

УДК 621.382; 353-083; 53-088

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОТКЛИКА НАНОПРОВОЛОЧНЫХ БИОСЕНСОРОВ

О. В. Наумова, Б. И. Фомин

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: naumova@isp.nsc.ru*

Нанопроволочные полевые транзисторы являются высокочувствительными сенсорными элементами, предназначенными для качественного и количественного анализов биологических и химических веществ. Оптимизация режима работы сенсоров — одна из ключевых задач повышения их чувствительности. Предложен алгоритм выбора режима работы сенсоров на основе КНИ-транзисторов, позволяющий обеспечить их максимальный отклик в процессе мониторинга проводимости при детекции целевых частиц.

*Ключевые слова:* биосенсор, отклик, полевой транзистор.

DOI: 10.15372/AUT20160503

**Введение.** Хорошо известно, что из-за большого аспектного соотношения поверхность/объем нанопроволоки (НП) с омическими контактами на концах (областями стока-истока) могут быть использованы в качестве высокочувствительных сенсорных элементов [1–7]. В таких сенсорах любая частица, адсорбируемая на поверхность НП, действует как локальный виртуальный затвор, вызывая изменение поверхностного потенциала и соответственно проводимости НП [1, 2]. Предельная чувствительность этих сенсоров составляет одну частицу на проволоку при сопоставимости размеров НП и области обеднения, индуцируемой адсорбируемой частицей. Экспериментально достигнутая в настоящее время концентрационная чувствительность НП-сенсоров при детекции белков, ДНК, РНК и других молекул лежит в диапазоне  $10^{-15}$ – $10^{-16}$  М [2–7].

Сенсорные элементы могут изготавливаться в виде отдельно стоящих или размещённых на диэлектрике нанопроволок. Локализация НП на диэлектрике (отсечение НП от проводящей подложки слоем диэлектрика, например, при изготовлении их на структурах кремний-на-изоляторе (КНИ)) превращает такой сенсор в полевой МОП-транзистор с двойным затвором. Подложка структур, в частности КНИ, используется в качестве управляющего электрода — тылового затвора (BG), на котором напряжением  $V_{BG}$  формируется канал проводимости вблизи границы раздела скрытый диэлектрик — НП. Адсорбируемая частица с зарядом  $Q_{ad}$  действует как второй, виртуальный или верхний затвор (TG), вызывая изменение проводимости в канале из-за взаимосвязи потенциалов на противоположных границах НП [8, 9]. Для сенсоров, работающих в режиме обеднения НП, происходит практически параллельный сдвиг затворных характеристик вправо или влево в зависимости от знака заряда адсорбируемой частицы, как схематично показано на рис. 1. При этом модуляция проводимости (или тока между стоком-истоком сенсора  $I_{DS}$ ) при адсорбции частиц на поверхность НП сильно зависит от выбора напряжения  $V_{BG}$  — рабочей точки транзистора (ср. точки 1 и 2). Из-за экспоненциальной зависимости тока  $I_{DS}$  от поверхностного потенциала в подпороговой области затворных характеристик (в режиме обеднения НП) можно получить максимальный отклик сенсора к адсорбируемым частицам [1, 5, 6]. Таким образом, при детекции частиц в режиме реального времени модуляция проводимости сенсора в конструкции, когда НП локализована на диэлектрике, определяется выбором напряжения  $V_{BG}$ .

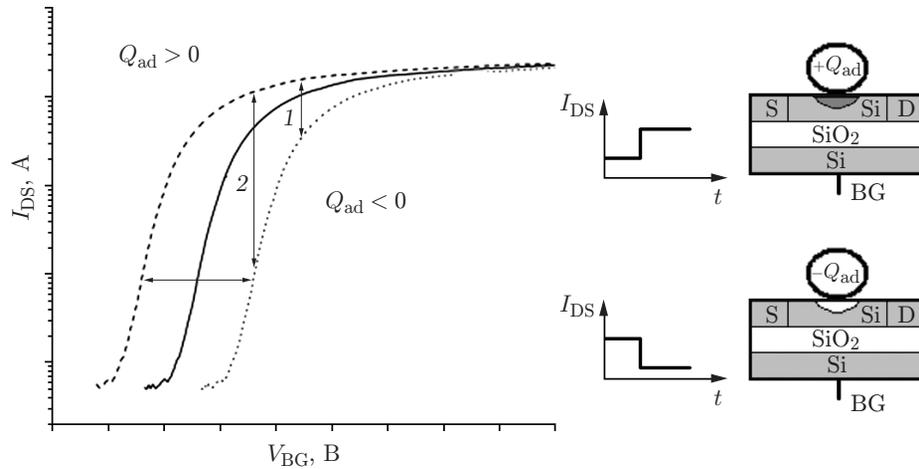


Рис. 1. Схема нанопроволочного КНИ-транзистора и его временные  $I_{DS}(t)$  и затворные  $I_{DS}(V_{BG})$  зависимости до и после адсорбции положительного или отрицательного заряда на поверхность Si-нанопроволоки

Цель данной работы — определение диапазона напряжений на BG (рабочего диапазона) сенсора, позволяющего обеспечить максимальный отклик к адсорбируемому заряду на поверхности. Для этого были проанализированы поведение затворных характеристик НП-сенсора и его отклик при имитации адсорбции частиц на поверхность НП и предложен алгоритм выбора рабочего напряжения для сенсора, позволяющий оптимизировать его отклик при последующей детекции аналита.

**Результаты эксперимента.** На рис. 2 представлены зависимости  $I_{DS}(V_{BG})$  для КНИ-транзистора, измеренные экспериментально (исходная) и полученные сдвигом исходной характеристики по оси напряжений вправо. Ширина и толщина Si-НП равны 30 нм, толщина скрытого диэлектрика составляет 400 нм. Сдвиг затворных зависимостей по оси

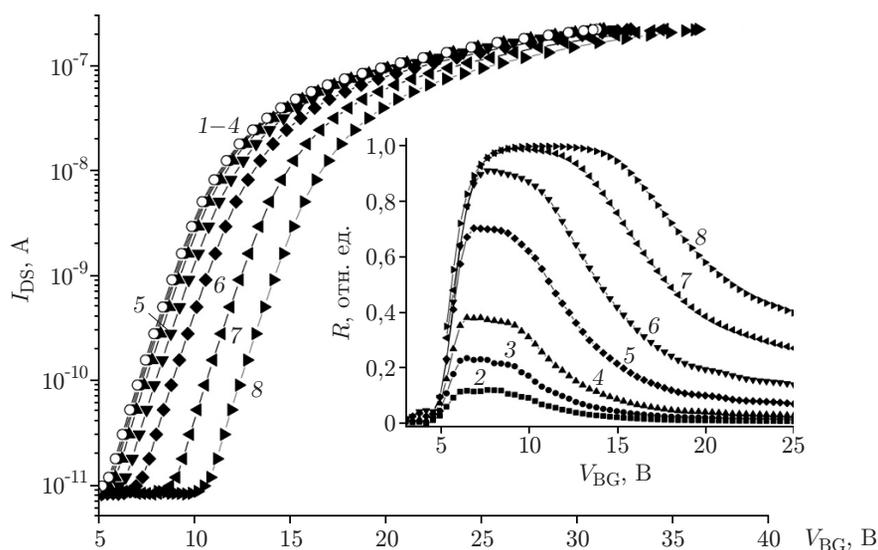


Рис. 2. Зависимости  $I_{DS}(V_{BG})$  для КНИ-транзистора: исходная (кривая 1) и полученные сдвигом исходной по оси напряжений на  $\Delta V_{BG}(S)$ : кривая 2 — 0,05, 3 — 0,1, 4 — 0,2, 5 — 0,5, 6 — 1, 7 — 2, 8 — 3. На вставке показаны соответствующие относительные изменения тока (отклик сенсора)

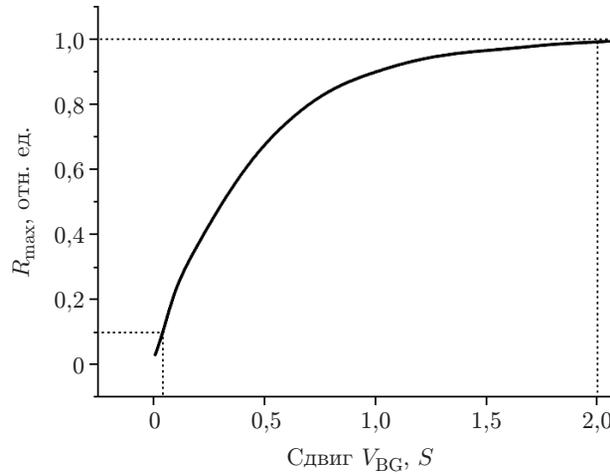


Рис. 3. Максимальный отклик сенсора на основе КНИ-транзистора в зависимости от сдвига его исходной характеристики  $I_{DS}(V_{BG})$  по оси напряжений

напряжений  $\Delta V_{BG}$  выражен в единицах  $S$  ( $S$  — подпороговый наклон затворной характеристики транзистора).

Как отмечалось выше, для работающих в режиме обеднения КНИ-сенсоров (транзисторов) адсорбция частиц на поверхность приводит к параллельному сдвигу затворных зависимостей  $I_{DS}(V_{BG})$ . Сдвинутые по оси напряжений вправо зависимости  $I_{DS}(V_{BG})$  имитируют накопление отрицательно заряженных частиц на поверхности НП.

На вставке рис. 2 показаны соответствующие относительные изменения тока  $I_{DS}$  — отклик НП-транзистора  $R$  на «адсорбируемый» заряд, рассчитанный как

$$R = \frac{|I_{DS} - I_{DS}^0|}{I_{DS}^0} = \left| \frac{I_{DS}}{I_{DS}^0} - 1 \right|. \quad (1)$$

Видно, что зависимости  $R$  от  $V_{BG}$  немонокотонны и имеют плато, т. е. достигают максимальных значений  $R_{max}$  в определённых диапазонах  $V_{BG}$ .

Из выражения (1) ясно, что отклик сенсора  $R$  стремится к единице, когда выполняется условие  $I_{DS}^0/I_{DS} \geq 100$ . С другой стороны, хорошо известно, что подпороговый наклон МОП-транзистора  $S$  показывает, насколько необходимо изменить напряжение на затворе, чтобы обеспечить изменение тока транзистора в 10 раз [10]. Отсюда понятно, что максимальный отклик КНИ-транзистора  $R_{max} = 1$  (относительные изменения тока 100 %) достигается в том случае, если при адсорбции частицы на поверхность его зависимость  $I_{DS}(V_{BG})$  сдвигается по оси напряжений на  $2S$  и больше. На рис. 3 представлена зависимость  $R_{max}$  от  $\Delta V_{BG}$ , выраженная в единицах  $S$ . Видно, что  $R_{max} = 0,1$  (относительные изменения тока сенсора 10 %) достигается при сдвиге зависимостей  $I_{DS}(V_{BG})$  по оси напряжений на  $0,05S$ . Поскольку сдвиг затворных характеристик выражен в единицах  $S$  и  $S$  включает все параметры КНИ-транзистора [8, 9], зависимость  $R_{max}$  от  $\Delta V_{BG}$  универсальна для сенсоров с любыми конструктивно-технологическими параметрами.

Результаты анализа зависимостей, приведённых на рис. 2 и 3, позволяют предложить следующий алгоритм выбора рабочего напряжения  $V_{BG}$  НП-транзистора (сенсора), необходимого для непрерывного мониторинга модуляции его проводимости при детекции аналита с максимальным откликом к адсорбированным на поверхности частицам. Алгоритм, схематически изображённый на рис. 4, включает следующие шаги:

— измерение исходной (до адсорбции частиц) зависимости  $I_{DS}(V_{BG})$  для сенсора;

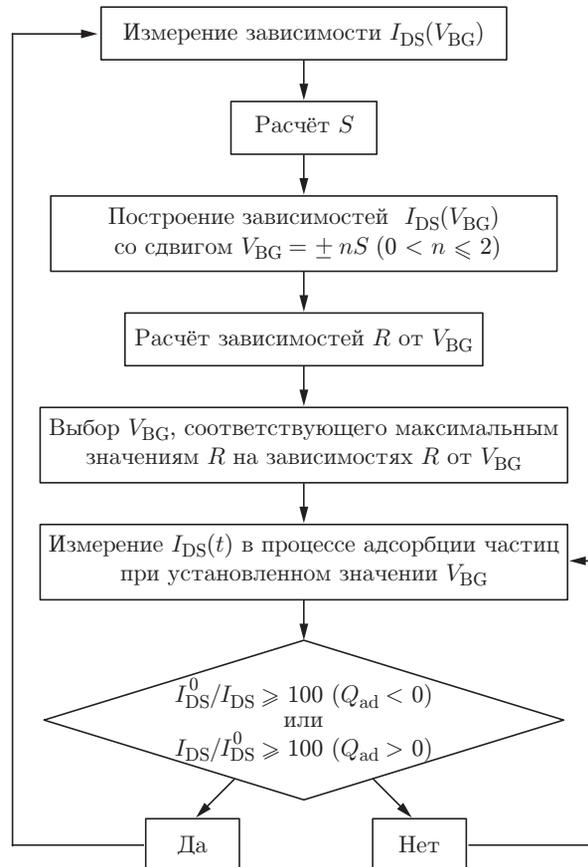


Рис. 4. Схема алгоритма выбора рабочей точки (напряжения  $V_{BG}$ ), обеспечивающей максимальный отклик сенсора на адсорбированный заряд при измерении временных зависимостей тока (проводимости) НП

- определение подпорогового наклона  $S$  для зависимости  $I_{DS}(V_{BG})$ ;
- построение зависимостей  $I_{DS}(V_{BG})$ , сдвинутых по оси напряжений на  $\pm nS$  с учётом знака заряда тестируемых частиц (здесь  $0 < n \leq 2$ );
- расчёт соответствующих зависимостей  $R$  от  $V_{BG}$  с использованием выражения (1);
- выбор  $V_{BG}$  из интервала значений, соответствующих плато на зависимостях  $R$  от  $V_{BG}$  (см. вставку на рис. 2);
- измерение зависимостей  $I_{DS}(t)$  до и после адсорбции тестовых частиц при условии, что  $I_{DS}^0/I_{DS} \geq 100$  или  $I_{DS}/I_{DS}^0 \geq 100$  при различном знаке заряда адсорбируемых частиц ( $Q_{ad} < 0$  и  $Q_{ad} > 0$ ), сдвигающих характеристики  $I_{DS}(V_{BG})$  влево или вправо соответственно.

Если последнее условие не выполняется, необходим выбор нового значения  $V_{BG}$  (новой рабочей точки).

**Заключение.** Чувствительность НП-сенсоров обусловлена многими факторами (доставкой аналита, наличием рецепторных слоёв на поверхности сенсора, конструктивно-технологическими параметрами прибора и др.). Выбор режима работы — одна из ключевых задач повышения чувствительности прибора. На примере КНИ-сенсоров показано, что оптимизация режима (выбор рабочего напряжения) сенсоров может на порядки увеличить их отклик при адсорбции заряда на поверхность. Предложен алгоритм выбора режима работы сенсоров, позволяющий оптимизировать их отклик в процессе последующего мониторинга проводимости при детекции целевых частиц. Данный алгоритм действителен

для любого типа сенсоров, разделённых с подложкой слоем изолятора, где подложка используется как управляющий электрод (дополнительный затвор).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неизвестный И. Г.** Полупроводниковые нанопроволочные сенсоры // Микроэлектроника. 2009. **38**, № 4. С. 243–259.
2. **Stern E., Klemic J. F., Routenberg D. A. et al.** Label-free immunodetection with CMOS-compatible semiconducting nanowires // Nature. 2007. **445**, Is. 7127. P. 519–522.
3. **Lu N., Gao A., Dai P. et al.** CMOS-compatible silicon nanowire field-effect transistors for ultrasensitive and label-free microRNAs sensing // Small. 2014. **10**, Is. 10. P. 2022–2028.
4. **Gao A., Lu N., Wang Y. et al.** Enhanced sensing of nucleic acids with silicon nanowire field effect transistor biosensors // Nano Lett. 2012. **12**, Is. 10. P. 5262–5268.
5. **Naumova O. V., Fomin B. I., Nasimov D. A. et al.** SOI nanowires as sensors for charge detection // Semicond. Sci. Technol. 2010. **25**, N 5. 055004.
6. **Xuan P., Gao A., Zheng G., Lieber C. M.** Subthreshold regime has the optimal sensitivity for nanowire FET biosensors // Nano Lett. 2010. **10**, Is. 2. P. 547–552.
7. **Yang F., Zhang G.-J.** Silicon nanowire-transistor biosensor for study of molecule-molecule interactions // Rev. Anal. Chem. 2014. **33**, Is. 2. P. 95–110.
8. **Lim H.-K., Fossum J. G.** Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's // IEEE Trans. Electron Devices. 1983. **30**, Is. 10. P. 1244–1251.
9. **Hovel H. J.** Si film electrical characterization in SOI substrates by the HgFET technique // Solid-State Electron. 2003. **47**, Is. 8. P. 1311–1333.
10. **Sze S. M.** Physics of Semiconductor Devices. N. Y.: John Wiley & Sons, 1981. 868 p.

*Поступила в редакцию 30 марта 2016 г.*

---