

УДК 681.7.069.3

## СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАКЕТА ПРИБОРА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИК–УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Полохин<sup>1</sup>, А. Ю. Герасименко<sup>1</sup>, А. А. Дудин<sup>2</sup>,  
Л. П. Ичкитидзе<sup>1</sup>, Е. П. Кицюк<sup>2,3</sup>, А. П. Орлов<sup>2</sup>,  
А. А. Павлов<sup>2</sup>, Ю. П. Шама<sup>3</sup>

*Разработан макет фотоприемного прибора на основе структуры полупроводник–углеродные нанотрубки (УНТ), состоящий из 16 чувствительных элементов, имеющих ячеистую структуру и выполненных на единой подложке. Топология чувствительных ячеек представляет собой отверстия, проходящие через слои металлизации и диэлектрика к полупроводнику, от которого массив УНТ прорастает к верхнему слою металлизации. Исследованы параметры макета прибора: рабочий диапазон длин волн находится в пределах 400–1100 нм, быстродействие составляет 30 мкс, коэффициенты пиковой чувствительности, которая достигалась при длинах волн 640 и 950 нм, составили 197 мкА/Вт и 193 мкА/Вт, соответственно.*

**Ключевые слова:** приёмник оптического излучения, углеродные нанотрубки, полупроводник, оптоэлектроника.

*Введение.* В наше время разработка приемников оптического излучения является актуальной задачей в различных отраслях науки, производства и спецтехники. Все существующие на данный момент фотоприемники по принципу работы можно разделить на два основных типа: фототермические и фотоэлектрические [1]. В фототермических

<sup>1</sup> НИУ “МИЭТ”, 124498 Россия, Зеленоград, пл. Шокина, 1; e-mail: a.a.polohin@gmail.com.

<sup>2</sup> ИНМЭ РАН, 115487 Россия, Москва, ул. Нагатинская, 16а, корп. 11.

<sup>3</sup> НПК “Технологический центр”, 124498 Россия, Зеленоград, 4806-й пр-д, 5.

реализуется механизм преобразования оптической энергии в тепловую энергию, а затем в электрическую. Подобным фотоприемникам свойственны такие недостатки, как высокая инерционность (как следствие, низкое быстродействие) и подверженность воздействию внешней среды. В основе принципа работы фотоэлектрических приемников лежит непосредственное преобразование оптической энергии в электрическую. К такому типу можно отнести полупроводниковые фотоприемники, которые обладают высоким быстродействием и менее подвержены воздействию внешних условий, чем фототермические приемники.

Современные исследования показали перспективность использования в качестве компонентов чувствительных элементов в фотоприемниках углеродных нанотрубок (УНТ) полупроводникового типа, которые являются прямозонными полупроводниками. Несмотря на свои значительные преимущества, фотоприемники на основе УНТ еще не получили массового внедрения из-за следующих особенностей:

1. Ширина запрещенной зоны для полупроводниковых нанотрубок различных диаметров колеблется от 0.1 до 2 эВ ( $\lambda$  от  $\sim 1$  мкм до  $\sim 10$  мкм) [2].

2. Незначительные изменения параметров (размеров, состава, структуры и др.) нанотрубок влекут за собой сильные изменения их свойств. Следовательно, для сохранения воспроизводимости характеристик фотоприемников на основе УНТ требуется высокая степень эквивалентности синтезируемых нанотрубок [3].

3. Необходим учет размерных эффектов (например, зон обеднения и пространственного заряда) в зоне контактов УНТ с полупроводниковой (металлической) матрицей (функциональный гетеропереход), так как эти эффекты играют значительную роль в возможности увеличения рабочей температуры детектора [4].

4. Малый размер единичной нанотрубки приводит к низкой интенсивности сигнала при взаимодействии с оптическим излучением [5], а для усиления сигнала необходимо множество трубок, например, в виде выращенного массива.

*Материалы и методы.* Разработанный макет прибора представлял собой матричный детектор, состоящий из 16 чувствительных элементов, выполненных на единой полупроводниковой подложке (рис. 1). Каждый чувствительный элемент содержит 10000 чувствительных ячеек, расположенных в виде квадрата  $100 \times 100$ , с расстоянием между ячейками 5 мкм. Основной топологией чувствительных ячеек являлась двухэлектродная система, представляющая собой отверстия, проходящие через слой металлизации и диэлектрика к полупроводнику, от которого массив УНТ прорастал к верхнему слою металлизации (рис. 1).

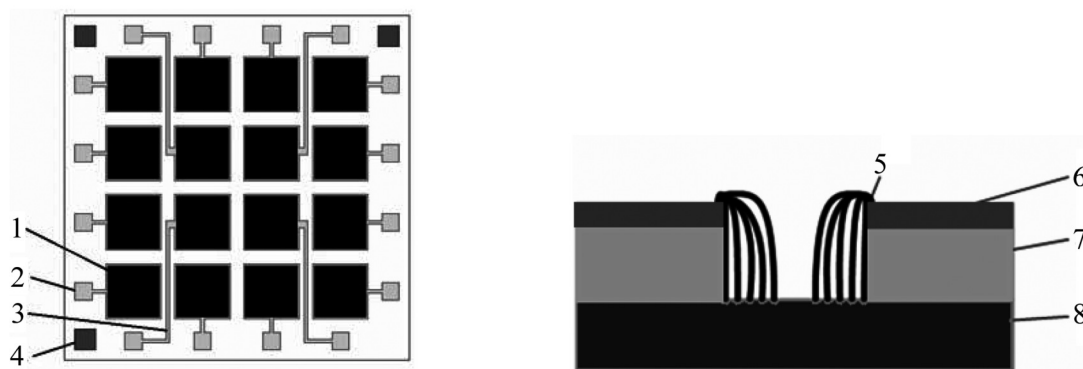


Рис. 1: Топологии матричного детектора на основе массива УНТ (слева) и чувствительной ячейки (справа). 1 – чувствительный элемент, 2 – контактная площадка чувствительного элемента, 3 – контактная металлизация, 4 – контактное окно кремниевой подложки, 5 – углеродные нанотрубки, 6 – верхний слой металлизации, 7 – оксид кремния (изолирующий слой), 8 – кремниевая подложка.

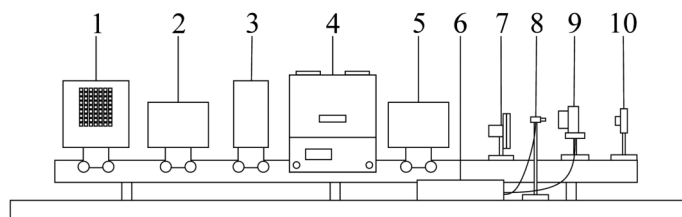


Рис. 2: Экспериментальная установка для исследования параметров макета прибора на основе структуры полупроводник-УНТ. 1 – источник излучения, 2 – входной конденсор, 3 – блок светофильтров, 4 – монохроматор, 5 – выходной конденсор, 6 – устройство сбора данных, 7 – аттенюатор, 8 – быстродействующий светодиод, 9 – держатель образца, 10 – эталонный измеритель мощности оптического излучения.

*Описание эксперимента.* Параметры матричного детектора на основе УНТ, такие как рабочий диапазон длин волн, быстродействие и коэффициенты пиковой чувствительности, исследовались с помощью экспериментальной установки (рис. 2). Основными элементами экспериментальной установки являлись монохроматор МДР-41 (ОКБ Спектр, Россия) и устройство сбора данных NI USB-6218 (National Instruments, США). Процесс исследований был автоматизирован с помощью специально разработанного программного обеспечения в среде LabVIEW.

Для определения рабочего диапазона длин волн на исследуемый макет прибора с помощью монохроматора последовательно производилось воздействие излучением раз-

личных длин волн, при этом синхронно регистрировалась величина генерируемого тока каждого чувствительного элемента. Определение быстродействия производилось с помощью воздействия на макет прибора импульсным излучением от быстродействующего светодиода и регистрации зависимости амплитуды генерируемого тока от времени. При этом также регистрировалась зависимость тока светодиода от времени. Для исследования чувствительности с помощью монохроматора и аттенюатора с калиброванными нейтральными светофильтрами были получены зависимости амплитуды генерируемого тока от интенсивности падающего излучения для длин волн 640 и 950 нм.

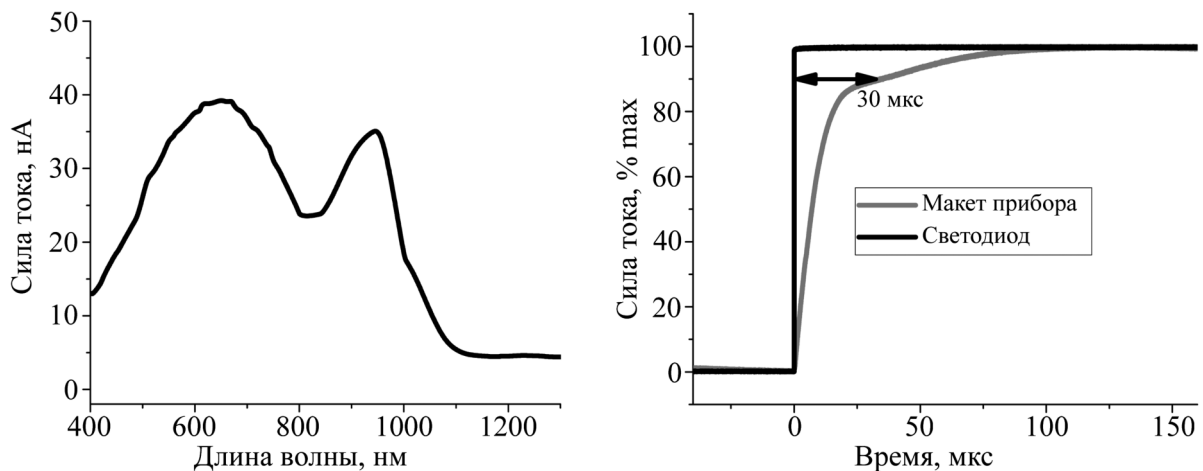


Рис. 3: Зависимости силы тока макета прибора на основе структуры полупроводник-УНТ от длины волны падающего излучения (слева) и от времени (справа). Серая линия – макет, чёрная – ток импульсного светодиода.

*Результаты эксперимента.* Зависимость силы тока от длины волны падающего излучения (рис. 3) позволила определить спектральный диапазон работы исследуемого макета прибора, который составил 400–1100 нм. Кривая данной зависимости также обладает несколькими характерными точками: 640, 800, 950 нм, наличие которых отличает исследуемый прибор от существующих кремниевых фотоприемников.

Полученные зависимости амплитуды генерируемого тока от интенсивности падающего излучения линейно возрастали, что указывает на линейность процесса формирования фототока в детекторе при взаимодействии с излучением. Данные кривые были линейно аппроксимированы с использованием метода наименьших квадратов, а коэффициент чувствительности определялся как коэффициент наклона линеаризированной кривой. Коэффициенты пиковой чувствительности на длинах волн 640 и 950 нм составили 197 мкА/Вт и 193 мкА/Вт, соответственно.

По зависимости изменения амплитуды генерируемого тока от времени (рис. 3) было установлено быстроедействие исследуемого прибора  $\sim 30$  мкс, как сумма времени срабатывания (которое в данном случае было пренебрежимо мало) и времени нарастания до 90% максимальной амплитуды силы тока.

*Заключение.* В работе представлены результаты разработки макета прибора на основе структуры полупроводник–углеродные нанотрубки. Исследованы параметры макета прибора: рабочий диапазон длин волн находился в пределах 400–1100 нм, быстроедействие составило 30 мкс, коэффициенты пиковой чувствительности составили 197 мкА/Вт (640 нм) и 193 мкА/Вт (950 нм). Данный прибор является результатом, лежащим в области новой кремний–углеродной наноэлектроники, и по мере совершенствования и отработки технологии должен обеспечить более высокие параметры, чем у ныне существующих полупроводниковых детекторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 16.9007.2017/БЧ).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. D. Vincent, J. Vampola, and J. Pierce, *Fundamentals of Infrared and Visible Detector Operation and Testing* (Hoboken, Wiley, 2015).
- [2] A. Rakitin and C. Papadopoulos, J. M. Xu, *Phys. Rev. B* **61**(8), 5793 (2000).
- [3] P. Avouris, M. Freitag, and V. Perebeinos, *Nat. Photonics* **2**(6), 341 (2008).
- [4] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi, and C. Dekker, *Science* **294**(5545), 1317 (2001).
- [5] M. Freitag, Y. Martin, J. A. Misewich, R. Martel, and P. Avouris, *Nano Lett.* **3**(8), 1067 (2003).

*По материалам VI Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.*

Поступила в редакцию 20 июля 2017 г.