

Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей

Алексей ПРОКИМОВ
prok@spcable.ru
Кива ДЖУРИНСКИЙ
kbd.istok@mail.ru
Юлия СМЕРНОВА
nauka@plastpolymer.com

Изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей должны удовлетворять комплексу требований: минимально возможные диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот, диапазон рабочих температур от криогенных до +170 °С и выше, низкий коэффициент линейного термического расширения, высокая прочность, химическая и радиационная стойкость, стабильность геометрических размеров, технологичность изготовления. В статье рассмотрены перспективные зарубежные и отечественные изоляционные материалы, используемые в коаксиальных трактах соединителей и радиочастотных кабелей.

Предварительные замечания

К настоящему времени создано и выпускается большое количество полимерных материалов, широко применяемых в различных областях техники. Благодаря своим диэлектрическим свойствам ряд полимеров используют в качестве изоляционных материалов.

Классификация полимеров, работоспособных в течение длительного времени в широком диапазоне температур, приведена в таблице 1. В каждую из двух групп, представленных в таблице, входят аморф-

ные и кристаллические полимеры, отличающиеся способностью формировать плотно упакованные упорядоченные структуры. Аморфные полимеры изотропны, их свойства одинаковы во всех направлениях. Для них характерны прозрачность, средняя химическая стойкость, износостойкость, малая усадка. Наличие кристаллической фазы (степень кристалличности может достигать до 100%) повышает химическую и износостойкость, снижает усадку полимера. В связи с высокой степенью упорядоченности структуры кристаллические и полукристаллические полимеры анизотропны: их свойства

зависят от пространственного направления, в котором они измеряются. Температуру, при превышении которой кристаллическая структура разрушается и полимер становится аморфным, называют температурой плавления.

Для изготовления радиочастотных кабелей и соединителей применяют полимеры, удовлетворяющие следующим требованиям [1]:

- минимальные величины диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) в широком диапазоне частот (до 100 ГГц) и температур;
- технологичность изготовления;
- механическая прочность, химическая и радиационная стойкость;
- высокая электрическая прочность;
- отсутствие хладотекучести, стабильность размеров.

Из многообразия полимерных материалов, представленных в таблице 1, этим требованиям удовлетворяют фторполимеры, полиимиды, полифенилы, полиэфир и полимерные композиции на их основе. Рассматриваемые в данной статье полимеры выделены в таблице полужирным шрифтом, а некоторые их производители приведены в приложении 1.

Полимеры близкого химического состава выпускают разные зарубежные компании, под своей торговой маркой и по запатентованной технологии, потому существует так много названий одного и того же вида полимера. Кроме того, каждый полимер имеет несколько марок разной химической чистоты, с разнообразными добавками для изменения определенных свойств. Даже при

Таблица 1. Классификация полимеров

Группы полимеров	Аморфные		Кристаллические и полукристаллические	
Специальные (высокотемпературные)	Полиимид	PI	Полиарилэфиркетон	PAEK
	Полиамидимид	PAI	Полиэфирэфиркетон	PEEK
			Полиэфиркетон	PEK
	Полиэфирсульфон	PES	Жидкокристаллический полимер	LSP
			Полифениленсульфид	PPS
	Полифенилсульфон	PPSU	Политетрафторэтилен	PTFE
			Перфторалкоксы	PFA, MFA
	Полиэфиримид	PEI	Фторированный этилен-пропилен	FEP
	Полисульфон	PSU	Этилентетрафторэтилен	ETFE
	Полиарилсульфон	PPP	Полихлортрифторэтилен	PCTFE
Инженерные	Поликарбонат высокотемпературный	PC-HT	Поливинилиденфторид	PVDF
	Полифениленоксид	PPO		
	Поликарбонат	PC	Полиамид	PA
	Триметилгексаметилен-диаминтерэфталат	PA6-3-T	Полиэтилентерэфталат	PET
			Полибутилентерэфталат	PBT
Традиционные			Полиоксиметилен	POM
			Полиметилпентен	PMP
	Полифениленэфир	PPE	Полипропилен	PP
	Полиметилметакрилат	PMMA	Полиэтилен	PE
	Полистерен	PS		
	Акрилонитрилбутадиен-стирол	ABS		
	Стиролакрилонитрил	SAN		

Таблица 2. Основные технические характеристики материалов для высокочастотных применений

№ пп.	Наименование материала	Торговые марки, ГОСТ, ТУ	ε ($f = 1 \text{ МГц}$)	$\tan \delta \times 10^4$ ($f = 1 \text{ ГГц}$)	Электр. прочность, кВ/мм	Допустимая доза облучения, Мрад	Диапазон рабочих температур, °С	Температура плавления, °С
Фторполимеры								
1	PTFE (PolyTetraFluoroEthylene)	Teflon 7; Fluon G 163, 190; Aigoflon F; Hostafion TF 1702; Polyflon M 12, 14; Deraу PTFE; Ф-4 ГОСТ 10007-80; Ф-4Д ГОСТ 14906-77	1,9–2,2	2–3	20–27	0,5	–269...+260	–
2	Арфлон	AR100 AR200	ТУ 2291-003-14502248-2016	2,1–2,2 (1 ГГц)	1–2 (1 ГГц)	50	100 300	–200...+250
3	PFA (PerFluoroAlkoxy)	Teflon PFA; Aflon PFA; Neoflon PFA; Hostafion PFA; Hyflon PFA; Ф-50 ТУ 6-05-041-663-82	2–2,2	1–2,5	35–40	5	–200...+260	+(300...310)
4	MFA (MetilFluoroAlkoxy)	Hyflon MFA	2 (2,1 ГГц)	2–9 (1 ГГц)	35–40	3	–200...+225	+(270...285)
5	Фторопласты группы Ф-10	Ф-10 ТУ 2243-063-00203521-2001 с изв. 1	2–2,1	5–10	33–34	3	–80...+170	+(220...240)
6	FEP (FluorinatedEthylenePropylene)	Teflon FEP; Neoflon FEP; Ф-4МБ ТУ 301-05-73-90	1,9–2,1	6–8	25–35	1–3	–200...+250	+(265...290)
7	ETFE (Ethylene-TetraFluoroEthylene)	Tefzel; Neoflon ETFE; Fluon ETFE; Aflon; Dyneon; Hostafion; Halon; Ф-40 ТУ 301-05-17-89; Ф-40М ТУ 2213-036-07623164-2003	2,5–2,6	60–100	28–40	100–300	–100...+250	+(260...280)
8	PCTFE (PolyChloroTriFluoroEthene)	Kel-F81; Neoflon PCTFE; Aclon; Fluon; Voltaief; Ф-3 ГОСТ 13744-76; Ф-3М ТУ 6-05-1812-77	2,3–3	70–270	20–40	50	–200...+190	+(170...215)
9	PVDF (PolyVinylDeneFluoride)	Kynar; Neoflon VDF; Solef; Ф-2 ТУ 6-05-646-77; Ф-2М ТУ 6-05-1781-84, ТУ 2213-012-13696708-2002; Ф-2МЭ 2213-028-00203521-97	2–7	1500–2500	16–33	10–100	–55...+175	+(143...180)
Полиимиды								
10	PI (PolyImide)	Aracon; Kapton; Kevlar; Vespel; Zedex; Duratron PI	2–3,55	30–50	20–22	1000	–269...+400	–
11	PAI (PolyAmide-Imide)	Torlon; Tecasint; Duratron PAI	3,9–4,2	260–310	23–24	1000	–270...+350	>+470
12	PEI (PolyEtherImide)	Ultem	3,15–3,2	13–20	16–33	500	–65...+170	+382
Изоляционные материалы других составов								
13	PEEK (PolyEtherEtherKetone)	Ketron PEEK 1000, Susta PEEK ТУ 2246-001-15210588-2014	2,2–3,3	10–40	18–20	2000	–190...+350	+(355...374)
14	PPS (PolyPhenylene Sulfide)	Fitex, Tecatron, Fortron	3–4	13	21	<1000	–60...+270	+(280...290)
15	PPO (PolyPhenylene Oxide)	PPE, Noril, Axlrox	2,5–2,7	7–10	16–20	50	–40...+190	+(240...270)
16	PS (PolySteren)	Rexolite 1422	2,5–2,56	1,2–6,6	19–21	1000	–270...+100	–
17	POM (PolyOxyMethylene, Polyacetal)	Delrin, Celkon	3,7	14	20	2	–40...+120	+(200...225)
18	Fluoroloy (композит)	Fluoroloy H, Rulon H	2,3–2,5	3–4	20–26	–	–240...+288	–
19	SiO ₂ (мелкодисперсный)		3,78–3,9	3	15–40	5000	–270...+1000	–

совпадении основных физико-химических показателей полимеры, полученные по различным технологиям, могут по-разному вести себя при эксплуатации.

Каждая марка полимера имеет свой комплекс параметров в зависимости от содержания примесей, степени кристалличности и ориентации, технологии производства и методики измерения параметров. Например, диэлектрические свойства зависят от частоты, на которой они измеряются. Электрическая прочность существенно зависит от толщины материала.

Радиационная стойкость — это способность материалов сохранять свойства (механические, электрические, оптические и другие) при воздействии радиации. Радиационная стойкость в значительной степени зависит от вида радиации, величины и мощности поглощенной дозы, режима облучения (непрерывного или импульсного), размеров образца материала, его удельной поверхности, наличия стандартной или инертной атмосферы и других факторов. Вместе с тем у некоторых полимеров под воздействием радиации происходит сшивание с образованием поперечных связей, при этом повышается их рабочая температура и прочность.

Говорить о точных характеристиках конкретного полимера сложно, поскольку они различаются в технических описаниях разных компаний. Да и сами компании всегда подчеркивают, что приведенные ими характеристики носят лишь ознакомительный характер, а за точными данными следует обращаться непосредственно в компанию-производитель.

Основные технические характеристики изоляционных материалов

Основные технические характеристики изоляционных материалов для радиочастотных кабелей и соединителей приведены в таблице 2.

По химическому составу полимеры делятся на гомополимеры, состоящие из одного мономера, и сополимеры, образованные по меньшей мере из двух различных мономеров — низкомолекулярных веществ, способных формировать полимер в результате реакции полимеризации и повторяющихся в виде звеньев (структурных единиц) в составе полимерных молекул.

Важной характеристикой полимеров является температура стеклования T_g (glass-transition temperature), при которой полимер при охлаждении переходит из высокоэластичного или вязкотекучего в стеклообразное, малопластичное состояние. При температурах выше температуры стеклования полимеры находятся в пластичном состоянии, а при температурах ниже T_g — в твердом и хрупком состоянии. Интересна особенность полимеров восстанавливать первоначальные размеры и форму после термической обработки — это так называемая «эластическая память», если данной операции предшествовала операция растяжения при более низкой температуре.

Фторполимеры

Фторполимеры широко применяются в качестве изоляторов и оболочек радиочастотных кабелей, опорных изоляторов

коаксиальных соединителей и переходов благодаря сочетанию высокого уровня диэлектрических свойств в широком диапазоне температур и частот, химической стойкости и технологичности обработки [2]. Из многочисленного семейства фторсодержащих полимеров [3] на рис. 1 в двух группах представлены лишь фторполимеры, рассматриваемые в данной статье. К первой группе относятся гомополимеры политетрафторэтилен (PTFE), полихлортрифторэтилен (PCTFE) и поливинилиденфторид (PVDF). Вторая группа содержит сополимеры тетрафторэтилена (TFE) с гексафторпропиленом (HFP), перфторалкилвиниловыми эфирами (PFAVE) и этиленом (E). Латинскими буквами обозначены виды фторполимеров (из мономеров, их образующих) и наименование, принятое у зарубежных производителей, русскими буквами указана отечественная марка аналогичного фторполимера.

PTFE (№ 1)

PTFE (№ 1 в таблице 2) — политетрафторэтилен (ПТФЭ), первый в семействе фторполимеров, — был создан в 1938 году Роем Планкеттом из компании DuPont. Появление PTFE стало значительным прорывом в науке о полимерах. Широкое промышленное применение этого материала с торговой маркой Teflon началось с 1960-х годов.

В России разработкой ПТФЭ под маркой «Фторопласт-4» занялись в 1947 году в ОАО «Пластполимер» (тогда НИИ полимеризационных пластмасс с опытным заводом «НИИПП и ЭЗ»), где уже в 1949-м появилось опытное производство ПТФЭ. Первое в России промышленное изготов-

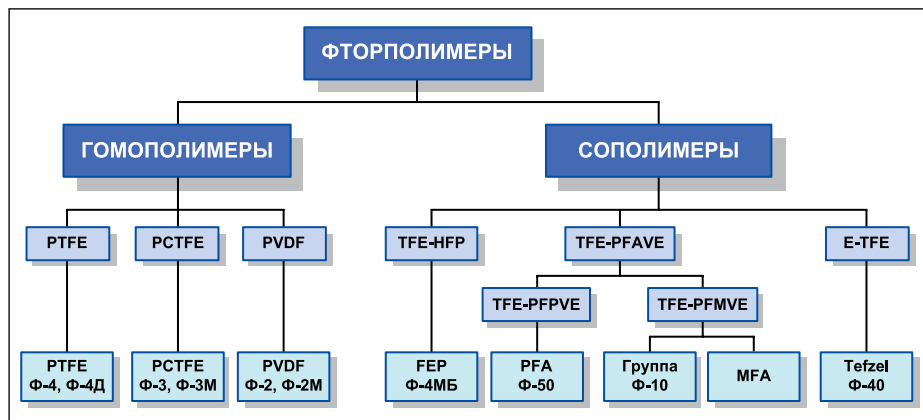


Рис. 1. Основные виды фторполимеров

ление ПТФЭ началось в г. Кирово-Чепецк в 1956 году [4]. В настоящее время этот материал выпускает большое количество зарубежных и отечественных компаний в виде лент, стержней, трубок и плит практически любых размеров.

Свойства PTFE хорошо изучены. У него наименьшие величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот, высокие химическая стойкость и огнестойкость, широкий диапазон рабочих температур $-269...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$, плотность $2,1\text{--}2,2\text{ г/см}^3$. PTFE является самым распространенным изоляционным материалом в конструкциях радиочастотных кабелей и соединителей.

Электрическая прочность фторопласта-4 в тонких пленках зависит от метода их изготовления. Нераскатанная пленка содержит мелкие отверстия и имеет электрическую прочность 30 кВ/мм , тогда как раскатанная пленка меньшей толщины имеет электрическую прочность $100\text{--}250\text{ кВ/мм}$. Несмачиваемость и ненабухаемость фторопласта-4 в воде позволяет применять изоляцию в условиях высокой влажности. Фторопласт-4 недостаточно устойчив к облучению — при дозе $0,5\text{ Мрад}$ он утрачивает 44% своей прочности, а при дозе 5 Мрад становится хрупким и ломается при изгибе [3, 5].

Накопленный опыт применения PTFE и новые требования к параметрам изоляционных материалов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) позволили выявить и существенные недостатки этого материала:

- при нагревании PTFE не переходит в вязко-текучее состояние, что исключает его экструзию (технологический процесс, заключающийся в продавливании расплава материала через формующее отверстие в экструдере). Вместо экструзии приходится использовать прессование дисперсионного PTFE, в том числе при помощи плунжерных прессов, с последующим спеканием при температуре $+(370 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$, и этот процесс является единственным способом переработки PTFE;

- при температуре около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит структурная перестройка PTFE, приводящая к скачкообразному изменению электрической длины радиочастотных кабелей. Этот эффект известен в зарубежной технической литературе как «тефлоновое колено» [6];
- нестабильность геометрических размеров при отсутствии механической нагрузки даже при отрицательных температурах из-за высокой хладотекучести материала (склонности к деформации при постоянной температуре);
- самая низкая из всех высокотемпературных полимеров радиационная стойкость;
- значительное, порой необратимое, объемное расширение при воздействии высокой температуры, например при пайке соединителей на кабель с изоляцией из PTFE.

Для снижения диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), а также для уменьшения влияния «тефлонового колена» на параметры коаксиальных кабелей при использовании PTFE многие зарубежные компании — производители коаксиальных кабелей занимались и продолжают заниматься совершенствованием технологии получения микропористого PTFE. Эти компании разработали и запатентовали оригинальные технологии создания сердечников коаксиальных кабелей из микропористого PTFE [6].

Микропористый PTFE применяют в радиочастотных кабелях уже более 30 лет. Его использование в качестве изолятора радиочастотных кабелей обеспечивает снижение потерь за счет уменьшения значения $\text{tg}\delta$ до 1×10^{-4} , увеличение скорости распространения сигнала благодаря уменьшению ϵ вплоть до $1,26$ и существенное улучшение температурно-фазовых характеристик кабеля. Тем не менее реализация современных требований к радиочастотным кабелям невозможна без преодоления перечисленных выше недостатков PTFE и вызывает интерес ведущих производителей СВЧ-кабелей к другим изоляционным материалам.

Для изготовления термоусаживаемых изделий применяют сополимеры тетраф-

тор-этилена с гексафторпропиленом (FEP), тетрафторэтилена с этиленом (ETFE), поливинилиденфторид (PVDF), как гомополимер, так и модифицированный [7].

Термоусаживаемые трубки предназначены для повышения химической, температурной и радиационной стойкости кабелей, защиты от внешних воздействий соединителей и элементов маркировки, а при необходимости — для дополнительной защиты кабельных сборок в целом.

Компания DSG-Canusa GmbH (Германия) разработала серию высокотемпературных, химически стойких термоусаживаемых трубок Deraу PTFE (рис. 2а) со следующими основными параметрами:

- интервал рабочих температур: $-65...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- коэффициент усадки: $2:1$ и $4:1$;
- температура усадки: $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- внутренний диаметр трубок: $2\text{--}101\text{ мм}$.

Арфлон (№ 2)

Арфлон — отечественный радиационно модифицированный фторполимерный материал, получаемый путем предварительного компактирования порошка ПТФЭ (Ф-4ПН, ГОСТ 10007-80) с последующей высокотемпературной радиационно-термической обработкой. Материал является аналогом ПТФЭ по комплексу химических свойств, но значительно превосходит его по физико-механическим и антифрикционным свойствам.

Арфлон разработан специалистами ПО «Родонит» (www.rodonit.chepetsk.ru) совместно с ООО «АР-ПРО» (ar-pro.org) и выпускается серийно.

Этот фторполимер характеризуется широким диапазоном рабочих температур, стойкостью в химически и биологически агрессивных средах, в углеводородах и морской воде. Материал имеет плотность $2,19\text{--}2,21\text{ г/см}^3$ при температуре $+(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ и коэффициент линейного термического расширения (при температуре, $^{\circ}\text{C}$): $(8...9) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (-60), $(10...20) \times 10^{-5}$ ($+20$), $(10...12) \times 10^{-5}$ ($+100$), $(15...17) \times 10^{-5}$ ($+150$), $(18...20) \times 10^{-5}$ ($+200$), $(22...24) \times 10^{-5}$ ($+250$).

Благодаря пренебрежимо малой степени изменения молекулярного строения в процессе переработки исходного ПТФЭ, арфлон сохранил следующие свойства, присущие ПТФЭ:

- химическая стойкость к растворителям, концентрированным кислотам, щелочам, углеводородам и морской воде;
- биологическая инертность и физиологическая совместимость, благодаря которым материал может применяться в медицине и пищевой промышленности;
- стойкость к ультрафиолетовому излучению, термоциклированию и другим климатическим факторам старения;
- отсутствие влагопоглощения ($<0,01\%$);
- широкий температурный интервал применения (без нагрузки $-200...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- не поддерживает горение;

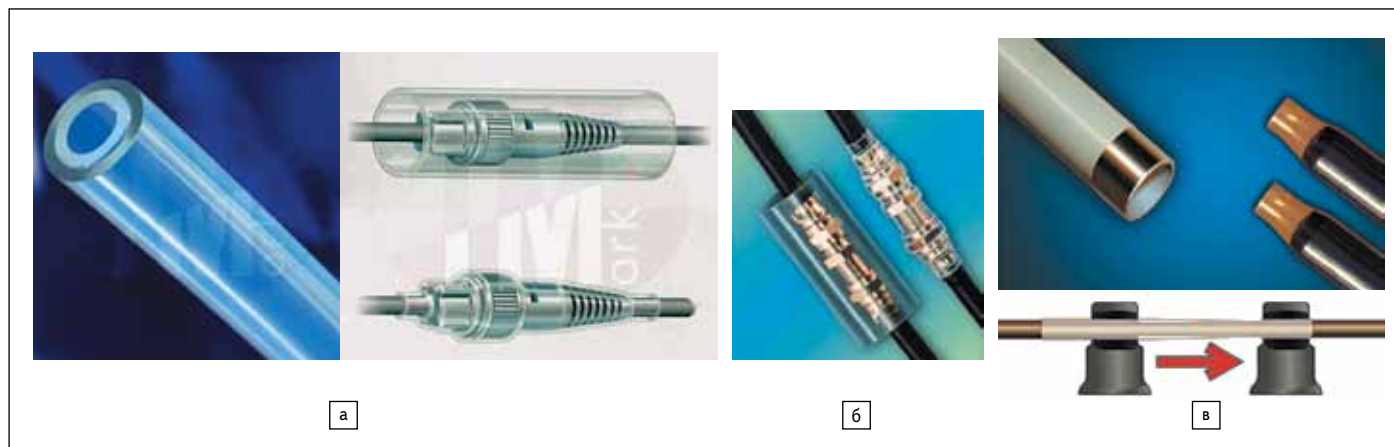


Рис. 2. Термоусаживаемые трубки: а) Deray PTFE, Kynar (PVDF), Tefzel (ETFE); б) двухслойная трубка Zeus и ее применение; в) PEEK

- высокая температура терморазложения (деполимеризации), равная +580 °С.

Вместе с тем примененная технология переработки порошка ПТФЭ привела к значительным изменениям надмолекулярной структуры, ответственной за физико-механические и антифрикционные свойства. В результате арфлон приобрел физические свойства, не характерные для исходного ПТФЭ:

- более высокую износостойкость при трении (в 50 и более раз);
- отсутствие хладотекучести (со снижением скорости ползучести в 1000 и более раз и упругим поведением в широком интервале напряжений и температур);
- высокий модуль упругости (в 2 раза выше при комнатной температуре и в 3–4 раза при +250 °С);
- отсутствие пористости (для обычного ПТФЭ характерна пористость на уровне 1–5%, для композитов на его основе — 5% и более);
- высокую стойкость к воздействию радиационного облучения.

Выпускаются две марки фторполимера арфлон: AR100 и AR200. AR200 отличается от AR100 несколько большей плотностью и упругостью, большей твердостью, меньшей ползучестью и меньшим коэффициентом линейного термического расширения. При деформациях ниже 10% наименьшую вероятность хрупкого разрушения обеспечивает материал AR200. Значительно отличается радиационная стойкость этих марок: у AR100 она равна 100 Мрад, а у AR200 — 300 Мрад. Электрические характеристики обеих марок — ϵ , $\tan \delta$ и электрическая прочность — одинаковы.

По сравнению с аналогичными фторполимерами марок PTFE и NXT компании DuPont обе марки арфлона имеют меньшую пористость и ползучесть, более высокую упругость при сжатии (600 и 650 МПа против 500 и 550 МПа), в 2–3 раза лучшие деформационные характеристики. По износостойкости материалы марок AR100 и AR200 значительно превосходят PTFE и NXT: первая марка — в 300 раз, вторая — в 1800 раз.

PFA (№ 3)

В группу сополимеров тетрафторэтилена с перфторалкилвиниловыми эфирами (TFE-PFAVE, рис. 1), в зависимости от того, какой вид винилового эфира является модифицирующим мономером для TFE, входят два вида фторполимеров: PFA с перфторпропилвиниловым эфиром (PFPVE) и MFA с перфторметилвиниловым эфиром (PFMVE).

Полностью фторированный алкоксиполимер (Perfluoroalkoxy, или PFA) — полукристаллический, со степенью кристалличности 48–70%, был разработан компанией DuPont в 1972 году. PFA имеет многие характеристики (химическую стойкость, диэлектрические свойства), аналогичные PTFE, но в отличие от него изготавливается из расплава методами экструзии, литьевого и центробежного формования. По механической прочности при высоких температурах и радиационной стойкости PFA превосходит PTFE. Наряду с этим PFA обладает эластичностью, стойкостью к многократным перегибам, не имеет хладотекучести. Удельный вес PFA составляет 2,12–2,15 г/см³, коэффициент линейного термического расширения (в диапазоне температур, °С) равен $14 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ (+21...+100), 17×10^{-5} (+100...+149), 21×10^{-5} (+149...+208) и не имеет резких температурных скачков, как у PTFE. Диэлектрические свойства PFA мало изменяются в широком диапазоне температур (–40...+250 °С) и частот ($10^2 \dots 2 \times 10^{10}$ Гц). При облучении PFA дозой 5 Мрад происходит 95%-ное снижение его относительного удлинения, доза 50 Мрад вызывает разрушение материала.

Благодаря своим техническим характеристикам PFA находит все большее применение в производстве радиочастотных кабелей. Компании Times Microwave и Molex (США) разработали и внедрили технологию производства пористого PFA при изготовлении радиочастотных кабелей с уникальными температурно-фазовыми характеристиками. Пористый PFA имеет диэлектрическую проницаемость 1,56–1,61, рабочие температуры находятся в диапазоне –65...+150 °С.

В 1970-е годы ОАО «Пластполимер» разработало сополимер тетрафторэтилена с перфторметилвиниловым эфиром [8] под маркой «Фторопласт-50», который имеет самый широкий из всех термопластичных фторполимеров диапазон рабочих температур: –200...+250 °С. Высокая температурная и химическая стойкость, стойкость к многократным перегибам обеспечивают длительную эксплуатацию изделий из фторопласта-50 в самых жестких условиях [3].

MFA (№ 4)

Сополимер тетрафторэтилена и перфторметилвинилового эфира (TFE-PFMVE), известный под маркой MFA (MetilFluoro-Alkoxy), отличается от PFA химическим составом и максимальной рабочей температурой. Для PFA она равна +(250...260) °С, для MFA — +225 °С, что связано с температурой плавления полимеров: для PFA и фторопласта-50 — +(300...310) °С, а для MFA — +(270...285) °С. Оба сополимера обеспечивают одинаковый уровень химической стойкости и считаются лучшими из всех коммерческих фторполимеров.

Ф-10 (№ 5)

В 1995 году в ОАО «Пластполимер» был запатентован сополимер тетрафторэтилена и перфторметилвинилового эфира, не имеющий зарубежных аналогов по своим характеристикам [9]. Этот сополимер, входящий в семейство фторполимеров группы Ф-10, сочетает повышенную эластичность и устойчивость к многократным перегибам (превышающую PFA) с высокой химической стойкостью ко всем агрессивным средам и низкой проницаемостью. Фторполимеры группы Ф-10 характеризуются высокими диэлектрическими показателями, прозрачностью в видимой части спектра 80–93%, диапазоном рабочих температур –80...+170 °С [10], который может быть расширен до уровня MFA. В настоящее время ОАО «Пластполимер» выпускает пленку из фторопласта-10 и дисперсию для покрытий.

FEP (№ 6)

В 1960-х годах компании DuPont удалось создать первый плавящийся фторполимер — под маркой Teflon FEP (сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена) с частично кристаллической структурой (70%), свойства которого схожи со свойствами PTFE. По своей формуле он похож на этилен-пропилен, в котором все атомы водорода заменены на фтор, отсюда и название — «фторированный этиленпропилен FEP». Хотя термостойкость FEP несколько хуже, чем у PTFE, FEP можно обрабатывать с помощью литьевого формования и экструзии.

В СССР сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена выпускается с середины 1960-х годов под маркой фторопласт-4МБ (Ф-4МБ) [3]. При прочих равных параметрах по сравнению с маркой Teflon FEP отечественный полимер Ф-4МБ имеет более узкий диапазон рабочих температур — $-190...+205$ °С.

Коэффициент линейного термического расширения FEP (в диапазоне температур, °С), равен $13,5 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ($0...+100$), $20,8 \times 10^{-5}$ ($+100...+150$), $26,6 \times 10^{-5}$ ($+150...+200$). Диэлектрическая проницаемость этого полимера практически неизменна в диапазоне частот от 1 кГц до 13 ГГц. Кратковременно допустим интервал рабочих температур $-200...+250$ °С. FEP имеет удельный вес $2,14 \text{ г/см}^3$ и выпускается в виде пленок, трубок, стержней, гранул, стабилизированных водных дисперсий.

Благодаря более высокой по сравнению с PTFE радиационной стойкости и возможности экструзии, FEP нашел применение в качестве материала оболочки высокотемпературных радиочастотных кабелей, в которых изолятор (сердечник) изготовлен из PTFE. В результате стойкости кабеля при воздействии радиации определяется прочностью оболочки, позволяющей сохранить поперечную геометрию кабеля постоянной даже при деструктивных изменениях материала сердечника.

Особое значение имеет химическая чистота (минимальное содержание примесей) изоляционного материала. В работе [11] показано, что применение для изготовления кабеля особо чистого полимера Daikin Neoflon FEP вместо FEP обычной чистоты позволило существенно снизить потери в кабеле.

Сегодня этот материал широко распространен в качестве высокотемпературной электрической изоляции кабелей и проводов для автомобильной и бытовой техники (65% от его общего мирового потребления).

В 2010 году на выставке в Дюссельдорфе компания DuPont представила запатентованную технологию компаундирования и переработки фторполимерных пенопластов с содержанием пор от 45 до 60% и созданные на ее основе марки Teflon: FFR330, FFR550, FFR750, FFR770. В 2012 году марочный ассортимент был расширен: создан Teflon FFR880

для изготовления тонкостенной пористой изоляции, а в 2014 году FFR330 был заменен на FFR440. Разработанная технология основана на идее введения в полимер газа с диэлектрической проницаемостью, близкой к 1, благодаря чему снижается диэлектрическая проницаемость полимера и соответственно увеличивается скорость распространения сигнала. При этом обеспечивается равномерность распределения газа в полимерной матрице и реализуется композиция на основе фторполимеров (Teflon FF) с равномерным распределением газа, вводимого в расплав полимера на специальном оборудовании при наложении на провод.

В Советском Союзе работы по созданию облегченной изоляции по технологии химического вспенивания проводились в ОАО «Пластполимер» в 1970-х годах: в композицию кроме регулятора порообразования вводили компонент, вызывающий вспенивание на выходе из экструдера. Однако эта технология не нашла широкого распространения. В настоящее время в ОАО «Пластполимер» разработана фторполимерная порообразующая композиция на основе фторопласта-4МБ для получения пористой изоляции (до 50% пустот при среднем размере пор до 290 мкм) на специальном оборудовании, обеспечивающем введение газообразного компонента в расплав полимера при наложении изоляции на провод [12].

Термоусаживаемые трубки из FEP, в том числе двухслойные с использованием PTFE, которые выпускает компания Zeus, создают возможность изготовления кабельных сборок повышенной термостойкости. По совокупности характеристик однослойные термоусаживаемые трубки из FEP компании Zeus аналогичны трубкам из PTFE, но имеют меньший коэффициент усадки (1,3:1 и 1,6:1), более низкую температуру усадки — $+216...227$ °С и максимальную рабочую температуру $+204$ °С.

Для ряда применений представляет интерес двухслойная термоусаживаемая трубка — Zeus PTFE/FEP Dual Shrink (рис. 26), имеющая внешний слой из PTFE и внутренний слой из FEP. В процессе усадки при нагреве струей горячего воздуха внешний слой PTFE плотно облегает изделие, в то время как внутренний слой FEP, выполняющий задачу склеивания, расплавляется и обеспечивает герметизацию элементов кабельной трассы. Трубка PTFE/FEP Dual Shrink отличается стойкостью к высоким температурам (до $+232$ °С), химической стойкостью и стойкостью к ультрафиолетовому излучению, однако область ее применения ограничивает высокая температура гарантированной усадки $+346...354$ °С.

ETFE (№ 7)

Сополимер этилена с тетрафторэтиленом (ETFE) под торговой маркой Tefzel разработан компанией DuPont в 1970 году. В то время его максимальная рабочая температура

составляла всего $+135...155$ °С. Только к 2005–2007 годам интервал рабочих температур для отдельных марок расширили от -100 до $+200$ °С. Tefzel — полукристаллический полимер со стандартной степенью кристалличности 50%.

Отечественный радиационно- и химически стойкий сополимер ETFE фторопласт-40 (Ф-40) с максимальной температурой эксплуатации без изменения свойств до $+200$ °С (кратковременно до $+250$ °С) был внедрен в производство в 1961 году. В 2003 году компания «ГалоПолимер» собственными силами разработала марку модифицированного сополимера этилена с тетрафторэтиленом Ф-40М. Для повышения рабочей температуры изоляции из Ф-40 до $+250$ °С в ОАО «Пластполимер» в 2010–2012 годах проводились исследования, по результатам которых были получены патенты и оформлены технические условия на марочный ассортимент композиции ФК-40С для электронно-лучевого отверждения на основе сополимера этилена с тетрафторэтиленом [4].

Сополимер ETFE имеет удельный вес $1,7 \text{ г/см}^3$, высокую механическую прочность и твердость, стоек к истиранию, отличается значительной радиационной стойкостью. Допустимая температура длительного (в течение 20 000 ч) нагрева на воздухе без существенного ухудшения свойств равна $+155$ °С. Коэффициент линейного термического расширения (в диапазоне температур, °С) равен $12,6 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ($0...+100$), $17,6 \times 10^{-5}$ ($+100...+150$), $22,3 \times 10^{-5}$ ($+150...+200$). Диэлектрическая проницаемость Tefzel снижается с ростом частоты с 2,6 на частоте 1 МГц до 2,3 на частоте 10 ГГц.

ETFE производят в виде гранул, из которых методами экструзии и формования из расплава изготавливают стержни, пластины, трубки, пленку и порошки для покрытий. Около 60% промышленного выпуска предназначено для изоляции радиочастотных кабелей и проводов.

Компания Zeus изготавливает химически стойкие термоусаживаемые трубки из материала ETFE. Трубки под маркой Zeus ETFE-HS имеют температуру усадки $+185...215$ °С, коэффициент усадки 1,5:1 (возможно и 2:1), максимальную рабочую температуру $+150$ °С, радиационную стойкость 100 Мрад. Они обладают высокой оптической прозрачностью (рис. 2а) и могут использоваться, в частности, для защиты кабельной маркировки от механического и химического воздействия.

PCTFE (№ 8)

Полихлортрифторэтилен (PCTFE) представляет собой термопластичный кристаллический гомополимер. Закаленные образцы этого материала имеют степень кристалличности 35–40%, кристалличность медленно охлажденных образцов может достигать 85–90%. Гомополимер имеет вы-

сокую механическую прочность, пластичен, оптически прозрачен в закаленном состоянии. Прозрачность зависит от степени кристалличности: чем она выше, тем мутнее образец.

От других фторполимеров PCTFE отличается низкой хладотекучестью (деформация менее 0,2%) и высокой стабильностью размеров. Его коэффициент линейного термического расширения ступенчато возрастает: при $-60...+50$ °C равен 6×10^{-5} 1/°C, в интервале температур $+(50...80)$ °C возрастает до 10×10^{-5} 1/°C, и в интервале $+(120...130)$ °C увеличивается до 12×10^{-5} 1/°C. Плотность закаленных образцов равна 2,08–2,09 г/см³, а медленно охлажденных — 2,16 г/см³. Диэлектрик характеризуется исключительной влагостойкостью. Тангенс угла диэлектрических потерь имеет максимум при температурах $+(110...120)$ °C [5]. При дозе облучения 50 Мрад модуль упругости материала снижается на 50%.

PCTFE был создан немецкой компанией IG Farben Company в 1934 году. В начале 1950-х его стала выпускать компания Kellogg (позднее вошла в известную фирму 3M) под торговой маркой Kel-F81 (сочетание: название компании Kellogg и фторполимер), производство велось до 1996 года. В настоящее время этот полимер выпускают другие компании в виде лент, листов, трубок и стержней. Kel-F81 приблизительно в 6 раз дороже, чем PTFE.

В СССР хлортрифторэтилен был разработан в НИИ «Пластполимер» в 1950-х [5] под марками Ф-3 и Ф-3М (модифицированный) [3]. Особенностью фторопласта-3М является меньшая степень кристалличности (60%) у медленно охлажденных образцов и способность выдерживать длительный нагрев при $+150$ °C без заметного ухудшения механических свойств. Кроме того, свойства изделий из Ф-3М практически не зависят от скорости охлаждения. В настоящее время полимеры Ф-3 и Ф-3М серийно не выпускаются.

PVDF (№ 9)

Поливинилиденфторид (PVDF) — термопластичный фторированный (содержание фтора более 50%), частично кристаллический (степень кристалличности 30–70%) полимер, имеющий высокие химическую стойкость, прочность и твердость при температуре до $+175$ °C, а также небольшой удельный вес — 1,78 г/см³. PVDF имеет весьма низкую температуру стеклования -40 °C.

PVDF запатентован компанией Du Pont в 1948 году [13], начал выпускаться в 1961-м французской компанией Arkema, а в дальнейшем Solvay, Daikin и другими компаниями [14]. PVDF получают путем полимеризации винилиденфторида. Изготавливается этот полимер в гранулированной форме, что облегчает процесс его переработки при формовании и экструзии, а также в форме тонкодисперсного порошка для приготовления растворов и центробежного формования.

Детали из PVDF изготавливают литьем под давлением или экструзионным формованием. Основные свойства PVDF: технологичность обработки, химическая стойкость при высоких температурах, высокая радиационная стойкость: при дозе 100 Мрад прочность при растяжении снижается на 5–10%, тогда как PTFE теряет до 40% прочности при дозе 2 Мрад. PVDF абсолютно стоек к микроорганизмам и физиологически безвреден [15].

Изоляция проводов из PVDF хорошо зарекомендовала себя при работе в условиях космических полетов [16], в качестве защитной оболочки бортовых авиационных проводов [17], однако высокий тангенс угла диэлектрических потерь ограничивает применение в качестве изоляции провода, работающего в высокочастотной области.

С 1965 года компания Arkema производит гомополимерные и модифицированные сорта PVDF под марками Kynar и Kynar Flex. Kynar Flex отличается повышенной гибкостью и более широким диапазоном температур плавления $+(117...166)$ °C. Вспененный Kynar 468 имеет более низкую диэлектрическую проницаемость и удельную плотность. Нити из PVDF применяются для оплетки радиочастотных кабелей. В результате повышается радиационная стойкость и гибкость кабелей, а за счет более эффективного отвода тепла увеличивается допустимая пропускная мощность СВЧ-сигналов.

В ОАО «Пластполимер» разработан гомополимер поливинилиденфторида — фторопласт-2 с повышенной механической прочностью, твердостью, стойкостью к истиранию и радиации (по сравнению с PTFE). При облучении дозой в 100 Мрад фторопласт-2 сохраняет 80% прочности. Позднее была разработана серия модифицированных марок полимера, у которых введение звена модифицирующего сомономеров нарушает регулярность построения цепи макромолекулы, что приводит к снижению кристалличности, температуры плавления, прочности при растяжении и твердости, присущих гомополимеру. Одновременно могут улучшаться эластичность, химическая стойкость, усадка и тангенс угла диэлектрических потерь [15]. В СССР разработаны марки модифицированного PVDF: фторопласт-2М [18] с большей эластичностью и более низкой температурой плавления кристаллитов, фторопласт-2МЭ [19] с улучшенными диэлектрическими свойствами и пьезоэффектом, фторопласт-2МБ с наилучшей адгезионной прочностью к материалу подложки и фторопласт-2БА — с пьезоэффектом [15]. В настоящее время в ООО «ГалоПолимер» (г. Кирово-Чепецк) выпускается только фторопласт-2М.

Компания DSG-Canusa разработала гибкие высокотемпературные, химически стойкие термоусаживаемые трубки из фторполимера Kynar: Deray KYF 190, Deray KY 175 (рис. 2а). Температура усадки $+175$ °C, диапазон рабо-

чих температур $-55...+190$ °C, удельный вес 1,8 г/см³, электрическая прочность 33 кВ/мм. Среди всех фторопластов Kynar отличается самой большой прочностью, твердостью по Бринелю (90–114 МПа), отсутствием хладотекучести под действием нагрузки, имеет повышенную упругость и стойкость к абразивному износу. К тому же у Kynar обнаружен пьезоэлектрический эффект, что позволяет использовать его в датчиках антенн, в авиакосмической и специальной технике.

Полиимиды

В состав полиимидов входят полимеры PI, PEI и PAI (рис. 3).

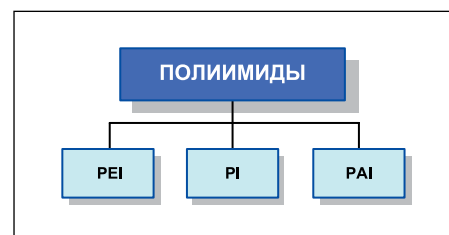


Рис. 3. Основные типы полиимидов

PI (№ 10)

PI — класс синтетических термостойких материалов, содержащих в полимерных цепях циклические имидные группы. Полиимиды обладают выдающимися свойствами: высокой термической, криогенной, радиационной стойкостью, высокими прочностными показателями в широком температурном диапазоне. В структуре этих материалов имеются как кристаллические, так и аморфные области. В класс полиимидов входят Kapton, Kevlar и Vespel, созданные компанией DuPont соответственно в конце 1960-х и в 1990-х годах.

Полиимиды имеют удельный вес 1,3–1,4 г/см³, коэффициент линейного термического расширения $3,2 \times 10^{-5}$ 1/°C в диапазоне температур $+(20...200)$ °C, температуру стеклования $+(315...360)$ °C. У них практически отсутствует хладотекучесть, что обеспечивает высокую стабильность размеров.

PAI (№ 11)

PAI — прочный аморфный полимер желто-зеленого цвета, стойкий к воздействию химических агрессивных сред и радиации, разработанный компанией Solvay. Благодаря хорошей обрабатываемости, термостойкости, размерной стабильности в широком диапазоне температур и высокой диэлектрической прочности этот материал применяют в производстве прецизионных деталей электрических соединителей (методами литья под давлением и механической обработки). Наиболее известный полиамидимид Torlon 4203 имеет низкий коэффициент линейного термического расширения — $2,5 \times 10^{-5}$ 1/°C в диапазоне температур до $+250$ °C. Это один из лучших

термопластичных полимеров по стойкости к воздействию ультрафиолетового, гамма- и рентгеновского излучения высокой энергии. Torlon выпускают в виде листов, стержней и трубок.

PEI (№ 12)

Полиэфиримидные материалы серии Ultem были разработаны компанией General Electric, Plastics Division, ныне входящей в состав Sabic Corporation. Один из лучших материалов этой серии Ultem 1000 PEI — аморфный термопластичный полупрозрачный полимер янтарно-желтого цвета, имеющий высокие механическую прочность (близкую к прочности металлов и керамических материалов), термостойкость, химическую и радиационную стойкость, а также исключительно высокую стабильность размеров. Кратковременный нагрев этого материала до +210 °C не приводит к существенному уменьшению прочности. Диэлектрические свойства Ultem незначительно изменяются в широком диапазоне до +200 °C и частот 1–10¹⁰ Гц. Это радиационно-стойкий материал: при дозе облучения 500 Мрад радиоактивным кобальтом Co⁶⁰ со скоростью 1 Мрад/ч потеря прочности не превышает 6%.

Изделия из Ultem изготавливают механической обработкой и литьем под давлением. Зарубежные компании выпускают этот материал в виде стержней и листов.

Изоляционные материалы других составов

PEEK (№ 13)

PEEK был создан Imperial Chemical Industries в 1977 году. PEEK — органический термопластичный полимер бледно-кремового цвета с частично кристаллической структурой (40%), в котором удачно сочетаются высокие механические свойства, приближающиеся к свойствам металлов, химическая и радиационная стойкость, стабильность размеров и приемлемые диэлектрические свойства при температурах до +250 °C (допускается кратковременный нагрев до +350 °C). PEEK имеет наилучшую стабильность размеров и радиационную стойкость среди всех термопластичных материалов. Коэффициент линейного термического расширения PEEK (в диапазоне температур, °C) равен $4,7 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ (0...+150), $10,8 \times 10^{-5}$ (+150...+250), что в 1,5–2 раза меньше, чем у PTFE; температура стеклования +161 °C.

Изделия из PEEK производят методами механической обработки, плавления в пресс-формах и экструзии. За рубежом полимер выпускают в виде стержней, листов, лент и трубок, в том числе и термоусаживаемых. На две марки этого полимера в 2014 году выпущены отечественные технические условия (табл. 2).

Термоусаживаемые трубки из PEEK могут быть использованы для дополнительной защиты коаксиальных элементов от радиацион-

ных воздействий. Компания Zeus производит трубки Zeus PEEK shrink (рис. 2в) со следующими основными техническими данными:

- коэффициент усадки: 1,4:1;
- температура усадки: +(330...360) °C;
- температура длительной эксплуатации: до +260 °C;
- высокая радиационная стойкость (более 1000 Мрад без значительного ухудшения механических свойств);
- не содержит галогенов;
- теплостойкость: +400 °C;
- внутренний диаметр выпускаемых трубок: 0,97–9,96 мм.

PPS (№ 14)

PPS — высокотемпературный полукристаллический полимер. Его промышленное производство было начато в 1967 году компанией Philips Petroleum (ныне Solvay) под торговой маркой Ryton. В твердом виде материал непрозрачный, от белого до светло-бежевого цвета, с удельным весом 1,35 г/см³. PPS имеет высокую химическую стойкость и стабильность при температурах до +200 °C (кратковременно до +260 °C), а также стабильные диэлектрические свойства при этих температурах. Температура стеклования PPS равна +85 °C (для сравнения: у PEI — +215 °C, у PEEK — +143 °C), средний коэффициент линейного термического расширения равен $(3...7) \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Изделия из PPS можно изготавливать с высокой точностью литьем под давлением, экструзией и механической обработкой.

PPO (№ 15)

PPO — термостойкий, аморфный, химически стойкий, легкий (удельный вес 1,1–1,4 г/см³) термопластичный полимер, созданный в 1964 году компанией General Electric Plastics. Из-за высокой температуры стеклования (+210 °C) усложняется обработка полимера. Поэтому для снижения вязкости его используют в смеси с полистиролом. Модификация PPO и полистирола выпускается компанией Sabic Innovative Plastics под торговой маркой Noryl (наиболее известен Noryl EN265). Данный материал характеризуется высокой прочностью, стойкостью к ударным нагрузкам, высоким сопротивлением ползучести. При изготовлении деталей из PPO используют технологию точного литья. PPO и PPE (PolyPhenyleneEther) сходны по свойствам и рассматриваются как эквивалентные полимеры.

PS (№ 16)

PS (полистерен) — термореактивный полимер, полученный путем радиационного сшивания полистирола с дивинилбензолом. Разработан компанией C-Lec Plastics для применения в СВЧ-технике. Наиболее широко распространенный полимер этой серии — Rexolite 1422 представляет собой легкий (плотность всего 1,05 г/см³), жесткий, прозрачный изоляционный матери-

ал со средним коэффициентом линейного термического расширения $7 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. У Rexolite 1422 высокий уровень диэлектрических свойств в диапазоне температур –270...+176 °C и в широком диапазоне частот от 1 МГц до 50 ГГц, отсутствует остаточная деформация и пластическое течение даже при температуре +125 °C. Материал отличается высокой радиационной стойкостью: после воздействия дозы 1000 Мрад диэлектрические потери и другие свойства не претерпевают существенных изменений.

POM (№ 17)

POM разработан компанией DuPont в 1956 году, с 1960 года началось его промышленное производство под торговой маркой Delrin. Другая компания, Celanese, наладила его промышленное производство в 1962 году под торговой маркой Celkon. Этот материал известен как гомополимер POM-Н, выполненный по технологии DuPont, и сополимер POM-С, изготовленный по технологии Celanese.

Delrin — полимер белого цвета, непрозрачный, легко окрашиваемый, с частично кристаллической структурой (степень кристаллизации 75%). Он удачно сочетает повышенную механическую прочность, химическую стойкость и высокую стабильность размеров с хорошими диэлектрическими свойствами. Деформация этого материала под нагрузкой 14,3 кг/см² не превышает 0,7%. Коэффициент линейного термического расширения (в диапазоне температур, °C), равен $10,4 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ (–40...+29), $12,2 \times 10^{-5}$ (+29...+60), $13,7 \times 10^{-5}$ (+60...+104), $14,9 \times 10^{-5}$ (+104...+149). Свойства Delrin заметно не изменяются при длительном нагреве до +80 °C и кратковременном нагреве до +120 °C.

Переработку полимера в изделия производят методом прессования и литья под давлением при температуре +(200...225) °C. Delrin не следует использовать в случаях, когда суммарная доза электронов превышает 1 Мрад. При дозе 2,3 Мрад происходит охрупчивание материала.

FLUOROLLOY H (№ 18)

Fluoroloy H (другое название Rulon H) представляет собой композицию PTFE и керамического наполнителя, который улучшает механические, термические и изоляционные свойства данного полимера. Он был создан в 1952 году компанией Saint Gobain Performance Plastics. По сравнению с PTFE Fluoroloy H имеет несколько более высокую диэлектрическую проницаемость, но у него в 5 раз выше теплопроводность (соответственно 1,21 и 0,24 Вт/м·°C).

Fluoroloy H имеет высокую абразивную и химическую стойкость, а также широкий диапазон рабочих температур. Удельный вес материала 2,13–2,17 г/см³, коэффициент линейного термического расширения в диапазоне температур +(26...200) °C равен $13,2 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$.

SiO₂ (№ 19)

Неорганический аморфный диэлектрик — мелкодисперсный диоксид кремния SiO₂ — применили в фазостабильных кабелях СВЧ-диапазона американские компании Meggitt Safety System, Times Microwave Systems, Measure Tech, а также французская компания Thermocoax [11]. Рабочий диапазон температур кабеля с SiO₂ составляет –270...+1000 °С. Однако в кабельных сборках предельная температура нагрева ограничена диапазоном рабочих температур соединителей –273...+600 °С.

Применение изоляционных материалов

Применение изоляционных материалов в радиочастотных кабелях рассмотрено в работах [1, 6, 11] и на сайтах компаний-производителей, однако требует отдельного, более детального обсуждения.

Изоляционные материалы (полимеры), применяемые в радиочастотных соединителях зарубежных компаний (приложение 2), приведены в таблице 2 (кроме № 4, 5). Радиочастотные соединители и адаптеры подразделяются на приборные и инструментальные (прецизионные). Подавляющее большинство приборных отечественных и зарубежных соединителей сантиметровой диапазона длин волн (SMA, BMA, QMA, QN, BNC, QLA, 7/16, BNC, TNC и другие) имеют коаксиальную линию, целиком заполненную монолитным PTFE [1]. Наряду с высокими диэлектрическими свойствами PTFE имеет недостатки, описанные в разделе «Фторполимеры» данной статьи.

Современная техника предъявляет к соединителям возрастающие требования к стабильности электрических параметров в условиях радиационных и механических воздействий, при повышении рабочей частоты и пропускаемой мощности. Для обеспечения этих параметров разработчики вынуждены использовать диэлектрики, альтернативные PTFE. Так, НПП «Спецкабель» (Москва) и ФГУП «ПО «Октябрь» (г. Каменск-Уральский) в своих разработках успешно применили вместо PTFE фторполимер Арфлон.

Прецизионные соединители и адаптеры, а также приборные соединители миллиметрового диапазона длин волн имеют полувоздушную коаксиальную линию. Крепление центрального проводника соединителя обеспечивают тонкие опорные диэлектрические шайбы, которые изготавливают из прочного изоляционного материала, не имеющего хладотекучести. К таким материалам относятся PEEK, Rexolite 1422, Noryl EN265, Ultem 1000 и в отдельных случаях Kартон. Хотя по диэлектрическим свойствам эти материалы уступают PTFE, они имеют значительно более высокую механическую прочность и радиационную стойкость.

Область применения Rexolite 1422 ограничена измерительными соединителями, так

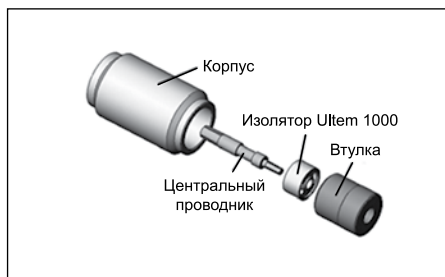


Рис. 4. Схематическое изображение конструкции соединителей SMA 2.9

как верхнее значение диапазона рабочих температур диэлектрика не превышает +100 °С. Например, прецизионные соединители RPC 3.5 компании Rosenberger с этим диэлектриком имеют максимальную рабочую температуру +90 °С.

Ultem 1000 — один из лучших изоляционных материалов для опорных шайб соединителей СВЧ-диапазона. Его недостаток — значительная величина диэлектрической проницаемости, составляющая 3,15–3,2. Чтобы снизить влияние диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, удаляют часть материала опорной шайбы, делая для этого в шайбе отверстие и углубления. Такую геометрию опорной шайбы удобнее всего получать литьем под давлением, установив центральный проводник по оси литьевой пресс-формы. В качестве примера применения Ultem 1000 на рис. 4 представлены конструкции соединителей SMA 2.9 компании Radiall. В соединителе втулку, покрытую гальваническим золотом, запрессовывают в корпус после установки в нее блока «центральный проводник + опорная шайба».

Пример применения Kартон — соединители и переходы (адаптеры) SMA 2.9 оригинальной конструкции компании Radiall (рис. 5).

Устройство крепления центрального проводника состоит из четырех упругих пластинок толщиной 125 мкм, сформованных в виде звезды вокруг проточки на центральном проводнике. Пластины вставлены в прорези держателя без применения клея. Держатель представляет собой запрессовываемую втулку, покрытую гальваническим золотом. Устройство с опорной шайбой занимает незначительную часть внутреннего объема коаксиальной линии, обеспечивая эквивалентную диэлектрическую проницаемость всего 1,5 и предельную частоту соединителя 46 ГГц.

PEEK применяет компания Rosenberger для опорных шайб прецизионных соединителей, его используют также в соединителях SMP с предельной частотой 40 ГГц компании Molex и Amphenol. Целесообразно употребление PEEK в качестве опорных элементов центральных проводников коаксиальных соединителей и переходов, подверженных ионизирующим излучениям (медицина,

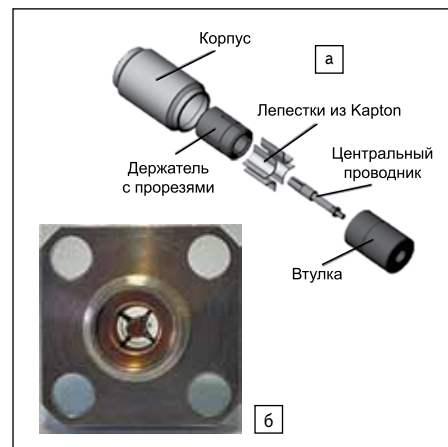


Рис. 5. Адаптер SMA 2.9: а) схематическое изображение конструкции; б) внешний вид устройства

атомная энергетика, космос) и высоким механическим воздействием. Имеется отечественный опыт использования PEEK для изготовления корпусов специальных соединителей (НПО «Соединитель», г. Миасс) и в качестве опорных шайб в коаксиальных переходах (НПП «Спецкабель», Москва).

Положительные результаты получены при использовании ETFE (Tefsel) при изготовлении опытных образцов соединителей SMA в НПП «Спецкабель».

Noryl EN265 находит применение в инструментальных и приборных соединителях с предельной частотой вплоть до 50 ГГц.

Компании San-Tron и Spectrum Elektrotechnik употребляют Fluoroloy H в соединителях TNC повышенной мощности с предельной частотой 11 ГГц, а TRU Corp. — в соединителях 7/16 с предельной мощностью 2000 Вт на частоте 4,2 ГГц. Компания SV Microwave применила этот полимер в соединителях SMA и в высоковольтных соединителях SC (предельная частота 11 ГГц, рабочее напряжение 2000 В). Компаниям Astrolab и SRI Connector, применившим Fluoroloy H для изготовления изолятора соединителей SMA, удалось на 20% повысить допустимую пропускаемую мощность соединителей [20].

Заключение

За рубежом разработано и широко используется большое количество изоляционных материалов с уникальными свойствами и изделия диапазона СВЧ из них. Применение новых типов диэлектриков обеспечило создание радиочастотных кабелей и соединителей, не имеющих отечественных аналогов.

Решение задач импортозамещения при разработке современных СВЧ-устройств предусматривает применение отечественных полимеров. В нашей стране была создана широкая номенклатура полимеров, аналогичных зарубежным, а также разработаны полимеры, не имеющие зарубежных анало-

Приложение 1. Компании — производители изоляционных СВЧ-материалов

Компания	Страна	Сайт
DuPont	США	www.dupont.com
San Diego Plastics		www.sdplastics.com
C-Lec Plastics		www.rexolite.com
Polymer Plastics Company		www.polymerplastics.com
Dyneon LLC		www.dyneon.com
Zeus Industrial Plastics		www.zeusinc.com
Saint-Gobain Performance Plastics		www.plastics.saint-gobain.com
Porex Corporation		www.porex.com
Imperial Chemical Industries	Великобритания	www.britannica.com
Solvay	Бельгия	www.solvay.com
Arkema	Франция	www.arkema.com
DSG-Canusa GmbH	Германия	www.dsgcanusa.com
Sumitomo Fine Polymer	Япония	www.sei-sfp.co.jp
Sabic Corporation	Саудовская Аравия	www.sabic-ip.com
Россия		
ОАО «Пластполимер»	Санкт-Петербург	www.plastpolymer.com www.plastpolymer.org
АО «Институт пластмасс им. Г. С. Петрова»	Москва	instplast.ru
ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»	Санкт-Петербург	www.giph-su
Институт высокомолекулярных соединений РАН	Санкт-Петербург	imc.macro.ru
АО «ГалоПолимер»	Пермь	www.halopolymer.ru
ООО «Первый фторопластовый завод»	Кирово-Чепецк	www.1fz.ru
ПО «Родонит»	Кирово-Чепецк	www.rodonit.chepetsk.ru

Примечание. Наряду с перечисленными изоляционные СВЧ-материалы выпускают и многие другие компании Юго-Восточной Азии, США и Европы.

Приложение 2. Полимеры, применяемые в радиочастотных соединителях зарубежных компаний

Полимер, марка	Типы соединителей	Компания, страна	Источник информации
PTFE	Большинство соединителей СВЧ-диапазона	Большинство компаний	[1]
PFA	SMA, BMA, QMA, QN, BNC, TNC	Huber+Suhner, Швейцария	www.hubersuhner.com
PCTFE, Kel-F81	2,92; 2,4 мм	Southwest Microwave, США	www.southwestmicrowave.com
	3,5; 2,92; 2,4; 1,85 мм	SGMC Microwave, США	www.sgmcmicrowave.com
Fluoroloy H	TNC	San-Tron, США	www.santron.com
		Spectrum Elektrotechnik, Германия	www.spectrum-et.org
	SMA	Sri Connector Gage, США	www.sricconnectorgage.com
		SV Microwave, США	www.svmicrowave.com
		Astrolab (Huber+Suhner), Швейцария	www.astrolab.com
	7/16	TRU Corp., США	www.trucorporation.com
PI, Kapton	SMA 2,9	Radiall, США, Франция	www.radiall.com
PEI, Ultem 1000	2,92; 2,4; 1,85 мм	Southwest Microwave, США	www.southwestmicrowave.com
	2,92 мм	SV Microwave, США	www.svmicrowave.com
PEEK	RPC-2.92, RPC-2.40, RPC-1.85, RPC-1.0	Rosenberger, Германия	www.rosenberger.com
	SMP	Molex, США	www.molex.com
	SMP	Amphenol, США	www.amphenol.com
PS, Roxelite 1422	PC 3.5	Huber+Suhner, Швейцария	www.hubersuhner.com
PPO, Noryl EN265	RPC-7, RPC-N	Rosenberger, Германия	www.rosenberger.com
	SK (2,9 мм)	Huber+Suhner, Швейцария	www.hubersuhner.com
	2,9 мм	Tru corp., США	www.trucorporation.com
	2,4 мм	Cristek Interconnect, США	www.cristek.com
	2,92 мм	Pasternack, США	www.pasternack.com
POM, Delrin	S292	San-Tron, США	www.santron.com
	BNC adapters	Amphenol, США	www.amphenol.com
	SMA	TE Connectivity, США	www.te.com

гов. Однако в настоящее время номенклатура и объем выпуска российских полимеров ограничены. По этой причине разработчики СВЧ-устройств либо вынуждены обращаться к полимерам зарубежного производства, либо, что более правильно, должны наладить взаимоотношения с отечественными организациями — разработчиками полимеров, которые получают возможность при поддержке потребителей восстановить выпуск подобных материалов и сырья, необходимого для их производства.

Литература

- Джуринский К. Б. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры. Изд-во «Файнстрит». СПб, 2014.
- Логинова Н. Н., Подлеская Н. К., Кочкина Л. Г., Смирнова Ю. А., Чиркова Ю. Н. Особенности сополимеризации фторсодержащих олефинов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 2. Т. 16.
- Фторопласты. Каталог продукции НИИТЭХИМ. Черкассы, 1983.
- Логинова Н., Подлеская Н., Трофимов Д. Российский опыт модификации фторполимеров // Пластик. 2014. № 3.
- Чегодаев Д. Д., Наумова З. К., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. Госхимиздат, 1960.
- Прокимов А., Лобанов А., Джуринский К., Кузнецов Р. Фазовая стабильность кабельных сборок СВЧ с диэлектриком ПТФЭ // Компоненты и технологии. 2015. № 6.
- Паншин Ю. А., Ярцев И. К., Малкевич С. Г., Пугачев А. К. Термопластичные фторлоны и их переработка. Л.: ЛДНТП, 1975.
- Логинова Н. Н., Кочкина Л. Г., Ерохова В. А., Тишина В. В. и др. Способ получения сополимеров тетрафторэтилена с 2–5 мол. % перфторпропилвинилового эфира. Патент РФ 2156777, 1999.
- Логинова Н. Н., Кочкина Л. Г., Ерохова В. А., Березина Г. Г. Способ получения сополимеров тетрафторэтилена. Патент РФ 2071479, 2003.
- Логинова Н. Н., Кочкина Л. Г., Березина Г. Г. и др. Способ получения сополимеров тетрафторэтилена с 12–15 мол.% гексафторпропилена. Патент РФ 2109761, 1996.
- Прокимов А., Джуринский К., Фомченко А. Оригинальные конструктивные решения фазостабильных кабелей СВЧ-диапазона // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
- Просолупова Л. П., Шолуденко М. В., Смирнова Ю. А., Красовский Д. С., Логинова Н. Н. Фторопластовая порообразующая композиция и способ получения фторопластовой порообразующей композиции. Патент РФ 2554886, 2015.
- Эдвард Х. В., Форд Т. А. Поливинилиденфторид и процесс его получения. Патент США 2435537, 1948.
- Линхард К., Ульмшнайдер Д. Способ получения поливинилиденфторида. Патент СССР 359830, 1972.
- Афонина И. И., Мадорская Л. Я., Невежина Т. Б. Состояние и тенденции развития производства поливинилиденфторида. Обзорная информация, серия «Полимеризационные пластмассы». М.: НИИТЭФИМ, 1985.
- Финкель Э. Э., Брагинский Р. П. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно модифицированной изоляцией. М.: Энергия, 1975.
- Диккерман Д. Н., Кунегин В. С. Провода и кабели с фторопластовой изоляцией. М.: Энергия, 1980.
- Логинова Н. Н., Мадорская Л. Я., Захаров П. С. и др. Способ получения сополимеров винилиденфторида с тетрафторэтиленом. Патент РФ 2139891, 1999.
- Логинова Н. Н., Мадорская Л. Я., Захаров П. С., Хачатрян С. С. Способ получения полимеров на основе винилиденфторида. Патент РФ 2200167, 2003.
- Джуринский К., Прокимов А. Выбираем радиочастотный соединитель // Компоненты и технологии. 2014. № 7.