

Особенности оценки прочности соединения кристалла с основанием корпуса

В статье проанализированы способы контроля качества соединений кристаллов с основаниями корпусов. Предлагается способ оценки прочности соединения кристалла, при котором кристалл подвергается сдвигу вдоль плоскости раздела «кристалл–корпус», при этом усилие сдвига не должно превышать $[\sigma]_{сж}$ — допускаемого напряжения материала кристалла при сжатии. Приведены номограммы максимально-допустимых усилий сдвига кремниевых кристаллов в зависимости от их геометрических размеров и площади спаиваемого шва.

Виктор Зенин,
д. т. н., профессор

zenvik@bk.ru

Александр Кочергин

Введение

В технологии производства полупроводниковых изделий (ППИ) наиболее трудоемкими являются сборочные операции. Из общей стоимости изготовления ППИ на монтажно-сборочные работы приходится около 65%. Эти затраты вполне обоснованы, так как от качества выполнения этих работ во многом зависит эксплуатационная надежность готовых изделий.

Качество соединений «кристалл–корпус» оказывает существенное влияние на нагрев кристалла при эксплуатации ППИ. В работе [1] приведены результаты расчетов перегрева кремниевых кристаллов резистивных сборок, смонтированных в корпус типа «Монтаж 2-28» (материал корпуса — бериллиевая керамика). Рассматривались два способа монтажа: пайка на эвтектику Si-Au и с помощью клея ВК-32-200. При пайке на эвтектику Si-Au предполагалось, что площадь паяного шва равна площади кристалла, а при монтаже с помощью клея задавались различные варианты пористости клеевого соединения — от 0 до 30%.

Расчет конвективного α_K и лучистого α_L ($\alpha = \alpha_K + \alpha_L$) коэффициентов теплоотдачи проводился по уравнениям, приведенным в [2]. Так как значение α зависит от искомой температуры T , то вычисление перегрева осуществлялось методом последовательных приближений.

В таблице 1 приведены результаты расчетов перегрева кристалла при подаваемой мощности на кристалл в 1 Вт относительно температуры 20 °С.

Выбор способа монтажа полупроводниковых кристаллов во многом зависит от требований, предъявляемых к соединению «кристалл–корпус», а также от вида микросварки, применяемой для крепления выводов на кристалле и корпусе, и режимов герметизации ППИ.

Независимо от способов крепления кристаллов ППИ на подложки или основания корпусов должно обеспечиваться заданное расположение контактных площадок кристалла относительно контактных площадок корпуса. Погрешность совмещения не должна превышать 25 мкм. Поэтому установку кристалла выполняют с помощью манипулятора, а контроль точности совмещения осуществляют при помощи микроскопа с высоким разрешением.

Контроль качества соединений кристаллов с основаниями корпусов

Известен способ механических испытаний готовых схем в корпусах [3]. По данному способу схемы помещаются в центрифуги, дающие ускорение в 20 000 g, что позволяет выявлять кристаллы с низким качеством присоединения к корпусу. Основным недостатком данного способа является трудоемкость испытаний, использование дорогостоящего оборудования, что приводит к повышению себестоимости выпускаемых изделий. Кроме того, данный способ контроля качества присоединения кристаллов к корпусам не учитывает размеры и физико-механические свойства кристалла.

Проводятся испытания [4] качества крепления кристаллов, в состав которых входят термоудар, воздействие постоянных и переменных ускорений, испытания на срез и др. Данный комплекс испытаний очень трудоемкий и может использоваться только на опытных образцах при отработке новых способов и технологий монтажа кристаллов к корпусам.

Качество паяных соединений контролируют, например, с помощью холестерических жидких кристаллов — веществ, изменяющих свой цвет под воздействием температуры. Участки изменения цвета соответствуют расположению дефектов монтажа

Таблица 1. Данные перегрева кристалла, рассчитанные на подаваемую мощность в 1 Вт относительно температуры 20 °С

Размер кристалла, мм	Температура перегрева кристалла, °С				
	Монтаж на эвтектику Si-Au	Монтаж с помощью клея ВК-32-200 с различной пористостью соединения, %			
		0	10	20	30
2×2	5,58	20,28	21,88	23,88	26,45
3×3	5,41	11,94	12,66	13,54	14,67
4×4	5,26	8,94	9,34	9,84	10,48
5×5	5,12	7,51	7,77	8,09	8,49

полупроводникового кристалла. После испытаний жидкий кристалл удаляется с поверхности — стирается или уничтожается путем прополаскивания в этиловом спирте.

Обнаружение дефектов монтажа кристаллов пайкой возможно с помощью инфракрасного излучения. Направляя на исследуемую поверхность радиометр, можно на телевизионном экране наблюдать термограмму. Характер дефектов и место их расположения определяют сравнением термограммы с эталонным образцом.

В статье [5] рассматривается способ контроля качества паяных соединений путем измерения параметра, непосредственно зависящего от структуры паяного соединения (термоэлектрический контроль паяного соединения). Однако этот способ рекомендует использовать при контроле и испытаниях радиоэлектронного оборудования различного назначения, преимущественно соединений выводов интегральных микросхем и других компонентов в печатных узлах.

К неразрушающим методам, широко используемым в практике, можно отнести рентгенографическое исследование и контроль теплового сопротивления «кристалл–корпус» [6–11]. Рентгеновские методы осуществляются с помощью рентгеноскопии (наблюдение теневого рентгеновского изображения на экране) и рентгенографии (получение теневого изображения на рентгеновской пленке). Обработанная рентгеновская пленка с изображением контролируемых участков изделий называется рентгенограммой.

Следует отметить, что высокоточное рентгеновское оборудование дорого и поэтому малодоступно небольшим предприятиям в качестве повседневного рабочего инструмента контроля качества. Этот метод целесообразно использовать на этапе разработки технологии сборки новых изделий или на стадии серийного производства для того, чтобы управлять технологическим процессом монтажа кристаллов к основаниям корпусов.

Определение теплового сопротивления — один из методов контроля правильности выбора конструкции или технологического процесса изготовления ППИ. Известно, что одной из наиболее существенных причин отказов силовых полупроводниковых приборов (СПП) является повышенное тепловое сопротивление «кристалл–корпус», приводящее к выходу приборов из строя вследствие теплового пробоя. Например, простое увеличение на 10 °С рабочей температуры может привести к увеличению в два раза тока смещения транзистора и к уменьшению в два раза среднего срока службы чувствительного операционного усилителя [8, 12].

При изготовлении СПП качество паяных соединений кристаллов проверяют, измеряя тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом и сравнивая его с тепловым сопротивлением эталонного прибора. Разница значений более чем на 20% свидетельствует о низком качестве пайки (наличие воздушных прослоек, оксидных пленок, непропаев и т. п.). Повышение теплового сопротивления

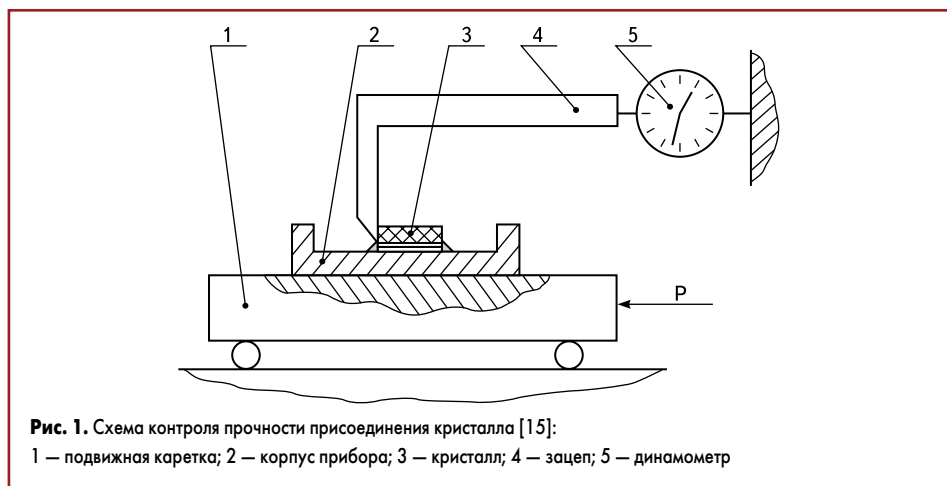


Рис. 1. Схема контроля прочности присоединения кристалла [15]:
1 — подвижная каретка; 2 — корпус прибора; 3 — кристалл; 4 — зацеп; 5 — динамометр

«кристалл–корпус» обусловлено, в основном, низким качеством присоединения кристалла. Участки локального повышения температуры кристалла могут привести к отказу, так как развитие теплового пробоя способствует ускорению протекания диффузионных процессов на границе раздела «металлическая пленка – полупроводник».

В последние годы при пайке кристаллов к основаниям корпусов стремятся получить площадь спаиваемой поверхности не менее 95% от площади кристалла. Это тема для дискуссии, так как некоторые СПП могут быть годными по электрическим параметрам, в том числе по мощности рассеивания и тепловому сопротивлению «кристалл–корпус» ($R_{Ткр-к}$), и в то же время иметь площадь спаиваемой поверхности менее 80% от площади кристалла [13].

Авторы не призывают к тому, чтобы приборы, тем более СПП, выпускались с площадью пустот в паяных соединениях «кристалл–корпус» до 20%. Такие приборы после сборки, термоциклирования и 10 000 энергоциклов имеют электрические параметры и тепловое сопротивление «кристалл–корпус» ($R_{Ткр-к}$) в пределах допустимых значений (согласно ТУ). Но неизвестно, насколько эти приборы будут надежны в течение длительного срока эксплуатации.

Нами установлено, что четкой зависимости температуры нагрева кристалла от площади спаиваемой поверхности нет. Анализ рентгенограмм показал, что качество паяных соединений кристаллов с основаниями корпусов зависит от способов пайки [14]. Непропаи в паяных швах, полученных при одних и тех же режимах пайки, могут быть на различных участках: в центре кристалла, по углам, периметру и т. п. Поэтому оценку качества пайки кристалла к основанию корпуса целесообразно осуществлять путем замера теплового сопротивления с одновременным анализом рентгенограмм паяных швов исследуемых приборов. Оценку необходимо проводить при отработке новой технологии пайки кристаллов и установлении критериев качества для серийного производства СПП.

Зависимость надежности СПП от качества пайки кристаллов к основаниям требует дополнительных исследований.

В технологии производства ППИ при оценке качества монтажа кристалла к основанию корпуса используют также разрушающий метод, заключающийся в том, что кристалл

с помощью специального приспособления механически отделяют от монтажной поверхности корпуса (рис. 1). Кристалл подвергается сжатию, а соединение «кристалл–корпус» — срезу. Испытания на сдвиг кристаллов проводят по методике, изложенной в ОСТ 11.073.013-2008 (часть 1). При этом определяют прочность соединения кристалла с поверхностью, а в случае сдвига кристалла с основания корпуса исследуют состояние поверхности паяемых сторон кристалла и корпуса на предмет наличия пор, зон объемного взаимодействия контактируемых участков.

При отработке новой технологии присоединения кристаллов к основаниям корпусов необходимо проводить исследование качества соединений по поперечным шлифам. Под микроскопом при необходимом увеличении можно зафиксировать не только наличие непропаев и различных включений в шве, но и оценить качество адгезии пленочной металлизации с кристаллом и основанием корпуса.

Следует отметить, что разрушающий метод занимает много времени, кроме того, происходит разрушение прибора.

Оценка прочности соединения кристалла с основанием корпуса

В электронной промышленности широко используется способ оценки прочности крепления кристалла к держателю (табл. 2) [16]. Однако в данном способе не учитывается толщина кристалла, что не позволяет использовать максимально допустимое усилие сдвига кристалла, исключая его разрушение. Кроме того, не берется во внимание возможное наличие пустот (непропаев) в паяном шве.

О несовершенстве существующих стандартов оценки прочности соединения кристалла с корпусом отмечается также в работе [17].

По ОСТ 11 073.013-2008 проведем оценку прочности соединения кристалла с основанием корпуса. Определим максимально допустимое усилие сдвига кремниевого кристалла площадью 3,24 мм² (1,8×1,8 мм) и толщиной 0,3 мм с основания корпуса. Кристалл присоединяется к основанию корпуса пайкой с использованием припоя ПОС40. Допускаемое напряжение для кремния при сжатии $[\sigma]_{ск} = 9,47$ кгс/мм², а допускаемое напряжение в паяном шве на срез $[\tau]_{ср} = 3,9$ кгс/мм².

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчетным значением прочности P' паяного соединения будет:

$$P' = [\sigma]_{ск} \times F,$$

где $[\sigma]_{ск}$ — допускаемое напряжение для основного материала (кристалла) при сжатии, кгс/мм²; F — площадь поперечного сечения кристалла в направлении действия усилия сжатия, мм².

Подставляя значения $[\sigma]_{ск} = 9,47$ кгс/мм², размеры кристалла 1,8 и 0,3 мм, получаем $P' = 5,11$ кгс. То есть кристалл при данном усилии сдвига не будет разрушаться.

В таблице 3 приведены значения прочности P' паяного соединения (усилия сдвига) для кристаллов размером 1,8×1,8 мм при толщине от 0,3 до 0,6 мм.

По данным таблицы 3 видно, что только кристалл толщиной 0,6 мм будет разрушаться при сдвиге с усилием 10,23 кгс, то есть больше допустимого напряжения при сжатии ($[\sigma]_{ск} = 9,47$ кгс/мм²).

Соединение кристалла с основанием корпуса относится к нахлесточному соединению. Для данного типа соединения расчет прочности P кристалла с корпусом определяется по формуле:

$$P = [\tau]_{ср} \times b \times l,$$

где $[\tau]_{ср}$ — допустимое напряжение в паяном шве на срез, кгс/мм²; b — ширина шва, мм; l — длина шва (нахлестки), мм.

Для припоя ПОС40 $[\tau]_{ср} = 3,9$ (размеры кристалла $b = 1,8$ и $l = 1,8$).

Подставляя эти значения в формулу прочности (при отсутствии непропаев в паяном шве, то есть когда площадь паяного шва равна площади кристалла), получим $P = 12,64$ кгс.

В таблице 4 приведены значения усилия сдвига кристалла площадью 3,24 мм² при различных значениях площади паяного шва.

Расчеты показывают, что кремниевый кристалл площадью 3,24 мм² выдерживает при сдвиге минимально-допустимое усилие 2,2 кгс. Однако площадь паяного соединения (спая) составляет около 17% от площади кристалла. То есть кристаллы с площадью непропаев в паяном шве 83% будут считаться годными на операции контроля

Таблица 2. Зависимость минимально-допустимого усилия сдвига от площади кристалла (ОСТ 11 073.013-2008, часть 1, стр. 39)

Площадь кристалла, мм ²	до 0,5	>0,5 до 1,0	>1,0 до 1,5	>1,5 до 2,0	>2,0 до 2,5	>2,5 до 3,0	>3,0 до 3,5	>3,5
Минимально-допустимое усилие сдвига, кгс	0,2 (0,1)	0,6 (0,3)	1,0 (0,5)	1,4 (0,7)	1,6 (0,8)	1,8 (0,9)	2,2 (1,1)	2,5 (1,25)

Примечание.

Значения в скобках приведены для проверки прочности крепления кристаллов, посаженных на клей.

Таблица 3. Зависимость прочности P' (усилие сдвига) от толщины кристалла

Толщина кристалла, мм	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
Площадь поперечного сечения кристалла в направлении действия усилия сжатия, мм ²	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	0,99	1,08
Прочность P' (усилие сдвига), кгс	5,11	5,97	6,82	7,67	8,52	9,38	10,23

Таблица 4. Прочность соединения кристалла с корпусом P (усилие сдвига) при различных значениях площади паяного шва

Площадь паяного шва по отношению к площади кристалла, %	100	75	70	50	25	17,3
Прочность соединения кристалла с корпусом P (усилие сдвига), кгс	12,64	9,48	8,85	6,32	3,16	2,19

прочности паяных соединений кристалла с корпусом (по ОСТ 11 073.013-2008).

По данным таблицы 4 видно, что соединение кристалла с корпусом выдерживает усилие сдвига величиной 8,85 кгс без разрушения, при этом площадь непропаев (пустот) в паяном шве составляет 30% от площади кристалла. В этом случае усилие сдвига не приведет к разрушению кристалла, так как меньше $[\sigma]_{ск}$.

Таким образом, на наш взгляд, необходима корректировка (в сторону увеличения) минимально-допустимых усилий сдвига кристалла.

На рис. 2 и 3 приведены номограммы максимально-допустимых усилий сдвига кремниевых кристаллов в зависимости от их геометрических размеров и площади спая в паяном шве (от 100% до 17,3%). Линия, параллельная оси абсцисс, соответствует усилию сдвига кристалла величиной 9,47 кгс, ниже которой кристалл не будет разрушаться при испытаниях прочности паяных соединений «кристалл–корпус».

Зная допустимое напряжение в кристалле при сжатии $[\sigma]_{ск}$ и допустимое напряжение в шве на срез $[\tau]_{ср}$, можно построить номограммы усилий сдвига кристаллов из различных материалов, смонтированных на кри-

сталлодержатели с использованием припоев, клеев и паст.

Заключение

Известно, что на прочность (качество) соединений «кристалл–корпус» существенно влияют: дефекты на соединяемых поверхностях, остаточные напряжения в кристалле, корпусе, пленочной металлизации и другие факторы. Необходимо учитывать физико-механические свойства кристалла и корпуса, толщину и структуру пленок, способы подготовки кристаллов и корпусов перед сборочными операциями. Немаловажное значение имеет и адгезионная прочность пленок с кристаллом и материалом корпуса. Напряженное состояние в пленках может изменить адгезионную прочность.

Внутренние механические макронапряжения в тонких пленках делятся на собственные и термические. Собственные напряжения появляются в процессе формирования пленок, а термические возникают из-за различий температурных коэффициентов линейного расширения пленок и кристалла (корпуса).

Как показали расчеты прочности паяного соединения кристалла с основанием корпуса,

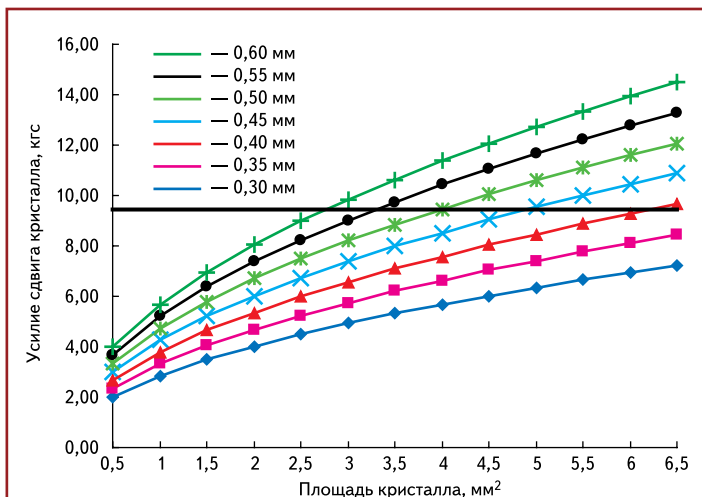


Рис. 2. Зависимость усилия сдвига от площади и толщины кристалла

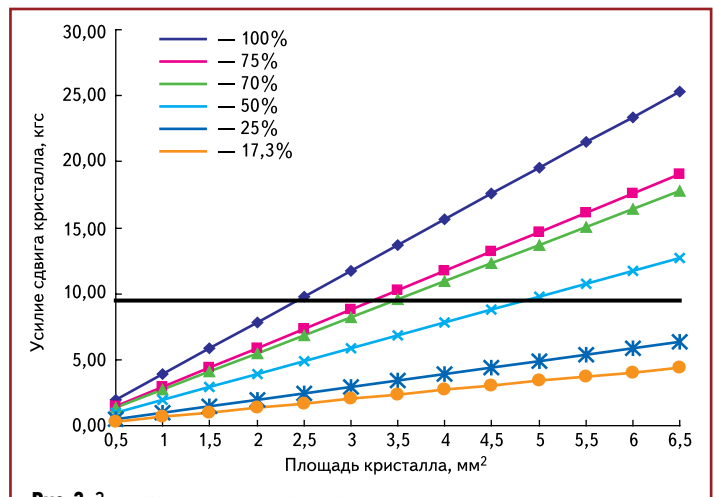


Рис. 3. Зависимость усилия сдвига кристалла от площади кристалла и площади спая в паяном шве

величины усилий сдвига кристалла являются заниженными. Поэтому мы предлагаем увеличить значения минимально-допустимых усилий сдвига кристалла. Но это не значит, что все кристаллы необходимо подвергать сдвигу при максимально-допустимых значениях. В каждом конкретном случае оценку прочности соединений кристалла с кристаллодержателем необходимо рассматривать во взаимосвязи с площадью пустот в соединении «кристалл–корпус». Для этого необходимо ориентироваться на максимально-допустимые значения усилия сдвига, при которых не происходит разрушение кристалла.

При оценке прочности соединения кристалла с основанием корпуса следует учитывать, что площадь боковой грани кристалла, к которой прикладывается сдвигающая нагрузка, возможно, будет меньше исходной толщины кристалла при наличии галтели припоя или выдавленного клея (пасты) из зоны соединения «кристалл–корпус».

На наш взгляд, целесообразно проводить контроль прочности на сдвиг паяных соединений «кристалл–корпус» для кремниевых кристаллов больших размеров, например в производстве СПП. Авторы статьи надеются, что специалисты по сборке ППИ выскажут свое мнение по данному вопросу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 08-08-99033.

Литература

1. Зенин В. В., Макаров О. Ю. Расчет нагрева кристаллов резистивных матриц // Тез. докл. регионального межвузовского семинара. Воронеж: ВГТУ, 1995.
2. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990.
3. Тилл У., Лаксон Д. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление / Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
4. Faith T. J.-Jr., Irvan R. S. Испытания качества крепления кристаллов КНС. Bond-integrity testing of sapphire chips mounted with eutectic performs // IEEE Trans. Compon., Hybrids, and Manuf. Technol. 1984. Vol. 7. № 2 (англ.).
5. Данилин Н. С., Белослудцев С. А. Новый способ контроля паяных соединений в печатных узлах // Печатный монтаж. 2008. № 1.
6. Моряков О. С., Вихров С. А. Методы и средства измерения температуры в полупроводниковом производстве: обзор. Сер. 2 // Полупроводниковые приборы. 1987. № 4.
7. Зигель Б. Измерение теплового сопротивления — ключ к обеспечению нормального охлаждения полупроводниковых компонентов // Электроника. 1978. № 14.
8. Зигель Б. Электрический метод быстрой проверки качества напайки кристалла // Электроника. 1979. № 8.
9. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. Б. Е. Бердичевского. М.: Советское радио, 1976.
10. Горлов М. И., Зенин В. В., Строгонов А. В. Геронтология интегральных схем: долговечность внутренних соединений // Петербургский журнал электроники. 1998. № 2.
11. Патент № 2240573 RU, G01R 31/26. Экспресс-метод измерения теплового сопротивления «переход – корпус силовых полупроводниковых приборов в корпусном исполнении» / С. Н. Флоренцев, В. М. Гарцбейн, С. В. Иванов, Н. Ф. Марамыгин, Л. В. Романовская. Опубл. 20.11.2004. Бюл. № 35.
12. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцева. М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Рязузов А. В. Модификация процесса бесвинцовой пайки кристаллов к основаниям корпусов силовых полупроводниковых приборов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006.
14. Зенин В. В., Хишко О. В. Влияние марки припоя и способов пайки кристаллов на параметры силовых полупроводниковых приборов на примере транзистора КП767В // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
15. Онегин Е. Е., Зенькович В. А., Битно Л. Г. Автоматическая сборка ИС. Технологический процесс. Оборудование. Управление. Техническое зрение. Привод / Справ. пособие. Минск: Высшая школа, 1990.
16. ОСТ 11 073.013-2008. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Часть 1.
17. Парфенов А. Н. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3.