

# Асимметричные устройства на основе углеродных нанотрубок для детектирования излучения терагерцового диапазона

© Г.Е. Федоров, Т.С. Степанова, А.Ш. Газалиев, И.А. Гайдученко, Н.С. Каурова, Б.М. Воронов, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет,  
119991 Москва, Россия

E-mail: gefedorov@mail.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

Исследуются различные асимметричные детектирующие устройства на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Под асимметрией понимается неоднородность свойств вдоль канала проводимости. В первом типе устройств используется неоднородная морфология УНТ-сетки. Во втором типе устройств в качестве контактного материала используются металлы с сильно различной работой выхода. В работе анализируется связь между чувствительностью и конфигурацией детектора. На основе полученных данных предлагаются подходы к созданию эффективного детектора терагерцового излучения на основе углеродных нанотрубок.

## 1. Введение

Возможность использования углеродных наноматериалов в качестве основы чувствительного элемента детекторов терагерцового излучения обусловлена рядом особенностей их характеристик. В основном речь идет о высокой подвижности носителей заряда, возможности перестройки свойств затворным напряжением и влиянии геометрических размеров на параметры зонной структуры. Полученные на данный момент результаты [1–6] свидетельствуют о перспективности этого направления исследований с точки зрения получения практических результатов.

В данной работе исследуются различные асимметричные детектирующие устройства на основе углеродных нанотрубок (УНТ). В таких устройствах при воздействии электромагнитного излучения возникает сигнал постоянного напряжения. Таким образом, они представляют собой детекторы, работающие при нулевом токе смещения. Исследуемые устройства выполнены в конфигурации полевого транзистора, в котором каналом проводимости является латеральный массив УНТ (сетка УНТ) или индивидуальная УНТ. Под асимметрией понимается неоднородность свойств вдоль канала проводимости. В первом типе устройств используется неоднородная морфология УНТ-сетки. Во втором типе устройств в качестве контактного материала используются металлы с сильно различной работой выхода.

## 2. Изготовление образцов

Наши устройства представляют собой полевые транзисторы с каналом проводимости в виде сетки УНТ, синтезированной методом химического парофазного осаждения [7]. Чувствительный элемент на основе УНТ связан с логарифмической спиральной антенной, рукава которой представляют собой контакты по постоянному току. При изготовлении устройств первого типа 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. При

изготовлении устройств второго типа рукава антенны изготавливались из разных металлов. При этом в качестве канала использовались УНТ (индивидуальные или сетки), целиком располагающиеся на подложке. В качестве подложки был выбран кремний марки КДБ-12, покрытый слоем термического оксида кремния толщиной 250–500 нм. Кремниевая подложка использовалась в качестве затворного электрода, при этом затворное напряжение  $V_G$  прикладывалось между подложкой и одним из электродов антенны. Схематическое изображение устройств обоих типов показано на рис. 1.

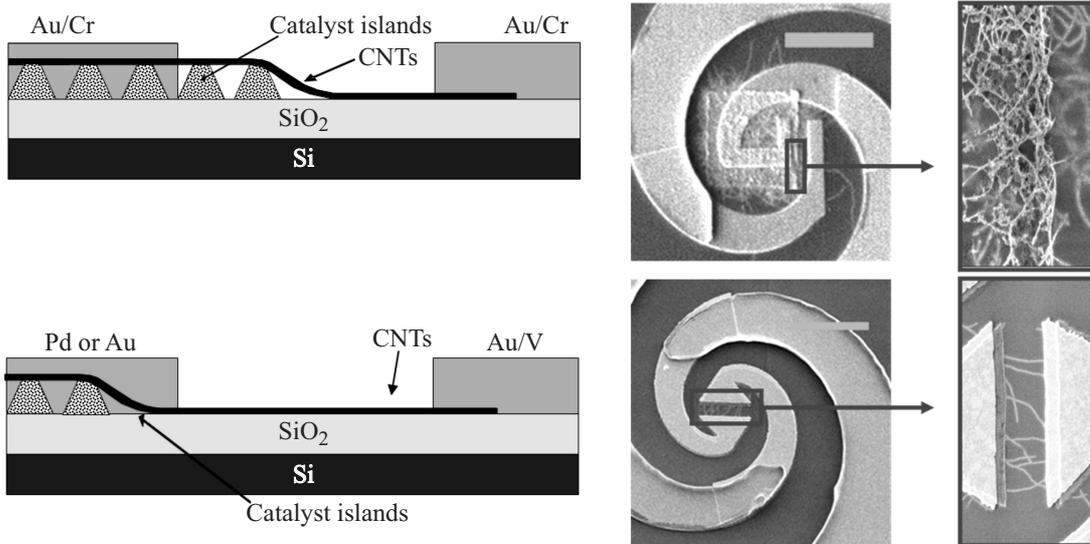
## 3. Экспериментальные результаты

### 3.1. Экспериментальная установка

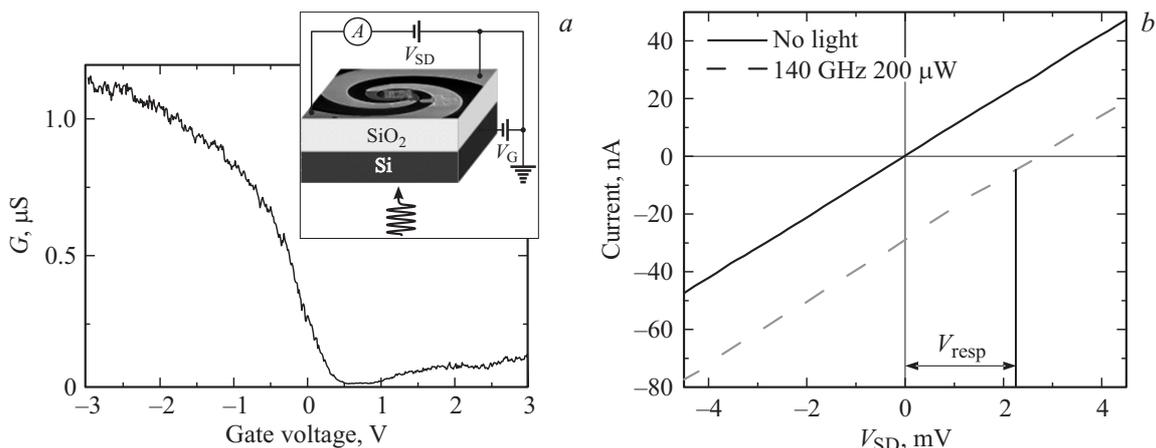
Для лучшего согласования с излучением образцы были зафиксированы на плоской поверхности кремниевой линзы. Смонтированные на медном держателе линза и образец были размещены внутри гелиевого криостата с оптическим окном из политетрафторэтилена (ПТФЭ). В качестве источника суб-ТГц излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) с 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 SourceMeter. Электрическая схема подключения образца проиллюстрирована на рис. 2, а. Все приведенные далее результаты были получены при комнатной температуре.

### 3.2. Результаты характеристики образцов

Зависимость проводимости устройства от затвора позволяет идентифицировать характер проводимости канала. На рис. 2, б показана проходная характеристика устройства, в котором каналом проводимости является



**Рис. 1.** Конфигурация устройств первого и второго типа. На верхней панели представлена схема чувствительного элемента, а справа — СЭМ фотография образца первого типа. Снизу то же самое для образцов второго типа. Скэйлбары на СЭМ фотографиях соответствуют размеру 10 мкм.

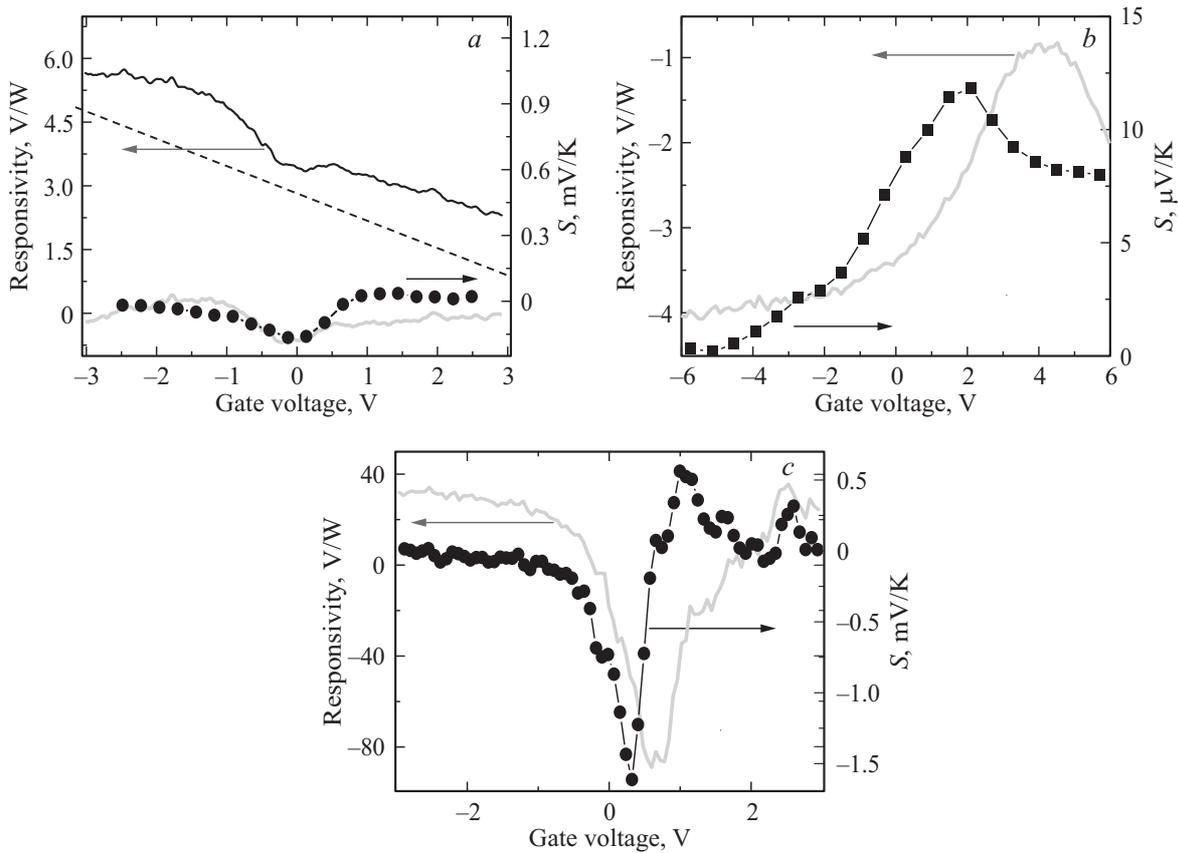


**Рис. 2.** *a* — проходная характеристика устройства с каналом проводимости из индивидуальной полупроводниковой УНТ. Вставка показывает принципиальную схему подключения устройства. *b* — модификация ВАХ устройства первого типа под действием излучения.

индивидуальная полупроводниковая УНТ. Отклик исследуемых образцов на излучение проиллюстрирован на рис. 2, *b*, где представлены ВАХ образца второго типа, измеренные в темновом режиме и при воздействии излучения частотой 140 ГГц. Мощность излучения, попадающая на внешнюю поверхность кремниевой линзы, составляет около 200 мкВт. Как видно из рис. 2, *b*, под воздействием излучения вольт-амперная характеристика смещается вдоль оси напряжений. Напряжение смещения при нулевом токе, обозначаемое  $V_{\text{resp}}$ , составляет несколько мВ, при этом дифференциальная проводимость не меняется. Отношение напряжения отклика к мощности, называемое вольт-ваттной чувствительностью, является одним из ключевых параметров, определяющим эффективность работы детектора. В наших экспериментах она составляет от единиц до нескольких десятков В/Вт.

### 3.3. Исследование отклика устройств

Для выяснения физических механизмов, обуславливающих наблюдаемый отклик, мы провели исследования его зависимости от затворного напряжения. Полученные данные для трех образцов разной конфигурации представлены на рис. 3. На этом рисунке приведены зависимости вольт-ваттной чувствительности (отношения напряжения отклика к мощности падающего излучения) для образца первого типа (рис. 3, *a*), образца второго типа на основе сетки УНТ (рис. 3, *b*) и образца второго типа на основе индивидуальной полупроводниковой УНТ (рис. 3, *c*). Сразу же отметим, что наибольшая вольт-ваттная чувствительность наблюдается у третьего образца. Важной особенностью отклика является немонотонный характер его зависимости от затворного напряжения.



**Рис. 3.** *a* — зависимость вольт-ваттной чувствительности и рассчитанного по формуле (1) коэффициента Зеебека от затворного напряжения для устройств различной конфигурации. *a* — образец первого типа. Серая кривая — результат вычитания линейного фона (пунктирная линия) из зависимости вольт-ваттной чувствительности от затвора. *b* — образец второго типа с сеткой УНТ. *c* — образец второго типа с индивидуальной полупроводниковой УНТ.

На рис. 3 зависимости отклика от затворного напряжения сравниваются с производными от логарифма проводимости по затворному напряжению. Такое сравнение позволяет выделить вклад так называемого фототермоэлектрического эффекта. Последний связан прежде всего с неоднородностью температуры вдоль канала. В результате взаимодействия электромагнитного излучения с электронной подсистемой канала проводимости электронная температура становится выше фононной. В устройствах первого типа термализация носителей заряда происходит менее эффективно в той части сетки УНТ, которая находится на каталитическом островке над подложкой, по сравнению с той, которая находится в непосредственном контакте с подложкой. В устройствах второго типа разница в контактном сопротивлении на границе УНТ–металл приводит к различному нагреванию приконтактных областей за счет выделения джоулева тепла при протекании переменного тока, индуцированного излучением.

Таким образом, во всех исследуемых устройствах излучение создает неоднородный нагрев канала проводимости и между электродами возникает термоэдс. Последняя вычисляется как произведения разности температур на так называемый коэффициент Зеебека  $S$ ,

который можно рассчитать в приближении диффузного транспорта по формуле [8]

$$S \equiv \frac{\Delta V}{\Delta T} = -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{3|e|} \frac{1}{G} \frac{dG}{dE} \Big|_{E_F} = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3|e|} \frac{1}{G} \frac{dG}{dV_G} \frac{dV_G}{dE} \Big|_{E_F}, \quad (1)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $e$  — элементарный заряд,  $E$  — энергия, отсчитываемая от уровня Ферми. Последний множитель  $dV_G/dE$  можно оценить как  $10/e$  [8]. Вид зависимостей  $S(V_G)$ , рассчитанных по этой формуле, в целом совпадает с зависимостями отклика от затворного напряжения. При этом, в то время как значение  $S(V_G)$  стремится к нулю при больших по модулю величинах затворного напряжения, величина отклика либо стремится к постоянному отличному от нуля значению, либо монотонно убывает как функция затворного напряжения (см. рис. 3, *a*), что особенно заметно в области отрицательных  $V_G$ .

Отмеченные особенности зависимостей  $V_{\text{resp}}(V_G)$  свидетельствуют о наличии другого механизма возникновения постоянного напряжения. Асимметрия, заложенная в наши устройства, должна приводить к двум эффектам, которые в общем случае могут приводить к наблюдаемому в эксперименте сигналу постоянного напряжения.

Первый, термический, эффект связан с возникновением градиента температуры в канале транзистора под воздействием излучения. Второй эффект связан с нелинейностью вольт-амперной характеристики и называется диодным эффектом.

Для расчета величины диодного отклика используется формула (см. работу [9])

$$S_V = -\frac{1}{4} \frac{d^2 I}{dV^2} R_S Z_A, \quad (2)$$

где  $R_S$  — сопротивление устройства, а  $Z_A$  — импеданс антенны, равный 75 Ом. Для всех образцов расчет вольт-ваттной чувствительности по формуле (2) с использованием транспортных характеристик (сопротивление и вторая производная тока по напряжению), измеренных при затворном напряжении 3 В, дает значение, примерно в 2 раза превышающее значение, полученное в эксперименте. Таким образом, указанное приближение адекватно описывает полученные значения вольт-ваттной чувствительности.

Сравнение данных, полученных с использованием образцов различной конфигурации, показывает, что образец второго типа с каналом проводимости, образованным индивидуальной полупроводниковой УНТ, обладает наибольшей вольт-ваттной чувствительностью. Для практического использования лучше подходит режим, соответствующий отрицательному напряжению на затворе, когда канал легирован носителями  $p$ -типа. Важно отметить принципиальную возможность легирования УНТ за счет нековалентной функционализации их поверхности, что позволяет не использовать затворный электрод. Для улучшения стабильности характеристик детектора предпочтительнее использовать не индивидуальные УНТ, а их латеральные массивы, когда до нескольких десятков УНТ соединены параллельно. Как видно из наших данных, такие структуры обладают более низкой чувствительностью. Это скорее всего связано с наличием в таких массивах металлических УНТ (их количество должно составлять около 1/3 от общего количества УНТ в массиве [10]). Однако существуют процедуры синтеза УНТ методом химического парофазного осаждения, позволяющие получать до 99% полупроводниковых УНТ [11]. Сочетание этих методов с подходами, описанными в данной работе, возможно, позволят создать новый класс недорогих, энергоэффективных и чувствительных детекторов ТГц излучения на основе УНТ.

#### 4. Заключение

Асимметричные структуры на основе углеродных нанотрубок представляют интерес для разработки детекторов терагерцового излучения. Результаты, представленные в данной работе, показывают перспективность использования в качестве чувствительного элемента детектора латеральных массивов полупроводниковых УНТ, контакт к которым осуществляется металлами с различной работой выхода.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.586.21.0003, уникальный идентификатор RFMEFI58614X0003).

#### Список литературы

- [1] X. He, N. Fujimura, J.M. Lloyd, K.J. Erickson, A.A. Talin, Q. Zhang, W. Gao, Q. Jiang, Y. Kawano, R.H. Hauge, F. Leonard, J. Kono. *Nano Lett.*, **14** (7), 3953 (2014).
- [2] X. He, F. Leonard, J. Kono. *Adv. Optical Mater.*, **3**, 989 (2015).
- [3] L. Vicarelli, M.S. Vitiello, D. Coquillat, A. Lombardo, A.C. Ferrari, W. Knap, M. Polini, V. Pellegrini, A. Tredicucci. *Nature Materials*, **11**, 865 (2012).
- [4] X. Cai, A.B. Sushkov, R.J. Suess, M.M. Jadidi, G.S. Jenkins, L.O. Nyakiti, R.L. Myers-Ward, S. Li, J. Yan, D.K. Gaskill, T.E. Murphy, H.D. Drew, M.S. Fuhrer. *Nature Nanotechnol.*, **9**, 814 (2014).
- [5] G. Fedorov, A. Kardakova, I. Gayduchenko, I. Charayev, B.M. Voronov, M. Finkel, T.M. Klapwijk, S. Morozov, M. Presniakov. I. Bobrinetskiy, R. Ibragimov, G. Goltzman. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 181 121 (2013).
- [6] I. Gayduchenko, A. Kardakova, G. Fedorov, B. Voronov, M. Finkel, D. Jimenez, S. Morozov, M. Presniakov, G. Goltzman. *J. Appl. Phys.*, **118**, 194 303 (2015).
- [7] A. Tselev, K. Hatton, M.S. Fuhrer, M. Paranjapeand, P. Barbara. *Nanotechnology*, **15**, 1475 (2004).
- [8] J. Small, K. Perez, P. Kim. *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 256 801 (2003).
- [9] K. Fu, R. Zannoni, C. Chan, S.H. Adams, J. Nicholson, E. Polizzi, K.S. Yngvesson. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 033 105 (2008).
- [10] R. Saito., G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus. *Physical Properties of Carbon Nanotubes* (Imperial College Press, London, 1998).
- [11] L. Ding, A. Tselev, J. Wang, D. Yuan, H. Chu, T.P. McNicholas, Y. Li, J. Liu. *Nano Lett.*, **9** (2), 800 (2009).

Редактор А.Н. Смирнов

#### Asymmetric devices based on carbon nanotubes for terahertz range radiation detection

G.E. Fedorov, T.S. Stepanova, A.Sh. Gazaliev, I.A. Gaiduchenko, N.S. Kaurova, B.M. Voronov, G.N. Goltzman

Moscow State Pedagogical University,  
119991 Moscow, Russia

**Abstract** In this paper we study various asymmetric detecting devices based on carbon nanotubes (CNTs). Asymmetry refers to the heterogeneity of the properties along the conduction channel. In the first type of device non-uniform morphology of the CNT grid is used. In the second type of devices metals with significantly different work function are used for source and drain electrodes. The relationship between sensitivity and detector configuration is analyzed in the paper. Based on the data obtained we suggest approaches to the creation of effective detectors of terahertz radiation based on carbon nanotubes.