АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ИМПУЛЬСНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ В СООТВЕТСТВИИ С РЕГЛАМЕНТИРУЮЩЕЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ

Э. Т. Аврасин, Д. О. Ваничкин, Э. Н. Вологдин, И. Я. Гантман, В. Ф. Синкевич

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

В статье рассмотрены методические основы испытаний изделий полупроводниковой электроники на импульсную электрическую прочность. Проанализированы требования регламентирующей документации к проведению испытаний. Рассмотрены проблемы, связанные с проведением испытаний и интерпретацией результатов. Сделаны выводы о применимости полученных результатов.

Ключевые слова: импульсная электрическая прочность, одиночный импульс напряжения, электромагнитный импульс, электромагнитная наводка, ядерный взрыв, методика испытаний

Сведения об авторах: Аврасин Эрнст Тевелевич; Ваничкин Денис Олегович, vanichkin@pulsarnpp.ru; Вологдин Эрих Николаевич; Гантман Илья Яковлевич; Синкевич Владимир Фёдорович, д.т.н., профессор

ANALYSIS OF METHODOLOGICAL BASIS FOR PULSED VOLTAGE- WITHSTAND TESTING OF SEMICONDUCTOR ELECTRONIC DEVICES IN ACCORDANCE WITH REGULATORY DOCUMENTATION

E. T. Avrasin, D. O. Vanichkin, E. N. Vologdin, I. Ya. Gantman, V. F. Sinkevich

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

This article describes the methodological basis for pulsed voltage-withstand testing of semiconductor electronic devices. Regulatory documentation requirements for testing are analysed. Issues associated with tests and with the interpretation of their results are considered and conclusions about the applicability of these results are made.

Keywords: pulsed voltage-withstand level, single voltage pulse, electromagnetic pulse, magnetic pickup, nuclear explosion, test procedure

Data of authors: Avrasin Ernst Tevelevich; Vanichkin Denis Olegovich, vanichkin@pulsarnpp.ru; Vologdin Erikh Nikolaevich; Gantman Ilya Yakovlevich; Sinkevich Vladimir Fedorovich, ScD, Professor

Введение

В условиях реального применения радиоэлектронная аппаратура (РЭА) может подвергаться воздействию электромагнитных импульсов (ЭМИ) различной природы.

Известно, что непосредственное влияние электрической и магнитной компонент типичного ЭМИ на изделия полупроводниковой электроники (ИПЭ) в большинстве практических случаев незначительно и мо-

жет существенно проявляться только в экзотических ситуациях, например, в изделиях с магниточувствительными элементами.

При воздействии ЭМИ внутри РЭА за счёт антенных свойств проводных и кабельных линий может образовываться некоторый заряд, который протечёт через нагрузку внутри аппаратуры. Так образуются импульсные электрические наводки, которые при воздействии ЭМИ ядерного взрыва (ЯВ) возникают однократно и характеризу-

ются набором параметров – длительностью, амплитудой, формой и т.д. Эти наводки и представляют основную проблему при воздействии ЭМИ.

Испытания на воздействие ЭМИ

При исследованиях влияния ЭМИ на РЭА наводки моделируются одиночными импульсами напряжения (ОИН), воспроизводимыми генераторами ОИН в стандартизованном виде. Таким образом, для оценки влияния ЭМИ на конкретное изделие проблема сводится к воздействию на него ОИН. Подобная идеология лежит в основе методики испытаний ИПЭ на импульсную электрическую прочность (ИЭП), что закреплено в нормативной документации [1-4]. При испытаниях на ИЭП в первую очередь имеется в виду моделирование ОИН, возникающих при воздействии ЭМИ ЯВ. В настоящее время для типовых ситуаций известно, в каком диапазоне могут лежать параметры наведённых ОИН при таком воздействии.

В то же время обратный переход от результатов испытаний по методике, изложенной в нормативных документах, к параметрам воздействующего ЭМИ представляется крайне неоднозначной задачей. Иными словами, на практике у разработчика конечной аппаратуры возникает проблема с интерпретацией и реальным применением результатов, полученных при испытаниях на ИЭП.

В соответствии с нормативной документацией результатом испытаний на ИЭП являются определённые «... предельные значения параметров ОИН, при которых значения параметров-критериев ИЭП изделий соответствуют установленным нормам». «Параметры ОИН – амплитуда и длительность ОИН при заданных выходном импедансе и форме сигнала стандартизованного генератора» [4].

Видимо, в основе идеологии лежит следующий алгоритм применения результатов испытаний. Для заданной геометрии РЭА и ориентации изделия в поле ЭМИ с заданными параметрами разработчик конечной аппаратуры расчётным методом определяет

амплитуду (накопившийся заряд) и длительность (время его протекания через данную нагрузку) возможной наводки, создаваемой ЭМИ на выводах ИПЭ. Затем сравнивает с приведёнными в ТУ значениями параметров, характеризующих ИЭП, и принимает решение о возможности применения данного изделия. Следует отметить, что подобные расчёты сами по себе крайне затруднительны и практическое использование подобной методики с необходимой достоверностью вызывает сомнения. Кроме того, отсутствуют какие-либо типовые методики и любая руководящая документация, которой мог бы воспользоваться разработчик РЭА на этапе разработки для решения этой проблемы.

Однако, помимо этого, возникает ряд других проблем, проистекающих из методики испытаний, и разработчик сталкивается с необходимостью интерпретации непосредственно результатов испытаний.

Влияние выходного импеданса генератора ОИН на результаты испытаний

Для того чтобы результаты любого моделирования соответствовали тому, с чем ИПЭ может столкнуться в условиях реального применения, важно правильно подобрать параметры моделирующей установки, чтобы она позволяла получать адекватные результаты испытаний.

Одним из таких параметров является выходной импеданс генератора ОИН (R_r). Структурная схема стенда для испытаний ИПЭ на ИЭП представлена на рис. 1.

Понятно, что если изменить R_r , то это полностью поменяет распределение токов и напряжений в разрядном контуре, и на нагрузку (испытываемое изделие) в результате будет подан совершенно другой импульс.

Согласно нормативной документации допускается использовать генератор ОИН с выходным импедансом от 1 до 300 Ом [2-4]. Это колоссальный диапазон, практически то же самое, что произвольный. Проблема выбора R_r отмечалась в литературе [5, 6], тем не менее необходимо сформули-

- 1 – управляющий импульсный генератор;
 2 – высоковольтный вольтметр;
 3 – высоковольтный источник питания;
 4 – блок усиления;
 5 – токоограничивающее сопротивление;
 6 – оснастка для подключения испытуемого изделия;
 7 – двухканальный осциллограф;
 8 – испытуемое изделие в составе оснастки

Рис. 1

Структурная схема стенда для испытания ИПЭ на ИЭП

ровать последствия такого разброса этой величины.

Однако прежде детальнее разберём прочие требования, предъявляемые руководящими документами к R_r . Согласно [4], генератор импульсов в диапазоне амплитуд ОИН от 5 до 500 В должен обеспечивать импульсный ток не менее 100 А. Понятно, что получить такой ток при напряжении 5 В можно, только если выходной импеданс генератора не превышает $\frac{5 \text{ В}}{100 \text{ А}} = 0,05 \text{ Ом}$ и при этом работает в режиме короткого замыкания, то есть без подключения испытуемого изделия! Стандарты, действие которых распространяется на испытания интегральных микросхем [2, 3], уменьшают требование к току до 10 А, что позволяет использовать генераторы ОИН с R_r не более 0,5 Ом. То есть уже здесь видно противоречие – с одной стороны, допустимый диапазон R_r очень широкий, с другой стороны, значения выходного импеданса генератора ОИН, способного удовлетворить прочим требованиям, в него не попадают.

По всей видимости, идеология испытаний предполагает возможность пересчёта результатов, полученных с помощью генератора с выбранным R_r для генератора с произвольно заданными параметрами

в допустимом диапазоне. В то же время методики такого пересчёта результатов отсутствуют в нормативных документах, и все существующие попытки решить эту проблему представлены только в отдельных работах различных исследователей, которые занимались проблемами ИЭП.

В общем случае можно выделить несколько подходов к такому пересчёту:

- 1) оценка перераспределения токов и напряжений в разрядном контуре при изменении R_r ;
- 2) пересчёт ИЭП по энергетическим характеристикам воздействующего импульса;
- 3) статистическая оценка влияния R_r .

Статистический метод может предложить некоторое административное решение, не основанное, по большому счёту, на физике. При таком подходе бесполезно разделять изделия по технологии, материалу, типу для сбора статистики, потому что зачастую у испытательной лаборатории ввиду отсутствия принципиальной электрической схемы и сведений о топологии изделия нет возможности оценить, на что именно внутри изделия приходится воздействие – на затвор, на канал, на p - n переход, на какой-нибудь изолирующий слой и т.д. Видимо, именно поэтому нет работ, в которых прямо предлагалось бы использование статистики для решения конкретно этой проблемы.

Подход к пересчёту результатов испытаний на ИЭП, основанный на оценке распределения токов и напряжений в разрядной цепи генератора

Оценка перераспределения токов и напряжений в разрядной цепи генератора, казалось бы, является простой задачей расчёта одноконтурной цепи. Но в условиях испытаний она оказывается нерешаемой для большинства случаев: активное сопротивление нагрузки R_n в произвольно выбранном включении мало того, что никогда заранее не известно, так ещё может быть нелинейным, то есть сложным образом зависеть от текущей амплитуды воздействующего ОИН.

Кроме того, возможна деградация свойств изделия прямо во время воздействия ОИН (например, вследствие разогрева протекающим током), которая приведёт к непредсказуемому перераспределению токов и напряжений в цепи, как в ситуации, описанной в работе [7]. Это особенно важно в том случае, если изделие после такого воздействия не утратило функционирование (не произошёл параметрический, функциональный или катастрофический отказ) и, согласно методике испытаний, необходимо увеличивать амплитуду ОИН и повторно воздействовать на изделие в данном включении.

На рис. 2а изображена осциллограмма воздействующего ОИН, при котором произошёл катастрофический отказ испытуемого СВЧ усилителя мощности. Красная эпюра – это импульс напряжения, синяя – импульс тока. Во втором случае (рис. 2б) испытывался приёмопередающий модуль, который после воздействия сохранил функционирование. Контролируемые параметры-критерии изменились, но остались в пределах норм ТУ, а по выводам питания увеличился ток

потребления, потому что входное сопротивление изделия после воздействия необратимо поменялось. После такого воздействия, в соответствии с нормативной документацией, необходимо продолжить испытания до выхода изделия из строя. Однако в этом случае сложно оценить, при каких значениях импульсного напряжения произошло бы повреждение изделия при другом значении $R_{\text{вх}}$, как бы изменилось его сопротивление и какую его величину закладывать при пересчёте результатов испытаний.

В приведённом примере речь идёт об эффектах накопления внутренних повреждений при многократной подаче импульса напряжения. Это так называемый аддитивный эффект [8]. Побочное действие этого эффекта проявляется из-за того, что однократное воздействие импульса наводки, по нормативным документам, моделируется многократным воздействием. И если в такой ситуации выбрать генератор с высоким $R_{\text{вх}}$, то ток через нагрузку может быть ограничен и аддитивные эффекты не проявятся или проявятся слабее.

Рис. 2

Осциллограмма ОИН, воздействующего между входом и выходом СВЧ усилителя мощности (а); на выводы питания приёмопередающего модуля (б). Прерывистыми линиями обозначены границы ОИН длительностью 1 мкс

Таким образом, реальная стойкость при пересчёте результатов, полученных с помощью генераторов с различными R_r , может быть завышена или занижена. В общем случае эту проблему можно сформулировать так: генераторы с разным R_r могут включаться для одной и той же нагрузки в разных режимах – как источник тока и как источник напряжения в зависимости от соотношения R_r и R_n .

Влияние шага изменения амплитуды ОИН на результаты испытаний

При анализе аддитивных эффектов возникает вопрос их влияния на показатели ИЭП испытуемого изделия при заданном коэффициенте приращения ($k_{пр}$) амплитуды ОИН (U):

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

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

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 нормативной документации идеология предполагает уменьшение $k_{пр}$ для достижения большей точности при определении максимального допустимого значения амплитуды ОИН.

С другой стороны, ОИН подпороговой амплитуды могут необратимо повреждать изделие. Это приводит к тому, что предыдущие импульсы будут влиять на последующие воздействия и это увеличит погрешность определения показателей ИЭП. На рис. 3 приведена зависимость числа одиночных воздействий N до выхода биполярного транзистора из строя от амплитуд воздействующих ОИН, которые лежат в критической области отказа, ориентировочно определённой в процессе предварительных испытаний. Подача ОИН длительностью $t_{ОИН} = 1$ мкс производилась в самом чувствительном к данному виду воздействия включении – на эмиттерный переход, смещаемый воздействующим импульсом в прямом направлении. При каждом значении $U_{ОИН}$ было исследовано по 6 изделий. Критерием выхода изделия из строя был выбран катастрофический отказ. Полученная зависимость средних значений N для каждой величины амплитуды ОИН была аппроксимирована экспоненциальной функцией.

Рис. 3
Зависимость $N(U_{ОИН})$ в критической области значений амплитуд ОИН для прямо смещённого эмиттерного перехода биполярного транзистора

Из приведённой зависимости для рассматриваемого случая получено условие для $N = 1$: $U_{\text{ОИН}} \geq 57$ В. Пусть изделие необратимо повреждается однократным импульсом с минимальной возможной амплитудой $U_1 = 57$ В. Тогда ОИН с амплитудой U_2 не будет оказывать существенного влияния на результат испытаний при $N \gg 1$ для данного значения амплитуды. Если принять в качестве критерия $N = 10$, получим $k_{\text{пр}}$, при котором влиянием предшествующих воздействий можно пренебречь:

$$k_{\text{пр}} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100 \% = \frac{57 \text{ В} - 49 \text{ В}}{49 \text{ В}} \cdot 100 \% = 16 \ \%.$$

Иными словами, для исследованных биполярных транзисторов при испытаниях на ИЭП приращение амплитуды с $k_{\text{пр}} < 16\%$ может повлиять на определённое максимально допустимое значение амплитуды ОИН. Полученный результат входит в диапазон допустимых нормативной документацией значений $k_{\text{пр}}$, но прямо противоречит идеологии, заложенной в самой методике испытаний.

Ещё одним фактором, влияющим на выбор $k_{\text{пр}}$, является технологический разброс свойств испытуемых ИПЭ. По результатам приведённого в работе [9] исследования тех же биполярных транзисторов было получено распределение вероятности отказа x от $U_{\text{ОИН}}$. Под вероятностью отказа биполярного транзистора при данной амплитуде ОИН $U_{\text{ОИН}}$ понимается отношение числа транзисторов m , вышедших из строя при однократном воздействии ОИН, к общему количеству изделий M , испытанных в данном режиме:

$$x(U_{\text{ОИН}}) = \frac{m(U_{\text{ОИН}})}{M(U_{\text{ОИН}})}.$$

Полученное распределение аппроксимировано экспоненциальной функцией:

$$x(U_{\text{ОИН}}) = \begin{cases} e^{-b(U_0 - U_{\text{ОИН}})^a}, & U_{\text{ОИН}} \leq U_0, \\ 1, & U_{\text{ОИН}} > U_0, \end{cases} \quad (1)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, U_0 – минимальное значение $U_{\text{ОИН}}$, при котором $x(U_{\text{ОИН}}) = 1$. Экспериментальная зависимость и график аппроксимирующей функции представлены на рис. 4а.

Дифференцированием выражения (1) получена функция плотности распределения порогового значения $U_{\text{ОИН}}$ $x'(U_{\text{ОИН}})$, которая показывает вероятность, с которой заданная величина $U_{\text{ОИН}}$ будет определять ИЭП случайно выбранного изделия (рис. 4б).

Максимум распределения приходится на значение $U_{\text{max}} = 58$ В – это наиболее вероятное максимально допустимое значение амплитуды $U_{\text{ОИН}}$ для случайно выбранного изделия исследуемого типа. Это соотносится с результатами, полученными в предыдущем эксперименте.

Для доверительной вероятности $\alpha \approx 0,9$ ширина доверительного интервала по сравнению с величиной его нижнего предела определяет минимальное значение $k_{\text{пр}}$, дальнейшее уменьшение которого не приведёт к увеличению точности определения показателей ИЭП из-за технологического разброса параметров исследованных транзисторов:

$$k_{\text{пр}} = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \cdot 100 \% = \frac{62 \text{ В} - 48 \text{ В}}{48 \text{ В}} \cdot 100 \% = 29\%,$$

где U_1 и U_2 – доверительные пределы.

Полученный результат выходит за рамки допустимых нормативной документацией значений $k_{\text{пр}}$ и, судя по всему, обусловлен сильным различием параметров испытуемых изделий в партии. Для изделий с более стабильной технологией следует ожидать меньшего влияния фактора технологического разброса. Влияние технологического разброса при воздействии импульсов напряжения на ИПЭ было исследовано в работах [10, 11]. Схожий эксперимент описан в работе [12]. Влияние обоих описанных эффектов на определяемый уровень ИЭП при различном $k_{\text{пр}}$ подтверждается работой [13].

Подход к пересчёту результатов испытаний на ИЭП, основанный на энергетических характеристиках воздействующего ОИН

Последний рассматриваемый подход к пересчёту результатов испытаний для генераторов с различным R_f связан с энергетическими характеристиками воздействующего импульса. Идея заключается в том,

Рис. 4

Зависимость $x(U_{\text{OIN}})$ и график аппроксимирующей функции (а);
зависимость $x'(U_{\text{OIN}})$ – плотность распределения порогового значения U_{OIN} (б)

что тепловое повреждение полупроводника всегда происходит при разогреве до одной и той же определённой критической температуры $T_{\text{кр}}$ (предельная температура кристалла, p - n переходов), то есть при выделении определённого количества энергии за время импульса или определённой мощности, при которой отвод тепла за счёт теплопроводности будет недостаточным для предотвращения локального разогрева до $T_{\text{кр}}$.

К этому подходу отнесены методики пересчёта, основанные на достижении $T_{\text{кр}}$ при воздействии энергии ОИН.

Для пересчёта по таким методикам могут потребоваться дополнительные параметры, которые не приводятся в ТУ и недоступны разработчику аппаратуры. Например, напряжение лавинного пробоя, если речь идёт о p - n переходе, как в работе [14]. Понятно, что подобные рассуждения могут работать только для теплового механизма деградации, который встречается часто, но не является единственным. Подобный пересчёт не будет работать в случае, если наблюдаются эффекты dU/dt , сбои, связанные

с переключением логических схем, потерей информации и т.п. Как правило, при пересчёте по энергетическим характеристикам считается, что разогрев полупроводниковых структур током ОИН имеет адиабатический характер, а вся энергия, приводящая испытуемое изделие к выходу из строя, выделяется за время воздействия. В случае срабатывания эффектов, связанных с активацией паразитных биполярных или тиристорных структур, повреждение изделия может быть вызвано не энергией импульса, а за счёт энергии источника питания изделия (например, катодным током паразитного тиристора). В этом случае паразитная структура может оказаться в открытом состоянии даже после окончания действия ОИН. Тогда важную роль начинает играть способность изделия рассеивать тепло за счёт теплопроводности и наличие теплоотвода может быть критичным. При использовании генераторов с высоким R_f могут не проявиться некоторые токовые эффекты. Например, ограниченный внутренним сопротивлением генератора ток в базу паразитной структуры может быть

недостаточным для возникновения эффекта. Но все рассуждения о физике отказов не имеют смысла, потому что информация о механизме отказа не входит в ТУ и, более того, установление причин отказа не требуется нормативными документами.

Также возникает вопрос, кто должен заниматься подобным пересчётом. Испытатель даёт заключение на изделие, указывает параметры своего генератора и выпускает протокол испытаний. Получается, что такая задача ложится на плечи разработчика конечной РЭА, который будет использовать испытанные компоненты. Но для того чтобы осуществлять пересчёт по какой-либо методике, необходимо располагать соответствующими вводными данными для расчётов. В то же время, даже если разработка и испытания ИПЭ производятся на одном предприятии, получить требуемую информацию не всегда представляется возможным. То же напряжение лавинного пробоя для разрабатываемых СБИС может не фигурировать в конструкторской документации. Изделие разрабатывается, на завод отправляется техкарта, по ней производятся изделия, поставляются заказчику работы, который зачастую не имеет информации о топологии разработанного изделия. А в случае, если изделие разрабатывается на одном предприятии, производится на другом, испытывается на третьем, а применяется на четвёртом, обеспечить адекватный обмен необходимыми сведениями не представляется возможным.

Влияние формы ОИН на результаты испытаний

Нормативная документация допускает использовать ОИН различной формы – двухэкспоненциальной или трапецеидальной (рис. 5). Стандарт [1] допускает использование импульсов любой другой формы по согласованию с заказчиком. Однако при проведении испытаний этот выбор никак не регламентируется. Поэтому при попытке интерпретировать результаты, полученные с помощью генераторов ОИН различной формы, возникают те же трудности с пересчётом, что и в случае генераторов с различным R_r .

В работе [15] приводится исследование воздействия импульсов разной формы на p - n переход. Видимо, влияние формы импульса из двух предложенных вариантов всё же меньше, чем влияние выходного импеданса генератора, и результат испытаний будет отличаться, но при прочих равных условиях не на порядки, как при сильном различии R_r , а меньше. Следует отметить, что трапецеидальный импульс напряжения является более опасным для компонент РЭА, однако его возникновение в условиях реального применения теоретически может быть возможным лишь в экзотических случаях, например, при наличии приборов с индуктивной связью. Таким образом, при использовании генераторов ОИН трапецеидальной формы реальная ИЭП изделия может занижаться.

Рис. 5

ОИН различной формы – трапецеидальный и двухэкспоненциальный

Требования нормативной документации к длительности ОИН при испытаниях

Длительность ОИН $t_{\text{ОИН}}$ также оказывает влияние на ИЭП компонент РЭА – чем длиннее импульс при заданной амплитуде, тем он опаснее для испытываемого изделия. Нормативная документация допускает проведение испытаний при $10^{-7} \text{ с} < t_{\text{ОИН}} < 10^{-5} \text{ с}$. Предполагается, что при воздействии ЭМИ ЯВ длительность наводки будет лежать в этом диапазоне. Так как нельзя заранее сказать, какой именно будет длительность наводки, предъявляются требования к определению показателей ИЭП при различных значениях $t_{\text{ОИН}}$. Таким образом, в ходе испытаний должна быть получена зависимость $U_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$, при этом данная зависимость может быть как слабой, так и очень сильной в зависимости от R_f используемого генератора ОИН [5].

Стандарт [3] требует не менее трёх длительностей ОИН, «... при которых проводят испытания по определению справочных данных» для микросхем. Практически переписанный текст этого документа в виде стандарта [2] вообще никаких требований по этому вопросу не содержит. В [4] с такой же формулировкой требуется 5 длительностей, но «контроль ИЭП допускается проводить при одном значении длительности ОИН». И наконец, стандарт [1] требует проводить испытания не менее чем при пяти значениях длительностей ОИН.

Вообще, «испытания по определению справочных данных» – это нечто неопределённое. Существует стандарт [16], который содержит все термины и определения, связанные с испытаниями. Там перечислены все возможные виды испытаний. Испытания, которые обычно проводятся, когда в ТЗ на ОКР записывается ИЭП, – предварительные. После этого они, как правило, засчитываются как приёмочные. Цель предварительных испытаний – определение возможности предъявления на приёмочных. Цель приёмочных – решение вопроса о целесообразности постановки продукции

на производство и (или) использовании по назначению.

С одной стороны, в существующей нормативной документации понятие уровней стойкости к ОИН не вводится, поэтому испытания определительные. То есть в заключении протокола испытаний действительно приводится не что иное, как справочные данные. С другой стороны, «испытания по определению справочных данных» не проводятся. Видимо, здесь когда-то при переписывании стандартов произошла ошибка и формулировка «испытания с целью получения справочных данных о стойкости» превратилась в «испытания по определению справочных данных».

Зависимость максимально допустимой амплитуды ОИН от его длительности должна быть получена в ходе испытаний, иначе возникают трудности с применением результатов испытаний. На рис. 6 приведены четыре зависимости $U_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$ для различных типов ИПЭ. Видно, что все изделия ведут себя совершенно по-разному. У исследованного МОП транзистора при данном R_f (2,5 Ом) ИЭП одинаковая во всём диапазоне, а полупроводниковый диод, наоборот, имеет очень сильную зависимость. Вообще, общий вид зависимости для всех изделий должен быть одинаковым. Можно сказать, что представленная зависимость 3 имеет классический вид [17, 18]. Она состоит из двух областей. Пологая часть в пределах с увеличением длительности ОИН выходит на значение, соответствующее постоянному напряжению. В этой области ИЭП изделия практически неизменна. В крутой области наблюдается сильная зависимость, то есть длительность импульса сказывается на значении ИЭП. Видимо, такой вид эта зависимость имеет в любом случае, только от места расположения точки перегиба зависит, как она выглядит в исследуемом диапазоне. Это хорошо видно на кривых 2 и 3, где точки перегиба явно располагаются в разных местах, хотя кривые сняты через порядок, то есть с очень большим шагом.

Подводя итог, можно сделать вывод, что для оценки воздействия ЭМИ ЯВ вид

Рис. 6

Зависимость максимально допустимого значения амплитуды ОИН от его длительности для различных типов ИПЭ

этой зависимости нужно знать во всём диапазоне, однако при существующей методике испытаний это не всегда представляется возможным.

При этом получение недостающих максимально допустимых значений амплитуды ОИН расчётным методом затруднительно ввиду ряда причин. Серьёзная проблема в непрогнозируемости расположения точки перегиба.

Даже если считать процесс нагрева изделия при воздействии наводки адиабатическим (из-за того, что наводка короткая) и в рассуждениях привязываться к выделившейся энергии или мощности, то зависимость этих величин от длительности ОИН тоже может быть нелинейной.

На рис. 7 приведены зависимости полной энергии $E_{\text{ОИН}}$ (а) и средней мощности $P_{\text{ОИН}}$ (б) импульса, предшествующего отказу,

от длительности ОИН $t_{\text{ОИН}}$ для $p-n$ перехода, испытанного во включениях с прямой и обратной полярностью. Видно, что зависимости мало того, что нелинейные, так ещё отличаются друг от друга в разных включениях. И это создаёт сложности при попытках решить проблему расчётным методом с использованием энергетических характеристик.

Требования к испытаниям в диапазоне длительностей, в целом, прозрачны и возражений не вызывают. Тем не менее испытательной лаборатории часто приходится сталкиваться с проблемой нехватки изделий на испытания.

Требования нормативной документации к количеству изделий на испытания

Проблема нехватки изделий для испытания на ИЭП возникает вследствие требований, предъявляемых нормативной документацией. В последнее время испытания на ИЭП записываются в ТЗ на разработку совершенно разных типов изделий, в том числе многовыводных СБИС и модульных сборок. При проведении таких испытаний хорошо, если есть возможность, в соответствии с методикой испытаний перебрать при одной длительности все возможные комбинации выводов – входы, выходы, питание. Для микросхем, согласно общим техническим условиям [19], число изделий на испытания привязано к степени интеграции. Для испытаний на ИЭП при степени интеграции ИС8 положено испытывать всего 4 микросхемы – ровно на одну микросхему меньше, чем предписывается документом [1] количество длительностей ОИН! А испытания являются разрушающими: одно включение – одна микросхема.

Стандарт [20] вообще не содержит никаких сведений об испытании на воздействие ОИН – на момент составления этого документа требования по определению ИЭП не предъявлялись. А между тем модульные сборки требуют особой методики испытания, учитывая количество выводов и высокую стоимость производства одного изделия.

Рис. 7

Зависимости $E_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$ (а) и $P_{\text{ОИН}}(t_{\text{ОИН}})$ (б) для испытанного p - n перехода во включениях с прямой (1) и обратной (2) полярностью

Можно подсчитать необходимое количество изделий на испытания в соответствии с методикой испытаний. В общем случае нормативная документация предписывает рассмотрение всех возможных пар выводов изделия методом последовательного перебора. Число подобных комбинаций S можно определить по формуле:

$$S = \frac{n!}{(n-2)! \cdot 2},$$

где n – число выводов.

Каждую пару выводов необходимо испытывать при двух полярностях ОИН при пяти значениях $t_{\text{ОИН}}$. Учитывая, что уровни стойкости для ИЭП не заданы, в каждом из возможных вариантов требуется доводить изделие до отказа, то есть число возможных включений определяет число требуемых изделий на испытания! Тогда в соответствии с методикой испытаний для определения ИЭП изделий, у которых 6 выводов, требуется

$$\frac{2 \cdot 5 \cdot 6!}{(6-2)! \cdot 2} = 150 \text{ (шт.)}.$$

Понятно, что при испытаниях число исследуемых включений сокращают на основании различных соображений [21], но регламентирующие документы не содержат

никаких критериев выбора пар выводов изделий и сокращения объёмов испытаний.

Выводы

1. Реальное применение результатов испытаний на ИЭП сталкивается с серьёзными проблемами методологического характера.

2. Нормативная документация содержит противоречивые требования, которые не позволяют получить исчерпывающую информацию по вопросу воздействия ЭМИ ЯВ на компоненты РЭА.

3. Параметров ОИН, регистрация которых при испытаниях предписывается регламентирующей документацией, может быть недостаточно для оценки импульсной электрической прочности изделия.

4. Не существует стандартизированного подхода к интерпретации результатов испытаний ИПЭ на ИЭП, закреплённого в нормативной документации.

5. Создание методик пересчёта результатов испытаний для их интерпретации возможно только для ограниченного класса ситуаций.

6. Даже использование описанных в литературе методик интерпретации резуль-

татов испытаний на ИЭП, а также методик пересчёта этих результатов для различных классов ситуаций на практике сталкивается с проблемой недоступности исходной информации об испытуемом изделии как на стадии разработки конечной РЭА, так и на стадии проведения испытаний.

7. Необходима корректировка нормативных документов и оптимизация методики испытаний в части требований к порядку испытаний и количеству испытываемых изделий.

8. Необходим комплексный подход к испытаниям изделий электронной техники на импульсную электрическую прочность, включающий в себя анализ физики происходящих процессов.

Литература

- ГОСТ РВ 20.57415-98.
- ГОСТ 5962-004.10-2012.
- ОСТ 11073.013-2008, ч. 10.
- РД В 319.03.30-98 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Испытания на импульсную электрическую прочность.
- Ванин В.И. Зависимость импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов от выходного сопротивления генераторов одиночных импульсов напряжения // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2011». – 2011. – Вып. 14. – С. 95.
- Аврасин Э.Т., Вологдин Э.Н. Общий подход к оценке импульсной электрической прочности изделий полупроводниковой электроники // Материалы VII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 2008. – С. 144.
- Ваничкин Д.О., Вологдин Э.Н., Гантман И.Я. Исследование эффекта возникновения двойного пика тока при испытаниях изделий электронной техники на импульсную электрическую прочность // Тез. докл. на 19 Всеросс. научно-техн. конф. Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2016». – 2016. – С. 39.
- Герасимчук О.А., Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К. Аддитивные эффекты повреждения цифровых микросхем при воздействии на их выводы импульсов напряжения // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2011». – 2011. – Вып. 14. – С. 91.
- Ваничкин Д.О., Вологдин Э.Н., Гантман И.Я. Исследование импульсной электрической прочности биполярных транзисторов при пониженной температуре окружающей среды // Материалы XIV научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 2015. – С. 316.
- Пузанов А.С., Оболенский С.В. Влияние разброса электрических характеристик биполярного транзистора на его пробой при воздействии импульса напряжения // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – Вып. 1. – С. 54.
- Пузанов А.С., Оболенский С.В., Петров С.Г. Влияние разброса профилей легирования биполярных транзисторов на возникновение пробоя при воздействии импульса напряжения // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2009». – М.: СПЭЛС, 2009. – С. 107.
- Скоробогатов П.К., Епифанцев К.А., Дятлов Н.С. Определение оптимального шага изменения амплитуды одиночных импульсов напряжения при испытаниях элементной базы на импульсную электрическую прочность // Тез. докл. на 19 Всеросс. научно-техн. конф. Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2016». – 2016. – С. 194.
- Дятлов Н.С., Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К. Анализ выбора оптимального коэффициента приращения амплитуды напряжения при испытаниях электронных изделий на ИЭП // Тез. докл. 20-й Всеросс. научно-техн. конф. Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2017». – 2017. – С. 138.
- Ванин В.И. Относительные зависимости показателей импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов и интегральных схем от длительности одиночного импульса напряжения // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – Вып. 3. – С. 42.
- Епифанцев К.А., Скоробогатов П.К. Исследование влияния формы одиночного импульса напряжения на импульсную электрическую прочность p-n перехода // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2009». – М.: СПЭЛС, 2009. – С. 59.
- ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
- Герасимчук О.А. Зависимость уровней импульсной электрической прочности КМОП ИС

от длительности одиночных импульсов напряжения // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2008». – 2008. – С. 137.

18. Ваничкин Д.О., Вологдин Э.Н., Гантман И.Я. Исследование аномальной зависимости амплитуды предельно допустимого одиночного импульса напряжения от его длительности при испытаниях некоторых типов изделий на импульсную электрическую прочность // Материалы XIV научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 2015. – С. 323.
19. ОСТ В 110998-99 Микросхемы интегральные. Общие технические условия.
20. ОСТ В 110265-86.
21. Лаврентьев К.В., Зинченко В.Ф., Котов Д.К. Оптимизация методики испытаний полупроводниковых приборов на импульсную электрическую прочность // Научно-технический сборник Рад. стойкость электронных систем «Стойкость-2010». – 2010. – С. 177.

References

1. State Standard RV 20.57415-98.
2. State Standard 5962-004.10-2012.
3. Standard 11073.013-2008, pt. 10.
4. Guidance V 319.03.30-98. Electronic and quantum electronic devices for military applications. Pulsed voltage-withstand tests [In Russian].
5. Vanin V.I. Dependence of semiconductor devices' pulsed voltage-withstanding on output resistance of single-voltage pulse generators. *V sb. Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2011»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2011»], 2011, vol. 14, p. 95.
6. Avrasin E.T., Vologdin E.N. General approach to the evaluation of pulsed voltage-withstanding of semiconductor electronic devices. *Materialy VII nauchno-tehnicheskoy konferencii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhniye funktsionalniye bloki REA»* [Proc. VII scientific and technical conference «Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment»], 2008, p. 144.
7. Vanichkin D.O., Vologdin E.N., Gantman I.Ya. Study of the double current peak occurrence during pulsed voltage-withstand tests of electronic devices. *Tez. dokl. na 19 Vseross. nauchno-tehnicheskoy konferencii Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2016»* [Proc. 19 All-Russian scientific and technical conference Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2016»], 2016, p. 39.
8. Gerasimchuk O.A., Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K. Additive effects of digital microchip's damage under voltage pulses applied on their terminals. *V sb. Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2011»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2011»], 2011, vol. 14, p. 91.
9. Vanichkin D.O., Vologdin E.N., Gantman I.Ya. Pulsed voltage-withstand testing of bipolar transistors at low ambient temperature. *Materialy XIV nauchno-tehnicheskoy konferencii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhniye funktsionalniye bloki REA»* [Proc. XIV scientific and technical conference «Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment»], 2015, p. 316.
10. Puzanov A.S., Obolenskiy S.V. Effect of scattering of bipolar transistor's electrical parameters on the breakdown under pulsed voltage. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of atomic science and engineering], 2010, vol. 1, p. 54.
11. Puzanov A.S., Obolenskiy S.V., Petrov S.G. Effect of scattering of bipolar transistor's doping profiles on the breakdown under pulsed voltage. *V sb. Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2009»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2009»]. Moscow, SPELS Publ., 2009, p. 107.
12. Skorobogatov P.L., Epifantsev K.A., Dyatlov N.S. Determination of the optimal step of changing the amplitude of single voltage pulses during pulsed voltage-withstand tests of electronic components. *Tez. dokl. na 19 Vseross. nauchno-tehnicheskoy konferencii Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2016»* [Proc. 19 All-Russian scientific and technical conference Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2016»], 2016, p. 194.
13. Dyatlov N.S., Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K. Analysis of selecting the optimal voltage amplitude increment coefficient during pulsed voltage-withstand tests of electronic devices. *Tez. dokl. na 20 Vseross. nauchno-tehnicheskoy konferencii Rad. stoykost elektronnykh sistem «Stoykost-2017»* [Proc. 20 All-Russian scientific and technical conference Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2017»], 2017, p. 138.
14. Vanin V.I. Relative dependences of the pulsed voltage-withstand levels of semiconductor devices and integrated circuits on the single voltage pulse duration. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of atomic science and engineering], 2010, vol. 3, p. 42.
15. Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K. Study of the influence of single voltage pulse shape on p-n junction pulsed voltage-withstand level. *V sb. Rad.*

- stoykost elektronnykh system «Stoykost-2009»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2009»]. Moscow, SPELS Publ., 2009, p. 59.
16. State Standard 16504-81. State product testing system. Product testing and quality control. Basic terms and definitions [In Russian].
 17. Gerasimchuk O.A. Dependence of CMOS IC pulsed voltage-withstand levels on single voltage pulse duration. *V sb. Rad. stoykost elektronnykh system «Stoykost-2008»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2008»], 2008, p. 137.
 18. Vanichkin D.O., Vologdin E.N., Gantman I.Ya. Study of abnormal dependence of maximum permissible single voltage pulse's amplitude on its duration during pulsed voltage-withstand testing of certain types of devices. *Materialy XIV nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhniye funktsionalniye bloki REA»* [Proc. XIV scientific and technical conference «Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment»], 2015, p. 323.
 19. Standard. *V 110998-99*. Integrated microchips. General specifications [In Russian].
 20. Standard *V 110265-86* [In Russian].
 21. Lavrentyev K. V., Zinchenko V. F., Kotov D. K. Optimization of testing procedure for pulsed voltage-withstand testing of semiconductor devices. *V sb. Rad. stoykost elektronnykh system «Stoykost-2010»* [Proc. of Rad. hardness of electronic systems «Stoykost-2010»], 2010, p. 177.