

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.382.232:53.098

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ НЕГО МОЩНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

© 2021 г. А. В. Семенов^а*, А. В. Серов^а, К. В. Шибалко^а

^аРоссийский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
просп. Мира, 37, Саров, Нижегородская обл., 607189 Российская Федерация

*E-mail: alekssemenov.nnov@gmail.com

Поступила в редакцию 07.08.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

Создан экспериментальный стенд для оценки характеристик электромагнитного поля, при которых происходят изменения вольт-амперной характеристики полупроводниковых элементов. На разрабатываемом стенде проведена серия экспериментов по воздействию сигналами с различными параметрами на диод КД520А с целью зафиксировать изменения крутизны вольт-амперной характеристики диода как признак начала деградации его $p-n$ -перехода путем регистрации амплитуд высших гармоник при воздействии сверхвысокочастотными сигналами.

DOI: 10.31857/S0033849421020157

ВВЕДЕНИЕ

Задача по проведению исследований стойкости полупроводниковых элементов различного назначения в опубликованных различными исследователями работах преимущественно сводится к облучению их электромагнитными полями с последующим увеличением амплитуды сигнала вплоть до катастрофических отказов исследуемых объектов [1–3]. Однако в ряде случаев, когда, например, исследуют стойкость уникальных и дорогостоящих микроэлектронных объектов, катастрофический отказ одной или нескольких из его систем неприемлем. Для достоверной оценки величины амплитуды электромагнитного поля, представляющей опасность для таких объектов, необходимо определить момент начала деградации $p-n$ -перехода в рабочем полупроводниковом элементе из состава объекта при омическом разогреве токами, наведенными под действием внешнего воздействующего фактора.

Для того чтобы определить момент начала деградации $p-n$ -перехода, нами предлагается воздействовать на исследуемый объект зондирующими сигналами регулируемой мощности с регистрацией амплитуд выходных сигналов на высших гармониках. Уменьшение уровня высших гармоник при дальнейшем увеличении амплитуды зондирующего сигнала будет свидетельствовать о начале изменения

крутизны вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового элемента.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для реализации возможности наблюдения прямой и обратной ветвей ВАХ полупроводниковых элементов, находящихся под воздействием внешнего электромагнитного поля, был создан стенд, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Формирователь сигналов ФС имеет два независимых канала. Один из них является источником ВЧ-воздействия на исследуемый диод и определяет частотно-временные параметры воздействующего ВЧ-импульса. Другой канал формирователя сигналов является генератором пилообразного напряжения, используемого в схеме измерения СИ ВАХ.

Сформированный ВЧ-каналом формирователя ФС сигнал поступает на связку усилитель–фильтр У–Ф для нормирования энергетических характеристик воздействующего ВЧ-импульса. Затем сформированный ВЧ-сигнал поступает на исследуемый диод, расположенный в схеме измерения СИ ВАХ. Контроль над состоянием исследуемого диода осуществляется с помощью анализатора спектра АС. Осциллограф Осц используется для записи текущего вида ВАХ исследуемого диода.

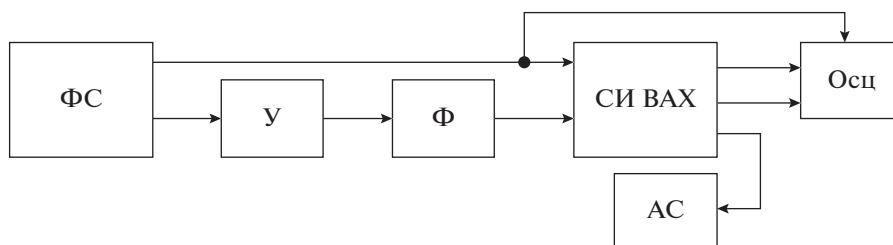


Рис. 1. Функциональная схема стенда для определения характеристик поля, достаточных для изменения ВАХ полупроводникового прибора: ФС – формирователь сигналов; У – усилитель; Ф – фильтр; СИ ВАХ – схема измерения ВАХ; АС – анализатор спектра; Осц – осциллограф.

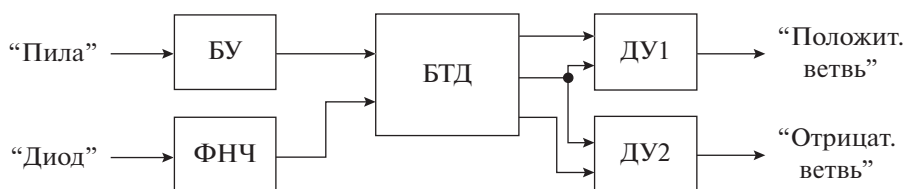


Рис. 2. Функциональная схема стенда для определения характеристик поля, достаточных для изменения ВАХ полупроводникового прибора: БУ – буферный усилитель; ФНЧ – фильтр нижних частот; БТД – блок токовых датчиков прямой и обратной ветвей ВАХ; ДУ1, ДУ2 – дифференциальные усилители.

Большинство элементов представленной функциональной схемы являются стандартными средствами измерений, за исключением схемы измерения ВАХ исследуемого полупроводникового элемента.

В реализованной схеме измерение ВАХ диода основано на измерении тока, протекающего через исследуемый диод, напряжение на котором определяется выходным напряжением усилителя с низким выходным сопротивлением [4]. Формирование прямой и обратной ветвей ВАХ обеспечивается двумя параллельными дифференциальными усилительными каналами с общей точкой на исследуемом диоде. Усилители формируют сигнал с датчиков тока прямой и обратной ветвей ВАХ. Источник ВЧ-сигнала также подключен к диоду через развязывающую LC-цепочку.

Функциональная схема устройства для измерения ВАХ диода представлена на рис. 2. Пилообразное напряжение, изменяющееся в диапазоне от -10 до 10 В, поступает на буферный усилитель БУ по входу “Пила”. Сформированный им сигнал подается на блок токовых датчиков БТД обеих ветвей ВАХ. С выхода токовых датчиков сигналы по двум каналам поступают на входы выходных дифференциальных усилителей ДУ1 и ДУ2. Сигналы с их выходов регистрируются осциллографом по каналам “Положит. ветвь” и “Отрицат. ветвь”. Исследуемый диод подключается к блоку токовых датчиков через развязывающий фильтр нижних частот ФНЧ по каналу “Диод”.

Принципиальная схема измерителя представлена на рис. 3. Входное пилообразное напряжение формируется стандартным функциональным генератором и подается на вход “Input_saw”. Входной сигнал через ограничитель напряжения на $D3$, $D4$, $D5$ и $R13$ поступает на операционный усилитель $U3A$, включенный по схеме повторителя напряжения. С выхода повторителя пилообразное напряжение поступает на параллельно включенные датчики тока прямой и обратной ветвей ВАХ $R7$ и $R4$. Коммутация датчиков реализована на диодах $D1$ и $D2$.

На операционных усилителях $U1$ и $U2$ собраны дифференциальные усилители сигналов токовых датчиков $R7$ и $R4$. Выходные сигналы “Out_positive” и “Out_negative” совместно с входным сигналом “Input_saw” определяют ВАХ исследуемого диода.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментальных исследований в качестве объекта использовали кремниевый эпитаксиально-планарный диод КД520А, предназначенный для применения в импульсных устройствах, с максимально допустимым постоянным обратным напряжением 15 В.

Принципиальная схема экспериментов по воздействию ВЧ-сигналами различной скважности на исследуемый полупроводниковый диод представлена на рис. 4.

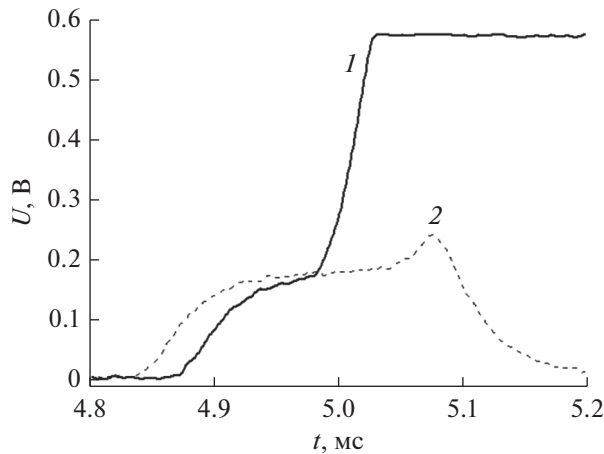


Рис. 5. Контроль работоспособности исследуемого диода после воздействия ВЧ-сигналом, осуществляемый по осциллограмме, регистрирующей положительную ветвь ВАХ: кривая 1 – эталон, кривая 2 – после воздействия непрерывным сигналом частотой 153 МГц.

ческого ВЧ-сигнала, использовали анализатор спектра с частотным диапазоном регистрации от 9 кГц до 7.5 ГГц.

Для синхронизации времени развертки анализатора спектра со временем генерации импульсно-периодического зондирующего сигнала использовали генератор импульсов.

Работоспособность исследуемого диода контролировали с помощью амплитуды сигнала, полученной при регистрации осциллограммы положительной ветви ВАХ. В качестве примера на рис. 5 приведена типовая осциллограмма, полученная для работоспособного диода, обозначенная на графике как эталон (кривая 1), и диода, вышедшего из строя после воздействия непрерывным сигналом частотой 153 МГц и мощностью порядка 12 Вт (кривая 2). В дальнейших исследованиях при воздействии как непрерывными сигналами, так и сигналами различной скважности, когда показания аппаратуры, контролирующей работоспособность исследуемого диода, по форме совпадали с пунктирной кривой на рис. 5, считалось, что диод вышел из строя.

Зависимости уровней собственных высших гармоник $P_{2\text{гарм}}$ и $P_{3\text{гарм}}$ исследуемого диода при подаче на плату непрерывного сигнала на частоте 153 МГц при последовательном увеличении мощности зондирующего сигнала $P_{\text{вх}}$ приведены на рис. 6а и 6б. Крайние правые точки на графиках соответствуют уровням гармоник в момент выхода диода из строя. Как следует из приведенных зависимостей, моменту выгорания диода предшествует снижение уровня его собственных гармоник, что

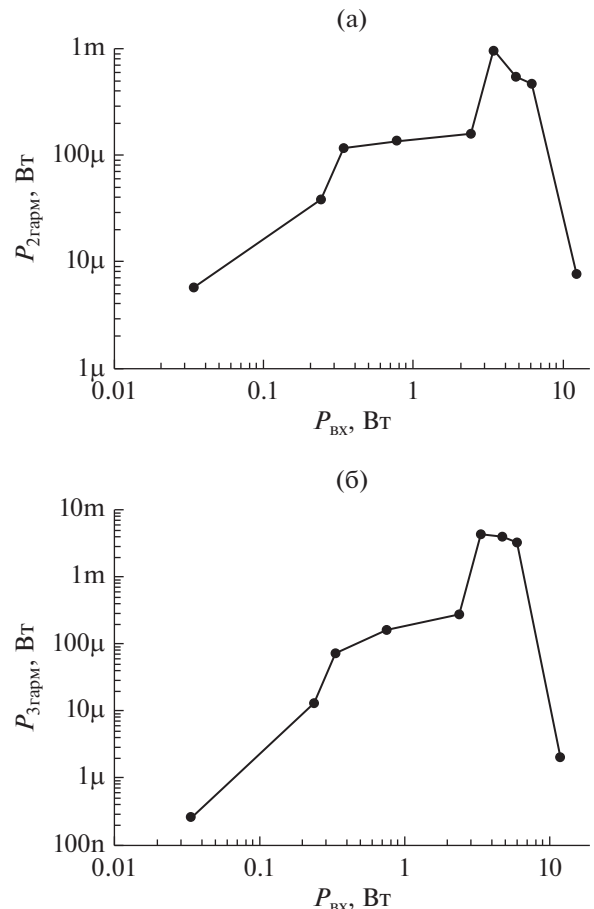


Рис. 6. Зависимость уровня второй (а) и третьей (б) гармоник (306 и 459 МГц соответственно) диода при подаче на плату непрерывного сигнала на частоте 153 МГц от амплитуды зондирующего сигнала.

прямо указывает на начало деградации $p-n$ -перехода под действием наведенных токов.

Проведенные эксперименты показали, что при использовании непрерывного сигнала в качестве зондирующего момент выгорания полупроводника наступает за характерное время менее 1 с, после того как величина мощности, подаваемой на экспериментальный стенд с диодом, превысит 10 Вт. Для более подробной регистрации процесса развития деградации $p-n$ -перехода было решено изменить воздействующий сигнал с непрерывного на импульсно-периодический. Таким образом, за счет уменьшения интегральной мощности, рассеиваемой на диоде (в связи с переходом на импульсно-периодический режим работы) удалось более подробно зафиксировать момент начала снижения амплитуд гармоник диода без выхода его из строя. На рис. 7а и 7б приведены зависимости уровней собственных высших гармоник $P_{2\text{гарм}}$ и $P_{3\text{гарм}}$ исследуемого диода при подаче на плату

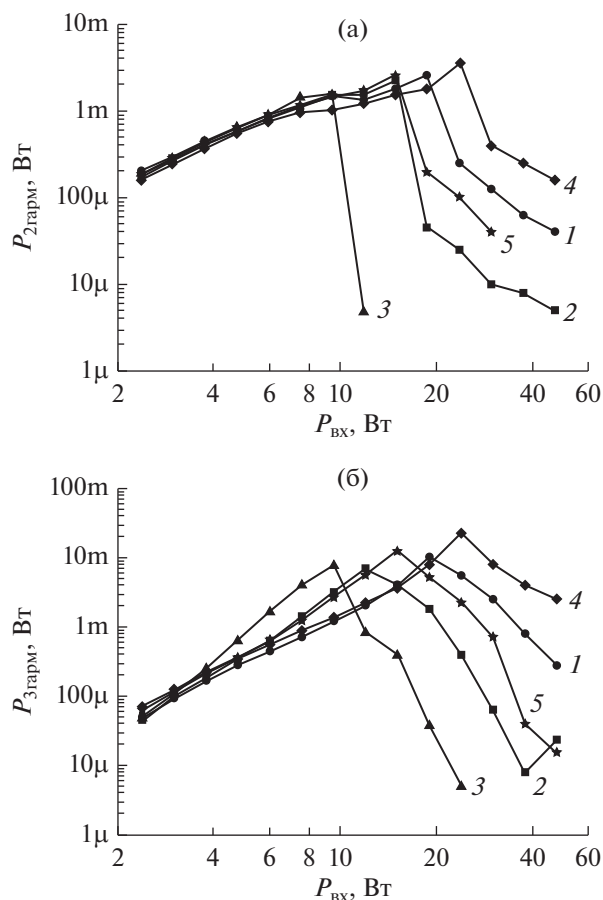


Рис. 7. Зависимость уровня второй (а) и третьей (б) гармоник (306 и 459 МГц соответственно) диода при подаче на плату импульсно-периодических сигналов на несущей частоте 153 МГц от амплитуды зондирующего сигнала: кривые 1 – 100 Гц/3 мс; 2 – 100 Гц/5 мс; 3 – 100 Гц/8 мс; 4 – 200 Гц/2 мс; 5 – 200 Гц/4 мс.

импульсно-периодических сигналов различной скважности и длительности одного импульса на несущей частоте 153 МГц при последовательном

увеличении мощности $P_{\text{вх}}$ зондирующего сигнала. Точки максимума зарегистрированных амплитуд на графиках соответствуют началу деградации $p-n$ -перехода с последующим его развитием при дальнейшем увеличении амплитуды зондирующего сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования создан экспериментальный стенд для оценки характеристик электромагнитного поля, при которых происходят изменения вольт-амперной характеристики полупроводниковых элементов. На разработанном стенде была проведена серия экспериментов по воздействию сигналами с различными параметрами на диод КД520А. Были зафиксированы изменения крутизны вольт-амперной характеристики диода как признак начала деградации его $p-n$ -перехода путем регистрации амплитуд высших гармоник при воздействии сверхвысокочастотными сигналами. Для обоих случаев, постоянного и импульсно-периодического воздействий, зарегистрированы моменты уменьшения амплитуд собственных высших гармоник диода, предшествующие его выходу из строя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec10/1/text.pdf>.
2. Козлов А.Н., Рыбаков А.П. // Радиоэлектрон. комп. системы. 2007. № 7. С. 83.
3. Бобрешов А.М., Коровченко И.С., Степкин В.А., Усков Г.К. // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2011. № 1. С. 12.
4. Морозов А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника. М.: Высшая школа, 1987.