

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШУМЫ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ZnO:Li

Р.К. ОВСЕПЯН^{1,2*}, Н.Р. АГАМАЛЯН^{1,2}, Е.А. КАФАДАРЯН^{1,2},
А.А. АРАКЕЛЯН^{1,2}, Г.Г. МНАЦАКАНЯН^{1,2}, С.И. ПЕТРОСЯН^{1,2}

¹Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: ruben.ovsepyan@mail.ru

(Поступила в редакцию 22 ноября 2019 г.)

Исследованы шумовые характеристики полевых транзисторов на основе пленок ZnO:Li, полученных с использованием диффузной технологии. Приведены результаты экспериментального исследования шумовых характеристик тока стока, а именно: взрывной шум и $1/f$ -шум. Спектральная плотность шумов тока стока в низкочастотном диапазоне (10–5000 Гц) имеет классическую $1/f$ -зависимость. Обнаружено, что при малых концентрациях акцепторной примеси наблюдается $1/f$ -шум, а при увеличении концентрации акцепторной примеси превалирует взрывной шум.

1. Введение

Прозрачная электроника стала быстроразвивающейся областью физики полупроводников и материаловедения, которая позволяет создавать целый ряд принципиально новых устройств, например, прозрачные дисплеи, прозрачные (невидимые) системы безопасности и т. д. Основные активные элементы прозрачной электроники – это прозрачные полевые транзисторы и диоды [1, 2]. Получению и исследованию таких транзисторов посвящено множество работ, однако мало исследованы шумовые характеристики прозрачных полевых транзисторов [3]. Одним из фундаментальных факторов, ограничивающих производительность электронных структур, являются шумы при передаче сигнала или обработке информации [4]. Понижение уровня шума в микронных и субмикронных металл–оксид–полупроводниковых (МОП) структурах является актуальной задачей. В таких МОП структурах из-за большого отношения поверхности к объему шумовые характеристики, в частности низкочастотные токовые шумы, более выражены, чем в кремниевых полупроводниковых структурах. Поэтому важно уменьшить шумы в таких устройствах, по крайней мере, до уровня шумов, сравнимых с традиционными полупроводниковыми элементами.

Существуют различные, зачастую противоречивые теории, пытающиеся

объяснить природу $1/f$ -шума и, в частности, определить его связь с взрывным шумом. Взрывной шум, имеющий характер случайного телеграфного процесса «Random Telegraph Signal» (RTS), наблюдается на фоне других шумов во многих электронных устройствах [5]. Некоторые исследователи предполагают, что $1/f$ -шум представляет собой суперпозицию нескольких случайных RTS процессов с различными характеристическими частотами. Другие полагают, что $1/f$ -шум возникает из-за флуктуаций подвижности носителей, а взрывной шум связан с захватом носителей ловушками, ведущим к изменению концентрации носителей заряда и, следовательно, к флуктуациям проводимости. В последнее время взрывной шум был описан как импульсный шум, проявляющий ступенчатое изменение уровня сигнала. Этот вид шума проявляется как двухуровневый RTS сигнал с одинаковой высотой импульсов тока и со случайно распределенными интервалами времени между импульсами [6]. Кроме того, возможно образование многоуровневого RTS сигнала с несколькими дискретными уровнями. Низкочастотный $1/f$ -шум традиционно используется в качестве показателя качества и надежности для полупроводниковых приборов, поэтому эти исследования представляют интерес для транзисторов на основе ZnO [7].

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование низкочастотного шума полевого транзистора на основе пленок ZnO:Li.

2. Эксперимент

Для проведения исследований шумовых характеристик были изготовлены транзисторы двумя разными методами [8, 9]. В первом случае легирующая примесь, акцепторная или донорная, вводилась в мишень и методом электронно-лучевого напыления в вакууме однородно по толщине вводилась в пленку. Во втором случае в номинально чистую пленку ZnO акцепторная или донорная примесь вводилась методом термической диффузии. Структурные схемы тонкопленочных полевых транзисторов приведены в работах [9, 10]. В технологии создания обоих типов транзисторов при напылении использовались маски-трафареты. На единой подложке сапфира с ориентацией (001) были изготовлены одинаковые по структуре полевые транзисторы. Кристаллическое качество и ориентация пленок оценивались методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-3 с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.1542$ нм).

В качестве изолятора затвора использовались аморфная пленка MgF_2 , полученная методом термического вакуумного напыления. После получения однородной структуры ZnO:Li/ MgF_2 методом лазерной абляции на одной подложке было получено 5 транзисторов. Проводилась электрическая изоляция полевых транзисторов друг от друга.

Измерения шумовых характеристик проводились двумя методами:

методом прямой аналоговой фильтрации (шумовые измерения включали в себя прямое измерение шумового напряжения с использованием аналогового резонансного усилителя с возможностью перестройки по частоте), а также методом оцифровки сигнала.

Шумовой аналоговый сигнал $X(t)$ измерялся в диапазоне от 10 до 5000 Гц. Спектр шумового сигнала может быть однозначно и без потерь восстановлен согласно теореме Котельникова, если частота дискретизации f_{SF} строго больше удвоенной максимальной частоты. В наших измерениях частота дискретизации f_{SF} пятикратно превышала удвоенную максимальную частоту. Измерения шумовых характеристик проводились при комнатной температуре, поэтому образец помещался в термостат. Сбор данных и управление экспериментом осуществлялись с помощью DAQ системы фирмы «National Instruments». Для амплитудного анализа сигнала использовался 60-канальный виртуальный анализатор фирмы «National Instruments», разработанный на основе пакета прикладных программ «LabVIEW». Измерения проводились с использованием изолятора радиопомех.

3. Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований были изготовлены транзисторы n -типа с применением разных технологий легирования – в процессе роста пленки и диффузного легирования. В зависимости от концентрации акцепторной и донорной примеси полевые транзисторы отличались тремя типами транспорта носителей заряда канала: первый тип – дрейфовая проводимость термически возбужденных носителей заряда, второй тип – прыжковая проводимость на ближайшие примесные центры и третий тип – прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. Наибольшей проводимостью исток–сток при нулевом напряжении затвора обладают транзисторы с дрейфовой проводимостью термически возбужденных носителей и наименьшей – транзисторы с прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка [10, 11]. Методика диагностики типа транспорта носителей заряда описана в работах [12, 13].

Проводились низкочастотные измерения электрических характеристик полученных полевых транзисторов. Для этого транзистор включался в режим усилителя, измерения проводились на постоянном токе и на частоте 200 Гц.

На рис. 1а представлены зависимости тока стока I_D от напряжения исток–сток U_{DS} при напряжениях затвор–исток $U_{\text{GS}} = 20$ В и на рис. 1б – зависимости тока стока I_{DS} от напряжения затвор–исток U_{GS} . Кривые 1 и 2 на рис. 1 соответствуют каналам полевого транзистора с дрейфовым механизмом транспорта носителей заряда и с прыжковым механизмом движения носителей на ближайшие примесные центры, соответственно.

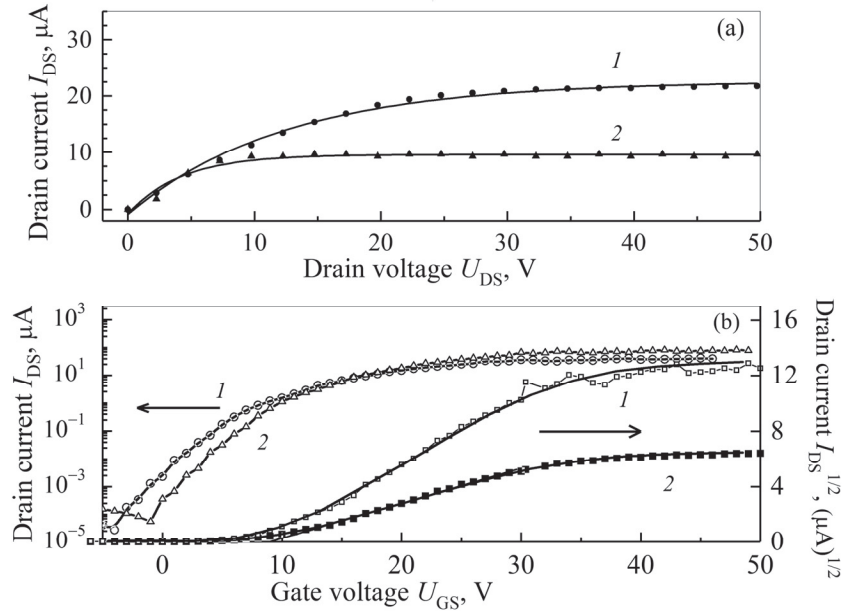


Рис.1. Электрические характеристики тонкопленочного полевого транзистора, полученного диффузным методом для каналов полевого транзистора с дрейфовой проводимостью (1) и с прыжковой проводимостью (2): (а) зависимость тока стока I_{DS} от напряжения исток–сток U_{DS} при напряжениях затвор–исток $U_{GS} = 20$ В и (б) зависимость тока стока I_{DS} и $(I_{DS})^{1/2}$ от напряжения затвор–исток U_{GS} при $U_{DS} = 30$ В.

На основе этих измерений оценивалась эффективная полевая подвижность μ_{FE} носителей заряда канала с использованием выражения $\mu_{FE} = \frac{L_{DS}}{W} \frac{g_m U_{GS}}{U_{DS} C_i}$, где L_{DS} – длина и W – ширина канала, C_i – удельная емкость затвора, обусловленная диэлектриком MgF_2 , и $g_m = \left| \partial I_{DS} / \partial U_{GS} \right|_{U_{DS} = \text{const}}$ – крутизна передаточной характеристики транзистора.

Максимальная величина полевой подвижности μ_{FE} исследуемых образцов достигала значений 15 и 12 cm^2/Vs для канала с дрейфовым и прыжковым механизмами проводимости, соответственно. Отношение тока стока в открытом состоянии к закрытому состоянию полевого транзистора составляло $\sim 10^5$. Сопротивление канала в закрытом состоянии $R_{DS} \sim 1.5 \times 10^8$ и $\sim 1.1 \times 10^6$ Ом для каналов с прыжковым и дрейфовым механизмами проводимости, соответственно.

Пороговое напряжение определялось из этих же измерений на основе выражения $I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_{Hall} C_i \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{th})^2$ (при условии $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$) аппроксимацией зависимости $(I_D)^{1/2}$ прямой линией до ее пересечения с осью абсцисс

(рис.1б). Получены полевые транзисторы с пороговым напряжением $U_{th} = 7.2\text{--}9.8$ В вне зависимости от механизма проводимости канала (прыжкового или дрейфового).

Измерения шумовых параметров транзисторов проводились при включении транзисторов в режим усилителя с общим стоком или истокового повторителя, далее сигнал усиливался малошумящим аналоговым трансимпедансным усилителем и оцифровывался.

На рис.2а приведены частотные зависимости шумов полевых транзисторов с дрейфовой проводимостью канала. Измерения представлены в частотном диапазоне 10–5000 Гц с нормализованной спектральной плотностью амплитуды тока шумов $S(I_{DS})/(I_{DS})^2$. Напряжение шумов на образце измерялось при прохождении через него постоянного прямого тока (режим генератора тока). Спектры приведены в логарифмическом масштабе. Измерения проводились при напряжении смещения исток–сток $U_{DS} = 20$ В и напряжениях затвор–исток $U_{GS} = 1, 5$ и 10 В. Спектры низкочастотных шумов аппроксимировались зависимостью $1/f^\alpha$. Для полевого транзистора с дрейфовой проводимостью канала $\alpha = 0.8$ (рис.2а) и для полевого транзистора с прыжковой проводимостью канала с прыжками на ближайшие примесные центры $\alpha = 1.1$ (рис.2б). Как видно из рис.2,

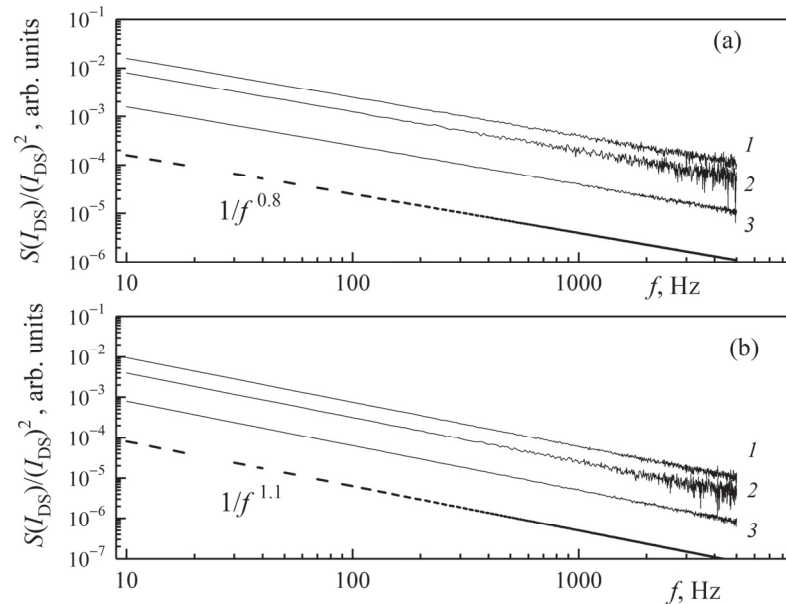


Рис.2. Нормализованная спектральная плотность шумов тока стока $S(I_{DS})/(I_{DS})^2$ от частоты в диапазоне 10–5000 Гц при комнатной температуре для (а) полевого транзистора с дрейфовой проводимостью канала и (б) полевого транзистора с прыжковой проводимостью (прыжки на ближайшие примесные центры): при напряжениях U_{GS} затвор–исток 1 (1), 5 (2), 8 В (3) и напряжении исток–сток $U_{DS} = 20$ В.

показатель α близок к 1, и в этих экспериментах преобладающим является $1/f$ -шум, что и оправдывает название шума.

Источники шума и механизмы их воздействия на ток стока в МОП-транзисторах в основном аналогичны тем, которые были рассмотрены для полевых транзисторов с управляющим переходом [5]. Существует лишь одно важное различие – в МОП-транзисторах значительно сильнее выражен $1/f$ -шум. Причиной этого являются ловушки, расположенные в слое диэлектрика затвора. В МОП кремневых транзисторах с дрейфовой проводимостью канала флуктуации проводимости обусловлены туннелированием и захватом носителей на ловушках, расположенных в переходе канал–изолятор затвора. В этом случае большой разброс значений времени релаксации τ возникает за счет экспоненциального уменьшения вероятности туннелирования с увеличением расстояния от границы раздела полупроводник–изолятор затвора в глубину изолятора затвора.

Как показали наши исследования, для полевых транзисторов с дрейфовой или прыжковой проводимостью канала (прыжки на ближайшие примесные центры) доминирующим является $1/f$ -шум. Флуктуации числа носителей в образце вызывают флуктуации его сопротивления, которые проявляются в виде флуктуации тока при протекании некоторого среднего тока $\langle I \rangle$ по транзистору под действием приложенного к нему стабильного напряжения. При этом $1/f$ -шум рассматривается как суперпозиция некоррелированных случайных процессов взрывного шума. Это означает, что процессы захвата и эмиссии электронов в канал не коррелированы по пространству и времени.

Взрывной шум – другой тип шума на низких частотах. Он описывается как импульсный (взрывной) шум, проявляющийся в ступенчатых изменениях уровня сигнала. Этот вид шума проявляет себя как двухуровневый случайный телеграфный (RTS) сигнал с одинаковой высотой импульсов тока или напряжения со случайно распределенными интервалами времени между импульсами и с переменной длительностью. Взрывной шум на осциллографе выглядит как меандр, импульсы с постоянной амплитудой, но со случайной шириной. В некоторых случаях шум может иметь не два, а несколько разных уровней. Спектральная плотность взрывного шума имеет вид

$$S_{\text{RTS}}(f) = C \frac{4(\overline{\Delta I})^2}{1 + (2\pi f / f_{\text{RTS}})^2}, \quad (1)$$

где $C = 1 / ((\tau_l + \tau_h) f_{\text{RTS}}^2)$, $\Delta I = (I_l - I_h)$ – ток импульсов перехода низкий–высокий уровень, τ_l и τ_h – средняя продолжительность импульсов на низком и высоком уровнях, соответственно, и $f_{\text{RTS}} = 1/2\pi\tau_l + 1/2\pi\tau_h$ – частота излома спектральной плотности шума.

Интенсивность взрывного шума зависит от расположения уровня ловушек относительно уровня Ферми. Только те из них, которые находятся в непосредственной близости от уровня Ферми, генерируют этот шум. Центры захвата, которые являются источником взрывного шума, обусловлены кислородными вакансиями и смещенными атомами цинка.

На рис.3а показана временная зависимость взрывного шума для исследуемого полевого транзистора с прыжковым механизмом проводимости канала с переменной длиной прыжка. Для определения временных параметров τ_l и τ_h были построены гистограммы тока на нижнем I_l и верхнем I_h , уровнях, из аппроксимации которых распределением Гаусса были найдены средние значения токов I_l и I_h и $\Delta I \approx 10$ нА. Определялось время пребывания транзистора в высоком и низком уровнях и на основе этих измерений рассчитывались $\tau_l = 12 \times 10^{-3}$ и $\tau_h = 8.5 \times 10^{-3}$ с. Далее рассчитывалась частота излома $f_{\text{RTS}} = 150$ Гц.

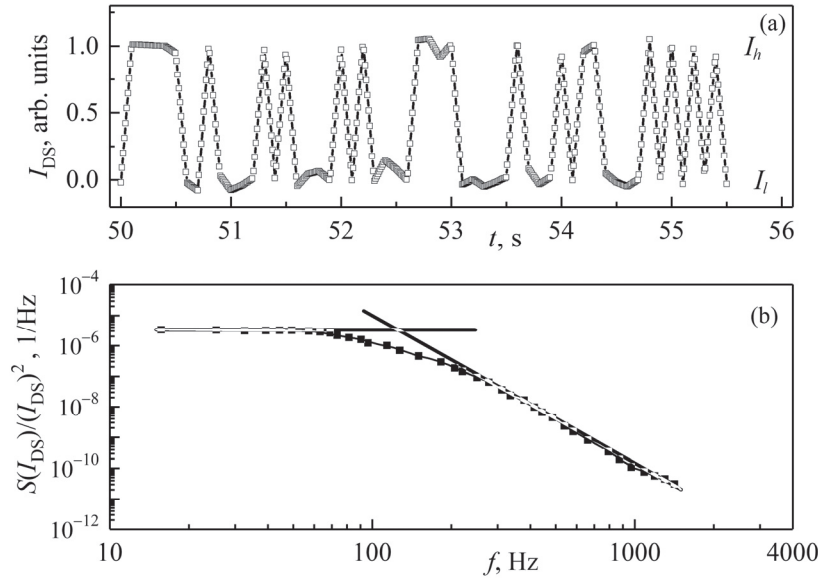


Рис.3. (а) Временная зависимость взрывного шума для полевого транзистора с прыжковым типом проводимости канала (прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка). (б) Зависимость нормализованной спектральной плотности шумов тока стока от частоты в диапазоне 10–5000 Гц при комнатной температуре. Излом наблюдается на частоте $f_{\text{RTS}} = 125$ Гц, измерения проведены для $U_{\text{GS}} = 8$ и $U_{\text{DS}} = 20$ В.

Определив амплитуду флуктуации тока $\Delta I \sim 10$ нА при подвижности носителей заряда $\mu_{\text{Hall}} = 12 \text{ см}^2/\text{Вс}$, вычислим амплитуду флуктуаций проводимости $\Delta\sigma = 10^{-6} \text{ Ом см}^{-1}$. Это означает, что концентрация носителей заряда канала из-за взрывного шума изменяется на $\Delta n \approx 10^{10}$ электронов. Такой результат можно

объяснить, предполагая наличие ловушек двух типов в переходе диэлектрик–канал с энергией активации в пределах нескольких $k_B T$ от уровня Ферми канала транзистора. В этом случае возможен обратимый процесс захвата и эмиссии электронов из канала в ловушки. Следовательно, для объяснения столь большой величины флуктуаций необходимо предположить коррелированный захват и коррелированную эмиссию электронов из ловушек [14].

Для объяснения $1/f$ -шума нами использовалось одноэлектронное приближение, оставаясь в рамках этого приближения невозможно объяснение взрывного шума в полупроводниках с прыжковым типом проводимости с изменяющейся длиной прыжка, т.е. необходимо учитывать корреляционные эффекты. Исследование корреляционных эффектов в таких полупроводниках проводилось в работах [15, 16]. Рассматривая взаимодействие локализованного электрона с ближайшими к нему зарядами, показано, что плотность состояний должна быть минимальной и близкой к уровню Ферми. С увеличением плотности состояний из-за увеличения концентрации носителей необходимо учесть электрон-электронную корреляцию через взаимодействие электрона с фононами, т. е. рассмотреть поляронное приближение. Исследование поляронов в оксиде цинка проводилось в работах [17, 18]. В поляронном приближении имеет место резонансное взаимодействие поляронов, что означает коррелированное поглощение поляронов ловушками и коррелированную эмиссию поляронов из ловушек.

На рис.3b приведены частотные зависимости шумов полевых транзисторов с прыжковым типом проводимости канала с переменной длиной прыжка. Измерения нормализованной спектральной плотности амплитуды тока шумов $S(I_{DS})/(I_{DS})^2$ представлены в частотном диапазоне 10–5000 Гц. Напряжение шумов на образце измерялось при прохождении через него постоянного прямого тока (режим генератора тока). Спектры приведены в логарифмическом масштабе. Полученная зависимость аппроксимирована формулой (1). На основе этой аппроксимации рассчитана частота излома f_{RTS} спектральной плотности шума. Проведенные измерения зависимости нормализованной спектральной плотности шумов тока стока показали значение $f_{RTS} = 125$ Гц. Таким образом, оба метода анализа параметра f_{RTS} дают хорошее совпадение – 125 и 150 Гц, соответственно.

Сравнивая рис.2 и 3, можно сказать, что с изменением механизма проводимости от прыжков на ближайшие центры на прыжки с переменной длиной прыжка (закон Мотта), обусловленное уменьшением проводимости, доминирующий шум меняется с $1/f$ типа на взрывной шум.

На рис.4 представлен многоканальный амплитудный анализ переменной составляющей шумового тока стока ΔI_{DS} полевого транзистора с дрейфовой проводимостью канала в зависимости от напряжения затвор–исток U_{GS} с величиной

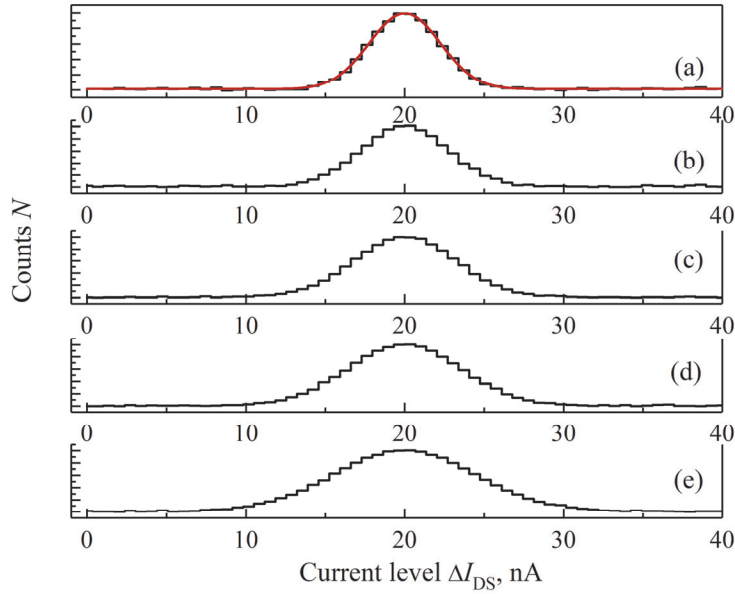


Рис.4. Гистограмма амплитудного анализа переменной составляющей шумового тока стока ΔI_{DS} полевого транзистора с дрейфовой проводимостью канала в зависимости от напряжения затвор–исток U_{GS} при постоянной составляющей тока стока I_{DS} для максимума распределения: (a) $I_{DS} = 0.55$ мкА и $U_{GS} = 10$ В, (b) $I_{DS} = 9.18$ мкА и $U_{GS} = 20$ В, (c) $I_{DS} = 18.9$ мкА и $U_{GS} = 25$ В, (d) $I_{DS} = 33.22$ мкА и $U_{GS} = 30$ В, и (e) $I_{DS} = 36.35$ мкА и $U_{GS} = 40$ В. Измерения проведены при напряжении исток–сток $U_{SD} = 30$ В.

тока стока I_{DS} для максимума распределения. Измерения проводились для 60 интервалов регистрации с шириной интервала 1 нА при напряжении исток–сток $U_{DS} = 30$ В. Полученные зависимости имеют единственный пик и хорошо аппроксимируются функцией Гаусса.

С увеличением напряжения затвор–исток U_{GS} изменяется траектория движения носителей заряда: они приближаются к области перехода канал–изолятор, где увеличивается дефектность структуры, что приводит к увеличению разброса энергии ловушек. Этим обусловлено уширение гистограммы. Шум имеет бистабильный характер во всем исследуемом диапазоне напряжений U_{GS} от 10 до 40 В.

На рис.5 представлен амплитудный анализ переменной составляющей шумового тока исток–сток ΔI_{DS} полевого транзистора с прыжковым механизмом проводимости канала (прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка) в зависимости от напряжения смещения затвора U_{GS} при постоянной составляющей тока исток–сток I_{DS} для максимума распределения. Измерения проведены при напряжении исток–сток $U_{DS} = 30$ В. Полученные зависимости имеют 3 пика, это особенно четко видно при напряжениях затвор–исток U_{GS} , равных 30 и 40 В. Полученные экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются суммой

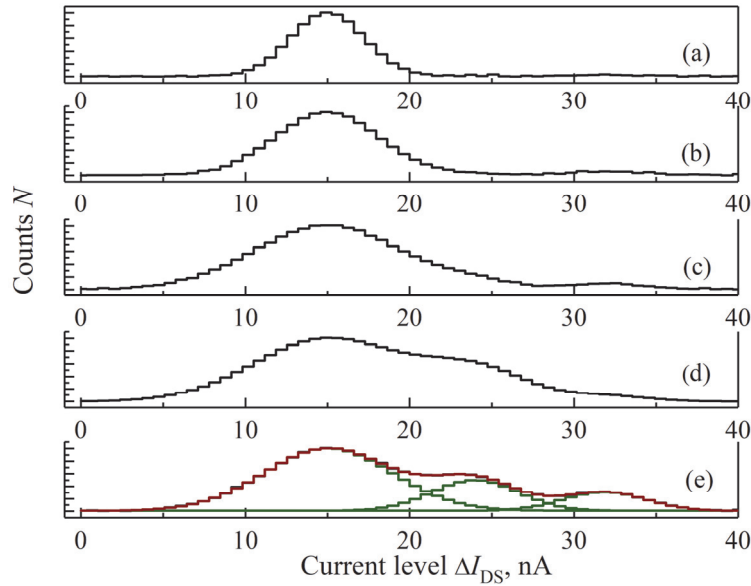


Рис.5. Гистограмма амплитудного анализа переменной составляющей шумового тока стока ΔI_{DS} полевого транзистора с прыжковым механизмом проводимости канала (прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка) в зависимости от напряжения затвор–исток U_{GS} при постоянной составляющей тока стока I_{DS} для максимума распределения: (a) $I_{DS} = 1.11 \text{ мкА}$ и $U_{GS} = 10 \text{ В}$, (b) $I_{DS} = 18.4 \text{ мкА}$ и $U_{GS} = 20 \text{ В}$, (c) $I_{DS} = 37.8 \text{ мкА}$ и $U_{GS} = 25 \text{ В}$, (d) $I_{DS} = 66.4 \text{ мкА}$ и $U_{GS} = 30 \text{ В}$, и (e) $I_{DS} = 77.8 \text{ мкА}$ и $U_{GS} = 40 \text{ В}$. Измерения проведены при напряжении исток–сток $U_{SD} = 30 \text{ В}$.

гауссовских распределений. Амплитуда этих импульсов мала и соответствует кооперативному переходу носителей из канала на ловушку в изоляторе и обратно, приводящему к скачкообразному изменению сопротивления (проводимости) канала из-за изменения в нем числа носителей заряда, это означает, существуют четыре метастабильные концентрации носителей заряда. Многоуровневый взрывной шум наблюдается достаточно редко, и нет четкого понимания его механизма [19, 20].

3. Заключение

Проведены исследования шумовых характеристик трех типов полевых транзисторов на основе пленок ZnO. Наибольшей сквозной проводимостью исток–сток обладают транзисторы с дрейфовой проводимостью термически возбужденных носителей. В этих транзисторах доминирует шум типа $1/f^\alpha$ с $\alpha = 0.8$. Для полевого транзистора с прыжковой проводимостью канала с прыжками на ближайшие примесные центры также доминирует шум $1/f^\alpha$ с $\alpha = 1.1$. Изменение механизма проводимости с прыжков на ближайшие центры на прыжки с

переменной длиной (закон Мотта), обусловленное уменьшением проводимости, приводит к изменению доминирующего шума с $1/f$ типа к взрывному шуму. Проведен амплитудный анализ переменной составляющей шумового тока с дрейфовой проводимостью канала: полученные зависимости имеют одиночные пики и структура шума не зависит от напряжения затвора. Проведенный амплитудный анализ переменной составляющей шумового тока полевого транзистора с прыжковой проводимостью канала в зависимости от напряжения затвора показал, что полученные зависимости имеют 3 пика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАУ за счет средств субсидий Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Han, D. Xiang, M. Zheng, J. Lin, J. Zhong. *Nanotechnology*, **26**, 095202 (2015).
2. J.F. Wager, D.A. Keszler, R.E. Presley. *Transparent Electronics*. Springer, 2008.
3. A. Abliz, C. Wei Huang, J. Wang, L. Xu, L. Liao. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 7862 (2016).
4. H.D. Xiong, W. Wang, Q. Li, C. Richter, J.S. Suehle. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 053107 (2007).
5. М. Букингем. Шумы в электронных приборах и системах. Москва, Мир, 1986.
6. А. Ван дер Зил. Шум: источники, описание, измерение. Москва, Сов. радио, 1973.
7. B. Dierickx, E. Simoen. *J. Appl. Phys.*, **71**, 2028 (1992).
8. P. Dutta, P.M. Horn. *Rev. Mod. Phys.*, **53**, 497 (1981).
9. Р.К. Овсепян, Н.Р. Агамалян, С.И. Петросян. *Известия НАН Армении, Физика*, **45**, 407 (2010).
10. Р.К. Овсепян, Н.Р. Агамалян, А.А. Аракелян, Е.А. Кафадарян, Г.Г. Мнацаканян, С.И. Петросян. *Известия НАН Армении, Физика*, **54**, 384 (2019).
11. Н.Ф. Мотт. Переходы металл–изолятор. Москва, Наука, 1979.
12. В.Ф. Гантмахер. Электроны в неупорядоченных средах. Москва, Физматлит, 2005.
13. Н.Р. Агамалян, Т.А. Асланян, Э.С. Варданян, Е.А. Кафадарян, Р.К. Овсепян, С.И. Петросян, А.Р. Погосян. *Известия НАН Армении, Физика*, **47**, 417 (2012).
14. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников*. Москва, Наука, 1979.
15. M. Pollak. *Disc Far. Soc.*, **50**, 13 (1970).
16. M.L. Knotek, M. Pollak. *J. Non-Cryst. Sol.*, **810**, 505 (1972); M.L. Knotek, M. Pollak. *Phys. Rev.*, **B9**, 664 (1974).
17. H. Sezen, H. Shang, F. Bebensee, C. Yang, M. Buchholz. *Nat. Comm.*, **6**, 6901 (2015).
18. A. de Jamblinne de Meux, G. Pourtois, J. Genoe, P. Heremans. *J. Appl. Phys.*, **123**, 161513 (2018).
19. G. Giusi, F. Crupi, C. Pace. *Rev. Sci. Instr.*, **79**, 024701 (2008).
20. J. Pavelka, J. Šikula, M. Tacano, M. Toita. *Radioengineering*, **20**, 194 (2011).

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԸ ԴԱՇՏԱՅԻՆ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՆԵՐՈՒՄ՝
ZnO:Li-ի ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Ռ.Կ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Ն.Ռ. ԱՂԱՄԱԼՅԱՆ, Ե.Ա. ԿԱՖԱԴԱՐՅԱՆ,
Ա.Ա. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Հ.Գ. ՄՆԱՅԱԿԱՆՅԱՆ, Ս.Ի. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հետազոտված են դիֆուզ տեխնոլոգիայի կիրառմամբ ստացված ZnO:Li-ի թաղանթների հիման վրա դաշտային տրանզիստորների աղմուկային բնութագրերը: Բերված են արտահոսքի հոսանքի աղմուկային բնութագրերի փորձարարական հետազոտության արդյունքները, այսինքն՝ պատահական հեռագրական ազդանշանը և $1/f$ -աղմուկը: Արտահոսքի հոսանքի աղմուկների սպեկտրալ խտությունը հաճախությունների ցածրահաճախային տիրույթում (10–5000 Հց) ունի դասական $1/f$ կախում: Հայտնաբերվել է, որ ակցեպտորային խառնուկի փոքր կոնցենտրացիաների դեպքում դիտվում է $1/f$ -աղմուկ, իսկ ակցեպտորային խառնուկի կոնցենտրացիայի մեծացման դեպքում գերակշռում է պատահական հեռագրական ազդանշանը:

ELECTRICAL NOISE IN FIELD-EFFECT TRANSISTORS
BASED ON ZnO:Li FILMS

R.K. HOVSEPYAN, N.R. AGHAMALYAN, Y.A. KAFADARYAN,
A.A. ARAKELYAN, H.G. MNATCAKANYAN, S.I. PETROSYAN

The noise characteristics of field-effect transistors based on ZnO:Li films obtained by the diffuse technology are studied. The results of an experimental study of the noise characteristics of the drain current are presented, namely, the Random Telegraph Signal and the $1/f$ -noise. The spectral density of the drain current noises in the low-frequency range (10–5000 Hz) has a classical $1/f$ dependence. It was found that at low concentrations of the acceptor impurity, $1/f$ -noise is observed, and with an increase in the acceptor impurity concentration the Random Telegraph Signal prevails.