

## АНАЛИЗ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ-ГЕНЕРАТОРОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА

Буслюк В.В.<sup>1</sup>, Оджаев В.Б.<sup>2</sup>, Панфиленко А.К.<sup>3</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>3</sup>, Просолович В.С.<sup>2</sup>, Шведов С.В.<sup>3</sup>, Филипеня В.А.<sup>3</sup>, Черный В.В.<sup>4</sup>, Явид В.Ю.<sup>2</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>2</sup>, Лановский Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательское унитарное предприятие «СКБ Запад»

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Ранее было установлено, что обратный ток и пробой в генераторных диодах обусловлены ионизацией технологических примесей, составляющих основу микроплазм [1]. Влияние примесных атмосфер и структурных дефектов микроплазменных каналов являются определяющими факторами при разработке генераторных диодов, учитывая их возможное влияние на основные параметры вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов. В связи с этим актуальным является исследование влияния как технологических, так и основных легирующих примесей на электрофизические параметры генераторных диодов.

В работе исследованы электрофизические параметры кремниевых диодов-генераторов шума ND102-ND104, изготовленных на основе монокристаллического кремния КДБ0.03(111), и ND201, изготовленных на подложках марки КДБ0.005(111). Глубина *p-n*-перехода, сформированного диффузией фосфора, составляла ~ 6 мкм. Измерения ВАХ производились в интервале температур от -60 до 125 °С.

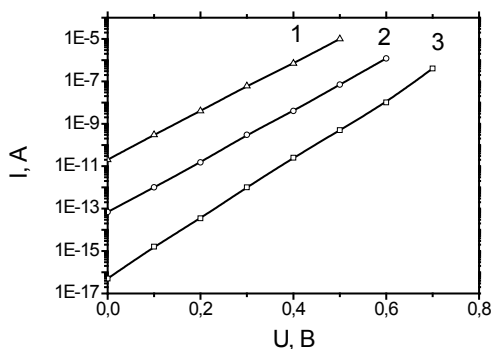


Рис. 1. Типичные прямые ВАХ *p-n*-переходов, температурных измерений:  
1 - 125 °С, 2 - 25 °С, 3 - -60 °С

Установлено, что ВАХ всех исследованных диодов в прямом направлении имеют активационный характер. При построении данных зависимостей в полулогарифмическом масштабе видно, что характеристики имеют экспоненциальную зависимость (рис.1). Поскольку полный прямой ток *p-n*-перехода приблизительно равен сумме диффузионного и рекомбинационного

токов, то для резкого перехода ( $p_{n0} \gg n_{p0}$  и  $V > kT/q$ ) полученные результаты в общем случае можно описать следующим выражением [2]:

$$J_F = \exp(qV / nkT),$$

где  $n=1$ , если преобладает диффузионный ток, и  $n=2$ , если преобладает рекомбинационный ток.

Когда оба тока сравнимы по величине, то  $n$  имеет значения между 1 и 2. При прямом смещении, из-за генерационно-рекомбинационных явлений в обедненном слое определяющими становятся процессы захватывающих носителей, и к диффузионному току добавляется рекомбинационный ток  $J_{rec}$  [2]. В таблице 1 приведены значения коэффициентов наклона ВАХ. Видно, что при уменьшении температуры измерения доля рекомбинационного тока возрастает, что обусловлено снижением при более низких температурах концентрации основных носителей заряда. Причем, для диодов ND201 значения коэффициента наклона ВАХ при всех температурах измерения имеют несколько большие значения, что обусловлено, вероятно, различием в уровнях легирования подложки и концентрации рекомбинационных центров

Таблица 1. Коэффициенты наклона ВАХ

Температура измерений	ND103	ND201
-60 °С	1.40	1.48
20 °С	1.27	1.32
125 °С	1.14	1.17

На рис. 2 приведены обратные ветви ВАХ диодов, построенные в двойном логарифмическом масштабе. Полный обратный ток для резкого *p-n*-перехода можно приблизительно представить суммой диффузионного тока в нейтральной области и генерационного тока в обедненной области [2]. Плотность тока, обусловленного генерацией в обедненной области, принимается

$$\text{равной } J_{gen} \sim \frac{1}{\tau_e}; J_{gen} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{1/2}, \text{ где}$$

$\tau_e$  – эффективное время жизни носителей заряда, определяемое скоростью генерации электронно-дырочных пар в обедненной области *p-n*-пере-

хода толщиной  $W$ ,  $V_{bi}$  – контактная разность потенциалов. Таким образом, следует ожидать, для резкого перехода степенную зависимость генерационного тока от приложенного напряжения с показателем степени 0,5.

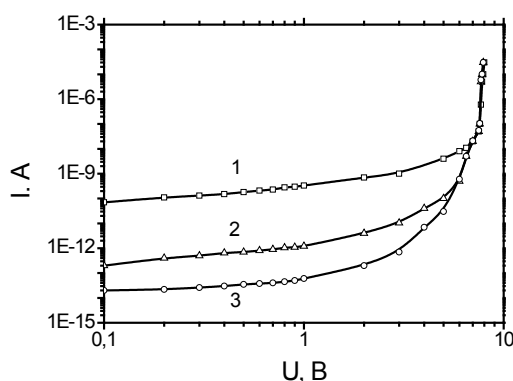


Рис. 2. Типичные обратные ВАХ  $p$ - $n$ -переходов, температурных измерений:

1 - 125 °C, 2 - 25 °C, 3 - -60 °C

Из рис. 2 видно, что для ВАХ  $p$ - $n$ -переходов при обратном смещении присуще наличие двух областей. При  $U < 2$  В ток практически не зависит от  $V$ , что свидетельствует о преобладании диффузионной составляющей, что обусловлено низкой концентрацией генерационных центров. При  $U > 2$  В наблюдается степенная зависимость тока от напряжения  $J \sim V^n$ , что характерно для обратной ВАХ  $p$ - $n$ -перехода в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар [2]. В данном случае  $n > 1$ , что свидетельствует о высокой концентрации рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородном распределении.

Из исследования температурных зависимостей обратных токов установлено, что энергия активации в зависимости от величины приложенного к  $p$ - $n$ -переходу обратного напряжения имеет значения в диапазоне 0.25-0.45 эВ, причем с увеличением обратного напряжения данная величина уменьшается.

Данный эффект может быть с одной стороны обусловлен температурным изменением ширины запрещенной зоны. Однако, наблюдаемое изменение глубины залегания уровня не превышает для используемого в данной работе температурного интервала исследований 0.05 эВ. С другой стороны, необходимо учитывать эффект Пула-Френкеля [3], заключающийся в уменьшении глубины залегания энергетических уровней в сильных электрических полях. Произведенные оценки показывают, что напряженность поля в

области обеднения превышает 100 В/см. Этого достаточно для изменения глубины залегания энергетических уровней. При экстраполяции зависимостей энергии активации от приложенного напряжения (рис.3), к координатной оси, соответствующей 0 В, полученные значения дают величину залегания энергетического уровня  $0.45 \pm 0.03$  эВ. Такими примесями могут быть технологические фоновые примеси железа и меди.

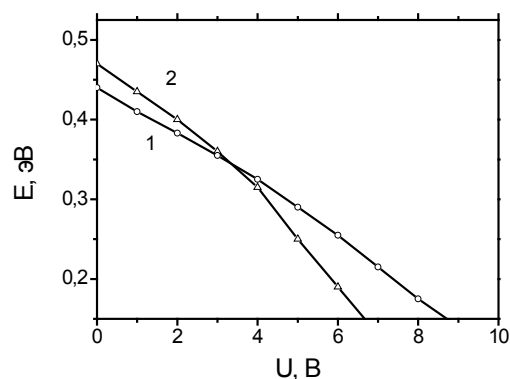


Рис.3. Зависимость энергии активации от приложенного обратного напряжения (1-диод ND103, 2-диод ND201)

Показано, что анализ ВАХ позволяет установить влияние неоднородностей легирования кристалла и ионизации глубоких примесных центров в области пространственного заряда на электрофизические параметры и процессы возникновения лавинного пробоя  $p$ - $n$ -переходов генераторных диодов шума, обусловленного включением микроплазм в результате локального увеличения на них напряженности электрического поля.

1. Буслюк В.В., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Русакевич Д.А., Черный В.В. Вольтамперные характеристики генераторных диодов для создания широкополосного шума // Матер. 7-й Межд. н.-т. конф. «Приборостроение – 2014», БНТУ, Беларусь, Минск, 2014, с. 268-269.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва «Мир», 1984. Т.1. 455 с.
3. Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, Р.Б. Джаббаров, С.А. Абушов, З.Я. Абдулаева, Ф. А. Казымова. Эффект Пула-Френкеля и спектроскопия локальных уровней в полупроводниках // Институт физики НАН Азербайджана, AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида 33., 2003 № 5.