

# РАДИОФИЗИКА

УДК 621.391.822

## МОДИФИКАЦИЯ СООТНОШЕНИЯ А. ВАН ДЕР ЗИЛА ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ШУМОВ ДИОДОВ С КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ВАХ, ПРЕВЫШАЮЩИМ ЕДИНИЦУ

© 2009 г.

А.В. Клюев, Е.И. Шмелёв, А.В. Якимов

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

klyuevalex@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2009

Исследуется спектр естественных шумов  $p$ - $n$ -перехода, а также барьера Шоттки, обладающего коэффициентом неидеальности вольт-амперной характеристики (ВАХ), превышающим единицу,  $\eta > 1$ . Показано, что подход А. Ван дер Зила (предназначенный для определения спектра шумов «идеального» диода,  $\eta = 1$ ) неприменим в области малых токов. Для решения этой проблемы принимается, что ВАХ, характеризующаяся произвольным значением коэффициента неидеальности  $\eta$ , описывается несколькими включёнными последовательно «идеальными» переходами; в случае  $\eta = n = 1, 2, 3, \dots$  это может быть  $n$  идентичных переходов. Шумы всех переходов учитываются суммарным генератором тока  $i(t)$ . Определён спектр  $S_i$  этого тока. Представленный результат есть модификация подхода А. Ван дер Зила на случай произвольного значения коэффициента неидеальности ВАХ.

*Ключевые слова:* естественные шумы, диоды, коэффициент неидеальности, формула Найквиста, модель А. Ван дер Зила.

### Введение

Для определения спектра естественных шумов полупроводникового диода с  $p$ - $n$ -переходом обычно используется подход А. Ван дер Зила [1]. При нулевом токе через диод, то есть в условии термодинамического равновесия с окружающей средой, соотношение А. Ван дер Зила трансформируется в формулу Найквиста [2]. Однако, как показано ниже, это справедливо только для диодов с «идеальным»  $p$ - $n$ -переходом, обладающих коэффициентом неидеальности ВАХ  $\eta = 1$ . В случае диодов с коэффициентом неидеальности, превышающим единицу,  $\eta > 1$ , подход А. Ван дер Зила оказывается неприменимым в области малых токов.

Для решения этой проблемы в настоящей работе предлагается модификация подхода А. Ван дер Зила для определения спектра естественных шумов  $p$ - $n$ -перехода, а также барьера Шоттки, обладающего коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу.

### Анализ спектра шума при малом токе

Проведём анализ спектра естественного шума в переходе диода, обладающего коэффициентом неидеальности ВАХ  $\eta$ , отличающимся от единицы,  $\eta \geq 1$ . Ограничимся относительно низкими частотами, на которых не проявляются инерционные свойства диода.

ВАХ перехода описывается соотношением:

$$I = I_s \cdot \{\exp[V/(\eta V_T) - 1]\} . \quad (1)$$

Здесь  $I_s$  – обратный ток насыщения перехода;  $V$  – напряжение, приложенное к переходу;  $\eta$  – коэффициент неидеальности;  $V_T = kT/q$  – тепловой потенциал, определяемый постоянной Больцмана  $k$ , абсолютной температурой  $T$  и элементарным зарядом  $q$ .

Дифференциальное сопротивление  $R_D$  такого перехода есть

$$R_D = \eta V_T / (I + I_s) . \quad (2)$$

Начальное сопротивление  $R_{D0}$  (при  $I = 0$ ) составляет

$$R_{D0} = \eta V_T / I_s . \quad (3)$$

Воспользуемся эквивалентной схемой, предложенной А. Ван дер Зилом для «идеального» ( $\eta = 1$ )  $p$ - $n$ -перехода  $D$  (рис. 1). Здесь генератором тока  $i(t)$  учитываются шумы перехода.

Для вычисления спектра  $S_i$  этого тока воспользуемся известным результатом А. Ван дер Зила для «идеального»  $p$ - $n$ -перехода:

$$S_i = 2q \cdot (I + 2I_s). \quad (4)$$

В этом случае спектр  $S_u$  напряжения естественных шумов, выделяющегося на переходе, есть:

$$S_u = 2q \cdot (I + 2I_s) R_D^2. \quad (5)$$

Принимая в соотношении (5) ток  $I$  равным нулю, получим следующее выражение для спектра  $S_{u0}$  напряжения естественных шумов для диода, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой (то есть для спектра теплового шума эквивалентного резистора, обладающего сопротивлением  $R_{D0}$ ):

$$S_{u0} = 4kT \cdot \eta R_{D0}. \quad (6)$$

Полученный результат противоречит формуле Найквиста, за исключением «идеального» случая  $\eta = 1$ . Иначе говоря, соотношение (4) неприменимо для описания естественных шумов полупроводниковых диодов, обладающих коэффициентом неидеальности, отличающимся от единицы. Очевидно, что данное несоответствие объясняется отсутствием учёта механизмов токопереноса при  $\eta > 1$ .

#### Модификация соотношения А. Ван дер Зила

Для решения выявленной проблемы рассмотрим сначала естественные шумы, соответствующие току, обусловленному рекомбинацией носителей в области пространственного заряда перехода,  $\eta = 2$ .

Вольт-амперная характеристика такого перехода описывается двумя включёнными последовательно идентичными «идеальными» переходами  $D_1$  и  $D_2$  (см. рис. 2), обладающими одинаковыми обратными токами насыщения  $I_{s1} = I_{s2} = I_s$ .

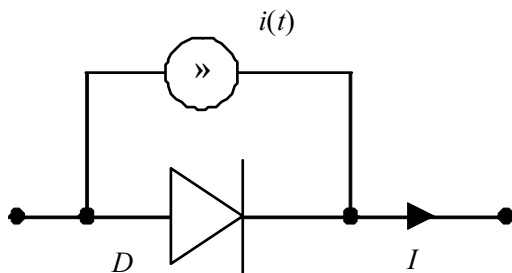


Рис. 1. Эквивалентная схема «идеального»  $p$ - $n$ -перехода

Дифференциальное сопротивление  $R_D$  перехода с рекомбинацией носителей в области пространственного заряда перехода есть сумма одинаковых дифференциальных сопротивлений  $R_{D1} = R_{D2}$  отдельных «идеальных» переходов:

$$R_D = 2 \cdot R_{D1} = 2 \cdot V_T / (I + I_s). \quad (7)$$

Начальное сопротивление  $R_{D0}$  (при  $I = 0$ ) составляет

$$R_{D0} = 2 \cdot V_T / I_s. \quad (8)$$

Учитывая некоррелированность шумов отдельных переходов, находим спектр  $S_u$  полного напряжения естественных шумов:

$$S_u = 2 \cdot [2q \cdot (I + 2I_s) R_{D1}^2] = (2q/2) \cdot (I + 2I_s) R_D^2. \quad (9)$$

При выполнении условия термодинамического равновесия с окружающей средой,  $I = 0$ , соотношение (9) преобразуется в формулу Найквиста:

$$S_{u0} = 4kTR_{D0}. \quad (10)$$

Обобщим полученные результаты.

Примем, что вольт-амперная характеристика (1), характеризующаяся произвольным значением коэффициента неидеальности  $\eta$ , описывает несколько включённых последовательно «идеальных» переходов; в случае  $\eta = n = 1, 2, 3, \dots$  это может быть  $n$  идентичных переходов.

Суммарным генератором тока  $i(t)$  учитываются шумы всех переходов. Учитывая некоррелированность этих шумов, получим следующее выражение для спектра  $S_i$  суммарного генератора тока:

$$S_i = (2q/\eta) \cdot (I + 2I_s). \quad (11)$$

Представленный результат есть модификация соотношения (4), предложенного А. Ван дер Зилом для «идеального» перехода, на случай произвольного значения коэффициента неидеальности ВАХ.

На рис. 3 в качестве иллюстрации представлен спектр шумового напряжения диода Шоттки с легированием при нулевом смещении.

Диод изготовлен в группе В.И. Шашкина [3–7] (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород). Начальное сопротивление

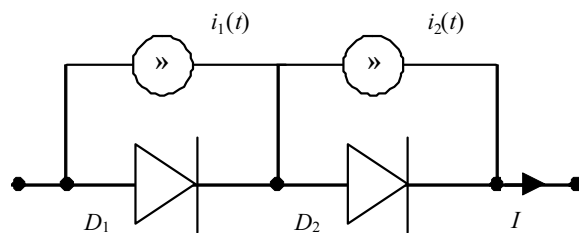


Рис. 2. Эквивалентная схема  $p$ - $n$ -перехода с  $\eta = 2$

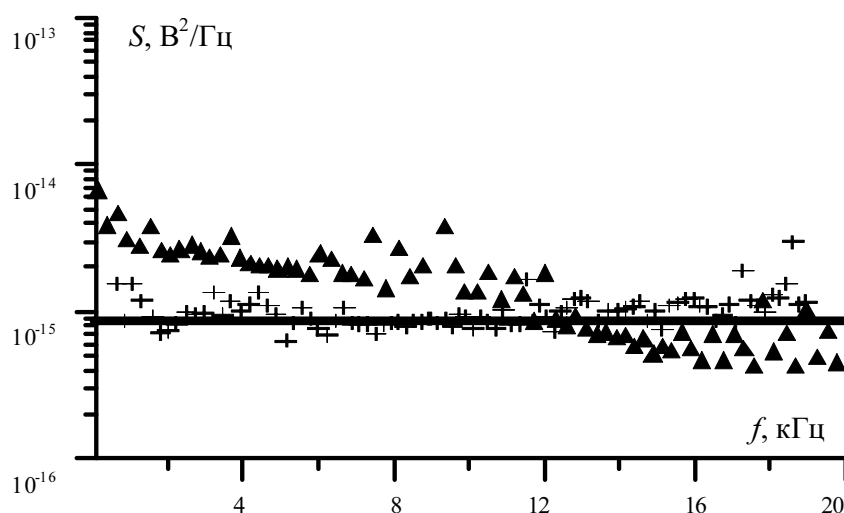


Рис. 3. Спектр шумового напряжения диода Шоттки с  $\delta$ -легированием при нулевом смещении (треугольники); сплошная линия – спектр  $S_{n0}$ , полученный в соответствии с формулой Найквиста; крестики – измеренный спектр теплового шума резистора 40 кОм

диода  $R_{D0} = 40$  кОм; коэффициент неидеальности  $\eta = 1.21$ . Сплошной линией представлен спектр  $S_{n0}$ , полученный с помощью выражений (2) и (11); крестиками показан спектр теплового шума резистора 40 кОм. Как видно из рисунка, экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с формулой Найквиста.

### Заключение

В работе представлен результат модификации соотношения А. Ван дер Зила для спектра естественных шумов  $p$ - $n$ -перехода, а также барьера Шоттки, с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу,  $\eta > 1$ . Получено выражение для спектра эквивалентного генератора тока, трансформирующееся, в условиях термодинамического равновесия с окружающей средой, в формулу Найквиста.

### Благодарности

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

*Решаемые задачи связаны с работами, выполняемыми по Приоритетному национальному проекту «Образование». Исследования проведены при поддержке программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК-08-3),*

*государственный контракт № 6039р/8473 от 26.05.2008, НИОКР «Диагностика внутренних дефектов наноразмерных полупроводниковых структур путем совместного анализа электрофизических свойств и низкочастотных модуляционных шумов».*

### Список литературы

1. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение). М.: Сов. радио, 1973.
2. Nyquist H. Thermal agitation of electric charge in conductors // Physical Review. 1928. V. 32. P. 110–113.
3. Шашкин В.И., Вакс В.Л., Данильцев В.М. и др. Микроволновые детекторы на основе низкочастотных планарных диодов Шоттки и их характеристики // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 5. С. 544–550.
4. Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью  $\delta$ -легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 5. С. 537–542.
5. Шашкин В.И., Мурель А.В. Теория туннельного токопереноса в контактах металл – полупроводник с приповерхностным изотипным  $\delta$ -легированием // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 5. С. 574–579.
6. Востоков Н.В., Шашкин В.И. Электрические свойства наноконтактов металл – полупроводник // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 9. С. 1084–1089.
7. Корзуева О.М., Клюев А.В., Якимов А.В. Исследование шумовых характеристик низкочастотных диодов Шоттки // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественно-научные дисциплины: Тезисы докладов. Изд. Гладкова О.В., 2008. С. 56.

**MODIFICATION OF A. VAN DER ZIEL RELATION  
FOR NATURAL NOISE IN DIODES WITH NON-IDEALITY FACTOR  
OF I-V CHARACTERISTIC GREATER THAN ONE**

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

The spectrum of natural noise in the junction of the diode and Schottky barrier with non-ideality factor of the I-V characteristic greater than one,  $\eta > 1$ , is investigated. It is shown that the van der Ziel model (intended for the «ideal» case  $\eta = 1$ ) is inapplicable in the region of small currents. To solve this problem, the I-V characteristic is assumed to be described by a number of serially-connected «ideal» junctions; in case of  $\eta = n = 1, 2, 3, \dots$  there may be  $n$  identical junctions. The summed noise current  $i(t)$  accounts for the noise of all junctions. The spectrum  $S_i$  of this current has been obtained. The result presented is the modification of A. van der Ziel relation for  $\eta \geq 1$ .

*Keywords:* natural noise, diodes, non-ideality factor, Nyquist relation, van der Ziel model.