

13

## Использование графена в вакуумной микро- и наноэлектронике

© Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин,  
Г.С. Рычков, О.А. Сахаров, Е.С. Чернявская

Научно-исследовательский институт физических проблем  
им. Ф.В. Лукина, Москва  
E-mail: polt@niifp.ru, mstlana2@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.

Исследуется использование графена в качестве электрода, стимулирующего полевыми эмиссию в вакуумных микро- и наноэлектронных устройствах. Такое применение графена становится возможным вследствие его высокой проводимости, прочности и прозрачности для электронов, падающих нормально к поверхности.

В настоящее время графен привлекает внимание многих разработчиков электронной аппаратуры благодаря своим уникальным электронным и механическим свойствам. Для применения в электронной микроскопии используется свойство прозрачности графена для электронов как с высокой энергией, так и с низкой [1–3].

Поскольку графен обладает высокой проводимостью и хорошей проницаемостью для падающих нормально к плоскости графена электронов, то он почти идеально может выполнять роль сетки, используемой для стимуляции полевой эмиссии электронов. Сетка располагается от полевого эмиттера на таком расстоянии, при котором у поверхности эмиттера (при соответствующей разности напряжений между сеткой и эмиттером) возникает напряженность электрического поля, достаточная для туннелирования электронов из эмиттера в вакуум. Пока нет точных экспериментальных данных о прозрачности графена для электронов. Это связано с трудностью получения абсолютно чистого, совершенного графена. Как правило, на графене всегда остаются некоторые посторонние включения, которые искажают картину прохождения электронов через графен. Предварительную оценку ослабления электронного потока, проходящего через графен, можно получить

из выражения

$$-\frac{dE}{dl} = \frac{\pi N e^4 Z}{(4\pi\epsilon_0)^2 E} \{2 \ln 2 \ln E/E_{ion} + 1\}, \quad (1)$$

которое отражает потери энергии  $E$  электрона при его движении в веществе [4]. Здесь  $N$  — количество атомов в кубическом метре,  $Z$  — номер атома в таблице Менделеева,  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума,  $E_{ion}$  — ионизационный потенциал атома.

Будем считать, что ослабление энергии электрона при его прохождении через графен равно ослаблению в графите соответствующей толщины. Зависимость между энергией  $E_0$  электрона, падающего нормально на графитовую пластинку толщиной  $\Delta l$ , и энергией электрона  $E_1$  при выходе из пластинки легко получается из (1) в виде

$$2.2 \cdot 10^{-4} \int_{E_1}^{E_0} \frac{x dx}{1.4 \ln(x/E_{ion}) + 1} = \Delta l, \quad (2)$$

здесь размерности для  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_{ion}$  берутся в eV, а  $\Delta l$  — в nm. Полагая, что падающий электрон взаимодействует только с валентными электронами графита, за ионизационный потенциал берем первый ионизационный потенциал для углерода, равный  $E_{ion} = 11.26$  eV. При оценке необходимой энергии, которой должен обладать электрон, чтобы пройти через графен и удалиться от него, следует полагать, что электрон на выходе имеет не нулевую энергию. Для определенности будем полагать, что  $E_1 = E_{ion}$ . В работе [3] сделана теоретическая и экспериментальная оценка толщины графена, и в качестве последней принята толщина, равная двойному ковалентному радиусу углерода в графите, т. е. 0.146 nm. В свете сказанного из выражения (2) получаем, что электроны с энергией  $E_0 = 60$  eV должны легко проходить через графен. Отметим, что это лишь предварительная оценка и необходимо провести более точные экспериментальные исследования.

Как управляющий электрод для автоэмиссионного катода графен обладает уникальным свойством по сравнению с металлической сеткой. При увеличении энергии эмитирующих электронов доля рассеиваемой энергии электронов в сетке тоже увеличивается, в силу чего сетка разогревается и провисает. Графен же при увеличении энергии электронов

становится все более прозрачным и поглощает все меньше энергии. Действительно, учитывая, что толщина графена мала, выражение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \alpha \left\{ \frac{1.4 \ln E_{01} + 1}{E_{01}^2} \right\}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{Ne^4 Z \Delta l}{16\pi \epsilon_0^2 E_{ion}^2}, \quad (4)$$

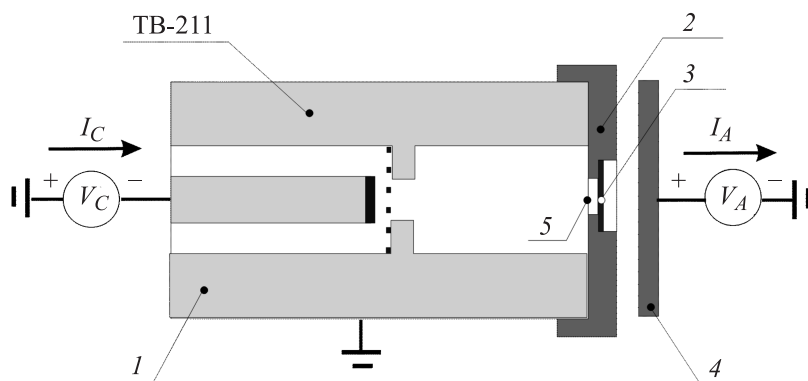
где  $\Delta E$  — энергия, передаваемая электроном графеновой мембране,  $E_{01} = E_0/E_{ion}$ ,  $\Delta l$  — толщина графеновой мембраны. Из (3) следует

$$\Delta E = 57.4 \frac{1.4 \ln E_{01} + 1}{E_{01}}. \quad (5)$$

Из (5) получаем, что при энергии электрона  $\sim 1$  keV энергия рассеивания составляет всего  $\sim 5$  eV, т.е. около 0.5% от энергии электрона, проходящего через мембрану.

Экспериментальное исследование прохождения электронов через графен было осуществлено для электронов с энергией, лежащей в диапазоне 0.44–0.6 keV. Такой диапазон был обусловлен использованием в экспериментальной установке полевого автоэмиссионного катода ТВ-211 фирмы HeatWave Labs Inc., который обеспечивал эмиссию электронов при напряжении между сеткой и катодом более 400 V. Схема экспериментальной установки (ЭУ) представлена на рис. 1.

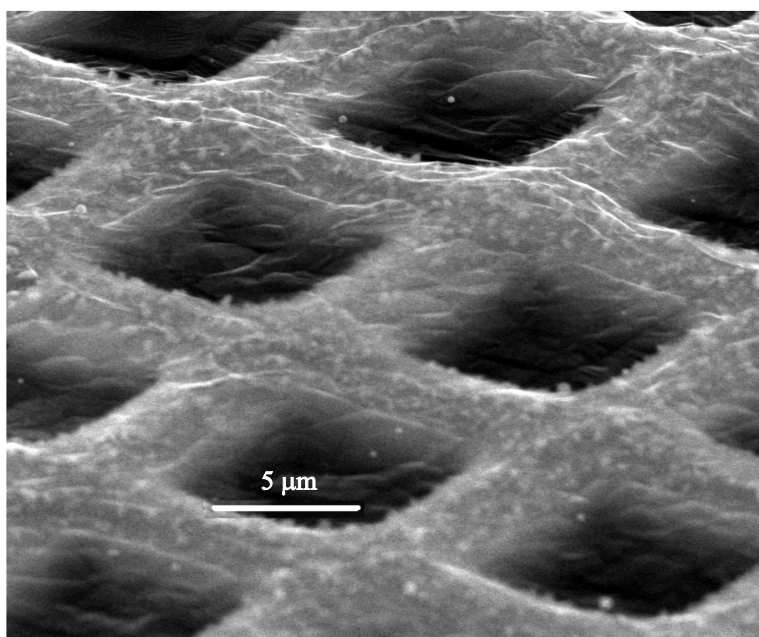
ЭУ состоит из катода ТВ-211 1, на выходе которого располагается оснастка 2, включающая графеновый образец (ГО) 3 и анод 4. На катод подавалось регулируемое напряжение  $V_C$ , а на анод — напряжение  $V_A$ . Корпус катода ТВ-211 заземлялся. В качестве графеновых образцов использовались как образцы НИИФП, полученные в рамках ГК № 14.740.11.0060, так и образцы CVD Graphene TEM Grid on Copper. Образцы НИИФП изготавливались посредством термодиффузии ( $T \sim 1000^\circ\text{C}$ ) атомов углерода из аморфной кремний-углеродной пленки в присутствии катализатора Ni, что позволяет сразу формировать графен на диэлектрике. Для исследования графен размещался на медной сетке диаметром  $\sim 3$  mm, шагом  $\sim 12 \mu\text{m}$  и размером ячейки  $\sim 7 \times 7 \mu\text{m}$  (рис. 2). Каждая ячейка закрыта одним или несколькими слоями графена (но не более 6). ГО крепился за отверстием 5 (рис. 1)



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования прохождения электронов через графен.

диаметром 1.5 mm. Через это отверстие поток электронов падает на ГО, и та его часть, которая проходит через графен, попадает на анод, создавая анодный ток  $I_A$ . Анод 4 удален от ГО 3 на расстояние 1 mm. Экспериментальная установка помещается в вакуумную камеру, в которой создается давление  $3 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-7}$  Торр.

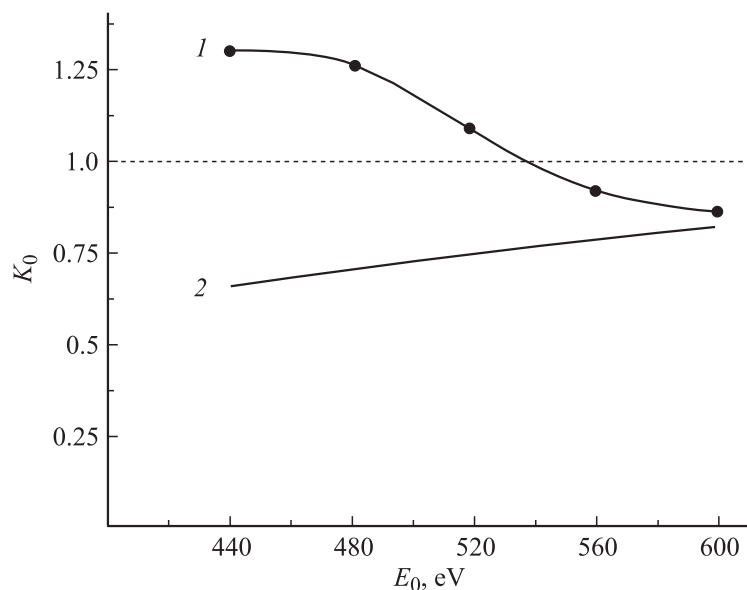
На рис. 3 в виде кривой  $I$  представлена экспериментальная зависимость коэффициента  $K_0$  (отношение потока электронов, прошедших через графен, к потоку падающих электронов) от энергии падающих электронов. Оценка потока электронов проводилась с учетом вторичной эмиссии электронов, которая возникает при падении первичных электронов на медную сетку. Известно, что при энергии первичных электронов 250–500 eV коэффициент вторичной эмиссии электронов из меди может достигать значений 1.5–2 [5]. Поскольку энергия вторичных электронов не превышает 5–10 eV, то вторичные электроны не проходят через графен. Однако если считать поток падающих электронов равным току  $I_A$  (при отсутствии на сетке графена), то эти вторичные электроны будут вносить заметный вклад в  $I_A$ . Поэтому оценка падающего потока электронов производилась измерением потока, проходящего через отверстие 5 (при отсутствующем ГО), и его масштабированием на коэффициент прозрачности медной сетки. К сожалению, низкоэнергетические электроны появляются в падающем



**Рис. 2.** Электронная микрофотография графена, расположенного на медной сетке.

потоке также и из-за соударения электронов с управляющей сеткой катода ТВ-211 (рис. 1). Поэтому пришлось делать соответствующую поправку, учитывающую и эти вторичные электроны.

Из анализа прохождения электронов через графит толщиной  $\Delta l$  следует, что отношение энергии электрона, выходящего из графита толщиной в 6 слоев, к энергии электрона, падающего на этот слой (в диапазоне 440–600 eV), подчиняется зависимости, представленной на рис. 3 (кривая 2). Видно, что это отношение растет. В то же время это отношение, полученное экспериментально, убывает. Более того, для значений энергии 440–540 eV отношение  $K_0$  превышает единицу, что, на первый взгляд, противоречит пониманию исследуемого явления. Однако последнее объясняется просто. Проходящие через графен электроны тратят энергию также и на рождение вторичных электронов,



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента прохождения электронов от их энергии: 1 — экспериментальная кривая, 2 — теоретическая кривая.

которые, выходя в вакуум, увеличивают количество электронов. При увеличении энергии первичных электронов, как это было отмечено выше, отдаваемая первичными электронами энергия уменьшается, следовательно, и количество вторичных электронов уменьшается также. То, что в этом случае  $K_0$  уменьшается, объясняется несовершенством графена, так как последний имеет множество включений, в том числе и частиц металла, на фольге которого он размещен. Роль этих включений как поглощающих и рассеивающих центров становится все заметнее по мере уменьшения числа вторичных электронов. Кроме того, исследуемый графен имел поликристаллическую структуру. Поэтому области стыковки поликристаллов играли роль своеобразных несовершенств, ухудшающих прохождение электронов.

Пока получаемый графен имеет ряд недостатков: поликристалличность, многослойность, наличие включений. Но эксперимент даже с

этим графеном демонстрирует потенциальные возможности его применения в автоэмиссионных катодах (вместо металлических сеток) в диапазоне напряжений 400–1000 V. Более же совершенный графен позволит уменьшить рабочие напряжения до значений менее 100 V, возможно, до десятка вольт. Однако для этого следует провести более детальный анализ.

Мы полагаем применить графен для получения высокоэффективных катодно-сеточных узлов, которые требуются для разработки СВЧ устройств терагерцового диапазона. В качестве эмиссионных катодов хорошо подходят алмазные микро- и наноконусы, для формирования которых будет использована технология, описанная в [6].

## Список литературы

- [1] *Booth T.J., Blake P. et al. // Nano Letters. 2008. V. 8. P. 2442–2446.*
- [2] *Geim A.K. // SCIENCE. 2009. V. 324. P. 1530–1534.*
- [3] *Mutus J.Y., Livadaru L., Robinson J.T. et al. // NJP. 2011. V. 13. P. 1–11.*
- [4] *Эберт Г. Краткий справочник по физике. М., 1963. 552 с.*
- [5] *Baglin V., Collins I., Grobner O. et al. Secondary electron emission: experimental results and their implications. CERN–LHC/VAC, NH–2 STREAMS/01.*
- [5] *Белоусов М.Э., Ильичев Э.А., Кулешов А.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 5. С. 49–55.*