

05.3

Усиление сигнала при стохастическом резонансе в пленке диоксида ванадия

© В.Ш. Алиев, С.Г. Бортников, М.А. Демьяненко

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск

E-mail: aliev@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2012 г.

В планарной структуре с VO_2 проводящим каналом, включенной последовательно с нагрузочным резистором, наблюдалось явление стохастического резонанса с усилением входного сигнала в 1.6 раза. Коэффициент передачи отношения сигнал-шум в схеме достигал 250.

Известно, что стохастический резонанс (СР) является одним из примеров индуцированных шумом переходов в нелинейных системах, возбуждаемых одновременно информационным сигналом и шумом [1]. При определенном подборе уровня шума на входе нелинейной системы в условиях стохастического резонанса наблюдается улучшение такой важной характеристики информационного сигнала, как отношение сигнал-шум и даже усиление сигнала. Представляет интерес исследование этого явления в пленках диоксида ванадия, которые, с одной стороны, проявляют ярко выраженные нелинейные электрофизические свойства вблизи фазового перехода металл-полупроводник (МП) [2], а с другой — широко используются в качестве чувствительного слоя болометров для регистрации и визуализации ИК-излучения [3,4]. Очевидно, что прямое использование СР в обычных болометрических матрицах из-за схемотехнической концепции построения системы регистрации сигнала, скорее всего, не даст положительного эффекта. Однако в системах регистрации, построенных по подобию биологических систем, использование СР может оказаться эффективным. Первое наблюдение СР в пленках диоксида ванадия было продемонстрировано в работе [5], в которой пленка играла роль многоходового компаратора для выделения сигнала на фоне шума и помех. В данной работе путем электроформовки была сформирована планарная структура с VO_2 проводящим каналом. В схеме, состоящей из данной структуры

и последовательно включенного с ней резистора, было обнаружено явление СР с усилением входного сигнала.

В работе для выращивания пленок оксидов ванадия был использован метод ионно-лучевого распыления–осаждения. В качестве мишени для распыления использовался металлический ванадий (марка МнВ-1, $V > 99.5\%$). Распыление проводилось в присутствии кислорода (ОСЧ, $O_2 > 99.998\%$), который подавался в вакуумную камеру, откачиваемую криогенным насосом. Остаточное давление в камере не превышало $7 \cdot 10^{-5}$ Па. В качестве подложек были использованы пластинки кремния, покрытые термическим SiO_2 . Температура подложки при нанесении пленок составляла 723 К, а скорость осаждения — 0.034 nm/s. Выращивались пленки толщиной около 150 nm.

Структурные исследования, проведенные методом дифракции быстрых электронов на приборе EF-Z4 при ускоряющем напряжении 50 keV, показали, что выращенные пленки являлись поликристаллическими, состоящими из смеси двух кристаллических фаз — VO_2 и V_6O_{13} и аморфной фазы.

По данным эллипсометрии (ЛЭФ-3М, длина волны света 632.8 nm) толщина одной из выращенных пленок составила 181.0 ± 6.9 nm, показатель преломления $n = 1.665 \pm 0.044$ и коэффициент поглощения $k = 0.07 \pm 0.01$. Слоевое сопротивление данной пленки, измеренное четырехзондовым методом, было равно $235 k\Omega$ square.

Электрические измерения были выполнены на структурах, изготовленных методом фотолитографии. Сечение структуры показано на рис. 1, а. Зазор между контактами был равен $3 \mu m$, а ширина контактной области на мезе — $50 \mu m$. Контакты отжигались в кварцевом трубном реакторе в потоке аргона высокой чистоты ($Ar > 99.999\%$) при температуре 523 К в течение 30 min. Слоевое сопротивление пленки после отжига практически не изменилось.

При нагреве от комнатной температуры (296 К) до температуры 353 К сопротивление структуры уменьшалось всего в 4.7 раза. Учитывая, что пленка состояла из смеси фаз, было сделано предположение, что между металлическими электродами (рис. 1, а) отсутствовал канал проводимости по нанокристаллам VO_2 . Для создания проводящего канала была использована электроформовка [6]. Для этого на образец кратковременно подавалось напряжение около 20–30 V через ограничивающее сопротивление. В результате в пленке оксидов ванадия образовывался „проводящий“ канал шириной около $2 \mu m$, который был

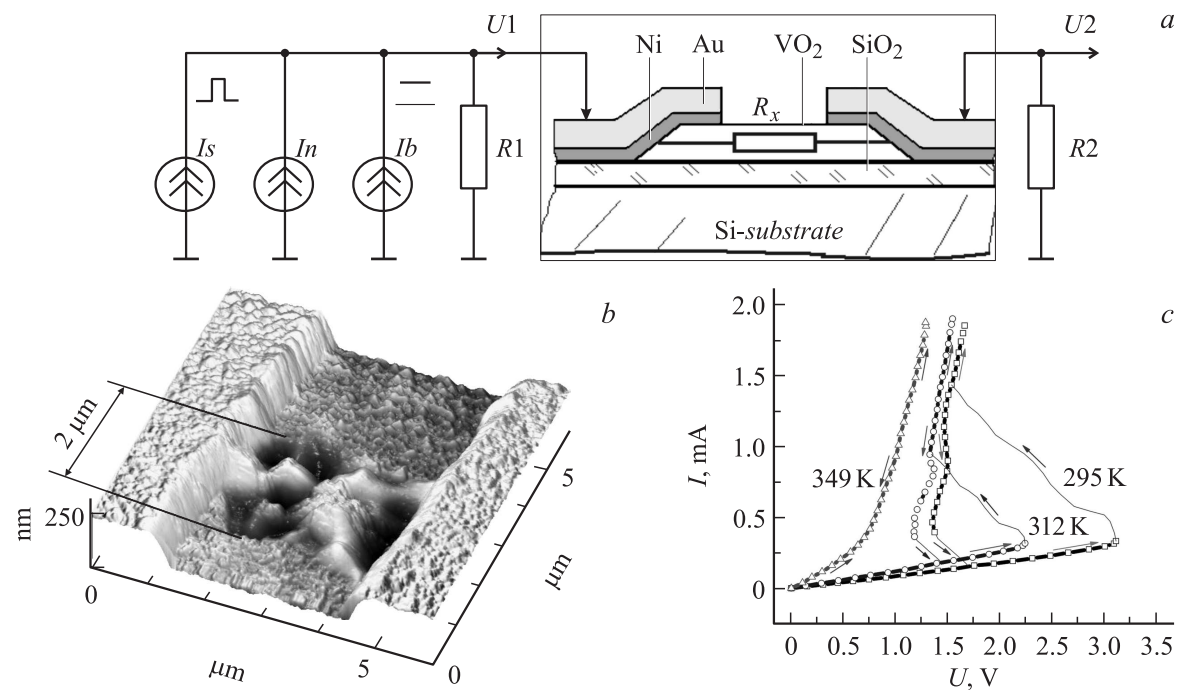


Рис. 1. Электрическая схема для наблюдения СР в структуре с VO_2 проводящим каналом. Резисторы: $R_1 = 100\Omega$ — входной, $R_2 = 1.05 k\Omega$ — выходной. *a* — схематическое изображение сечения структуры, R_x — сопротивление структуры; *b* — АСМ-изображение проводящего канала, образовавшегося в результате электроформовки; *c* — ВАХ структуры с проводящим каналом при различных температурах.

визуализирован методом атомно-силовой микроскопии (АС) (SOLVER P-4, NT-MDT) (рис. 1, *b*). Формовка изменила сопротивление структуры с 13.4 до 17.3 к Ω . После формовки сопротивление структуры при нагреве от комнатной температуры до температуры 353 К уменьшалось уже в 40.3 раза. ВАХ формованной структуры, снятые при разных температурах на характеристикографе TR-4805 с внутренним ограничивающим сопротивлением 1 к Ω , показаны на рис. 1, *c*. После формовки ВАХ структур оставались стабильными в течение всего времени измерений (несколько часов), а также воспроизводились на следующий день.

Из ширины электрода ($50 \mu\text{m}$), ширины канала ($2 \mu\text{m}$) и величин сопротивления отформованной структуры были оценены сопротивления канала при комнатной температуре и при температуре 353 К, которые оказались равными 432.5 к Ω и 429 Ω соответственно. Столь значительное (на три порядка) изменение сопротивления канала в области температур от 296 до 353 К позволяет сделать предположение о том, что в канале после формовки фазовый состав пленки изменился до VO₂, для которого существует фазовый переход МП при температуре 341 К.

Электрическая схема, в которой наблюдался СР, показана на рис. 1. Путем пропускания через R_1 постоянного тока от источника I_b задавалось рабочее напряжение на структуре без подачи сигнала и шума. Источники тока I_s и I_n являлись источниками сигнала и шума соответственно. Сигнал представлял собой импульсы длительностью $\tau = 1 \text{ ms}$, следующие с частотой 100 Hz. Источник шума генерировал белый шум в полосе 10 Hz–600 kHz. На входном сопротивлении R_1 суммировались: постоянное напряжение смещения, сигнал и шум. Входное U_1 и выходное U_2 напряжения записывались цифровым осциллографом GDS-2202 (GW INSTRUMENTS).

На рис. 2 показаны осциллограммы U_1 и U_2 при разных мощностях шума (D) на входе схемы для отформованной структуры с $R_x = 22.8 \text{ k}\Omega$. Видно, что с ростом мощности шума сигнал становился незаметным в осциллограммах U_1 и U_2 (рис. 2, *b*). При мощности шума около 0.15 mW появлялись отдельные импульсы, свидетельствующие о случайных перескоках пленки VO₂ из высокоомного в низкоомное состояние. И при мощности шума 0.29 mW импульсы на выходе схемы по частоте и фазе совпадали с входными импульсами (рис. 2, *c*). При дальнейшем увеличении мощности шума количество выходных импульсов начинало превышать количество входных импульсов.

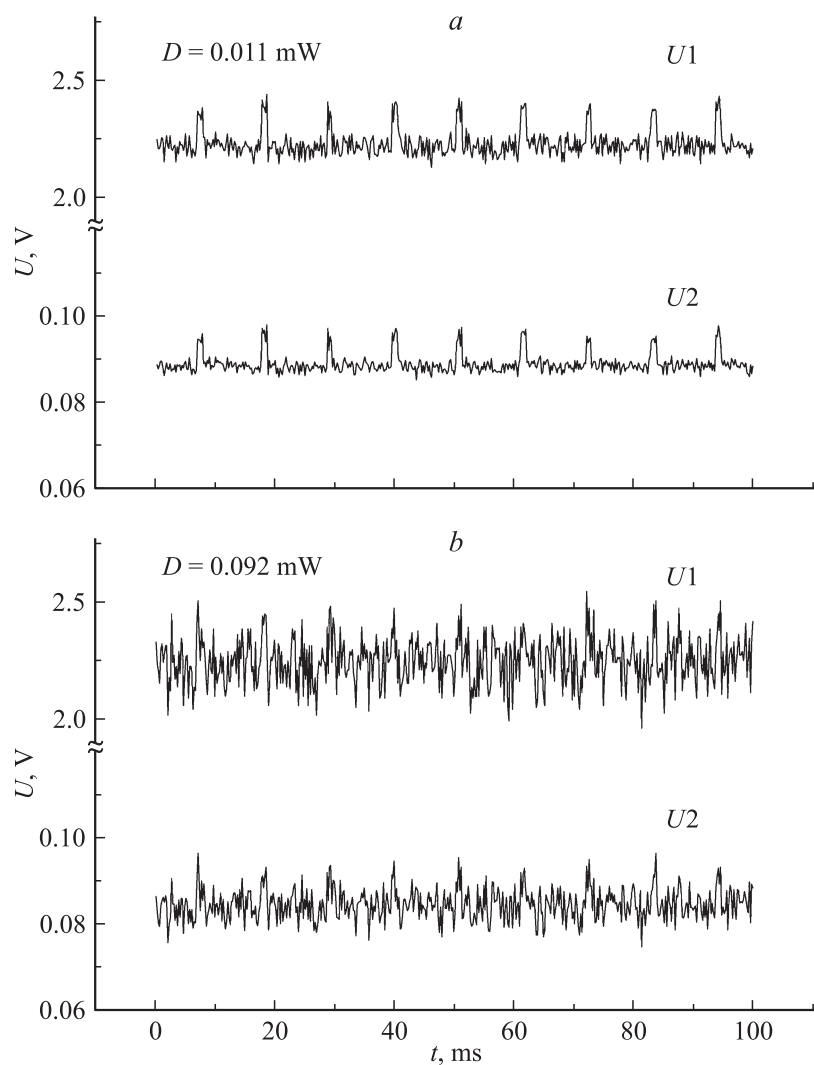


Рис. 2. Осциллограммы U_1 и U_2 при различных мощностях шума (D) на входном резисторе R_1 : a — 0.011 mW ; b — 0.092 mW ; c — 0.29 mW .

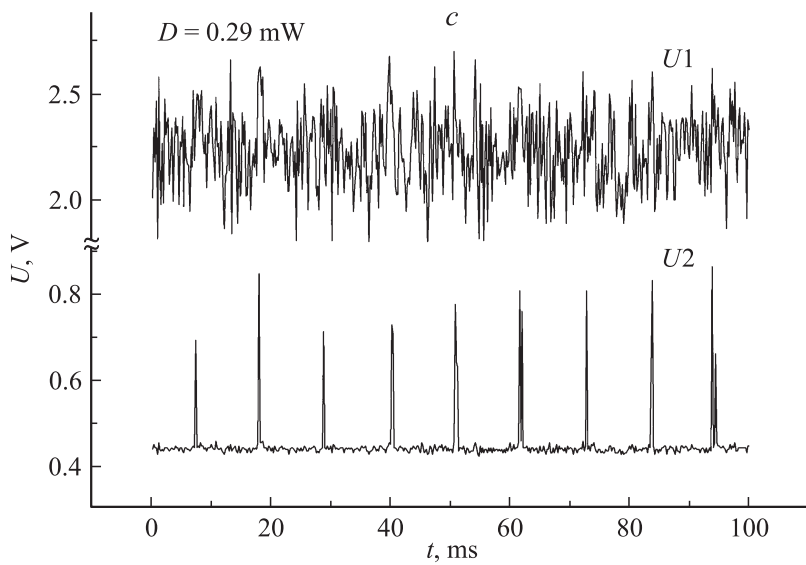


Рис. 2 (продолжение).

Из осциллограмм $U1$ и $U2$ были рассчитаны отношения сигнал-шум на входе ($RSN1$) и выходе ($RSN2$) схемы. При расчете были использованы осциллограммы, охватывающие временной интервал, содержащий $m = 14$ импульсов сигнала. Расчет $RSN1$ представлен ниже:

$$RSN1 = \frac{(U1s)^2}{(U1n)^2},$$

$$(U1n)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{T - \tau} \int_{t_{j+\tau}}^{t_{j+1}} (U1(t) - \tilde{U}1)^2 dt,$$

$$\tilde{U}1 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{T - \tau} \int_{t_{j+\tau}}^{t_{j+1}} U1(t) dt,$$

$$(U1s)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{\tau} \int_{t_j}^{t_j+\tau} ((U1(t) - \tilde{U}1)^2 - (U1n)^2) dt,$$

где $(U1n)^2$ — квадрат напряжения шума на входном резисторе $R1$, рассчитанный по осциллограмме $U1(t)$ во временном интервале $(t_j + \tau, t_{j+1})$, где нет импульсов; $\tilde{U}1$ — постоянное напряжение на резисторе $R1$, рассчитанное путем усреднения $U1(t)$ во временном интервале, где нет импульсов; $(U1s)^2$ — квадрат напряжения сигнала на входном резисторе $R1$, рассчитанный по осциллограмме $U1(t)$ во временном интервале $(t_j, t_j + \tau)$, где есть импульсы; t — текущее время; t_j — начало j -го импульса; $\tau = 1$ ms — длительность импульса; $T = 10$ ms — период следования импульсов. Аналогично было рассчитано $RSN2$. Изменяя мощность источника шума и рассчитывая входную мощность шума как $D = (U1n)^2/R1$, были получены зависимости $RSN1(D)$ и $RSN2(D)$ (рис. 3).

Отношение сигнал-шум на выходе схемы $RSN2(D)$ на начальном участке спадает по линейному закону, так же как $RSN1(D)$, однако в области мощностей шума 0.1–1.0 mW наблюдается резкий рост зависимости $RSN2(D)$, а затем ее спад. Такое поведение зависимости отношения сигнал-шум от внешне вводимого в систему шума характерно для явления стохастического резонанса [1]. В максимуме зависимости $RSN2(D)$ величина отношения сигнал-шум на выходе схемы была в 250 раз больше отношения сигнал-шум на входе, а амплитуда сигнала на выходе — в 1.6 раз выше амплитуды сигнала на входе, т.е. в схеме, состоящей только из пассивных элементов, при СР наблюдалось усиление сигнала.

Интересно отметить, что зависимость $RSN2(D)$ хорошо описывается функцией $y(x) = -x + 1.6 \cdot F(x, m, \sigma)$, где $x = 2.2 + \lg(D)$, $F(x, m, \sigma)$ — функция логарифмически-нормального распределения (ЛНР) с математическим ожиданием $m = -0.4$ и дисперсией $\sigma = 0.4$. Хорошая аппроксимация зависимости $RSN2(D)$ функцией ЛНР указывает на то, что отклик нелинейной системы является мультипликативным по отношению к источникам сигнала и шума. Отчасти это объясняет наблюдаемый anomalously высокий коэффициент передачи отношения сигнал-шум. Действительно, гармонические составляющие сигнала и шума взаимодействуют посредством теплового эффекта в ограниченном пространстве ($2\mu\text{m} \times 3\mu\text{m} \times 0.1$ nm) проводящего канала, состояще-

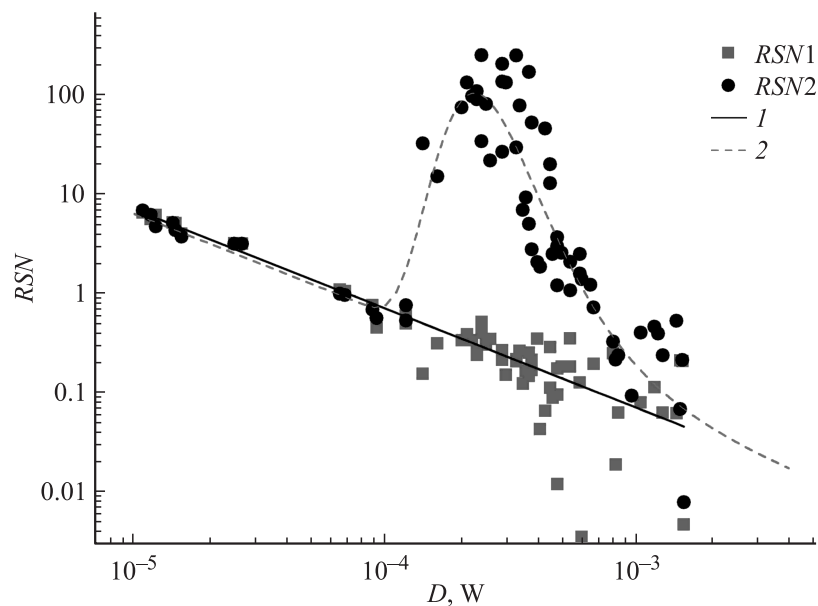


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум на входе $RSN1(D)$ и на выходе $RSN2(D)$ схемы от мощности входного шума: 1 — линейная аппроксимация зависимости $RSN1(D)$, 2 — аппроксимация зависимости $RSN2(D)$ функцией логарифмически-нормального распределения.

го из пленки VO_2 , которая обладает в области фазового перехода аномально высоким температурным коэффициентом сопротивления, достигающим 34%/К [7]. Очевидно, для яркого проявления СР структура должна „попасть“ в узкую температурную область фазового перехода (10 К). Рабочая точка структуры задавалась в экспериментах источником постоянного тока I_b . Однако экспериментально наблюдалась самопроизвольная подстройка рабочей точки структуры при переходе в режим СР. Из осциллограмм U_2 (рис. 2) видно, что при увеличении мощности шума и возникновении СР происходит сдвиг базовой линии осциллограммы, что соответствует увеличению среднего тока, протекающего через структуру. Это означает, что в условиях СР наблюдается автоподстройка рабочей точки структуры по постоянному

току. Новая рабочая точка структуры, по-видимому, сдвигает локальную среднюю температуру проводящего канала в область фазового перехода МП, что обеспечивает максимальную эффективность взаимодействия гармонических составляющих сигнала и шума.

Список литературы

- [1] Анищенко В.С. и др. // УФН. 1999. Т. 169. В. 1. С. 7.
- [2] Мотт Н.Ф. // Переходы металл–изолятор. М.: Наука, 1979. С. 342.
- [3] de Almeida L.A.L. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 94. P. 3605.
- [4] Демьяненко М.А. и др. // Вестник НГУ. Сер. Физ. 2010. Т. 5. В. 4. С. 73.
- [5] Kanki T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 242 108.
- [6] Стефанович Г.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 11. С. 62.
- [7] Алиев В.Ш. и др. // Труды 12-й Междунар. конференции и семинара EDM'2011. Эрлагол, Алтай, 2011. С. 129.