

ИОНЫЧЕВ В. К., ЧЕРАШЕВ Д. М., МУШКЕТОВ Е. В.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ ПО ЗАДЕРЖКЕ
ЛАВИННОГО ПРОБОЯ P - N -ПЕРЕХОДА В СЛУЧАЕ СИЛЬНОЙ ПОЛЕВОЙ
ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭМИССИИ**

Аннотация. В статье приводится описание усовершенствованной методики исследования глубоких центров в микроплазменных каналах по статистической задержке лавинного пробоя p - n -перехода. Предлагается изменить форму импульсов напряжения подаваемых на p - n -переход таким образом, чтобы исключить полевою перезарядку глубоких центров в области сильного электрического поля.

Ключевые слова: лавинный пробой, p - n -переход, микроплазма, глубокие центры, коэффициент эмиссии, задержка микроплазменного пробоя.

IONYCHEV V. K., CHERASHEV D. M., MUSHKETOV E. V.

**METHODOLOGY FOR THE STUDY OF DEEP CENTERS FOR THE DELAY
OF AVALANCHE BREAKDOWN OF P - N -JUNCTION: A STUDY OF
STRONG FIELD DEPENDENCE OF EMISSION COEFFICIENTS**

Abstract. The article describes an improved technique for the study of deep centers in microplasma channels based on the statistical delay of the avalanche breakdown of the p - n -junction. It is proposed to change the shape of the voltage pulses applied to the p - n -junction in such a way as to exclude field recharge of deep centers in the region of a strong electric field.

Keywords: avalanche breakdown, p - n -junction, microplasma, deep centers, emission coefficient, delay of microplasma breakdown.

Лавинный пробой p - n -переходов сильно локализован. Области локального пробоя имеют очень малые геометрические размеры и существенно меньшее напряжение пробоя по сравнению с однородными областями. Эти области сильно локализованного пробоя были названы микроплазмами (МП) [1]. Одним из основных проявлений микроплазменного эффекта в p - n -переходах является импульсный характер лавинного тока. Длительности импульсов и пауз между ними случайны. С ростом приложенного напряжения амплитуда импульсов увеличивается незначительно, но очень сильно возрастает их длительность, и сокращаются паузы между ними. При дальнейшем увеличении напряжения появляются новые микроплазмы. Такой характер протекания тока через микроплазмы приводит к появлению разрывов и изломов на вольт-амперной характеристике p - n -перехода. Наблюдение микроплазменных импульсов может быть затруднено из-за наличия нескольких одновременно работающих микроплазм. При пробое полный ток диода сконцентрирован в

области микроплазмы, не смотря на ее малые размеры. Таким образом, напряжение пробоя реального $p-n$ -перехода представляет собой напряжение включения первой микроплазмы V_M .

Если на $p-n$ -переход подать прямоугольный импульс напряжения, то будет наблюдаться статистическая задержка пробоя микроплазмы, обусловленная отсутствием в течение некоторого времени в канале микроплазмы носителя, способного дать начало лавине. Кроме того, не каждый носитель, попавший в микроплазменный канал, запустит лавину. Процесс запуска лавины носит случайный характер и определяется вероятностью запуска носителем лавины. При этом считается, что электрическое поле в $p-n$ -переходе мгновенно следует за изменением напряжения. Запускающие носители заряда могут попадать в канал МП, в основном, вследствие четырех механизмов: диффузии из базовых областей, термогенерации носителей в области пространственного заряда (ОПЗ), туннельного эффекта, реэмиссии с глубоких центров (ГЦ). Кроме этих четырех механизмов возможно попадание носителей в канал микроплазмы под действием внешних источников (облучение светом, γ -квантами). Возможно также взаимодействие микроплазм, если они находятся на небольших расстояниях друг от друга. При определенных обстоятельствах, например, слабый фоновый генерации (первые три механизма), четвертый фактор может вносить основной вклад в запуск лавины. Когда концентрация глубоких центров мала, то эмиссия носителей заряда с ГЦ будет влиять лишь на частоту микроплазменных импульсов и статистическую задержку пробоя микроплазмы.

Целью данной работы является усовершенствование разработанной ранее [2, 3] методики исследования глубоких центров в микроплазменных каналах по статистической задержке лавинного пробоя $p-n$ -перехода.

При исследовании вероятности включения микроплазмы при заполнении глубоких центров в микроплазменном канале необходимо точно знать местоположение области эмиссии носителей, участвующих в запуске лавины, так как коэффициент ударной ионизации зависит от электрического поля. На рисунке 1 представлено распределение электрического поля в $p-n$ -переходе при двух напряжениях V_M и V_m .

Рассмотрим $p-n$ -переход, в котором имеются равномерно распределенные глубокие центры с энергетическим уровнем в верхней половине запрещенной зоны и коэффициент эмиссии электронов с глубоких центров намного больше коэффициента эмиссии дырок $e_n \gg e_p$. Пусть $p-n$ -переход находится при такой температуре, при которой уровень Ферми в n -базе выше глубокого уровня. Подадим на $p-n$ -переход напряжение V_M , равное напряжению включения самой низковольтной микроплазмы. То есть, при самом незначительном увеличении напряжения смещения, через $p-n$ -переход потечет лавинный ток.

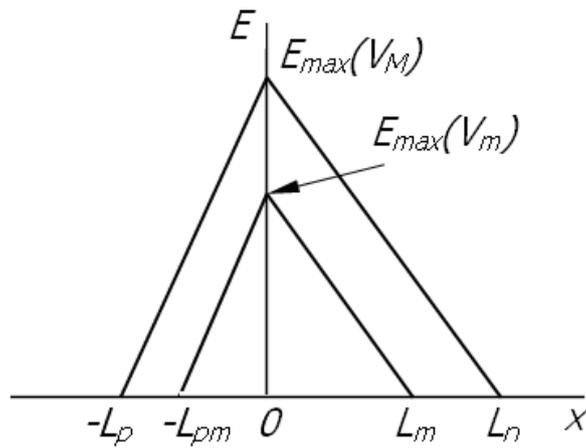


Рис. 1. Распределение электрического поля в p - n -переходе.

На рисунке 2 схематически представлена рассматриваемая структура.

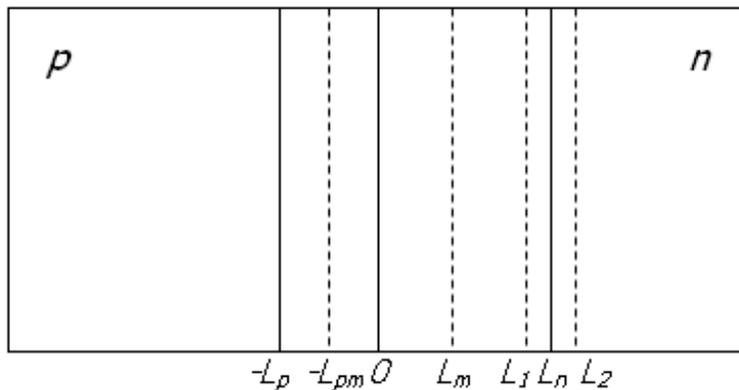


Рис. 2. Схематическое изображение p - n -перехода.

Когда на p - n -переход подано напряжение $V_m < V_M$, область пространственного заряда уменьшится до L_m , глубокие центры в области от L_m до L_n заполняются электронами со стороны n -базы. В области от $-L_p$ до L_m установившееся при V_m стационарное распределение заряда не изменяется. При приложении напряжения $V_2 > V_m$, ОПЗ увеличится, соответственно увеличится напряженность электрического поля. Со стороны n -базы граница ОПЗ при этом напряжении соответствует L_2 (рис. 2), со стороны p -области граница ОПЗ при напряжении V_2 не показана, т.к. заполнение ГЦ в этой части ОПЗ не изменяется.

Если существует полевая зависимость коэффициентов эмиссии носителей заряда с глубоких центров, то после изменения электрического поля, изменится распределение зарядов на глубоких уровнях в области от $-L_p$ до L_m , что может внести значительный вклад в вероятность включения микроплазмы. Поэтому при исследовании глубоких центров в области от L_m до L_n (рис. 2) необходимо исключить влияние запуска лавины носителями, эмитированными с ГЦ в области от $-L_p$ до L_m . В связи с этим предлагается проводить

измерения статистической задержки микроплазменного пробоя на прямоугольных импульсах напряжения следующего вида (рис. 3).

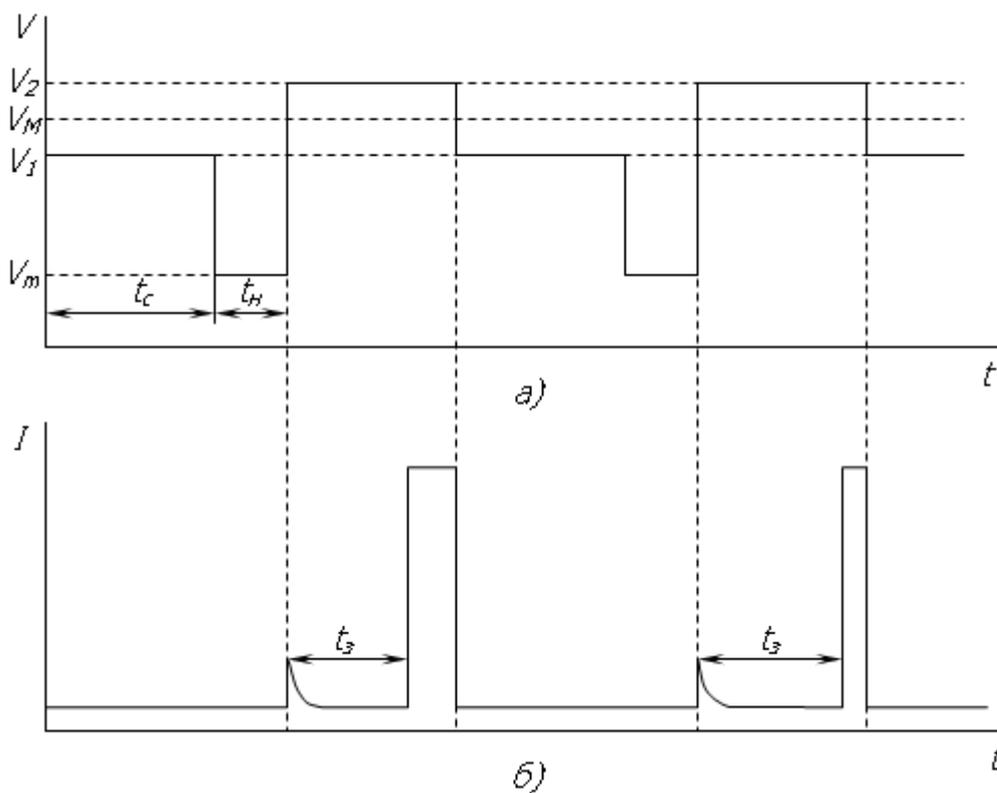


Рис. 3. Форма импульсов напряжения для измерения задержки пробоя:
 а) напряжение, прикладываемое к диоду; б) ток через диод.

Время t_c выбирают таким образом, чтобы в p - n -переходе успевало устанавливаться стационарное состояние ГЦ. Время t_n должно быть гораздо меньше времени перераспределения заряда на ГЦ под действием электрического поля в области от $-L_p$ до L_m (рис.2), и в тоже время, чтобы ГЦ в области от L_m до L_l заполнились основными носителями заряда (электронами) со стороны n -базы. Это можно сделать, так как время перераспределения носителей заряда на ГЦ под действием электрического поля определяется коэффициентами эмиссии носителей заряда с ГЦ, а заполнение ГЦ электронами в области от L_m до L_l при попадании ее в n -базу при снижении напряжения до V_m определяется коэффициентом захвата основных носителей заряда на ГЦ, который гораздо больше. Таким образом, можно исследовать влияние на вероятность включения микроплазмы только тех носителей, которые эмитированы из области от L_m до L_2 . Для исключения перераспределения заряда ГЦ в области от $-L_p$ до L_l , $V_2 - V_1$ должно быть много меньше V_2 . При этом эмиссия носителей с глубоких центров в области заполнения от L_l до L_2 должна влиять на вероятность включения микроплазмы. Однако электрическое поле в этой области настолько слабое, что эмитируемые с ГЦ носители не будут оказывать влияние на запуск лавины.

Поэтому предыдущая методика [2], в случае сильной полевой зависимости коэффициентов эмиссии носителей заряда с ГЦ, не позволяла корректно исследовать глубокие центры при заполнении их основными носителями незначительным снижением напряжения на $p-n$ -переходе. Изменяя напряжение V_m , можно изменять область заполнения ГЦ основными носителями заряда и исследовать влияние эмиссии носителей с ГЦ на запуск лавины в различных областях $p-n$ -перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. – Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
2. Булярский С. В., Сережкин Ю. Н., Ионычев В. К. Статистическая задержка пробоя микроплазм в фосфидгаллиевых $p-n$ -переходах // ФТП. – 1999. – Т. 3, Вып. 11. – С. 1345–1349.
3. Ионычев В. К. Механизмы формирования вольт-амперных характеристик кремниевых лавинных диодов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – 100 с.