

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ

ХАРАКТЕРИСТИКИ, КРИТЕРИИ ВЫБОРА

Ю.Богданов, В.Кочемасов, Е.Хасьянова ehasyanova@gmail.com

Подложка – основа многих электронных компонентов и интегрированных изделий, влияющая на их параметры. Материалы для подложек могут быть проводниками, полупроводниками или изоляторами, иметь различную химическую чистоту, температурные и электрические характеристики. Ведущие производители материалов для электроники предлагают подложки с самыми разными свойствами. Выбирая подложку, необходимо учитывать важнейшие характеристики разрабатываемого изделия.

При производстве пассивных и активных элементов и устройств, интегральных микросхем и печатных плат важную роль играет выбор материала основания. Согласно IPC-T-50 [1], подложка (substrate) – это твердое основание в виде пластины, в объеме или на поверхности которого формируется проводящий слой. В зависимости от исходных материалов и процесса производства, подложка может иметь свойства полупроводника или изолятора. По типу применяемых материалов подложки делятся на органические [2] и неорганические.

Неорганические подложки изготавливаются из материалов на основе монокристаллических и аморфных диэлектриков и/или полупроводников. Они применяются при производстве толсто- и тонкопленочных резисторов, индуктивностей, конденсаторов, фильтров, направленных ответвителей и микросхем, в том числе и с применением технологий HTCC и LTCC (high temperature co-fired ceramic, low temperature co-fired ceramic – высоко- и низкотемпературная совместно обжигаемая керамика). Такие материалы содержат оксиды и нитриды алюминия (Al_2O_3 , AlN) с различной чистотой материала и оксид бериллия (BeO) (рис.1а). Для изготовления диодов, транзисторов и интегральных микросхем применяются полупроводниковые кристаллы в виде тонких пластин (wafer) диаметром 100–450 мм [1, 3] (рис.1б). Методами легирования (ионной имплантации), травления (осаждения)

и т.д. на пластинах размещают множество бескорпусных интегральных схем (bare die, chips). В качестве исходных материалов полупроводниковых подложек используются кристаллические материалы высочайшей степени чистоты 99,9999999%: карбид кремния SiC, сапфир (99,99999% Al_2O_3) и др.

Более всего распространены керамические подложки – из-за их экологичности, доступности исходного сырья, стойкости к окислению, экстремально высоким температурам и на порядок более высокой, чем у металлов, упругости. В зависимости от процесса производства такие подложки могут быть как проводниками, так и изоляторами (табл.1).

Свойства подложки влияют как на параметры линии передачи и конструкцию устройства в целом, так и на технологию его производства, поэтому к подложкам (особенно для устройств СВЧ) предъявляются жесткие требования. Для выбора оптимального варианта необходимо понимать, как свойства материала подложки влияют на параметры изделия [7, 8].

Электрофизические свойства подложки определяются составом и структурой кристаллических фаз, образующих керамику определенного вида. Самые важные свойства – это относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Диэлектрическая проницаемость характеризует электроизоляцию материала, определяющую импеданс и частотный диапазон изделия.

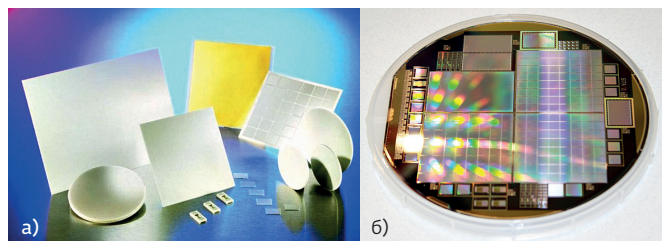


Рис.1. Неорганические подложки: керамические [4] (а); полупроводниковые [5] (б)

На частотный диапазон также влияет и толщина подложки (рис.2).

Линейные размеры проектируемого устройства обратно пропорциональны значению ϵ_r . Однако при очень высоких значениях ϵ_r в микрополосковых линиях возникают паразитные поверхностные волны. Граничную частоту их возбуждения можно повысить, уменьшая толщину подложки [10].

Тангенс угла диэлектрических потерь определяет погонные диэлектрические потери. Большое влияние на величину $\text{tg}\delta$ оказывает структура исходного материала, его пористость и уровень стекловидной фазы – наличие в керамическом материале стеклообразующих оксидов SiO_2 , Na_2O , CaO , BeO .

Термомеханические свойства – комплекс показателей, характеризующих механические свойства керамических материалов при изменении температуры. В спецификации материалов чаще всего приводятся предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$ (flexural strength, МПа) и предельная температура применения подложки $T_{\text{макс}}$ (maximal temperature of use, °C). Предел прочности при изгибе определяет кратковременную прочность керамики при рабочей температуре. Предельная температура применения керамического материала лежит между температурой начала размягчения и температурой, при которой образец деформируется на 4%.

Значительное влияние на прочность подложки оказывает и микроструктура материала – содержание и состав стеклофазы, пористость, количественное соотношение кристаллических фаз, размер зерна. Увеличение содержания кристаллических фаз и уменьшение размера зерна ведут к росту прочности.

Основные теплофизические свойства, определяющие температурную стойкость керамики, – теплопроводность λ (thermal conductivity, Вт/(м·К)) и температурный коэффициент линейного расширения ТКЛР (КТР, СТЕ – coefficient of thermal expansion, ppm/°C).

λ – скорость распространения тепла через материал. Для керамики зависимость теплопроводности

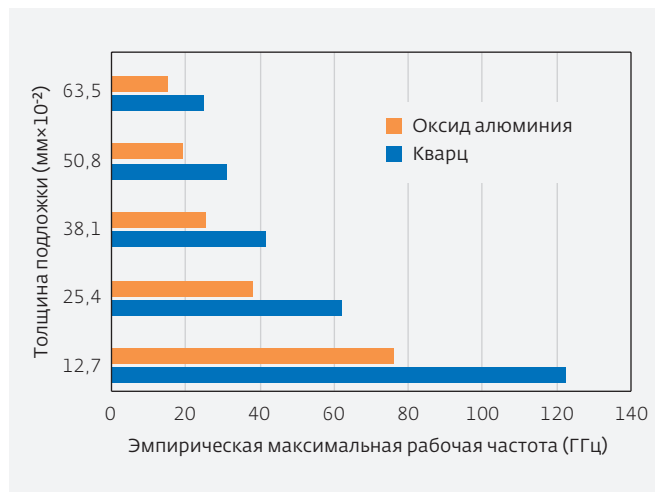


Рис.2. Сравнение максимальных рабочих частот для подложек на основе оксида алюминия и кварца. Результаты рассчитывались по эмпирическому правилу: толщина подложки равна одной десятой доле длины волны [9]

от температуры имеет два участка: область ниже характеристической температуры (температуры Дебая), в которой λ уменьшается по экспоненциальному закону, и область "последебаевских" температур (рис.3). Значение теплопроводности может быть снижено при изменении строения кристаллической решетки, наличии стеклофазы (рис.4) и пор. О пористости материала можно судить по приводимой в спецификации кажущейся плотности ρ_k (packed density, г/см³), которая рассчитывается как отношение массы материала ко всему занимаемому им объему без вычета внутренних пустот.

ТКЛР определяется как относительное изменение линейных размеров образцов керамического материала при нагревании на 1°C. При производстве пленочных интегральных схем необходимо

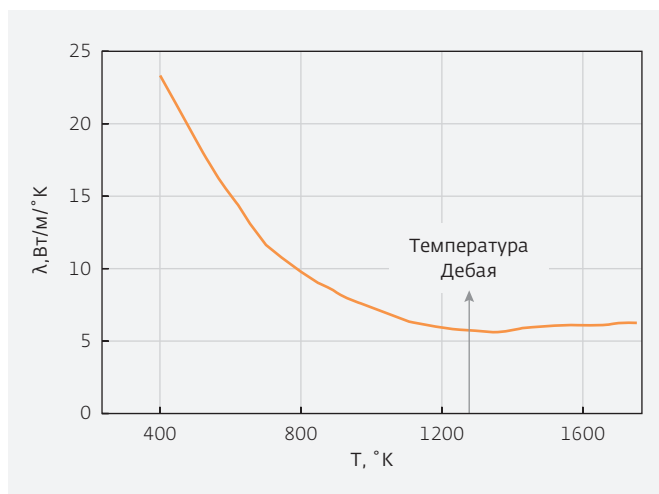


Рис.3. Изменение теплопроводности в зависимости от температуры для Al_2O_3 [7]

максимально согласовывать ТКЛР подложки и пленок.

Температурные свойства характеризуют способность материала выдерживать высокие температуры. В целом характеристики керамических материалов меньше зависят от температуры, чем характеристики металлов. Одно из важнейших свойств этой группы – термостойкость, или стойкость к тепловому удару (thermal shock resistance), определяющая способность керамического материала выдерживать резкие колебания температуры,

Таблица 1. Свойства керамических материалов [6]

Свойства	Электроизоляция	Теплопроводность	Максимальная температура применения, °С	Термостойкость	Износостойкость	Ударопрочность	Устойчивость к коррозии
Оксид алюминия	Хорошая	Приемлемая	1900	Приемлемая	Хорошая	Слабая	Хорошая
Нитрид алюминия		Отличная	1200		Приемлемая		Приемлемая
Кварц SiO_2		Приемлемая	1100	Хорошая	Неприемлемая	Неприемлемая	Слабая
Карбид кремния спеченый SiC	Неприемлемая	Хорошая	1800	Отличная	Отличная	Приемлемая	Хорошая

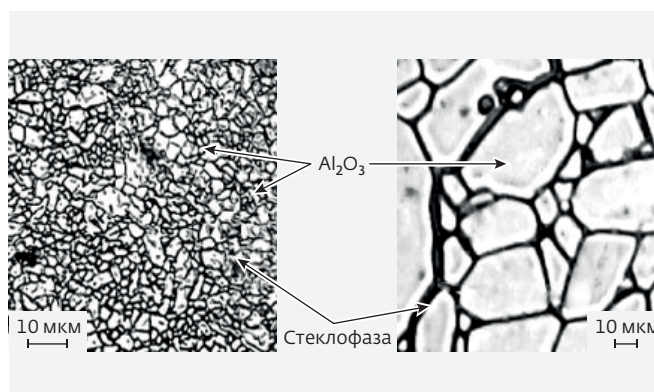


Рис.4. Микроструктура мелкокристаллического (а) и крупнокристаллического (coarse-crystal) (б) Al_2O_3 [11]

не разрушаясь. Термическая стойкость керамических материалов зависит от их физико-химических и механических свойств, формы и размера изделий, условий их нагревания и охлаждения. На подложках с диэлектрической проницаемостью порядка 20 можно производить фильтры с термостойкостью в 10 раз лучшей по сравнению с 99,6%-м Al_2O_3 (рис.5).

При конструировании СВЧ-микросхем важно учитывать класс чистоты обработки поверхности подложки, определяемый средним арифметическим отклонением профиля R_a (CLA – center-line average, мкм). Чистота поверхности определяет четкость и точность рисунка схемы, ВЧ-потери

в проводниках, возможность выхода из строя тонкопленочных конденсаторов и качество резисторов.

Поверхность керамических подложек, полученных по стандартной технологии спеканием (sintered) и обжигом (as-fired) исходных материалов, имеет множество дефектов. Поэтому перед нанесением рисунка и дальнейшими операциями производства поверхность основания шлифуют и полируют, при необходимости с двух сторон. Практически все известные компании – производители подложек для элементов и устройств микроэлектроники [12–25], а также фирмы, занимающиеся контрактным производством интегральных схем [26–29], выполняют такую предварительную обработку поверхности.

Поверхность после спекания подходит для нанесения проводников толщиной 0,0254 мм при тонкопленочной технологии и 0,127 мм – при толстопленочной [26]. Формирование рисунка более тонких проводников на такой поверхности приводит к увеличению сопротивления проводников и возникновению аномалий в характеристиках изделия из-за недостаточной точности формирования рисунка. На предварительно отполированную поверхность допустимо нанесение рисунка схем с большей плотностью межсоединений, что позволяет применять

более сложные топологии резисторов, делать чип-индуктивности с меньшим шагом, снижать массу и габариты делителей мощности Вилкинсона, циркуляторов, вентилях и полосовых фильтров. Так как при полировке уменьшается значение R_a , возможно нанесение более тонких слоев металлизации, а следовательно – производство тонкопленочных резисторов с большим сопротивлением. Для каждого вида материала существует примерный диапазон возможных значений R_a , зависящий от вида обработки (табл.2).

Не менее важный фактор, влияющий на величину потерь, добротность и качество поверхности после шлифовки и полировки, – чистота материала. Она определяется количеством примесей, и чем выше чистота, там более гладкая поверхность будет получена после обработки.

Каждый материал подложки имеет свои особенности, определяющие область применения. Наиболее популярен оксид алюминия Al_2O_3 (alumina). Это синтетический материал кристаллической структуры, применяемый в интегральных схемах средней или небольшой мощности с кремнием (Si), арсенидом галлия (GaAs) и др. в диапазоне ВЧ. Полированные подложки из Al_2O_3 применяются и в СВЧ-диапазоне. Для толстопленочных схем подходит оксид

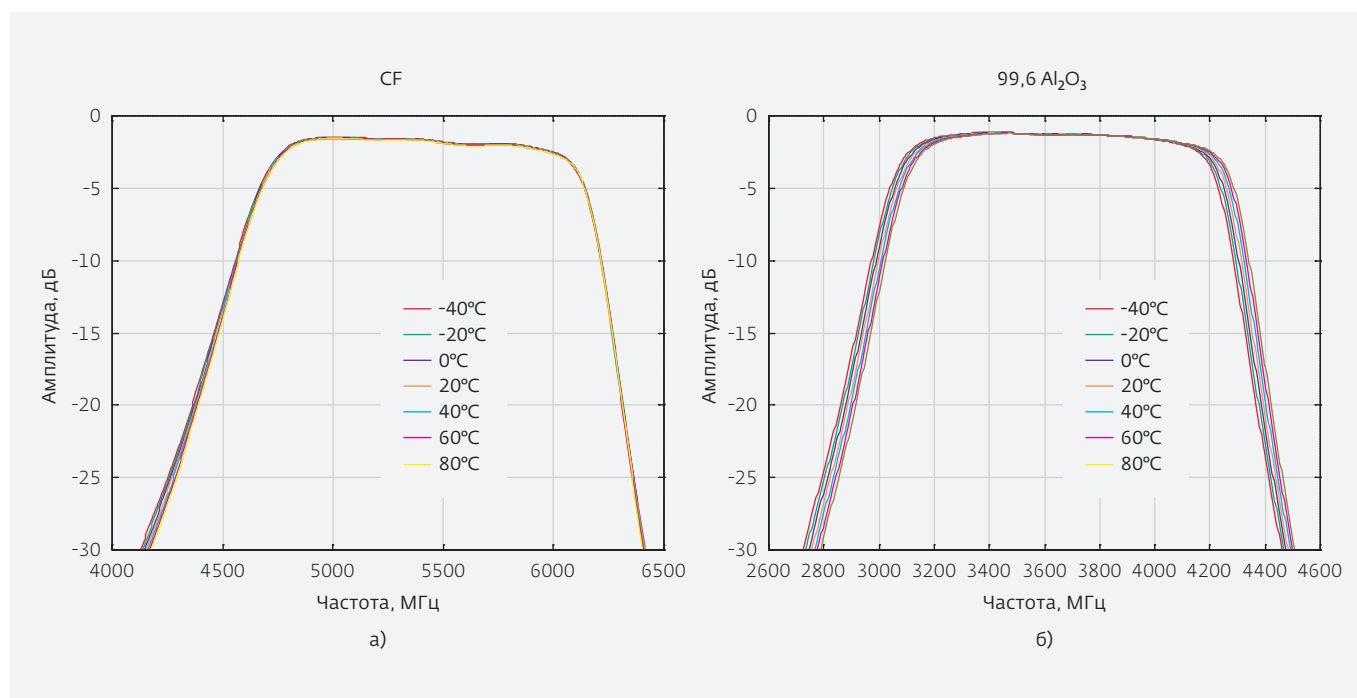


Рис.5. Сравнение температурной стабильности АЧХ фильтров на подложках из патентованного материала Diel Labs с $\epsilon_r=23$ (а) и 99,6% Al_2O_3 (б) [12]

алюминия с процентным содержанием 96%, а для тонкопленочных – 99,6%-й Al_2O_3 . Широкое распространение в электронике эти подложки получили благодаря исключительному сочетанию электрофизических свойств в широком диапазоне частот, высокой износостойкости и устойчивости к коррозии при очень высоких температурах, а также механической прочности. Наличие же оксида делает такую подложку устойчивой и к радиации.

В электронике чаще всего применяется оксид алюминия с содержанием от 80 до 99,99% Al_2O_3 . Однако подложки на основе 75%-го Al_2O_3 обладают большей прочностью при изгибе и лучшим качеством поверхности, чем материалы с более высоким процентным содержанием оксида. Однако при снижении процентного содержания Al_2O_3 возрастает значение диэлектрических потерь. В зависимости от процентного содержания, Al_2O_3 можно

встретить под разными названиями: муллит (70–95% Al_2O_3), корунд, алюминооксид, поликор (более 95% Al_2O_3).

Оксид бериллия BeO (berillia) имеет непревзойденное сочетание электрофизических, температурных и механических свойств и обладает теплопроводностью на порядок большей, чем у оксида алюминия. Это делает его наиболее привлекательным для применения в высокомоощных толсто- и тонкопленочных интегральных элементах и устройствах диапазона от 50 Гц до СВЧ. Однако токсичность оксида бериллия ограничивает его применение. Большинство производителей электронных устройств заменили BeO на более безопасный нитрид алюминия AlN , чьи свойства наиболее близки к свойствам BeO .

Теплопроводность AlN находится в диапазоне 170–220 Вт/(м·К), ее значение зависит от исходных

Таблица 2. Диапазон возможных значений шероховатости поверхности R_a , нм, при разных видах обработки поверхности подложки [27]

Материал	Al_2O_3 99,6%	BeO	AlN	SiO_2	Сапфир
Шлифованная поверхность	203–381	508–762	381–635	178–305	254–508
Полированная поверхность	<25,4	51–102	51–100	38	<25,4

порошковых материалов и способа производства подложки. ТКЛР нитрида алюминия равен $5,6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ и близок к аналогичному параметру кремния ($4,1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) и арсенида галлия ($6,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Кроме того, этот материал может использоваться в толсто- и тонкопленочной технологии, для высокотемпературной пайки или пайки мягким припоем. Минусы AlN – непригодность к применению во влажной среде, при механических ударах и температурах более 1000°C . Поэтому для изготовления высокотемпературных изделий вместо AlN и BeO применяются алмазные подложки (табл.3). Например, резистор 0402 компании EMC Technology, выполненный на алмазной подложке с химическим парофазным осаждением (chemical vapour deposit (CVD) diamond substrate), может рассеивать 20 Вт непрерывной мощности и 200 – пиковой.

Карбид кремния SiC (карборунд) применяется для производства полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия. Такая область применения обусловлена высоким значением теплопроводности и большим показателем износостойкости.

Плавленый кварц SiO₂ (Fused Silica) с низким значением ϵ_r используется для создания микросхем, фильтров со стабильными характеристиками,

Таблица 3. Температурные и высокочастотные свойства материалов подложек [31]

Тип материала	λ , Вт/(м·К)	ϵ_r	tg δ
AlN	170	8,9	0,0005
BeO	260	6,5	0,004
CVD Diamond	1600	5,6	0,0005

генераторов и других устройств, работающих по принципу пьезоэлектрического эффекта.

Сапфир (99,99999% Al₂O₃) – синтетический материал с кристаллической структурой, использующийся в различных областях промышленности: от оптоэлектронной до часовой. В электронике применяются пластины сапфира диаметром 152,4 и 200 мм – шести- и восьмидюймовые соответственно. В частности, на его основе изготавливаются радиочастотные переключатели для мобильных устройств с пониженным энергопотреблением [13]. Благодаря высокой химической чистоте, после полировки поверхность сапфира становится очень гладкой. Использование сапфира для подложек

Таблица 4. Неорганические подложки мировых производителей

Состав	Фирма	Название	ϵ_r на частоте 1 МГц	$\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ на частоте 1 МГц	λ , Вт/(м·К)	КТР, ppm/°C для 20–800°C	ρ_k , г/см ³	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа
75% Al ₂ O ₃	CeramTec	Rubalit HSS	9	–	22	9,5	–	800
85% Al ₂ O ₃	GBC materials	GBC 85%	7,6	6	23	–	3,4	–
96% Al ₂ O ₃	НЭВЗ-Керамикс	–	9	2	24,7	8,2	3,72	≥300
	GBC materials	GBC 96%	9	3	24	–	3,67	–
	Поликор	БК-96	9,2±0,2	4		7,9	3,7	310,8
	Kyocera	A-476	9,4	4	24	7,9	3,7	350
	Diel Labs	PJ	9,5±1	4	26	6,4–8,2	–	–
	CoorsTek	DuraStrate	9,55	4	–	8,4	3,81	482
	Maruwa	HA-96-2	9,8	3	24	7,8	3,75	500
	CeramTec	Rubalit 708 HP	9,9	–	24	8,03	–	500
99,5% Al ₂ O ₃	Microcertic	AL-995	9,58	3,2	29,3	9,43	3,86	296
	Accumet	–	9,6	–	35	8,43	3,7–3,97	310–379
	MTC	Deranox 995	9,7*	1	25,6	8,5	3,89	330
	CoorsTek	ADS-995	9,8	1	25,5	8,33	3,88	572
	ATC	–	9,8	2	0,088	6,7	–	–
	DuPont	–	9,8	2	36	8,2	3,85	380
99,6% Al ₂ O ₃	Accumet	–	9,9 ±0,1	–	27	7–8,3	3,87	–
	Diel Labs	PI	9,9±0,15	1	27	6,5–7,5	–	–
	Kyocera	A493	9,9±2	2	33	8,2	3,86	–
	CoorsTek	ADS-996	9,9	1	26,6	8,3	3,88	592
	CoorsTek	Superstrate TPS	9,9	1	27	8,2	3,95	682
	CoorsTek	Superstrate 996	9,9	1	26,9	8,2	3,88	620
	Maruwa	HA-996	9,9	2	29	8,1	3,85	–
	CeramTec	Rubalit 710	10,1	2	28	8,5	3,9	400
99,7% Al ₂ O ₃	Поликор	БК-100-1	9,6±0,2	1		8	3,96	320

Таблица 4. Продолжение

Состав	Фирма	Название	ϵ_r на частоте 1 МГц	$\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$ на частоте 1 МГц	λ , Вт/(м·К)	КТР, ppm/°C для 20–800°C	ρ_k , г/см ³	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа
99,9% Al ₂ O ₃	МТС	Deranox 999	10,1	1	30	8,9	3,95	500
Оксид бериллия BeO	АТС	–	6,6*	3	0,6	7,5	–	–
	American Berillia	BERLOX	6,6	3	265	8	2,85	242
	MATERION	BW 1000	6,7	120	–	9	–	–
	DuPont	–	6,7	3	260	8,5	2,89	230
	Accumet	–	10,2	–	270	9	2,85	225
Нитрид алюминия AlN	Diel Labs	AG	8,6±0,35	50	140–180	4,6	–	–
	Microcertic	ALN	8,6	50	180	5,6**	3,32	300
	Accumet	K170	8,6	–	170	4,6	3,28	–
	AdTech	–	8,6	10	160	4,0**	3,26	280
	АТС	–	8,7	10	0,4	4,5	–	–
	Kyocera	AN215	8,7	3	150	4,8	3,4	310
	НЭВЗ-Керамикс	–	8,7	3	180–200	6,2	3,3	260
	DuPont	–	8,9	1	170–200	4,6	2,3	290
	CeramTec	Alunit	9	1	180	5,6	3,33	360
	Maruwa	AN-XXX	9	3	180–230	5,4	3,25–3,30	–
Плавленый кварц SiO ₂	АТС	–	3,78	1	0,0033	0,5	–	–
	Diel Labs	QZ	3,82	0,15	1,28	0,55	–	–
	МТС	HVX (99,9 SiO ₂)	3,6	–	0,9	0,5	1,35	15,2
	Accumet	–	3,826	0,15	–	0,55	2,2	–
Карбид кремния SiC	Microcertic	SiC	–	–	125	5,2	>3,1	400
	Accumet	–	10,2	–	41	5,12	3,21	–
Сапфир – 99,9999% Al ₂ O ₃	Монокристалл	Al ₂ O ₃	9,3	–	46,06	–	3,98	–
	Accumet	–	11,5	8,6	–	–	3,97	–

* Для частоты 10 ГГц.

** Для температуры 20–1000°C.

Таблица 5. Типы металлизации для тонкопленочной технологии [12, 34–36]

Металлизация	Применение	Метод крепления кристалла	Типовая толщина	$t_{\text{раб.}}$, °C, макс.	Примечания
TaN TiW Au	Стандартная тонкопленочная металлизация для проводников с резистивным слоем	Au/Sn, Au/Si, Au/Ge – эвтектические сплавы, клей на основе эпоксидных смол	TiW: 30–50 нм Au: 0,1–7,6 мкм	380	Не рекомендуется для припоя олово/свинец. Толщина слоя золота для нанесения припоя 0,1–0,5 мкм. Совместимо с проволочным монтажом при толщине золотого слоя $\geq 2,54$ мкм
TiW Au	Стандартная тонкопленочная металлизация для проводников		TiW: 30–50 нм Au: 0,1–7,6 мкм	425	
NiCr/Ni/Au	Для резисторов с повышенными требованиями к точности, низким температурным коэффициентом сопротивления (± 50 ppm/°C)	Sn/Pb, Au/Sn	Ni: 20–50 нм Au: 0,5–7,62 мкм	325	Пригоден для припоя олово/свинец. Резистивная пленка наносится напылением
TaN TiW Au Cu Ni Au	Металлизация для силового проводящего слоя с низким уровнем потерь	Au/Sn, Au/Si, Au/Ge – эвтектические сплавы, Sn/Pb, клей на основе эпоксидных смол	TiW: 30–50 нм Au: 0,1–0,3 мкм Cu: 3,8–15,2 мкм Ni: 1–2,5 мкм Au: 0,1–7,6 мкм	350	Пригоден для припоя олово/свинец. Толщина золота на открытой площадке в таком случае составляет 0,1–0,5 мкм с возможностью повторной пайки при необходимости ремонта. Совместимо с проволочным монтажом при толщине золота $\geq 2,54$ мкм
TaN TiW Au Ni Au			TiW: 30–50 нм Au: 0,1–7,6 мкм Ni: 1–2,5 мкм Au: 0,1–1,8 мкм	350	
TiW Pt Au	Металлизация, применяемая для радиаторов	Au/Sn, Au/Si, Au/Ge – эвтектические сплавы, Sn/Pb, клей на основе эпоксидных смол	TiW: 30–50 нм Pt: 0,2–0,3 мкм Au: 0,1–7,6 мкм	>400	
TiW Ni Au	Стандартная металлизация для проводников		TiW: 30–50 нм Ni: 1–2,5 мкм Au: 0,1–7,6 мкм	350	
TiW/Pd/Au или TaN/TiW/ Pd/Au	Стандартная металлизация для проводников с резистивным слоем	Au/Sn, Au/Si, Au/Ge – эвтектические сплавы, Sn/Pb, клей на основе эпоксидных смол	TiW: 30–80 нм Au: 0,5–5 мкм (напыление) Au: 0,5–12,7 мкм (электролитическое осаждение)	450	Лучше всего подходит для прикрепления кристалла эвтектическим сплавом Au/Si. Также пригоден для припоя олово/свинец. Совместимо с проволочным монтажом при толщине золота $\geq 2,54$ мкм
TaN TiW Au Ni AuSn	Избирательное нанесение золота и олова и размещение проводных соединений	Au/Sn	TiW: 30–50 нм Au: 0,1–0,3 мкм Ni: 1–2,5 мкм Au: 2,5–8,9 мкм	280	Не предусматривает паяные соединения. Прямая посадка кристалла на контактную площадку (Au/Sn). Выборочные области доступны для проволочного монтажа
TiW Ni AuSn	Для золото-оловянного припоя без возможности осаждения TaN-резистивного слоя		TiW: 30–50 нм Ni: 1–2,5 мкм Au: 2,5–8,9 мкм	280	

ограничивается в основном его стоимостью и трудностью изготовления.

В ассортименте компаний – производителей подложек представлен широкий спектр изделий из описанных материалов (табл.4).

Некоторые компании предлагают подложки с предварительно нанесенной металлизацией [32]. При производстве интегральных микросхем по толсто- и тонкопленочным технологиям применяются различные типы металлизации. Проводник должен обладать высокой проводимостью, низким температурным коэффициентом сопротивления, хорошей адгезией к материалу подложки и т.д. Для улучшения адгезии между проводником и подложкой наносится слой материала с малой проводимостью толщиной 100–500 ангстрем.

Сопротивление проводника определяется поверхностным удельным сопротивлением и глубиной скин-слоя. Последний параметр определяет также необходимую толщину проводника – для распространения 98% плотности тока в проводнике она должна быть в 3–4 раза больше глубины скин-слоя [33]. Технология изготовления металлизированных подложек зависит также и от диапазона рабочих частот.

При изготовлении устройств и компонентов по толстопленочной технологии используются золотые, медные, серебряные проводники, а также сочетания палладий – серебро на золоте и платина – серебро на золоте. В качестве резистивного слоя чаще всего применяется рутениевое стекло RuO₂.

В тонкопленочной технологии при металлизации распылением в качестве адгезионного слоя применяется сплав титана и вольфрама TiW, проводящего – золото, а резистивного – нитрид тантала TaN и хромид никеля NiCr с поверхностными сопротивлениями 12–200 и 50–200 Ом/квadrat соответственно. При металлизации припоем в качестве барьерного слоя добавляют никель и/или медь, палладий, платину – для уменьшения хрупкости оловянно-свинцового припоя (табл.5).

Многообразие современных неорганических базовых материалов позволяет подобрать вариант, подходящий для производства интегральных схем, толсто- и тонкопленочных элементов и устройств, удовлетворяющих необходимым требованиям. При выборе подложки нужно руководствоваться наиболее важными для проектируемого устройства параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ipc.org.
2. **Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е.** Фоль-

гированные диэлектрики – как выбрать оптимальный вариант для печатных плат ВЧ/СВЧ диапазонов. – Электроника: НТБ, 2013, №3, с.156–170; №4, с.142–147.

3. en.wikipedia.org/wiki/Wafer_(electronics).
4. www.ceramtec.com.
5. www.hacastronomy.com.
6. www.microcertec.com/pdf/1209124153_tableau_cc_en.pdf.
7. **Матренин С.В., Слосман А.И.** Техническая керамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004.
8. **Малорацкий Л.Г.** Микро-миниатюризация элементов и устройств СВЧ. – М. Советское радио, 1976.
9. www.microwaves101.com/encyclopedia/alumina96.cfm.
10. **Maloratsky L.G.** Reviewing the basics of microstrip lines. – Microwaves & RF, 2000, March.
11. www.keramverband.de/brevier_engl/brevier.htm.
12. www.knowledscapacitors.com/dilabs.
13. www.polikor.net.
14. www.nevz-ceramics.com/ru.
15. www.accumet.com.
16. www.adtechceramics.com.
17. www.americanberyllia.com.
18. www.atceramics.com.
19. www.ceramtec.com.
20. www.coorstek.com.
21. www2.dupont.com.
22. www.gbcmaterials.com.
23. www.johansontechology.com.
24. global.kyocera.com/application/automotive/product/compo/auto_ecu.html.
25. www.maruwa-g.com/e/products/ceramic/000314.html.
26. www.microcertec.com.
27. www.centerlinetech-usa.com.
28. www.microtoolinc.com.
29. www.micropt.com.
30. accuratus.com/alumox.html.
31. ferroceramic.com.
32. **Bailly M.** Diamond RF resistives: The answer to high power and low capacitance. – EMC Technology, Microwave Journal, 2010, №11(53).
33. www.johansontechology.com/modules-a-substrates/custom-thin-film-metalized-substrates.html.
34. **Inder Bahl.** Lumped elements for RF and Microwave Circuits. – Artech House, 2003.
35. www.thinfilm.com.
36. www.microfab.com.
37. www.ultrasourceusa.com.