулированного графена).

Для исследования процесса распространения ПАВ в графене на пьезоэлектрическом кристалле можно использовать метод сканирующей электронной микроскопии. Метод сканирующей электронной микроскопии позволяет визуализировать распространение акустических волн в режиме регистрации низкоэнергетических вторичных электронов, чувствительных к электрическим полям, сопровождающим распространение ПАВ в пьезоэлектриках [14,15]. Визуализация процесса распространения ПАВ осуществлялась в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) при ускоряющем напряжении $E = 1\text{ kV}$ и токе электронного зонда $I = 0.3\text{ nA}$. На рис. 3 показаны СЭМ-изображения пленки графена на поверхности кристалла LiNbO_3 . В отсутствие ПАВ контраст графеновой пленки однороден (рис. 3, а). При прохождении ПАВ на поверхности и LiNbO_3 , и графена проявляется периодическая структура (рис. 3, b), соответствующая длине волны ПАВ, связанная с различием потенциалов в минимумах и максимумах акустической волны. Темный контраст на изображении соответствует положительному заряду, а светлый — отрицательному. Таким образом, наблюдаемая в графене периодическая решетка зарядов, по-видимому, является причиной усиления взаимодействия с падающим светом и увеличения фотоотклика в графене.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-29-06306).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Xuan W., He M., Meng N., He X., Wang W., Chen J., Shi T., Hasan T., Xu Z., Xu Y., Luo J.K. // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 7206. DOI: 10.1038/srep07206
- [2] Whitehead E.F., Chick E.M., Bandhu L., Lawton L.M., Nash G.R. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 063110. DOI: 10.1063/1.4818465
- [3] Miseikis V., Cunningham J.E., Saeed K., O'Rorke R., Davies A.G. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 133105. DOI: 10.1063/1.3697403
- [4] Bandhu L., Lawton L.M., Nash G.R. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103, P. 133101. DOI: 10.1063/1.4822121

- [5] *Bandhu L., Nash G.R.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 263106. DOI: 10.1063/1.4905222
- [6] *Roshchupkin D., Ortega L., Zizak I., Plotıcyına O., Matveev V., Kononenko O., Emelin E., Erko A., Tynshtykbayev K., Irzhak D., Insepov Z.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 104901. DOI: 10.1063/1.4930050
- [7] *Hernandez-Minguez A., Tahraoui A., Lopes J.M.J., Santos P.V.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 193502. DOI: 10.1063/1.4949756
- [8] *Insepov Z., Emelin E., Kononenko O., Roshchupkin D.V., Tynshtykbayev K.B., Baigarın K.A.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 023505. DOI: 10.1063/1.4906033
- [9] *Poole T., Bandhu L., Nash G.R.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 133107. DOI: 10.1063/1.4916940
- [10] *Poole T., Nash G.R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 154001. DOI: 10.1088/1361-6463/aab3ec
- [11] *Echtermeyer T.J., Britnell L., Jasnós P.K., Lombardo A., Gorbachev R.V., Grigorenko A.N., Geim A.K., Ferrari A.C., Novoselov K.S.* // Nature Commun. 2011. V. 2. P. 458. DOI: 10.1038/ncomms1464
- [12] *Farhat M., Guenneau S., Bağcı H.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 237404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.237404
- [13] *Schiefele J., Pedros J., Sols F., Calle F., Guinea F.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 237405. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.237405
- [14] *Tanski W.J., Wittels N.D.* // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 34. P. 537–539. DOI: 10.1063/1.90878
- [15] *Roshchupkin D.V., Brunel M., Tucoulou R., Bigler E., Sorokin N.G.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 164–165. DOI: 10.1063/1.111552