

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ИМПУЛЬСА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

© 2024 г. В. В. Кузнецов^{a,*}, В. В. Андреев^{a,**}

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, с. 1

*e-mail: vadim.kuznetsov@bmstu.ru

**e-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 02.07.2023 г.

Представлена экспериментальная установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. Данная установка позволяет измерять импульсные вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов и защитных элементов, а также проводить исследование стойкости микроэлектронных устройств к электростатическому разряду, в том числе и без их разрушения. Установка обеспечивает создание испытательных импульсов напряжения прямоугольной формы длительностью 100 нс, согласно стандарту IEC62615, и обеспечивает амплитуду импульса тока разряда до 10 А.

DOI: 10.31857/S0032816224020087 EDN: QSZJOP

1. ВВЕДЕНИЕ

Стойкость к воздействию электростатического разряда (ЭСР) является важной характеристикой электронных компонентов [1, 2]. Для определения стойкости полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС) к воздействию ЭСР применяется несколько моделей воздействия ЭСР в зависимости от источника разряда. Наиболее употребительными являются модель тела человека (human body model, HBM) и модель заряженного компонента (charged device model, CDM), которые имитируют ситуацию, когда носителем заряда является человек или непосредственно электронный компонент [2, 3]. Промышленность выпускает установки для испытания электронных компонентов согласно данным моделям. Результатом испытаний при помощи данного оборудования является заключение о том, выдержал ли электронный компонент разряд с заданным напряжением. Для конструирования новой защиты

от ЭСР или улучшения существующей зачастую недостаточно данной информации. Требуется исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) полупроводниковых приборов при воздействии достаточно мощного импульса тока малой длительности. Также подобные измерения требуются для схемотехнического моделирования воздействия ЭСР на ИМС [4].

Поведение электронного компонента при воздействии импульса тока с большой амплитудой (до нескольких ампер) и малой длительностью (порядка 100 нс) не может быть промоделировано, если известны только ВАХ, полученные при традиционной методике измерений на постоянном токе [5], либо экстраполяцией ВАХ, измеренных при малом токе. Под воздействием больших импульсных токов в полупроводниковых приборах проявляются различные нелинейные эффекты. Также в паразитных биполярных транзисторах, образующихся между областями стока, истока и канала

МОП-транзисторов, проявляется тиристорный эффект. На данном эффекте основана работа защиты на МОП-транзисторах с заземленным затвором, применяемой в схемотехнике современных цифровых и аналоговых ИМС.

Существенно более информативный метод исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию ЭСР и протекающих при этом физических процессов основан на использовании прямоугольного импульса линии передачи (transmission line pulse, TLP) [6, 7]. Методику испытаний TLP регламентирует международный стандарт IEC 62615:2010. Принцип действия TLP-установок хорошо известен, но их конструктивные исполнения, которые в значительной мере определяют точность измерений, практически не описаны в открытых источниках. Зарубежная промышленность (фирмы ThermoFisher и HPPI GmbH) выпускает установки для измерения ВАХ полупроводниковых приборов методом TLP, предназначенные для применения в микроэлектронном производстве. Но отечественные аппаратные решения, реализующие данные методы, отсутствуют. Установка, предложенная в работе [8], использует импульсы микросекундного диапазона, что недостаточно для определения стойкости ИМС к воздействию ЭСР. Существующие зарубежные решения также требуют применения дорогостоящего дополнительного оборудования, такого как согласованные 50-омные датчики тока и напряжения для цифрового осциллографа. Предлагаемая в данной работе экспериментальная установка позволяет проводить исследование импульсных ВАХ методом TLP, используя стандартное измерительное оборудование, как правило, имеющееся в исследовательских лабораториях и на приборостроительных предприятиях. Результаты данных измерений могут быть использованы для комплексного исследования стойкости полупроводниковых приборов и ИМС к воздействию ЭСР.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВАХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ОТ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Типичная ВАХ элемента защиты от ЭСР, основанного на тиристорном эффекте [9], показана на рис. 1.

При достижении порогового напряжения V_{t1} активируется тиристорный эффект,

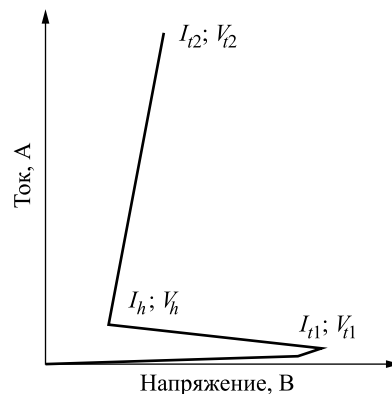


Рис. 1. Типичная ВАХ защитного элемента тиристорного типа.

и напряжение на защитном элементе скачком уменьшается до V_h . Если ток через защитный элемент превышает величину I_{t2} , то происходит необратимый тепловой пробой. В результате измерения импульсной ВАХ требуется определить данные параметры, а также дифференциальное сопротивление R_{diff} защитного элемента:

$$R_{diff} = \frac{V_{t2} - V_h}{I_{t2} - I_h}. \quad (1)$$

Кроме того, метод TLP позволяет исследовать не только ВАХ полупроводниковых приборов, но и изменения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) подзатворного диэлектрика под воздействием повторяющихся импульсов ЭСР. В работе [10] указано, что имеется следующая зависимость числа зарядовых ловушек Q_N , генерируемых в подзатворном диэлектрике, от количества импульсов N_{ESD} ЭСР:

$$Q_N = k \ln N_{ESD} + C, \quad (2)$$

где k , C — эмпирические безразмерные коэффициенты. Генерация зарядовых ловушек в подзатворном диэлектрике может приводить к параметрическому отказу ИМС. Разработанная установка позволяет проводить подобные исследования, этим она отличается от промышленно выпускаемых TLP-установок.

Разработанная установка реализует измерение импульсных ВАХ методом TLP [6–8]. Данный метод основан на том, что коаксиальный кабель, заряженный от источника постоянного тока до некоторого напряжения, затем разряжается в согласованную цепь, в которую включен исследуемый полупроводниковый компонент (device under test, DUT). При разряде длинной

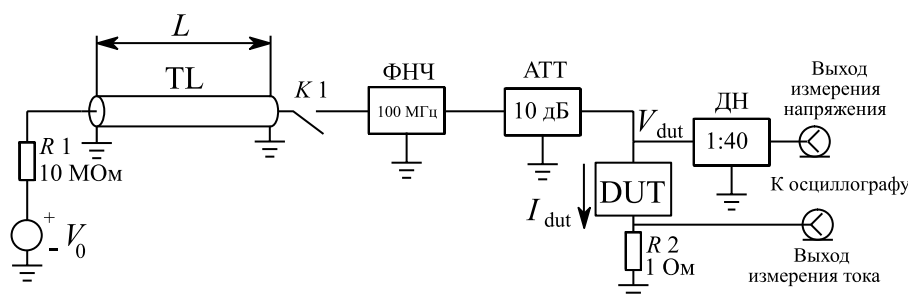


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом TLP.

линии в согласованную нагрузку, сопротивление которой равно волновому сопротивлению линии, форма импульса тока разряда будет близкой к прямоугольной. Длительность импульса зависит от длины кабеля, а амплитуда тока разряда — от напряжения высоковольтного источника. Длительность импульса τ определяется из следующего выражения [7]:

$$\tau = \frac{2L}{cK_{\text{short}}}, \quad (3)$$

где L — длина кабеля, c — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, а K_{short} — коэффициент укорочения кабеля. Для кабелей со сплошной полиэтиленовой изоляцией, подобных RG-58, $K_{\text{short}}=0.66$.

Блок-схема установки показана на рис. 2.

Отрезок коаксиального кабеля TL заряжается от источника постоянного напряжения V_0 через зарядный резистор R_1 до напряжения, определяемого этим источником. Длина кабеля установлена равной $L=10$ м, что, согласно выражению (2), соответствует длительности импульса 100 нс. Такая длительность импульса рекомендована стандартом IEC 62615:2010. При необходимости можно подключить отрезок кабеля другой длины и получить длительность импульса в пределах от 50 нс до 500 нс. При этом нижняя граница определяется паразитными параметрами (индуктивностью и емкостью) печатной платы и контактирующего устройства, которые начинают вносить существенные искажения в форму импульса. Верхняя граница длительности импульса ограничена габаритными показателями катушки кабеля, которая подключается к установке, и затуханием в кабеле. Для импульсов микросекундной длительности целесообразно использовать генераторы, подобные решению, описанному в работе [8], как более компактные. В данной установке используется 50-омный

коаксиальный кабель RG-58 либо RG-316. При замыкании контактов реле K_1 происходит разряд кабеля. Фильтр нижних частот (ФНЧ) формирует фронт импульса тока разряда. В составе установки используется П-образный LC-фильтр на компонентах для поверхностного монтажа с входным и выходным импедансом 50 Ом. Частота среза ФНЧ 100 МГц соответствует времени нарастания импульса тока разряда 10 нс. После фильтра включен аттенюатор (АТТ) с затуханием 10 дБ и импедансом 50 Ом. Аттенюатор позволяет согласовать волновое сопротивление кабеля и исследуемого полупроводникового прибора DUT, который подключается между выходом аттенюатора и землей. Использование простой схемы с нагрузкой линии на сопротивление 50 Ом в данном случае не рекомендуется к применению, так как тестируемый компонент будет включен параллельно нагрузке, и таким образом нагрузка длинной линии будет сильно отличаться от 50 Ом, что приведет к искажению формы импульса. В данной конструкции установки объектом испытаний являются ИМС в керамических корпусах с планарным расположением выводов, установленные в специальном контактирующем устройстве. Датчиком тока служит безындукционный резистор сопротивлением 1 Ом, включаемый в разрыв цепи тока разряда. Датчиком напряжения служит делитель напряжения (ДН) на безындукционных резисторах с коэффициентом деления 1:40 и согласованным выходным сопротивлением 50 Ом. К выходам измерения тока и напряжения подключается цифровой осциллограф в режиме однократной развертки, который фиксирует форму импульсов тока и напряжения на исследуемом полупроводниковом приборе.

Установка выполнена в виде модуля на печатной плате, на которой смонтированы контактирующее устройство, ФНЧ, реле, управляемое

кнопкой, аттенюатор и делители напряжения. Внешний вид установки показан на рис. 3. Осциллограф и источник высокого напряжения на фото не показаны. Совместно с установкой может быть использован любой источник высокого напряжения, например, приведенный в работе [8]. Рекомендуется использовать цифровой осциллограф с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее $1 \Gamma_{\text{выб}}/\text{с}$. Подключение кабеля осуществляется при помощи коаксиальных разъемов типа BNC. Подключение осциллографа осуществляется короткими (200 мм) отрезками кабеля RG-316 через коаксиальные соединители SMA, установленные на плате.

Измерение ВАХ начинаются с того, что на источнике высокого напряжения выставляется минимальное напряжение. Затем инициируется разряд и снимаются осциллограммы тока и напряжения на исследуемом объекте. Определяются значения тока и напряжения в окне 70–90 нс для прямоугольного импульса длительностью 100 нс (рис. 4). Таким образом получаются значения, соответствующие одной точке на ВАХ. Затем напряжение высоковольтного источника повышается последовательно ступенями по 10–25 В до тех пор, пока не произойдет пробой исследуемого компонента или не будет достигнуто предельное напряжение источника. Таким образом получается ВАХ исследуемого электронного компонента. При этом фиксируют предельное значение тока I_{T2} , протекающего через защитный элемент. Данное значение может быть пересчитано в напряжение отказа при тестировании по методике модели тела человека НВМ с использованием способа, представленного в работе [11].

Пример осциллограммы тока и напряжения на исследуемом электронном компоненте показан на рис. 5. Амплитуда импульса тока ограничена максимальным напряжением на высоковольтном источнике, она составляет 6 А для напряжения 1000 В при разряде в короткозамкнутую нагрузку.

3. ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ВАХ ПРИ ПОМОЩИ УСТАНОВКИ

В качестве объектов исследования были выбраны цифровые КМОП ИМС в металлокерамических корпусах с планарным расположением выводов, имеющие напряжение питания

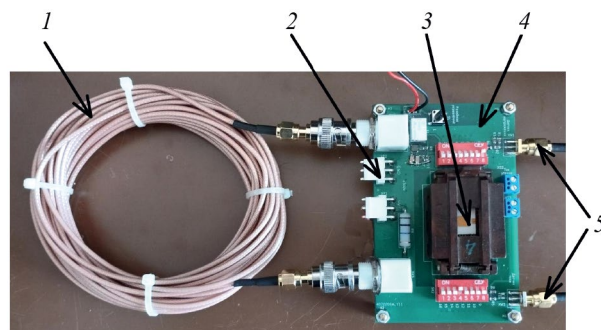


Рис. 3. Установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом TLP: 1 – отрезок кабеля RG-316 длиной $L=10$ м, 2 – разъемы для подключения источника высокого напряжения, 3 – контактирующее устройство с установленной ИМС, 4 – модуль на печатной плате, 5 – разъемы для подключения осциллографа.

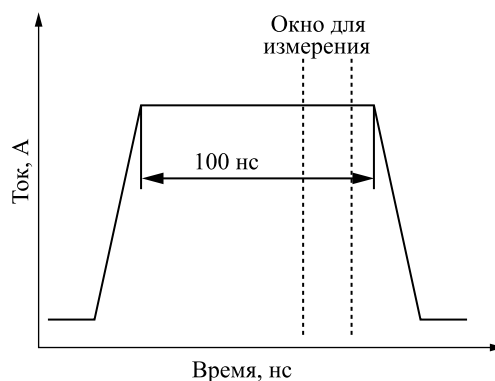


Рис. 4. Форма разрядного импульса тока и окно для измерения.

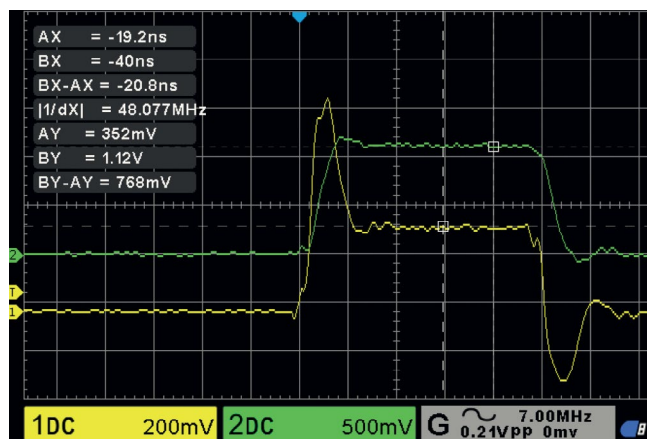


Рис. 5. Осциллограмма импульса напряжения на выходе измерения напряжения (канал 1) и на выходе измерения тока (канал 2).

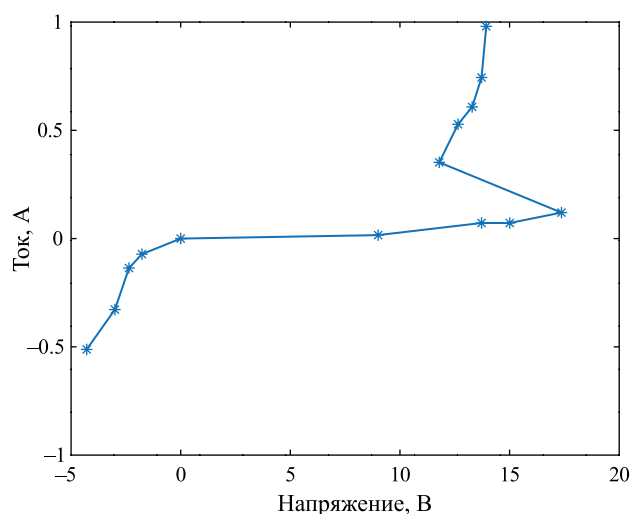


Рис. 6. ВАХ защитного элемента для ИМС по технологии 3 мкм.

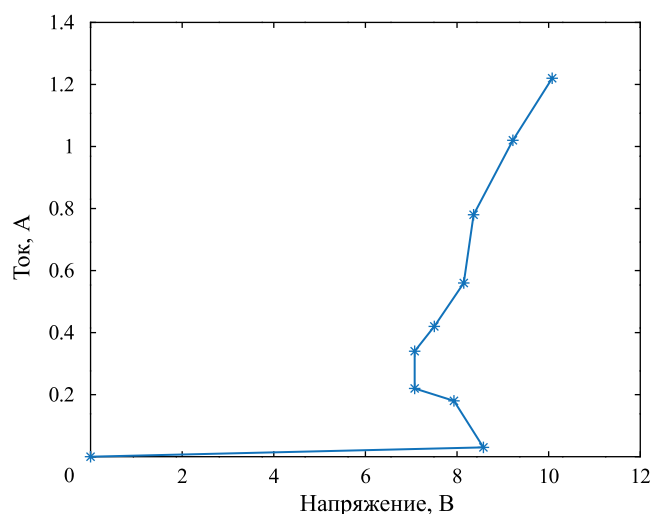


Рис. 7. ВАХ защитного элемента для ИМС по технологии 0.6 мкм.

5 В, выполненные согласно техпроцессам 3 мкм и 0.6 мкм, выпускаемые отечественными предприятиями. Данные ИМС имеют защиту на основе полевых транзисторов с заземленным затвором [12]. Принцип действия данной защиты основан на тиристорном эффекте. Для правильной работы защитного компонента требуется, чтобы напряжение включения $V_{\text{и}}$ (см. рис. 1) не превышало напряжение пробоя подзатворного диэлектрика [13], но было больше напряжения высокого логического уровня с некоторым запасом, чтобы исключить самопроизвольное срабатывание защиты от ЭСР при нормальном функционировании ИМС. Защита от ЭСР на основе МОП-транзисторов с заземленным затвором обычно имеет напряжение включения не менее 5 В для ИМС с напряжением питания 3.3 В. Также дифференциальное сопротивление защитного элемента во включенном состоянии должно быть минимально возможным.

Измеренные с использованием описанной установки импульсные ВАХ для данных ИМС с элементами защиты показаны на рис. 6 и 7. Испытания проводились импульсом положительной полярности, который прикладывался между выводами входа и минусовым выводом питания ИМС (земля V_{SS}). При этом импульсный ток протекает через защитный элемент напрямую на минусовую шину питания, что позволяет исследовать ВАХ защиты от ЭСР.

Из полученных ВАХ можно определить напряжение включения $V_{\text{и}}$ и дифференциальное

сопротивление защитного элемента. Напряжение включения составило 18 В для ИМС, изготовленных по технологии 3 мкм, и 8.5 В для ИМС, полученных по техпроцессу 0.6 мкм. Дифференциальное сопротивление защитного элемента во включенном состоянии для ИМС по технологии 3 мкм составляло около 4 Ом, а для ИМС по технологии 0.6 мкм имело значение 1 Ом.

В результате испытаний был достигнут ток около 1 А, протекающий через защитный элемент, без разрушения защитного элемента. Это значение соответствует эквивалентному испытательному напряжению около 1.3–1.5 кВ при разряде по модели НВМ, согласно методике пересчета результатов испытаний, приведенной в работе [11]. Таким образом результаты ТЛР-испытаний можно использовать для оценки стойкости ИМС к ЭСР по модели НВМ без дополнительного проведения НВМ-испытаний на специальном оборудовании. Данное значение соответствует требованиям по стойкости к ЭСР, предъявляемым к современным цифровым ИМС.

4. ВЫВОДЫ

Разработана установка для исследования стойкости полупроводниковых приборов к воздействию электростатического разряда методом импульса линии передачи. Установка имеет компактные размеры, не требует применения дополнительного дорогостоящего

измерительного оборудования, но позволяет производить измерения с точностью, достаточной для определения стойкости изделий микроэлектронной техники к воздействию ЭСР. Установка обеспечивает импульс тока прямоугольной формы амплитудой до 10 А и длительностью 100 нс, что позволяет проводить измерения по методике TLP согласно рекомендациям стандарта IEC 62615:2010. Путем коммутации отрезков кабеля различной длины можно устанавливать длительность испытательного импульса от 50 нс до 500 нс. При этом возможно проведение как неразрушающего, так и разрушающего теста. Проведена экспериментальная апробация установки при исследовании стойкости к ЭСР цифровых КМОП ИМС в металлокерамических корпусах с планарным расположением выводов, изготовленных по техпроцессам с проектными нормами 3 мкм и 0.6 мкм. Измерены импульсные вольт-амперные характеристики испытываемых ИМС, характеризующие входные защитные цепи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FSFN-2024-0027

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Ильин А.Б., Пяков А.В., Шатров С.А., Плехотниченко П.Г. // ПТЭ. 2017. № 2. С. 110.
<https://doi.org/10.1134/S0020441217010274>
2. Абрамешин А.Е., Галухин И.А., Кечиев Л.Н., Кузнецов В.В., Назаров Р.В. // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 3. С. 44.
3. Voldman S.H. // 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. Beijing, China. 2008. P. 325.
4. Ammer M., Esmark K., zur Nieden F., Rupp A., Cao Y., Sauter M., Maurer L. // 39th Electrical Overstress/ Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD), Tucson, USA. 2017. P. 1.
<https://doi.org/10.23919/EOSSED.2017.8073438>
5. Наумов В.В., Гребеничиков О.А., Залесский В.Б. // ПТЭ. 2007. № 1. С. 164. eLIBRARY ID: 9465475
6. Barth J.E., Verhaege K., Henry L.G., Richner J. // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2001. V. 24. P.99.
<https://doi.org/10.1109/6104.930960>
7. Ashton R.A. // Proceed. International Conference on Microelectronic Test Structures. Nara, Japan. 1995. P. 127.
<https://doi.org/10.1109/ICMTS.1995.513959>
8. Вьюхин В.Н. // ПТЭ. 2020. № 1. С. 52.
<https://doi.org/10.1134/S0020441219060216>
9. Du F., Song S., Hou F., Song W., Chen L., Liu J., Liou J.J. // IEEE Electron Device Letters. 2019. V. 40. P. 1491.
<https://doi.org/10.1109/LED.2019.2926103>
10. Teh G.L., Chim W.K. // Proceedings of the 6th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. Singapore. 1997. P. 156.
<https://doi.org/10.1109/IPFA.1997.638186>
11. Kuznetsov V. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. V. 60. P. 107.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2017.2700492>
12. Максимов И.В., Кузнецов В.В., Андреев В.В. // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 4(63). С. 35.
13. Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. // Phys. Status Solidi A. 2022. V. 219. № 9. P. 2100400.
<https://doi.org/10.1002/pssa.202100400>