

Технологические материалы для высоко-температурных микросхем



Текст: Александр Скупов



В статье представлен обзор материалов и технологии для создания микросхем, предназначенных для длительной эксплуатации при температурах до +300 °С.

Введение

Продолжается активное внедрение электроники в разнообразные изделия, выпускаемые и эксплуатируемые различными отраслями промышленности. Электроника позволяет упростить некоторые системы, сделать их более компактными, дает возможность удаленно следить за их состоянием в режиме реального времени.

В некоторых отраслях (добыча полезных ископаемых, автомобилестроение, авиакосмическая промышленность) требуется работа электроники при повышенных температурах¹. Обычно за «повышенную температуру»

принимается диапазон от +150 до +300 °С. Существуют примеры и более высокотемпературных устройств, но мы, говоря о «высокотемпературной электронике», будем придерживаться именно этого диапазона.

Основным элементом любого устройства электроники является интегральная микросхема (ИМС). Ее составные части – кристалл, выводы, корпус, связующие материалы – как по отдельности, так и в соединении друг с другом чувствительны к температуре. Во многом долговременная и стабильная работа микросхемы при высоких температурах зависит от выбора технологических материалов для её производства, который происходит на стадии проектирования.

¹ G. Watson, G. Castro, High-Temperature Electronics Pose Design and Reliability Challenges

T 1

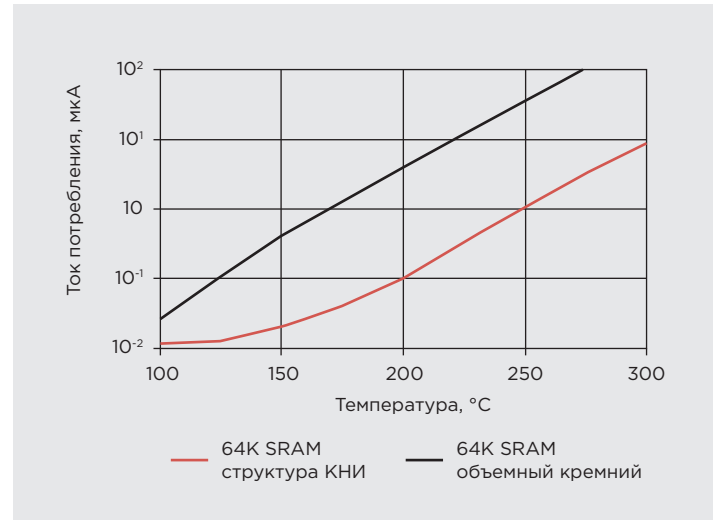
ТИПИЧНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИН TSOI (КНИ С КАНАВКАМИ), ИЗГОТОВЛИВАЕМЫХ КОМПАНИЕЙ ICEMOS TECHNOLOGY

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Диаметр, мм	100, 125, 150
Толщина несущей пластины, мкм	350-1000
Легирование	n-тип: P, Sb, As p-тип: B
Удельное сопротивление, Ом·см	≈0,001-10000
Ориентация	(100), (110), (111)
Скрытый диэлектрик	SiO ₂
Толщина скрытого диэлектрика, мкм	0,2-5,0
Толщина приборного слоя, мкм	1,5-100
Ширина изолирующей канавки, мкм	≥2
Аспектное отношение изолирующей канавки	15:1
Толщина изолирующего SiO ₂ в канавке, мкм	0,1-1,0
Заполнение канавки после изоляции, мкм	Poly Si
Метод финальной планаризации поверхности	ХМП

Материалы на уровне полупроводниковой пластины

Для понимания сложности работы ИМС при повышенных температурах необходимо вспомнить базовые закономерности физики твёрдого тела:

- рост проводимости при увеличении температуры в полупроводниках;
- увеличение скорости диффузии;
- уменьшение пробивного напряжения в диэлектриках.



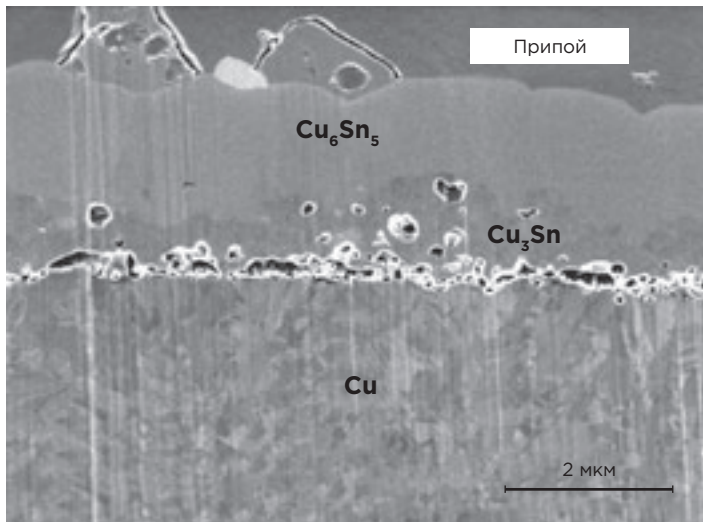
1 Зависимость тока в режиме ожидания от температуры и типа подложки для микросхемы статической памяти SRAM

Рост проводимости приводит к значительному увеличению токов утечек. Как следствие, растёт потребляемая мощность, и ещё более увеличивается тепловыделение. При высоких температурах стандартная изоляция между транзисторами ИМС с помощью p-n переходов становится неэффективной². Вместо этого необходимо применять изоляцию канавками (trench), заполненными SiO₂ либо иным диэлектриком или их композицией. Если кристалл микросхемы изготавливается на основе кремния, то разумно использовать пластины «кремний на изоляторе» (КНИ). Это позволит сократить утечки через подложку (рис 1). Коммерчески доступны пластины производства компании Icemos Technology, где диэлектрические канавки формируются в пластине КНИ согласно топологии заказчика (T 1). Такие структуры называются TSOI (Trenched Silicon on Insulator). Другим вариантом решения проблемы возрастания токов утечки является использование широкозонных полупроводников: GaN, SiC и других³.

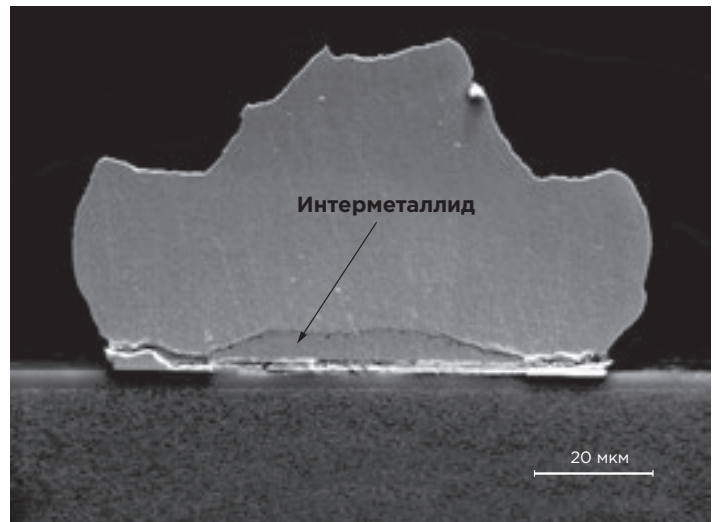
Увеличение скорости диффузии при повышенных температурах приводит к нежелательным явлениям. Во-первых, происходит дальнейшая диффузия примесей в полупроводнике. Во-вторых, увеличивается скорость электромиграции металла контактных площадок. В-третьих, существует риск взаимной диффузии на границах разных материалов с образованием новых фаз и химических соединений. В целом, увеличение скорости диффузии оказывает значительное влияние не только на уровень полупроводникового кристалла, но и на уровень всего электронного узла,

² High Temperature Electronics, F. Patrick McCluskey, Thomas Podlesak, Richard Grzybowski, December 13, 1996 by CRC Press, Reference - 352 Pages

³ Z. Szczepanski, R. Kisiel, SiC die-substrate connections for high temperature applications, MATERIAŁY ELEKTRONICZNE, T. 37-2009 NR 1



2 Дефекты на границе припоя PbSn и Cu после теста на ускоренное старение: интерметаллиды Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , пустоты



3 Трещины на границе алюминия и золота из-за формирования хрупких интерметаллических соединений [X3]

работающего в условиях повышенной температуры. Все это необходимо учитывать при проектировании ИМС, выбирая оптимальные профили и топологию легирования, материалы с низкой скоростью взаимной диффузии, неподверженные образованию химических соединений.

Проблема возрастания пробивного напряжения в диэлектриках решается лишь конструктивно – увеличением их толщины.

Материалы для корпусирования

МОНТАЖ КРИСТАЛЛА

Для монтажа кристаллов микросхем используют полимерные материалы на основе эпоксидных смол, а также металлические и стеклянные припой.

Обычные эпоксидные клеи неприменимы для высокотемпературных приложений из-за постепенной деградации их основы⁴. Вместо них используют припой, например, Au80Sn20 в виде преформ или пасты, например, Indalloy #182. Но он не всегда приемлем из-за высокой стоимости.

Привлекательной альтернативой эпоксидному клею и сплаву Au80Sn20 являются наполненные серебром стеклоприпой, например, новый продукт компании Namics ХН9930-1. Его свойства приведены в 1 2. Этот материал обладает высокой тепло- и электропроводностью. Он может быть использован для монтажа кристаллов, предназначенных для эксплуатации при температурах до +300 °С. Данный стеклоприпой наносится на подложку методом дозирования, как эпоксидный клей для монтажа кристалла. Оплавление ХН9930-1 происходит при +370 °С.

В качестве подложек для микросхем, работающих при высокой температуре, уже не может применяться стеклотекстолит, здесь необходимо использовать керамику: Al_2O_3 , AlN, LTCC (Low Temperature Co-Firing Ceramics) и прочие её виды.

КОРПУС

Для корпусирования ИМС используется литьё под давлением с использованием компаунда на основе эпоксидной смолы, или микросхема помещается в корпус из керамики, металла или специального полимера.

В настоящее время наиболее популярен первый способ, обеспечивающий массовость выпуска и низкую стоимость изделий. К сожалению, метод неприменим для высокотемпературной электроники из-за деградации самой смолы.

Эпоксидный компаунд проницаем для влаги. Поэтому при высоких температурах возможно ускорение коррозии проволоки, используемой для разварки кристалла. Это означает, что лучше использовать корпуса, которые обеспечивают герметичность.

Для высокотемпературных применений наилучшим будет использование корпусов из керамики (например, LTCC), а также металлостеклянных корпусов. Разумно использовать системы в корпусе (СВК, SiP – System in Package) вместо применения каждой микросхемы в индивидуальном корпусе. Это полезно с точки зрения сокращения массогабаритных характеристик сборки, уменьшения термомеханических напряжений при нагреве платы, сокращения длины проводников.

ПРИСОЕДИНЕНИЕ ВЫВОДОВ

Электрическое соединение контактных площадок полупроводникового кристалла и выводов корпуса осуществляется либо с помощью столбиковых или шариковых выводов (т. н. «flip chip», монтаж перевернутого кристалла), либо с помощью проволоки.

⁴ M.B. Neiman et al, The Thermal Degradation of Some Epoxy Resins, Journal of Polymer Science Vol. 56, PP 383-389, 1962

Т 2

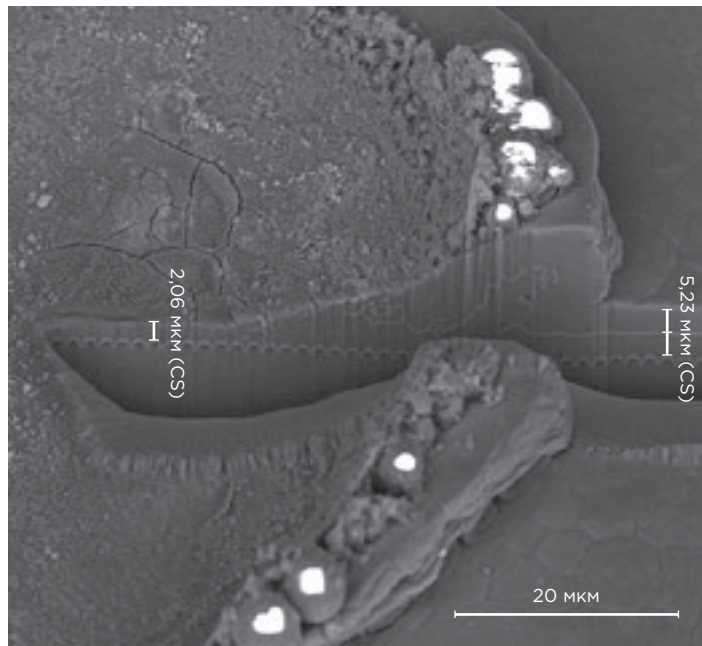
СВОЙСТВА НАПОЛНЕННОГО СЕРЕБРОМ СТЕКЛОПРИПОЯ NAMICS XH9930-1

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
В виде пасты	
Вязкость, Па·с	18
Индекс тиксотропности	4,5
Содержание серебра, %	73
Плотность, г/см ³	5,2
После отверждения	
Сопrotивление, мкОм·см	8
КТР, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	20
Теплопроводность, Вт/м·К	80
Прочность на сдвиг, МПа	30
Содержание серебра, %	80

Соединение контактных площадок кристалла с выводами корпуса (или дорожками платы) для высокотемпературной электроники – тоже непростая задача. Стандартная технология монтажа перевернутого кристалла на текстолитовую подложку с использованием бессвинцовых выводов здесь неприменима. Во-первых, это связано с ростом фазовых включений интерметаллидов Cu/Sn/Ag или Au/Sn/Ni/Ag (в зависимости от сплава и металлизации подложки). Интерметаллические соединения обладают высокой твердостью и хрупкостью, что приводит к отрыву выводов при высоких механических нагрузках или термоциклировании (рис 2). Во-вторых, типичные материалы для заливки зазора между подложкой и чипом (underfill) на основе эпоксидных смол подвержены деградации при высоких температурах из-за химических свойств их основы.

Использование проволочной разварки также ограничено при создании изделий высокотемпературной электроники. В мировой практике для разварки микросхем наиболее часто используют проволоку из Au или Cu на контактных площадках из алюминия. Как золото, так и медь формируют интерметаллические соединения с алюминием (рис 3 и 4), которые приводят к потере прочности выводов⁵.

Одним из решений описанной проблемы является использование соединений из того же металла, что и контактная площадка, например, Al. Также возможно создание дополнительных барьеров для диффузии



4 Контактная площадка из Al после отрыва проволоки из Cu из-за формирования хрупких интерметаллических соединений

(W, Ta, Ni, Ti и др.). Существуют виды проволоки, в которых образование хрупких интерметаллических соединений подавляется с помощью определенных элементов. Например, компания Tanaka производит проволоку типа GPG, в которую добавлен палладий.

Заключение

Создание микросхем, рассчитанных на работу при температурах до +300 °C, требует применения особых приёмов при конструировании и выборе технологических материалов.

На уровне кристалла вместо объёмного кремния целесообразнее использовать структуры КНИ. Высокотемпературная электроника также является одним из применений, где в качестве полупроводниковых материалов имеет смысл использовать SiC, GaN. Для монтажа кристаллов высокотемпературных микросхем уже не подходят клеи на основе полимерных материалов, и вместо них следует применять металлические или стеклянные припои. Для присоединения выводов рекомендуется использовать проволоку, изготовленную из того же металла, что и контактная площадка кристалла, либо использовать барьерную металлизацию.

Группа компаний Остек тесно сотрудничает с производителями материалов, ведущих активные разработки продуктов для применения в высокотемпературной электронике. Специалисты компании готовы оказать технологическую поддержку при создании высокотемпературных микросхем, совместно с производителями материалов и оборудования провести исследования и тесты. □

⁵ D. Kim et al, Formation and behavior of Kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 22, PP 703-716