

Болометр на основе углеродных нанотрубок

М. Тарасов^{+*1)}, Дж. Свенссон^{△2)}, Дж. Вейс^{* 2)}, Л. Кузьмин^{+*}, Е. Кемпбелл^{△ 2)}

⁺ Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия

^{*} Chalmers University of Technology, SE41296 Gothenburg, Sweden

[△] Gothenburg University, SE41296 Gothenburg, Sweden

Поступила в редакцию 28 июня 2006 г.

После переработки 26 июля 2006 г.

С целью создания болометров и электронных охладителей исследованы контакты одиночных углеродных нанотрубок (УНТ) и пучков УНТ со сверхпроводящими и металлическими электродами. Получены туннельные контакты УНТ с алюминиевыми электродами. Исследованы вольт-амперные характеристики переходов при температурах от комнатной до 300 мК. Сопротивление отдельных нанотрубок, в основном, определяется дефектами и оказывается слишком высоким для практических применений. При использовании пучков нанотрубок удается существенно снизить сопротивление болометра, которое определяется небольшим количеством проводящих трубок, имеющих достаточно хорошие туннельные контакты с электродами. Энергетическая щель в первом случае составляет сотни милливольт, а во втором – десяток милливольт. Структуры, содержащие пучки углеродных нанотрубок, могут быть описаны в рамках модели с барьером Шоттки. Образцы с пучками УНТ продемонстрировали болометрический отклик на внешнее высокочастотное облучение на частоте 110 ГГц с амплитудой до 100 мкВ и температурный отклик по напряжению до 0.4 мВ/К.

PACS: 74.50.+r, 85.25.Pь

Ранее было показано теоретически, что возможен сильный болометрический эффект и эффективное электронное охлаждение в болометрических структурах с переходами сверхпроводник – изолятор – нормальный металл (СИН) [1]. Экспериментально получено электронное охлаждение с 300 до 100 мК [2]. Оценки предельных характеристик предлагаемых устройств можно сделать, исходя из соотношения для передачи энергии от электронов к фононам: $P = \Sigma \nu (T_e^5 - T_o^5)$, или для электронной температуры $T_e = (T_o^5 + P/\Sigma \nu)^{1/5}$, где Σ – постоянная материала, ν – объем абсорбера, T_o – фононная температура. Из этих выражений видно, что для повышения эффективности разогрева абсорбера излучением и улучшения электронного охлаждения ниже температуры решетки нужно существенно снижать объем абсорбера. В обычном болометре с металлическим тонкопленочным абсорбером, изготовленным с использованием электронной литографии [3], объем составляет $10 \times 0.2 \times 0.05$ мкм, а для той же длины углеродных нанотрубок (УНТ) объем составит $10 \times 0.001 \times 0.001$ мкм, то есть на 4 порядка меньше.

Обычно считают, что одностенные углеродные нанотрубки имеют диаметр в диапазоне 1–4 нм и со-

стоят из свернутого в цилиндр листа графена. В зависимости от структуры связей проводимость нанотрубки может быть полупроводниковой, металлической или сверхпроводящей [4]. Многостенные нанотрубки могут быть диаметром до 50 нм и в некоторых случаях быть сверхпроводящими при температурах ниже 12 К. Существующие технологии позволяют выращивать одиночные нанотрубки между электродами на подложке, или наносить приготовленные УНТ на подложку между электродами манипуляцией электрическим полем. Отдельной проблемой является формирование электрических контактов с нанотрубками. Если считать УНТ одномерным объектом, то сопротивление на границе с трехмерным электродом не может быть меньше квантового $R_Q = h/2e^2 = 12.9$ кОм на одну моду [5]. Поскольку электроны имеют две ориентации спина, то наименьшее возможное сопротивление контакта с одномерным проводником будет не ниже 6.5 кОм [6].

Изготовление образцов. В нашей работе УНТ изготавливали методом CVD (chemical vapor deposition) и PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition) [7–9] каталитическим синтезом из газовой фазы гидрогенацией ацетилена на зародышах из железа, никеля или ниобия при температуре 900 °С при атмосферном давлении. Второй метод применялся для формирования нанотрубок меж-

¹⁾ e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

²⁾ J. Svensson, J. Weis, E. Campbell.

ду заостренными электродами непосредственно на подложке. После нанесения на подложку или формирования на подложке поверх УНТ наносили сверхпроводниковые электроды из алюминия. Такой метод позволяет создавать, в том числе, и металлические УНТ.

Были разработаны и изготовлены фотошаблоны для обоих методов получения УНТ. В качестве нижнего слоя наносится пленка ниобия с заостренными точками роста, между которыми вырастают либо электрически выстраиваются нанотрубки (см. рис.1). Во втором случае между электродами нано-

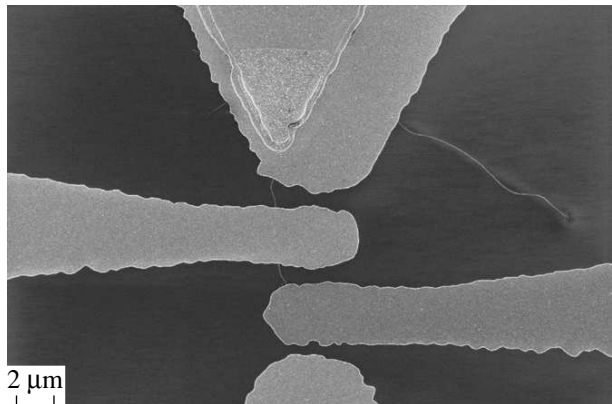


Рис.1. Две нанотрубки, выращенные на кремниевой подложке и покрытые алюминиевыми электродами

сили небольшие капли раствора, содержащего нанотрубки со средним диаметром около 1.5 нм. К электродам прикладывали переменное напряжение амплитудой около 2 В/мкм в течение 3–10 с. Таким образом под действием механизма диэлектрофореза нанотрубки притягивались к подложке и располагались в зазоре между электродами, где приклеивались к подложке силами Ван-дер-Ваальса. В зависимости от параметров процесса была возможность наносить как одиночные нанотрубки, так и пучки нанотрубок. В случае пучков с тысячами трубок до одной трети из них могли быть полуметаллическими с малой щелью и до 1/20 полностью металлическими. Процесс диэлектрофореза использован для управления и ускорения процесса укладывания нанотрубок. Переменное напряжение приводит к поляризации нанотрубок. В статическом поле трубки бы просто располагались вдоль линий поля по направлению к электродам. Поскольку поле неравномерно, то силы с разных концов трубок будут различаться, и они будут колебаться вперед-назад в переменном поле, располагаясь вдоль направления поля. За счет этих движений дипольный момент будет взаимодействовать с полем и вызывать силы по направлению вниз к подложке.

На втором этапе формировали два или четыре контакта с трубкой путем нанесения алюминиевых электродов, либо трехслойных электродов из пленок титана толщиной 0.5 нм, палладия толщиной 5 нм и алюминия толщиной 100 нм. После извлечения из напылительной установки поверхность алюминия на границе с УНТ могла окисляться и формировать туннельный барьер. В случае палладия мог формироваться барьер Шоттки на границе металла с полупроводниковой или полуметаллической трубкой. При этом титан был использован для улучшения адгезии, а палладий использован по причине хорошей смачиваемости с УНТ.

Эксперимент. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных переходов с одиночными нанотрубками (рис.1) представлены на рис.2. При из-

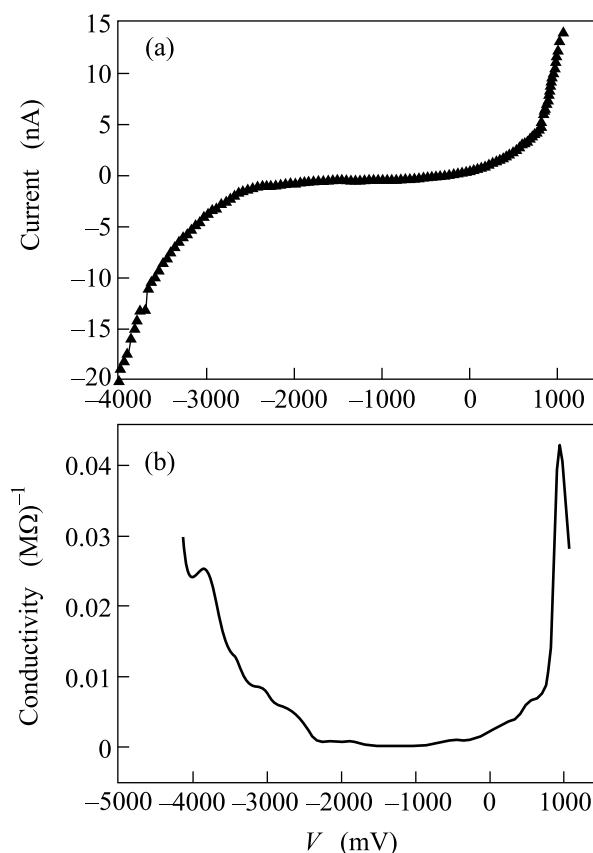


Рис.2. ВАХ (А) и дифференциальная проводимость (В) туннельного перехода Al-AlO_x-CNT, измеренная по трехзондовой схеме при температуре 176 К

мерении по 3-зондовому методу на ВАХ наблюдаются два энергетических барьера, один около 2 эВ, соответствующий алюминию, и другой при 0.5 эВ, что соответствует углероду. Изготовленные нанотрубки содержали много дефектов, и в результате их сопротивление оказалось очень высоким, причем можно

говорить об одноэлектронном механизме туннельной проводимости и эффекте кулоновской блокады при температуре в районе 300 мК.

Для снижения сопротивления болометров за счет высокой проводимости металлических нанотрубок с малым количеством дефектов в следующей серии экспериментов были исследованы пучки УНТ. В этом случае сопротивление будет определяться самыми низкоомными трубками, и число их будет сравнительно небольшим, поскольку доля металлических трубок составляет обычно несколько процентов. Фотография одного из таких образцов приведена на рис.3, а ВАХ – на рис.4. Сопротивление такой структуры при температуре 300 мК составляет несколько

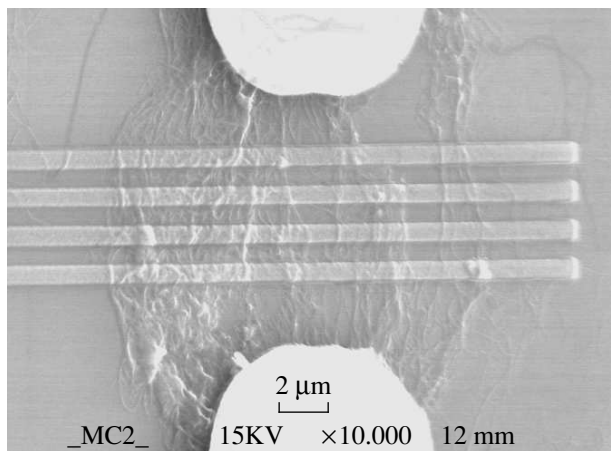


Рис.3. Изображение пучка нанотрубок с четырьмя алюминиевыми электродами

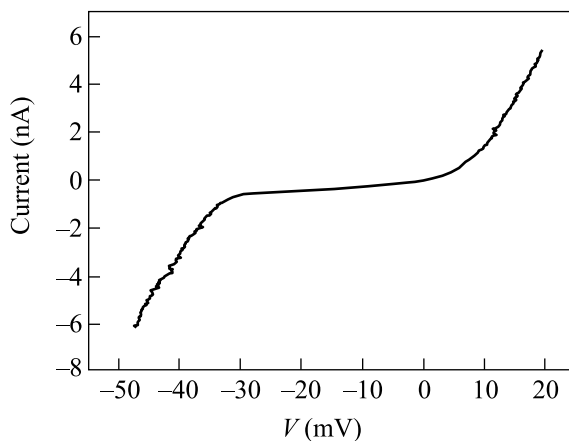


Рис.4. ВАХ пучка нанотрубок, измеренная по двухзондовой схеме при температуре 300 мК

килоом, в отличие от одиночных трубок сопротивлением порядка Гигаом при той же температуре. В области малых смещений присутствуют несимметричные относительно нуля участки с малым динамическим сопротивлением. Естественным объяснением

этих участков может быть модель полупроводникового перехода. При наличии многих параллельных трубок часть из них может быть представлена в эквивалентной схеме как два встречно включенных диода, часть – как антипараллельное соединение диодов. Важной величиной является масштаб этой нелинейности и возможной энергетической щели или барьера, которая оказывается порядка сотен милливольт для одиночных, предположительно полупроводниковых, УНТ и порядка десяти милливольт для пучков с преобладанием проводимости металлических и полуметаллических трубок. В зависимости от температуры такая нелинейность может быть описана как диод с барьером Шоттки (полупроводник – нормальный металл), либо как супер-Шоттки диод (сверхпроводник – полупроводник).

Мы измерили отклик по напряжению пучка углеродных нанотрубок при воздействии высокочастотного облучения. Источником сигнала на частоте 110 ГГц был генератор на основе лавино-пролетного диода с выходной мощностью около 10 мВт. Сигнал ослаблялся в поглотителе ECCOSORB, модулировался механическим модулятором и через оптическое окно с холодными ИК фильтрами подавался на образец, содержащий пучок нанотрубок. Подложка с образцом монтировалась на плоской поверхности удлиненной гиперполусферической кремниевой линзы диаметром 12.6 мм. По нашим оценкам, мощность сигнала, поглощаемая болометром, была существенно меньше 1 нВт. На образец задавали постоянный ток смещения и измеряли отклик, который выделялся на синхронном детекторе, по напряжению. Результаты измерений отклика и ВАХ при температуре 4.2 К представлены на рис.5. Максимальный вы-

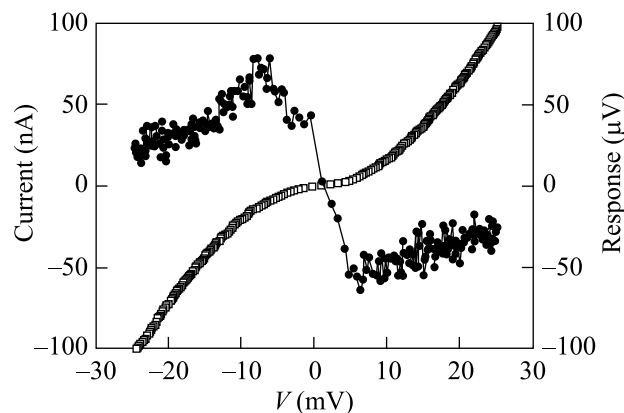


Рис.5. ВАХ пучка УНТ и отклик по напряжению на излучение на частоте 110 ГГц, измеренные при $T = 4.2$ К

ходной сигнал достигал 100 мкВ. Качественно ВАХ и отклик УНТ болометра похожи на ВАХ и отклик

обычного болометра типа сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) с полоской нормального металла в качестве абсорбера [3], но с большим значением энергетической щели.

Были измерены зависимости напряжения на том же образце от температуры при заданном токе 0.3 мкА (рис.6). Значения $dV/dT = 0.4$ мВ/К

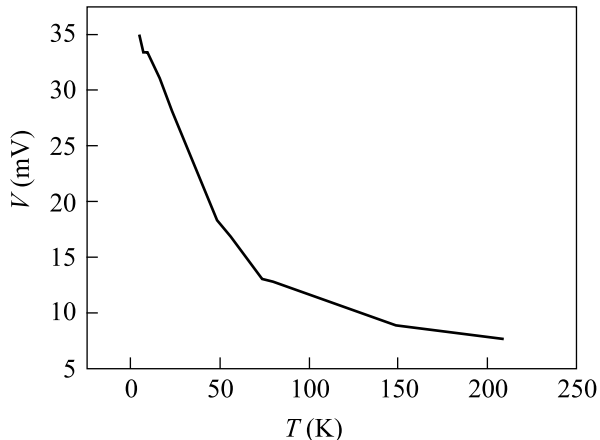


Рис.6. Напряжение на образце при заданном токе 0.3 мкА в зависимости от температуры

оказались близки к величинам температурного отклика для металлических тонкопленочных СИНИС болометров [3].

Обсуждение результатов. Для объяснения полученных результатов удобно воспользоваться моделью нелинейности типа диода с барьером Шоттки (ДБШ). Вольт-амперную характеристику ДБШ можно представить как $I = I_s[\exp(eV/\eta k_b T) - 1]$, где I – ток через барьер, V – напряжение, I_s – ток насыщения, e – заряд электрона, T – температура, k_b – постоянная Больцмана, η – фактор неидеальности перехода. Важным параметром ДБШ является его частота среза, которая определяется сопротивлением растекания и емкостью. Для современных ДБШ эта величина может превышать плазменную частоту 20 ТГц [10]. Для слаболегированных диодов хороший детекторный отклик может наблюдаться до 30 ТГц [11]. Шумовая температура смесителя на ДБШ может опускаться до 3500 К на 2.5 ТГц [12]. Основным фактором, ограничивающим характеристики ДБШ смесителей, является распределенное сопротивление, которое пропорционально диаметру перехода и может быть предельно малым в нашем случае УНТ. Следует также упомянуть возможность реализации электронного охлаждения в структуре сверхпроводник – полупроводник [13]. При оптимизации технологии

изготовления такой эффект может наблюдаться и в образцах с пучками УНТ. Можно еще упомянуть диоды супер-Шоттки в качестве прямых детекторов излучения с мощностью, эквивалентной шуму (МЭШ), равной $5 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2} и в качестве смесителя с шумовой температурой около 6 К, как это было показано в [14]. Можно ожидать в пучках УНТ комбинацию обоих эффектов – электронного охлаждения и болометрического отклика. К числу достоинств ДБШ следует отнести отсутствие необходимости формирования дополнительного туннельного барьера, поскольку барьер Шоттки автоматически формируется на границе между полупроводником и нормальным металлом. В качестве подтверждения нашей модели можно привести недавние публикации по исследованию Шоттки диодов с УНТ в [15] и экспериментального исследования болометрического фотоотклика в подвешенной пленке из одностенных нанотрубок [16].

Работа выполнена при поддержке Swedish Institute, Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-19650, ФАНИ # 02.434.11.1010.

1. L. Kuzmin, I. Devyatov, and D. Golubev, Proc. of SPIE **3465**, 193 (1998).
2. L. Kuzmin, I. Agulo, M. Fominsky et al., Superconductor Science and Technology **17**, 400 (2004).
3. M. Tarasov, M. Fominsky, A. Kalabukhov, and L. Kuzmin, JETP Letters **76**, 507 (2002).
4. I. Takesue, J. Haruyama, N. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 057001 (2006).
5. Y. Imry and R. Landauer, Rev. Mod. Phys. **71**, 2 (1999).
6. K. S. Yngvesson, Appl. Phys. Lett. **87**, 043503 (2005).
7. <http://www.fy.chalmers.se/atom/research/nanotubes/production.xml>
8. S. Dittmer, J. Svensson, and E. Campbell, Current Appl. Phys. **4**, 595 (2004).
9. R. E. Morjan, M. S. Kabir, S. W. Lee et al., Current Appl. Phys. **4**, 591 (2004).
10. K. S. Champlin and G. Eisenstein, IEEE Trans. MTT **26**, 31 (1978).
11. D. Tsang and S. Schwartz, Appl. Phys. Lett. **30**, 263 (1977).
12. M. Gaidis, H. Pickett, C. Smith et al., IEEE Trans. MTT **48**, 733 (2000).
13. A. Savin, M. Prunnila, P. P. Kivinen et al., Appl. Phys. Lett. **79**, 1471 (2001).
14. F. Vernon, M. Millea, M. Bottjer et al., IEEE Trans. MTT **25**, 286 (1977).
15. M. Yang, K. Teo, W. Milne, and D. Hasko, Appl. Phys. Lett. **87**, 253116 (2005).
16. M. Itkis, F. Borondics, A. Yu, and R. Haddon, Science **312**, 413 (2006).