

07

Исследование электронной прозрачности графена для малых энергий электрона

© Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Д.М. Мигунов, Р.М. Набиев,
Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков[¶], Е.Г. Тверовская, В.О. Хаустов

Национальный исследовательский университет „Московский институт
электронной техники“, Зеленоград, Москва, Россия

[¶] E-mail: mstlenna2@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2018 г.

Исследуется прозрачность графеновых мембран для электронов с энергией в диапазоне 5–50 eV. Предполагается использование графена как электрода, стимулирующего полевыми эмиссию в вакуумных микро- и нанoeлектронных устройствах. При анализе поведения отраженных от мембраны электронов учитывается их возврат под действием тормозящего электрического поля. В качестве электронов с небольшой энергией используются фотоэлектроны, эмитируемые из алмазного фотокатода под действием вакуумного ультрафиолета.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46617.17356

Благодаря своим уникальным электронным и механическим свойствам графен привлекает внимание многих разработчиков электронной аппаратуры. Особенно следует отметить уникальные свойства графеновых мембран как микро- и нанорезонаторов, обеспечивающих разработку автоколебательных систем для передачи и вывода информации из микро- и наносистем [1]. Генерация высокочастотных колебаний достигается введением положительной обратной связи, и в дальнейшем для этой цели предполагается использовать CMOS-технологии. Однако необходимую связь можно реализовать, используя графеновые мембраны не только как резонаторы, но и как электроды, стимулирующие полевыми эмиссию [2,3]. Тогда можно получить наноразмерный автогенератор, превосходящий по размерам автогенератор на основе туннельно-резонансных приборов [4]. Существенным при этом становится свойство электронной прозрачности графеновой мембраны, чему посвящен ряд работ [2,3,5–7], результаты которых довольно противоречивы. Это связано с исследованием образцов, по структуре сильно

отличающихся друг от друга. В [8] выполнены квантово-механические расчеты для энергий 20–200 eV. Результаты, полученные для 20–40 eV, показывают резкие колебания прозрачности в зависимости от энергии, что, по мнению самих авторов указанной работы, является странным и, возможно, связано с недостаточной точностью в аппроксимации графена потенциальным полем. Кроме того, при расчетах полагалось, что электрон падает нормально к поверхности графена. В реальности это не так, но учет данного факта сильно усложняет расчеты, что обусловлено возникновением резонансных явлений [9,10].

Использование графенового электрода в качестве управляющей сетки в вакуумных триодных структурах характеризуется тем, что отраженные от графена электроны попадают в поле, возвращающее их обратно на графен или фиксирующую его подложку. Это приводит к тому, что часть потока проходит через графен, а остальная часть поглощается непрозрачной подложкой, на которой располагаются графеновые мембраны. Следует также отметить работу [5], в которой в качестве источника электронов использовался напыленный термокатод BaO:W, нагреваемый до 800°C. Показано, что при энергии электронов от 3 до 10 eV наблюдался почти линейный рост прозрачности (от 0.1 до 0.6). При дальнейшем увеличении энергии коэффициент прозрачности колебался, но не увеличивался, что объяснялось возникновением пространственного заряда. С течением времени из-за испарения с катода Ba и его осаждения на графене прозрачность сильно падала. В работе поднимается ряд дополнительных вопросов и показана проблематичность использования термокатаода.

Графеновые мембраны перспективно использовать для стимуляции полевой эмиссии [2,3,11]. В работе [11] показано, что в этом случае мембрана позволяет создать когерентный источник электронов для голографического исследования наноразмерных объектов, причем при энергии электронов ~ 66 eV прозрачность мембраны достигает 0.73.

Приведенный обзор показывает, что изучение электронной прозрачности графена для электронов малой энергии следует продолжить. В настоящей работе экспериментально исследована прозрачность графена для энергий электрона 5–50 eV.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а. Установка состоит из фотокатода 1, представляющего собой сапфировую пластину, на поверхности которой сформирован слой поликристаллического алмаза *p*-типа проводимости, сеточного анода 2 и оснастки 3,

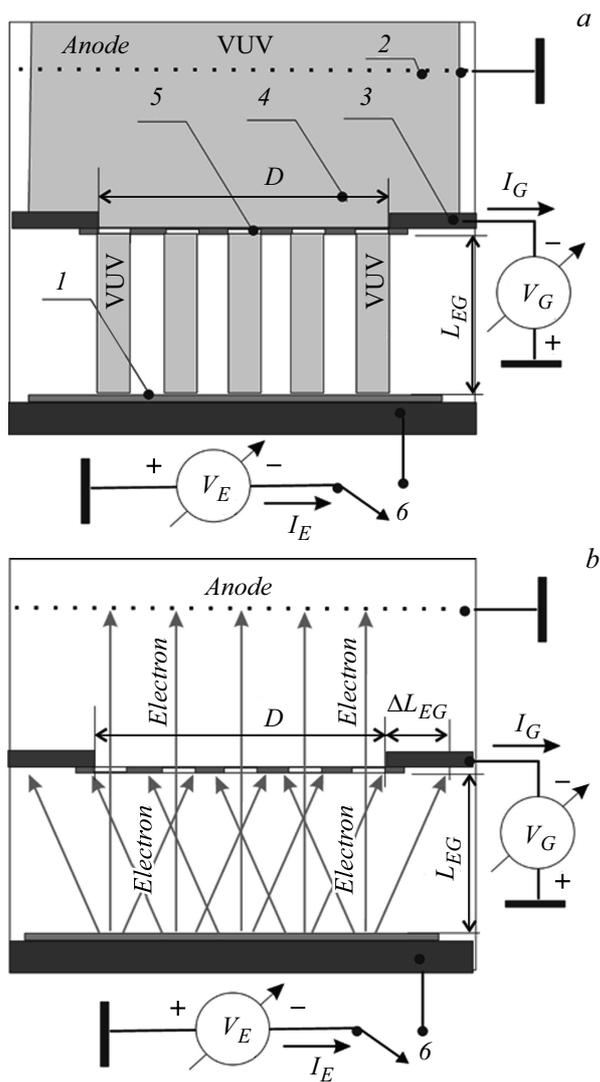


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *a* — генерация фотоэлектронов под действием вакуумного ультрафиолета, *b* — характер поведения фотоэлектронов. Пояснения в тексте.

удаленной от фотокатода I на расстояние L_{EG} . Источником электронов является фотокатод, облучаемый вакуумным ультрафиолетом (VUV) с длиной волны 185–225 нм. В оснастке 3 имеются окна 4, в которых крепятся исследуемые образцы графена 5. Поток VUV поступает от внешнего источника, использующего дейтериевую лампу ДДС-30. Проходя через сеточный анод и графеновые мембраны, поток падает на поверхность фотокатода и генерирует в месте падения фотоэлектроны. Фотоэлектроны в вакууме $(2-5) \cdot 10^{-7}$ Торр под действием электрического поля, создаваемого источниками напряжения V_E и V_G (подключенными соответственно к фотокатоду и графеновой оснастке), двигаются в сторону графеновых мембран (рис. 1, *b*). Если бы фотоэлектроны не имели компоненты скорости v_g , параллельной мембранам, то они бомбардировали бы только мембраны. Однако v_g в основном зависит от энергии кванта VUV и работы выхода электрона из алмаза. Максимальное значение этой скорости $v_{g \max}$ оценивается следующим образом. Берется подложка с диаметром отверстия D_0 . Проходя через отверстие, VUV-излучение рождает на фотокатоду в круге диаметром D_0 фотоэлектроны, которые под действием поля и благодаря отличной от нуля компоненте скорости v_g образуют расходящийся поток, сечение которого у фотокатода имеет диаметр D_0 , а у подложки — $D_0 + 2\Delta L_{EG}$ (рис. 1, *b*). Считая, что плотность электронов меняется линейно вдоль отрезка ΔL_{EG} и постоянна внутри отверстия, можно легко найти $v_{g \max}$ на основе измерения токов I_E и I_G при энергии электронов 50 eV. Величина ΔL_{EG} зависит от энергии электронов и при $L_{EG} = 1$ мм несложные вычисления дают $\Delta L_{EG} [\mu\text{m}] = 14(50/E_e [\text{eV}])^{0.5}$.

Исследуемые образцы графена 5 представляют собой подложку со сквозными отверстиями, покрытыми однослойной или многослойной графеновой пленкой, что превращает ее в ряд мембран. Подложка крепится в окне оснастки 4 диаметром $D = 2.4$ мм. В исследуемых образцах расстояние между мембранами менее $5 \mu\text{m}$, а размытие электронного потока ΔL_{EG} происходит более чем на $14 \mu\text{m}$, что усредняет падающий на подложку электронный поток, т.е. на поверхности подложки его можно считать равномерным, а вне подложки убывающим на расстоянии ΔL_{EG} по линейному закону. Отсюда легко вычисляется вероятность p_G попадания фотоэлектрона на мембрану, а именно $p_G = (1 + 0.08/E^{0.5})S_G/S_0$, где S_G — общая площадь мембран, $S_0 = \pi D^2/4$. Обозначая через $p_T(E_e)$ вероятность прохождения

мембраны электроном с энергией E_e , получаем, что вероятность p_e для фотоэлектрона с энергией E_e попасть на мембрану и пройти сквозь нее на анод будет $p_e = p_T(E_e)p_G$. Фотоэлектроны с вероятностью $\sim 1 - p_T(E_e)$ также отражаются от мембраны. Таким образом, поток фотоэлектронов J_{GE2} , падающий на мембраны, распадается на анодную составляющую $p_T J_{GE2}$ и поток $(1 - p_T)J_{GE2}$ отраженных электронов. Часть падающих фотоэлектронов поглощается графеном, но, как показывает моделирование прохождения электронов через графеновую мембрану с помощью программы „Casino v2.48“, электроны в основном либо проходят, либо отражаются. Поэтому в рамках настоящей работы поглощение не учитывается. При средней величине угла отражения $\pi/3$ получаем, что под действием тормозящего поля отраженный электрон попадает либо на подложку, либо на оснастку на расстоянии от места отражения $L_R = 1.7L_{EG}$. Таким образом, диаметр области возврата становится $D + 3.4L_{EG}$. Рассуждая точно так же, как в случае начального потока фотоэлектронов, получаем, что из всех отраженных электронов их часть η_R снова попадает на мембраны, причем $\eta_R = 0.33S_G/S_0$. Часть отраженных электронов, попадая на мембрану, проходит через нее, а часть снова отражается. Вторым отражением можно пренебречь из-за значительного поглощения отраженных электронов подложкой и оснасткой. Электроны, вторично падающие на графеновую мембрану, падают под произвольными углами, а это, как упоминалось ранее, резко меняет всю картину поведения электронов из-за резонансных явлений [9,10]. Чтобы избежать усложнений, полагается, что вероятность прохождения фотоэлектронов не зависит от угла и равна $p_T(E_e)$. Тогда доля проходящих через мембрану первично отраженных электронов составит $\eta_R p_T(E_e)$. Итак, результирующий поток фотоэлектронов I_{Af} , проходящий через мембрану и достигающий анода, будет равен $I_{Af} = p_e(1 + \eta_R - \eta_R p_T)I_{Ef}$. При энергии электрона $E_e = e(V_G - V_E)$ ток I_{Ef} равен приращению тока I_E при включении вакуумного ультрафиолета, а ток I_{Af} равен разности $I_{Af} = I_{Ef} - \Delta I_G$, где ΔI_G — приращение тока I_G при размыкании-замыкании ключа δ и непрерывном облучении VUV (рис. 1). Определяя коэффициент $K_{TR}(E_e) = I_{Af}/I_{Ef}$, для нахождения p_T получаем уравнение

$$(1 - 0.08/E_e^{0.5})p_T(1 + \eta_R - \eta_R p_T)S_G/S_0 = K_{TR}(E_e) - K_0, \quad (1)$$

где K_0 — не зависящее от энергии электрона (при малых E_e) значение коэффициента $K_{TR}(E_e)$, обусловленное наличием незакрытых графеном

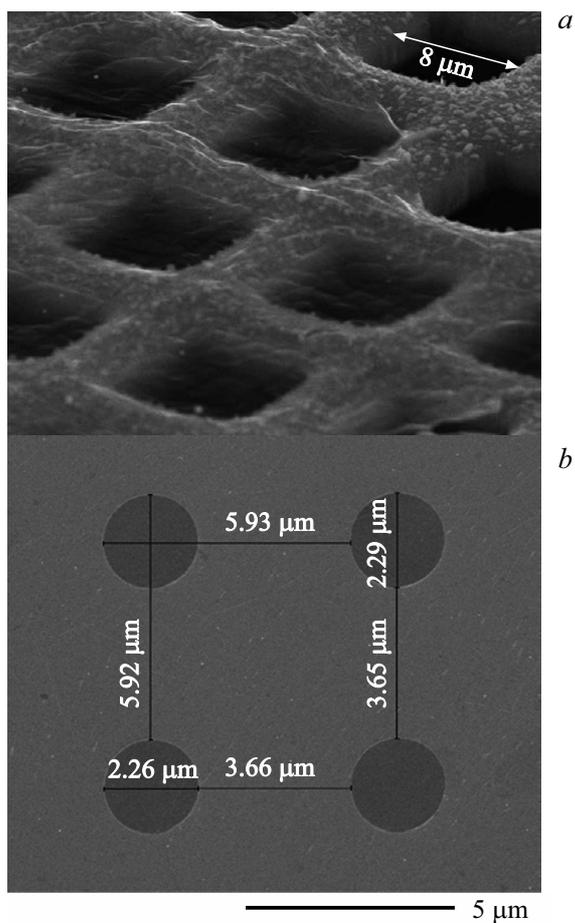


Рис. 2. СЭМ-изображения экспериментальных образцов. *a* — Graphene Lab., *b* — Graphenea Inc.

отверстий в подложке. Исследовались два образца, полученные от производителей Graphene Lab. и Graphenea Inc. СЭМ-изображение (СЭМ — сканирующая электронная микроскопия) первого образца представлено на рис. 2, *a*. Многослойная графеновая пленка (произво-

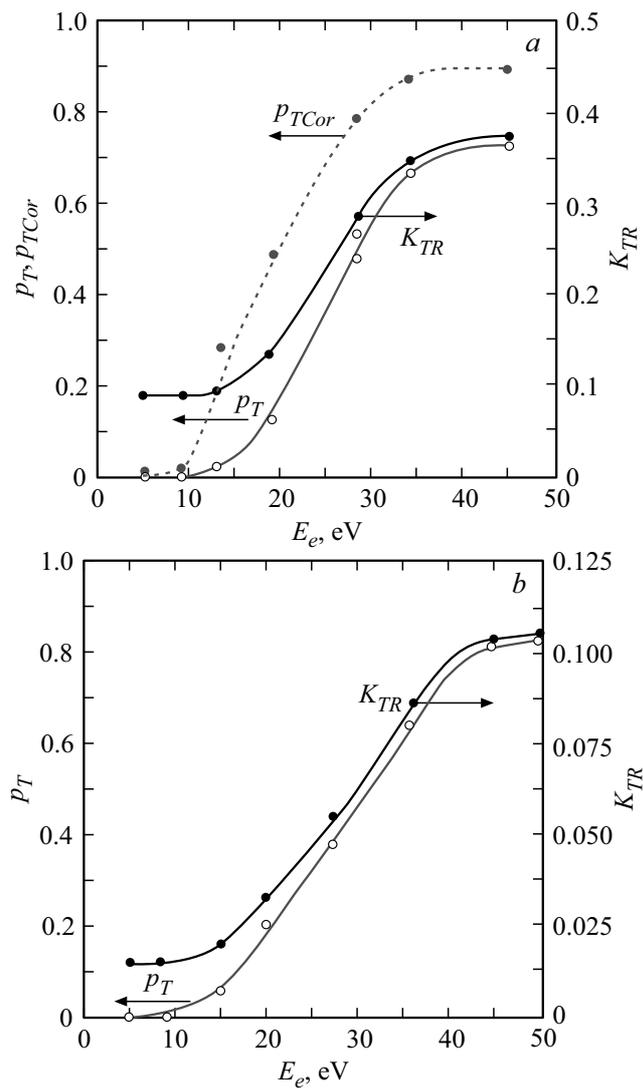


Рис. 3. Коэффициент прозрачности K_{TR} и вероятности p_T, p_{TCor} прохождения электронов через несколько слоев и один слой графена для образца Graphene Lab. (a), через один слой графена для образца Graphene Inc. (b).

датель Graphene Lab. гарантирует, что число слоев графена по образцу может меняться только в пределах 1–6) нанесена на медную решетку с размером ячейки $8 \times 8 \mu\text{m}$ и периодом $13 \mu\text{m}$, отсюда $S_G/S_0 = 0.379$ и $\eta_R = 0.12$. На рис. 3, *a* в виде кривой представлена полученная экспериментально зависимость $K_{TR}(E_e)$, причем $K_0 = 0.09$. Вероятность $p_T(E_e)$, вычисленная на основе уравнения (1), также представлена на рис. 3, *a*; $p_T(E_e)$ — вероятность, отнесенная к нескольким графеновым слоям. Учитывая, что некоторые ячейки не покрыты графеном, а максимальное число слоев может достигать 6, получаем, что среднее число слоев, приходящихся на одну ячейку, равно 3. Исходя из средней величины слоев оцениваем вероятность p_{TCor} для одного слоя как $p_{TCor} = p_T^{1/3}$ (рис. 3, *a*). Второй образец (рис. 2, *b*) представляет собой графитовую подложку с покрытыми однослойным графеном отверстиями диаметром $\sim 2.3 \mu\text{m}$. Отверстия регулярно расположены с периодом $\sim 6 \mu\text{m}$. Графитовая подложка совмещена с золотой решеткой, имеющей период $82 \mu\text{m}$ и ячейки размером $\sim 50 \times 50 \mu\text{m}$. Образец имеет $S_G/S_0 = 0.119$ и с учетом золотой сетки $\eta_R = 0.03$. Результаты измерений представлены в виде кривой $K_{TR}(E_e)$ на рис. 3, *b*, причем $K_0 = 0.013$. Используя уравнение (1), получаем приведенную на рис. 3, *b* зависимость $p_T(E_e)$.

Отметим, что для двух образцов получены близкие результаты. Основным результатом является то, что при энергии электрона 40–50 eV один слой графена становится практически прозрачным для электронов. Значение прозрачности при этих энергиях все же меньше единицы, что, по-видимому, обусловлено несовершенством графена и наличием на его поверхности „сопутствующих“ инородных частиц. При энергиях электрона 10–20 eV прозрачность графена падает существенно, но здесь остается открытым вопрос о том, преобладает поглощение или отражение. Использование для моделирования программы „Casino v2.48“ показывает превалирование процесса отражения. В нашем эксперименте явно преобладает процесс поглощения, что связано не столько со свойствами графена, сколько с подложкой.

Великолепные упругие свойства графеновых мембран и возможность их использования для стимуляции полевой эмиссии электронов позволяют уверенно прогнозировать применение графеновых пленок для разработки генерирующих и усилительных наноприборов СВЧ-диапазона вплоть до терагерцевого.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.3164.2017/ПЧ).

Список литературы

- [1] *Chen C., Lee S., Deshpande V., Lee G.-H., Lekas M., Shepard K., Hone J.* // Nature Nanotechnol. 2013. V. 8. P. 923–927.
- [2] *Li C., Cole M.T., Lei W., Qu K., Ying K., Zhang Y., Robertson A.R., Warner J.H., Ding S., Zhang X., Wang B., Milne W.I.* // Adv. Funct. Mater. 2014. V. 24. N 9. P. 1218–1227.
- [3] *Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С., Сахаров О.А., Чернявская Е.С.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 18. С. 25–31.
- [4] *Poltoratsky E.A., Rychkov G.S.* // Nanotechnology. 2001. V. 12. P. 556–561.
- [5] *Hassink G., Wanke R., Rastegar J.T., Braun W., Stephanos C., Herlinger P., Smet J.H., Mannhart J.* // APL Mater. 2015. V. 3. P. 076106.
- [6] *Mutus J.Y., Livadaru L., Robinson J.T., Urban R., Salomons M.H., Cloutier M., Wolkow R.A.* // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 063011.
- [7] *Frank L., Mikmekova E., Müllerova I., Lejenne M.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 013117.
- [8] *Yan J.-A., Driscoll J.A., Wyatt B.K., Varga K., Pantelides S.T.* // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 224117.
- [9] *Nazaron V.U., Krasovskii E.E., Silkin V.M.* // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 041405.
- [10] *Wicki F., Longchamp J.-N., Latychevskaia T., Escher C., Fink H.-W.* // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. P. 075424.
- [11] *Longchamp J.-N., Latychevskaia T., Escher C., Fink H.-W.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 113117.