

мого субмикронного кремниевого диода при напряжениях между электродами, больших 1 В [9], но и на шумовые, приводя, как это следует из рисунка, к увеличению времени корреляции флуктуаций плотности тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Martin, M.J.* Analysis of current fluctuations in silicon pn^+ and $p+n$ homojunctions / M.J. Martin, J.E. Velazques, D. Pardo // *J. Appl. Phys.* 1996. Vol. 79. No. 9. P. 6975.
2. *Rengel, R.* A microscopic interpretation of the RF noise performance of fabricated FDSOI MOS-FETs / R. Rengel [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2006. Vol. 53. No 3. P. 523.
3. *Reklaitis, A.* Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97. P. 043709-1.
4. *Gonzalez, T.* Monte Carlo simulation of noise in electronic devices: limitations and perspectives / T. Gonzalez [et al.] // *Unresolved Problems of Noise and Fluctuations: UPoN 2002: Third International Conference.* 2003. Vol. CP665. P. 496.
5. *Muscato, O.* Electrothermal Monte Carlo validation of a hydrodynamic model for sub-micron silicon devices / O. Muscato, V. Di Stefano // *Journal of Physics: Conference Series.* 2009. Vol. 193. P. 1.
6. Борздов, В. М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n -канальном МОП-транзисторе / В. М. Борздов [и др.] // *Микроэлектроника.* 2014. Т. 43. № 3. С. 188.
7. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
8. Ridley, B.K. Soft-threshold lucky drift theory of impact ionization in semiconductors / B.K. Ridley // *Semiconductor Science and Technology.* – 1987. – No. 22. – P. 116–122.
9. Борздов, А.В. Моделирование методом Монте-Карло влияния ударной ионизации на ВАХ и флуктуации тока в кремниевом диоде со структурой n^+-n-n^+ / А.В. Борздов, В.М. Борздов, В.В. Буслук // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. трудов VI Международной научной конференции, Минск, 8–9 Октября 2014.* – Минск: БГУ, 2014. – С. 40.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ КП7209 В КОРПУСЕ ТО-254 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРМОУДАРОВ

Ю. А. Бумай¹, О. С. Васьков¹, В. К. Кононенко¹, В. С. Нисс¹,
А. Ф. Керенцев², А. Н. Петлицкий², И. И. Рубцевич²

¹Белорусский национальный технический университет, bumai@tut.by
²ОАО Интеграл, akerentsev@intgral.by

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС) исследована деградация внутреннего теплового сопротивления МОП-транзисторов КП7209 в корпусе ТО-254, изготовленных при различных температурных режимах и методах посадки кристалла, при воздействии термоударов в интервале от -196 до $+200$ °С. Обнаружено, что основные изменения теплового сопротивления образцов проявились в области посадки кристаллов. Полученные результаты и закономерности могут быть использованы для анализа механизмов деградации мощных полупроводниковых приборов и повышения их надежности.

ВВЕДЕНИЕ

Термоудары являются одним из распространенных видов отбраковочных испытаний полупроводниковых изделий. В данной работе для анализа изменений, происходящих при таких испытаниях мощных МОП-транзисторов КП7209 в термокомпенсированном металлокерамическом корпусе ТО-254, использовался метод ТРДС, позволяющий исследовать структуру теплового сопротивления транзисторов, а также профиль распределения теплового потока в транзисторах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования тепловых параметров транзисторов проведены с использованием разработанного в БНТУ релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов [1]. Работа спектрометра основана на регистрации процесса релаксации напряжения (на барьере «исток – затвор» в случае МОП - транзисторов) вследствие нагрева транзистора при прохождении импульса тока в виде ступеньки.

Методом ТРДС определены внутреннее тепловое сопротивление транзистора и его структура в виде дискретного $R_{th}(\tau_i)$ (зависимости от постоянной времени тепловой релаксации τ_i) и непрерывного дифференциального спектра $R_{th}(t)$, а также профили распределения эффективного сечения S_a теплового потока от активного слоя к корпусу прибора. Подробная теория метода ТРДС описана в работе [2, 3]. При измерениях и анализе ТРДС спектров, для данных транзисторов было задано разрешение, достаточное для построения семизвенных электротепловых RC -моделей. Измерения спектров ТРДС в режимах нагрев/остывание проводились во временном интервале ≤ 1 с, соответствующем времени релаксации тепла на внутреннем тепловом сопротивлении R_{jc} исследуемых приборов.

Для измерений использованы 24 образца экспериментальных мощных полевых транзисторов КП7209 (ИНТЕГРАЛ) в металлокерамическом корпусе ТО-254, изготовленных при различных температурных режимах и методах посадки кристалла. Конструкция корпуса ТО-254 (КТ-97В) содержит термокомпенсатор для снижения термических напряжений в кристалле мощного транзистора. Монтаж кристаллов производился следующими способами:

а) на эвтектику золото-кремний на автомате ЭМ-40-85-03 на золотую прокладку при температурах 440°C, 460°C, 480°C с использованием термокомпенсаторов MD-40 или MD-50;

б) на припой ПОС-10 в водородной печи ЖК4007А при температурах 390°C, 420°C, 440°C с использованием термокомпенсаторов MD-40 или MD-50.

Из всей партии образцов в соответствии с методом посадки кристалла и типом термокомпенсатора выделено четыре группы: I, III (посадка на эвтектику) и II, IV (посадка на припой) с термокомпенсаторами MD-50, MD-40, соответственно.

Деградация теплового сопротивления и его структуры транзисторов КП7209 исследовалась при воздействии термоударов в интервале от -196 до +200 °C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения внутреннего теплового сопротивления для всей партии образцов после воздействия 100 термоударов приведены на рисунке 1.

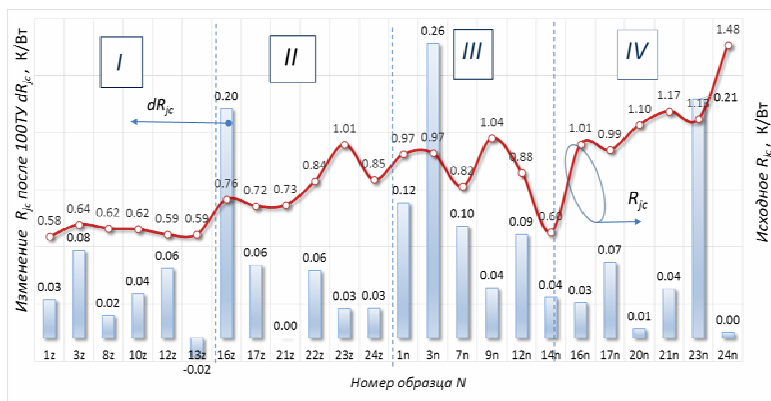


Рисунок 1. – Изменение внутреннего теплового сопротивления dR_{jc} после воздействия 100 термоударов (от уровня исходного сопротивления R_{jc}) для всей партии образцов

Установлено, что в 21-м из 24-х исследованных транзисторов произошел рост теплового сопротивления, причем в 4-х из них достаточно существенный (более 10%). Наименьший рост теплового сопротивления зафиксирован в образцах с посадкой кристалла на эвтектику и термокомпенсатором МД50 (I группа). Корреляция между изменением теплового сопротивления после термоударов и уровнем исходного теплового сопротивления исследованных образцов не выявлена. Умеренная корреляция существует между изменением внутреннего теплового сопротивления образцов I и III групп с температурой пайки кристалла на эвтектику. В этом случае наименьший уровень изменения теплового сопротивления наблюдается при температуре пайки кристалла, составляющей 480 °С.

Проведена идентификация тепловых компонент спектров ТРДС (в качестве примера приведен рисунок 2) и проведен сравнительный анализ спектров и фотоизображений припоя под кристаллом образцов. Обнаружено, что основные изменения теплового сопротивления образцов после термоударов проявились в области посадки кристалла в компонентах переходного слоя, обозначенных на рисунке 2 как R3 (кристалл-припой), R4 (слой припоя) и R5 (переходной слой припой – термокомпенсатор).

Обнаружено, что для образцов группы II и IV величина теплового сопротивления коррелирует с площадью дефектов в области припоя. Для образцов с большой площадью дефектов припоя наблюдается сужение сечения теплового потока S_a в слое посадки R4. Для образца 23n в области припоя характерно резкое сужение сечения теплового потока S_a в виде теплового горлышка (thermal bottleneck), что совпадает с уменьшением активной площади припоя, что видно и на фотоизображении. Изменение теплового сопротивления, в основном, связано с компонентами R4 в группе II и R4, R5 в группе IV.

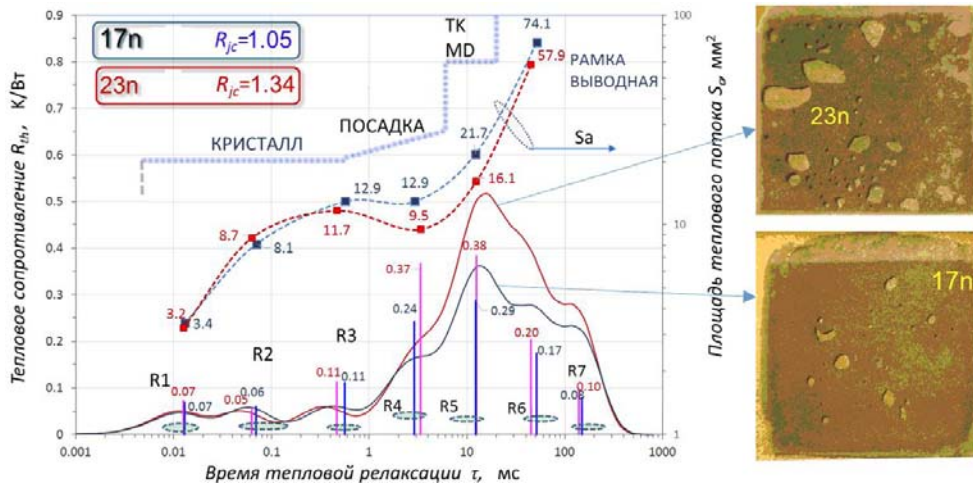


Рисунок 2. – Сравнение ТРДС спектров с фотоизображением области припоя для пар образцов 17n и 23n с термокомпенсатором МД40 после 100 термоударов (группа IV, см. рисунок 1)

Образцы с разным типом термокомпенсатора отличаются разнонаправленными изменениями тепловых компонентов R4 и R5, связанных соответственно с дефектами слоя посадки и области термокомпенсатора. Корреляция между видимой на фотоизображении площадью дефектов припоя образцов группы II и уровнем спектрального теплового сопротивления является либо слабой, либо вообще отсутствует, что связано, возможно, с влиянием дефектов термокомпенсатора, невидимых на фотоизображении припоя. Различия в спектрах образцов с посадкой на эвтектику, возможно, определяются процессами теплового рассеяния в переходном слое эвтектика–термокомпенсатор, недоступных визуализации на фотоизображении переходного слоя посадки под кристаллом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.
2. Нисс, В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии / В.С. Нисс [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.
3. Vaskou, A.S. Diagnostics of the technological characteristics of high–power transistors using relaxation impedance spectrometry of thermal processes / A.S. Vaskou [et al.] // Russian Microelectron. - 2015. -Vol. 44, No. 8. - P. 579–584.