Письма в ЖЭТФ, том 94, вып. 4, с. 353 – 356

Семейство сверхпроводниковых устройств на основе графена

М. Тарасов[△□1)], *Н. Линдвалл*[△2)], *Л. Кузьмин*[△], *А. Юргенс*[△]

[△] *Chalmers University of Technology, SE41296 Gothenburg, Sweden*

[□] *Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 июля 2011 г.

Разработано, изготовлено и исследовано семейство высокочувствительных устройств на основе наномостика из графена и сверхпроводниковых электродов, которые могут стать основой для создания интегрального приемника на базе графена. Исследован прототип болометра на холодных электронах с туннельными переходами сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН). Измерен его отклик на изменение температуры и внешнего СВЧ-излучения. Исследован сверхпроводниковый квантовый интерферометр с полоской графена в качестве слабой связи между сверхпроводящими электродами. Измерена соответствующая модуляция напряжения магнитным полем при заданном токе. Для этих образцов исследовано влияние напряжения затвора на сопротивление графена. Для подтверждения однослойности графена проведено измерение его толщины в атомно-силовом микроскопе, а также квантового и эффекта.

Присоединение сверхпроводниковых электродов к графену позволяет исследовать явления с участием эффекта близости, включая множественное андреевское отражение [1, 2], а также создавать различные устройства, такие, как настраиваемые сверхпроводящие цепи [3], сверхпроводящие квантовые интерферометры (сквиды) [4] и т.п. Наноструктуры на основе мостиков графена представляют интерес с точки зрения создания высокочувствительных приемных и измерительных криогенных устройств, поскольку обладают такими уникальными характеристиками, как предельно малая толщина (в один атомный слой), высокая подвижность носителей и их нулевая масса. Эти параметры позволяют получить предельные характеристики приемных и измерительных устройств, по оценкам значительно превосходящие существующие традиционные устройства, такие, как болометры и квантовые интерферометры. Оценим, например, предельные характеристики болометра на холодных электронах (БХЭ) [5, 6]. Под действием микроволнового излучения мощностью P электронная температура T_e при милликельвиновых температурах изменяется как

$$T_e^5 = P(\Lambda\Sigma)^{-1}, \tag{1}$$

где Σ – параметр материала, Λ – объем абсорбера. Для оценки чувствительности обычно используют величину отклика по напряжению S_U, и эквивалентную мощность шума NEP. Отклик S_U можно записать как

$$S_U = \frac{\partial U_0/\partial T_e}{G_{e-\mathrm{ph}} + G_{\mathrm{SIN}}}, \tag{2}$$

где $G_{e-\mathrm{ph}} = 5\Sigma\Lambda T_e^4$ характеризует эффективную теплопередачу между электронной и фононной подсистемами абсорбера, $G_{\mathrm{SIN}} = \partial P/\partial T$ есть эффективная теплопередача СИН-перехода, посредством которой из абсорбера удаляются самые горячие электроны. Одновременно G_{SIN} обеспечивает электронное охлаждение и позволяет избежать перегрева абсорбера. Шумовые свойства характеризуются NEP, которая может быть описана суммой из трех слагаемых:

$$\mathrm{NEP}^2 = 10k_{\mathrm{B}}\Sigma\Lambda(T_e^6 + T_{\mathrm{ph}}^6) + \delta U_{\mathrm{SIN}}^2 S_U^{-2} + \delta U_{\mathrm{amp}}^2 S_U^{-2}. \tag{3}$$

Здесь первый член представляет собой термодинамический шум электрон-фононного взаимодействия. Второй член есть дробовой шум туннельных СИН-переходов. Последний член описывает вклад шумов последующего усилителя. Из этой формулы видно, что уменьшение объема приводит к значительному снижению NEP. При прочих равных условиях при замене стандартной топологии БХЭ с абсорбером толщиной 15 нм на графен толщиной 0.3 нм мы получим выигрыш по NEP в 7 раз.

Обычно БХЭ изготавливают по традиционной технологии напыления пленок алюминия и других металлов через подвешенную маску под разными углами. Нижний слой алюминия окисляют для формирования туннельного барьера, после чего напыляют абсорбер из нормального металла [7]. В этом случае абсорбер не может быть тоньше первого слоя (50–100 нм), что не позволяет существенно снизить объем абсорбера. В нашем случае последовательность напыления слоев изменена, т.е. абсорбер наносится первым, что позволяет уменьшить его толщину до 10 нм [8]. Ранее нами была предпринята попытка ра-

1) e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru
2) N. Lindvall.

дикально уменьшить объем БХЭ за счет применения углеродных нанотрубок [9]. Такие БХЭ с нанотрубками показывают конечный отклик на микроволновый сигнал. Однако слишком большое контактное сопротивление приводит к рассогласованию импедансов, что значительно уменьшает чувствительность устройства. Объем графенового абсорбера эквивалентной толщины 0.3 нм при той же площади сокращается в 50 раз по сравнению со стандартным металлопленочным толщиной 15 нм. Помимо этого, можно ожидать снижения параметра материала Σ за счет нулевой массы электронов и дырок в графене.

Болометр на холодных электронах состоит из полоски абсорбера, подключенной к электродам антенны через туннельные переходы типа СИН с обеих сторон. В нашем случае графеновый абсорбер получается методом механического отслаивания чешуек графита и перенесения их на стандартную кремниевую подложку 7×7 мм, покрытую слоем окиси кремния. Перед нанесением графена на подложке формируются Au/Ti контактные площадки и пленочные метки для дальнейшего совмещения. Координаты чешуек графена по отношению к меткам определяются с помощью оптического и атомно-силового микроскопов. Для подтверждения однослойности полученных графеновых фрагментов применялось измерение квантового эффекта Холла. Холловские графеновые устройства, изготовленные на таких же подложках, демонстрировали характерный для однослойного графена полуцелый квантовый эффект Холла. Чешуйки в болометрах и интерферометрах с таким же оптическим контрастом оценивались как однослойные. С использованием электронной литографии формировалась маска резиста, через которую проводилось плазменное травление графена в кислороде. В результате получались мостики графена размером 5.5×2 мкм^2. Затем изготавливались прямоугольные СИН-переходы размером 1.5×2 мкм^2 с каждого края графеновой полоски. Переходы представляли собой трехслойную структуру, состоящую из 1.5 нм хрома, 10 нм алюминия, его окисла, образованного в результате окисления в течение 5 мин в атмосфере кислорода при давлении 5×10^{-2} мбар, 70 нм алюминия и 5 нм палладия. После "взрыва" резиста в ацетоне проводилась третья литография с формированием алюминиевых подводящих проводников толщиной 80 нм. Первый слой Cr/Al не является сверхпроводником. Он представляет собой нормальный электрод СИН-перехода. Изображение такого болометра с графеновым абсорбером в атомно-силовом микроскопе представлено на рис. 1. Его вольт-амперные характеристики приведены на рис. 2, а отклики – на рис. 3.

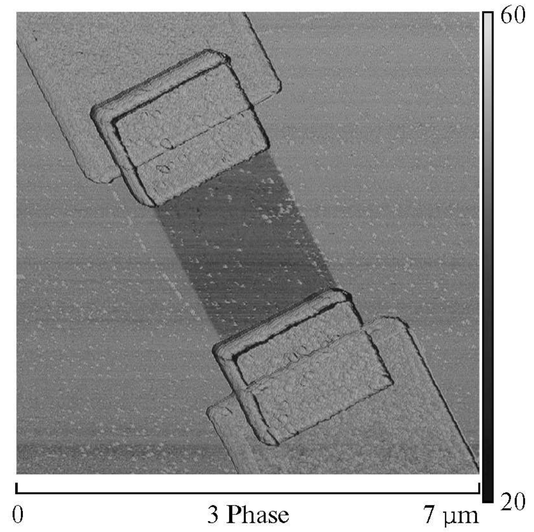

Рис. 1. Изображение болометра, полученное в микроскопе атомных сил.

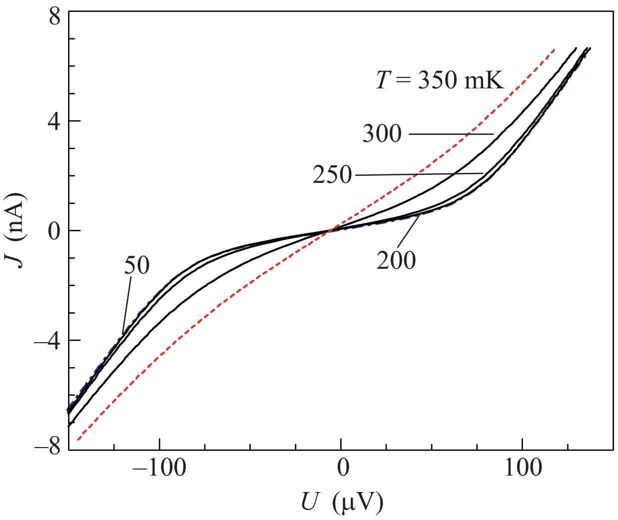

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики болометрических структур при температурах 50, 200, 250, 300 и 350 мК

Мы также исследовали образцы с непосредственным контактом Al/Ti (40/2.5 нм) электродов с графеном без дополнительных СИН-переходов. Расстояние между сверхпроводящими электродами варьировалось от 0.3 до 3 мкм. При изготовлении сквидов применялась такая же технология. Образцы сверхпроводящего квантового интерферометра (сквида) представляли собой незамкнутую сверхпроводящую петлю из алюминиевой пленки диаметром 20 мкм и графенового мостика в разрыве петли. Полоска графена имела дополнительные электрические контакты, которые позволяли подавать ток и снимать напряже-

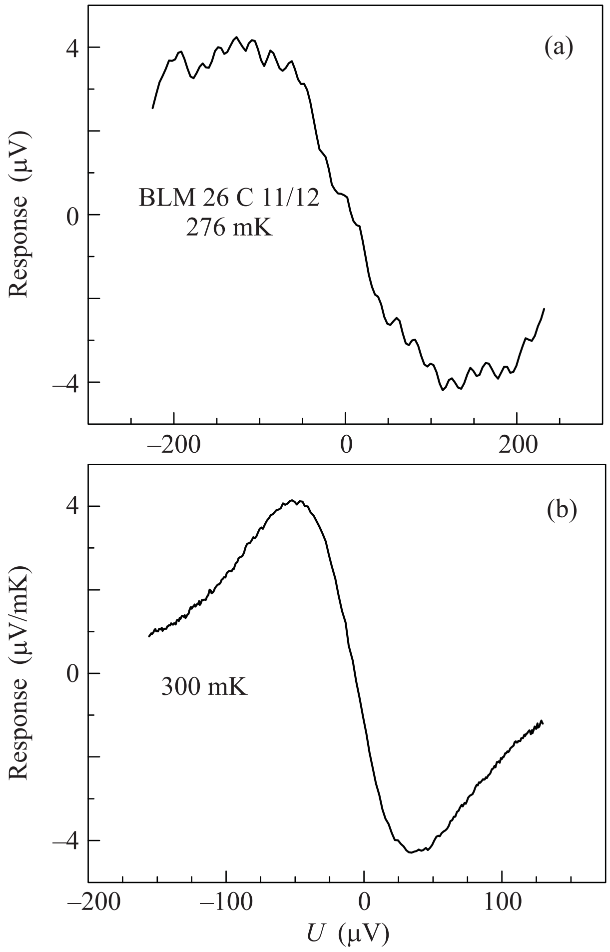

Рис. 3. (a) – Отклик по напряжению на излучение на частоте 110 ГГц. (b) – Отклик по напряжению на изменение температуры

ние из середины графенового мостика. Алюминиевые контакты на краях графена индуцировали минищель в нормальном проводнике и обеспечивали сверхпроводящую слабую связь между концами сверхпроводящей петли. Образцы изготавливались на оксидированных кремниевых подложках размером 7×7 мм^2 с 16 контактными площадками по краям. На одном чипе были сформированы два сквида. Изображение одного из сквидов приведено на рис. 4. Для исследования модуляции магнитным полем имелась возможность подавать ток как через основную петлю (контактные площадки 3/16), так и через дополнительную петлю (контакты 6/14). Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) сквида проведено четырехзондовым методом с использованием контактов D1, D2 и S1, S2.

Образцы БХЭ с туннельными переходами, СНС-графеновые переходы и интерферометры исследованы в криостате растворения TRITON (Oxford

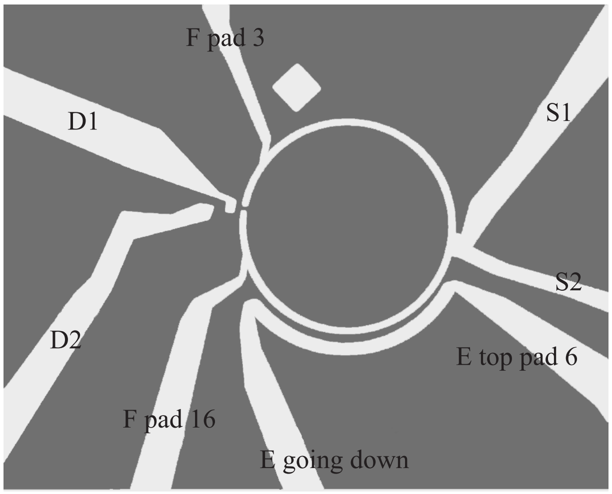

Рис. 4. Структура интерферометра, где контакты D1, D2 и S1, S2 используются для четырехзондового измерения ВАХ интерферометра. Ток через петлю интерферометра задается через контакты *3* и *16*

Instruments) при температурах 50–350 мК и в сорбционном криостате с оптическим окном HELIOX-ACV (Oxford Instr.) при температуре 277 мК. Для снижения влияния наводок и внешних магнитных полей образцы помещали в двойной экран из сверхпроводящего ниобия и криогенного пермаллоя. На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики образца с СИН-переходами при температурах от 50 до 350 мК. Видно, что ВАХ мало изменяется при температурах ниже 250 мК. Исследования влияния излучения на частоте 110 ГГц на ВАХ таких болометров показали зависимость отклика от напряжения, сходную с аналогичными зависимостями для традиционных металлопленочных болометров с алюминиевыми электродами. Как показано на рис. 3a, максимум отклика наблюдается при напряжениях смещения в районе 100–150 мкВ. Максимум отклика по напряжению на изменение температуры составил 0.4 мкВ/мК при напряжении смещения 50 мкВ, см. рис. 3b.

Также были исследованы ВАХ и дифференциальное сопротивление образцов, в которых алюминиевые электроды находились в непосредственном контакте с графеном. В этом случае в графене возникает наведенная сверхпроводимость и наблюдается критический ток, который может быть подавлен магнитным полем или повышением температуры образца. Аналогичные эффекты приводят к появлению джозефсоновской слабой связи в сверхпроводящем интерферометре. Как и в классическом металлопленочном сквиде, в нашей структуре интерферометра наблюдалась модуляция критического тока магнитным полем. Особенностью такого сквида являются достаточно высокое сопротивление (250 Ом) и безгистерезисная характеристика при температурах на уровне 50 мК. Глубина модуляции напряжения магнитным полем при некотором токе достигала 20 мкВ. Вольт-амперная характеристика сквида в диапазоне температур от 63 до 300 мК остается практически неизменной. Критический ток составляет 0.2 мкА. Нормальное сопротивление 250 Ом. Форма ВАХ качественно несколько отличается от сквидов с традиционными джозефсоновскими переходами и имеет избыточный ток. Модуляция напряжения током через индуктивную петлю представлена на рис. 5. Глубина модуляции 16 мкВ, сравнима с коммерчески-

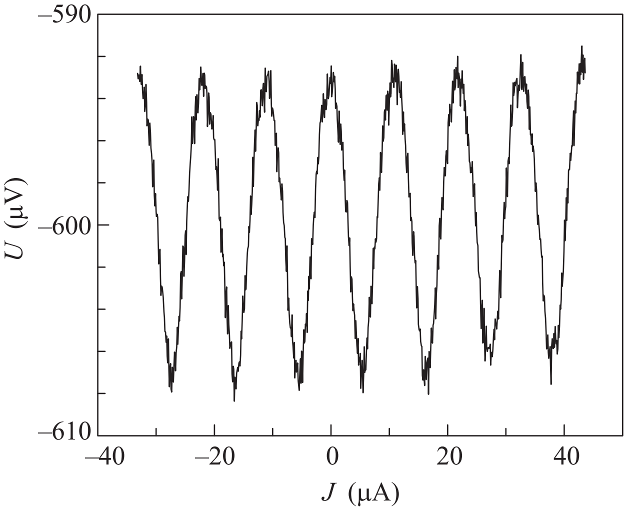

Рис. 5. Модуляция напряжения на интерферометре под действием тока через петлю сквида

ми ниобиевыми сквидами с шунтированными СИС-переходами и соответствует вольт-потоковой чувствительности $dU/d\Phi = 50$ мкВ$/\Phi_0$. Отличительной особенностью такой модуляции является ее достаточно протяженная область тока смещения: до 4 мкА, или 1 мВ (рис. 6). Это значительно больше критического тока 0.2 мкА. Этот эффект может возникать за счет процесса, аналогичного протекающему в андреевском интерферометре, в котором сопротивление модулируется магнитным полем.

Итак, нами разработано, изготовлено и исследовано семейство сверхпроводниковых устройств с использованием графена в качестве активного элемента. При температурах 50–350 мК исследованы джозефсоновские переходы на эффекте близости с непосредственной проводимостью, туннельные переходы типа сверхпроводник–изолятор–нормальный металл с графеном в качестве нормального металла. Для прототипа болометра на холодных электронах измерены отклик по напряжению на изменение тем-

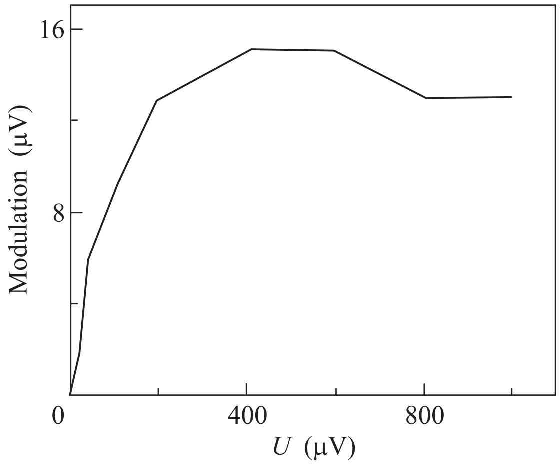

Рис. 6. Зависимость глубины модуляции от напряжения смещения на интерферометре

пературы, $dU/dT = 0.4$ мкВ/мК, и внешнее СВЧ-излучение ($f = 110$ ГГц). Измерена вольтпотоковая характеристика сверхпроводящего квантового интерферометра с джозефсоновской слабой связью с глубиной модуляции $dU/d\Phi = 50$ мкВ$/\Phi_0$. Критический ток составляет 0.2 мкА, нормальное сопротивление 250 Ом. Полученные результаты и устройства могут быть использованы для создания интегральной сверхпроводниковой приемной микросхемы на основе графена с болометром на холодных электронах в качестве приемника терагерцового излучения и графенового сквида в качестве устройства считывания.

Авторы благодарны Шведскому институту, Шведскому исследовательскому совету и Шведскому фонду стратегических исследований за финансовую поддержку. Изготовление образцов производилось в чистой комнате на оборудовании, субсидированном Фондом Кнута и Алис Валленберг. Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ # 11-02-12145-офи-м-2011.

1. X. Du, I. Skachko, and E. Y. Andrei, Phys. Rev. B **77**, 184507 (2008).
2. F. Miao, C. N. Lau et al., Science **317**, 1530 (2007).
3. F. Morpurgo et al., Nature **446**, 56 (2007).
4. C. Girit, I. Siddiqi et al., Nano letters **9**, 198 (2009).
5. L. Kuzmin, Proc. SPIE **5498**, 349 (2004).
6. L. Kuzmin and D. Golubev, Physica C **372–376**, 378 (2002).
7. A. Agulo, L. Kuzmin, and M. Tarasov, Proc. 16 ISSTT **147** (2005).
8. M. Tarasov, L. Kuzmin, N. Kaurova, et al., Proc. 21 ISSTT (2010).
9. M. Tarasov, J. Svensson, L. Kuzmin, and E. Campbell, Appl. Phys. Lett. **90**, 163503 (2007).