АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАВ И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

[1]Инсепов З. А., [2]Кононенко О. В., [2]Рощупкин Д. В., [1]Тыныштыкбаев К. Б.

[1]Назарбаев университет, http://www.nu.edu.kz
10000 Астана, Казахстан
[2]Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, http://www.ipmt-hpm.ac.ru
142432 Москва, Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 14.09.2015

Исследовано влияние ПАВ на электрические свойства несколько слойного (2-3 слоя) графена. Под воздействием ПАВ наблюдается возникновение в графене акустоэлектрического тока I_{AEC}. Знак и величина индуцированного в графене I_{AEC} обусловлен величиной и направлением электромагнитных полей, индуцированных ПАВ и внешним электрическим полем. При совпадении направления ПАВ и напряженности внешнего электрического поля происходит усиление процесса наведения акустоэлектрического тока, при противоположном направлении - торможение I_{AEC}. По результатам измерения наведенного в графене акустоэлектрического тока (I_{AEC}) под действием поверхностной акустической волны (ПАВ) установлен флуктуационный характер акустоэлектрического тока в области электронейтральности, при малых напряжениях внешнего смещения (V_{bias}), прикладываемого на графен. Флуктуационный характер I_{AEC} проявляется во всех случаях измерения в зависимости от действия ПАВ и приложения внешнего электрического поля около точки электронейтральности. Хаотический флуктуационный потенциал графена в области электронейтральности усиливается действием ПАВ, что позволяет наблюдать в реальных условиях эксперимента при комнатной температуре на воздухе. Величина I_{AEC} зависит от мощности ПАВ, при этом наблюдается параболическая зависимость наведенного I_{AEC} от тока усиления мощности ПАВ (I_{saw}). Параболическая зависимость I_{AEC} от I_{saw} объясняется характером релаксации акустических фононов пьезокристаллической подложки, которая является доминирующей в процессах электрон-фононного рассеяния в графене и наведения акустоэлектрического тока в нем. При больших величинах V_{bias} наблюдается строгая линейная зависимость I_{AEC} от V_{bias}. Большие напряжения смещения V_{bias} внешнего электрического поля эффективно подавляют возникновение флуктуационного потенциала электронов и дырок. Возможность управлять с помощью ПАВ величиной и направлением индуцированного в графене I_{AEC} имеет практическое значение.

Ключевые слова: **графен, поверхностная акустическая волна, напряжение смещения, акустоэлектрический ток, ПАВ-прибор.**

PACS: 81.05.ue

Содержание

1. **Введение (153)**
2. **Материалы и методы (154)**
3. **Результаты (155)**
4. **Обсуждение (157)**
5. **Заключение (159)**

Литература (160)

1. ВВЕДЕНИЕ

Уникальные электронные свойства графена [1] можно контролируемо управлять не только с помощью электрического поля [1, 2], но и с помощью поверхностных акустических волн [3-5]. В работах [3, 4] была показана возможность генерации акустоэлектрического тока в графене под воздействием ПАВ, а в [5] обнаружен эффект усиления поверхностных акустических волн (ПАВ) на поверхности пьезокристалла $La_3Ga_5SiO_{14}$ при приложении внешнего электрического смещения на графен, находящийся между двумя встречно-штыревыми

преобразователями высокочастотного сигнала. Усиление ПАВ происходило тогда, когда под воздействием внешнего электрического поля по направлению распространения ПАВ на поверхности пьезоэлектрика, в проводящей графеновой пленке, контактирующей с поверхностью генерирующего ПАВ пьезокристалла, пропускается электрический ток, который индуцирует акустоэлектрический ток в пьезокристалле, что проявляется в усилении амплитуды ПАВ. Данный эффект усиления амплитуды ПАВ в ПАВ-структурах с графеновым покрытием наблюдается при приложении к графену электрического поля малой величины, что также открывает новые возможности для создания бесконтактной акустооптической и акустоэлектронной связи с графеном, и для практических приложений в радиоакустоэлектроники. Все это вызывает большой интерес к исследованиям взаимодействия ПАВ с графеном.

В данной работе исследуется влияние ПАВ на характер возникновения акустоэлектрического тока в графене при приложении внешнего электрического поля в зависимости от амплитуды и направленности его.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В эксперименте в качестве подложек ПАВ-приборов с графеновым покрытием использовались пьезокристаллы ниобата лития $LiNbO_3$ и лангасит $La_3Ga_5SiO_{14}$ (LGS). Данные кристаллы, как и кристалл пьезокварца SiO_2, обладают точечной группой симметрии 32, но в отличии от последнего имеют большие значения коэффициентов электромеханической связи.

Для изготовления ПАВ-приборов были использованы подложки *Y*-среза кристаллов (плоскости (100) параллельны поверхности кристалла). Электродные структуры встречно-штыревого преобразователя (ВШП) – источника ПАВ на поверхности пьезокристалла – формировались с использованием электронно-лучевой литографии на сканирующем электронном микроскопе «*EVO-50 Ziess*» с приставкой "*NanoMaker*" для программной разметки контактных площадок и с последующей металлизацией контактов вакуумно-термическим, плазмохимическим и молекулярно-лучевыми методами испарения и осаждения. ВШП состояли из 50 пар штырей. На подложке *Y*-среза кристалла LGS были сформированы ВШП для возбуждения ПАВ с длиной волны λ = 30 мкм, которая возбуждается на резонансной частоте f = 75.33 МГц и распространяется со скоростью $V = f \times \lambda$ = 2260 м/с вдоль оси *X*. На поверхности подложки *Y*-среза кристалла $LiNbO_3$ были сформированы ВШП для возбуждения ПАВ с длиной волны λ = 4мкм, которая возбуждается на резонансной частоте f = 860 МГц и распространяется со скоростью $V = f \times \lambda$ = 3440 м/с вдоль оси *X*.

Пленка графена на поверхности пьезоэлектрической подложки между двумя ВШП была сформирована методом переноса [6]. Вначале на поверхности окисленного *Si*(100) методом ионного распыления была сформирована пленка *Ni*. В качестве источника был использован *Ni* (99.9999) высокой частоты. Процессе ионного распыления осуществлялся в вакууме 10^{-6} тор. Толщина напыленной пленки *Ni* составляла 0.3 мкм. После получения пленки *Ni* подложки была помещена в трубу кварцевого реактора, который был откачан до давления 10^{-6} тор и затем помещен в печь, нагретую до 950°С. Когда образцы были нагреты до температуры реакции, в кварцевую трубу в течении 5с напускали ацетилен до давления 0.4 тор. Затем трубу кварцевого реактора откачивали и извлекали из печи. После охлаждения на поверхность подложки *Si* с графеном наносился слой полиметилметакрилата (PMMA), который в дальнейшем выступает в качестве несущей опоры. Графен вместе с опорной пленкой PMMA отделялся от подложки *Si* методом жидкостного травления пленки *Ni* в 1% водном растворе хлористоводородной кислоты, а затем вручную укладывался на пьезоэлектрическую подложку LGS (или $LiNbO_3$) между двумя ВШП. PMMA был удален с поверхности графена растворением в ацетоне.

Контроль качества графена осуществлялся с помощью рамановского микроскопа *SENTERRA* фирмы *Bruker* при длинах волн возбуждающего лазера 488 нм, 532 нм и 735 нм.

На **рис. 1** представлены рамановские спектры лангаситовой подложки LGS и графена после переноса на пьезоэлектрическую подложку LGS, и электронномикроскопическое изображение

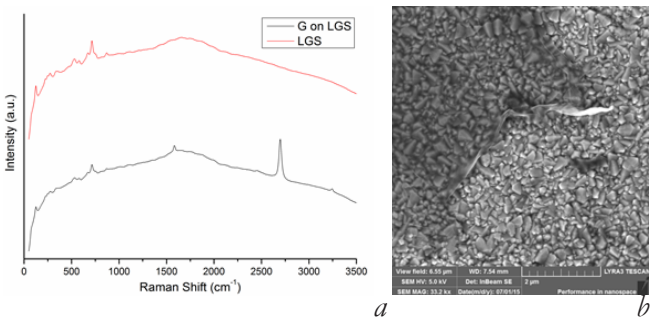

Рис. 1. *Спектр КРС (a) лангаситовой (LGS) подложки (красная) и графена на LGS-подложке (темная) и электронномикроскопическое изображение графена, полученное на сканирующем электронном микроскопе с катодом полевой эмиссией LYRA 3, TESCAN (b). Отношение характерных пиков* $I_{2D(2650)}/I_{G(1560)}$ *= 2.23 показывает на наличие (2-3)-слойного графена.*

графена, полученное на сканирующем электронном микроскопе *LYRA 3, TESCAN*. Спектры были измерены с использованием голубого лазера с длиной волны 488 нм. Соотношение интенсивностей двух пиков демонстрирует, что сформированная пленка состоит из нескольких (2-3) слоев графена. Электронномикроскопическое изображение графена получено на микроскопе традиционной электронной оптикой с катодом Шоттки.

Для исследования электрических свойств графена в условиях распространения ПАВ методом электронно-лучевой литографии на поверхности пленки графена были сформированы два *Al*-электрода. Расстояние между *Al*-электродами составляет ~3 мм.

На **рис. 2** представлены ПАВ-приборы с графеном, которые были использованы для исследования как процесса распространения акустических волн в пленках графена, так и исследования влияния процесса распространения ПАВ на электрические свойства графена.

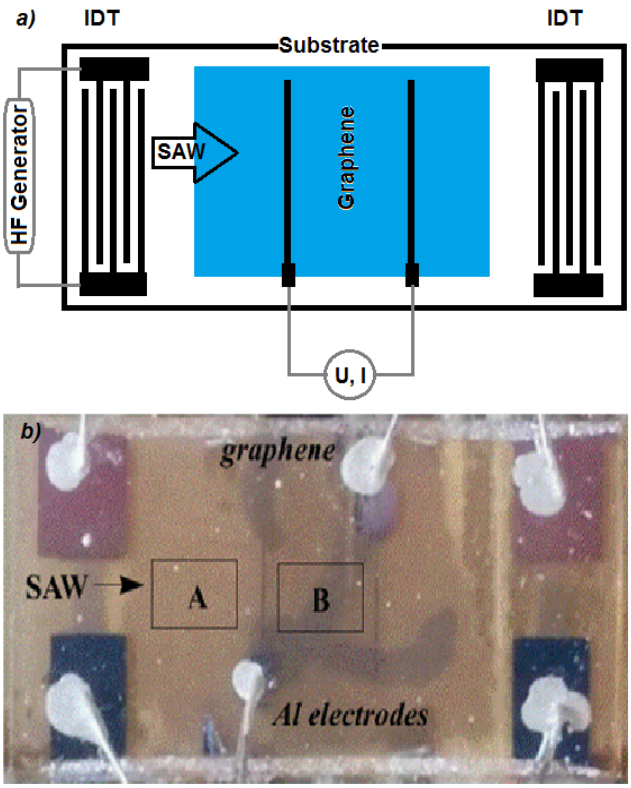

Рис. 2. *Схема измерения электроакустического тока на графене* I_{AEC} *под воздействиями ПАВ и внешнего напряжения смещения электрического потенциала* V_{bias} *(a), фото образца ПАВ-прибора (b).*

Генерация и регистрация сигнала ПАВ и акустоэлектрического тока и ЭДС на графене осуществляются с помощью высокочастотного генератора *АНР-2140* и микроампервольтметра *KEITHLEY 2400 SourceMeter* согласно электрической схеме на рис. 2а.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На **рис. 3** показаны зависимости ВАХ токов I_{gr} и I_{AEC} через графен от величины приложенного на графен напряжения смещения V_{bias} внешнего электрического поля как при отсутствии ПАВ

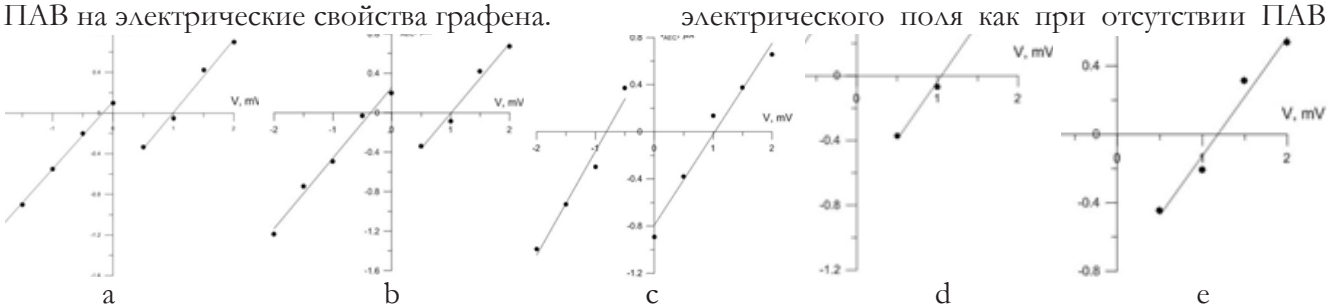

Рис. 3. *Зависимости ВАХ токов* I_{gr} *и* I_{AEC} *через графен от величины приложенного на графен напряжения напряжения смещения* V_{bias} *внешнего электрического поля как при отсутствии ПАВ (рис. 3а), так и при воздействии ПАВ на графен (рис. 3b-e).* I_{gr} *- ток через графен при отсутствии ПАВ,* I_{AEC} *– наведенный акустоэлектрический ток через графен при различных токах усиления* I_{saw} *мощности ПАВ. Зависимости акустоэлектрического тока через графен* I_{AEC} *от внешнего смещения электрического поля* V_{bias} *при воздействии ПАВ с частотой f = 54.2 MHz показаны при различных токах усиления* I_{saw} *ПАВ: a)* I_{saw} *= 0 mkA; b)* I_{saw} *= 25 mkA; c)* I_{saw} *= 50 mkA; d)* I_{saw} *= 75 mkA; e)* I_{saw} *= 100 mkA. Мощность источника ПАВ на входе ВШП W = 1.07 W.*

(рис. 3*a*, $I_{gr}f(V_{bias})$, так и при воздействии ПАВ на графен (рис. 3*b-e*, I_{AEC} $f(V_{bias})$. I_{gr} - ток через графен при отсутствии ПАВ, I_{AEC} – наведенный акустоэлектрический ток через графен при различных токах усиления I_{saw} мощности ПАВ.

В пределах статистической погрешности измерения тока, видна линейная зависимость I_{gr} $f(V_{bias})$, свидетельствующая об омическом контакте на графеновой пленке.

Однако, при малых величинах напряжения смещения V_{bias} (вблизи $V_{bias} \approx 0$) не удается измерить значение тока через графен из-за больших флуктуаций его значения в силу больших погрешностей измерения.

Необходимо особо отметить, что во всех случаях измерения зависимости I_{gr} $f(V_{bias})$ и I_{AEC} $f(V_{bias})$ не проходят через точку электронейтральности (0) при отсутствии внешнего электрического поля, $V_{bias} = 0$. Эта область показана разрывом зависимостей I_{gr} $f(V_{bias})$, рис. 3*a* и $I_{AEC}f(V_{bias})$, рис. 3*b-e*.

Более детальный анализ показывает, что в области малых напряжений $V_{bias} \approx 0$, около точки электронейтральности [1], наблюдается интересная особенность изменения величины и знака акустоэлектрического тока I_{AEC} носителей заряда в графене под воздействием ПАВ, величины и направления приложенного внешнего электрического поля смещения потенциала, V_{bias}.

Вблизи области $V_{bias} \approx 0$, как в области положительного напряжения смещения ($V_{bias} > 0$), так и отрицательного (V_{bia}s < 0) наблюдается смена знака тока через графен I_{gr} и разрыв зависимости $I_{gr}f(V_{bias})$, рис. 3*a*.

При включении ПАВ величина разрыва зависимости I_{AEC} $f(V_{bias})$ вблизи $V_{bias} \approx 0$ увеличивается (рис. 3*b*). С ростом тока усиления I_{saw} мощности ПАВ этот разрыв еще больше больше (рис. 3*b-e*). При этом с ростом тока усиления I_{saw} мощности ПАВ смена знака акустоэлектрического тока I_{AEC} наблюдается при больших значениях отрицательного напряжения смещения ($V_{bias} < 0$). При положительных значениях напряжения смещения ($V_{bias} > 0$) смена знака тока I_{gr} для ПАВ различной мощности происходит практически при одном и том же значении $V_{bias} \approx 1.0$ mV (рис. 3). Зависимость V_{bias} от тока усиления I_{saw} мощности ПАВ, когда

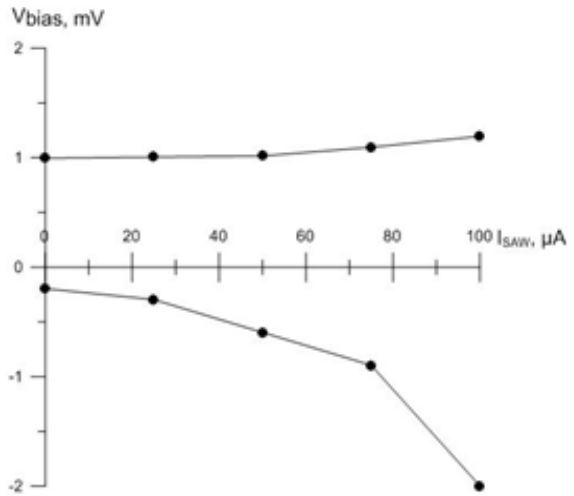

Рис. 4. *Зависимости V_{bias} от I_{saw}, при которых происходит смена знака акустоэлектрического тока I_{AEC}.*

происходит смена знака I_{AEC}, носит квадратичный характер (**рис. 4**).

На **рис. 5** показаны зависимости акустоэлектрического тока I_{AEC} от тока усиления I_{saw} мощности ПАВ при разных значениях и знаках V_{bias}. Значение I_{AEC}, возникающего под воздействием ПАВ, увеличивается при подаче отрицательного напряжения смещения $V_{bias} < 0$ (рис. 5*a*) и уменьшается при положительных $V_{bias} > 0$ (рис. 5*b*). При этом зависимость I_{AEC} от тока усиления I_{saw} мощности ПАВ носит квадратичный характер (рис. 5*a*).

При больших напряжениях смещения V_{bias} наблюдается строгая линейная зависимость I_{AEC} от прикладываемого напряжения (рис. 3). При этих величинах V_{bias} прикладываемое внешнее

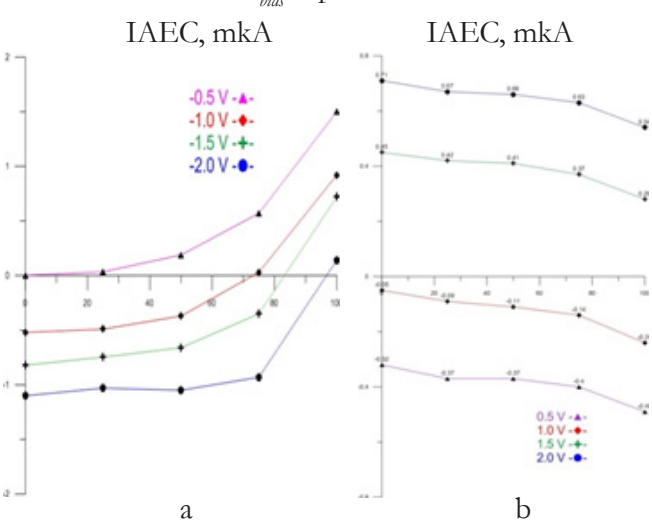

Рис. 5. *Зависимости акустоэлектрического тока (I_{AEC}) от тока усиления мощности ПАВ (I_{saw}) при отрицательных ($V_{bias} < 0$, (a)) и положительных ($V_{bias} > 0$, (b)) значениях напряжения смещения.*

электрическое поле эффективно подавляет возникновение флуктуационного потенциала [7] и в графене реализуется обычная, свойственная традиционным проводникам, зависимость тока омического контакта от напряжения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно [3-5], при воздействии ПАВ на графене индуцируется акустоэлектрический ток I_{AEC}. Величина наведенного I_{AEC} увеличивается линейно с мощностью ПАВ [3]. При приложении дополнительного внешнего напряжения смещения электрического потенциала на графен величина I_{AEC} зависит от направления приложенного электрического поля [5] и увеличивается при совпадении направлений распространения ПАВ и внешнего электрического поля, и уменьшается при противоположных направлениях (рис. 3).

Акустоэлектрический ток I_{AEC} измерялся согласно схеме приложения положительного напряжения на электроды графена по направлению распространения ПАВ (рис. 2). Ток электронов течет от левого электрода к правому, при смене полярности - наоборот, справа налево. Направление ПАВ остается неизменным - от левого ВШП источника ПАВ к правому ВШП. При совпадении направления распространения ПАВ с направлением внешнего электрического поля (при отрицательном напряжении $V_{bias} < 0$) происходит усиление I_{AEC}, в противном случае – торможение. Это проявляется в виде квадратичной зависимости роста акустоэлектрического тока I_{AEC} от тока усиления I_{saw} мощности ПАВ в случае совпадения направлений распространения ПАВ и внешнего электрического поля при отрицательном напряжении смещения $V_{bias} < 0$. В случае противоположных направлений ПАВ и $V_{bias} > 0$ наблюдается снижение I_{AEC}, несмотря на увеличение мощности ПАВ, увеличение I_{saw}.

Наблюдаемый разрыв I_{AEC} в области малых напряжений смещения V_{bias} (вблизи $V_{bias} \approx 0$) и смена знака носителей заряда (рис. 3) мы склонны объяснить проявлениями особенностей электронных свойств графена вблизи точки электронейтральности под воздействием ПАВ.

Согласно [1, 2, 7] точка электронейтральности в графене (заметим, с высокой подвижностью носителей заряда) – это область, вблизи которой за счет равной концентрации взаимно компенсирующих электронов и дырок [1] или нулевой концентрации носителей (или при приближении к ней [2]) наблюдается резкое увеличение сопротивления образца [7].

В реальных условиях в графене всегда имеется хаотический флуктуационный потенциал, обусловленный нановолнистой структурой двумерного кристалла и его тепловой флуктуацией, которые исчезают только при T = 0K [2, 7]. Повышение или понижение локального потенциала приводит к тому, что двумерный электронный газ разбивается на "лужи" электронов и дырок (в местах локального повышения или понижения потенциала, соответственно) [2]. И это проявляется при пониженных концентрациях носителей, когда нет перекрытий этих флуктуационных полей. То есть графен обладает амфотерной (амбиполярной) проводимостью, наличием двух типов зарядов - электронов и дырок, при отрицательных напряжениях электронный тип превалирует, при положительном напряжении начинают доминировать положительные заряды. В области электронейтальности происходит взаимная компенсация носителей зарядов. То есть в области электронейтальности присутствуют оба типа зарядов, которые, компенсируя друг друга, обуславливают при этом флуктуацию потенциала электрического поля графена [2].

В нашем случае флуктуационный характер акустоэлектрического тока через графен вблизи малых электрических напряжений обусловлен воздействием переменного электрического поля пьезокристалла, сопровождающего генерацию и распространение ПАВ, и приводящего к упругой деформации системы графен/пьезокристалл [9]. ПАВ вызывая упругую деформацию поверхностного слоя пьезоэлектрической решетки, индуцирует его электрическую поляризацию, что приводит к возникновению переменного электрического поля ПАВ как внутри, так и вне пьезокристалла, что может отражаться на флуктуации дираковских фермионов в графене [8], и на изменении знака электрического тока в графене [9].

Амплитуда деформации поверхностного слоя пьезокристалла, определенная с помощью метода высокоразрешающей рентгеновской

дифрактометрии на источнике синхротронного излучения *BESSY II*, может меняться в зависимости от мощности ПАВ [9]. То есть изменение амплитуды ПАВ в системе графен/пьезоэлектрический кристалл в свою очередь определяет характер деформации графена, амплитуду, период и частоту деформации. В условиях данного эксперимента амплитуда деформации графена меняется в пределах $h = 0 – 1.8$ Å в зависимости от изменения подаваемого на ВШП амплитуды высокочастотного сигнала $U = 0–25$ V и с периодом $\lambda = 30$ мкм при частоте ПАВ $f = 75.33$ MHz для LGS-подложки [9]. Деформация графена приводит к флуктуации его электрического поля, в местах локального повышения или понижения электрического потенциала двумерный электронный газ разбивается на "лужи" электронов и дырок, соответственно [2], которые пространственно разделены с периодом равным $\lambda_{SAW} = 30$ мкм (LGS). И это проявляется в виде разрыва зависимости $I_{AEC} f(V_{bias})$ и смены знака носителей зарядов в области малых напряжений (рис. 3-5). С увеличением тока усиления I_{saw} мощности ПАВ изменение знака I_{AEC} наблюдается при больших отрицательных напряжениях смещения $V_{bias} < 0$. То есть с увеличением мощности амплитуды ПАВ наблюдается тенденция смены знака I_{AEC} при увеличивающихся значениях отрицательного напряжения смещения от $V_{bias} \approx –0.2$ mV до $V_{bias} \approx –1.0$ mV (рис. 3, 4). В то время как смена знака I_{AEC} при положительных напряжениях смещения $V_{bias} > 0$ происходит при постоянном значении V_{bias}, около 1.0 mV независимо от мощности ПАВ (рис. 3 и 4).

При больших напряжениях смещения V_{bias} наблюдается строгая линейная зависимость I_{AEC} от прикладываемого напряжения (рис. 3). При этих величинах V_{bias} прикладываемое внешнее электрическое поле эффективно подавляет возникновение флуктуационного потенциала [7].

Необходимо отметить отличительную особенность проявления флуктуационного характера акустоэлектрического тока через графен вблизи малых электрических напряжений нашего эксперимента от условий экспериментов [1, 2, 7], когда используются монослойный или двуслойный графен, полученные путем микромеханического расслоения высокоориентированного пиролитического графита (*HOPG*). При этом пленки графена находятся в подвешенном состоянии между металлическими контактами на подложке из окисленного кремния [1, 2] или капсулированы тонкими слоями кристаллита нитрида бора, полученного с помощью также микромеханического расслоения кристалла нитрида бора [7]. Подвижность носителей зарядов в таких образцах графена порядка 10^6 см^{2}В$^{-1}$с$^{-1}$ для подвешенного графена и 10^5 см^{2}В$^{-1}$с$^{-1}$ для капсулированного. Измерения проводятся при низких температурах 4К, 20К в инертной среде. В нашем случае использовался 2-3 слойный графен, синтезированный методом газофазного осаждения из паров ацетилена с помощью выращенных “in sity” *Ni*-катализаторов. Подвижность была равна 4800 см^{2}В$^{-1}$с$^{-1}$ [5]. И данная графеновая пленка размещается на пьезоэлектрической подложке из кристаллов ниобата лития $LiNbO_3$ и лангасита $La_3Ga_5SiO_{14}$ между двумя ВШП. Измерения проводятся при комнатной температуре на воздухе.

Тем не менее, воздействие ПАВ на графен приводит к созданию дополнительных условий для проявления флуктуации носителей заряда в графене, которая наблюдается в нашем эксперименте при комнатной температуре и на воздухе.

Параболическая зависимость акустоэлектрического тока I_{AEC} через графен в зависимости от тока усиления I_{saw} мощности ПАВ и внешнего электрического поля при совпадении их направлений (рис. 5а) можно объяснить следующим образом. Воздействие ПАВ на графен приводит к возникновению акустоэлектрического тока в результате взаимодействия электромагнитных полей ПАВ и электрического тока через графен в результате приложения электрического напряжения смещения. В результате электрон-фононного рассеяния, которое велико в графене [1], часть энергии ПАВ теряется на это. Энергия релаксации акустических фононов графена зависит от температуры решетки кристаллах [10-12]. В графене время релаксации акустических фононов зависит от температуры T_e обратно квадратично

t_{relax}(Graphene) ~ T_e^{-2},
в то время как для акустических фононов пьезокристаллической подложки релаксация при высоких температурах имеет линейную зависимость от T_e и не зависит от степени вырождения электронного газа [13],
t_{relax}(SAW) ~ T_e^{-1}.

Кроме того, надо учесть, что любое внешнее возмущение на дву- и более слойный графен не только действует на имеющиеся носители заряда, но и создает дополнительные носители [1, 2, 6, 14].

Необходимо отметить, что этот электрон-фононный процесс релаксации в графене можно регулировать с помощью внешней пьезоэлектрической связи и внешнего электрического поля.

Таким образом, результаты данной работы показывают возможности управления акустоэлектрическим током в графене под воздействием внешних ПАВ и электрических полей. Эти возможности, наряду с возможностями усиления амплитуды ПАВ [4] и управлять величиной и направлением тока в графене на поверхности пьезоэлектрических кристаллов путем изменения амплитуды ПАВ представляют практический интерес для будущих разработок различных приборов на основе графена, таких, как солнечные батареи с наноантеннами в террагерцовом диапазоне, нанонасосы и топливные элементы, двумерные наномембраны и т.д.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние ПАВ на электрические свойства несколько слойного (2-3 слоя) графена. Под воздействием ПАВ наблюдается возникновение в графене акустоэлектрического тока I_{AEC}. Знак и величина наведенного в графене I_{AEC} обусловлен величиной и направлением электромагнитных полей, индуцированных ПАВ и внешним электрическим полем. При совпадении направления ПАВ и напряженности внешнего электрического поля происходит усиление процесса наведения акустоэлектрического тока, при противоположном направлении – торможение I_{AEC}.

По результатам измерения наведенного в графене акустоэлектрического тока (I_{AEC}) под действием поверхностной акустической волны (ПАВ) установлен флуктуационный характер акустоэлектрического тока в области электронейтральности, при малых напряжениях внешнего смещения (V_{bias}), прикладываемого на графен. Флуктуационный характер I_{AEC} проявляется во всех случаях измерения в зависимости от действия ПАВ и приложения внешнего электрического поля около точки электронейтральности. Хаотический флуктуационный потенциал графена в области электронейтральности усиливается действием ПАВ, что позволяет наблюдать в реальных условиях эксперимента при комнатной температуре на воздухе.

Величина I_{AEC} зависит от мощности ПАВ, при этом наблюдается параболическая зависимость наведенного I_{AEC} от тока усиления мощности ПАВ (I_{saw}). Параболическая зависимость I_{AEC} от I_{saw} объясняется характером релаксации акустических фононов, которая является доминирующей в процессах электрон-фононного рассеяния в графене и наведения акустоэлектрического тока в нем.

При больших величинах V_{bias} наблюдается строгая линейная зависимость I_{AEC} от V_{bias}. Большие напряжения смещения V_{bias} внешнего электрического поля эффективно подавляют возникновение флуктуационного потенциала электронов и дырок.

Возможность управлять с помощью ПАВ величиной и направлением индуцированного в графене I_{AEC} имеет практическое значение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.А. Айнабаеву (Назарбаев Университет, г.Астана), А.В. Иржак (ИПТМ РАН, Черноголовка, г. Москва) за помощь в эксперименте и обработке результатов, М.В. Лукашовой (ООО "ТЕСКАН", г. Санкт-Петербург) за электронномикроскопические снимки изображений графена.

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки Российской Федерации (контракт № 14.607.21.0047, номер регистрации № RFMEFI60714X0047) и Министерством образования и науки Республики Казахстан (контракт № 265-12.02.2015).

Д.Р. выражает благодарность Российскому Фонду фундаментальных исследований (грант №14-02-91700) и З.И. – Фонду Назарбаев Университета по программе «Звезды мировой науки», якорный проект № 031-2013).

ЛИТЕРАТУРА

1. Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva IV, Firsov AA. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 2004, 306:666-669.
2. Морозов СВ, Новоселов КС, Гейм АК. Электронный транспорт в графене. *УФН*, 2008, 178 (7):776-780.
3. Miseikis V, Cunningham JE, Saeed K, O'Rorke R, Davies AG. Acoustically induced current flow in graphene. Appl. Phys. Lett., 2012, 100(133105):1-4.
4. Santos PV, Schumann T, Oliveira MH,Jr., Lopes JMJ, Riechert H. Acousto-electric transport in epitaxial monolayer graphene on SiC. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(1221907):1-3.
5. Insepov Z, Emelin E, Kononenko O, Roshchupkin DV, Tynyshtykbayev KB, Baigarin KA. Surface acoustic wave amplification by direct current-voltage supplied to graphene film. Appl. Phys. Lett., 2015, 106(023505):1-5. doi: 10.1063/1.4906033
6. Матвеев ВН, Кононенко ОВ, Левашов ВИ, Волков ВТ, Капитанова ОО. Способ получения графеновой пленки. *Патент РФ № 2500616*, 2013.
7. Морозов СВ. Новые эффекты в графене с высокой подвижностью. *УФН*, 2012, 182(4):437-442.
8. Thalmeier P, Dora B, Ziegler K. Surface acoustic wave propagation in graphene. Phys. Rev. B, 2010, 81(041409 (R):1-4. arXiv:0909.0130.
9. Dmitry Roshchupkin, Luc Ortega, Ivo Zizak, Olga Plotitsyna, Viktor Matveev, Oleg Kononenko, Evgenii Emelin, Alexei Erko, Kurbangali Tynyshtykbayev, Dmitry Irzhak, Zinetula Insepov. Surface acoustic wave propagation in graphene film. *JAP*, 2015 in press.
10. Morozov SV, Novoselov KS, Katsnelson MI, Schedin F, Elias DC, Jaszczak JA, Geim AK. Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Bilayer. *Phys.Rev.Lett.*, 2008, 100(016602).
11. Chen JH, Jang C, Xiao S, Ishigami M, Fuhrer MS. Intrinsic and Extrinsic Performance Limits of Graphene Devices on SiO_2. *Nature Nanotech.*, 2008, 3:206.
12. Das Sarma S, Adam Sh, Hwang EH, Rossi E. Electronic transport in two-dimensional graphene. *Rev.Modern Phys.*, 2011, 83(2):407-470.
13. Zhang SH, Xu W, Peeters FM, Badalyan SM. Electron energy and temperature relaxation in graphene on a piezoelectric substrate. *Phys. Rev. B*, 2014, 89(1954090):1-6. arXiv:1312.638v2.
14. Лозовик ЮЕ, Меркулова СП, Соколик АА. Квантовые электронные явления в графене. *УФН*, 2008, 178(7):757-776.

Инсепов Зинетула Алпысович
д.ф.-м.н., проф., зав. лаб. «Наносинергетика»
Назарбаев Университет
53, ул. Кабанбай Батыра, 10000 Астана, Казахстан
+ 7 7172 70 65 60

Кононенко Олег Викторович
к.ф.-м.н., с.н.с. лаб. «Наноматериалы»
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
6, ул. Ак. Осипьяна, Черноголовка, Московская область, Россия
+ 7 496 524 40 98

Рощупкин Дмитрий Валентинович
д.ф.-м.н., проф., зав. лаб. рентгеновской акустооптики,
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, зам. директора
6, ул. Ак. Осипьяна, Черноголовка, Московская область, Россия
+ 7 496 524 40 58, dmitry.roshchupkin@iptm.ru

Тыныштыкбаев Курбангали Байназарович
д.т.н., проф., с.н.с. лаборатории «Наносинергетика»
Назарбаев Университет,
53, ул. Кабанбай Батыра, 10000 Астана, Казахстан
+ 7 7172 70 65 42, ktynyshtykbayev@nu.edu.kz, kt011@mail.ru

ACOUSTOELECTRIC PROPERTIES OF GRAPHENE UNDER THE INFLUENCE OF SAW AND EXTERNAL ELECTRIC FIELD

Zinetula A. Insepov, Kurbangali B. Tynyshtykbayev
Nazarbayev University, NURIS, http://www.nu.edu.kz
53, Kabanbay Batyr str., 10000 Astana, Kazakhstan
ktynyshtykbayev@nu.edu.kz, kt011@mail.ru

Oleg V. Kononenko, Dmitry V. Roschupkin
Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, http://www.ipmt-hpm.ac.ru
142432 Moscow, Chernogolovka, st. Ak. Osip'yan 6, Russia
dmitry.roshchupkin@iptm.ru

Abstract. **The effect of SAW on the electrical properties of the few-layer (2-3 layers) graphene is studied. Under the influence of SAW the appearence of acoustoelectric current I_{AEC} in graphene is observed. The sign and magnitude of the induced I_{AEC} in graphene conditioned by magnitude and direction of the electromagnetic fields induced by SAW and an external electric field. When the direction of SAW and V_{bias} is the same I_{AEC} amplified, when at the opposite direction - I_{AEC} are reduced in result of the interaction of these fields with each other. As a result of the measurement of the induced acoustoelectric (I_{AEC}) current in graphene under the influence of a surface acoustic wave (SAW) the fluctuation nature of acoustoelectric current in the area of electrical neutrality is established at low voltages of an external bias (V_{bias}) applied on a graphene. The fluctuation character of the I_{AEC} is manifested in all cases of measurements depending on the action of SAW and V_{bias} near the point of electrical neutrality. Chaotic fluctuation potential of graphene in the area of electrical neutrality is enhanced by the action of SAW that allows observing it in real conditions of the experiment at room temperature in air. The magnitude of I_{AEC} depends on the power of SAW, while there is a parabolic dependence of the induced I_{AEC} on the amplification current of SAW power (I_{SAW}). The parabolic dependence of I_{AEC} on I_{SAW} explained by specific relaxation of acoustic phonons of the piezocrystallical substrate, which is dominant in the process of electron-phonon scattering in graphene and acoustoelectric current induction in it. For large magnitudes of V_{bia}s strict linear dependence of the I_{AEC} on V_{bias} is observed. Large V_{bias} effectively suppress the appearance of the fluctuation potential of electrons and holes. The ability to control the magnitude and direction of I_{AEC} induced in graphene by SAW is of practical importance.**

Keywords: **graphene, surface acoustic wave, voltage bias, acoustoelectric current, SAW-device.**

PACS: 81.05.ue

Bibliography – 14 references *Received - 14.09.2015*

RENSIT, 2015, 7(2):153-161 **DOI: 10.17725/rensit.2015.07.153**