

92 дБ. В ходе проектирования УВХ было проведено моделирование для разных моделей транзисторов *tt*, *sf*, *fs*, *ss*, *ff* (process corners) в зависимости от их скорости работы при разных температурах (– 40, 27 и 80 °С) и напряжениях питания ( $\pm 10\%$  от напряжения питания 3,3 В). В таблице 1 приведены результаты данного моделирования по температуре, а в таблице 2 – по напряжению.

Таблица 1

Температура, °С	corner				
	<i>tt</i> , dB	<i>sf</i> , dB	<i>fs</i> , dB	<i>ff</i> , dB	<i>ss</i> , dB
- 40	93	92,2	94	96,4	91,6
27	92,2	101	91,7	90,7	87,6
80	81,2	81,6	81	89,9	77

Таблица 2

Напряжение, В	corner				
	<i>tt</i> , dB	<i>sf</i> , dB	<i>fs</i> , dB	<i>ff</i> , dB	<i>ss</i> , dB
3,0	80,6	80,5	80,4	81,9	78,6
3,6	94,5	95,5	93,2	92	89,9

Данное УВХ разработано в технологии КМОП 90нм. Моделирование проводилось в среде Cadence. Разработанное УВХ удовлетворяет всем поставленным требованиям и обладает следующими характеристиками:

- Однополярное напряжение питания 3,3 В;
- Диапазон свободный от гармонических искажений 92 дБ;
- Эффективная разрядность (ENOB) 14,9 бит;
- Тактовая частота 50 МГц;
- Частота входного сигнала 1–150 МГц;
- Коэффициент усиления дифференциального сигнала ОУ 65 дБ;
- Полоса пропускания ОУ 130 кГц;
- Частота единичного усиления 200 МГц;
- Мощность потребления ОУ 22 мВт;
- Запас по фазе ОУ 82 град.

#### Литература

1. *Willy M. C. Sansen. Analog Design Essentials.*// Springer.
2. *Baker R. Jacob. Circuit design, layout and simulation.*// IEEE Press.

### КОМПЛЕКС УНТ-ДНК

**Н. В. Плешко, В. И. Крот**

Одним из открытий, существенно расширивших возможности использования современных физических разработок в различных сферах научно-технической деятельности, стало обнаружение новых алло-

тропных форм углерода, таких, как фуллерены, углеродные нанотрубки и графен. Многообразие свойств этих структур открыли широчайшие перспективы их использования в электронике, медицине и в других областях. Уникальные физические свойства нанотрубок в сочетании с распознающими способностями биомолекул могут привести к созданию биосенсоров нового поколения.

Первым шагом на пути создания ДНК-содержащих биосенсоров является присоединение молекулы нуклеиновой кислоты к поверхности нанотрубки. В связи с этим целью данной работы является изучение процесса комплексообразования ДНК с УНТ, определение физических характеристик комплекса и его компонент.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектрофотометрия растворов (суспензий) ДНК и комплексных систем ДНК-УНТ, включая определение гиперхромного эффекта (Г. Э.) и температуры плавления ДНК при нагревании растворов с ее участием, позволили определить что свободная ДНК и в комплексе с УНТ находится в состоянии, близком к нативному (максимум поглощения при  $\lambda=260$  нм, величина Г. Э. порядка 40%,  $T_m$  в  $H_2O \approx 70^\circ C$ ).

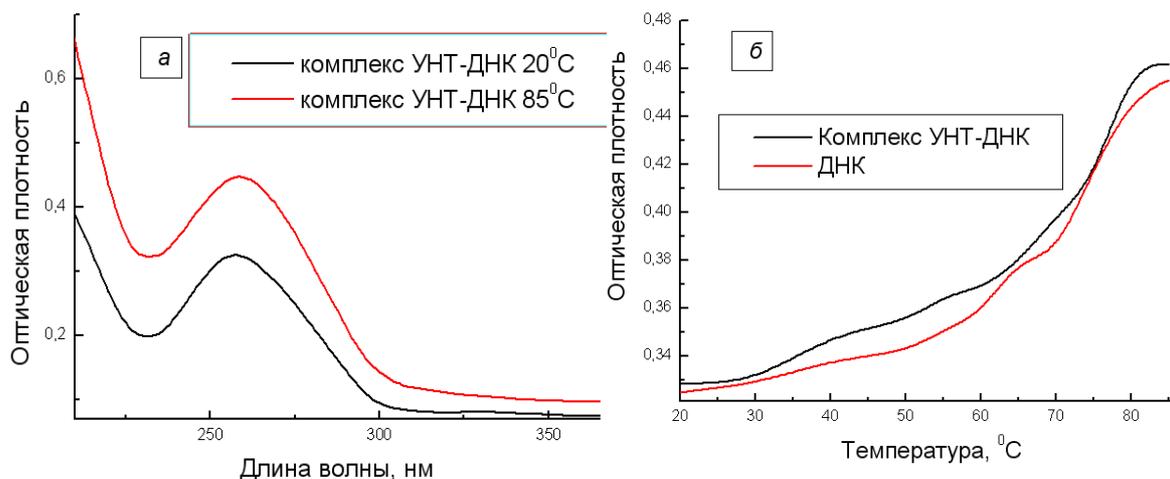


Рис. 1. Электронный спектр поглощения комплекса УНТ-ДНК: при разных температурах (а), кривые плавления ДНК и УНТ (б)

Электронно-микроскопическое изучение этих объектов показало, что УНТ характеризуются большим распределением по диаметру (т.е. являются многостенными) и имеют длину порядка микрон (рис. 2 (а)). ДНК имеет диаметр  $\sim 2$  нм и длину, достигающую миллиметров. При рассмотрении комплекса УНТ-ДНК (рис. 2 (б)) можно проследить, что ДНК наматывается на УНТ.

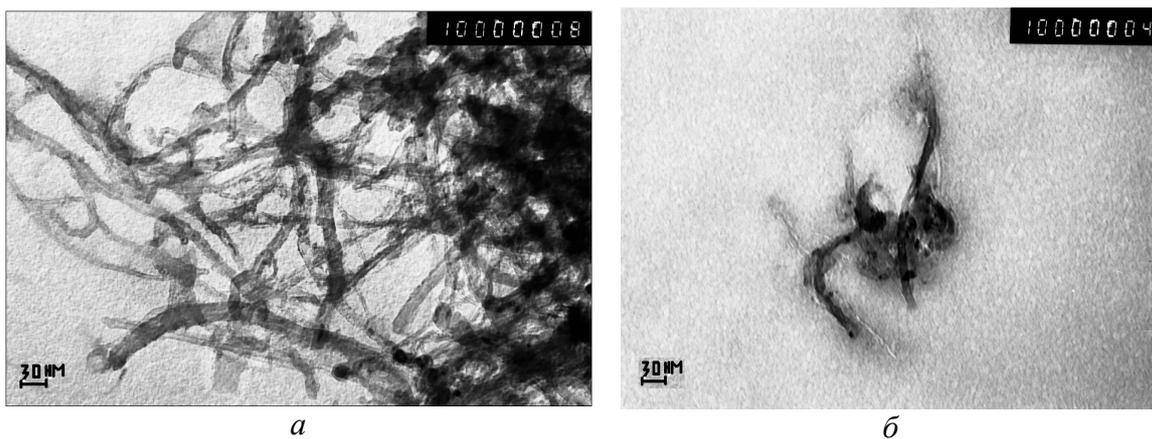


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки: (а) – УНТ, (б) – комплекс УНТ-ДНК

Структура свободной ДНК и в комплексе с УНТ прослеживается с помощью атомно-силовой микроскопии (рис. 3).

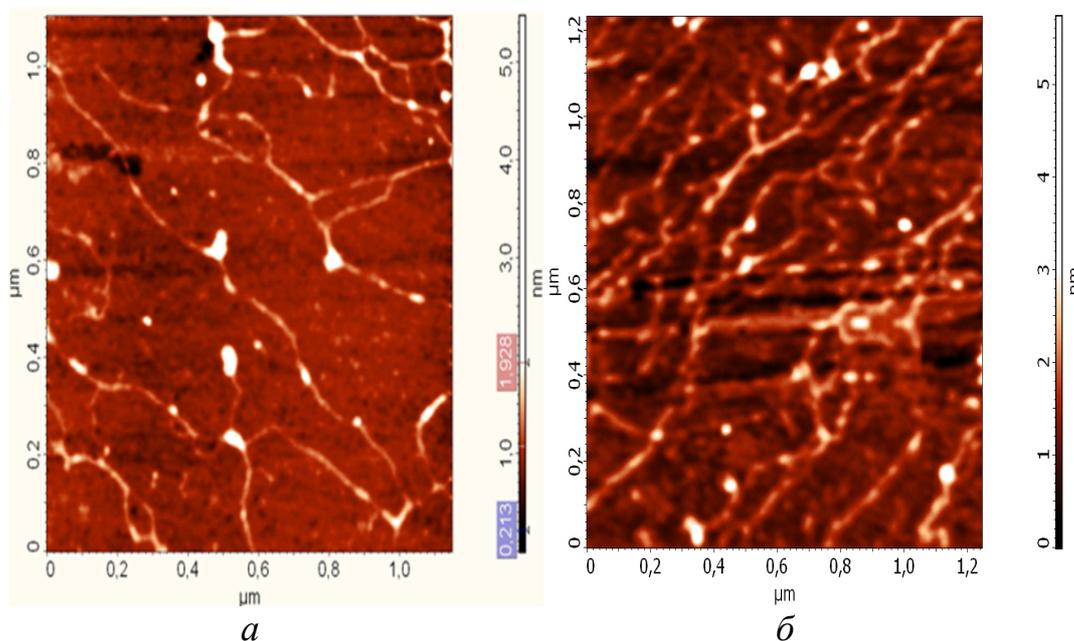


Рис. 3. Атомно-силовая микроскопия: (а) – ДНК, (б) – комплекс УНТ-ДНК

Изучение комплексообразования ДНК с УНТ с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) позволило определить относительно высокое количество дефектов в нанотрубках (соотношение интенсивностей G и D полос  $\approx 3,5$ ), относительно большое распределение нанотрубок по диаметру (волновое число для радиальной дыхательной моды лежит в интервале 100-300  $\text{см}^{-1}$ ). КР спектроскопия позволила определить частично дестабилизированное состояние ДНК (увеличение на 8  $\text{см}^{-1}$  полосы колебаний фосфодиэфирной связи – 1090  $\text{см}^{-1}$ ), подтверждаемое уменьшением на 10 $^{\circ}\text{C}$  температуры плавления ДНК в воде относительно таковой в физиологической среде. При изучении спектра КР комплекса УНТ-ДНК также можно сделать заключение о дестабилиза-

ции ДНК в составе комплекса (смещение на 9 см<sup>-1</sup> полосы 1090 см<sup>-1</sup>) при смещении на 5 см<sup>-1</sup> полос колебаний атомных групп аденина и гуанина (1421 см<sup>-1</sup>) и смещение на 14 см<sup>-1</sup> колебательной полосы гуанина 679 см<sup>-1</sup> (рис. 4).

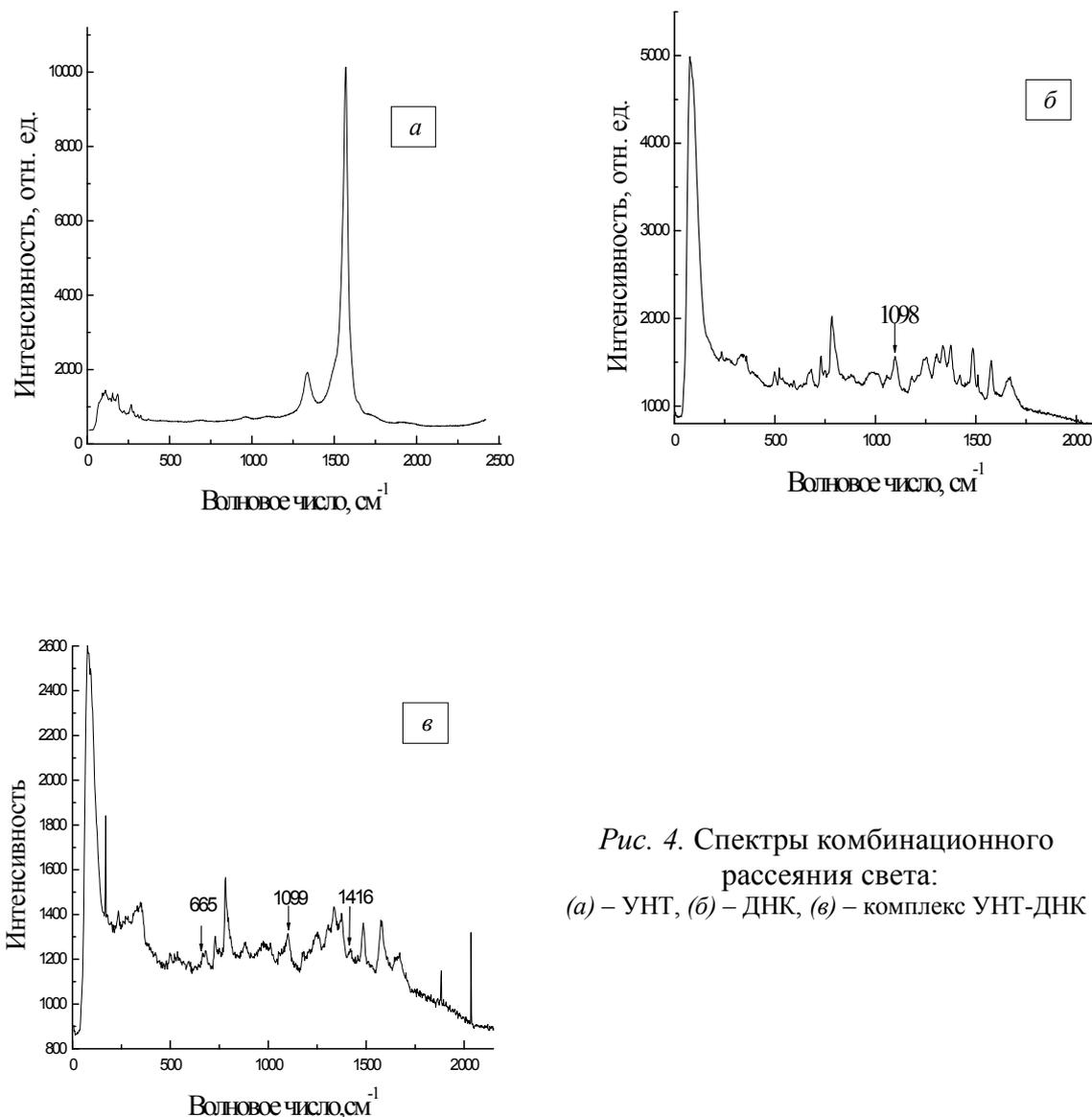


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света:  
(а) – УНТ, (б) – ДНК, (в) – комплекс УНТ-ДНК

### ВОЗМОЖНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА ДНК-УНТ

В качестве модели комплекса ДНК-УНТ можно предположить, что молекула ДНК своими концевыми односторонними участками образует связи в некоторых местах с поверхностью нанотрубки благодаря нековалентным взаимодействиям (гидрофобные силы,  $\pi$ -стэкинг и др.). Односторонние участки обладают большой гибкостью (вращение нуклеозидов и нуклеотидов вокруг связей сахара-фосфатного остова), что позво-

ляет им находить низкоэнергетические состояния с максимальным взаимодействием с поверхностью УНТ. Эти участки служат своего рода «якорем», удерживающим двунитевые ДНК на нанотрубке. Затем Ван-дер-ваальсовы силы и электростатические силы (фосфатный остов отрицательно заряжен) приводят к дальнейшей стабилизации комплекса, располагая ДНК на минимальном расстоянии от поверхности нанотрубки [1, с. 1245].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Электронная и атомно-силовая микроскопия показали, что изучаемые нами УНТ имеют диаметр 10-30 нм, а длина их достигает микрометров. Диаметр молекул ДНК порядка 2 нм и их длина несколько миллиметров, что соответствует экспериментальным данным, полученным в других лабораториях. ДНК, используемая нами в эксперименте, находится в двуспиральной конформации (В-форме), близкой к нативной (судя по электронному спектру поглощения, величине гиперхромного эффекта) и, тем не менее, снижение температуры плавления на 10°C свидетельствует о том, что либо отдельные молекулы, либо участки молекул ДНК в условиях эксперимента находятся в частично дестабилизированном. Это согласуется со смещением колебательных полос фосфодиэфирной связи в спектре КР раствора ДНК. При комплексообразовании состояние ДНК в комплексе УНТ-ДНК также изменяется в сторону ее дестабилизации, что подтверждается смещением полос колебаний фосфодиэфирной связи и атомных групп азотистых оснований ДНК в спектрах КР раствора ДНК-УНТ. При комплексообразовании обнаружено также смещение (увеличение частоты) полосы колебаний G моды УНТ.

## **Литература**

1. *Гладченко Г. О., Карачевцев М. В., Гламазда А. Ю.* Адсорбция одонитевой и двунитевой ДНК на углеродные нанотрубки // *Nanotechnologies*. 2008. т. 6. № 4. С. 1237–1245.

## **СТАБИЛЬНОСТЬ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ Ti-Zr-Al-N ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНОВ КСЕНОНА**

**А. Ю. Ровбуть**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Добавлением в состав систем Ti-Zr-N алюминия и варьированием его концентрации можно существенно модифицировать структурно-фазовое состояние покрытий за счет формирования нанокристаллической струк-