УДК 621.38

DOI:10.36845/2073-8250-2020-257-2-47-69

АНАЛИЗ БОЛЬШОГО МАССИВА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА ИМПУЛЬСНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕ- СКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Д. О. Ваничкин, И. Я. Гантман, А. В. Левко
АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

Проведён анализ большого массива экспериментальных данных, полученных испытательным центром АО «НПП «Пульсар» в ходе испытаний изделий электронной техники на импульсную электрическую прочность, проведённых при выполнении опытно-конструкторских работ по заказу Минпромторга России. Результаты анализа скомпонованы и представлены в виде диаграмм, графиков и таблиц с учётом методических основ испытаний, назначения и классификационной группы испытываемых изделий, технологии их изготовления.

Ключевые слова: импульсная электрическая прочность, одиночный импульс напряжения, испытания изделий электронной техники

Сведения об авторах: Денис Олегович Ваничкин, vanichkin@pulsarnpp.ru; Илья Яковлевич Гантман; Алексей Владимирович Левко

ANALYSIS OF THE LARGE ARRAY OF RESULTS OBTAINED DURING THE PULSED MODE DIELECTRIC BREAKDOWN TESTING OF ELECTRONIC DEVICES

D.O. Vanichkin, I.Ya. Gantman, A.V. Levko
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

In this paper we perform the analysis of the large array of experimental data obtained by the testing center of S&PE Pulsar JSC during the dielectric breakdown testing of electronic devices under pulsed operation mode. Tests were carried out as part of the development work commissioned by the Ministry of Industry and Trade of Russia. The results of the analysis are arranged as diagrams, graphs and tables, taking into account the methodological basis, purpose, classification group and manufacturing method of each device under test.

Keywords: pulsed dielectric strength, single voltage pulse, testing of electronic devices

Data on authors: Denis Olegovich Vanichkin, vanichkin@pulsarnpp.ru; Ilya Yakovlevich Gantman; Aleksey Vladimirovich Levko

Введение

Испытания изделий электронной техники (ИЭТ) на импульсную электрическую прочность (ИЭП) при воздействии одиночных импульсов напряжения (ОИН) проводились в соответствии с требованиями регламентирующих документов [1–4]. При проведении испытаний использовался генератор ОИН с выходным импедансом $\sim 2,5$ Ом, позволяющий получать ОИН трапецеидальной формы в диапазоне от 100 нс до 10 мкс.

К настоящему моменту (март 2020 года) за время работы испытательного центра АО «НПП «Пульсар» на ИЭП было испытано более 1600 образцов 212 типов различных изделий в рамках 119 опытно-конструкторских работ (ОКР). Накопленный материал и практический опыт позволяют сделать ряд выводов и обобщений, касающихся основных результатов и методологии испытаний.

Исследованы более трёх десятков СВЧ усилителей мощности и операционных усилителей, значительная выборка смесителей частот и генераторов, управляемых напряжением. Из дискретных изделий про-

ведены испытания большого количества биполярных и полевых транзисторов, полупроводниковых диодов. Диаграмма, иллюстрирующая распределение количества типов испытанных изделий различных классов, приведена на рис. 1.

Если говорить о классификационной группе изделий [5], то больше всего было испытано интегральных микросхем, дискретных изделий и различного рода модульных сборок (рис. 2). Ввиду того, что различие между микросборками, модулями и модулями СВЧ зачастую условное, по группам изделия распределялись в зависимости от общих технических условий, использовавшихся в соответствующей работе.

Понятие критичного включения

Согласно [4], ИЭП изделие характеризуется максимально допустимым значением амплитуды ОИН, после воздействия которого значения параметров-критериев ИЭП изделия соответствуют установленным нормам. Таким образом, в ходе испытаний определяются параметры ОИН, при которых гарантированно не происхо-

Рис. 1

Распределение ИЭТ, испытанных на ИЭП, по функциональному назначению

Рис. 2

Распределение ИЭТ, испытанных на ИЭП, по классификационным группам

дит отказ изделия при подаче импульса в любом включении. На практике удобно пользоваться не введённым в стандартах термином критичное включение. При проведении испытаний под критичным включением понимается то включение, в котором при заданной длительности ОИН ($t_{\text{ОИН}}$) определённая максимально допустимая амплитуда ОИН ($U_{\text{ОИН}}$) минимальна. В понятие включения входит выбранная пара выводов, между которыми произво-

дится испытательное воздействие, электрический режим испытываемого изделия при подаче ОИН, а также полярность, в которой подаётся импульс.

Понятно, что в условиях испытаний, когда выборка изделий ограничена, критичное включение определяется формально наименьшим полученным значением $U_{\text{ОИН}}$. Однако разница между величинами $U_{\text{ОИН}}$, определёнными для разных включений, может быть очень мала. Для того

Рис. 3

Количество выявленных критичных включений в разных ОКР

чтобы установить истинное критичное включение (и величину $U_{\text{ОИН}}$ для него), требуется применить методы статистической обработки результатов испытаний. Зачастую для одного включения используется одно изделие, поэтому применить анализ на основе статистики на практике не всегда возможно. На полученную величину $U_{\text{ОИН}}$ оказывают влияние технологический разброс характеристик изделия, погрешность средств измерения, методическая погрешность, связанная с шагом импульса, случайная ошибка при измерениях и т. д.

В данной работе определим критичное включение как любое включение, $U_{\text{ОИН}}$ которого больше обнаруженного минимального значения $U_{\text{ОИН}}$ не более чем в 1,2 раза, то есть на один двадцатипроцентный шаг увеличения амплитуды ОИН при испытаниях (в соответствии с методикой испытаний). Таким образом, у одного изделия может быть несколько включений, попадающих под определение критичных.

На рис. 3 приведены сведения о количестве выявленных критичных включе-

ний в различных ОКР. Следует отметить, что реальное число критичных включений может быть больше, так как не все из них могут быть установлены в ходе испытаний.

Количество изделий для испытаний и понятие группы выводов изделия

Большая часть ОКР выполнялась по заказам Министерства промышленности и торговли Российской Федерации в части Департамента радиоэлектронной промышленности, частные программы и методики испытаний (ПМИ) на ИЭП согласовывались с представителем заказчика – ФГУП «МНИИРИП».

В процессе согласования мы столкнулись с понятием группы выводов, которое не фигурирует в нормативной документации. С точки зрения экспертной организации, все включения можно разделить на три группы – включения, связанные со входами, с выходами и с выводами питания изделий. Подобный подход прослеживается в ряде публикаций [6, 7]. На рис. 4

Рис. 4

Типовая эквивалентная схема воздействия ОИН, вызванных ЭМИ, на выводы ИЭТ: A – входы изделия, B – выходы, C – выводы питания, GND – общий вывод; E_A , E_B , E_C , Z_A , Z_B и Z_C – параметры эквивалентного генератора ОИН (ЭДС и выходной импеданс соответственно), $E_П$ и $Z_П$ – ЭДС и выходной импеданс источников питания, задающих электрический режим изделия

приведена взятая из работы [5] «типовая эквивалентная схема воздействия ОИН, вызванных электромагнитным импульсом (ЭМИ), на выводы ИЭТ». Здесь А – входы изделия, В – выходы, С – выводы питания, GND – общий вывод. В общем случае в рамках данного подхода в процессе испытаний предписывается рассматривать следующие включения: « $A_1 - GND$ », ..., « $A_m - GND$ », « $B_1 - GND$ », ..., « $B_n - GND$ », « $C_1 - GND$ », ..., « $C_k - GND$ » (каждое включение – при обеих полярностях подаваемого ОИН). Таким образом, в рамках данного подхода для испытания изделия требуется $2 \cdot (m + n + k)$ образцов для каждого значения длительности ОИН.

С другой стороны, при воздействии ЭМИ за счёт антенных свойств проводных и кабельных линий на внешних выводах изделия возникают наведённые электростатические потенциалы φ_{A1} , ..., φ_{Am} , φ_{B1} , ..., φ_{Bn} , φ_{C1} , ..., φ_{Ck} . Можно считать, что в общем случае эти потенциалы возникают и существуют одновременно, так как время прохождения ЭМИ сквозь аппаратуру много меньше длительности процесса протекания наведённого заряда через нагрузку внутри аппаратуры. В соответствии с регламентирующей документацией задача анализа сложной системы, в которой возникают множественные электрические перегрузки на различных элементах рассматриваемого изделия, сводится к более простой задаче анализа влияния единичной перегрузки независимо для каждой из пар выводов. Но если на выводе A_1 возникает потенциал φ_{A1} , а на выходе B_1 – потенциал φ_{B1} , почему нужно рассматривать только включения, связанные с общим выводом (« $A_1 - GND$ » и « $B_1 - GND$ »)? Почему не нужно рассматривать включение « $A_1 - B_1$ », если вследствие воздействия ЭМИ между

этими выводами образовалось напряжение $U_{AB} = \varphi_{A1} - \varphi_{B1}$? Причём потенциалы φ_{A1} и φ_{B1} будут зависеть от расположения относительно векторов электрического и магнитного полей ЭМИ проводов и кабелей, соединённых с выводами A_1 и B_1 , наличия и вида их экранирования, качества заземления и даже от конфигурации электрической схемы испытываемого изделия. То есть в общем случае φ_{A1} и φ_{B1} будут различны, а $U_{AB} \neq 0$.

Регламентирующая документация не содержит каких-либо инструкций, касающихся выбора включений для определения максимально допустимой амплитуды ОИН. Предполагается, что в процессе испытаний должны быть рассмотрены все возможные варианты. В этом случае для проведения испытаний при каждом значении длительности ОИН требуется как минимум $\frac{n!}{(n-2)!}$ образцов, где n – общее число выводов изделия. В общих технических условиях для микросхем [8] и микросборок [9] число образцов для испытаний установлено и привязано к степени интеграции. Для испытаний на ИЭП при степени интеграции ИС1 положено испытывать 20 образцов, а при ИС8 – всего 4, при этом каким именно образом нужно обеспечить достоверность и информативность испытаний, не указано.

Уменьшить число включений при испытаниях можно на основании анализа особенностей конструктивно-технологического исполнения, типовой схемы включения изделия и реальных условий его применения в радиоэлектронной аппаратуре. Ниже приводятся некоторые принципы, на основании которых может быть сокращён объём испытаний.

1. Если возможно физически обосновать, что изделие в данном включении способно выдержать ОИН большей амплитуды

ды, чем в другом включении, в таком более стойком включении изделие может не подвергаться испытательному воздействию.

2. При наличии у изделия выводов, не чувствительных к импульсным электрическим перегрузкам амплитудой до 5 кВ, на включения с этими выводами испытательное воздействие не подаётся, например, в случае, когда входом изделия является первичная обмотка трансформатора, пробивное напряжение между обмотками которого превышает 5 кВ.

3. Изделия, выводы которых (например, вход и/или выход) выполнены в виде волновода, не испытываются во включениях, связанных с этими выводами.

4. В случае, если ранее испытательной лабораторией были получены данные по ИЭП конструктивно-технологических аналогов испытуемых изделий, могут быть использованы полученные ранее сведения об ИЭП в наиболее чувствительных к ОИН включениях, ориентировочных границах области отказа в этих включениях (с обоснованием возможности такого использования результатов и ссылкой на протоколы предыдущих испытаний).

5. Данные об ИЭП сложносоставных изделий (модулей, микросборок и т. п.) могут быть получены при испытании отдельных компонентов, входящих в их состав.

6. При наличии включений, механизм воздействия ОИН и вид отказа в которых не будет зависеть от полярности ОИН, изделие может быть испытано при одной полярности.

7. При наличии в составе изделия однотипных каскадов проводятся испытания только одного из каскадов, при этом полагается, что при испытании остальных каскадов будет получен аналогичный результат.

8. Сведения о реальных условиях применения изделия используются для определения критичных и некритичных включений. Например, если в реальной схеме при применении изделия ОИН не может быть наведён на данную пару выводов, связанное с ней включение не рассматривается для испытаний.

Решение использовать понятие группы выводов в виде «X – GND» может быть компромиссом (с нашей точки зрения, необоснованным), уменьшающим количество рассматриваемых во время испытания включений, и соответственно, уменьшающим требуемое количество образцов изделий. Однако даже в этом случае проблема нехватки образцов и выбора включений не может быть решена полностью.

Будем обобщённо считать выводами питания (С) выводы, к которым в типовой схеме присоединяются источники постоянного напряжения, питающие один или несколько каскадов испытываемого изделия. Входами (А) назовём любые выводы изделия, на которые в типовой схеме включения подаётся сигнал и которые не являются выводами питания, – непосредственные входы изделий (на частоте и по постоянному напряжению), выводы управления, выводы коррекции и подстройки и т. д. Выходами (В) будем считать выводы, с которых сигнал снимается, – непосредственные выходы, различные выводы контроля состояния изделий и прочее.

Тогда включения вида « $A_i - GND$ » относятся к группе входов, « $B_i - GND$ » – к группе выходов, « $C_i - GND$ » – к группе питания. С нашей точки зрения, имеют право на существование включения других видов. Назовём включения вида « $A_i - A_j$ » группой вход-вход, включения вида « $B_i - B_j$ » группой выход-выход, а включения вида

Рис. 5

Количество критических включений по группам выводов

« $A_i - B_j$ » – вход-выход. Здесь i и j – порядковые номера выводов. На рис. 5 представлено распределение критических включений по группам выводов для всех испытанных изделий (при $t_{оин} = 1$ мкс). Включения вида « $A_i - C_j$ », « $B_i - C_j$ » и « $C_i - C_j$ » не приведены, так как по ним практически отсутствуют данные (изделия не испытывались в данных включениях в связи с малым количеством образцов). Включения, для которых затруднительно однозначно установить группу или же группа зависит от способа включения (включения, связанные с выводами полупроводниковых диодов, биполярных транзисторов и т. д.), выведены в отдельную группу (без группы).

Из рис. 5 видно, что включения, отличные от вида « $X - GND$ », являются определяющими ИЭП изделий в значительном проценте случаев. Превалирование отказов по группам входы, выходы и питание в некоторой мере можно объяснить тем, что в большей части последних работ именно эти группы были согласованы в ПМИ с представителем заказчика и иные группы

выводов для испытания не рассматривались, то есть получившееся распределение в некоторой мере искусственное.

Для всех испытанных изделий было посчитано количество включений (количество требуемых образцов для испытаний) с учётом возможности их сокращения посредством теоретического рассуждения. Произведено сравнение этой величины с реальным числом предоставленных образцов (рис. 6).

При этом было выделено пять случаев. В первом, наиболее благоприятном случае, образцов хватило для прямого перебора всех включений при всех значениях длительности ОИН. При этом образцов было достаточно как для сбора статистики отказов (не менее двух образцов на каждое включение), так и для проведения дополнительных исследований с целью установления физического механизма отказа.

Во втором случае образцов хватило для прямого перебора всех возможных включений, при этом был предоставлен значительный запас образцов для проведения

Рис. 6

Сравнение количества образцов изделий, предоставленных для испытаний, с требуемым количеством

предварительных испытаний с целью установления ориентировочной границы области отказа, а также для сбора статистики отказов в некоторых включениях, определяющих ИЭП изделия.

Третья группа – предоставлено ровно то количество образцов, которое было необходимо для перебора всех включений, а также два дополнительных образца для испытания изделия во включении, определяющем ИЭП изделия при двух других значениях $t_{оин}$.

К четвёртой, наиболее многочисленной группе, отнесены работы, в которых переданных образцов оказалось недостаточно для прямого перебора необходимых включений, но при этом число образцов было не менее трёх. Для проведения испытаний использовалась скорректированная методика, не предполагающая прямого перебора включений с доведением изделия до отказа в каждом из них. В рамках этой методики первое изделие используется для определения включения, наиболее чувствительного к воздействию ОИН, – задаётся начальная

(минимальная) амплитуда импульса и производятся последовательные испытательные воздействия (ИВ) на выводы изделия в каждом из выбранных включений. Измерение параметров-критериев годности изделия производится до и после каждого ИВ. После того, как при заданной амплитуде импульса подвергнутся воздействию все выбранные включения испытуемого изделия, амплитуда ОИН генератора повышается и последовательное ИВ на выводы изделия повторяется. Это происходит до тех пор, пока в одном из включений не происходит отказ изделия. Это включение объявляется определяющим ИЭП изделия и в нём обычным способом испытываются два других образца при двух других значениях $t_{оин}$.

Данная методика не позволяет выявить все чувствительные к данному виду воздействия включения, но зато позволяет на ограниченной выборке гарантировать определённую величину стойкости изделия в целом. Также следует отметить, что при таком подходе ИВ, подаваемые на одно

включение, могут оказывать влияние на величину максимально допустимой амплитуды, которая будет получена для другого включения. Это может происходить вследствие накопления скрытых повреждений. Однако, во-первых, скрытые повреждения могут привести к заниженному результату испытаний, но не к завышенному (консервативная оценка), то есть по результатам испытаний можно будет гарантировать, что воздействие ОИН с полученной амплитудой $U_{\text{ОИН}}$ не выведет изделие из строя. Во-вторых, скрытые повреждения возникают и при обычной методике испытаний, проявляясь в виде так называемого аддитивного эффекта, который также может влиять на результат испытания консервативным образом.

И к последней группе отнесены работы, в которых число образцов изделий для испытаний было меньше трёх, то есть получение зависимости $U_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$ в предписываемом стандартами диапазоне оказалось невозможно. В первую очередь это многокомпонентные изделия (модули), сложные в производстве и обладающие высокой стоимостью изготовления.

Интересно сравнить количество включений (и соответственно, требуемое количество образцов) для испытаний (M) с количеством внешних выводов изделия (N) напрямую (рис. 7). Видно, что в общем случае $M = 2 \cdot N$ (граница отмечена чёрной прерывистой линией), хотя в части случаев требуется меньше образцов. Требования к количеству образцов нормативная

Рис. 7

Сравнение количества внешних выводов изделия с количеством включений, в которых необходимо испытать изделие при условии, что посчитаны только включения по группам выводов входы, выходы и питание при единственной длительности ОИН

документация устанавливает только для изделий, относящихся к классификационным группам микросборки и микросхемы. Для изделий со степенью интеграции ИС1 и ИС2 эта величина составляет 20 штук (синяя прерывистая линия), а для ИС3 и ИС4 – 12 штук (красная прерывистая линия) [8, 9]. Если считать, что для испытания изделия в одном включении требуется один образец (испытания разрушающие), то для всех точек, лежащих выше соответствующей прямой, образцов для прямого перебора включений не хватит.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в настоящее время методика испытаний, предписываемая нормативными документами, не соответствует реальной производственной ситуации. Способ определения количества включений и требуемого количества образцов никак не регламентируется. В тех случаях, когда число образцов для испытаний указано в явном виде, способ обеспечения достоверности и информативности испытаний не устанавливается.

Влияние разброса параметров-критериев годности изделий на показатели ИЭП

С точки зрения общей физики технологический разброс электрофизических параметров изделия в выборке должен влиять на разброс величин, характеризующих ИЭП изделий этой выборки при условии, что все изделия были испытаны в одном включении и при одной длительности ОИН.

В большинстве случаев при испытаниях нет возможности в одной работе испытывать несколько изделий в одном включении, осуществляя сбор статистики отказов (рис. 6). Однако в некоторых работах такие

результаты были получены. Сравним относительные величины статистического разброса измерявшихся параметров-критериев годности и разброса величины $U_{\text{ОИН}}$ для этих случаев. Для каждого измерявшегося параметра-критерия годности вычислялась величина Δ_X , характеризующая статистический разброс относительно средней величины значения параметра:

$$\Delta_X = \frac{\sigma \cdot t_{\alpha, n}}{\bar{X}} \cdot 100\%,$$

где $\bar{X}$ – среднее значение измерявшегося параметра-критерия годности X для всех изделий, испытанных в данном включении (не менее двух); σ – среднеквадратичное отклонение; $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для числа изделий n , испытанных в данном включении.

Аналогичная величина вычисляется для максимально допустимой амплитуды ОИН ($U_{\text{ОИН}}$) и полной энергии импульса, предшествующего отказу ($E_{\text{ОИН}}$):

$$\Delta_U = \frac{\sigma \cdot t_{\alpha, n}}{\overline{U_{\text{ОИН}}}} \cdot 100\%;$$

$$\Delta_E = \frac{\sigma \cdot t_{\alpha, n}}{\overline{E_{\text{ОИН}}}} \cdot 100\%,$$

где $\overline{U_{\text{ОИН}}}$ и $\overline{E_{\text{ОИН}}}$ – средние значения величин $U_{\text{ОИН}}$ и $E_{\text{ОИН}}$ для каждого включения.

На рис. 8 представлены зависимости $\Delta_U(\Delta_X)$ и $\Delta_E(\Delta_X)$. Видно, что сделать вывод о каком-либо характере влияния технологического разброса параметров на уровень ИЭП затруднительно – малому разбросу может соответствовать значительное расхождение в результатах испытаний, и наоборот, при значительном разбросе параметров определённая в одном и том же включении максимально допустимая амплитуда ОИН может быть практически одинаковой.

Рис. 8
Зависимости $\Delta_U(\Delta_x)$ и $\Delta_E(\Delta_x)$

Этому может быть несколько причин. Во-первых, возможен выбор параметров-критериев, при котором сами параметры обеспечивают функциональный контроль, но физически мало связаны с процессами электрического пробоя. Во-вторых, электрические параметры-критерии годности изделий могут быть связаны с электрофизическими параметрами полупроводниковых структур не напрямую, а посредством нелинейных зависимостей. В-третьих, для обеспечения требуемого диапазона значений параметра могут использоваться подстроечные элементы, обеспечивающие соответствующий режим работы изделия. Это характерно для СВЧ модулей и микросборок.

Анализ причин отказов

В [4] целью испытаний указывается определение фактических показателей ИЭП при воздействии ОИН от стандартизованного генератора «с учётом доминирующих видов и механизмов отказа». Однако напрямую нормативная документация не предписывает выявлять по результатам

испытаний конкретный механизм. Тем не менее любые рассуждения о природе импульсной электрической прочности невозможны без понимания сути физических процессов, происходящих в изделии при испытательном воздействии.

При проведении испытаний можно выделить основные методы определения механизма отказа:

- анализ принципиальной электрической схемы изделия, топологической схемы кристалла, чертежа слоевого среза активных структур;
- наблюдение с помощью характеристографа вольт-амперных характеристик пар выводов изделий до и после воздействия;
- анализ эпюр отклика изделия (осциллограмм импульсов тока и напряжения) при подаче ОИН;
- визуальный осмотр кристалла с помощью микроскопа;
- анализ изменения параметров-критериев годности и электрических режимов функционирования изделия вследствие испытательного воздействия.

В отдельных случаях для определения физической сути отказа может применяться широкий спектр лабораторных методов исследования, в частности:

- различные методы измерения электрических параметров изделия, в том числе с использованием зондовой установки;
- исследование изменения электрических параметров изделия в диапазоне температур;
- исследование поведения образцов при радиационном воздействии, в первую очередь при воздействии гамма-квантов, альфа-частиц или нейтронов.

Возникавшие и обнаруженные во время испытаний механизмы отказов можно разделить на несколько категорий.

1. Эффекты, связанные с выделяющейся в отдельных областях исследуемого изделия мощностью при воздействии ОИН. Эти эффекты характеризуются большой величиной импульсного тока, и соответственно, импульсной мощности, вследствие чего происходит проплавление и закорачивание областей полупроводниковой структуры. Такие эффекты можно разделить на несколько групп.

а) Обрыв траверсы между контактными площадками кристалла и корпуса. Отказ определяется визуально с помощью микроскопа.

б) Перегорание дорожки металлизации на кристалле. В отличие от прочих эффектов, связанных с разрушением металлических элементов на кристалле (например, вспучивание и образование каверн на металлизации над областью, в которой произошло тепловыделение), перегорание дорожки характеризуется обрывом, наблюдаемым в соответствующей цепи с помощью характериографа. Чаще всего перегоревшую дорожку можно обнаружить

визуально. Следует отметить, что при зондовом измерении обрыв может быть связан и с образованием каверны под зондом. В этом случае возможно восстановить электрический контакт повторной установкой зонда на неповреждённую часть контактной площадки.

в) Вторичный тепловой пробой (ВТП) *p-n* перехода. Если из анализа электрической схемы видно, что воздействие ОИН приходится на *p-n* переход, смещаемый импульсным напряжением в обратном направлении, вторичный тепловой пробой определяется по характерной «ступеньке» (рис. 9а), возникающей в момент перехода лавинного или туннельного пробоя в тепловой, что приводит к необратимому разрушению *p-n* перехода. Следует отметить, что «ступенька» может возникать в различных случаях и не является надёжным критерием развития именно теплового пробоя.

г) Тепловой перегрев на границе металл–полупроводник, при котором в локальной области достигается температура плавления эвтектики. В этом случае происходят процессы, которые могут привести к возникновению отказов: образованию расплава на границе металл–полупроводник, ускоренной диффузии примесей вследствие высокого коэффициента диффузии в расплаве, перемещению примесей под действием электрического поля. Так как в процессе испытания амплитуда ОИН постепенно увеличивается с некоторым шагом, импульсная мощность также нарастает постепенно до тех пор, пока выделившейся за время импульса энергии не станет достаточно для возникновения отказа. Поэтому, в отличие от предыдущих эффектов, в данном случае возможен сильный дрейф электрических параметров-критериев годности

Рис. 9

Иллюстрация формы импульсов тока и напряжения при вторичном тепловом пробое обратносмещённого эмиттерного р-п перехода биполярного транзистора (а) и резонансе в колебательном контуре выходного каскада СВЧ-модуля генератора, управляемого напряжением (б)

при воздействии ОИН предпороговой амплитуды. Характерным видом отказа является параметрический, хотя возможен и катастрофический отказ, при котором тем не менее наблюдается изменение параметров в пределах норм ТУ по мере приближения к амплитуде отказа.

д) При испытаниях СВЧ изделий часто можно наблюдать генерацию в паразитных (или даже не в паразитных) LC-контурх при воздействии ОИН (рис. 9б). В этом случае можно говорить о резонансных эффектах, то есть подобный вид осциллограммы будет наблюдаться, когда частота генератора ОИН будет равна частоте собственных колебаний контура. А это означает, что возникновение резонанса зависит от электрической схемы построения генератора ОИН.

е) Дважды с помощью характериографа наблюдалось возникновение паразитной многослойной структуры с тиристорной вольт-амперной характеристикой. При этом активация (открывание) происходила

при подаче между анодом и катодом этой структуры низковольтного сигнала (не более 5 В) с частотой 200 Гц, то есть величина dU/dt составляла не более $4 \cdot 10^3$ В/с. При подаче ОИН длительностью более 1 мкс в данном включении также наблюдалось резкое увеличение импульсного тока после превышения амплитудой ОИН порога в 5 В. В конечном итоге происходил вторичный тепловой пробой и наблюдался катастрофический отказ.

2. Программный сбой многофункционального модуля. В общем случае, исходя из методики испытаний, программные сбои при воздействии ОИН не фиксируются в качестве отказа изделия, так как измерение параметров-критериев годности производится после испытательного воздействия и требует отдельной процедуры задания электрического режима посредством программатора. Перезагрузка устройства устраняет возникший сбой и изделие работает в штатном режиме, параметры-кrite-

рии годности измеряются в пределах норм ТУ и испытания продолжаются. Однако в том случае, когда программируемое изделие не нуждается в повторном программном задании режимов (хранит программу в своей памяти), возможно зафиксировать параметрический отказ изделия. Если подобный сбой не приведёт к какому-нибудь катастрофическому вторичному эффекту (например, выгорание каскада под действием напряжения питания, заданного из-за сбоя не в штатном режиме), после перепрограммирования работоспособность изделия восстановится.

3. Пробой диэлектрика. В первую очередь идентифицируется при анализе принципиальной электрической схемы, когда видно, что ОИН воздействует на ёмкостный элемент или затвор транзистора с изолированным затвором. На осциллограмме импульса напряжения также может наблюдаться ступенька. Однако ток утечки через диэлектрик до момента пробоя очень маленький и в отличие от лавинного тока

$p-n$ перехода в большинстве случаев не может быть зафиксирован осциллографом.

4. При испытании полупроводниковых диодов и полевых транзисторов с изолированным затвором при воздействии ОИН может возникнуть инжекция и встраивание носителей заряда в слой окисла. Это может привести к параметрическому отказу таких параметров, как обратный ток диода, ток утечки через затвор полевого транзистора, величина его порогового напряжения. Данный вид параметрического отказа может быть обратимым, однако время рассасывания встроенного заряда может составлять единицы и даже десятки минут. С формальной точки зрения при измерении параметров-критериев годности после воздействия ОИН необходимо констатировать параметрический отказ. Определить данный механизм отказа можно повторным измерением параметров-критериев годности спустя некоторое время после воздействия. Чаще всего дрейф вольт-амперной характеристики, связанный с рассасыва-

Рис. 10
Наблюдавшиеся механизмы отказов

нием заряда, виден непосредственно во время измерения на характериографе.

Однако в большинстве случаев анализ причины отказа не проводился или был невозможен.

Наиболее распространённые виды отказа из обнаруженных – вторичный тепловой пробой $p-n$ перехода и тепловой перегрев при протекании большого тока через низкоомную нагрузку (рис. 10). Следует отметить, что приведённое на диаграмме распределение отказов по механизмам может количественно сильно отличаться от реального, так как в 73,9 % случаев механизм установлен не был.

В процессе испытаний механизм отказа зачастую не может быть выявлен, однако, как правило, указывается тип отказа – отмечается выход параметров-критериев годности за нормы ТУ (параметрический отказ) или фиксируется полное разруше-

ние образца, при котором изделие не может функционировать (катастрофический отказ). Из статистики типов отказа сложно выявить какие-либо закономерности, однако можно отметить, что импульсы более короткой длительности чаще приводят к возникновению параметрического отказа, чем импульсы большей длительности.

Характерные значения величины максимально-допустимой амплитуды ОИН

На рис. 11 приведено распределение величины $U_{\text{ОИН}}$ для всех испытанных включений всех изделий по частоте возникновения отказа ($U_{\text{ОИН}}$ округлялась до ближайшего целого числа по правилам округления). Из рисунка видно, что при величине выходного импеданса генератора ОИН $R_{\Gamma} = 2,5 \text{ Ом}$ 80 % значений максимально допустимой амплитуды ОИН, опреде-

Рис. 11
Распределение включений по уровню отказа

лённой по результатам испытаний, лежит в диапазоне между 5 и 70 В для $t_{\text{ОИН}} = 1$ мкс, между 3 и 55 В для $t_{\text{ОИН}} = 10$ мкс и между 40 и 250 В для $t_{\text{ОИН}} = 0,1$ мкс.

Диапазон характерных величин $U_{\text{ОИН}}$, полученных с помощью генератора с $R_{\Gamma} = 2,5$ Ом, лежит в области более низких значений по сравнению с результатами, приводимыми в работах [6, 7] и полученными с помощью генератора с $R_{\Gamma} = 50$ Ом. Это соответствует результатам, полученным в работе [10].

Исходя из данных, приведённых на рис. 11, можно отметить, что наблюдалось как минимум 14 включений, в которых величина максимально допустимой амплитуды ОИН оказалась менее 5 В. Так как в соответствии с нормативной документацией генератор ОИН должен обеспечивать возможность подавать на выводы изделия импульсы с амплитудой от 5 В, для данных включений установление характерной величины $U_{\text{ОИН}}$ с помощью такого генерато-

ра было бы невозможно. Эти 14 включений принадлежат десяти различным изделиям, которые испытывались в разных работах независимо друг от друга.

Также следует отметить, что в восемнадцати случаях величина $U_{\text{ОИН}}$, характеризующая ИЭП изделия, оказывалась меньше напряжения питания этого изделия в типовой схеме включения (отказ происходил по группе выводов, не связанной с питанием). Таким образом, выбор начальной амплитуды подаваемого ОИН по величине напряжения питания изделия не во всех случаях может быть оправдан.

Целью проведения испытаний на ИЭП является установление величины $U_{\text{ОИН}}$ в диапазоне длительностей ОИН [1]. На рис. 12 приведены типичные зависимости $U_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$, полученные в ходе испытаний. Можно отметить, что одиночным импульсам меньшей длительности соответствуют большие величины максимально допустимой амплитуды.

Рис. 12

Зависимости $U_{\text{ОИН}}$ от длительности прямоугольного импульса, полученные с помощью генератора ОИН с выходным импедансом 2,5 Ом

Обобщение результатов испытаний в зависимости от технологии изготовления изделий

По результатам испытания большого объёма ЭКБ можно сделать вывод, что максимально допустимая величина амплитуды ОИН в целом не зависит от технологии изготовления (рис. 13). Видимо, это связано с тем, что величина напряжения пробоя p - n перехода больше зависит от соотношения концентраций легирующей примеси и характерных размеров соответствующих областей p - n перехода.

Некоторые методические аспекты испытаний на ИЭП

Амплитуда ОИН при испытаниях постепенно повышается до выхода изделия за нормы ТУ. Шаг такого повышения в критической области отказа изделия по нормативным документам [2, 3] не должен превышать 20 % от амплитуды последнего воздействовавшего импульса, при этом рекомендуемое значение – менее 10 % [4]. Таким образом, заложенная в норматив-

ной документации идеология предполагает уменьшение коэффициента приращения амплитуды для достижения большей точности при определении максимально допустимого значения амплитуды ОИН. Коэффициент приращения амплитуды определим следующим образом:

$$k_{\text{пр}} = \frac{U_{n+1} - U_n}{U_n} \cdot 100\%,$$

где n – порядковый номер воздействия в данном включении при испытаниях.

Проблема выбора шага импульса подробно рассматривалась в [11]. На рис. 14 приведено полученное по всем испытанным образцам распределение округлённой по правилам округления величины $k_{\text{пр}}$ между импульсом, предшествующим отказу, и импульсом, в результате которого отказ произошёл.

Несмотря на наличие аргументов в пользу повышения величины $k_{\text{пр}}$, в ходе проведённых испытаний мы руководствовались требованиями нормативной документации, выбирая маленький шаг приращения. Это, с одной стороны, увеличивает ошибку

Рис. 13

Уровни отказов в критичных включениях, сгруппированные по технологиям исполнения изделий; результаты приведены для длительности ОИН 1 мкс

Рис. 14

Распределение величины $k_{пр}$, получившееся в ходе проведённых испытаний большого количества образцов

определения величины $U_{Oин}$, связанную с тем, что импульсная перегрузка подаётся на изделие многократно, но, с другой стороны, уменьшает методическую ошибку, связанную с величиной шага при определении $U_{Oин}$ ступенчатым методом.

Увеличение амплитуды импульса с $k_{пр} > 20 \%$ (рис. 14) связано с тем, что при предварительном определении границы критической области отказа используется грубая оценка. При испытаниях изделий при $U_{Oин} < 5$ В изменение $U_{Oин}$ с шагом 1 В также означает величину $k_{пр} > 20 \%$.

Ещё одной методической особенностью испытаний является требование нормативной документации проводить испытания в активном электрическом режиме изделия. При этом существует оговорка, согласно которой напряжение питания допускается не подавать в случае, если показатели величины $U_{Oин}$ намного больше, чем напряжение питания. Поэтому в большей части включений изделия испытывались либо только в электрическом режиме, либо только без него. Однако в ряде случаев одни и те же включения были испытаны как с по-

дачей напряжения на выводы питания, так и без подачи.

На рис. 15 приведено сравнение результатов испытаний различных ИЭТ в активном электрическом режиме и без него. В верхней части чёрными столбцами (правая ось ординат) показана определённая величина $U_{Oин}$, полученная при испытаниях без режима, а в нижней части – с режимом. Оранжевыми столбцами (левая ось ординат) показана разница в процентах между этими величинами, отнесённая к наименьшей из них (ΔU).

Таким образом, можно отметить три группы включений. В первой из них (красная область) при отсутствии электрического режима ИЭП оказывалась существенно ниже, чем с заданным электрическим режимом. Во второй (зелёная область) – наоборот. А в третьей группе (синяя область) разница между полученными значениями максимально допустимой амплитуды составляла не более 20 %, то есть можно считать, что в этих включениях наличие или отсутствие электрического режима не играет роли.

Рис. 15

Сравнение величины U_{OIN} при испытаниях изделий в заданном электрическом режиме и без него. Чёрными столбцами показаны уровни U_{OIN} : сверху – без режима, снизу – с режимом.

Оранжевыми столбцами показана величина ΔU . Таким образом, в красной области сгруппированы случаи, когда ИЭП изделия без электрического режима существенно ниже, чем с режимом, в зелёной области – наоборот, а в синей области – влияние электрического режима отсутствует.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие электрического режима не всегда означает более низкие показатели ИЭП, что противоречит исходной идеологии регламентирующей документации.

Большая часть изделий, ИЭП которых без напряжения питания меньше, чем с ним, представляет собой схемы на основе полевых транзисторов. В работе [12] проводилось исследование влияния электрического режима на показатели ИЭП полевых транзисторов. Были рассмотрены несколько типов изделий. В таблице для всех рассматриваемых транзисторов пе-

речислены включения, в которых изделия были испытаны, а также показатели ИЭП для данных включений – максимально допустимое значение амплитуды ОИН (U_{OIN}) и максимальное значение амплитуды тока в таком импульсе (I_{OIN}).

При подаче испытательного воздействия между затвором и истоком транзистора № 1 (включения 1, 2, 4) катастрофическая деградация подзатворного окисла наступает после превышения амплитудой ОИН порогового значения пробоя этого окисла электрическим полем импульса. При этом полярность ОИН не играет никакой роли,

Таблица

Результаты испытаний транзисторов № 1 и № 2

№	Включение	Электрический режим	$U_{\text{ОИН}}, \text{В}$	$I_{\text{ОИН}}, \text{А}$
кремниевый полевой n -канальный МОП транзистор со встроенным каналом (№ 1)				
1	затвор « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 30 \text{ В}$	88	0,00
2	затвор « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	без режима	84	0,00
3	затвор « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 30 \text{ В}$	22	0,00
4	затвор « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	без режима	90	0,00
5	сток « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 30 \text{ В}$	118	0,00
6	сток « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 0 \text{ В}$	135	0,00
7	сток « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	без режима	46	9,2
8	сток « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 0 \text{ В}$	122	0,00
9	сток « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	без режима	28	15,4
GaN полевой n -канальный транзистор с барьером Шоттки (№ 2)				
10	затвор « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	без режима	44	0,01
11	затвор « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	без режима	17	1,0
12	сток « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -2,5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 0 \text{ В}$	39	0,9
13	сток « $\rightarrow$ » $\div$ исток « $\leftarrow$ »	без режима	10	1,0
14	сток « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	$U_{\text{ЗИ}} = -2,5 \text{ В}, U_{\text{СИ}} = 0 \text{ В}$	3,5	0,3
15	сток « $\leftarrow$ » $\div$ исток « $\rightarrow$ »	без режима	19	0,8

а постоянное смещение затвор-исток незначительно влияет на максимально допустимую амплитуду ОИН, складываясь с ней в соответствии с полярностью подаваемого импульса. Если же между стоком и истоком приложено рабочее напряжение ($U_{\text{СИ}} = 30 \text{ В}$), а испытательное воздействие подаётся таким образом, что ОИН открывает закрытый постоянным смещением на затворе канал (включение 3), за время импульса происходит деградация транзистора по механизму теплового пробоя вследствие протекания большого тока в области канала от источника питания в цепи стока. Таким образом, транзистор выходит из строя не за счёт энергии импульса, а за счёт собственного источника питания вследствие воздействия ОИН. ИЭП в таком включении гораздо ниже, чем в любом другом включении по затвору (22 В против 84, 88 и 90).

Не менее важным является наличие электрического режима при подаче ОИН между стоком и истоком. Приложенное постоянное смещение сток-исток ($U_{\text{СИ}}$) при закрытом канале с учётом знака добавляется к амплитуде ОИН (включения 5, 6, 8). При этом ток через канал не превышает утечки до тех пор, пока не произойдёт пробой обратносмещённого p - n перехода и транзистор не выйдет из строя.

Состояние канала (открытое/закрытое) оказывает различное влияние на стойкость изделия к ОИН в зависимости от концентраций легирующих примесей, технологии и топологии. В самом простом случае через открытый канал (включения 7, 9) протекает большой импульсный ток и транзистор выходит из строя по механизму теплового пробоя. Разница показателей ИЭП в этих двух включениях обусловлена несимметричностью стока и истока. В другом

случае (транзистор № 2) закрытый канал может обладать меньшей стойкостью к воздействию ОИН, чем открытый (включения 14, 15). Это может быть связано с тем, что электрическим полем импульса при определенном уровне напряжения происходит локальный пробой в некоторой области p - n перехода между n -каналом и обеднённой областью барьера Шоттки под затвором и вся энергия от протекающего тока выделяется в небольшом объёме, в то время как при протекании тока через открытый канал тепловыделение происходит по всей площади его сечения и критический разогрев (критическая плотность тока) возникает при больших значениях амплитуды ОИН.

Не всегда ИЭП изделий на полевых транзисторах в пассивном электрическом режиме меньше, чем в активном, но возможность этого необходимо учитывать при испытаниях.

Заключение

- Изделие электронной техники может иметь несколько включений, чувствительных к воздействию ОИН. Методика испытаний, соответствующая нормативной документации, не позволяет выявить их все во всех практических случаях.

- Разделение включений по группам выводов входы, выходы и питание помогает в некоторой мере сократить объём испытаний, однако обоснованность подобного подхода вызывает сомнения.

- В значительной части практических случаев предоставляемого количества образцов для испытаний оказывается недостаточно для проведения испытаний в строгом соответствии с идеологией, заложенной в нормативную документацию.

- Необходимы корректировка нормативных документов и оптимизация ме-

тодики испытаний в части требований к порядку испытаний и количеству испытываемых изделий.

- Из разброса параметров-критериев годности изделий по величине в общем случае нельзя сделать однозначный вывод о разбросе показателей ИЭП.

- При проведении испытаний изделий на воздействие ОИН по существующей нормативной документации конкретный физический механизм отказа в большинстве случаев не может быть установлен.

- Показатели ИЭП изделий могут лежать за пределами установленного нормативной документацией диапазона (от 5 В до 5 кВ).

- Технология изготовления изделий в целом не влияет на показатели ИЭП.

- В отсутствие электрического режима ИЭП изделия может быть существенно ниже, чем с заданным электрическим режимом. Особенно это характерно для схем на полевых транзисторах.

Литература

1. ГОСТ РВ 20.57 415-98.
2. **ГОСТ 5962-004.10-2012.** Изделия электронной техники. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность : изд.офиц. : государственный военный стандарт: введен 2013-07-01 / Федер. агентство по техн. регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2013. – 22 с.
3. ОСТ 11 073.013-2008.
4. **РД В 319.03.30-98.** Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Испытания на импульсную электрическую прочность.
5. ГОСТ РВ 20.39.411-97.
6. Скоробогатов, П.К. Импульсная электрическая прочность изделий ЭКБ. / П.К. Скоробогатов.

- богатов // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2015», 2015, Лыткарино. – М.: НИЯУ «МИФИ». – 2015. – 252 с.
7. Шемонаев, А.Н. Экспериментальное исследование показателей импульсной электрической прочности в активном и пассивном режимах работы КМОП интегральных микросхем / А. Н. Шемонаев, К. А. Епифанцев, П. К. Скоробогатов // Тезисы докладов 21-й Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость-2018», научно-технический сборник, 5-6 июня 2018 г. – г. Лыткарино. – 139 с.
 8. **ОСТ В 11 0998-99.** Микросхемы интегральные. Общие технические условия: изд. офиц.: утв. 2004-01-01. – 23 с.
 9. **ОСТ В 11 1009-2001.** Многокристалльные модули, микросборки. Общие технические условия. – 139 с.
 10. Ванин, В.И. Зависимость импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов от выходного сопротивления генераторов одиночных импульсов напряжения / В.И. Ванин // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2011», 07-08 июня 2011, Лыткарино. – М.: НИЯУ «МИФИ». – 2011. – Вып. 14. – С. 95.
 11. Аврасин, Э.Т. Анализ интерпретации результатов испытаний изделий полупроводниковой электроники на импульсную электрическую прочность / Э. Т. Аврасин, Д.О. Ваничкин, Э.Н. Вологдин, И.Я. Гантман // Материалы XV научно-технической конференции «Пульсар – 2017», Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 27-29 сентября 2017, Москва – Дубна. – М.: АО «НПП «Пульсар». – С.236.
 12. Ваничкин, Д.О. Влияние электрического режима на импульсную электрическую прочность полевых транзисторов / Д.О. Ваничкин, Э.Н. Вологдин, И.Я. Гантман // Материалы XV научно-технической конференции, «Пульсар – 2017», Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА, 27-29 сентября 2017, Москва – Дубна. – М.: АО «НПП «Пульсар». – С. 240.

References

1. GOST RV 20.57 415-98.
2. GOST 5962-004.10-2012. Izdeliya elektronnoy tekhniki. Mikroskhemy integral'nyye. Metody ispytaniy. Ispytaniya na stoykost' k vozdeystviyu spetsial'nykh faktorov i impul'snuyu elektricheskuyu prochnost' [Electronic products. Integrated circuits. Testing methods. Special factors failure testing and pulsed mode dielectric breakdown testing], Moscow, 2013.
3. OST 11 073.013-2008.
4. RD V 319.03.30-98. Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskoye voyennogo naznacheniya. Ispytaniya na impul'snuyu elektricheskuyu prochnost' [Electronic, quantum electronic and military-grade electrical products. Pulsed mode dielectric breakdown testing].
5. GOST RV 20.39.411-97
6. Skorobogatov P. K. Impul'snaya elektricheskaya prochnost' izdeliy EKB [Pulsed dielectric strength of electronic devices]. Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem, "Stoykost'-2015", Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2015, 252 p.
7. Shemonaev A. N., Epifantsev K. A., Skorobogatov P. K. Eksperimental'noye issledovaniye pokazateley impul'snoy elektricheskoy prochnosti v aktivnom i passivnom rezhimakh raboty KMOП integral'nykh mikroskhem [Experimental study of the pulsed mode dielectric strength in CMOS integrated circuits during active and passive operation] Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem, "Stoykost'-2018", Lytkarino, 2018, 139 p.
8. OST V 11 0998-99. Mikroskhemy integral'nyye. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya [Integrated circuits. General specifications]. Moscow, 1999.

9. OST V 11 1009-2001. Mnogokristal'nyye moduli, mikrosborki. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Multi-chip modules, microassemblies. General specifications]. Moscow, 2001.
10. Vanin V. I. Zavisimost' impul'snoy elektricheskoy prochnosti poluprovodnikovyykh priborov ot vykhodnogo soprotivleniya generatorov odinochnyykh impul'sov napryazheniya [Dependence of the pulsed dielectric strength of semiconductor devices on the output resistance of single voltage pulse generators]. Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem, "Stoykost'-2011", Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2011, iss. 14, pp 95.
11. Avrasin E. T., Vanichkin D. O., Vologdin E. N., Gantman I. Ya. Analiz interpretatsii rezul'tatov ispytaniy izdeliy poluprovodnikovoy elektroniki na impul'snuyu elektricheskuyu prochnost' [Analysis of the interpretation of the semiconductor devices pulsed dielectric breakdown testing results]. Materialy XV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Pulsar – 2017», Tverdotel'naya elektronika. Slozhnyye funktsional'nyye bloki REA, Moscow, S&PE Pulsar JSC, 2017, pp. 236.
12. Vanichkin D. O., Vologdin E. N., Gantman I. Ya. Vliyaniye elektricheskogo rezhima na impul'snuyu elektricheskuyu prochnost' polevykh tranzistorov [Influence of the electric mode on the pulsed dielectric strength of field-effect transistors]. Materialy XV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Pulsar – 2017», Tverdotel'naya elektronika. Slozhnyye funktsional'nyye bloki REA, Moscow, S&PE Pulsar JSC, 2017, pp.240.