



УДК 004.318+004.382

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.60.64

РАЗРАБОТКА КОРПУСА МНОГОЯДЕРНОГО ПРОЦЕССОРА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЫ

DEVELOPING A MULTI-CORE PROCESSOR BASED ON A POLYMER COMMUTATION BOARD

ВОРОБЬЕВ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

ПАО «Институт электронных управляющих машин
им. И. С. Брука»
119334, Москва, ул. Вавилова, 24
Тел.: +7 (499) 135-50-32
Anton.S.Vorobiev@mcst.ru
<http://ineum.ru>

VOROBIEV ANTON S.

Brook INEUM PJSC
24 Vavilov St., Moscow, 119334, Russia
+7 (499) 135-50-32
Anton.S.Vorobiev@mcst.ru
<http://ineum.ru>

В работе представлены новые технологии для изготовления корпуса микросхемы, примененные для разработки оригинального многоядерного процессора. С учетом этих технологий представлены эффективные проектные решения при проектировании корпуса микросхемы на основе полимерной коммутационной платы.

Ключевые слова: конструкция микросхемы; полимерные материалы корпуса; крышка микропроцессора; отечественный микропроцессор; технология flip-chip; трассировка платы корпуса.

The paper presents new technologies for manufacturing packaging the microcircuit, that are used to develop the original multi-core processor. Taking into account these technologies, effective design solutions have been presented for the design of the chip body based on the polymer commutation board.

Keywords: design of the chip; polymeric materials of the shell substrate; cover of the microprocessor; domestic microprocessor; flip-chip technology; trace of the substrate board.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность реализации подложки корпуса для высокопроизводительного микропроцессора постоянно растет. Это обусловлено увеличением потребляемой мощности, площади и большим количеством периферии кристалла. Периферия кристалла включает в себя высокочастотные каналы оперативной памяти, каналы ввода-вывода, каналы межпроцессорных соединений и интерфейсы управления. Совместное проектирование периферии кристалла, подложки корпуса, процессора и вычислительного модуля на его основе требует детальной проработки каждого этапа проектирования. Основной задачей при разработке подложки корпуса сложно-функциональной СБИС является учет требований к заданию и назначению выводов микросхемы для успешной разработки вычислительных модулей, а также достоверная оценка реализуемости коммутационной платы корпуса и вычислительного модуля на его основе. Неполный учет требований к заданию и назначению матрицы выводов корпуса может привести к увеличению трудоемкости разработки подложки корпуса микросхемы и вычислительного модуля или к недостижению заданных параметров микропроцессора, что повлечет за собой повторное проектирование. При назначении матрицы выводов корпуса необходимо учитывать реализацию системы питания, охлаждения и синхронизации на вычислительном модуле. Также необходимо проработать вывод из-под корпуса высокочастотных интерфейсов и сигналов управления на вычислительном модуле. Для такого совместного проектирования необходим учет применяемых технологий сборки микросхем и изготовления корпусов. В отечественных микропроцессорах серии «Эльбрус» применяется современная промышленная технология сборки микросхем flip-chip.

При создании надежных отечественных микропроцессоров с большой производительностью применяются новейшие полимерные материалы и новейшие технологии для сборки микропроцессоров. Благодаря применению новейших материалов и технологий возможны эффективные и универсальные проектные решения, позволяющие добиться поставленной задачи. Предлагается рассмотрение проектных решений на примере отечественного восьмиядерного микропроцессора «Эльбрус-8СВ» и шестнадцатиядерного микропроцессора «Эльбрус-16С».

КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСХЕМЫ МИКРОПРОЦЕССОРА

Конструкция микросхемы включает в себя шариковые выводы, два уровня высокочастотных конденсаторов, термически связывающий материал, теплораспределитель и наполнитель между выводами кристалла. Для вычислительного модуля с использованием микросхем в соquete оптимальная конструкция современного многоядерного микропроцессора представлена на рис. 1. Эта конструкция достаточно распространена и применяется во всех микропроцессорах серии «Эльбрус», для серийного производства процессора Haswell [1] и так далее.

В сочетании с вычислительным модулем данная конструкция микросхемы имеет три уровня высокочастотных конденсаторов [2]. Изменение напряжения питания при скачке тока потребления зависит от количества конденсаторов и качества их подключения на каждом уровне.

Второй уровень конденсаторов не ограничивает поверхностный монтаж микросхемы, это обеспечивается выбором выводов корпуса с фиксированной высотой 0,6 мм, который позволяет устанавливать высокочастотные конденсаторы высотой 0,3 мм.

МАТЕРИАЛЫ КОРПУСА МИКРОСХЕМЫ

При проектировании многоядерных микропроцессоров используются высокоскоростные интерфейсы. Исходя из скорости интерфейсов под каждый микропроцессор необходимо подбирать оптимальные материалы подложки корпуса микросхемы. При разработке микропроцессора «Эльбрус-8СВ» применяются каналы межпроцессорного обмена и канал ввода-вывода, построенные на базе приемопередатчиков СЕI-6G с последующей передачей по дифференциальной паре со скоростью 6,25 Гб/с. При разработке микропроцессора «Эльбрус-16С» применяются каналы межпроцессорного обмена и каналы ввода-вывода, построенные на базе приемопередатчиков Enterprise 12G PHY с последующей передачей по дифференциальной паре со скоростью 12,5 Гб/с.

Рассмотрим полимерные материалы слоев диэлектриков, приведенные в табл. 1 и табл. 2.

Основными эффектами в подложке корпуса являются СКИН-эффект [3] и потери в диэлектриках. Со СКИН-эффектом в подложке корпуса бороться очень сложно и практически невозможно, так как в современных микропроцессорах высокая плотность трассировки и увеличение ширины проводников приводит к нереализуемости проекта. С потерями в диэлектриках бороться на подложке корпуса можно с использованием высокочастотных материалов. Для микропроцессора «Эльбрус-8СВ» использовались материалы диэлектриков в build-up-слоях [4] Ajinomoto GX-13 и для слоя жесткости Hitachi [5] MCL-E-679. По результатам моделирования и нашим расчетам, этих материалов достаточно для сигналов со скоростью 5–6 Гб/с. Для микропроцессора «Эльбрус-16С» используются сигналы со скоростью 12,5 Гб/с, для данного проекта необходимо менять все материалы на более высокочастотные. В микропроцессоре «Эльбрус-16С» использовались материалы диэлектриков в build-up-слоях Ajinomoto GL-102 и для слоя жесткости Hitachi MCL-E-705G. Материалы, выбранные для проекта «Эльбрус-16С», имеют лучшие показатели по тангенсу угла потерь и тем самым имеют меньшие показатели затухания в диэлектриках. Данных

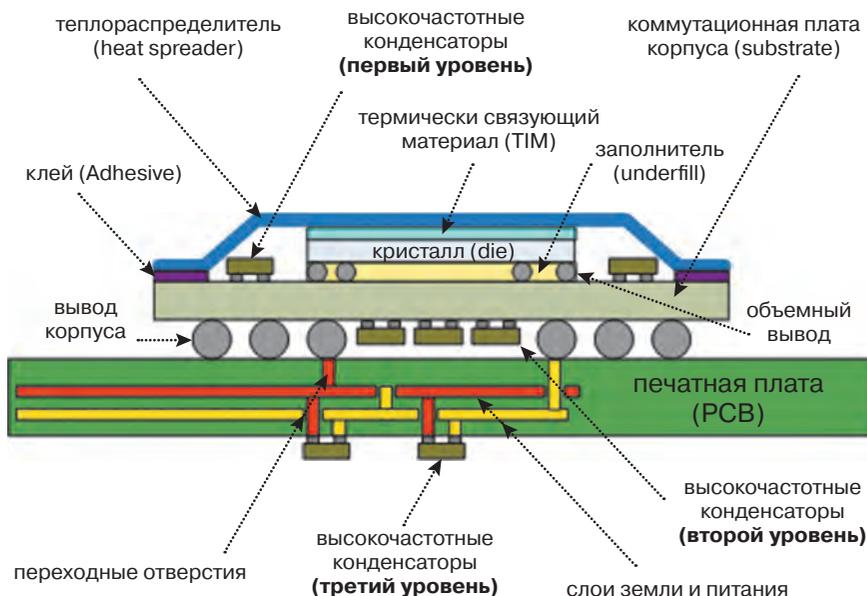


Рис. 1. Конструкция микросхемы процессора

материалов по результатам моделирования достаточно для сигналов со скоростью 12–13 Гб/с.

В качестве материала для теплопроводителя микросхемы возможны традиционные металлические сплавы или композиты. Для теплопроводителя рассматриваемых микропроцессоров используется композитный материал AlSiC-10. Этот материал обладает сопоставимой с металлами теплопроводностью, равной 200 Вт/(м·К). По сравнению с металлическими сплавами у него меньше себестоимость, и его выбор приводит к меньшей стоимости подготовки к производству.

Особое внимание нужно уделить еще термически связывающему материалу (TIM) между теплопроводителем микросхемы и кристаллом. В табл. 3 приведены распространенные материалы.

Рассмотрим два типа термически связующих материалов: органические и металлизированные. В табл. 3 рассмотрены два вида органических материалов. В микропроцессорах серии «Эльбрус» используется оба вида TIM. Они отличаются между собой тепловым сопротивлением и коэффициентом передачи тепла от кристалла до радиатора микропроцессора [6]. У термопасты X-23-7772-4A показатели лучше, чем у SE 4450, но на практике есть еще два важных показателя, такие как адгезия

Таблица 1. Материалы подложки корпуса для Build-up-слоев

Vender			AJINOMOTO				SEKISUI	
Characteristics			GX13	GZ41	GL102	GL103	NX04H	NQ07
CTE x-y	25–150°C	ppm/°C	46	20	20	14	24.5	23
TG	TMA	°C	156	176	153	166		
TG	DMA	°C	177	203	171	171	205	180
Young modulus		Gpa	4.0	9.0	13	12	8.0	12.1
Tensile strength		MPa	93	120	130	123	100	112
Elongation		%	5.0	1.7	1.5	1.6	2.4	1.8
Dielectric constant	5.8GHz		3.2	3.3	3.3	3.3	3.2	3.4
Loss tangent	5.8GHz		0.019	0.0074	0.0044	0.0036	0.0090	0.0040
Amount of SiO2		%	38	66	72	72	68	70



Таблица 2. Материалы подложки корпуса слоев жесткости

Item	Unit	MCL-E-679FG(R)	MCL-E-700G(R)	MCL-E-705G	MCL-E-705GX	MCL-E-705GLH	R-1515A	R-1515W
Supplier	-	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Panasonic	Panasonic
Halide free	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Color	-	Light yellow	Brown	Brown	Brown	Brown	natural	Natural
Insulation resistance	Ω	1.0e12-1.0e15	1.0e12-1.0e15	1.0e12-1.0e15	1.0e12-1.0e15	1.0e12-1.0e15	2.0e14	2.0e14
Surface resistance	Ω	1.0e12-1.0e14	1.0e12-1.0e14	1.0e12-1.0e14	1.0e12-1.0e14	1.0e12-1.0e14	3.0e14	3.0e14
Volume resistance	Ωcm	1.0e13-1.0e15	1.0e13-1.0e15	1.0e13-1.0e15	1.0e13-1.0e15	1.0e13-1.0e15	7.0e13	7.0e13
Dielectric constant (1MHz)	-	5.2-5.4	4.8-5.0	4.5-4.7	-	4.3-4.5	5.2	5.3
Dielectric constant (1GHz)	-	4.6-4.8	4.5-4.7	4.3-4.5	4.3-4.5	4.0-4.2	4.8	4.9
Dissipation factor (1MHz)	-	0.008-0.010	0.008-0.010	0.006-0.008	-	0.006-0.008	0.012	0.014
Dissipation factor (1GHz)	-	0.014-0.016	0.009-0.011	0.007-0.009	0.007-0.009	0.007-0.009	0.018	0.014
Glass transition (TMA)(Z)	Deg.C	163-173	250-270	250-270	250-270	250-270	180	225
Glass transition (DMA)	Deg.C	210-220	295-305	295-305	295-305	295-305	205	255
CTE(α_1)	ppm/K	X,Y : 14-16 Z : 23-33	X,Y:7-9 Z:15-25	X,Y:5-7 Z:10-15	X,Y:4.5 Z:12	X,Y:2.5-3.5 Z:10-15	X:12, Y:12 Z: 27	X:10, Y:9 Z:21
CTE(α_2)	ppm/K	X,Y : 10-12 Z : 140-170	X,Y:9-11 Z: :55-75	X,Y:6-8 Z:50-70	X,Y:2.0 Z:80	-	X:12, Y:12 Z :140	X:10, Y:9 Z:93
Young's modulus	GPa	19-21	22-24	22-24	25	28-30	27	33
Flexural modulus	GPa	28-30	30-33	30-33	35	-	28	33
Tensile strength	MPa	200-300	200-300	200-300	-	250-350	230	-
Thermal conductivity	W/mk	0.79-0.83	0.70-0.75	0.70-0.75	0.70-0.75	0.55-0.75	0.70	0.72
Poisson's ratio	-	0.20-0.21	0.20-0.21	0.20-0.21	-	0.20-0.21	0.19	0.20
Flame resistance	-	UL94-V0	UL94-V0	NA	NA	NA	UL94-V0	UL94-V0

Таблица 3. Распространенные термически связующие материалы

Type	Model	Supplier	Thermal Conductivity (W/m·K)	Theta Jc (°C/W)
Organic TIM	SE 4450	Dow Corning	1,92	—
	X-23-7772-4A	ShinEtsu	4,2	0,08–0,12
Metal TIM	Indium	Indium	87	0,03–0,05



Рис. 2. Органический и металлизированный термически связывающий материал

и упругость материала. От этих показателей зависит возможное отслоение термопасты от кристалла или теплораспределителя микропроцессора. При высоких температурах эти два показателя показали себя лучше у термопасты SE 4450. В связи с этим на микропроцессорах нынешнего поколения используется именно эта термопаста.

Для микропроцессоров нового поколения планируется переход от органических термически связывающих материалов к металлизированному, такому как Indium [7], изображенному на рис. 2.

Данный материал является мягким металлическим сплавом и имеет хорошую смачиваемость поверхностей. Податливость индия позволяет минимизировать поверхностное сопротивление и тем самым увеличить тепловой поток. Индий обладает отличной теплопроводностью и применяется в высокопроизводительных микропроцессорах

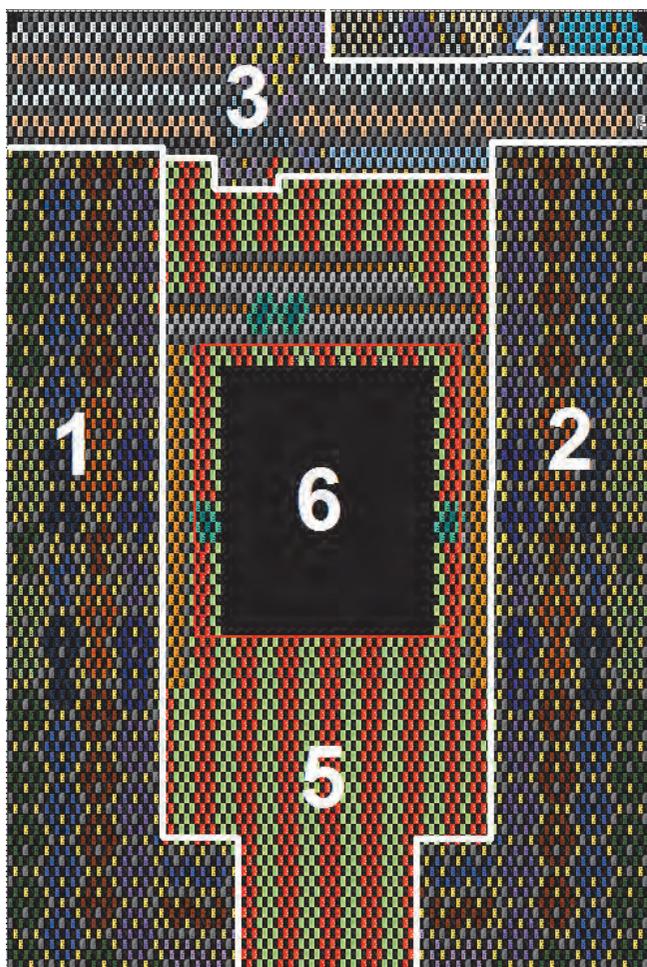


Рис. 3. Матрица выводов микропроцессора

с большой мощностью использование индия устранил возможность появления воздушного пространства между кристаллом микропроцессора и теплораспределителем, что исключит возможность перегрева микросхемы.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ВЫВОДОВ

Матрица выводов рассматриваемого микропроцессора представлена на рис. 3. Назначение выводов корпуса [8] выполнено в рамках пяти основных зон. Первая и вторая зоны выделены под каналы быстродействующей памяти типа DDR4. Зона номер три выделена под каналы ввода-вывода и для каналов межпроцессорного обмена. Зона номер четыре выделена под сигналы управления. Зона пять выделена для выводов основного питания и земли кристалла. Шестая зона не содержит выводов корпуса.

У представленной матрицы есть ряд преимуществ. Каналы оперативной памяти и каналы ввода-вывода расположены таким образом, что трассировка их на коммутационной плате корпуса и на материнской плате выполняется в одних и тех же слоях, без пересечений. Зона для основного питания кристалла позволяет устанавливать на материнской плате источники питания в непосредственной близости к микропроцессору, тем самым обеспечивать низкое омическое сопротивление подключения. Выделенная область без выводов корпуса необходима для установки конденсаторов второго уровня на основное питание кристалла.

К недостаткам данной матрицы можно отнести нестандартные габариты микросхемы, что влечет за собой разработку

VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D	GN _{D_1}
D_1	2G	D	_N[0]	D	2G	D	_N[2]	D	2G	D	_N[4]	D	2G
GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D										
D_1	D	_P[0]	D	_P[1]	D	_P[2]	D	_P[3]	D	_P[4]	D	_P[5]	D
VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_O}
D	2G	D	2G	D	_N[1]	D	2G	D	_N[3]	D	2G	D	_N[5]
VCC _D	GN _{D_1}												
D	2G												
VCC _D	GN _{D_1}	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D
D	2G	_P[1]	D	2G	D	_P[3]	D	2G	D	_P[5]	D	2G	D
IPL _{A_I}	VCC _D												
_N[0]	D	_N[1]	D	_N[2]	D	_N[3]	D	_N[4]	D	_N[5]	D	_N[6]	D
VCC _D	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_I}	VCC _D	GN _{D_1}	VCC _D	IPL _{A_I}
D	_P[0]	D	2G	D	_P[2]	D	2G	D	_P[4]	D	2G	D	_P[6]
GN _{D_1}	VCC _D												
2G	D												

Рис. 4. Размещение выводов каналов ввода-вывода и межпроцессорных каналов

индивидуальных сокетов для тестирования и разработки микросхемы.

Учитывая опыт проектирования коммутационных плат корпуса и анализ зарубежных микросхем, необходимо экранировать все высокочастотные сигналы друг от друга. Рассмотрим пример размещения выводов каналов ввода-вывода и межпроцессорных каналов (рис. 4).

На рис. 4 изображено размещение сигналов выводов каналов ввода-вывода и межпроцессорных каналов. Трансмиттеры и ресиверы в данном канале изолированы друг от друга землей для исключения наводок друг на друга. Дифференциальные пары расположены в каждой группе таким образом, чтобы наводки от одной пары не переходили на другую. Рассмотрим более детально расположение выводов. Дифференциальная пара IPLA_N[0], IPLA_P[0] находится в равном удалении от сигнала IPLA_N[1]. Расстояние между этими тремя выводами — 1 мм. Наводки на сигнал IPLA_N[1] поступают одновременно от двух фаз IPLA_N[0] и IPLA_P[0], тем самым эти наводки складываются и равняются 0. Если рассмотреть обратную наводку сигнала IPLA_N[1] сразу на обе фазы IPLA_N[0] и IPLA_P[0], то эта наводка не разрушает дифференциальную пару из-за равного удаления от обоих сигналов дифференциальной пары. Аналогичная схема размещения сигналов выполняется во всех высокочастотных каналах.

При назначении матрицы выводов корпуса происходит анализ выводов кристалла, полученных от разработчиков кристалла, при необходимости в назначение выводов кристалла вносятся корректировки с возможностью изменения шага выводов кристалла. Параллельно происходит оценка материнской платы, на которую будет устанавливаться данный микропроцессор. Учитывая сразу кристалл, корпус и МПП, можно упростить работу при выпуске конечного изделия.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЫ КОРПУСА

При проектировании коммутационных плат корпуса на основе полимерных материалов есть ограничение на количество слоев, на данный момент оно достигает двадцати. Также есть ограничение на переходы между слоями, сейчас технологии позволяют пройти максимум пять слоев. Учитывая максимальное количество слоев и максимальный переход между слоями, необходимо очень тщательно проработать размещение выводов корпуса на микросхеме. Детальной проработки требует размещение выводов и на кристалле; так как в высокопроизводительных кристаллах много периферии, необходимо проработать, как эти выводы будут доходить до трассировочных слоев, учитывая требования по прохождению переходных отверстий со смещением.

Технологические нормы для полимерных материалов позволяют использовать ширину проводников в области кристалла 12 микрон и зазор между проводниками в 12 микрон. Для сравнения в керамических материалах эта ширина составляет 50 микрон. При использовании проводников с шириной 12 микрон и при зазоре между проводниками в 12 микрон между выводами кристалла проходит четыре сигнальных проводника. Это позволяет вывести все высокочастотные каналы на верхних слоях без перехода через слой жесткости.

Расположение основных зон микропроцессора исключает пересечение трассировочных зон, тем самым позволяет выполнить качественную трассировку каждого интерфейса.

НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- использование новых высокочастотных полимерных материалов для отечественной коммутационной платы корпуса;
- использование новых термически связывающих материалов;
- проектирование схем назначения выводов высокочастотных сигналов без наводок друг на друга;

- использование совместного проектирования подложки корпуса, кристалла и МПП позволяет ускорить процесс проектирования конечного изделия при небольших затратах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обсуждается совокупность проблем при проектировании подложки корпуса отечественного микропроцессора. Проведен анализ существующих материалов и технологических процессов изготовления коммутационных плат корпуса на основе полимерных материалов. Показана эффективная конструкция микросхемы процессора и предлагаются перспективные материалы для ее элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Demler M. Haswell ULT Integrates PC Platform. Intel Lays Groundwork for Broadwell in Next-Generation PCs // Microprocessors report. December 16, 2013.
2. Бычков И. Н., Рябцев Ю. С., Юрлин С. В. Варианты распределенной сети питания для многоядерного микропроцессора // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ, 2013. — Вып. 3. — С. 157–168.
3. PCB Layout Guidelines for Designing with Avago SFP+ Transceivers, AV02-0725EN July 27, 2010 // URL: <http://cmsstaging.avagotech.com:90/docs/AV02-0725EN> (дата обращения 12.05.2014).
4. URL: <https://www.aft-website.com/en/electron/abf>.
5. Hitachi, copper clad laminates, 2018. http://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/bm/files/catalog_all.pdf.
6. Freescale semiconductor, Package thermal performance. June 2013.
7. Indium corporation, Metal thermal interface materials.
8. Бычков И. Н., Воробьев А. С., Молчанов И. А., Маняхин Д. В. Проектные решения для микропроцессора и сервера на его основе // «Микроэлектроника-2015». — С. 154–162.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 760 руб.

ВАЛИДАЦИЯ НА СИСТЕМНОМ УРОВНЕ. ВЫСОКОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕСТИРОВАНИЕМ

М. Чэнь, К. Цинь, Х.-М. Ку, П. Мишра

при поддержке ЗАО «СКАН»

перевод с англ. под ред. А. Н. Ланцева

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. — 296 с.
ISBN 978-5-94836-365-3

В этой книге описываются методы высокоуровневого моделирования и валидации комплексных систем аппаратных средств и программного обеспечения, включая архитектуры с многоядерными процессорами. Читатели узнают, как избежать затрат времени и ошибок при всесторонней системной валидации, в том числе при моделировании систем и их отказов, а также об автоматической генерации специализированных тестов и эффективных методах валидации с использованием подобных тестов и подтверждения работоспособности систем.

Эта книга предназначена для студентов старших курсов, аспирантов, исследователей, разработчиков инструментов САПР, проектировщиков и менеджеров, заинтересованных в развитии эффективных инструментов и методов проектирования и валидации на системном уровне, генерации направленных тестов и функциональной валидации гетерогенных конструкций СнК (систем на кристалле).

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru