

ЭЛЕКТРОНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.372.632

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

© 2023 г. В. В. Кузнецов<sup>а,\*</sup>, В. В. Андреев<sup>а,\*\*</sup>

*а*Калужский филиал Московского государственного университета им. Н.Э. Баумана  
Россия, 248000, Калуга, ул. Баженова, 2

\*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.

## 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, НВМ) 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],

**Рис. 1** показана на рис. 1.

При достижении порогового напряжения  $V_{t1}$  активируется тиристорный эффект, 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 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  $\tau$  определяется из следующего выражения [7]:

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

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

Блок-схема установки показана на рис. 2.

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 Г<sub>выб</sub>/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.

Рис. 3

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 получают 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  $I_{l2}$ , 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].

Рис. 4

Рис. 5

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 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  $V_{l1}$  (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.

Рис. 6, 7

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  $V_{I1}$  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 TLP-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 испытуемых ИМС, характеризующие входные защитные цепи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Ильин А.Б., Пияков 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. <https://doi.org/10.1109/ICSICT.2008.4734537>
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/EOSESD.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/TEMC.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>



## СПИСОК РИСУНКОВ

**Рис. 1.** Типичная ВАХ защитного элемента тиристорного типа.

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

**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.

нарисовать стрелки

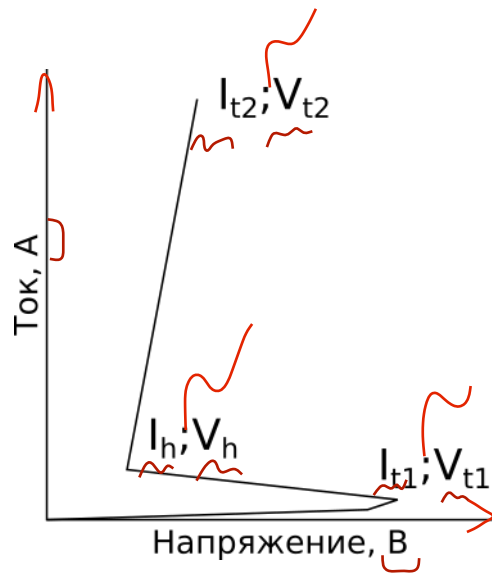


Рис. 1

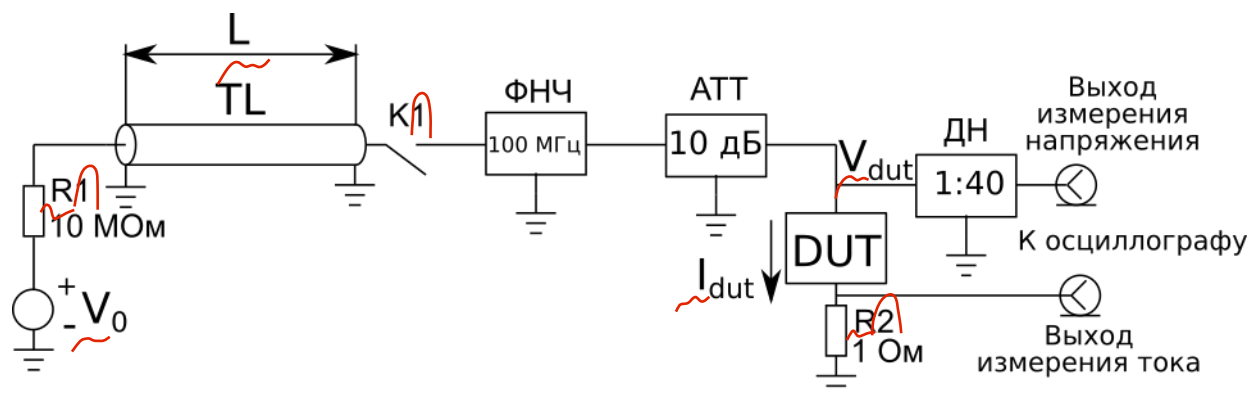


Рис. 2

цифры - курсив

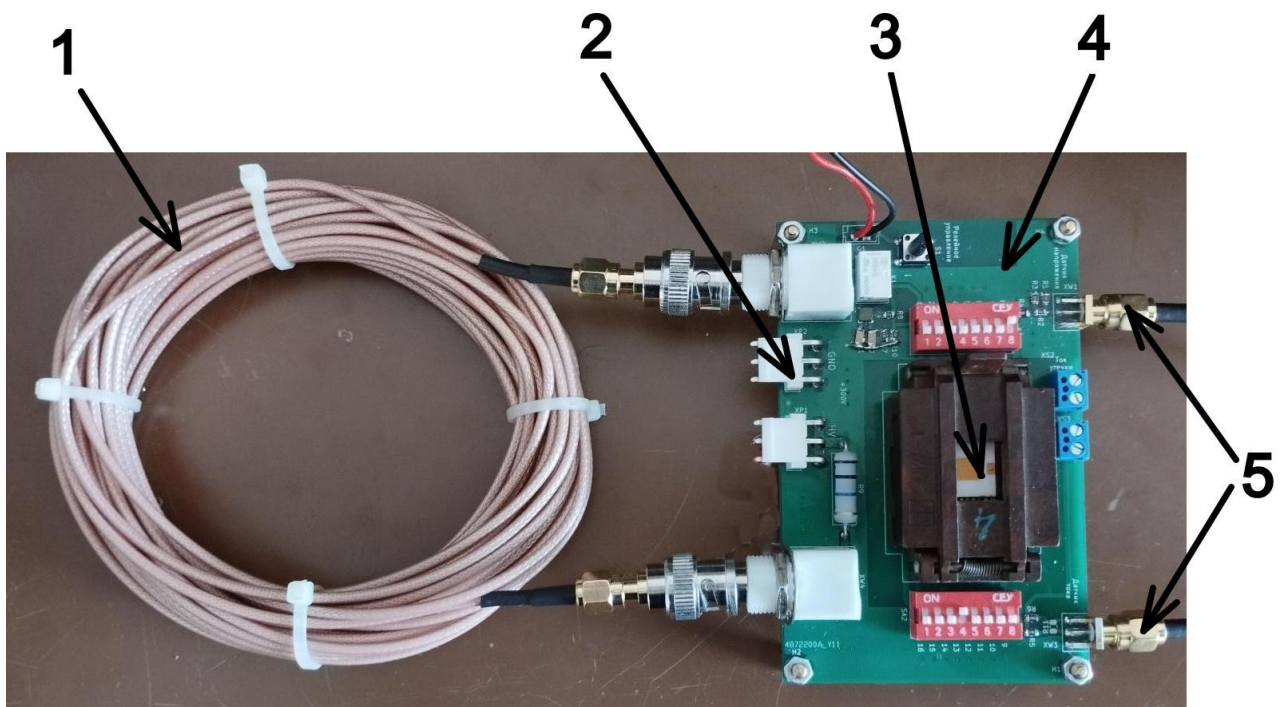
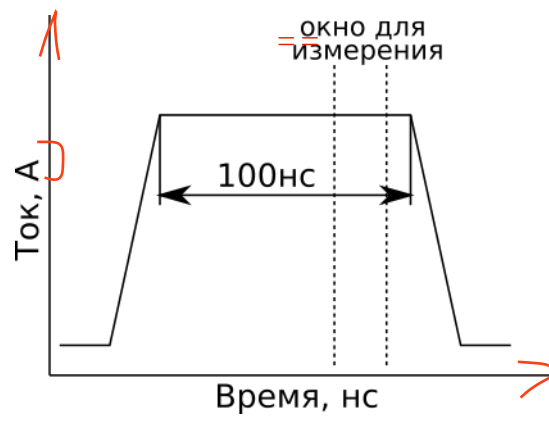


Рис. 3.



**Рис. 4.**

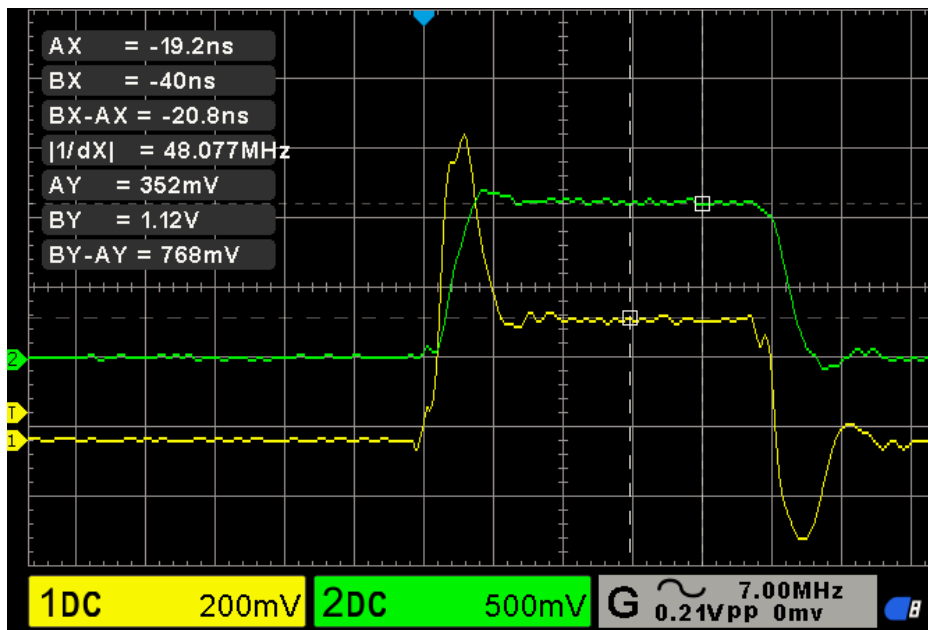


Рис. 5.

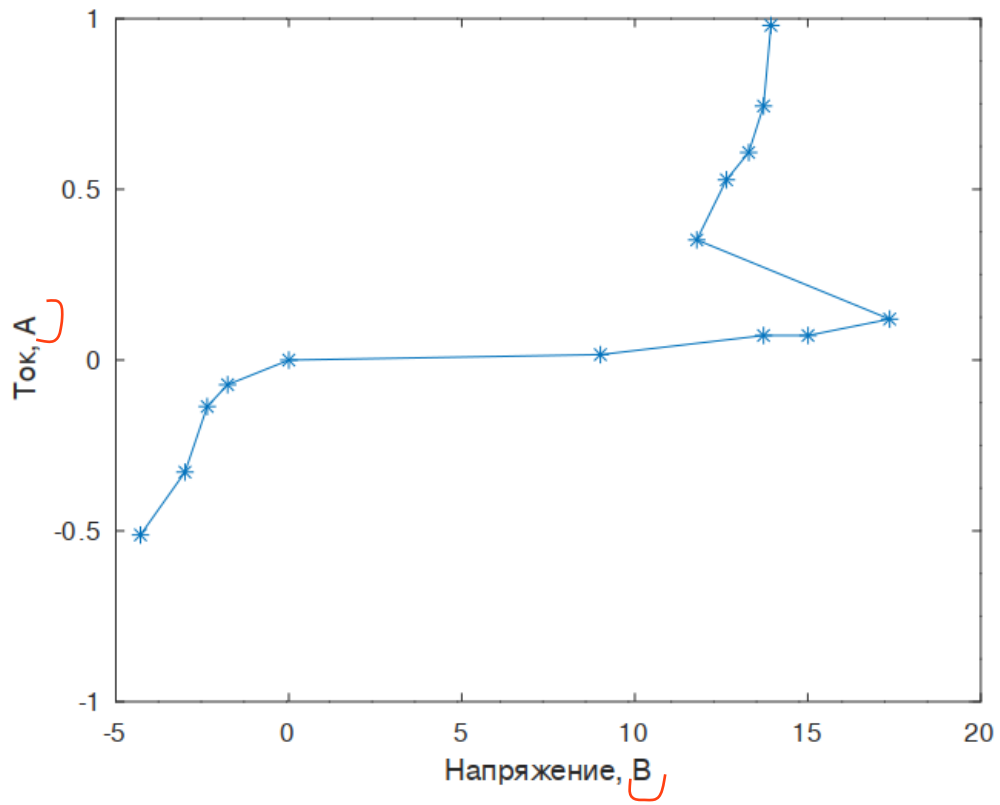


Рис. 6.

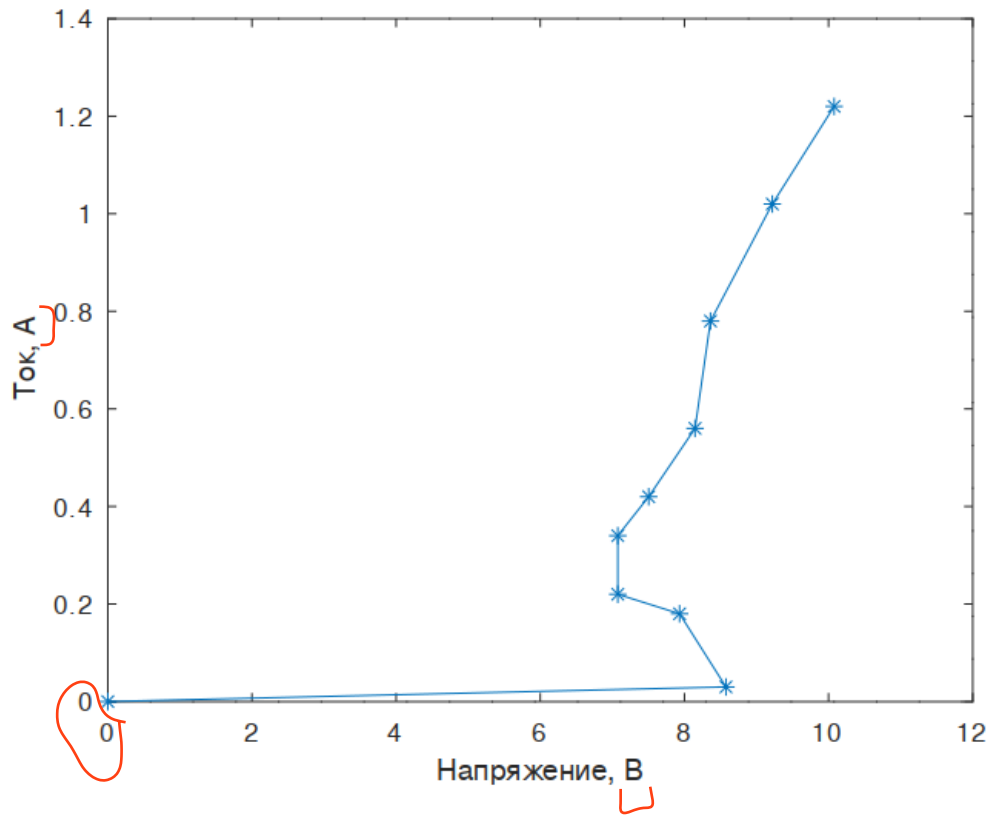


Рис. 7.

общий нуль



#### ДЛЯ СВЯЗИ С АВТОРАМИ:

*Кузнецов Вадим Вадимович*, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 248000, Россия, Калуга, ул. Баженова, д.2; кафедра «Конструирование и производство электронной аппаратуры», к.т.н., доцент, тел.: (4842) 57-81-88; e-mail: [vadim.kuznetsov@bmstu.ru](mailto:vadim.kuznetsov@bmstu.ru)

*Андреев Владимир Викторович*, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 248000, Россия, Калуга, ул. Баженова, д.2; кафедра «Конструирование и производство электронной аппаратуры», д-р техн. наук, профессор, тел.: (4842) 57-81-88; e-mail: [vladimir\\_andreev@bmstu.ru](mailto:vladimir_andreev@bmstu.ru)

#### В ПОМОЩЬ ПЕРЕВОДЧИКУ:

*Kuznetsov Vadim Vadimovich*, Bauman Moscow State University, Kaluga branch; 248000, Russia, Kaluga, Bazhenov str. 2; Department of Electronic Engineering, Ph.D., Associate Professor, Tel .: (4842) 57-81-88; E-mail: [vadim.kuznetsov@bmstu.ru](mailto:vadim.kuznetsov@bmstu.ru)

*Andreev Vladimir Viktorovich*, Bauman Moscow State University, Kaluga branch; 248000, Russia, Kaluga, Bazhenov str. 2; Department of Electronic Engineering, Dr.Tech.Sc., Professor, Tel .: (4842) 57-81-88; E-mail: [vladimir\\_andreev@bmstu.ru](mailto:vladimir_andreev@bmstu.ru)

### **Transmission line pulse setup for electrostatic discharge robustness testing of the semiconductor devices**

#### **Abstract**

An original transmission line pulse setup has been presented. This test setup allows to measure quasi-static I–V curves of the semiconductor devices and electrostatic discharge protection and investigate the electrostatic discharge robustness of the integrated circuits. The setup allows to perform both destructive and nondestructive tests. The designed test setup allows to perform transmission line pulse test using 100ns pulse with current peak value up to 10 A according to the IEC62615 international standard.

**Keywords:** electrostatic discharge, transmission line pulse, integrated circuit, semiconductor device

