

# Оценка отклика локального биозонда на основе наноканального транзистора

И. А. Девятков<sup>1,\*</sup>, И. И. Соловьев<sup>1</sup>, В. В. Колыбасова<sup>2</sup>, Д. Е. Преснов<sup>1,2</sup>, П. А. Крутицкий<sup>3</sup>, В. А. Крупенин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИЯФ им. Д. В. Скобелевца МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 1.

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Миусская пл., 4.

\*igor-devyatov@yandex.ru

Проведена оценка отклика локального сенсора на основе полевого транзистора с каналом-нанопроводом. Данная оценка получена в рамках трехмерной модели сенсора с локализованной чувствительной частью. Исследована зависимость отклика от электрофизических параметров системы: характерного размера чувствительной части сенсора, уровня допирования канала транзистора, молярной концентрации ионов в среде электролита, расстояния заряженных частиц от поверхности сенсора.

## Введение

Для оценки отклика зондов на основе транзистора с каналом-нанопроводом традиционно предлагаются простые аналитические одномерные модели, использующие ряд допущений, позволяющих значительно упростить аналитическое решение, пользуясь которым можно лишь качественно описать характеристики устройств простейшей геометрии. Для более точных расчетов используются численные методы.

Недавно был предложен принципиально новый прибор на основе транзистора с изогнутым каналом-нанопроводом – зонд для проведения локальных измерений в биологических и физических системах [1]. Сложная геометрия такого сенсора представляет значительную трудность при расчете его характеристик. Актуальной задачей является разработка трехмерной модели и аналитического подхода, позволяющего количественно оценить зависимость величины отклика сенсора от параметров системы.

## Моделирование

Поиск точного решения задачи в явном виде возможен в случае, когда модель сенсора обладает топологической симметрией. В качестве такой модели был выбран полупроводниковый шар, находящийся в среде электролита. Математически задачу можно сформулировать следующим образом. Распределение потенциала вокруг шара и внутри него будет удовлетворять уравнениям Гельмгольца:

$$(\Delta - k_0^2) \tilde{u}_0(\vec{r}) = -q\delta(\vec{r} - \vec{r}_0), \quad r > R, \quad (1)$$

$$(\Delta - k_1^2) u_1(\vec{r}) = 0, \quad r < R, \quad (2)$$

с условиями сопряжения

$$\tilde{u}_0|_{r=R} = u_1|_{r=R}, \quad \varepsilon_0 \frac{\partial \tilde{u}_0}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varepsilon_1 \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (3)$$

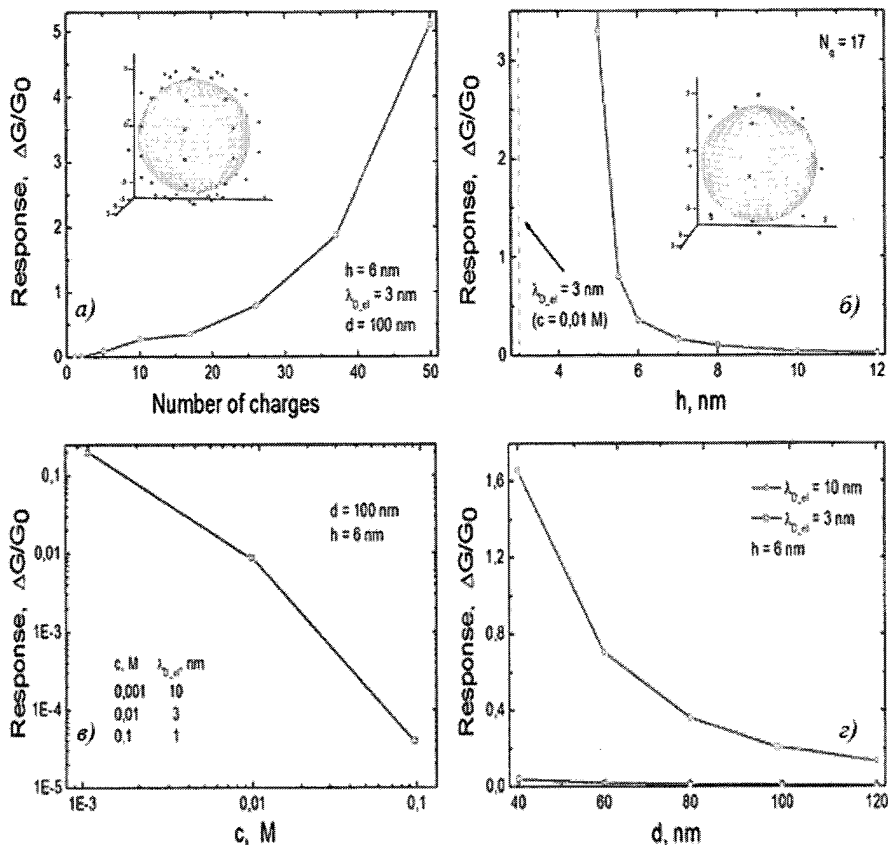
где индекс 0 соответствует среде вокруг шара, а индекс 1 – среде внутри шара,  $\vec{r}_0 = \{0, 0, a\}$ ,  $a$  – расстояние от центра координат до пробного заряда,  $R$  – радиус шара,  $k_{0,1} = \lambda_{0,1}^{-1}$  – обратные длины Дебая в соответствующих средах,  $q = ze/e\varepsilon_0$  – пробный заряд,  $z$  – зарядовое число,  $e$  – заряд электрона,  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$  – диэлектрические проницаемости электролита, вакуума и шара,  $u_{0,1}$  – потенциалы в соответствующих средах,  $\vec{r}_0 = \{x, y, z\}$  – радиус-вектор. На бесконечности выполнено условие:

$$\tilde{u}_0(\vec{r}) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Аналитическое решение этой задачи в сферических координатах имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_0(r, \theta, \varphi) &= \frac{q}{4\pi} \frac{e^{-k_0 \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta}}}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta}} + \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{K_{n+\frac{1}{2}}(k_0 r)}{\sqrt{r}} P_n(\cos \theta), \quad r > R, \\ u_1(r, \theta, \varphi) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n \frac{I_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)}{\sqrt{r}} P_n(\cos \theta), \\ &r < R, \end{aligned}$$

где  $C(\theta, \varphi) = \cos(\theta)\cos(\theta_0) + \sin(\theta)\sin(\theta_0)\cos(\varphi - \varphi_0)$ ,  $r = a > R$ ,  $\theta = \theta_0$ ,  $\varphi = \varphi_0$  – сферические координаты пробного заряда. С помощью принципа суперпозиции решение обобщается на случай произвольного числа точечных зарядов.



**Рисунок 1.** а) зависимость отклика от количества детектируемых единичных зарядов, расположенных вокруг шара равномерно по сферическим углам, как показано на вставке.  $d$  - диаметр шара,  $h$  - расстояние зарядов до поверхности шара,  $\lambda_{D,el}$  - значение дебаевской длины экранирования, молярная концентрация  $c = 0.01$  М; б) зависимость отклика от расстояния детектируемых единичных зарядов до поверхности шара.  $N_q$  - количество зарядов; в) зависимость отклика на единичный детектируемый заряд в электролите от молярной концентрации ионов; г) зависимости отклика на единичный детектируемый заряд в электролите от диаметра шара при различных длинах экранирования Дебая в электролите

Оценку величины отклика сенсора можно получить, подставляя найденное решение в известное выражение для относительной модуляции удельной проводимости канала транзистора:

$$\frac{\Delta G}{G_0} = \frac{1}{V} \int \left( e^{\frac{e}{k_B T} u_1} - 1 \right) dV, \quad (7)$$

где  $V$  – объем шара,  $k_B$  – константа Больцмана,  $T$  – температура. Зависимости, рассчитанные согласно выражениям (6), (7) для кремниевого шара, допированного до концентрации  $N = 10^{15}$ , представлены на рисунке 1. Из полученных данных видно, что зависимость отклика от количества зарядов близка к экспоненциальной (а) и остается такой при условии, что характерный размер чувствительной области сенсора оказывается меньше длины экранирования Дебая в полупроводнике. Линейный размер биологической структуры, активирующей канал,

должен быть не более этой длины (б). Детектирование на уровне единичных зарядов в электролите возможно лишь при слабой концентрации ионов, не превышающей  $c_{max} = 0.01$  М (в). Зависимость отклика от характерного размера чувствительной области сенсора существенна только в случае, когда расстояние детектируемого заряда до поверхности сенсора меньше длины экранирования Дебая в электролите (г). При этом отклик начинает заметно возрастать при уменьшении характерного размера сенсора.

Работа проводилась при поддержке грантов РФФИ № 14-07-00828, Президента РФ № МК-1841.2014.2.

### Литература

1. В. Tian, Т. Cohen-Karni, Q. Qing et al. // Science V. 329, 830 (2010).