

УДК 621.382.323

А. А. Тышко (A. Tyshko)

NATA Consulting,

729 Meadowbrook Drive, Coatesville, PA 19320, USA Tel (484) 431-7454, Email: atyshko01@comcast.net

В. А. Попов

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

кафедра промышленной электроники, г. Киев, Украина, E-mail: popov@fel.kpi.ua

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МОЩНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

При разработке высокочастотных преобразователей предназначенных для работы в расширенном диапазоне температур от +175С и выше [1], первый вопрос связан с выбором соответствующей элементной базы.

Поскольку значительная часть потерь происходит в ключевых элементах и диодах, генерируемое тепло приводит к существенному превышению температуры полупроводниковых структур над температурой окружающей среды и может достигнуть +200С и выше. При этом возрастают потери как в режиме проводимости за счет увеличения сопротивления канала исток-сток [2], так и за счет роста тока утечки в выключенном состоянии. Дополнительной проблемой является значительное снижение допустимых импульсных токов и резкое увеличение напряжения исток-сток с температурой как показано на рис. 1,а для Infineon IPW90R120 [3] и рис. 1,б для STM SPB11NM80 [4].

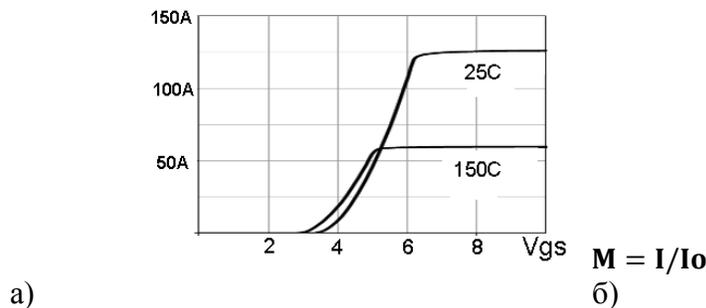


Рис. 1

Зависимость сопротивления канала исток-сток от тока и температуры приведена на рис. 2.

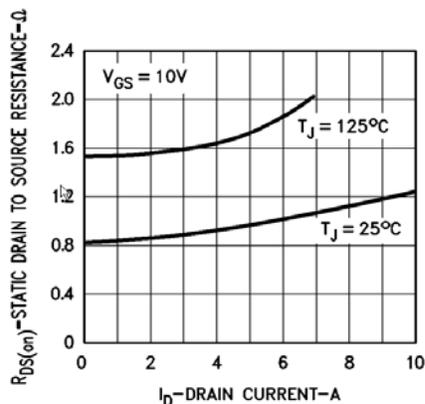


Рис. 2

В ранних исследованиях [2] приводилась зависимость сопротивления канала исток-сток R_{DSON} только от температуры

$$R_{\text{DSON}} = R_{\text{DSON}(25\text{C})} \left(\frac{T}{300} \right)^{2.3} \quad (1),$$

где $R_{\text{DSON}(25\text{C})}$ – сопротивление канала при 25С и T – абсолютная температура.

Целью данной работы является получение практических данных по зависимости сопротивления канала исток–сток мощных полевых транзисторов с изолированным затвором от величины тока при температурах до +200С, т.е. за пределами гарантированного производителем диапазона температур, для расчета потерь проводимости в импульсных преобразователях.

В качестве объектов исследования были взяты как массово производимые кремниевые полевые транзисторы с изолированным затвором с предельным напряжением 600V – 900V, так и новые на рынке транзисторы на основе карбида кремния с напряжением 1200V

Методика измерения

Для измерения падения напряжения исток-сток при разных значениях тока в пределах 5А – 50А в диапазоне температур от +25С до +200С был собрана измерительная установка, собранная по схеме приведенной на рис. 3.

$$R_{\text{dson}} = R_0 [1 + A(M - 1)]$$

Рис. 3

Тест проводился одновременно с 10 транзисторами одной группы (марки). Транзисторы были расположены на печатной плате на полиамидной основе с рабочей температурой до +225С, использовался припой SN95 с температурой плавления +221С. Плата с транзисторами и резисторами, подключенными к затворам, была помещена в печь с максимальной рабочей температурой +200С. Температура на поверхности транзисторов измерялась термопарой с Extech TM300Dual K Thermometer. Соединительные провода с тефлоновой изоляцией рассчитаны на +250С. Время выдержки перед измерением при каждой температуре один час.

Управляющие импульсы 15V с выхода буферного усилителя поступали на галетный переключатель и далее на 10 витых пар проводов к каждому транзистору. Каждый из 10 транзисторов (на блок – схеме показан только один T1) имел два резистора в цепи затвор – исток для снижения входного импеданса, подавления переходных процессов в сигнальных проводах подключенных к затвору, обеспечивая +10В на затворе.

Для подавления всплесков напряжения при переключении на плате между шинами исток – сток были установлены последовательно включенные 0,1uF и 5ом (не показаны).

Регулируемый источник питания 0 – 60V с буферным накопителем энергии содержащим 10 электролитических конденсаторов по 220uF, 63V и 5 керамических по 22 uF, 63V включенных параллельно обеспечивал импульсные токи до 50А. Для уменьшения индуктивности силовоточные провода соединяющие блок питания с нагрузочным резистором и расположенной в печи платой выполнены в виде жгута из пяти витых пар проводов полезным сечением 0.33 кв. мм каждый. Для предотвращения нагрева транзисторов током в процессе измерения использовался импульсный режим: длительность рабочего импульса составляла 10us при периоде следования 1s.

Измерение напряжения V_d исток–сток транзисторов и I_d на безиндукционном резисторе 1ом производилось в конце импульса, когда переходной процесс закончился, как показано на рис. 4.

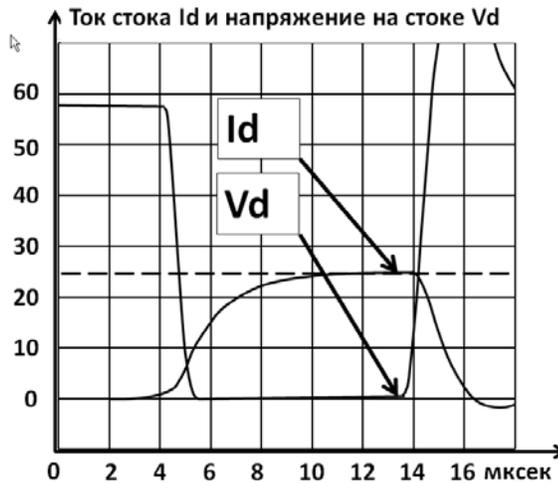


Рис. 4

Использование дифференциальных усилителей позволило измерять падение напряжения V_{ds} 1V – 10V на фоне соизмеримых помех в проводах. Падение напряжения на транзисторах измерялось для токов 5A – 50A с шагом 5A. Величина импульсов тока контролировалась изменением напряжения источника питания.

Объект измерения – кремниевые полевые транзисторы с изолированным затвором

Пять типов кремниевых полевых транзисторов по 10 штук в группе каждого типа были протестированы для определения статистически достоверного результата в пределах каждой группы. Арифметическое среднее напряжения сток – исток при известном токе стока в амперах (по вертикали) для каждой температуры (°C по горизонтали) приведено в соответствующей таблице. Знак X соответствует либо выходу за пределы диапазона измерительной установки либо потере практического интереса из-за высокого падения напряжения и связанных с ним неприемлемых потерь.

IPW60R099, Infineon, 600V, 0.09ohm @ 18A, Продолжительный ток 31A @ 25C, 93A имп, Темп. Макс 150C, корпус TO-263 (D2PAK)

IPW90R120, Infineon, 900V, 0.12ohm @ 26A, Продолжительный ток 36A @ 25C, 96A имп, Темп. Макс 150C, корпус TO-247

IPW90R120		Таблица 2				
A\С	25	100	150	175	185	200
5	0,40	0,79	1,16	1,33	1,38	1,55
10	0,84	1,65	2,39	2,78	3,00	3,33
15	1,29	2,63	3,74	4,39	4,62	5,19
20	1,77	3,55	5,18	5,96	6,55	7,26
25	2,28	4,55	6,70	7,87	8,40	9,33
30	2,81	5,58	8,34	9,87	10,43	11,43
35	3,31	6,63	10,02	11,93	12,66	13,99
40	3,86	7,67	11,92	14,19	15,22	16,86
45	4,42	8,93	13,85	16,55	17,84	19,77
50	5,03	10,20	15,92	19,21	20,80	23,39

$$R_{T,M} = R_0 [1 + A(M - 1)] * (T/300)^{B+CM}$$

STP11N80, ST-Micro, 800V, 0.35ohm @ 5.5A, Продолжительный ток 11A @ 25C, 44A имп, Темп. Макс 150C, корпус TO-220, TO-263

SPP17N80, Infineon, 800V, 0.25ohm @ 11A, Продолжительный ток 17A @ 25C, 51A имп, Темп. Макс 150C, корпус TO-220

SPP17N80					Таблица 4	
A/C	25C	100C	150C	175C	185C	195C
5A	1,16	2,11	2,94	3,42	3,62	3,79
10A	2,45	4,44	6,40	7,41	7,78	8,38
15A	3,90	6,89	10,1	11,8	12,6	13,6
20A	5,18	9,94	14,3	16,9	18,1	19,9
25A	6,73	13,3	19,4	24,1	25,7	27,6
30A	8,43	18,6	26,6	32,3	34,6	36,7
35A	10,60	21,67	32,86	X	X	X

$$R_{T,M} = R_0[1 + A(M - 1)] * (T/300)^{B+CM}$$

IXFH24N90, IXYS, 900V, 0.42ohm @ 12A, Продолжительный ток 24A @ 25C, 48A имп, Темп. Макс 150C, корпус TO-247, TO-263

IXFH24N90P						Таблица 5
A\C	25C	100C	150C	175C	185C	200C
5A	1,76	3,38	4,80	5,61	5,89	6,38
10A	3,63	6,95	9,88	11,5	12,1	13,1
15A	5,58	10,8	15,3	17,9	19,0	20,5
20A	7,70	14,7	21,0	24,8	26,4	28,6
25A	10,1	19,3	27,9	32,6	34,7	37,5
30A	12,7	24,5	34,3	39,4	X	X
35A	15,3	29,4	X	X	X	X

Результаты обработки данных измерений для кремниевых полевых транзисторов с изолированным затвором

Для разработчиков важно предсказать поведение потерь проводимости как одного из основных факторов снижения эффективности транзисторных преобразователей работающих в импульсном режиме, максимально используя данные приведенные в спецификации производителя. К стандартному набору данных относятся: сопротивление исток-сток R_{dson} при нормальной температуре (~300K), стандартном напряжении затвор-исток (10V) и определенном значении тока стока (обозначим его I_0); максимальный постоянный ток стока I_{max} , ограниченный максимальной температурой кристалла T_{max} и тепловым сопротивлением R_{th} кристалл-корпус при идеальном теплоотводе с температурой 300K; максимальный импульсный ток I_p стока; сопротивление стока при T_{max} . Приводятся также графики зависимости некоторых параметров от температуры или тока стока.

При моделировании потерь удобно иметь аналитическое выражение связывающее сопротивление стока транзистора с температурой и величиной тока за пределами стандартного диапазона T_{max} и до 200C.

За основу было взято выражение (1) с экспоненциальной зависимостью R_{dson} от абсолютной температуры T и дополнено двумя составляющими, дающими поправку на отношение M рабочего тока I к току I_0

$$M = I/I_0 \quad (2)$$

Важно отметить что ток тестирования I_0 имеет разное значение для разных транзисторов.

При нормальной температуре R_{dson} имеет приблизительно линейную зависимость от тока (смотри Рис.2 для 25C) и может быть описан следующим выражением

$$R_{dson} = R_0[1 + A(M - 1)] \quad (3)$$

Предлагаемое полное выражение зависимости сопротивления стока R_{dson} с учетом тока и температуры имеет следующий вид

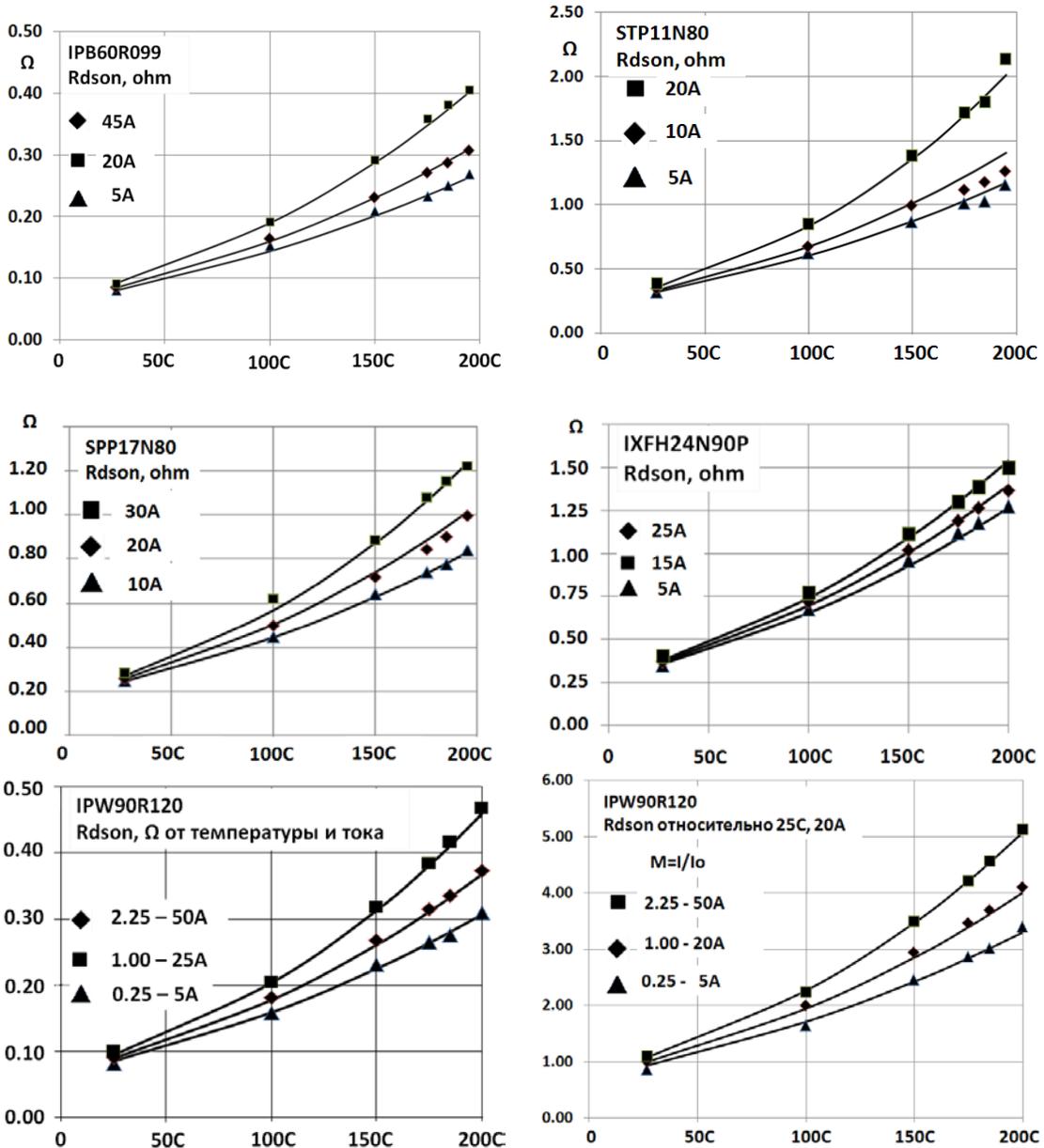
$$R_{T,M} = R_0[1 + A(M - 1)] * (T/300)^{B+CM} \quad (4)$$

Коэффициенты A , B и C находятся из данных полученных экспериментальной оптимизацией регрессионной функции (4) методом минимизации относительной дисперсии.

При работе в условиях повышенных температур рекомендуемые пиковые значения тока стока не должны превышать половину пикового тока указанного в спецификации для транзистора при 25C.

Приведенные экспериментальные данные перекрывают рекомендованный диапазон токов, поэтому для определения коэффициентов А, В, С и графического представления исходных данных и соответствующих результатов моделирования использовались только данные, ограниченные максимальным током, указанным на графиках.

Корреляционный анализ проводился по рекомендованной базе данных, но графически показаны только 3 кривые, отражающие данные при токе I_0 и при граничных значениях. Измеренные величины показаны точками с соответствующими маркерами, линии показывают результаты моделирования.



Относительное изменение сопротивления исток-сток IPW90R120 при минимальном токе 5А и максимальном 50А в диапазоне температур 25С – 200С приведено на Рис. 11 и составляет 3.2 для 5А и 5.1 для 50А. Остальные измеренные транзисторы имеют достаточно близкие относительные температурные характеристики, что позволяет предположить применимость выражения (4) для аналогичных кремниевых полевых транзисторов с изолированным затвором с напряжением исток-сток 600В – 900В.

Таблица 6					
Транзистор	A	B	C	R	σ отн
IPB60R099	0.07	2.60	0.32	0.999	0.017
STP11N80	0.04	2.60	0.32	0.991	0.059
SPP17N80	0.05	2.40	0.34	0.998	0.027
IXFH24N90	0.03	2.70	0.15	0.999	0.023
IPW90R120	0.08	2.70	0.35	0.999	0.025

В табл. 6 приведены оптимальные величины коэффициентов A, B, C полученные для каждого транзистора и соответствующие R коэффициенты корреляции и σ отн – величина среднеквадратичной относительной погрешности и ограниченном диапазоне.

Объект измерения – транзисторы на основе карбида кремния

В последние годы прогресс в технологии новых полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной (3,2eV для карбида кремния против 1,1eV для кремния) привел к созданию в частности силовых транзисторов и микросхем, способных работать при температуре +250C и выше и при этом обеспечивать значительно меньшие потери. На рынке появились MOSFET на основе карбида кремния с предельным напряжением на стоке 1200V и сопротивлением канала менее 0,1ом при 25C компании Cree.

Биполярные (super junction) SiC транзисторы разработки шведской компании TranSiC (теперь Fairchild) готовятся к выходу на рынок и обещают произвести скачок в силовых преобразователях – по частоте, напряжению, рабочей температуре и надежности.

Образцы двух типов транзисторов на основе карбида кремния были испытаны на этой же измерительной установке с той разницей что напряжение импульса на затворе CMF20120D было увеличено до +20V, а для биполярного BT1220AB ток базы 0,75A пик.

CMF20120D, Cree, 1200V, 0.08ohm @ 20A, Продолжительный ток 42A, имп 90A @ 25C, Темп. Макс 125C, корпус TO-247.

- **BT1220AB**, TranSiC – Fairchild, 1200V, 0.05ohm @ 25C, Продолжительный ток 20A, имп 40A @ 250C, Темп. Макс 250C, TO-258

CMF20120D, на затворе +20В						Таблица 7
A\C	25	100	150	175	185	200
5	0.47	0.50	0.57	0.60	0.68	0.68
10	0.94	0.94	1.06	1.16	1.28	1.28
15	1.38	1.39	1.56	1.80	1.88	1.88
20	1.90	1.80	2.06	2.32	2.50	2.50
25	2.45	2.28	2.65	2.90	3.13	3.13
30	3.00	2.82	3.18	3.51	3.78	3.78
35	3.61	3.29	3.78	4.10	4.41	4.41
40	4.24	3.84	4.36	4.68	5.08	5.08
45	5.00	4.46	4.95	5.36	5.85	5.85
50	5.75	5.10	5.55	6.05	6.60	6.60

BT1220AB, ток базы 0.75A						Таблица 8
A\C	25	100	150	175	185	200
5	0.28	0.36	0.40	0.43	0.44	0.46
10	0.46	0.57	0.69	0.76	0.78	0.82
15	0.60	0.81	0.98	1.08	1.13	1.19
20	0.76	1.02	1.28	1.44	1.50	1.62
25	0.90	1.25	1.68	2.00	2.13	2.20
30	1.11	1.71	1.95	2.46	2.61	2.97
35	1.25	1.84	X	X	X	X
40	1.42	X	X	X	X	X
45	2.17	X	X	X	X	X

Выводы

В работе приведены данные измерения зависимости сопротивления исток-сток от тока и температуры в расширенном диапазоне температур до 200C для серийных кремниевых полевых транзисторов с изолированным затвором и для новых транзисторов на основе карбида кремния, пригодных для высокочастотных преобразователей

Даны рекомендации по использованию параметров, приведенных в спецификации на транзистор, для определения максимального рабочего тока и связанных с ним потерь проводимости.

Предложено эмпирическое выражение для расчета сопротивления исток-сток от температуры и тока стока, использующее параметры, приведенные в справочных данных производителя. Приведены результаты симулирования и погрешности предложенного выражения

$$R_{T,M} = R_0 [1 + A(M - 1)] * (T/300)^{B+CM}.$$

Список литературы

1. Mohan, Underland, Riobbins, – Power Electronics, Converters, Applications and Design. Wiley, Second Edition, 1995
2. Ralf Locher - Introduction to Power MOSFETs and Their Applications, Application Note AN-558, National Semiconductor, 1988
3. STB11NM80 Datasheet, загружено с сайта производителя ST-Microelectronics
4. Fairchild Semiconductor Co, Application Note AN9010, July 2000, загружено с сайта <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9010.pdf>
5. А. А. Тышко, В. А. Попов, Высокочастотные преобразователи для приборов на основе магнитно-ядерного резонанса, работающие при повышенных температурах. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. ISSN 1607-7970, Ч. 2. – 2012. – С. 46–48.
6. David Divins, Using Simulation to Estimate MOSFET Junction Temperature in a Circuit Application, загружено с сайта http://www.ansoft.com/firstpass/pdf/Using_Simulation_to_Estimate_MOSFET_Junction_Temperature.pdf

AN ESTIMATION OF LOSSES OF CONDUCTIVITY IS FOR SOME POWERFUL FIELD TRANSISTORS AT ENHANCEABLE TEMPERATURE

A. A.Tyshko, V.A. Popov

Some practical results on drain-to-source resistivity vs. drain current measurement for a few commercially available MOSFETs at high temperature are provided.

Key words: MOSFET, Silicon, Silicon Carbide, drain-to-source resistance, high temperature.