

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ И КОМПАУНДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Т.Ершова npzubrov@istokmw.ru

Тенденция к миниатюризации изделий СВЧ-техники ставит задачи разработки материалов с высокой поглощающей способностью, хорошими клеявыми, герметизирующими и изолирующими свойствами. Более того, сегодня актуально создание композиционных материалов, в том числе конструкционного назначения, позволяющих осуществлять в едином технологическом цикле сборку элементной базы и одновременно формирование локальных слоев поглотителей СВЧ-энергии или экранов заданного размера как в отдельных изделиях, так и электронных модульных устройствах. Рассмотрим разработанные ФГУП "НПП "Исток" композиционные материалы на основе низкомолекулярных полимерных соединений типа заливочных компаундов и клеев, предназначенные для получения клеевого и поглощающего СВЧ-энергию покрытия и изделий. На материалы оформлен патент России №2375395 и они включены в список 100 лучших изобретений России за 2011 год.

ПОСТАВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения электромагнитной совместимости, изоляции, устойчивости параметров и защиты изделий электронной техники (ИЭТ), особенно СВЧ- и КВЧ-диапазонов длин волн, сейчас в основном применяются объемные поглотители из феррооксидов и магнитодиэлектрической резины ХВ [1]. Однако у таких поглотителей ограниченные функциональные возможности поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в широком диапазоне частот. Кроме того, их локальное размещение непосредственно в конструкции электровакуумных, полупроводниковых и комплексированных приборов затруднено. В связи с этим в НПП "Исток" была проведена серия разработок специальных полимерных композиционных материалов (ПКМ) типа заливочных компаундов

и клеев, предназначенных для формирования внешней электромагнитной изоляции отдельных узлов ЭВП или эффективной развязки на СВЧ по цепям питания функциональных узлов полупроводниковых приборов и электронных модульных устройств. При создании ПКМ, содержащих полимерное связующее, в которое были введены наполнитель на основе сплава металлов и отвердитель, учитывалось, что полимеры в основном – хорошие диэлектрики (диэлектрическая проницаемость $\Sigma \approx 2,5-4,5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta \approx 0,01-0,001$) и относятся к категории радиопрозрачных материалов. Главная задача при разработке ПКМ состояла в подборе или получении материала-наполнителя с оптимальными физико-техническими характеристиками, обеспечивающими поглощение ЭМИ.

Критериями оценки способности композиционного материала поглощать СВЧ-энергию могут служить как непосредственно коэффициенты поглощения и отражения электромагнитного излучения, так и его диэлектрические характеристики – тангенс угла суммарных диэлектрических и магнитных потерь и диэлектрическая проницаемость. Взаимодействие среды с электромагнитным полем описывается уравнениями: $D = \Sigma \Sigma_0 E$ и $B = \mu \mu_0 H$, где D – электрическая индукция, E – напряженность электрического поля, B – магнитная индукция, μ – магнитная проницаемость, H – напряженность магнитного поля, Σ_0 и μ_0 – постоянные коэффициенты. Значение поглощенной энергии (α) пропорционально частоте падающего поля (ω), удельной проводимости (σ) и магнитной проницаемости проводника (μ): $\alpha = \sqrt{\omega \sigma \mu / 2}$ [2, 3, 4]. Поэтому при подборе и создании наполнителей, поглощающих ЭМИ, рассматривались металлы или сплавы с повышенными значениями электропроводности и магнитной проницаемости. Однако, поскольку в металлах эффективное поглощение ЭМИ ограничено скин-слоем, проводящие наполнители необходимо использовать в виде порошка, при этом величина зерна выбранного металла или сплава должна быть близкой к толщине скин-слоя. Для обеспечения максимального вклада поверхностных явлений в эффект подавления ЭМИ и снижения отражения важно также, чтобы общее содержание материала в проводящей фазе ПКМ и характер его распределения в системе металл-диэлектрик исключали прямой контакт проводящих частиц между собой.

В качестве поглощающего наполнителя ПКМ, в силу достаточно малого удельного сопротивления ($\rho_v \approx 10^{-6} - 10^{-8}$ Ом·см), могут быть использованы и полупроводники. Их поглощающие свойства обеспечивают сквозная и дырочная проводимости. С повышением температуры удельная проводимость полупроводников возрастает [5].

При подборе полимерного связующего для поглощающих электромагнитное излучение ПКМ учитывалась возможность участия в суммарном эффекте поглощения, хотя и в меньшей степени, чем проводящие или полупроводящие наполнители, полимерных диэлектриков благодаря их собственной ионной проводимости, а также следующим факторам:

- релаксационным потерям за счет процессов поляризации в электрических полях;
- резонансным потерям, когда частота электрического поля сравнима с частотой собственных колебаний электронов или ионов диэлектрика;

- дополнительным релаксационным потерям в результате ионизации примесных включений [6].

РЕШЕНИЕ

Как указывалось, основной параметр, характеризующий эффективность любого поглотителя, – его коэффициент поглощения α . Но при подборе компонентов ПКМ необходимо также принимать во внимание возможность получения минимального значения другого параметра – коэффициента отражения, учитывающего отраженную волну, обусловленную несоответствием волнового сопротивления свободного пространства и поглощающего материала. Существуют и другие дополнительные условия, которые следует соблюдать при разработке поглощающих ПКМ типа заливочных компаундов и клеев:

- не использовать для наполнителей материалы с фазовыми переходами, поскольку их свойства при изменении температуры нестабильны;
- предпочтительно использовать наполнитель с повышенной теплопроводностью, а связующее – с высокой термостойкостью;
- принимать во внимание стабильность состава и свойств материалов наполнителя и связующего для обеспечения стабильности электрофизических характеристик ПКМ в жестких условиях эксплуатации (повышенные температуры, высокая влажность, соляной туман, резкая смена температур и т.п.);
- полимерная составляющая не должна ухудшать технологичность в условиях изготовления и переработки.

В качестве полимерных связующих при разработке ПКМ были выбраны следующие материалы:

- низкомолекулярные силиконовые каучуки типа СКТН, которые стабильны в диапазоне

температур от -60 до 300°C и долговечны – до 25 лет складского хранения в завулканизованном состоянии. Благодаря низкой вязкости на их основе возможно создание высоконаполненных композиций. При использовании специальных каталитических систем такие композиции легко переводятся в резиноподобное состояние без повышения температуры и давления;

- низковязкие эпоксидные модифицированные смолы, термостойкие до 200–250°C, на основе которых при использовании специальных отвердителей можно формировать высокопрочные твердые объемы различной конфигурации или клеевые материалы с высокой адгезионной способностью.

Поглощающая способность разрабатываемых ПКМ оценивалась на основе значения удельного поглощения ЭМИ в заданном диапазоне частот путем измерения его затухания и отражения. Размеры контрольных образцов ПКМ определялись размерами поперечного сечения волноводного тракта панорамного измерителя, их толщина составляла 10 мм для компаундного и 1–32 мм для клеевого материалов. Диэлектрические характеристики материалов определяли резонаторным методом в диапазоне частот 7,5–9,5 ГГц.

С применением тонкодисперсных ферромагнитных порошков двойных и тройных сплавов

железа [7, 8, 9] разработаны силиконовые заливочные компаунды марок ПАК-1 и ПАК-3 резиноподобного типа на силиконовой основе и марки ЭЗК-184-19 на эпоксидной основе (табл.1 и 2).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУЧЕННЫХ КОМПАУНДОВ

Силиконовые компаунды пригодны для электромагнитной изоляции токоведущих элементов ЭВП, а также для формирования поглотителей внутри модульных объемов электронных устройств и полупроводниковых приборов. Жизнеспособность компаундов ограничена, поэтому они изготавливались непосредственно перед применением. Изоляционное покрытие формировалось методом свободного или принудительного литья в заливочные формы либо путем нанесения шпателем на открытые поверхности. Для обеспечения адгезии к изолируемым поверхностям на них предварительно наносятся специальные адгезионные подслои (например, П-12Э).

Прочностные, адгезионные и поглощающие свойства компаундов стабильны в условиях воздействия температуры до 200°C в течение не менее 200 ч, резкой смены температуры в диапазоне от -60 до 85°C в течение не менее 10 циклов, повышенной влажности при 55°C – не менее 21 суток, соляного тумана и грибковой плесени – в течение 7 и 30 суток соответственно.

Таблица 1. Физико-технические характеристики силиконовых заливочных компаундов марки ПАК

Показатель	ПАК-1	ПАК-3
Внешний вид до вулканизации	Однородная пастообразная масса серо-черного цвета	
Жизнеспособность при T = 20 ± 5°C, ч	0,5–2,0	0,5–2,0
Режим вулканизации, °C/ч	20±5/72	20±5/72
Внешний вид после вулканизации	Резиноподобный материал серо-черного цвета	
Плотность, г/см ³	3,3	1,9
Коэффициент теплопроводности, мин., Вт/МК	0,6	0,6
Удельное поглощение, дБ/см, мин., (f = 7,5 – 9,5 ГГц)	20	30
Тангенс угла диэлектрических потерь, (f = 7,5 – 9,5 ГГц)	0,48	0,54
Условная прочность на разрыв, мин., МПа	10,0	10,0
Относительное удлинение при разрыве, %	> 30,0	> 30,0
Прочность связи по подслою П-12Э с медными элементами, элементами из сплава 29НК, мин., кгс/см	0,3	0,3
Общее газовыделение в интервале температур 20–150°C, м ³ ·Па/г	1057·10 ⁻³	1895·10 ⁻³

Таблица 2. Эксплуатационная устойчивость эпоксидного компаунда ЭЗК-184-10

Показатель	До испытаний	После воздействия 150°С в течение 500 ч	После климатических испытаний в последовательном режиме
Удельное поглощение, $\alpha_{уд}$, дБ/см (f = 7,5–9,5 ГГц)	32,9	33,7	35,7
Механическая прочность на разрыв, δ_{pp} , МПа	40,9	36,6	28,7

Для изготовления объемных поглотителей конструкционного назначения (экранов, прокладок, втулок и т.п.) применяется высокопрочный компаунд ЭЗК-184-10 повышенной твердости на основе эпоксизэлементоорганической смолы со следующими свойствами:

- Плотность, г/см³3,2
- Механическая прочность на разрыв, δ_{pp} , МПа 40,9
- Тангенс угла диэлектрических потерь tg δ (f=7,5–9,5 ГГц) 0,27
- Диэлектрическая проницаемость,

- Σ (f=7,5–9,5 ГГц) 6,38
 - Теплопроводность, Вт/мК 0,5
 - Удельное поглощение, $\alpha_{уд}$, дБ/см (f=7,5–9,5 ГГц) 32,9
 - Общее газовыделение в интервале температур 20–150°С, м³·Па/г844·10⁻³
- Кроме того, вязкость компаунда низкая, а теплостойкость достигает 200°С. Свойства компаунда позволили с применением тонкодисперсного ферромагнитного порошка создать на его основе композицию с высоким уровнем поглощающих свойств (см. табл.2).

Таблица 3. Физико-технические характеристики клеев марки ТПК

Марка клея	Прочность на разрыв, $\delta_{отр}$, МПа	$\alpha_{уд}$, дБ/мм		Диэлектрические характеристики в диапазоне $f = 7,5-9,5$ ГГц	
		$f = 7,5-9,5$ ГГц	$f = 12-18$ ГГц	$tg \delta$	Σ
ТПК-1	23,7	1,93	4,65	0,196	7,1
ТПК-2	42,0	5,76	11,85	0,124	36,8
ТПК-3	37,5	3,69	1,97	0,029	36,4

Композиция технологична по рабочей вязкости, режимам отверждения и литьевым свойствам [10]. Эксплуатационная устойчивость компаунда (см. табл.2) оценивалась в условиях воздействия таких жестких дестабилизирующих факторов, как:

- резкая смена температуры в диапазоне от -60 до 85°C (10 циклов);
- пониженная температура -60°C в течение 24 ч;
- влажность воздуха $\varphi = 93$;
- температура 150°C в течение 500 ч;
- складское хранение в отапливаемом помещении в течение 15 лет.

Компаунд можно наносить методом свободного литья в предварительно нагретые до 100°C металлические формы для отливки деталей или заготовок различной массы и конфигурации, в том числе и крупногабаритных. Для изготовления беспористых деталей следует проводить предварительное обезгаживание компаундной массы при давлении $P = 0,5-10$ мм рт.ст. (67-1330 Па). Отверждение компаунда выполняется в два этапа: при 120 ± 2 °C в течение 4 ч и 140 ± 8 °C в течение 9 ч. Металлические формы для отливки деталей проходят предварительную обработку разделительным составом с вжиганием этого состава при 180°C для обеспечения легкого съема и тиражируемости отливок.

Таблица 4. Диэлектрические характеристики клеев в СВЧ-диапазоне длин волн

Марка клея	f , ГГц	$tg \delta$	Σ
ТПК-1	3,3	0,057	10,2
	15,9	0,1	8,6
ТПК-2	13,1	0,027	20,9
	16,4	0,025	19,45
ТПК-3	13,3-15,9	0,033	16,45

Электромагнитную развязку по цепям питания и электромагнитную совместимость в модульных объемах электронных изделий СВЧ- и КВЧ-диапазонов длин волн обеспечивают полимерные клеевые материалы марки ТПК конструкционного назначения [10]. Удельное поглощение ЭМИ этих материалов достаточно велико ($\alpha_{уд} > 3$ дБ/мм) (табл. 3, 4). К тому же они отвечают требованию проведения в одном технологическом цикле операций по монтажу элементной базы и формированию локальных слоев поглотителей или экранов заданной толщины и площади в объемах блоков. Клеи разработаны на основе эпоксидной модифицированной смолы с применением в качестве наполнителей тонкодисперсных порошков ферромагнитных сплавов и полупроводникового материала. Клеи отверждаются при температуре 20 ± 5 °C в течение не менее 24 ч или при 80°C в течение 4 ч.

Климатические испытания клеев ТПК в условиях, аналогичных испытаниям компаунда ЭЗК-184-10, показали, что их поглощающая способность практически не изменяется - значение удельного поглощения $\alpha_{уд}$ после каждого вида испытаний варьируется в пределах погрешности измерений. Механическая прочность клеев является более "зависимым параметром". Однако предел прочности на отрыв после всех испытаний был достаточно высоким - более 15 МПа.

Клеи приготавливаются непосредственно перед применением, так как по рецептурному составу они относятся к клеям холодного отверждения. Если разрыв между операциями приготовления и применения клеев превышает 3-4 ч, их надо транспортировать в двухместной таре. В этом случае срок их хранения увеличивается до 10 и более дней.

Разработанные клеи - высоконаполненные системы с вязкой консистенцией и не растекаются по поверхности. По рабочей вязкости они пригодны для формирования объемов поглотителей разной площади без применения специальной оснастки. Клей ТПК-1 успешно используется в качестве экранирующего

покрытия цепей питания и управления с одновременными фиксацией самих проводов и упрочнением мест пайки. Клей ТПК-2 заменяет магнитодиэлектрическую резину ХВ в качестве экранирующего и поглощающего покрытия на внутренних сторонах крышек корпусов. Он также используется для формирования эффективных межсхемных и внутрисхемных поглощающих покрытий, обладающих высокой адгезионной прочностью соединения с металлическими поверхностями, в том числе с такими гальваническими покрытиями, как Ni, Sn-Bi, Pd-Ni. Немагнитный поглощающий клей ТПК-3 может также применяться в качестве электрического изолятора при плотном монтаже проводов питания для предотвращения низкоомного контакта между ними.

На все клеевые и компаундные полимерные композиционные материалы оформлены технические условия.

В работах по созданию полимерных композиционных и компаундных материалов принимали участие ведущие специалисты ФГУП "НПП "Исток" – О.А.Сорочинская, Н.В.Кожевина, Г.В.Смирнова, Т.З.Хавкина, а в разработке методики измерения электро-физических характеристик ПКМ – В.М.Лямзин.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 6-00-5761783-322-89. Пластины эластичных марок "ХВ" .
2. **Маделунг О.** Теория твердого тела. – М.: Наука, 1980.
3. **Лившиц М.М.** Электронная теория металлов. – М.: Энергия, 1976.
4. **Лапдау Л.Д., Лившиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. – М.: Гостехиздат, 1959.
5. **Шапилова К.В.** Физика полупроводников. – М.: Энергия, 1976.
6. **Тареев Б.М.** Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1982.
7. А.С. 257279 СССР. Композиционный материал. Оpubл. 1987.
8. А.С. 294726 СССР. Ферромагнитный накопитель. Оpubл. 1989 г.
9. Патент РФ №2375395 2009. Композиционный материал для поглощения электромагнитных волн. / Ершова Т., Кожевина Н., Кондрашенков Ю. – Оpubл. 2009 г.
10. Патент №2373236 России, 2009. Полимерная композиция для получения клеевого и поглощающего СВЧ-энергию покрытия и формованного изделия из нее. / Николаева Т., Кожевина Н., Кондрашенков Ю., Смирнова Г. – Оpubл. 2009 г.