

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **24452**

(13) **С1**

(45) **2024.12.05**

(51) МПК

**G 01R 31/26** (2020.01)

**G 01N 25/18** (2006.01)

(54) **СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
"КРИСТАЛЛ-КОРПУС" ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ИХ  
КАЧЕСТВА**

(21) Номер заявки: а 20220125

(22) 2022.05.12

(43) 2023.12.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Казючиц Владислав Олегович; Боровиков Сергей Максимович; Шнейдеров Евгений Николаевич; Жданович Виктория Павловна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) RU 2685769 С1, 2019.

RU 2178893 С1, 2002.

RU 2185634 С1, 2002.

RU 2276379 С1, 2006.

UA 89911 С2, 2010.

JP 2007-225505 А.

CN 114217198 А, 2022.

US 9601404 В2, 2017.

(57)

Способ определения теплового сопротивления "кристалл-корпус" транзисторов при контроле их качества, при котором осуществляют выборку однотипных транзисторов, измеряют у каждого из них электрические параметры, установленные для их типа, и определяют наиболее коррелированные с тепловым сопротивлением "кристалл-корпус"  $R_{кр-корп}$  транзистора электрические параметры  $x_1, x_2, x_3$ , затем определяют  $R_{кр-корп}$  для каждого упомянутого транзистора выборки из уравнения линейной регрессии, в котором свободный член  $a_0$  равен нулю, используя значения упомянутых  $x_1, x_2, x_3$ , предварительно рассчитав коэффициенты уравнений регрессии  $a_1, a_2, a_3$  и определив величины коэффициентов линейной парной корреляции  $|r|$  теплового сопротивления "кристалл-корпус"  $R_{кр-корп}$  типового транзистора с его упомянутыми электрическими параметрами, причем в качестве  $x_1, x_2, x_3$  используют электрические параметры с  $|r| \geq 0,3$ , при этом  $R_{кр-корп}$  определяют из уравнения линейной регрессии:

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot x_1,$$

где  $x_1$  - электрический параметр с коэффициентом корреляции  $|r| > 0,7$ ,

или  $R_{кр-корп}$  определяют из уравнения линейной регрессии:

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2,$$

где  $x_1, x_2$  - электрические параметры с коэффициентами корреляции  $|r| = 0,3...0,7$ ,

или  $R_{кр-корп}$  определяют из уравнения линейной регрессии:

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3,$$

где  $x_1, x_2, x_3$  - электрические параметры с коэффициентом корреляции  $|r| = 0,3...0,5$ .

**ВУ 24452 С1 2024.12.05**

Изобретение относится к контролю качества элементов полупроводниковой электроники путем определения их тепловых параметров и относится к контролю теплового сопротивления "кристалл-корпус" у полевых и биполярных транзисторов.

Известен способ контроля теплового сопротивления "кристалл-корпус" у транзисторов [1], заключающийся в том, что полупроводниковый кристалл нагревают путем пропускания через него постоянного электрического тока заданной амплитуды. В процессе нагревания измеряют значения его температурочувствительного параметра, дополнительно измеряют температуру основания корпуса прибора в выбранной точке, запоминают эти значения, получая их зависимости от времени. После этого прекращают нагрев полупроводникового кристалла при достижении заданного значения температуры корпуса. Затем в режиме естественного охлаждения при подаче на кристалл коротких измерительных импульсов тока измеряют и запоминают значения температурочувствительного параметра и температуры основания корпуса, получая их зависимости от времени уже на интервале охлаждения. Далее определяют момент динамического равновесия на интервале нагрева и по полученным зависимостям вычисляют тепловое сопротивление переход-корпус в текущий момент динамического равновесия.

Недостатком такого способа является недостаточная точность контроля теплового сопротивления "кристалл-корпус", так как в процессе испытания в кристалле испытуемого прибора выделяется тепло, что непрерывно изменяет величину выделяемой в нем мощности с возникновением переходных тепловых процессов, отрицательно влияющих на точность измерений.

Более точен принятый за прототип изобретения способ контроля теплового сопротивления "кристалл-корпус" у транзисторов [2].

Он заключается в нагреве испытуемого транзистора постоянным электрическим током при условии выделения в структуре транзистора известной постоянной мощности. На интервале нагрева получают зависимости температуры корпуса и температурочувствительного параметра от времени нагрева, при этом в качестве температурочувствительного параметра используют напряжение на затворе испытуемого транзистора. Прекращают нагрев при достижении заданного значения температуры корпуса.

Через определенный промежуток времени, на интервале естественного охлаждения, пропускают через структуру транзистора периодически измерительные импульсы электрического тока. При этом соблюдается условие по выделению в структуре транзистора постоянной мощности, равной величине постоянной мощности, выделяемой в структуре транзистора на интервале нагрева, длительность и скважность которого минимально влияет на тепловые процессы.

При протекании каждого измерительного импульса электрического тока одновременно измеряют и сохраняют значения температуры корпуса и температурочувствительного параметра. Затем находят функцию взаимосвязи температуры кристалла и температурочувствительного параметра и вычисляют переходное тепловое сопротивление "кристалл-корпус". После этого определяют тепловое сопротивление "кристалл-корпус" в состоянии теплового равновесия испытуемого транзистора на основе значения переходного состояния такого сопротивления на постоянном участке измерения.

Однако недостатками такого более точного, чем аналог [1], способа-прототипа [2] являются его большая длительность осуществления, особенно для больших партий (выборок) изделий, а также увеличенная трудоемкость. Это происходит из-за наличия инерционности при осуществлении нагрева и остывания для прямого измерения переходного теплового сопротивления: пропускания нагревающего тока, контроля температуры и т. д., что требует для точного измерения параметров достижения равновесия, а в рамках предприятий, выпускающих транзисторы или приборы с ними, - это долгий и затратный способ.

Задачей изобретения является улучшение быстродействия и уменьшение трудозатрат способа определения теплового сопротивления "кристалл-корпус" у транзисторов.

Поставленная задача решается следующим образом. Для интересующего типа транзисторов из одной партии осуществляется выборка объемом 30...100 экземпляров и проводится эксперимент. Выборка будет называться обучающей, а эксперимент - обучающим экспериментом. Суть обучающего эксперимента состоит в измерении у каждого экземпляра обучающей выборки совокупности легко измеряемых электрических параметров, а затем в определении (измерении) теплового сопротивления "кристалл-корпус"  $R_{кр-корп}$  для каждого экземпляра одним из известных способов [1, 2]. Далее с помощью компьютерной программы (например, инструмента анализа "Корреляция" приложения Microsoft Excel) определяют коэффициенты парной линейной корреляции  $r$  между параметром  $R_{кр-корп}$  и каждым выбранным электрическим параметром. После этого выбирают два электрических параметра с заметной или умеренной корреляцией по шкале Чеддока ( $|r| = 0,3...0,7$ ) и, используя результаты обучающего эксперимента, строят линейное уравнение регрессии вида:

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2, \quad (1)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  - электрические параметры с коэффициентами корреляции  $|r| = 0,3...0,7$ ;

$a_1$  и  $a_2$  - рассчитанные по прикладным компьютерным программам коэффициенты уравнения регрессии в предположении, что коэффициент  $a_0$  (свободный член уравнения) равен нулю.

Затем уравнением вида (1) определяют прогнозные значения  $R_{кр-корп}$  для экземпляров обучающей выборки и возможную ошибку прогнозирования значений  $R_{кр-корп}$ . О возможных ошибках прогнозирования будем судить по средней относительной ошибке прогнозирования  $\Delta_{ср}$  (предсказания значений  $R_{кр-корп}$ ), определяемой по формуле:

$$\Delta_{ср} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(R_{кр-корп})_i - (R_{кр-корп})_i^{(прогн)}}{(R_{кр-корп})_i} \right| \times 100, \% \quad (2)$$

где  $n$  - объем обучающей выборки;

$(R_{кр-корп})_i$  - экспериментальное (фактическое) значение параметра  $R_{кр-корп}$  для  $i$ -го экземпляра обучающей выборки;

$(R_{кр-корп})_i^{(прогн)}$  - прогнозное значение параметра  $R_{кр-корп}$  для  $i$ -го экземпляра, полученное по уравнению регрессии (1).

Если средняя ошибка прогнозирования  $\Delta_{ср}$  отвечает требованиям ( $\Delta_{ср} \leq 7...10\%$ ), то полученным уравнением (1) можно пользоваться на практике. Уравнение (1) получают один раз и применяют для определения (прогнозирования) значений  $R_{кр-корп}$  для однотипных экземпляров (транзисторов), не принимавшим участия в обучающем эксперименте. При этом средняя относительная ошибка прогнозирования  $\Delta_{ср}$  примерно будет соответствовать значению, полученному по формуле (2) на экземплярах обучающей выборки.

Использование электрических параметров для прогнозирования значений  $R_{кр-корп}$  позволяет отказаться от применения специального оборудования, как в аналоге [1] и прототипе [2], что повысит быстродействие способа контроля теплового сопротивления "кристалл-корпус" у транзисторов и снизит его трудоемкость осуществления.

Дополнительные отличительные особенности изобретения, повышающие упомянутые эффекты:

при неудовлетворительной относительной ошибке прогнозирования  $\Delta_{ср}$  в случае использования двух электрических параметров рекомендуется построить и проверить по средней ошибке  $\Delta_{ср}$  качество неполного квадратичного уравнения регрессии вида:

$$R_{кр-корп} = a_1 \cdot X_2 + a_2 \cdot X_2 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2;$$

# BY 24452 C1 2024.12.05

в случае неудовлетворительной относительной ошибки прогнозирования  $\Delta_{\text{ср}}$  при использовании неполного квадратичного уравнения регрессии следует проверить пригодность линейного уравнения регрессии с тремя электрическими параметрами:

$$R_{\text{кр-корп}} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3;$$

при наличии тесной корреляции ( $|r| > 0,7$ ) между  $R_{\text{кр-корп}}$  и каким-то одним электрическим параметром может оказаться достаточным использование этого одного электрического параметра для прогнозирования значений  $R_{\text{кр-корп}}$  по уравнению регрессии вида:

$$R_{\text{кр-корп}} = a_1 \cdot x_1.$$

Суть способа поясняется примером получения уравнения регрессии для полевых транзисторов большой мощности типа КП744А при объеме обучающей выборки 50 экземпляров и применением полученного уравнения регрессии вида (1) к контрольной выборке объемом 150 однотипных экземпляров. У каждого экземпляра обучающей выборки были измерены электрические параметры (10 параметров) и выполнен контроль значений теплового сопротивления "кристалл-корпус"  $R_{\text{кр-корп}}$  путем применения специализированного оборудования.

Используя результаты обучающего эксперимента, с помощью инструмента анализа "Регрессия" приложения Microsoft Excel была получена корреляционная матрица параметров (табл. 1). В таблицу включено шесть параметров, которые наиболее коррелированы с тепловым сопротивлением "кристалл-корпус"  $R_{\text{кр-корп}}$ . Эти электрические параметры будут использоваться для получения уравнения регрессии.

Таблица 1

**Корреляционная матрица параметров**

Параметр	$U_{\text{обр-зи}}$	$U_{\text{зи.пор}}$	$R_{\text{си.отк}}$	$C_{\text{зс}}$	$Q(C_{\text{зс}})$	$C_{\text{зи}}$	$R_{\text{кр-корп}}$
$U_{\text{обр-зи}}$	1						
$U_{\text{зи.пор}}$	0,801	1					
$R_{\text{си.отк}}$	0,316	-0,043	1				
$C_{\text{зс}}$	-0,739	-0,787	-0,166	1			
$Q(C_{\text{зс}})$	0,692	0,830	-0,008	-0,888	1		
$C_{\text{зи}}$	-0,429	-0,581	0,089	0,590	-0,563	1	
$R_{\text{кр-корп}}$	0,568	0,684	-0,315	-0,468	0,553	0,431	1

В табл. 2 приводятся пояснения параметров, включенных в табл. 1.

Таблица 2

**Пояснение параметров корреляционной матрицы**

Обозначение параметра	Пояснение	Размерность	Режим измерения
$U_{\text{обр-зи}}$	обратное напряжение перехода затвор-исток	В	* $I_{\text{с}}=-0,1$ А
$U_{\text{зи.пор}}$	пороговое напряжение	В	$I_{\text{с}}=250$ мкА
$R_{\text{си.отк}}$	сопротивление перехода сток-исток в открытом состоянии	Ом	$I_{\text{с}}=5,5$ А, $U_{\text{зи}}=10$ В
$C_{\text{зс}}$	емкость перехода затвор-сток	пФ	$U_{\text{зс}}=0$
$Q(C_{\text{зс}})$	добротность емкости перехода затвор-сток	-	$U_{\text{зс}}=0$
$C_{\text{зи}}$	емкость перехода затвор-исток	пФ	$U_{\text{зи}}=0$
$R_{\text{кр-корп}}$	тепловое сопротивление кристалл-корпус транзистора	°С/Вт	-

\*Примечания:  $I_{\text{с}}$  - ток стока,  $U_{\text{зи}}$  – напряжение затвор-исток,  $U_{\text{зс}}$  - напряжение затвор-сток

# ВУ 24452 С1 2024.12.05

Выбрав два электрических параметра ( $U_{\text{зи.пор}}$  и  $C_{\text{зс}}$ ), с помощью инструмента анализа Регрессия было получено линейное уравнение регрессии вида (1), для которого коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9995$ :

$$R_{\text{кр-корп}} = 0,219 \cdot U_{\text{зи.пор}} + 0,00137 \cdot C_{\text{зс}}. \quad (3)$$

В табл. 3 в качестве иллюстрации приводится фрагмент данных об экспериментальных (фактических) значениях  $R_{\text{кр-корп}}$  экземпляров обучающей выборки и значениях этого параметра, полученных по уравнению регрессии (3).

Таблица 3

## Фрагмент экспериментальных и прогнозируемых значений $R_{\text{кр-корп}}$

Номер экземпляра обучающей выборки	Значение $R_{\text{кр-корп}}$ , °С/Вт		Относительная ошибка прогнозирования $\Delta_i$ , %
	экспериментальное	по уравнению (3)	
1	1,66	1,676	0,99
2	1,76	1,792	1,82
3	1,57	1,584	0,92
4	1,66	1,678	1,12
5	1,7	1,689	0,65
...	...	...	...
Максимальная ошибка прогнозирования $\Delta_{i,\text{max}}$ , %			5,37
Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ , %			1,84

В табл. 4 приводятся сведения об использовании для прогнозирования параметра  $R_{\text{кр-корп}}$  некоторых комбинаций параметров, указанных в табл. 1.

Таблица 4

## Сведения о прогнозировании параметра $R_{\text{кр-корп}}$

Используемые электрические параметры		Обучающая выборка (50 экземпляров)				Контрольная однотипная выборка (150 экземпляров)	
		Номер уравнения	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$ , %	$\Delta_{i,\text{max}}$ , %	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{i,\text{max}}$
$U_{\text{зи.пор}}$	$C_{\text{зс}}$	(3)	0,9995	1,84	5,37	1,59	6,41
$U_{\text{обр-зи}}$	$R_{\text{си.отк}}$	(4)	0,9995	1,91	4,72	1,92	5,28
$U_{\text{обр-зи}}$	$U_{\text{зи.пор}}$	(5)	0,9995	1,66	6,58	1,54	6,03
$U_{\text{обр-зи}}$	$Q(C_{\text{зс}})$	(6)	0,9994	1,87	6,77	1,66	6,96
$U_{\text{обр-зи}}$	$C_{\text{зс}}$	(7)	0,9993	1,82	8,42	1,94	5,43
$U_{\text{обр-зи}}$	$C_{\text{зи}}$	(8)	0,9995	1,72	7,06	1,75	8,25
$U_{\text{зи.пор}}$	-	(9)	0,9941	5,90	17,69	6,06	21,76

$$R_{\text{кр-корп}} = 3,204 \cdot U_{\text{обр-зи}} - 0,00221 \cdot R_{\text{си.отк}}, \quad (4)$$

$$R_{\text{кр-корп}} = 2,039 \cdot U_{\text{обр-зи}} + 0,117 \cdot U_{\text{зи.пор}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{кр-корп}} = 2,62 \cdot U_{\text{обр-зи}} - 0,000407 \cdot Q(C_{\text{зс}}), \quad (6)$$

$$R_{\text{кр-корп}} = 3,58 \cdot U_{\text{обр-зи}} - 0,000895 \cdot C_{\text{зс}}, \quad (7)$$

$$R_{\text{кр-корп}} = 3,88 \cdot U_{\text{обр-зи}} - 0,00193 \cdot C_{\text{зи}}, \quad (8)$$

$$R_{\text{кр-корп}} = 0,611 \cdot U_{\text{обр-зи}}. \quad (9)$$

Из табл. 4 видно, что использование двух электрических параметров для прогнозирования теплового сопротивления  $R_{\text{кр-корп}}$  обеспечивает достаточно хорошие результаты, а использование даже одного электрического параметра, для которого коэффициент корреляции с тепловым сопротивлением  $R_{\text{кр-корп}}$  равен 0,684, обеспечивает приемлемые для практики результаты.

# ВУ 24452 С1 2024.12.05

Источники информации:

1. RU 2300115 С1, 2007.
2. RU 2685769 С1, 2019.