

УДК 621.383

ОТКЛИК АСИММЕТРИЧНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СУБТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

А. И. Кардакова¹, Г. Е. Федоров^{1,2}, И. А. Гайдученко^{1,2}, И. А. Чараев¹,
Б. М. Воронов¹, М. И. Финкель¹, Г. Н. Гольцман¹

¹Московский Педагогический Государственный Университет, Москва

²НИЦ "Курчатовский институт", Москва

Статья получена 28 октября 2014 г.

Аннотация. В данной работе мы описываем отклик, возникающий под воздействием субтерагерцового излучения, в ассиметричных устройствах на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Чувствительным элементом данных устройств является плотная сетка УНТ, сформированная путем осаждения из газовой фазы в окрестности каталитического островка. Асимметрия исследуемых устройств заключается в неоднородной морфологии сетки УНТ, соединенной с металлическими контактами. Один из контактов связан с той частью УНТ-сетки, которая находится на каталитическом островке, где большинство нанотрубок подвешены над подложкой. Второй металлический контакт связан с другой частью УНТ-сетки, в которой нанотрубки находятся в непосредственном контакте с подложкой. Это приводит к асимметрии в устройстве, связанной с различным тепловым контактом сетки УНТ по отношению к подложке. Под воздействием излучения с частотой 140 ГГц наблюдается возникновение постоянного напряжения при нулевом токе смещения. Анализ зависимостей данного отклика от мощности падающего излучения и от затворного напряжения в широком диапазоне температур свидетельствует о том, что наблюдаемый эффект имеет двойную природу: тепловую и фотоэлектрическую. Вольт-ваттная чувствительность такого устройства при комнатной температуре превышает значения, которые приводились ранее для детекторов на основе УНТ, для субмиллиметрового и ТГц диапазонов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, детекторы ТГц излучения.

Abstract. In this paper we report on the response of the asymmetric devices based on carbon nanotubes (CNT) on the sub-terahertz radiation. Sensing element of the devices is a dense CNTs network formed by chemical vapor deposition near the catalytic island. Asymmetry of the investigated devices is inhomogeneous morphology of the CNT film which contacted with the metal electrodes. One of the electrodes contacts the part of the CNT-nets which is on the catalytic island where most of the nanotubes are suspended. The second contact connects to the other part of the CNT-network in which the nanotubes are in direct contact with the substrate. This results in the device's asymmetry associated with different thermal contact of the CNT film with the substrate. Under the radiation with a frequency of 140 GHz the DC voltage is observed at zero current bias. Analysis of the dependence of the response on the incident radiation power and the gate voltage in a wide temperature range suggests that the observed effect has a dual nature: thermal and photovoltaic. Volt-watt sensitivity of the device at room temperature exceeds the values which were earlier reported for detectors based on CNTs for submillimeter and THz ranges.

Key words: carbon nanotubes, THz detectors.

Введение

Благодаря особенностям зонной структуры и другим уникальным свойствам, углеродные нанотрубки (УНТ) рассматривают в качестве перспективного материала для использования при решении различных прикладных задач оптоэлектроники субмиллиметрового и ТГц диапазонов [1,2]. Тем не менее, до недавнего времени опубликованные результаты исчерпывались наблюдением диодного отклика при ненулевом токе смещения [2] и болометрического отклика [3] при низких температурах. В более свежих работах наблюдалось и исследовалось такое интересное явление, как фотонно-вынужденное туннелирование в режиме кулоновской блокады [4]. В работе [5] впервые приводились данные о возникновении под действием излучения сигнала постоянного напряжения, связанного с асимметричной конфигурацией устройства. Природа данного отклика связывалась с повышением температуры

электронной жидкости по отношению к температуре электродов и с асимметрией в контактном сопротивлении.

В данной работе мы описываем отклик, возникающий под воздействием субтерагерцового излучения в ассиметричных устройствах на основе УНТ. Отклик проявляется в сигнале постоянного напряжения при нулевом токе смещения. Вольт-ваттная чувствительность наших устройств достигает 10 В/Вт при комнатной температуре, что является рекордной величиной для УНТ-устройств. В то время как при комнатной температуре наблюдаемый отклик обусловлен, в основном, термическими эффектами, данные, полученные при низких температурах и малой мощности излучения, свидетельствуют о фотовольтаическом эффекте, связанном с рождением электрон-дырочных пар в окрестности р-n перехода.

Экспериментальные результаты

Наши устройства представляют собой полевые транзисторы с каналом проводимости в виде плотной сетки УНТ, синтезированной методом химического парофазного осаждения [6]. Чувствительный элемент на основе УНТ связан с логарифмической спиральной антенной, рукава которой представляют собой контакты по постоянному току. При этом один из электродов связан с той частью сетки УНТ, которая находится на каталитическом островке над подложкой, а другой электрод связан с частью УНТ-сетки, которая находится непосредственно на подложке. В качестве подложки выбран кремний марки КДБ-12, покрытый слоем термического оксида толщиной 250 нм. Кремниевая подложка использовалась в качестве затворного электрода, при этом затворное напряжение V_G прикладывалось между подложкой и одним из электродов антенны. Схематическое изображение устройства показано на рисунке 1 (а). Представленные результаты получены для двух образцов, обозначаемых в дальнейшем как D1 и D2. Фотографии чувствительных элементов этих устройств, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа показаны на рисунках 1(b) и 1(c) соответственно.

Для лучшего согласования с излучением образцы были зафиксированы на плоской поверхности кремниевой линзы. Смонтированные на медном держателе линза и образец были размещены внутри гелиевого криостата с оптическим окном из политетрафторэтилена (ПТФЭ). В качестве источника суб-ТГц излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) с частотой с максимальной мощностью 800 мкВт на частоте 140 ГГц. Мощность излучения изменялась с помощью сеточного аттенюатора. Отклик на амплитудно-модулированное излучение (с частотой модуляции от 100 Гц до 100 кГц) измерялся с помощью синхронного усилителя. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) для образцов снимались с использованием источника-измерителя Keithley 2400 Source Meter. Общая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2(а).

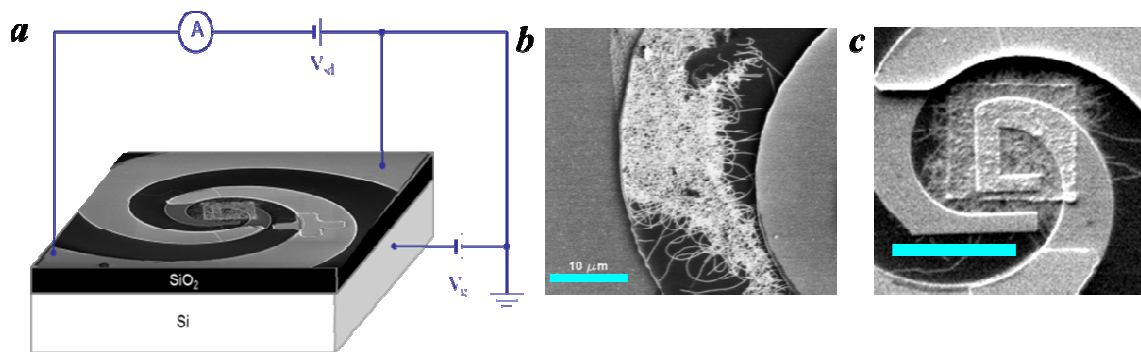


Рисунок 1. (а) Схема устройства на основе УНТ. (б) Изображение чувствительного элемента образца D1, полученное в растровом электронном микроскопе. (с) Изображение чувствительного элемента образца D2, полученное в растровом электронном микроскопе.

При комнатной температуре ВАХ обоих образцов линейны. Значение сопротивления составляет 200 кОм и 15 кОм для образцов D1 и D2, соответственно. Под воздействием излучения с максимальной мощностью вольт-амперная кривая для образца D2 смещается влево. Напряжение смещения V_{resp} при нулевом токе равно -2 мВ, при этом дифференциальная проводимость не меняется. Аналогичный эффект наблюдается для образца D1, но величина напряжения смещения для этого устройства при комнатной температуре

значительно меньше (около 50 мкВ).

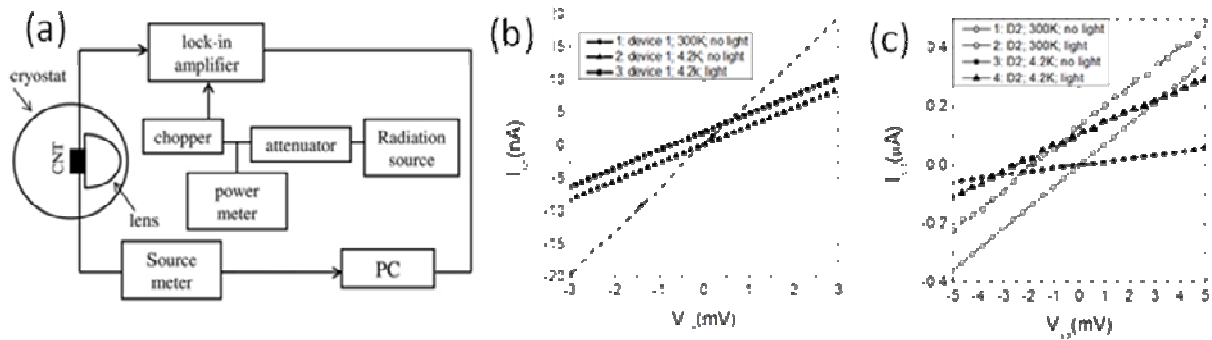


Рисунок 2. (а) Общая схема экспериментальной установки для регистрации отклика устройств на основе УНТ на воздействие суб-терагерцового излучения. (б) Вольтамперные характеристики образца D1 при комнатной температуре без излучения (штрих), при гелиевой температуре без излучения (треугольники) и при гелиевой температуре под действием излучения (кружки). (с) Вольтамперные характеристики образца D2 при комнатной температуре без излучения (пустые кружки), при комнатной температуре под действием излучения (пустые ромбики), при гелиевой температуре без излучения (сплошные кружки) и при гелиевой температуре под действием излучения (сплошные треугольники).

При понижении температуры сопротивление обоих образцов растет. При гелиевой температуре ВАХ образца D1 остается линейной с сопротивлением 330 кОм. При этом величина отклика V_{resp} образца D1 равна 550 мкВ при максимальной мощности излучения. ВАХ образца D2 является нелинейной с минимумом дифференциальной проводимости при нулевом напряжении. Под воздействием излучения возникает напряжение смещения $V_{resp} = -3$ мВ, при этом происходит значительное увеличение проводимости (в 3-4 раза). Соответствующие вольт-амперные характеристики образцов D1 и D2 представлены на рисунках 2(b) и 2 (c).

Зависимости отклика от мощности излучения линейны для обоих образцов при комнатной температуре (Рис. 3 (а)) и не линейны при гелиевой температуре (Рис.3 (b)). При этом при гелиевой температуре на низких мощностях наблюдалось изменение знака отклика: при мощности ниже 70 мкВт для

образца D1 и ниже 25 мкВт для образца D2.

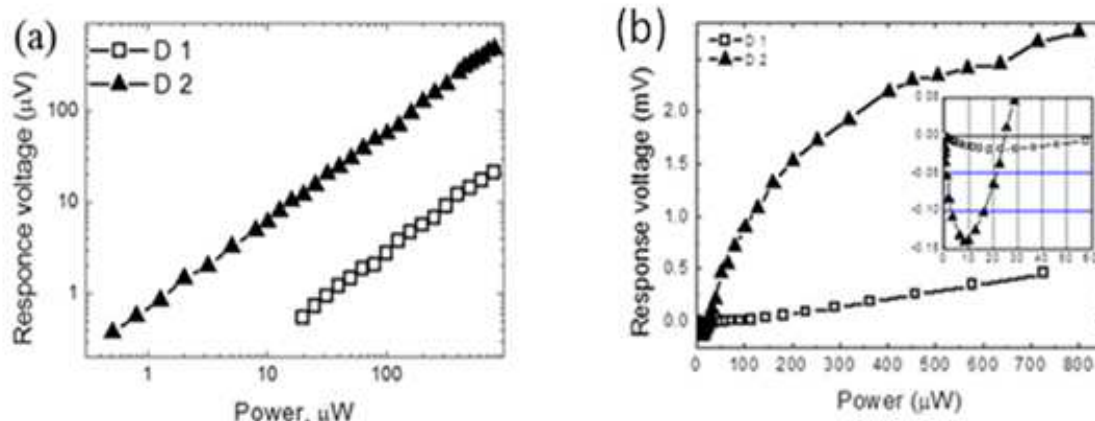


Рисунок 3. (a) Фотонапряжение V_{resp} как функция от мощности излучения при комнатной температуре для образцов D1 и D2. (b) Фотонапряжение V_{resp} как функция от мощности излучения при гелиевой температуре для образцов D1 и D2. На вставке показана область, соответствующая низким мощностям, где знак отклика отрицательный.

Кроме того, для образца D2 было проведено исследование отклика в зависимости от напряжения на затворе, менявшегося в диапазоне от -3 В до 3 В (рис. 4). При гелиевой температуре на низких мощностях наблюдалось изменение знака $V_{\text{resp}}(V_G)$ в узком диапазоне затворных напряжений, близких к нулю (рис. 4b).

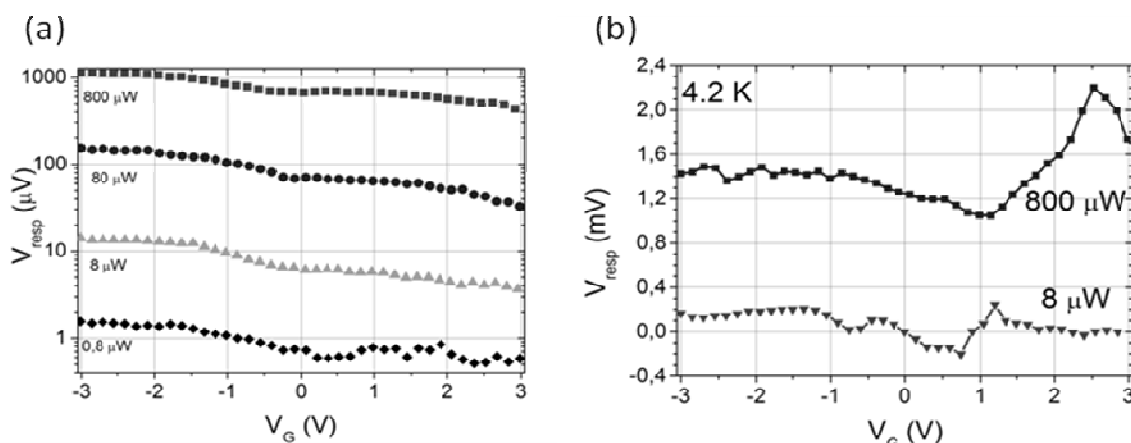


Рисунок 4. (a) Зависимость отклика устройства D2 от затворного напряжения при комнатной температуре. Мощность падающего излучения 800 мкВт, 80 мкВт, 8 мкВт, 0.8 мкВт. (b) Зависимость отклика устройства D2 от затворного напряжения при 4.2 К. Мощность падающего излучения 800 мкВт, 8 мкВт.

Обсуждение и выводы

Мы полагаем, что воздействие излучения приводит к повышению температуры носителей заряда. При этом она может отличаться от фоновой температуры и определяется связью с тепловыми резервуарами - подложкой и электрическими контактами. Уменьшение сопротивления при облучении соответствует нагреву носителей в УНТ. Можно предположить, что в исследуемых структурах часть нанотрубок, находящаяся над подложкой, нагревается сильнее по сравнению с той частью, которая лежит непосредственно на подложке. Разница в температурах должна приводить к возникновению термо-ЭДС, и, следовательно, к появлению фотонапряжения. Данная интерпретация согласуется с предыдущей работой по исследованию фотонапряжения в УНТ [7]. Знак отклика указывает на то, что при комнатной температуре основным типом носителей заряда являются дырки. Это согласуется с тем, что при подаче отрицательного затворного напряжения число дырок растет, и сигнал фотонапряжения увеличивается (рис. 4а). Небольшое повышение температуры в УНТ по сравнению с комнатной температурой под облучением соответствует линейной зависимости сигнала от падающей мощности. При гелиевой температуре и низких мощностях изменение знака V_{resp} может указывать на изменение знака термо-ЭДС для некоторых УНТ, аналогично данным работы [8]. Такая интерпретация не позволяет объяснить, почему мы не наблюдаем смены знака отклика при комнатной температуре.

Помимо интерпретации, основанной на изменении знака термо-ЭДС, можно предположить, что отрицательный отклик обусловлен прямыми оптическими переходами [9] через запрещенную зону в квазиметаллических УНТ. Ширина запрещенной зоны таких трубок равна или близка к энергии квантов излучения с частотой 140 ГГц, что соответствует энергии около 0.5 мэВ. Асимметрия исследуемых устройств приводит к различной эффективности затвора по отношению к трубкам, висящим над подложкой, и трубкам, лежащим на подложке. Что в свою очередь приводит к появлению p-n

переходов на пути тока в определенном узком диапазоне затворных напряжений, и, следовательно, к появлению фотонапряжения. Поскольку частота излучения соответствует энергии $\sim 0,5$ мэВ (~ 5 К), такой эффект может наблюдаться только при низких температурах.

В заключение отметим, что вольт-ваттная чувствительность образца D2 при комнатной температуре составляет порядка 5 В/Вт. Хотя данное значение не достигает чувствительности лучших современных детекторов ТГц диапазона, оно превышает значения, полученные ранее для устройств на основе УНТ. При гелиевой температуре для низкой мощности излучения вольт-ваттная чувствительность достигает 500 В/Вт. Такая чувствительность наблюдается только в узком диапазоне затворных напряжений, что затрудняет практическое применение. Возможно, лучшие результаты по чувствительности можно ожидать от устройств с меньшим контактным сопротивлением и меньшим межэлектродным расстоянием. Исследование этого вопроса требует проведения дальнейшей экспериментальной работы.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (государственный контракт No. 14.586.21.0003) и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 14-02-31533 и № 12-02-01291-а).

Литература

1. P. Avouris, M. Freitag & V. Perebeinos, *Nature Photonics* **2**, 341 - 350 (2008).
2. L. Ren, C. L. Pint, L. G. Booshehri, W. D. Rice, X. Wang, D. J. Hilton, K. Takeya, I. Kawayama, M. Tonouchi, R. H. Hauge and J. Kono, *Nano Lett.*, **9**, 2610 (2009).
3. J. D. Chudow, D. F. Santavicca, C. B. McKitterick, D. E. Prober, and P. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 163503 (2012).

4. M. Rinzan, G. Jenkins, H. D. Drew, S. Shafranjuk, and P. Barbara, *Nano Lett.*, **12**, 3097 (2012).
5. H. L. Hortensius, A. Öztürk, P. Zeng, E. F. C. Driessen, and T. M. Klapwijk, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 223112 (2012).
6. A. Tselev, K. Hatton, M. S. Fuhrer, M. Paranjape and P. Barbara, *Nanotechnology*, **15**, 1475 (2004).
7. B. C. St-Antoine, D. Me´nard, and R. Martel, *Nano Lett.*, **9**, 3503 (2009).
8. J. P. Small, K. M. Perez, and P. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 256801 (2003).
9. T. Kampfrath, K. von Volkmann, C. M. Aguirre, P. Desjardins, R. Martel, M. Krenz, C. Frischkorn, M. Wolf, and L. Perfetti, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 267403 (2008).