

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.12>

УДК: 621.382.323

ВЛИЯНИЕ ЁМКОСТИ ПОСАДОЧНОГО МЕСТА ТРАНЗИСТОРА НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

А.А. Дроздова, И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, ул. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2022 г.

Аннотация. В работе представлена оценка устойчивости полевых транзисторов к воздействию электростатического разряда. Она выполнена для двух полевых транзисторов разного типа проводимости, IRFZ46N и IRF4905 SPbF, в разных корпусах ТО-220 и ТО-263, с учётом и без учёта ёмкости посадочного места. Представлены аналитическая и квазистатическая модели посадочных мест корпусов транзисторов и с их помощью выполнен анализ собственных и взаимных ёмкостей с учётом и без учёта слоя припоя. Анализ показал, что слой припоя на электродах транзистора увеличивает ёмкость затвор-исток и сток-исток в 1,7 раза для транзистора IRFZ46N и в 2,2 раза для транзистора IRF4905 SPbF. На основе вычисленных ёмкостей создана схемотехническая модель транзистора, учитывающая корпус и посадочное место со слоем припоя. Приведены схема и модель для оценки устойчивости транзисторов к воздействию электростатического разряда в схемотехническом симуляторе. Анализ результатов моделирования и экспериментов показал, что ёмкость посадочного места с учётом слоя припоя оказывает значительное влияние на пробивное напряжение подзатворного диэлектрика транзистора при воздействии электростатического разряда. Показано, что критическими амплитудами

напряжения электростатического разряда для работоспособности транзисторов IRFZ46N в корпусе ТО-220 и IRF4905 SPbF в корпусе ТО-263 с учётом ёмкости посадочного места являются 3,05 и 4,75 кВ, а без учёта эти значения выше на 0,2-0,25 кВ. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало различие не более 2%.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электростатический разряд, электронные компоненты, транзистор, напряжение пробоя.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект №19-79-10162.

Автор для переписки: Дроздова Анастасия Александровна, anastasiya.drozdova.00@list.ru

Введение

С ростом степени интеграции электронных компонентов, возрастает чувствительность современных радиоэлектронных средств (РЭС) к воздействию электростатического разряда (ЭСР). Высокая чувствительность РЭС к воздействию ЭСР приводит к возникновению в них необратимых и катастрофических отказов [1]. Статистика [2] показывает, что примерно половина (47%) отказов вызвана воздействием ЭСР. Другая половина связана с качеством компонентов (30%), особенностями их применения (13%), влажностью и температурой воздуха при их эксплуатации (10%). Устойчивость РЭС к воздействию ЭСР, в основном, определяют компоненты и конструкция устройства в целом. Так, анализ воздействия ЭСР на биполярные интегральные схемы (ИС) показал, что у 90% ИС повреждены внутренние *p-n* переходы транзисторов, а у 10% разрушена металлизация, тогда как пробой диэлектрика происходил у 27% ИС [3]. Существенное влияние воздействие ЭСР оказывает на микроконтроллер (МК), вызывая более 10 видов его отказов (выключение, перезапуск, перезапись и считывание неправильных кодов и т.д.), основной причиной которых являются импульсные помехи, наведённые на проводники

печатной платы (ПП) [4]. Так, последовательное воздействие импульсов ЭСР амплитудой 6,4 кВ вызывает отказ 33,4% МК, а 6,5 кВ – 100% [5].

Структуры транзисторов типа металл-оксид-полупроводник (МОП) [6], широко используемые в интегральных схемах (ИС), наиболее чувствительны к воздействию ЭСР. Так, моделирование воздействия ЭСР на МОП-транзисторы [7] показало, что транзисторы с меньшей ёмкостью затвор-исток более чувствительны к воздействию ЭСР, а следовательно, напряжение пробоя подзатворного диэлектрика напрямую зависит от ёмкостей затвор-исток и затвор-сток. Кроме того, паразитные ёмкости посадочных мест, областей перекрытия каналов и переходных отверстий ПП оказывают существенное влияние на быстродействие транзисторов и РЭС в целом [8]. ПП, заряженная до потенциала порядка 100 В, с последующим воздействием ЭСР, может привести к серьёзным последствиям и оказать негативное влияние на работу компонента, вплоть до его полного отказа [9]. Используя модель заряженной ПП для воздействия ЭСР, активно исследуют влияние ёмкости ПП ($C_{ПП}$) на отказы, связанные с пробоем диэлектрика транзистора. Так, в [10] установлена связь между напряжением ЭСР, при котором происходит пробой подзатворного диэлектрика и $C_{ПП}$. Выявлено, что увеличение $C_{ПП}$ приводит к уменьшению напряжения ЭСР, при котором происходит пробой. Некорректный анализ взаимных электромагнитных связей проводников и посадочных мест со слоем припоя на электродах электронных компонентов, расположенных на ПП, могут привести к более серьёзным последствиям и негативно влиять на работу РЭС [11].

В настоящее время широко применяются различные корпуса для транзисторов, выпрямителей, линейных стабилизаторов напряжения и пр. полупроводниковых приборов. Так, типоразмеры корпусов для поверхностного монтажа ТО-220 [12] (рисунок 1а) и ТО-263 [13] (рисунок 1б) используются при проектировании и создании различных РЭС, содержащих данные виды полупроводниковых приборов. Учёт паразитных параметров ПП позволит повысить их надёжность и отказоустойчивость при воздействии ЭСР. При

проектировании РЭС целесообразно учитывать паразитную ёмкость посадочного места с учётом слоя припоя на электродах компонента, в том числе в целях защиты компонента от последствий воздействия ЭСР.

Целью работы является оценка влияния ёмкости посадочного места транзистора на его устойчивость к воздействию ЭСР.

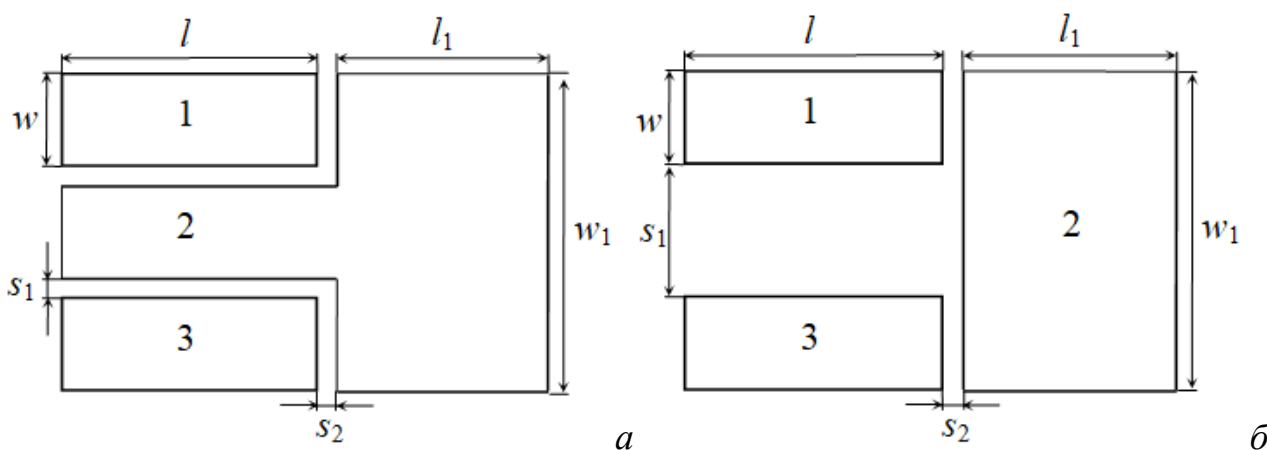


Рис. 1. Вид посадочных мест для корпусов ТО-220 (а) и ТО-263 (б)

1. Аналитические и квазистатические модели посадочных мест для расчёта ёмкостей

Поскольку форма поперечного сечения посадочного места транзистора может представлять собой несколько микрополосковых линий передачи определённой длины, справедливо воспользоваться комбинацией аналитических моделей Шнайдера [14] и Уилира [15] для расчёта погонных ёмкостей, а учёт длины (l и l_1) проводников позволит вычислять значения собственных ёмкостей проводников посадочного места. Исходными данными для вычисления являлись: ширина (w и w_1) и толщина (t) посадочного места с учётом слоя припоя, а также толщина (h) ПП и её относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r). Толщина посадочного места с учётом слоя припоя вычислялась как

$$t = t_\phi + t_n + t_э, \quad (1)$$

где t_ϕ – толщина фольги ПП в месте расположения посадочного места без учёта слоя припоя ($t_\phi = 35$ мкм), t_n – толщина пайки ($t_n = 200$ мкм), $t_э$ – толщина электродов транзистора ($t_э = 500$ мкм).

Тогда, погонная ёмкость

$$C = \frac{112,2 \varepsilon_{эфф}}{\ln \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{8h}{w_{эфф}} \left[\frac{8h}{w_{эфф}} + \sqrt{\left(\frac{8h}{w_{эфф}} \right)^2 + \pi^2} \right] \right\}}, \quad (2)$$

где

$$w_{эфф} = w + \frac{t}{h} \ln \left\{ 4e \cdot \left[\left(\frac{t}{h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\pi \left(\frac{w}{t} + 1,01 \right)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\},$$

$$\varepsilon_{эфф} = 0,5 \left(\varepsilon_r + 1 + (\varepsilon_r - 1) \cdot \left[1 + \frac{10h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \right).$$

При этом выражение для определения эффективной ширины проводника $w_{эфф}$ справедливо для любой ширины проводников и толщины ПП [15], а погрешность вычисления для $\varepsilon_{эфф}$ составляет не более 1% при условии, что $0,05 \leq w/h < 20$ и $\varepsilon_r \leq 16$ [14].

Вычисление значений взаимных ёмкостей проводилось, используя аналитическую модель, которая справедлива для случая, когда проводники имеют бесконечно малую толщину ($t \rightarrow 0$) [16]. Исходными данными для вычисления взаимных ёмкостей по аналитической модели являются: w и w_1 – ширина проводников, s_1 и s_2 – расстояние между проводниками. Тогда, ёмкость

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{\pi} l \left(\frac{k_1}{(1 - k_1^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{k_2}{(1 - k_2^2)^{\frac{1}{2}}} \right), \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2,$$

$$k_1 = \frac{p}{p+2} \sqrt{\frac{2p}{p+1}},$$

$$k_2 = \tan\left(\frac{p\pi}{4(p+1)}\right) \left(\tan\left(\frac{(p+2)\pi}{4(p+1)}\right) \right)^{-1},$$

$$p = \frac{w}{s}.$$

Используя выражения (1)-(3), возможно выполнить расчёт паразитных ёмкостей для геометрических моделей посадочных мест транзисторов (рисунок 1).

Используя модуль «МOM3D» в ПО TALGAT [17], разработаны квазистатические модели посадочных мест для заданных типоразмеров (ТО-220 и ТО-263) корпусов транзисторов (рисунок 2) по значениям (таблица 1) их геометрических параметров. Модели гибки к изменению значений этих параметров и позволяют рассчитать матрицы электростатической индукции посадочных мест с учётом и без учёта слоя припоя.

Таблица 1. Геометрические параметры посадочных мест для корпусов ТО-220 и ТО-263

Параметр, мм	ТО-220	ТО-263
l	5	3,81
w	2	2,08
s_1	0,5	3
s_2	5	5,08
l_1	15	8,89
w_1	11	11,43

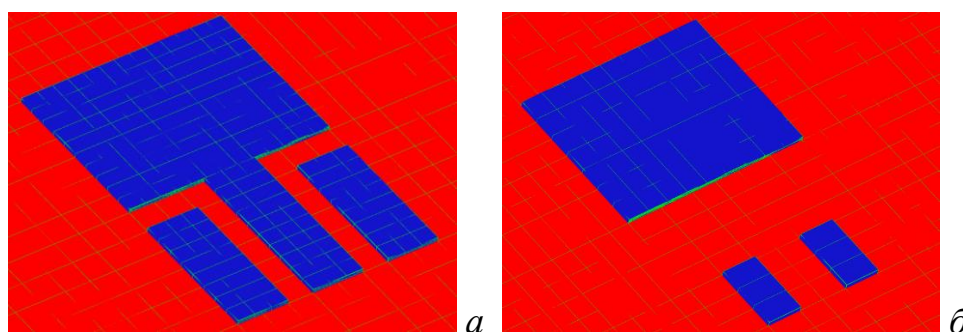


Рис. 2. Геометрические модели посадочных мест в системе TALGAT для корпусов ТО-220 (а) и ТО-263 (б)

2. Результаты расчёта ёмкостей посадочных мест

Для оценки влияния ёмкости посадочного места на амплитуду напряжения пробоя при воздействии ЭСР выбраны полевые транзисторы IRFZ46N и IRF4095 SPbF, с n - и p -типами проводимости. Транзисторы, в основном, используются в импульсных источниках электропитания, стабилизаторах и преобразователях тока и напряжения, а также в схемах управления электродвигателями и прочими узлами и блоками РЭС. Транзисторы выбраны двух типоразмеров корпусов (ТО-220 и ТО-263) при их горизонтальном размещении на ПП. Используя схемотехнические модели корпусов и модель Шихмана-Ходжеса для транзисторов [18], вычислены статические передаточные вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рисунок 3) в программе LTspice [19].

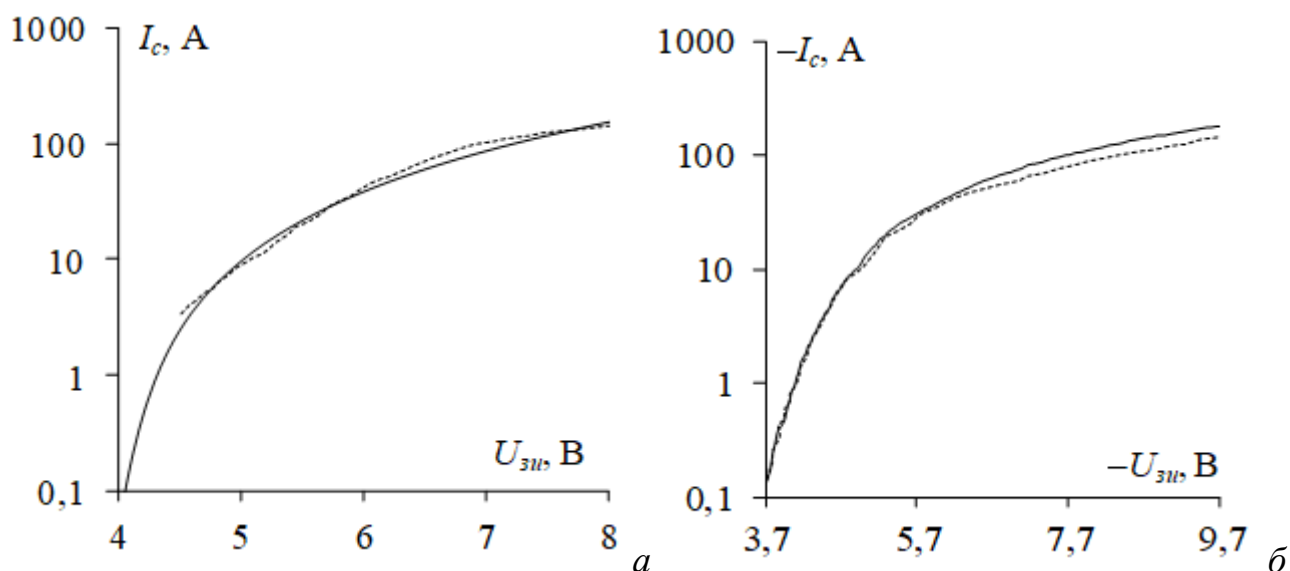


Рис. 3. Передаточные ВАХ транзисторов IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б), полученные в LTspice (—) и из технической документации (- -)

Из рисунка 3 видно, что ВАХ согласуются с представленными в технической документации [20, 21]. При этом максимальное отклонение значений составляет не более 20% для транзистора IRFZ46N и не более 15,2% – для IRF4095 SPbF. Такое отклонение может быть объяснено оцифрованной из технической документации ВАХ с логарифмической шкалой.

Выполнен расчёт значений собственных и взаимных ёмкостей, используя аналитические и квазистатические модели (таблица 2). Расчёт по аналитической модели выполнен без учёта слоя припоя, поскольку модель (3) не учитывает

толщину проводника. Для расчёта по квазистатическим моделям сначала выполнено вычисление матриц коэффициентов электростатической индукции, после чего выполнен их пересчёт в матрицу ёмкостей. При этом диагональные коэффициенты C_{11} , C_{22} и C_{33} являются собственными ёмкостями затвора, стока и истока, соответственно. Тогда как внедиагональные C_{12} (C_{21}), C_{13} (C_{31}) и C_{23} (C_{32}) являются взаимными ёмкостями затвор-сток, затвор-исток и сток-исток, соответственно.

Таблица 2. Ёмкости посадочных мест для полевых транзисторов, вычисленные без (1) и с (2) учётом слоя припоя на электродах

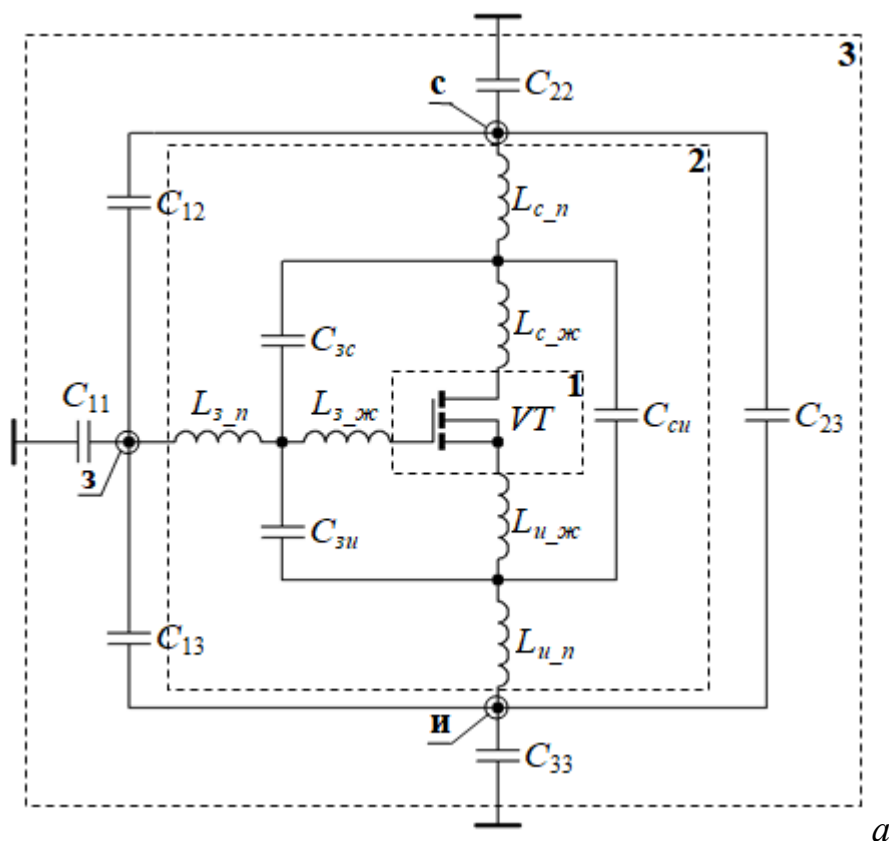
Модель		C, фФ	
		Аналитический расчёт	Квазистатический расчёт
IRFZ46N (TO-220)	1	$\begin{bmatrix} 491,5 & 124 & 6,1 \\ 124 & 5656,9 & 124 \\ 6,1 & 124 & 491,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 422,3 & 115,1 & 4,1 \\ 115,1 & 5739,7 & 115,1 \\ 4,1 & 115,1 & 422,3 \end{bmatrix}$
	2	–	$\begin{bmatrix} 450,4 & 196,8 & 6,6 \\ 196,8 & 5877,8 & 196,8 \\ 6,6 & 196,8 & 450,4 \end{bmatrix}$
IRF4095SPbF (TO-263)	1	$\begin{bmatrix} 382,9 & 8,7 & 8,7 \\ 8,7 & 3041 & 14,1 \\ 14,1 & 8,7 & 382,9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 399,2 & 6,7 & 10,8 \\ 6,7 & 3287 & 6,7 \\ 10,8 & 6,1 & 399,2 \end{bmatrix}$
	2	–	$\begin{bmatrix} 434,8 & 13,9 & 23,5 \\ 13,9 & 3395 & 13,9 \\ 23,5 & 13,9 & 434,8 \end{bmatrix}$

Из таблицы 2 видно, что слой припоя на электродах транзистора IRFZ46N несущественно (менее 7%) изменил собственные ёмкости. Однако, взаимные ёмкости затвор-сток и сток-исток увеличились в 1,7 раза, а затвор-исток – в 1,6 раза. Для транзистора IRF4095 SPbF слой припоя приводит к незначительному увеличению (менее 9%) собственных ёмкостей, при этом взаимные ёмкости увеличились в 2,2 раза. Из этого следует, что наибольшие изменения будут у паразитных ёмкостей затвор-сток и сток-исток для обоих транзисторов. Стоит отметить, что собственная ёмкость стока и взаимная ёмкость затвор-стока для корпуса TO-220 (IRFZ46N) в 1,7 и 14,2 раза больше, чем для TO-263 (IRF4095 SPbF), при этом взаимная ёмкость затвор-исток в

3,6 раза меньше, что связано с конструктивной особенностью транзистора IRF4095 SPbF, а именно, отсутствием центрального вывода корпуса для стока. При этом максимальные отклонения результатов аналитического и квазистатического расчётов составляют для собственных ёмкостей 14%, а взаимных – 23%. Однако, для транзистора IRFZ46N в корпусе TO-220 максимальное отклонение для C_{13} (C_{31}) составило 33%. Оно связано с тем, что при расчёте взаимной ёмкости между проводниками 1 и 3 (рисунок 1а), учитывалось лишь расстояние от начала первого проводника до конца третьего, поскольку аналитическая модель (3) подходит только для двухпроводной линии. Таким образом, при расчёте взаимных ёмкостей необходимо учитывать данные ограничения.

3. Создание моделей для анализа воздействия ЭСР на транзисторы

Для учёта посадочного места транзистора при моделировании воздействия ЭСР, создана схемотехническая модель (рисунок 4а), которая состоит из транзистора 1, его корпуса 2 и посадочного места 3. SPICE модели [22] транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF без учёта паразитных параметров корпуса и посадочного места представлены на рисунке 4б. Для учёта посадочного места 3, использовались вычисленные значения ёмкостей (таблица 2). Данная модель учитывает слой припоя и ёмкостные связи посадочного места, которые могут быть учтены при моделировании воздействия ЭСР и детальном анализе целостности сигнальных и питающих цепей при проектировании ПП.



```
.model IRFZ46N VDMOS(Rg=2.0 Vto=4 Rd=3.8m Rs=0.0m Rb=6.0m Kp=19 Cgdmax=3n
Cgdmin=0.01n Cgs=1.20n Cjo=0.9n Is=0.5p tt=67n ksubthres=.1
mfg=International_Rectifier Vds=55 Ron=12.8m Qg=72n)
```

```
.SUBCKT irf4905slpbf 1 2 3 M1 9 7 8 8 MM L=100u W=100u
.MODEL MM PMOS LEVEL=1 IS=1e-32 VTO=-3.97259 LAMBDA=0 KP=26.9225
CGSO=3.0512e-05 CGDO=1e-11 RS 8 3 0.0102272 D1 1 3 MD
.MODEL MD D IS=1.94089e-08 RS=0.00286204 N=1.32392 BV=55 IBV=0.00025 EG=1
XTI=4 TT=1e-07 CJO=3.17458e-09 VJ=1.30108 M=0.464932 FC=0.5
RDS 3 1 1e+07 RD 9 1 0.0001 RG 2 7 5.01762 D2 5 4 MD1
.MODEL MD1 D IS=1e-32 N=50 CJO=3.59776e-09 VJ=0.682035 M=0.560604 FC=1e-08
D3 5 0 MD2
.MODEL MD2 D IS=1e-10 N=0.4 RS=3e-06 RL 5 10 1
FI2 7 9 VF12 -1 VF12 4 0 0 EV16 10 0 9 7 1 CAP 11 10 7.39273e-09 FI1 7 9
VF11 -1 VF11 11 6 0 RCAP 6 10 1 D4 6 0 MD3
.MODEL MD3 D IS=1e-10 N=0.4
.ENDS irf4905slpbf
.SUBCKT irf4905slpbf 3 0
.ENDS irf4905slpbf
```

б

Рис. 4. Схемотехническая модель транзистора с посадочным местом и учётом слоя припоя (а) и её SPICE модель для транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF (б)

Принципиальная электрическая схема имитатора ЭСР [23], используемая для моделирования воздействия ЭСР на транзистор, представлена на рисунке 5а. Достоверность данной модели подтверждена результатами эксперимента [23] и

стандартом [24] при напряжении 4 кВ. Вычислены формы тока ЭСР (рисунок 5б) при изменении напряжения от 2 до 8 кВ, используя вышеуказанную модель.

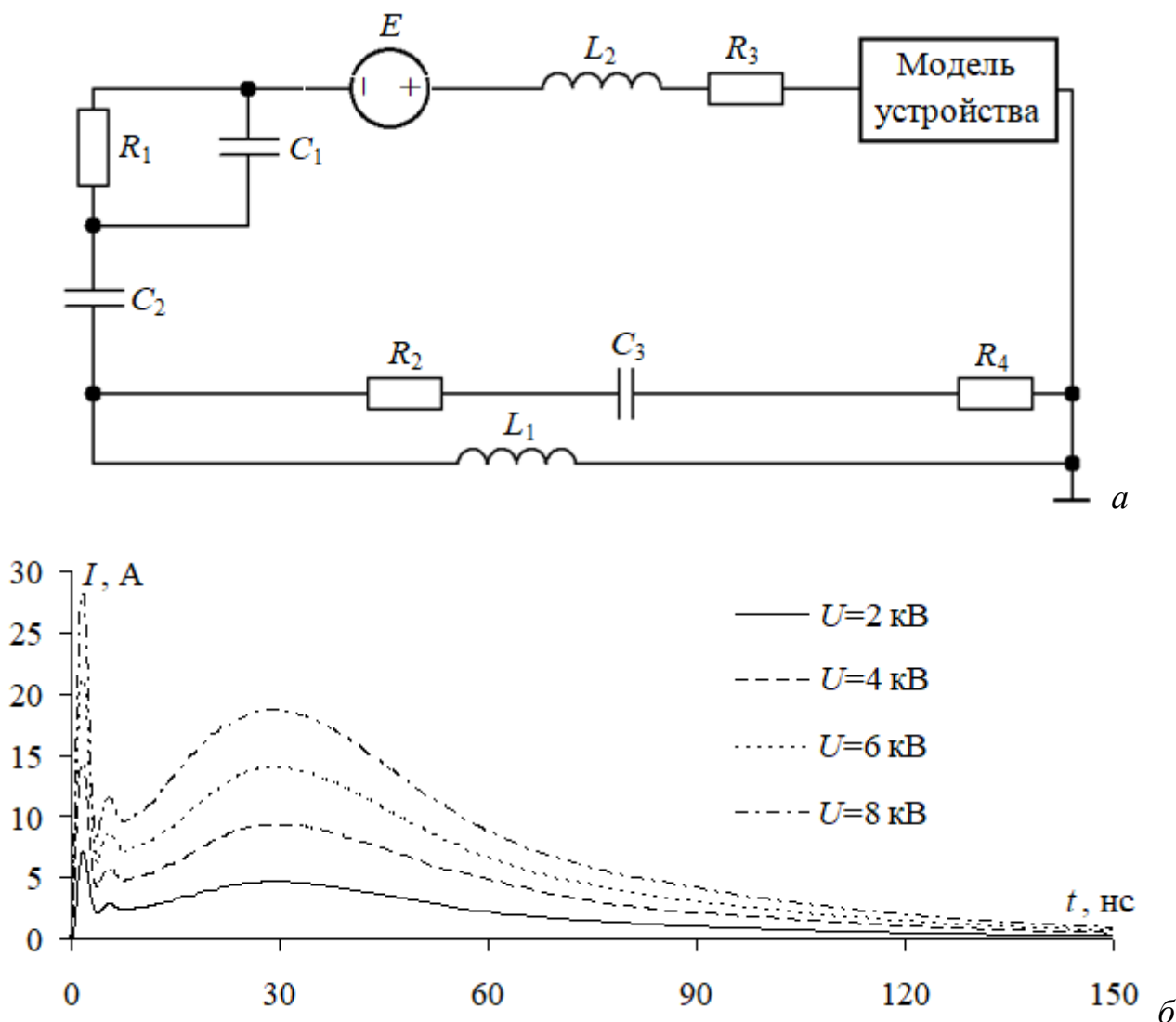
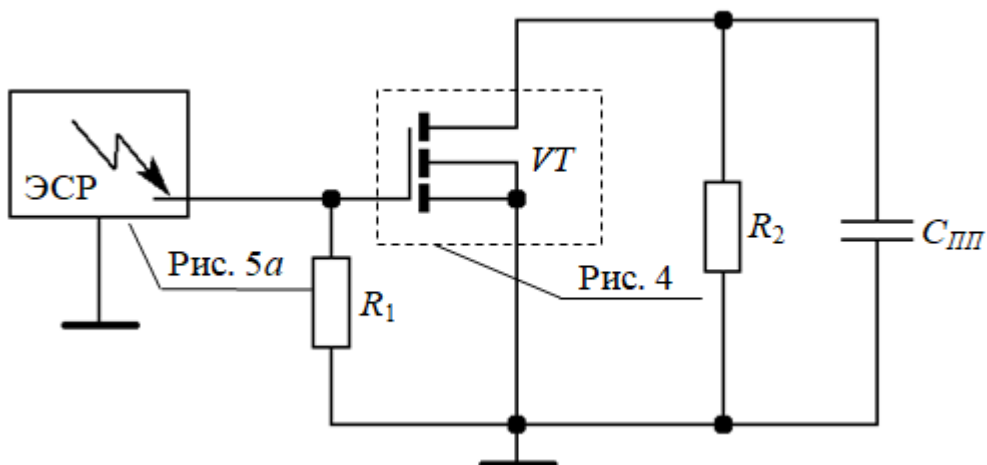


Рис. 5. Принципиальная схема имитатора ЭСР (а) и формы тока при напряжениях 2–8 кВ (б)

Оценка устойчивости транзисторов к воздействию ЭСР проводилась, используя схему из рисунка 6а, SPICE модель которой представлена на рисунке 6б. Схема включает: имитатор ЭСР (рисунок 5а), два резистора R_1 и R_2 , обеспечивающие выравнивание потенциалов на электродах транзистора, а также ёмкости ($C_{ПП}$) ПП и посадочного места транзистора с его паразитными параметрами корпуса (рисунок 4а).



a

```

XX1 N004 0 esd_gun
R1 N004 0 47k
C1 0 N001 220p
L2 N004 N005 1000p
L3 N005 N006 0.001p
L4 N003 N002 60p
L5 N002 N001 240p
L6 N009 N007 0.001p
L7 0 N009 1300p
C3 N002 N005 65f
C5 N005 N009 65f
C6 N002 N009 95f
R2 N001 0 1k
C2 N010 N001 450.4f
C4 N001 0 5877.8f
C7 N010 0 450.4f
M2 N003 N006 N007 N007
C8 N001 N008 196.8f
C9 N008 0 6.6f
C10 N001 0 196.8f

.subckt esd_gun ESD GROUND
RL N004 ESD 2
Ltip N001 N004 0.152uH
Cg 0 N006 18.2pF
Lg 0 N005 2.7uH
Rg N006 N005 50
Cgun N003 N005 150pF
Cprs N002 N003 2.75pF
Rgun N002 N003 330
V1 N001 N002 PULSE(0 -3950 0 1n 1n 300n)
R1 GROUND 0 0.0001
.ends esd_gun
.model NMOS NMOS
.lib
C:\Users\User\AppData\Local\LTspice\XVII\lib\cm
p\standard.mos
.param UESR={4000}
.tran 100n
.end
    
```

б

Рис. 6. Принципиальная электрическая схема воздействия ЭСР на транзисторы (*a*) и её SPICE модель (*б*)

4. Экспериментальная установка

Проведены экспериментальные исследования по воздействию ЭСР на электроды транзисторов. Лабораторный макет ПП с установленным транзистором IRFZ46N (IRF4905 SPbF) представлен на рисунке 7а. Для измерения передаточной ВАХ транзистора в цепь затвор-исток включён делитель напряжения на сопротивлениях $R_1 = R_2 = 1$ кОм, а в цепь стока включались два параллельно соединённых резистора ($R = 47$ Ом) с общим сопротивлением $R_3 = 23,5$ Ом и суммарной мощностью 20 Вт (рисунок 7б). Принципиальная электрическая схема для измерения передаточной ВАХ транзистора представлена на рисунке 7в. Источником электропитания являлся

двухканальный регулируемый лабораторный блок питания QJE QJ5003С III (рисунок 7а).

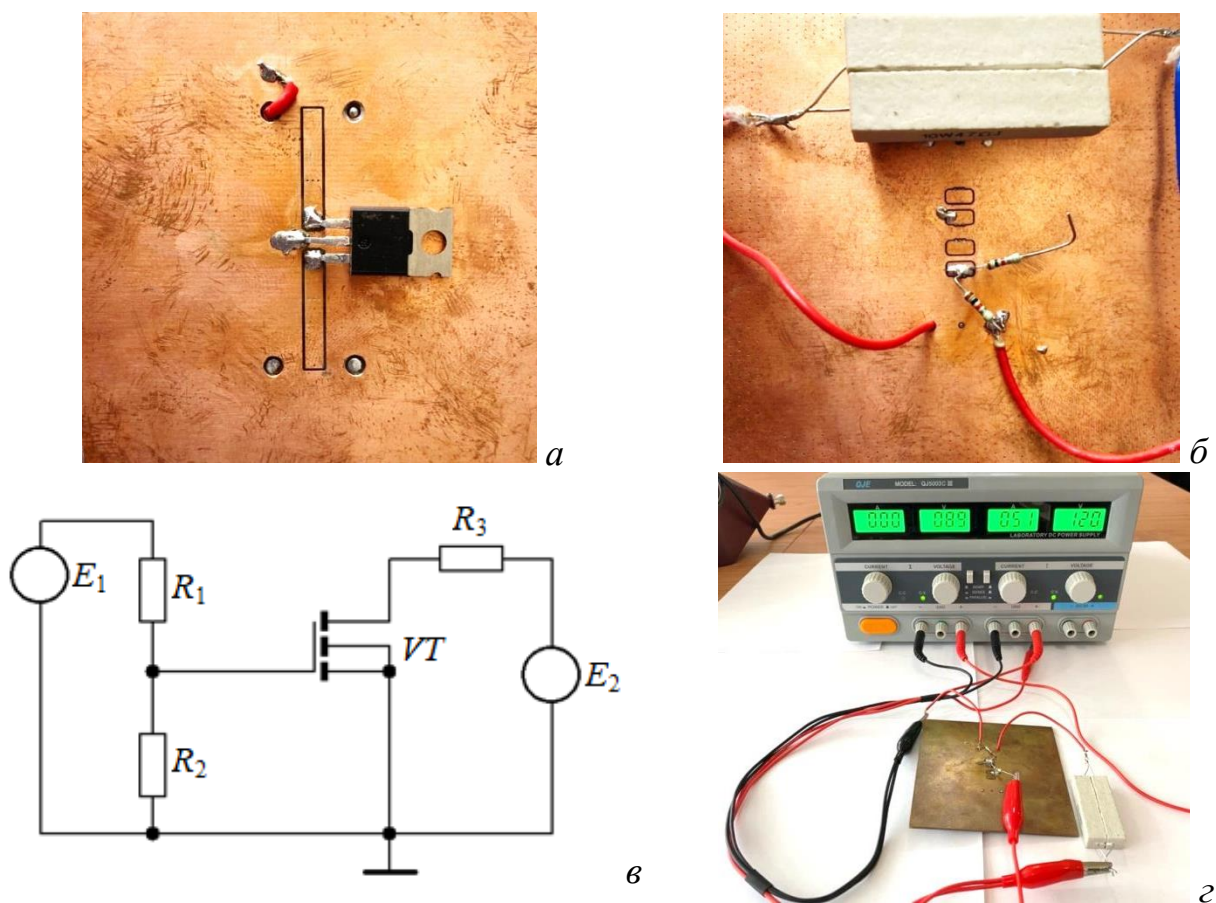


Рис.7. Макет ПП с видами сверху (а) и снизу (б), его принципиальная схема (в) и лабораторная установка (г) для измерения передаточной ВАХ

Используя созданный макет и имитатор ЭСР ONYX 30, собрана экспериментальная установка по воздействию ЭСР на транзисторы IRFZ46N и IRF4095 SPbF (рисунок 8а). Для измерения статических передаточных ВАХ после воздействия ЭСР собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 8б.

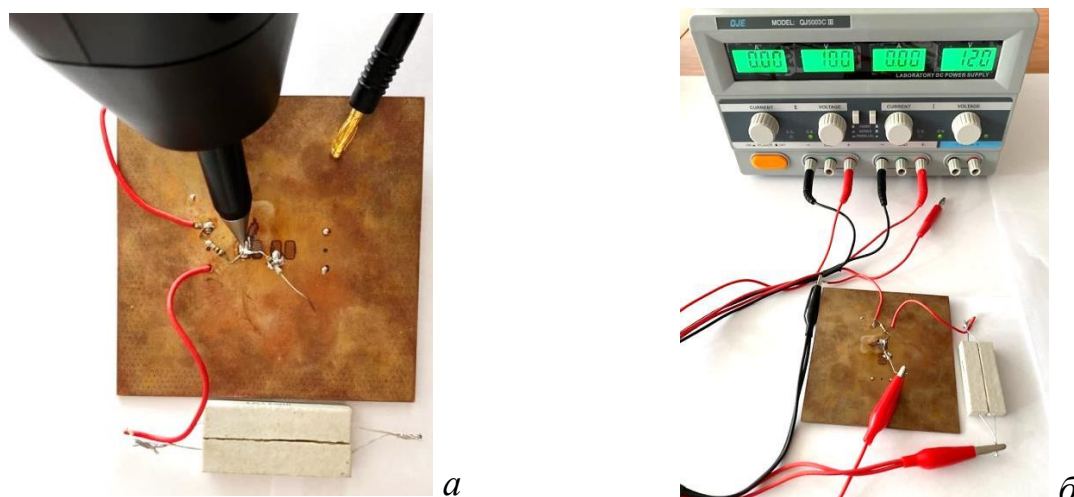
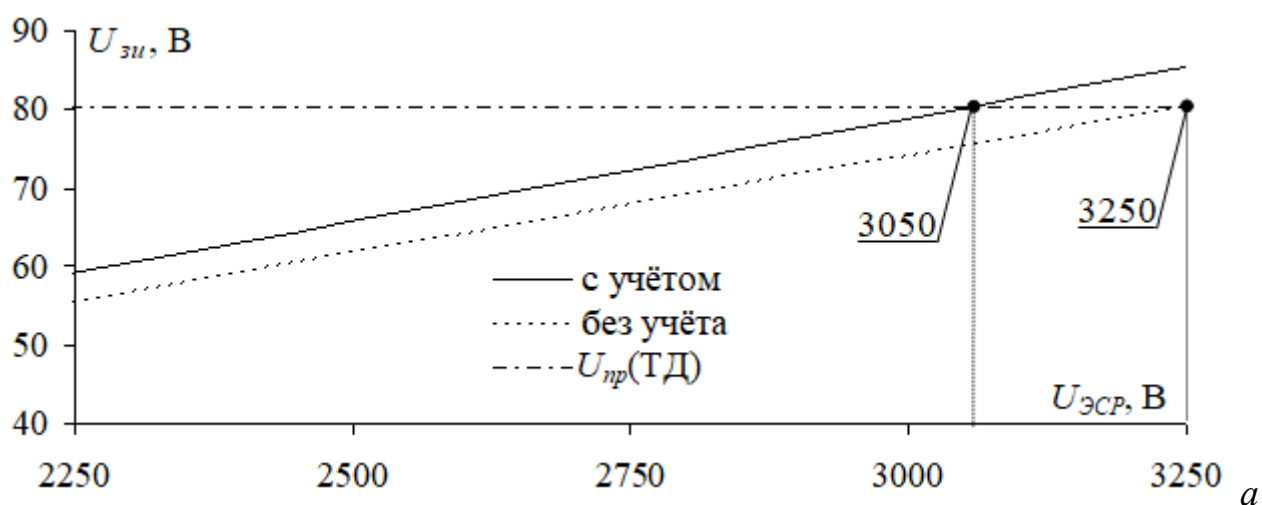


Рис. 8. Экспериментальная установка (а) и измерения ВАХ (б) после воздействия ЭСР для транзистора IRFZ46N

5. Результаты воздействия ЭСР на транзистор

Для анализа влияния ёмкости посадочного места на устойчивость транзисторов к ЭСР, выполнено моделирование воздействия ЭСР на транзистор, используя схему из рисунка ба. В модели учитывалась ёмкость посадочного места транзистора для реальной ПП ($C_{ПП} = 220$ пФ), в т.ч. образованной полигонами для электродов (сток и исток) транзистора. На рисунке 9 представлены зависимости напряжений затвор-исток от напряжения ЭСР с учётом и без учёта ёмкости посадочных мест, а также данные из ТД [25] для напряжения пробоя ($U_{пр}$) подзатворного диэлектрика транзисторов серии IRF, составляющее 80 В.



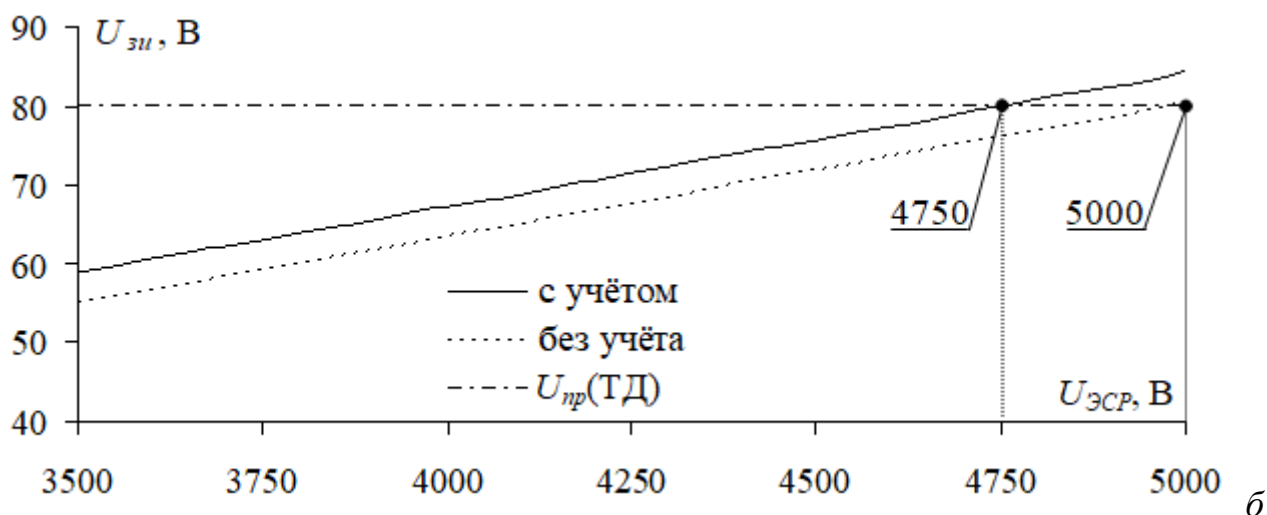


Рис. 9. Зависимости напряжений затвор-исток от напряжения ЭСР с учётом и без учёта ёмкости посадочного места для IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б)

Из рисунка 9а видно, что ёмкости посадочных мест транзисторов оказывают существенное влияние на величину напряжения затвор-исток при воздействии ЭСР. Так, для транзистора IRFZ46N учёт ёмкости посадочного места приводит к уменьшению на 200 В (с 3,25 до 3,05 кВ) воздействующего напряжения ЭСР, при котором происходит пробой подзатворного диэлектрика, а также увеличению на 5 В (с 75,3 до 80,3 В) напряжения затвор-исток. Для транзистора IRF4095 SPbF учёт ёмкости посадочного места приводит к уменьшению напряжения ЭСР на 250 В (с 5 до 4,75 кВ) и увеличению на 7,6 В (с 72,8 до 80,4 В) напряжения затвор-исток. Таким образом, для транзистора IRFZ46N восприимчивость к ЭСР увеличилась на 6,2%, а для IRF4095 SPbF – на 5%. Результаты моделирования воздействия ЭСР на полевые транзисторы с учётом ёмкости посадочных мест указывают на то, что посадочное место оказывает существенное влияние на значение воздействующего напряжения ЭСР, при котором происходит пробой подзатворного диэлектрика транзистора. Стоит отметить, что напряжение затвор-исток при воздействии ЭСР увеличивается линейно. При этом, угловые коэффициенты линейной зависимости $U_{ЭСР}$ от $U_{зи}$ для транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF составляют 0,025 и 0,017, соответственно.

Экспериментальное исследование проведено для двух групп из трёх одинаковых транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF из одной партии в корпусах

ТО-220 и ТО-263. Измерения передаточных ВАХ проводились после постепенного увеличения амплитуды воздействующего напряжения ЭСР от 1 до 3 кВ (шаг 0,5 кВ) для транзистора IRFZ46N и от 1 до 5 кВ (шаг 0,2 кВ) для транзистора IRF4095 SPbF. Усреднённые результаты измерения передаточных ВАХ для транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF приведены на рисунке 10. При этом, измерение ВАХ выполнялось через 1 мин., 3 ч. и 24 ч. В трёх временных интервалах ВАХ после каждого воздействия существенно не изменялась.

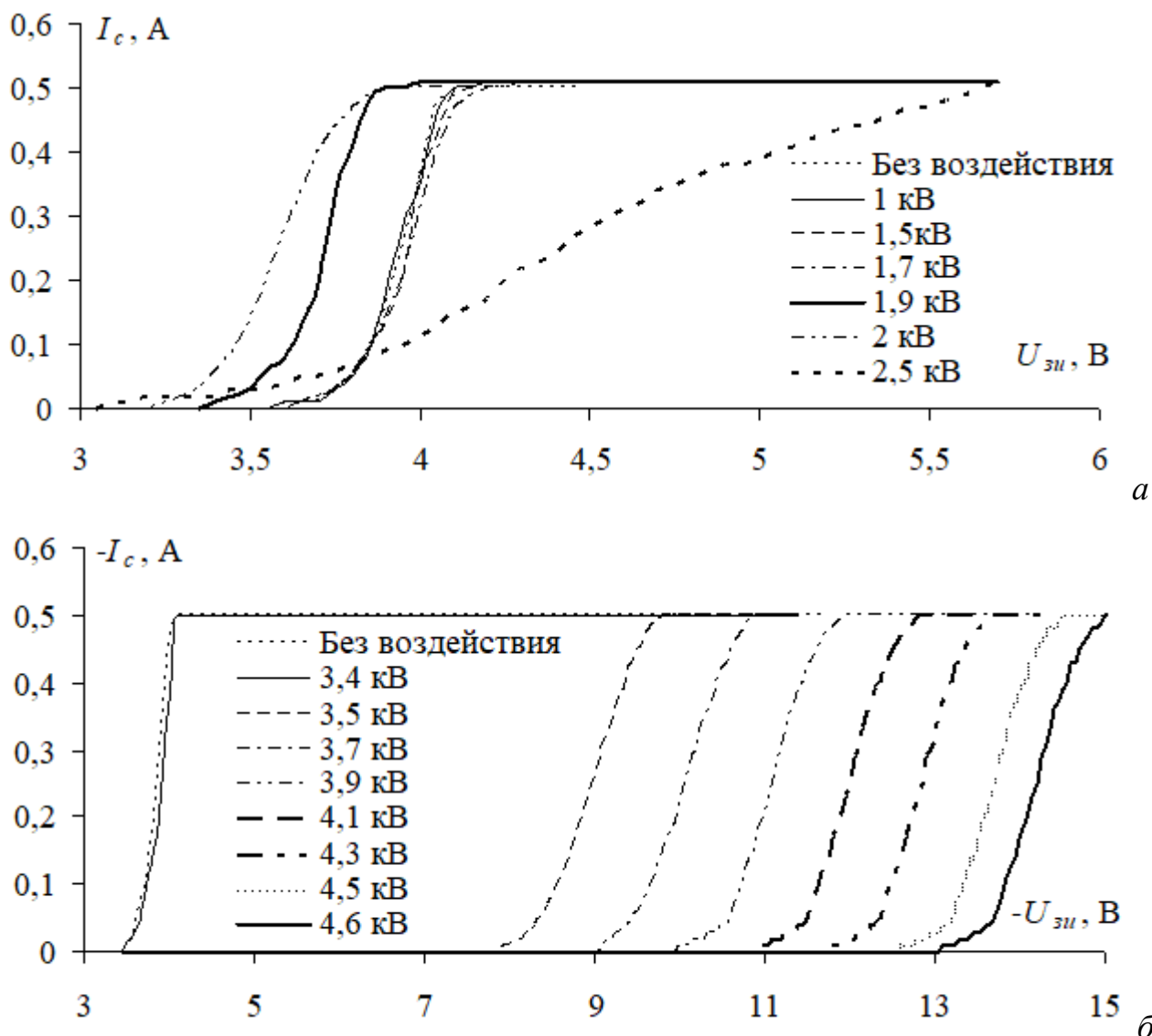


Рис. 10. Измеренные передаточные ВАХ транзисторов IRFZ46N (а) и IRF4095 SPbF (б) после воздействия ЭСР

Из рисунка 10а видно, что ЭСР с амплитудой напряжения 1 и 1,5 кВ не оказывали существенного влияния на передаточную ВАХ транзистора IRFZ46N, а значения крутизны сохранялись в пределах 2-2,2 А/В. Кроме того,

существенных изменений не выявлено в передаточной ВАХ транзистора после воздействия ЭСР с амплитудой 1,7 кВ. Однако, после воздействия ЭСР с амплитудой 1,9, 2 и 2,5 кВ, передаточная ВАХ транзистора существенно изменялась. Так, воздействие ЭСР с амплитудой 1,9 и 2 кВ, привело к смещению передаточной ВАХ транзистора в область более низких значений напряжений на $U_{зи} = 0,2$ В (с 3,8 В до 3,6 В) при 1,9 кВ и $U_{зи} = 0,4$ В (с 3,8 В до 3,4 В), при 2 кВ. При этом значения крутизны ВАХ существенно не изменялись при амплитуде ЭСР 1,9 кВ, тогда как при амплитуде ЭСР 2 кВ крутизна уменьшилась до 1,2 А/В. Воздействие ЭСР с амплитудой 2,5 кВ привело к более существенному снижению в 8–10 раз крутизны передаточной ВАХ до 0,2–0,3 А/В. Воздействие ЭСР с напряжением 3 кВ приводило к пробоем подзатворного диэлектрика, и транзисторы оказывались не работоспособными. Для транзистора IRF4095 SPbF воздействие ЭСР с амплитудой напряжения от 1 до 3,4 кВ не оказывало вредоносного влияния на передаточную ВАХ, при этом крутизна составляла 2–2,2 А/В (рисунок 10б). Однако, после воздействия ЭСР с амплитудой 3,5–4,6 кВ, передаточная ВАХ транзистора смещалась в область высоких значений напряжений. Так, воздействие ЭСР с амплитудой 3,5 кВ привело к смещению передаточной ВАХ транзистора на $U_{зи} = 4,45$ В (с 3,5 В до 7,95 В). С последующим увеличением напряжения ЭСР на 0,1 кВ, передаточная ВАХ смещалась на $U_{зи} = 0,45$ –0,5 В. Так, при ЭСР с напряжением 4,6 В ВАХ сместилась на $U_{зи} = 9,6$ В (с 3,5 В до 13,1 В). При этом значение крутизны уменьшилось в 5–5,5 раз (0,4–0,45 А/В). При воздействии ЭСР с амплитудой напряжения 4,7 кВ происходил пробой подзатворного диэлектрика и транзистор не функционировал.

Таким образом, при моделировании пробой подзатворного диэлектрика транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF происходит при воздействии ЭСР с амплитудой напряжения 3,05 кВ и 4,75 кВ, а при эксперименте – 3 кВ и 4,7 кВ, соответственно. Различие результатов моделирования и эксперимента составило 0,05 кВ (менее 2%), что говорит об удовлетворительной согласованности результатов эксперимента с результатами моделирования.

Заключение

Исследовано воздействие ЭСР на полевые транзисторы, расположенные на ПП, с учётом ёмкости их посадочных мест. Созданы аналитическая и квазистатическая модели посадочных мест корпусов, позволяющие рассчитывать собственные и взаимные ёмкости с учётом слоя припоя и без. Используя данные модели, рассчитаны и проанализированы ёмкости посадочных мест с и без учёта слоя припоя. Анализ показал, что слой припоя на электродах транзистора увеличивает ёмкость затвор-исток и сток-исток в 1,7 раза для IRFZ46N и в 2,2 раза для IRF4905 SPbF. На основе рассчитанных ёмкостей создана схемотехническая модель транзистора, учитывающая корпус и посадочное место со слоем припоя. Для оценки устойчивости транзисторов, создана принципиальная электрическая схема для моделирования воздействия электростатического разряда на транзистор. Из результатов моделирования такого рода, выявлено, что ёмкость посадочного места с учётом слоя припоя значительным образом влияет на значение пробивного напряжения подзатворного диэлектрика транзистора при воздействии ЭСР. Так, показано, что критическими уровнями для работоспособности транзисторов IRFZ46N и IRF4905 SPbF являются 3,05 и 4,75 кВ, в то время как без учёта слоя припоя, составляют 3,25 и 5 кВ соответственно. Следовательно, увеличилась восприимчивость транзисторов IRFZ46N и IRF4095 SPbF на 6,2% и 5%, соответственно. Натурный эксперимент показал, что пробой подзатворного диэлектрика транзисторов IRFZ46N и IRF4905SPbF произошёл при напряжениях 3 и 4,7 кВ, соответственно. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало различие не более 2%. Стоит отметить, что после воздействия ЭСР с амплитудой напряжения 2 и 2,5 кВ ВАХ транзистора IRFZ46N смещается в область более низких (в 1,15 раза) напряжений. Аналогичное поведение передаточной ВАХ наблюдается для транзистора IRF4095 SPbF при воздействии ЭСР с диапазоном амплитуд 3,5-4,6 кВ. Однако, изгиб передаточной ВАХ смещается в область более высоких (в 2,3 раза) напряжений [3].

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект №19-79-10162.

Литература

1. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. *Защита электронных средств от воздействия статического электричества*. Москва, Издательский дом «Технологии». 2005. 352 с.
2. Lin N., Liang Y., Wang P. Evolution of ESD process capability in future electronic industry. *15th Int. conf. on electronic packaging technology*. Chengdu, China. 2014. P.1556-1560. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922951>
3. Горлов М.И. Статическое электричество и полупроводниковая электроника. *Природа*. 2006. №12. С.27-36.
4. Xijun Z., Zhancheng W., Xuejun S., Wenwu S. Study on effect experiment of ESD EMP to single chip microcontroller. *IEEE Int. Symp. on microwave, antenna, propagation and EMC tech*. Beijing. 2005. P.631-634. <https://doi.org/10.1109/MAPE.2005.1617990>
5. Алексеев В.Ф., Силков Н.И., Пискун Г.А., Пикулик А.Н. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам. *Электроника, радиофизика, радиотехника, информатика*. 2011. №5(59). С.5-11.
6. Горлов М.И., Андреев А.В., Воронцов И.В. *Воздействие электростатических зарядов на изделие полупроводниковой электроники и радиоэлектронной аппаратуры*. Воронеж, Изд. Воронежского государственного университета. 1997. 160 с.
7. Konstantinov U.A., Pozhidaev E.D., Tumkovskiy S.R. Investigation of electrostatic discharge effect on high-power MOSFET-transistors considering the influence of PCB. *Int. seminar on elec. dev. design and prod. (SED)*. Prague, Czech Republic. 2019. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798468>

8. Структуры интегральных МОП-транзисторов [web]. *Helpiks*. Дата обращения: 11.06.2022. URL: <https://helpiks.org/7-69025.html>
9. White paper 2: A case for lowering component level CDM ESD specifications and requirements, industry council on ESD target levels. *Industry Council on ESD Target Levels Revision 2.0*. 2010. 173 p.
10. Константино Ю.А., Горланов Е.С., Пожидаев Е.Д., Тумковский С.Р. Компьютерное моделирование воздействия электростатических разрядов на мощные МОП-транзисторы с учетом влияния ёмкости печатной платы. *Системный администратор*. 2018. №9 (190). С.84-89.
11. Комнатнов М.Е., Почуев М.И. Предварительный анализ причин аномальной работы автогенератора Пирса. *Научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС»*. 2014. С.90-92.
12. PackageDetails - TO-220 [web]. *Central Semiconductor Corp*. Дата обращения: 15.06.2022. URL: https://www.centalsemi.com/PDFS/CASE/TO_220_PD.PDF
13. TO-263AB [web]. *Diodes Incorporated*. Дата обращения 15.06.2022. URL: [https://www.diodes.com/assets/Package-Files/TO263AB%20\(D2PAK\).pdf](https://www.diodes.com/assets/Package-Files/TO263AB%20(D2PAK).pdf)
14. Schneider M.V. Microstrip lines for microwave integrated circuits. *Bell Syst. Tech.* 1969. V.48. №5. P.1421-1444.
15. Wheeler H.A. Transmission line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1977. V.MTT-25. №8. P.631. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1965.1125962>
16. Левицкий А.С., Балящук Л.И. Расчёт электрической ёмкости конденсаторов с компланарными электродами. *Техн. Электродинамика*. 2008. №1. С.64-70.
17. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2015. Т.36. №2. С.45-50.
18. Shichman H., Hodges A. Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits. *IEEE Journal of solid-state circuits*. 1968. V.3. №3. P.285-289. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1968.1049902>

19. LTspice [web]. *Analog devices*. Дата обращения 1.07.2022. URL: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-andcalculators/ltspice-simulator.html>
20. IRFZ46NPbF [web]. *HEXFET Power MOSFET*. Дата обращения 25.06.2022. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFZ46N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b734b
21. IRF4905SPb [web]. *HEXFET Power MOSFET*. Дата обращения 25.06.2022. URL: https://alltransistors.com/adv/pdfdatasheet_international_rectifier/irf4905lp_bf_irf4905spbf.pdf
22. Модели транзисторов, диодов, микросхем и т.д. [web]. *Musatoffcv*. Дата обращения 4.07.2022. URL: <http://musatoffcv.narod.ru/Libs/Models.htm>
23. Yousaf J., Shin J., Lee H., Nah W. Efficient circuit and EM model of electrostatic discharge generator. *IEEE Int. symp. on electromagn. compat. and signal/power integrity (EMCSI)*. 2017. P.164-168. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2017.8077860>
24. ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. 2010. 26 с.
25. International IOR rectifier, IR Application Note AN-986. ESD Testing of MOS Gated Power Transistors. 1998. 20 p.

Для цитирования:

Дроздова А.А., Николаев И.И., Комнатнов М.Е. Влияние ёмкости посадочного места транзистора на его устойчивость к воздействию электростатического разряда. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.12>