

Д. т. н. В. А. СОКОЛ, к. т. н. А. И. ВОРОБЬЕВА

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск
E-mail: vasokol@gw.bsuir.unibel.by

Дата поступления в редакцию
09.01 2002 г.

Оппонент д. т. н. Д. Г. ГРОМОВ
(МИЭТ, г. Зеленоград)

МНОГОКРИСТАЛЬНЫЕ МОДУЛИ НА АНОДИРОВАННОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Исследован процесс локального формирования пористого оксида алюминия при формировании подложки с теплоотводящими столбиками и контактными переходами.

Многокристальные модули (МКМ), как известно, являются более совершенной версией гибридных интегральных микросхем, в частности, имеют более высокую степень интеграции, тактовую частоту (150—300 МГц), плотность мощности (50 Вт/см²) [1—4]. Возрастающие требования к функциональной сложности МКМ заставляют искать новые конструктивно-технологические решения в области компоновки и межсоединений. Одним из таких решений является использование металлических оснований, имеющих ряд неоспоримых преимуществ: высокую механическую прочность и теплопроводность, повышенную помехозащищенность и возможность использования в качестве корпуса МКМ. Более того, если стоимость единицы площади диэлектрических оснований растет с увеличением их площади экспоненциально, то стоимость металлических практически не зависит от размера.

В этой связи наиболее перспективным является использование в конструкции МКМ алюминиевых оснований, особенно если учесть, что алюминий является единственным металлом, на поверхности которого можно получить высококачественное диэлектрическое покрытие толщиной в десятки и сотни микрометров путем электрохимического превращения алюминия в его собственный оксид Al₂O₃.

При разработке многоуровневых систем межсоединений (МСМ) для МКМ на алюминиевой подложке наиболее подходящим конструктивно-технологическим решением является использование подложки не только в качестве несущего основания, но и для потенциальных слоев (шины "земли" и питания) [5]. В этом случае необходимо сформировать контактные переходы от подложки (выходы на "землю") в диэлектрическом слое оксида алюминия (L_{vias}) и матрицу вертикальных теплоотводящих столбиков (T_{vias}), позволяющих увеличить количество отводимого от МСМ тепла.

Авторы благодарят сотрудников фирмы РСВ Дрора Гурвица и Аллу Вепрински за помощь, оказанную при проведении экспериментов по профилометрии.

В настоящее время для соединения с шиной заземления, в качестве которой применяют металлическую подложку, используют металлизированные пропаянные отверстия или островки алюминия, полученные лазерной обработкой участков заземления на полностью готовой схеме [6, с. 83—84]. Однако столбиковые выводы из припоя не имеют механизмов ослабления напряжений при термоциклировании и не могут быть использованы в конструкциях МКМ из материалов с разными температурными коэффициентами расширения (ТКР). Кроме того, в технологии столбиковых выводов из припоя невозможно использовать одновременно Si- и GaAs-кристаллы из-за различия ТКР. Другие варианты заземления с помощью подложки, описанные, в основном, в иностранных патентах, весьма трудоемки при конкретной реализации и требуют освоения дорогостоящего оборудования.

С учетом таких факторов, как увеличение размеров исходных пластин-подложек, уменьшение размеров элементов топологии (до 10 мкм) и необходимость обеспечения при этом их высокой воспроизводимости по всему полю, увеличение размеров кристаллов-чипов (до 160 мм²) с числом выводов от 350 до 1000, а следовательно, и модулей на пластинах, представляется целесообразным формирование теплоотводящих столбиков и контактных переходов на "землю" в анодированной алюминиевой подложке.

Целью данной работы является исследование процесса локального формирования пористого анодного оксида алюминия и его сплавов при формировании алюминиевой подложки с теплопроводящими столбиками и контактными переходами от шины "земли" (подложки) для высокочастотных МКМ-А — многокристальных модулей на анодированной алюминиевой подложке с тонкопленочной многоуровневой системой межсоединений, изготовленной по ЭЛАТ-технологии [7]. Основным элементом конструкции МКМ-А является Al-подложка, которая используется в качестве несущей основы и в которой формируется матрица вертикальных теплоотводящих столбиков T_{vias} и контактные переходы от "земляной" шины (подложки) L_{vias} .

Ранее проведенные исследования показали, что пористые оксиды алюминия имеют высокие диэлектрические и физико-механические свойства и поэтому пригодны к применению в качестве изоляционного слоя оснований МКМ [8, 9].

Для получения оснований использовали деформируемые алюминиевые сплавы. Из алюминиевого листа толщиной 0,8—1,5 мм вырезали квадратные (120×120 мм) или круглые диаметром 150 мм (максимальные размеры) пластины, которые подвергали обезжириванию и термообработке при температуре 623 К в сжатом состоянии. Поверхность пластин с двух сторон обрабатывали алмазным точением или электролитической полировкой до чистоты по 13—14 классу. Затем образцы дважды промывали в хромпике, дистиллированной воде, сушили центрифугированием и отжигали при температуре 623—673 К с одночасовой выдержкой. Максимальный прогиб (неплоскостность) подложек после такой обработки составляет 30 мкм (60×48 мм) и 60 мкм (120×120 мм), соответственно.

Подготовленные пластины монтировались на специальные захваты и завешивались в ванну установки анодирования, заполненную щавелево-кислым электролитом. Процесс анодирования проводили на постоянном токе при плотности 3—3,5 А/дм², напряжении формовки 65—95 В и температуре электролита 290—297 К. Пластинам в ванне анодирования сообщалось непрерывное движение с линейной скоростью 20—22 м/мин, что обеспечивает надежный отбор тепла от пластин и исключает локальные перегревы и прожоги оксида. Продолжительность процесса анодирования зависит от скорости роста (0,5—1,0 мкм/мин) и заданной толщины оксида. Цвет оксидных слоев — от серого до черного — определяется составом алюминиевого сплава и режимом анодирования.

Пористость анодного оксида алюминия придает ему высокую гигроскопичность и приводит к зависимости диэлектрических свойств от условий окружающей среды, например, влажности воздуха. Поэтому анодированные основания подвергаются грунтовке органическими (полиимид, роливсан, ВСВ (бензо-цикло-бутан)) или неорганическими (окись хрома, фосфатные связки, жидкое стекло) наполнителями.

Грунтованные основания имеют следующие электрофизические свойства: объемное удельное электросопротивление $\rho_v = 8 \times 10^{13} \dots 10^{15}$ Ом·см, диэлектрические потери $\text{tg}\delta = (1 \dots 2,5) \cdot 10^{-3}$, диэлектрическая постоянная $\epsilon = 6,5 \dots 7,0$. После двухлетнего хранения в открытой таре в помещении с климатическими условиями Республики Беларусь электрофизические свойства алюминиевых оснований не изменяются.

Все исследования проводили на подложках из отечественных сплавов АМг и АМц и, для сравнения, из американских сплавов, имеющих состав, близкий к отечественным. Состав алюминиевых сплавов, исследованных в данной работе, приведен в табл. 1.

Толщина оксида выбиралась исходя из следующих соображений.

Таблица 1

Состав сплавов алюминия (% мас.)

Марка сплава	Al	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Cr
АМг-2	Основа	1,8—2,6	0,2—0,6	0,1	0,4	0,4	0,05
АМг-3	"	3,2—3,8	0,3—0,6	0,06	0,4	0,5	0,05
АМц	"	0,2	1,0-1,6	0,1	0,7	0,6	—
U-5086	"	4,0	0,5	—	—	—	—

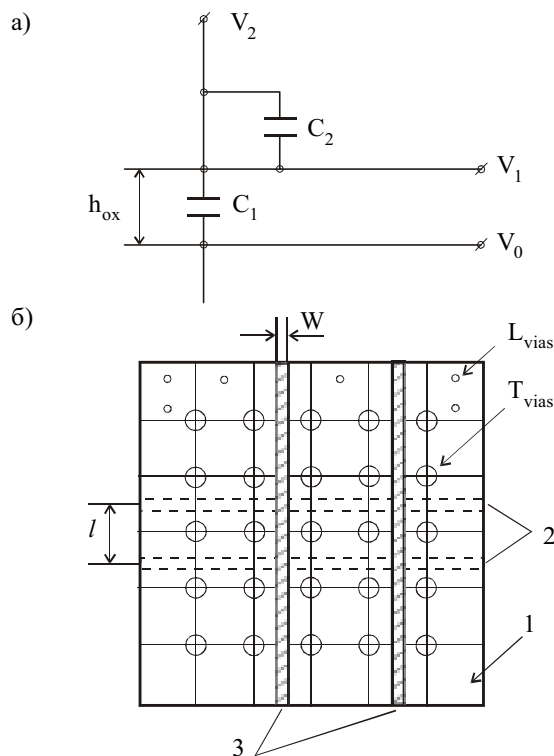


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) фрагмента структуры МСМ (б) и паразитные параметры:

1 — подложка; 2 — дорожки первого (нижнего) уровня; 3 — дорожки второго (верхнего) уровня; W — ширина дорожки; l — расстояние между дорожками

Нижний предел определяется наводками по диэлектрическому слою и паразитной емкостью на подложку. Наводками по слою пористого оксида Al_2O_3 можно пренебречь, если минимальное расстояние между элементами слоя l не менее чем в 5 раз больше толщины диэлектрика h_{ox} . Так, если расстояние между дорожками в МСМ ≥ 25 мкм, толщина слоя Al_2O_3 должна быть не менее 5 мкм.

На рис. 1 приведена эквивалентная схема (а) фрагмента структуры МСМ (б) и паразитные параметры, обусловленные емкостными связями подложки с МСМ. Ортогонально расположенные сигнальные слои V_1 и V_2 показаны через емкостные связи C_1 и C_2 с подложкой, используемой как "земля" (V_0). При увеличении толщины оксида от 30 до 100 мкм значение C_1 уменьшается от 0,2 до 0,08 нФ/см² при равных прочих условиях. Значение C_2 зависит от толщины межуровневого диэлектрика в МСМ h_{ox} . При изменении h_{ox} от 1,5 до 4,8 мкм C_2 изменяется в пределах 4,0—1,5 нФ/см².

Верхний предел толщины оксида (150 мкм) определяется как частотными свойствами МКМ, так и реальными возможностями локального электрохимического анодирования (ЭХА). Существует предельная толщина анодного оксида (порядка 200 мкм), выше которой процесс толстослойного ЭХА сплавов алюминия становится

неуправляемым. Исходя из вышеизложенного процесс локального формирования пористого оксида алюминия исследовали в диапазоне толщин 5—150 мкм.

Главной проблемой при локальном толстослойном ЭХА алюминия и его сплавов является объемный рост пористого оксида и изотропный характер процесса.

Для отработки технологических операций формирования защитной маски при локальном анодировании был разработан тестовый модуль. В топологии тестовой структуры имеются контактные переходы круглой и квадратной формы различных размеров, используемые как точечный тест на нарушение адгезии при объемном росте и поданоирование в результате изотропного характера процесса.

Исследование влияния конфигурации маски показало, что при всех исследованных толщинах оксида круглые фрагменты воспроизводятся лучше, а в углах квадратной маски образуются трещины после высокотемпературного отжига при температуре 673 К. Образование трещин не зависит от номинального размера фигуры и от расположения ее на подложке, а определяется составом сплава, толщиной оксида и формой элемента структуры. Около круглых элемен-

тов маски трещины не образуются ни до, ни после отжига. Подложки при высокотемпературном отжиге (≤ 723 К) деформируются при определенном соотношении толщины подложки и оксида преимущественно вблизи острых кромок и краев фрагментированных участков маски. Поэтому в тех случаях, когда высокотемпературная обработка является необходимой технологической операцией, желательно, во-первых, использовать круглые или с закругленными торцами подложки, а во-вторых, проектировать контактные переходы и теплопроводящие столбики круглой формы.

Были исследованы различные технологические варианты формирования защитной маски, устойчивой при локальном толстослойном ЭХА. Кислотостойкие органические резисты, химически устойчивые к воздействию щавелево-кислых электролитов, повреждаются механически на кромках фрагментированных участков маски из-за объемного роста пористого оксида. Поэтому исследовали комбинированную маску из тонких пленок анодируемых металлов (Ta—Al—Ta). Плотный оксид металла Ta_2O_5 , образованный из материала маски при порис-

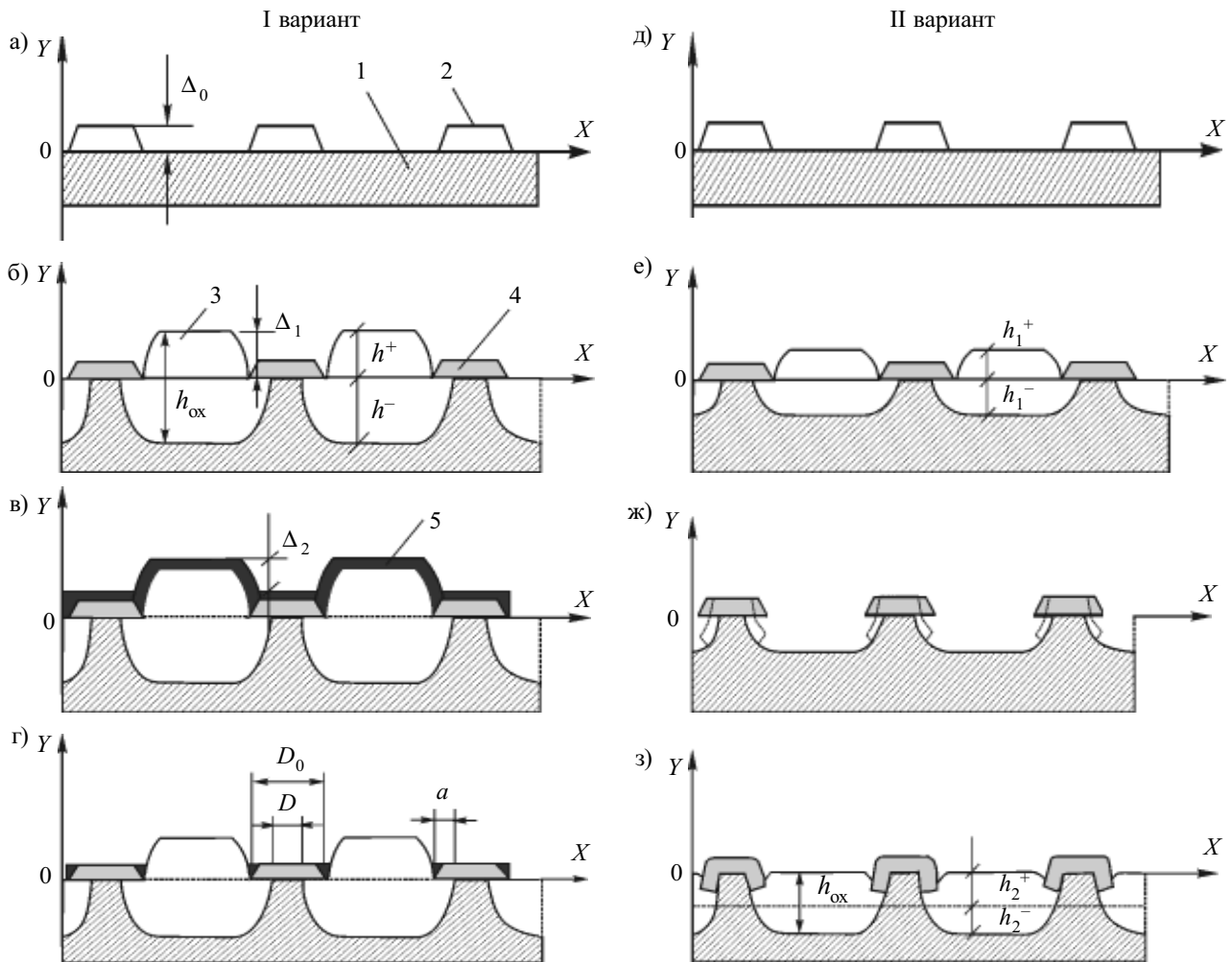


Рис. 2. Схема переноса изображения из комбинированной маски в подложку:

1 — алюминиевая подложка; 2 — комбинированная маска из тонких пленок Ta—Al—Ta; 3 — пористый оксид алюминия; 4 — защитная маска из Ta—Al— Ta_2O_5 ; 5 — SOG (special organic glass)

том анодировании подложки, достаточно эластичен и не подрывается при пористом анодировании, сохраняя форму рисунка. Однако имеет место значительный объемный рост пористого оксида над маской, как показано на соответствующих профилограммах поверхности на рис. 2 и 3.

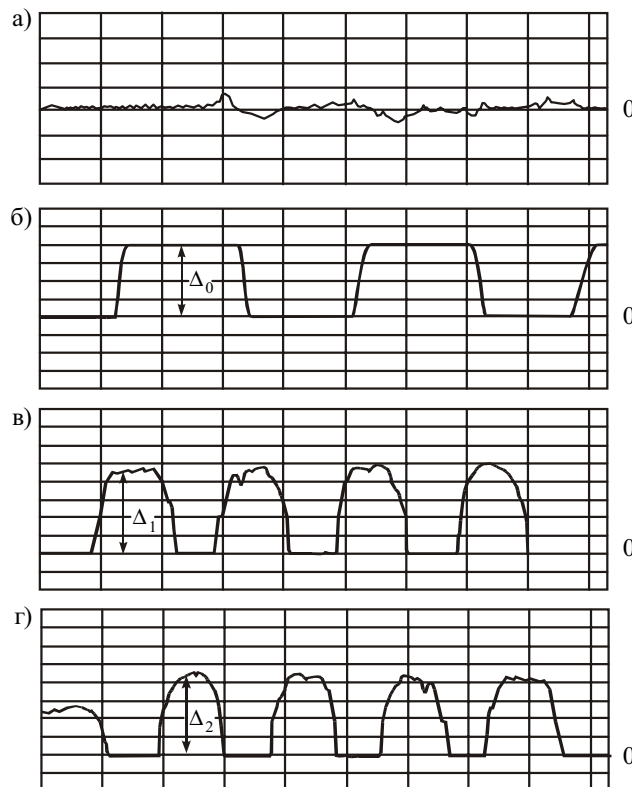


Рис. 3. Профилограммы поверхности тестовой структуры, изготавливаемой по I варианту:
 а — исходная поверхность; б — защитная маска; в — ступеньки оксида после анодирования; г — ступеньки оксида после планаризации

На рис. 2 приведена схема переноса изображения из комбинированной маски Ta (60 нм)+Al (2,0 мкм)+Ta (100 нм) в подложку с помощью ЭХА, а на рис. 3 — соответствующие профилограммы поверхности, полученные с помощью сканирующего профилометра Sloan DEKTAK 3030.Rev. фирмы Natan Post Office. На схеме приняты следующие обозначения: D_0 — размер стороны квадратного фрагмента маски; H_{ox} — общая толщина оксида; D — размер стороны контактного перехода в подложке; h^+ и h^- — толщина оксида над и под исходной поверхностью подложки, соответственно; a — величина поданоирования; $(a-h^-)$ — величина переаноирования; Δ — высота ступеньки оксида над маской.

Статистическая обработка экспериментальных результатов (профилограмм и микрофотографий поверхности) по методике

вариационных рядов позволила определить среднюю величину поданоирования (a) и переаноирования ($a-h^-$) при толстослойном ЭХА сплавов Al. В табл. 2 приведены экспериментальные результаты для образцов из сплавов АМг, АМц и U-5086, полученные при идентичных условиях анодирования, откуда видно, что чем толще пленка оксида, тем больше уход размеров вследствие поданоирования и тем больше должен быть допуск на этот уход. Профилограммы поверхности и данные табл. 2 показывают, что при локальном анодировании сплавов алюминия происходит значительный объемный рост оксида. Коэффициент объемного роста k больше, чем при анодировании плоской поверхности чистого алюминия (1,2—1,3). При приближении толщины оксида к геометрическим размерам элементов маски k увеличивается. При оптимальных условиях анодирования, включая охлаждение и перемешивание, основное влияние на результаты ЭХА оказывают однородность и состав сплава и соотношение толщин оксида и геометрических размеров маски.

Исследования переаноирования при равных прочих условиях показали, что наибольший вклад в искажение размеров обрабатываемой структуры вносит состав сплава. В естественных условиях (без перемешивания и принудительного охлаждения) переаноирование обусловлено тем, что скорость ЭХА при достижении некоторой критической толщины оксида $H_{кр}$ значительно уменьшается, т. к. каналы пор блокируются газовыми пузырьками.

Для сплавов АМг критическая толщина оксида равна примерно 30 мкм. Уменьшение скорости роста оксида после достижения этой толщины связано с уменьшением плотности тока анодирования (тока формовки). Последний однозначно связан с силой тока в поре, которая изменяется при изменении сопротивления токопроводящего канала (пора, заполненная электролитом). Сопротивление токопроводящего канала состоит из двух составляющих: сопротивление электролита в поре и переходное сопротивление оксида на границе раздела "барьерный слой оксида — электролит". Изменение сопротивления электролита в поре незначительно по сравнению с изменением переходного сопротивления оксида при сжатии токопроводящего канала газовыми пузырьками.

Таблица 2

Результаты локального анодирования сплавов алюминия

Сплав	Параметры						
	* H_{ox} , мкм	h^+ , мкм	h^- , мкм	a , мкм	$(a-h^-)$, мкм	$(a-h^-)$, %	k
АМг-3	5	3,5	1,5	4	0,5	12	1,4
АМг-3	17	10	7	13	3	23	1,7
АМг-3	45	25	20	37	12	32	1,8
АМг-3	150	65	85	115	30	20	1,8
АМг-2	100	45	55	80	40	25	1,7
АМц	65	32	38	75	37	57	1,7
АМц	70	33	40	85	45	64	1,7
U-5086	13	6	7	10	4	31	1,8
U-5086	25	11	13,5	20	9	36	1,8

*Толщина оксида, определенная с помощью измерителя толщины ВТ-30Н с точностью $\pm 5\%$.

Была разработана программа расчета изменения сопротивления токопроводящего канала в зависимости от диаметра газовых пузырьков (b) и длины поры (толщины оксида). Программа основана на решении уравнений Лапласа для электрического поля в поре, заполненной электролитом, при определенных граничных условиях. Результаты расчета относительного изменения сопротивления токопроводящего канала R/R_0 в зависимости от его диаметра (d_p) и высоты (h) приведены на **рис. 4**. Расчетные данные показывают, что при значительном сужении токопроводящего канала его сопротивление резко возрастает (кривая 1) вследствие выделения пузырьков газа.

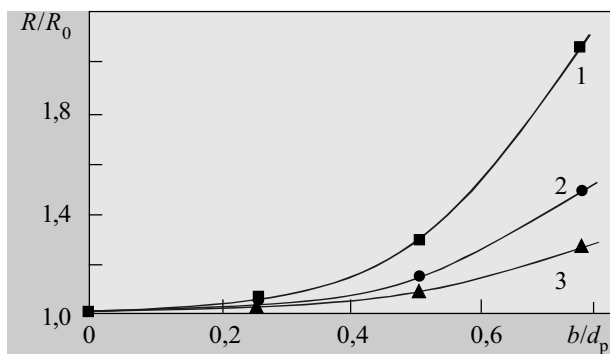


Рис. 4. Зависимость относительного изменения сопротивления токопроводящего канала от его диаметра и высоты:

$$1 - 2h/d_p = 0,1; 2 - 2h/d_p = 0,5; 3 - 2h/d_p = 1,0$$

Исследования динамики развития газовой выделения на аноде показали, что в кислотных электролитах (серно-кислых и щавелево-кислых) газовые пузырьки появляются на поверхности анода практически мгновенно (10^{-2} — 10^{-3} с). Химический анализ анодного газа показал, что он состоит из 96% об. кислорода и 4% об. водорода. Отрываясь от дна поры, газовые пузырьки заполняют ее объем, увеличивая сопротивление токопроводящего канала. Увеличивается температура электролита. С увеличением времени анодирования (толщины оксида) увеличивается скорость выделения газа на аноде. Вследствие этого увеличивается доля электроэнергии на его выделение, т. к. плотность тока в цепи поддерживается постоянной. Поэтому ЭХА в вертикальном направлении Y при достижении $H_{кр}$ приостанавливается или прекращается совсем, и переанодирование определяется только скоростью ЭХА материала подложки в боковом направлении X (см. рис. 2).

Экспериментальная оценка поданоодирования по элементам различного размера и формы (точечный тест) показала, что величина ухода под маску не зависит от формы и номинального размера элемента, если этот размер больше толщины оксида и элементы структуры находятся на значительном расстоянии друг от друга. Зависимость от размера имеет место при ширине схемного элемента, сравнимой с толщиной оксида или меньшей, и при переносе изображения через окна (щели) в защитной маске. В нашем эксперименте ширина схемного элемента изменяется на удвоенную и более толщину проаноодированного слоя.

Используя полученные экспериментальные результаты, был разработан технологический процесс планаризации поверхности подложки с T_{vigs} и L_{vias} совместимой с тонкопленочной технологией.

Конкретная реализация технологии планаризации допускает множество различных вариантов в зависимости от толщины диэлектрического слоя и с учетом функциональных требований, предъявляемых к МКМ. На рис. 2 представлены два варианта последовательности технологических операций планаризации поверхности перед нанесением тонкопленочных слоев для формирования МСМ.

При толщине диэлектрического слоя до 30 мкм наилучшие результаты были получены при следующей последовательности технологических операций. На полированную поверхность алюминиевой подложки (профилограмма поверхности на рис. 3, а, степень шероховатости на уровне 15,5 нм) осаждают многослойную тонкопленочную композицию Ta—Al—Ta и проводят фотолитографию по рисунку первого слоя ("земляной" шины) — рис. 2, а и 3, б. Проводят локальное формирование пористого оксида при постоянной плотности тока — рис. 2, б. По профилограммам поверхности (рис. 3, в) определяют высоту ступеньки Δ_1 и толщину оксида h^+ . Высота ступеньки в пределах длинной стороны тестовой структуры изменяется на $\pm 20\%$ относительно среднеарифметического значения. Далее проводят планаризацию поверхности традиционным методом, например, с помощью жидкого стекла — рис. 2, в. После планаризации высота ступеньки (Δ_2) изменяется в пределах $\pm 10\%$, но абсолютная величина почти не изменяется — рис. 3, г. Затем проводят вскрытие контактных окон — рис. 2, г. При вскрытии контактных окон плазменным травлением высота ступеньки уменьшается не более чем на 20%.

Профилограмма поверхности подложки после планаризации традиционным методом показана на рис. 3, г. Качество планаризирующего слоя, нанесенного поверх ступенчатой структуры, определяется его конформностью к наклонным элементам профиля ступенек. Покрытие из SOG сглаживает рельеф — рис. 2, г, но не решает проблемы ступенек, высота которых остается почти на том же уровне. Поэтому в процесс планаризации были введены дополнительные операции (*второй вариант*).

После формирования маски по рисунку контактных переходов — рис. 2, д проводят первое локальное анодирование на глубину h_1 — рис. 2, е, селективное химическое травление пористого оксида — рис. 2, ж, второе локальное ЭХА на глубину h_2 — рис. 2, з.

В данном варианте предпринята попытка превращения изотропного анодирования в псевдоанизотропное — рис. 2, ж: свешенные края защитной Ta_2O_5 -маски, образованные при селективном химическом травлении оксида Al_2O_3 , полученного при первом анодировании, блокируют дальнейшее боковое поданоодирование. Данный процесс сходен с предложенным в [10, с. 883—895] процессом псевдоанизотропного травления. Загиб маски во время второго анодирования защищает боковую стенку от переанодирования и, кроме того, образуется почти планарная поверхность.

Расчет режимов анодирования начинается с определения толщины оксида, необходимой для изоляции шин питания от сигнальных уровней ($h_{\text{ок}}$).

По известным значениям толщины оксида $h_{\text{ок}}$ и коэффициента объемного роста k по схеме, приведенной на рис. 2, определяют толщину оксида при первом анодировании. Из схемы рис. 2 видно, что

$$h_{\text{ок}} = h_2^- + h_2^+ = h_2^+ + h_1^- \quad (1)$$

Отсюда

$$h_1^- = h_{\text{ок}} - h_2^+ \quad (2)$$

где $h_2^+ = h_{\text{ок}}/k$,

тогда

$$h_1^- = h_{\text{ок}} - h_{\text{ок}}/k = h_{\text{ок}}(1 - 1/k) \quad (3)$$

По значению h_1^- определяют время первого анодирования, используя формулу Сааши для гальваностатического режима [11]. Затем экспериментально определяют время селективного химического травления оксида. Для селективного химического травления анодного оксида на подложках из сплава АМг использовали раствор следующего состава: 35 мл/л 85% H_3PO_4 + 20 г/л CrO_3 ($T=353$ К). Время обработки в этом травителе зависит от условий формирования оксида, а не от его толщины, и в каждом конкретном случае определяется экспериментально. В нашем эксперименте время травления составило $7 \pm 0,5$ мин.

Этот вариант изготовления подложки был разработан при проведении совместных исследований в рамках договора о научном сотрудничестве с фирмой РСВ (г. Хайфа, Израиль).

При толщине диэлектрика выше 30 мкм для увеличения прочности сцепления металлической маски с подложкой предварительно проводят неглубокое пористое анодирование ($\sim 0,5$ мкм) для получения однородной шероховатой поверхности, далее осуществляют операции по схеме рис. 2, $a \rightarrow z$ и после грунтовки проводят механическое полирование поверхности оксида. Этот вариант планаризации используется при разработке конструкции и технологии высококачественного фильтра на алюминиевой подложке в рамках республиканской программы "Информатика".

На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

Анодированные алюминиевые подложки с теплоотводящими столбиками и контактными переходами могут быть использованы при конструировании гибридных микросборок на крупноформатных подложках, объединяющих бескорпусные кристаллы (МКМ); тонкопленочных ГИС с многоуровневыми системами межсоединений, в том числе со встроенными пассивными элементами [12]; трассировочных микроплат под разварку СВЧ-кристаллов; оснований носителей для миниблоков, получаемых методом поверхностного монтажа, и др.

Толщина алюминиевых подложек для этих целей должна быть в диапазоне 0,8...1,5 мм, геометрические размеры зависят от используемого для полирования оборудования, максимальный прогиб (неплоскостность) составляет 30 мкм (60×48 мм) и 60 мкм (120×120 мм), соответственно.

Толщина анодного оксида на поверхности подложки зависит от конкретного применения, и для устройств, работающих в диапазоне частот до 50 МГц, может быть равна 10—15 мкм при ширине дорожек межсоединений в МСМ порядка 15—20 мкм. При частотах больше 150 МГц толщина диэлектрического слоя должна быть увеличена до 50 мкм и более. Толщина технологического слоя h_1 рассчитывается по формулам (1) — (3) исходя из условий получения планарной поверхности до нанесения тонких пленок. Величина поданоирования зависит от типа сплава, толщины оксида, и должна учитываться при проектировании контактных переходов.

В тех случаях, когда высокотемпературная обработка является необходимой технологической операцией, желательно использовать круглые или с закругленными торцами подложки и контактные переходы и теплопроводящие столбики круглой формы.

Так как переаномирование обусловлено тем, что каналы пор блокируются газовыми пузырьками, определены и исследованы условия анодирования с минимальным газовыделением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Burman Surendra, Shervani Naveed A. Programable multichip modules // IEEE Micro.— 1993.— Vol. 13, N 2.— P. 28—35.
- Nakahara H. Printed circuit world convention VI // Galvanotechnic.— 1993.— Vol. 84, N 7.— P. 2426—2429.
- Muszka E. G., Dixon A. Gasse, Frent J. A multichip package for high-speed logic die // IEEE Trans. Compon. Hybrid and Manuf. Technol.— 1993.— Vol. 16, N 1.— P. 67—73.
- Makund P. R., McDonald J. F. The high performance electronic packaging technology // Computers.— 1993.— Vol. 26, N 17.— P. 10—12.
- Сокол В. А., Воробьева А. И., Врублевский И. А., Паркун В. М. Печатные платы на металлических основаниях // Зарубежная радиоэлектроника.— 1991.— № 5.— С. 49—64.
- Мэнгин Ч. Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа.— М.: Мир, 1990.
- Сокол В. А., Воробьева А. И., Мирский У. Базовые технологии многокристальных модулей // Сб. "Современные средства связи".— Междунар. науч.-техн. конф.— РБ, г. Нарочь, 1995.— С. 223.
- Сокол В. А., Костюченко С. А., Фамес Ю. Н., Федотова Т. Н. Применение алюминиевых анодированных подложек в технологии гибридных интегральных микросхем // Специальная техника средств связи. Сер. Технология производства и оборудование.— 1983.— Вып. 1.— С. 1—13.
- Сокол В. А., Татаренко Н. И., Гусар Ю. С., Данилович Н. И. Получение высококачественной изоляции для многоуровневых коммутационных плат БГИС // Производство-технический опыт.— 1977.— № 11.— С. 24—30.
- Моро У. Микролитография. Т. 2.— М.: Мир, 1990.
- House Dr., Downie Dr. The theory of porous anodization of aluminium // Electroplating and metal finishing.— 1976.— Vol. 29, N 10.— P. 19—24.
- Воробьева А. И., Москвичев К. В. МСМ-D интегральные резисторы. Процесс изготовления и основные характеристики // Микроэлектроника.— 2000.— Т. 29, № 6.— С. 417—425.