

УДК 621.391.822

ОПИСАНИЕ СПЕКТРА ЕСТЕСТВЕННЫХ ШУМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СООТНОШЕНИЯ ВАН ДЕР ЗИЛА

А. В. Ключев *, *Е. И. Шмелёв*, *А. В. Якимов*

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В настоящей работе исследуется спектр S_{iD} естественных (тепловых и дробовых) токовых шумов р-п-перехода, а также барьера Шоттки с коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики η , превышающим единицу. Приводятся результаты, полученные с помощью специализированной экспериментальной установки. Для их объяснения использовалась эквивалентная схема, учитывающая наличие последовательного сопротивления базы и контактов диода, а также возможность существования тока утечки. Теоретически доказано и подтверждено экспериментально, что соотношение Ван дер Зила, $S_{iD} = 2q(I_D + 2I_s)$, служащее для вычисления спектра токовых шумов «идеального» перехода с $\eta = 1$, не применимо при $\eta > 1$ (здесь q — элементарный заряд, I_D — ток через переход, I_s — ток насыщения перехода). Полученные ранее результаты обобщены при помощи теоремы Гупта для спектра тепловых шумов в нелинейных резистивных системах и подтверждены экспериментально. Установлено, что спектр шумового тока даётся формулой $S_{iD} = (2q/\eta)(I_D + 2I_s)$. Она является модификацией соотношения Ван дер Зила на случай произвольного значения коэффициента неидеальности. Выполнена экспериментальная проверка полученной формулы для S_{iD} путём измерения спектра шума диода Шоттки с δ -легированием, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой.

ВВЕДЕНИЕ

Для вычисления спектра S_{iD} естественных (тепловых и дробовых) токовых шумов $i_D(t)$ полупроводникового диода с р-п-переходом, а также барьера Шоттки обычно используется соотношение Ван дер Зила [1]. При нулевом токе через диод, т. е. в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой, это соотношение трансформируется в формулу Найквиста [2] для спектра теплового шума. Однако, как показано в работах [3] и [4], это справедливо только для диодов, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики (ВАХ) $\eta = 1$. В случае, когда коэффициент неидеальности η превышает единицу, оно оказывается неприемлемым.

Для решения этой проблемы в работах [3] и [4] предложена модификация соотношения Ван дер Зила для вычисления спектра естественных токовых шумов в р-п-переходах, а также барьерах Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики, превышающим единицу. Для решения этой проблемы сначала рассматривался простейший случай $\eta = 2$, соответствующий рекомбинации носителей в области пространственного заряда [5]. Соответствующая вольт-амперная характеристика типична для светоизлучающих диодов с квантовыми точками, см., например, [6–9]. Вольт-амперная характеристика такого перехода моделируется двумя включёнными последовательно идентичными переходами с $\eta = 1$. При этом полный шумовой ток определяется некоррелированными шумовыми источниками обоих переходов. Однако такой подход позволяет описывать шумы только в переходах, обладающих целыми значениями коэффициента неидеальности вольт-амперной характеристики. В работе [4] проведено обобщение результатов, полученных в [3], на случай произвольного значения коэффициента неидеальности

* klyuev@rf.unn.ru

вольт-амперной характеристики. Осуществлена экспериментальная проверка модифицированного соотношения Ван дер Зила и показано, что оно удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

В настоящей работе использована эквивалентная схема, учитывающая последовательное сопротивление базы и контактов диода, а также возможность существования тока утечки. Приведены новые экспериментальные данные, полученные на модернизированной (по сравнению с использованной в [3, 4]) установке [10], подтверждающие теоретические результаты.

Полученное в [3, 4] соотношение обобщено с помощью метода Гупта [11], предназначенного для определения спектра теплового шума в нелинейных резистивных системах. Таким образом, решена задача вычисления спектра естественных токовых шумов р-п-переходов и барьеров Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики, превышающим единицу.

Экспериментальная проверка модифицированного соотношения Ван дер Зила представлена в разделе 3. В нём описаны измерения шумов диодов Шоттки с δ -легированием ($\eta > 1$), находящихся в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой. Диоды изготовлены в группе В. И. Шашкина, Институт физики микроструктур РАН [12, 13]. Показано, что модифицированное соотношение Ван дер Зила находится в согласии с экспериментальными данными. Оценка естественных шумов особенно важна для характеристики детекторов на основе низкобарьерных диодов Шоттки с δ -легированием. Некоторые вопросы детектирования с использованием таких диодов исследовались ранее в работах [14–19].

1. СПЕКТР ЕСТЕСТВЕННОГО ШУМА ПРИ СЛАБОМ ТОКЕ

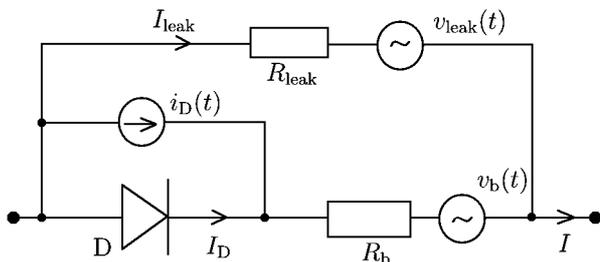


Рис. 1. Эквивалентная схема диода

Элементом D на схеме обозначен р-п-переход (либо барьер Шоттки); $i_D(t)$ — эквивалентный генератор тока, моделирующий шумы перехода. Шум сопротивления базы и контактов R_b моделируется генератором напряжения $v_b(t)$. Утечка описывается сопротивлением R_{leak} и генератором шумового напряжения $v_{leak}(t)$.

Вольт-амперная характеристика перехода описывается соотношением

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_D}{\eta kT}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Здесь I_s — обратный ток насыщения перехода; $q > 0$ — элементарный заряд; V_D — напряжение, приложенное к переходу; η — коэффициент неидеальности; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Дифференциальная проводимость G_D такого перехода есть

$$G_D = \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{q(I_D + I_s)}{\eta kT}. \quad (2)$$

Начальная дифференциальная проводимость G_{D0} (при $I_D = 0$) даётся выражением

$$G_{D0} = \frac{qI_s}{\eta kT}. \quad (3)$$

В предположении линейной (омической) утечки спектр $S_{v_{\text{leak}}}$ шума утечки $v_{\text{leak}}(t)$ определяется формулой Найквиста

$$S_{v_{\text{leak}}} = 4kTR_{\text{leak}}. \quad (4)$$

Аналогично определяется спектр S_{v_b} шума $v_b(t)$ линейного сопротивления базы и контактов R_b :

$$S_{v_b} = 4kTR_b. \quad (5)$$

Спектр шумового тока $i_D(t)$ в рамках подхода Ван дер Зила [1] имеет вид

$$S_{iD} = 2q(I_D + 2I_s). \quad (6)$$

Принимая в соотношении (6) $I_D = 0$, а также используя соотношение (3) для начальной дифференциальной проводимости перехода, получим следующее выражение для спектра естественных шумов перехода, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой:

$$S_{iD0} = 4qI_s = \eta 4kTG_{D0}. \quad (7)$$

Известно, что любое устройство, которое находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, генерирует только тепловой шум. Поэтому результат (7) не противоречит формуле Найквиста только в «идеальном» случае $\eta = 1$. Иначе говоря, соотношение Ван дер Зила (6) не применимо для описания естественных шумов полупроводниковых диодов, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики, отличающимся от единицы. Очевидно, что данное несоответствие объясняется отсутствием учёта механизмов токопереноса при $\eta > 1$.

2. МОДИФИЦИРОВАННОЕ СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ СПЕКТРА ТОКОВОГО ШУМА

В работах [3, 4] уже был рассмотрен возможный способ решения проблемы, обозначенной в предыдущем разделе. Обобщим полученные в [3, 4] результаты. Примем, что вольт-амперная характеристика (1), обусловленная произвольным значением коэффициента неидеальности η , описывает несколько включённых последовательно переходов. Рассмотрим сначала случай $\eta = n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ — число идентичных «идеальных» переходов.

Суммарным генератором тока $i_D(t)$ описываются шумы всех переходов. Учитывая некоррелированность этих шумов, получим следующее выражение для спектра S_{iD} полного шумового тока:

$$S_{iD} = (2q/\eta)(I_D + 2I_s). \quad (8)$$

Принимая во внимание соотношение (2) для дифференциальной проводимости, преобразуем соотношение (8) к следующему виду:

$$S_{iD} = 2kTG_D \frac{I_D + 2I_s}{I_D + I_s}. \quad (9)$$

В состоянии термодинамического равновесия, $I_D = 0$, это выражение преобразуется в формулу Найквиста для спектра теплового шума. В области сильных токов $I_D \gg I_s$, соотношение (9) переходит в известный результат $S_{iD} = 4kTG_D/2$ для перехода с $\eta = 1$.

Соотношение (9) было получено Ван дер Зилом [1] после преобразования предложенного им соотношения (6) для спектра токового шума к виду формулы Найквиста. Это соотношение не зависит явно от η . Поэтому можно ожидать, что соотношения (8) и (9) справедливы при любых коэффициентах неидеальности $\eta \geq 1$ — целых и нецелых. Для доказательства этого предположения, обратимся к работе Гупта [11], где определён спектр S_v напряжения теплового шума $v(t)$ в нелинейных резистивных системах. В используемых здесь терминах этот спектр имеет следующий вид:

$$S_v = 4kT \left(\frac{dV_D}{dI_D} + \frac{I_D}{2} \frac{d^2V_D}{dI_D^2} \right). \quad (10)$$

Первое слагаемое в скобках этого соотношения соответствует дифференциальному сопротивлению перехода, $R_D = 1/G_D$, см. (2). Это слагаемое определяет тепловой шум эквивалентного линейного резистора. Второе слагаемое является нелинейной поправкой Гупта:

$$\frac{I_D}{2} \frac{d^2V_D}{dI_D^2} = -\frac{1}{2G_D} \frac{I_D}{I_D + I_s}. \quad (11)$$

После преобразования выражения (10) к спектру токового шума, $S_{iD} = S_v G_D^2$, приходим к предыдущему результату (9).

Таким образом, есть две формы соотношения Ван дер Зила, которые предлагаются для описания спектра естественного токового шума в р-п переходах. Соотношение (9), выраженное в терминах спектра теплового шума, справедливо для любых значений коэффициента неидеальности $\eta \geq 1$. Но соотношение (6), выраженное в терминах спектра дробового шума, справедливо только для переходов с $\eta = 1$: если $\eta \geq 1$, то следует использовать модифицированное соотношение (8).

Отметим, что в литературе уже обсуждались проблемы, возникающие при применении соотношения Ван дер Зила (6) для описания спектра естественных шумов полупроводниковых диодов, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики, отличающимся от единицы, см., например, [20]. В статье [20] анализируется шумовая температура T_n перехода, обладающего коэффициентом неидеальности $\eta > 1$. За основу берётся соотношение Ван дер Зила (6), которое трактуется следующим образом (см. соотношение (10) цитируемой статьи [20], представленное в используемых здесь обозначениях):

$$S_{iD} = 4kT_n G_D = 2q(I_D + 2I_s). \quad (12)$$

Для состояния термодинамического равновесия, $I_D = 0$, учитывая (3), находим, что $T_n = \eta T$. При $\eta > 1$ этот результат противоречит флуктуационно-диссипационной теореме. Модифицированное соотношение (8) позволяет избежать парадоксов такого рода.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе представлены результаты экспериментальной проверки модифицированного соотношения (8) в окрестности термодинамического равновесия.

Нами исследовались диоды Шоттки с δ -легированием. Диоды изготовлены в Институте физики микроструктур РАН по единой технологии (см. [12, 13]) и различались начальным (при полном токе $I = I_D + I_{\text{leak}} = 0$) дифференциальным сопротивлением R_0 .

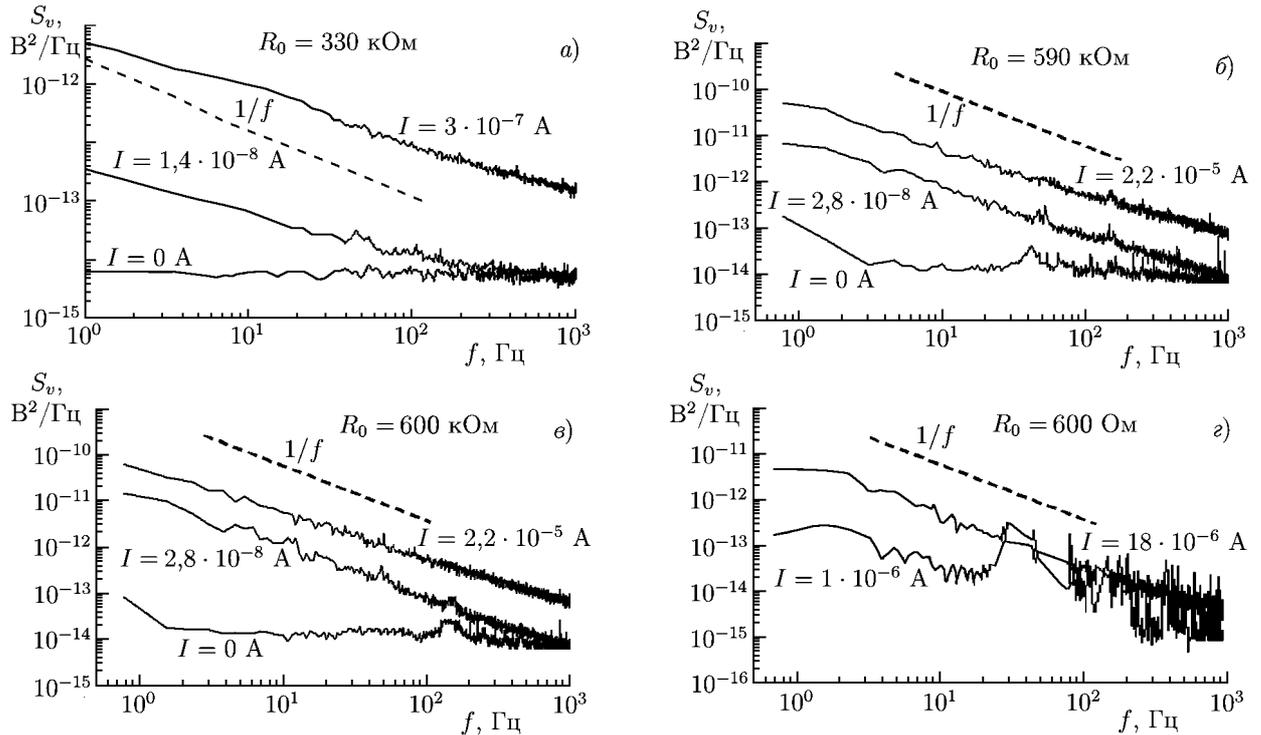


Рис. 2. Спектры шумового напряжения диодов Шоттки с δ -легированием: *a* — спектр для диода D-330к, *б* — для диода D-590к, *в* — для диода D-600к, *з* — для диода D-600

Согласно эквивалентной схеме, изображённой на рис. 1, полное сопротивление диода R определяется следующим соотношением:

$$R^{-1} = (G_D^{-1} + R_b)^{-1} + R_{\text{leak}}^{-1}. \quad (13)$$

Анализируется режим слабых токов, в котором проводимость G_D определяется соотношением (2), а сопротивления R_b и R_{leak} можно считать линейными. Соответственно, для начального дифференциального сопротивления R_0 (при $I_D = 0$) имеем выражение

$$R_0^{-1} = (G_{D0}^{-1} + R_b)^{-1} + R_{\text{leak}}^{-1}. \quad (14)$$

Здесь проводимость G_{D0} определяется соотношением (3).

Измерялся спектр шумового напряжения диода. Шумовое напряжение усиливалось малошумящим усилителем напряжения Ultra-Low Noise Preamplifier 5184 (Signal Recovery, USA) с эквивалентным шумовым сопротивлением 40 Ом. Усиленное шумовое напряжение оцифровывалось с помощью двух модулей — NI-9239 и NI cDAQ-9172 — с частотой дискретизации 50 кГц.

Аналого-цифровой преобразователь (имеющий разрядность 24 бита) располагается в плате аналогового ввода данных модуля NI-9239, которая, в свою очередь, размещается в многофункциональном шасси NI cDAQ-9172, обеспечивающим передачу данных на вход компьютера.

Оцифрованное шумовое напряжение записывалось на жёсткий диск компьютера реализациями по 10^7 отсчётов. Затем данные обрабатывались при помощи многофункционального анализатора [21], выполненного в программной среде LabVIEW (National Instruments, USA).

Сначала исследовались шумы диодов в режиме без внешнего смещения, т. е. диоды находились в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой и являлись источниками только теплового шума.

Использовалось 16384-точечное быстрое преобразование Фурье. Оно даёт 610 усредняемых

спектрограмм для каждой шумовой записи. Статистическая ошибка таких измерений составляет приблизительно 4%.

После вышеупомянутых измерений без внешнего смещения были выполнены измерения при малых внешних смещениях. При этом использовалось 8192-точечное быстрое преобразование Фурье. Частота дискретизации в этом случае составляла 50 кГц, а оцифрованное шумовое напряжение записывалось на жёсткий диск компьютера реализациями по 10^6 отсчётов. Статистическая ошибка таких измерений составляет приблизительно 9%. Шумы диодов с внешним смещением исследовались также в [7, 22].

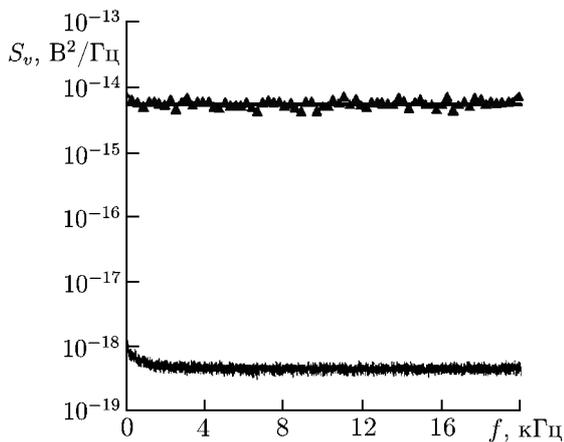


Рис. 3. Спектр шумового напряжения диода Шоттки D-330k с $R_0 = 330$ кОм (треугольники) при нулевом токе; сплошная горизонтальная линия — спектр, вычисленный с использованием соотношения Найквиста; нижняя линия — спектр шумового напряжения системы

ставленных здесь диодов. Поэтому спектр теплового шума диода D-600 измерить не удалось [25].

Спектр полного шумового напряжения для диода с начальным сопротивлением $R_0 = 330$ кОм при нулевом токе и спектр собственных шумов установки показаны на рис. 3. Спектр шума измерительной системы почти на 40 дБ слабее спектра шума исследованного диода. Таким образом, собственный шум измерительной системы является довольно малым.

Из рис. 3 также видно, что полученные экспериментальные данные согласуются с формулой Найквиста для спектра теплового шума: сплошная горизонтальная линия практически полностью замаскирована экспериментальными отсчётами. Согласно эквивалентной схеме диода, представленной на рис. 1, этот спектр вычислялся по формуле

$$S_v^{(0)} = \frac{(S_{iD}G_D^{-2} + S_{vb})R_{leak}^2 + S_{vleak}(G_D^{-1} + R_b)^2}{(G_D^{-1} + R_b + R_{leak})^2}. \tag{16}$$

Аналогичное заключение было сделано нами ранее для диода с начальным сопротивлением $R_0 = 40$ кОм [3, 26]. Полученные результаты согласуются также с данными, приведёнными в статье [27], где измерение спектра шума использовалось для определения сопротивления диода R_0 .

После измерения спектра шумового напряжения вычислялся спектр шумового тока $S_i = S_v/R^2$, где сопротивление диода R определяется соотношением (13). На рис. 4 в качестве примера приведены спектры S_{i0} шумового тока для некоторых диодов без внешнего смещения.

В общем случае спектр шумового напряжения исследуемого диода состоит из двух компонент:

$$S_v = S_v^{(1/f)} + S_v^{(0)}. \tag{15}$$

Первая компонента в соотношении (15) соответствует $1/f$ -шуму (фликкерному), её спектральная плотность мощности имеет вид $S_v^{(1/f)} \propto 1/f^\gamma$, где $\gamma \approx 1$. Этот шум был исследован в работах [22–24] и здесь не обсуждается. Вторая компонента соответствует белому шуму, далее будет рассматриваться именно она.

На рис. 2 изображены спектры шумового напряжения диодов Шоттки с δ -легированием при различной силе тока через диод. На нём указаны начальные сопротивления диодов R_0 при нулевом токе. Следует отметить, что спектр мощности теплового шума диода D-600 с начальным сопротивлением $R_0 = 600$ Ом на три порядка слабее, чем спектры тепловых шумов других пред-

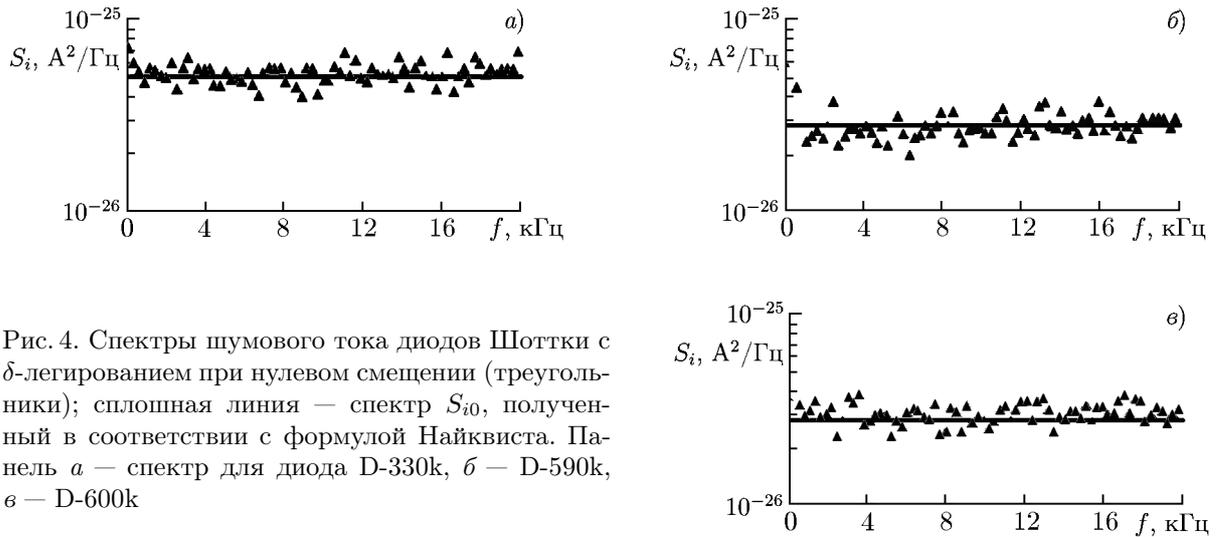


Рис. 4. Спектры шумового тока диодов Шоттки с δ -легированием при нулевом смещении (треугольники); сплошная линия — спектр S_{i0} , полученный в соответствии с формулой Найквиста. Панель *a* — спектр для диода D-330k, *б* — D-590k, *в* — D-600k

Таблица 1. Параметры аппроксимации вольт-амперных характеристик диодов

Диод	I_s, A	η	α	$R_{D0}, \text{Ом}$	$R_{lin}, \text{Ом}$	I_{sn}, A	η_{nl}	$R_b, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$
D-330k	$3,5 \cdot 10^{-8}$	2,20	0,04	$1,60 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	4	10	$3,3 \cdot 10^5$
D-590k	$5,1 \cdot 10^{-8}$	1,21	0,08	$5,93 \cdot 10^5$	$> 10^8$	—	—	10	$5,9 \cdot 10^5$
D-600k	$5,0 \cdot 10^{-8}$	1,21	0,07	$6,00 \cdot 10^5$	$> 10^8$	—	—	10	$6,0 \cdot 10^5$
D-600	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1,21	0,08	$6,00 \cdot 10^2$	$> 10^8$	—	—	10	$6,0 \cdot 10^2$

Следует отметить, что в отдельных диодах ток утечки нелинейно зависит от приложенного напряжения. При этом ток утечки моделируется двумя компонентами. Первая компонента — линейная, I_{lin} — описывается сопротивлением R_{lin} . Вторая компонента моделируется диодом, включенным параллельно в обратном направлении. Соответствующий ток I_{nl} описывается соотношением, аналогичным соотношению (1) с обратным током насыщения I_{sn} и с коэффициентом неидеальности η_{nl} . Таким образом, выражение для тока утечки имеет вид

$$I_{leak} = I_{lin} + I_{nl} \equiv V/R_{lin} + I_{sn} \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{\eta_{nl}kT}\right) \right]. \tag{17}$$

Полное сопротивление утечки состоит из двух компонент (линейной и нелинейной):

$$R_{leak}^{-1} = R_{lin}^{-1} + R_{nl}^{-1}, \quad R_{nl} = \frac{\eta_{nl}kT}{q(I_{nl} + I_{sn})}. \tag{18}$$

Спектр шумового тока, определяемого утечкой, имеет вид

$$S_{i\ leak} = \frac{4kT}{R_{lin}} + \frac{2q}{\eta_{nl}} (I_{nl} + 2I_{sn}). \tag{19}$$

Параметры вольт-амперной характеристики исследованных диодов приведены в табл. 1. Здесь $R_{D0} = 1/G_{D0}$ — начальная дифференциальная проводимость при $I_D = 0$.

Таким образом, компонента $S_i^{(0)}$, соответствующая белому шуму в спектре шумового тока, имеет вид

$$S_i^{(0)} = S_v^{(0)}/R^2 = S_{iD} + S_{i\ leak}. \tag{20}$$

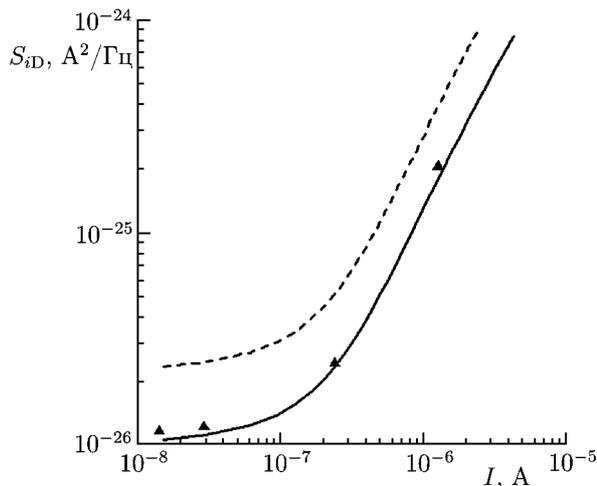


Рис. 5. Зависимость спектра S_{iD} от полного тока I через диод D-330k (треугольники); сплошная линия — спектр, полученный в соответствии с модифицированным соотношением (8); штриховая линия — спектр, полученный в соответствии с соотношением (6)

оно противоречит формуле Найквиста [2] для спектра теплового шума.

Предложено модифицированное соотношение для спектра токового шума, $S_{iD} = (2q/\eta)(I_D + 2I_s)$, трансформирующееся в условиях термодинамического равновесия с окружающей средой в формулу Найквиста. Проведена экспериментальная проверка этого модифицированного соотношения для спектра токового шума, показавшая удовлетворительное согласие теории с экспериментом.

Авторы выражают благодарность группе В. И. Шашкина (Институт физики микроструктур РАН) за предоставленные для исследования диоды Шоттки с δ -легированием и плодотворные дискуссии по теме работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты 02.740.11.0163, 02.740.11.0003 и П2606), а также государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки России, в сфере научной деятельности «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)», код проекта 2183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение). М.: Сов. радио, 1973.
2. Nyquist H. // Phys. Rev. 1928. V. 32. P. 110.
3. Клюев А. В., Шмелёв Е. И., Якимов А. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2009. № 4. С. 53.
4. Klyuev A. V., Shmelev E. I., Yakimov A. V. // Fluctuation Noise Lett. 2012. V. 11, No. 2. Art. no. 1250015.
5. Sah C. T., Noyce R. N., Shockley W. // Proc. IRE. 1957. V. 45, No. 9. P. 1 228.
6. Belyakov A. V., Vandamme L. K. J., Perov M. Yu., Yakimov A. V. // Fluctuation Noise Lett. 2003. V. 3, No. 3. P. 325.

Поскольку наша цель — исследование спектра шумового тока S_{iD} , мы выделили спектр шума тока утечки из спектра белого шума $S_i^{(0)}$. Зависимость спектра S_{iD} от полного тока I через диод с начальным сопротивлением $R_0 = 330$ кОм представлена на рис. 5. Можно видеть что оценки, основанные на соотношении (8), находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен результат модификации соотношения Ван дер Зила [1] для спектра естественных шумов р-п-перехода, а также барьера Шоттки, $S_{iD} = 2q(I_D + 2I_s)$. Показано, что соотношение Ван дер Зила не применимо для переходов, обладающих коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики, превышающим единицу, $\eta > 1$, т. к. при нулевом токе, $I_D = 0$,

7. Клюев А. В. Низкочастотные шумы в наноразмерных полупроводниковых структурах: источники, измерение, методы анализа. LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. 208 с.
8. Клюев А. В., Беляков А. В., Якимов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 2. С. 149.
9. Klyuev A. V., Yakimov A. V. // Physica B. 2014. V. 440. P. 145.
10. Клюев А. В., Шмелёв Е. И., Якимов А. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2009. № 5. С. 81.
11. Gupta M. S. // Phys. Rev. A. 1978. V. 18, No. 6. P. 2725.
12. Шашкин В. И., Вакс В. Л., Данильцев В. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 5. С. 544.
13. Шашкин В. И., Мурель А. В., Данильцев В. М., Хрыкин О. И. // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36, № 5. С. 537.
14. Клюев А. В. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011. № 3. С. 20.
15. Клюев А. В. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2012. № 3. С. 13.
16. Клюев А. В. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 2. С. 199.
17. Klyuev A. V. // Int. J. Modern Phys. B. 2013. V. 27, No. 13. Art. no. 1350049.
18. Клюев А. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 5 (3). С. 197.
19. Болховская О. В., Клюев А. В. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 1. С. 48-53.
20. Tripple M., Bosman G., Van der Ziel A. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1986. V. 34. P. 1183.
21. Андронов А. А., Беляков А. В., Гурьев В. А., Якимов А. В. // Труды 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 «Полупроводники». Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2002. С. 38.
22. Yakimov A. V., Klyuev A. V., Shmelev E. I., et al. // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1129. Proc. 20th Intern. Conf. "Noise and Fluctuations, ICNF 2009". P. 225.
23. Klyuev A. V., Yakimov A. V., Shmelev E. I. // Fluctuation Noise Lett. 2013. V. 12, No. 1. Art. no. 1350008.
24. Клюев А. В., Шмелёв Е. И., Якимов А. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5 (1). С. 57.
25. Клюев А. В., Якимов А. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2007. № 6. С. 52.
26. Klyuev A. V., Yakimov A. V., Shmelev E. I. // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1129. Proc. 20th Intern. Conf. "Noise and Fluctuations, ICNF 2009". 2009. V. 1129. P. 361.
27. Su N., Zhang Z., Schulman J. N., et al. // IEEE Electron. Device Lett. 2007. V. 28, No. 5. P. 336.

Поступила в редакцию 9 февраля 2014 г.; принята в печать 16 сентября 2014 г.

DESCRIPTION OF THE SPECTRUM OF NATURAL NOISE IN SEMICONDUCTOR DIODES BASED ON THE MODIFIED VAN DER ZIEL RELATION

A. V. Klyuev, E. I. Shmelev, and A. V. Yakimov

In this work, we study the spectrum S_{iD} of natural (thermal and shot) current noise of the p-n junction, as well as the Schottky barrier with the nonideality coefficient η of the current-voltage characteristic exceeding unity. The results obtained with the help of the special experimental setup are presented and explained using an equivalent scheme, which takes into account the presence of the series resistance of the base and the diode contacts, as well as the possibility of leakage-current existence. It is theoretically proved and experimentally confirmed that the Van der Ziel relation $S_{iD} = 2q(I_D + 2I_S)$, which is used for calculating the current-noise spectrum of an "ideal" junction with $\eta = 1$, cannot be used for $\eta > 1$ (here, q is an elementary charge, I_D is the current across the junction,

and I_s is the junction saturation current). The previously obtained results are generalized using the Gupta theorem for the thermal-noise spectrum in the nonlinear resistive systems and experimentally confirmed. It is found that the noise-current spectrum is given by formula $S_{iD} = (2q/\eta)(I_D + 2I_s)$, which is a modification of the Van der Ziel relation for the case of an arbitrary value of the nonideality coefficient. The obtained formula for S_{iD} is experimentally tested by measuring the noise spectrum of the Schottky diode with δ doping, which is in thermodynamic equilibrium with the environment.