

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А.П. БОВСУНОВСЬКИЙ

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

КОРОТКИЙ ДОВІДНИК

КИЇВ НУХТ 2012

УДК 621:669.14

Рецензент: *М.А. Сологуб*, д-р техн.наук, проф.

Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник – К.: НУХТ, 2012. – 36 с.

Наведено дані про склад, фізичні, механічні і хімічні властивості основних матеріалів, які використовують у електротехніці.

Для студентів енергетичних спеціальностей вищих технічних навчальних закладів.

А.П. Бовсуновський, д-р техн. наук

Видання подано в авторській редакції

УДК 621:669.14

© А.П. Бовсуновський, 2012
© НУХТ, 2012

ЗМІСТ

Прийняті позначення	4
I. ДІЕЛЕКТРИКИ	
Електричні характеристики діелектриків	5
Механічні властивості діелектриків	5
Теплові характеристики діелектриків	6
Смоли	8
Синтетичні полімери	9
Шаруваті пластики	11
Електроізоляційні лаки	11
Компаунди	13
Волокнисті діелектрики	14
II. ПРОВІДНИКИ	
Електричні характеристики провідників	17
Фізичні характеристики провідників	17
Магнітні характеристики провідників	18
Надпровідні матеріали	20
Сплави високого опору	21
Біметали	23
Сплави для термопар	24
Припої	27
Електротехнічне вугілля	28
III. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ	
Магнітні характеристики матеріалів	28
Магнітом'які матеріали	28
Магнітотверді матеріали	30
IV. НАПІВПРОВІДНИКИ	
Характеристики напівпровідників	32
Прості напівпровідники	32
Напівпровідникові хімічні сполуки	33
Література	36

Прийняті позначення

ρ – питомий електричний опір, Ом·м;
 ρ_v – питомий об'ємний електричний опір діелектрика, Ом·м;
 γ_v – питома об'ємна електрична провідність діелектрика, Ом⁻¹·м⁻¹;
 ρ_s – питомий поверхневий електричний опір діелектрика, Ом;
 R – електричний опір, Ом;
 γ_s – питома поверхнева електрична провідність, Ом⁻¹;
 α_p – температурний коефіцієнт питомого електричного опору, град⁻¹;
 ϵ – відносна діелектрична проникність;
 $\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;
 $E_{\text{пр}}$ – напруженість пробою (електрична міцність), В/м;
 $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою, В;
 δ – відносне видовження, %;
 ψ – відносне звуження, %;
 σ_b – границя міцності, Па;
 E – модуль пружності, Па;
 KCV – в'язкість руйнування, Дж/м²;
 HB – твердість матеріалу, одиниці твердості;
 C – теплоємність, Дж/К;
 c_m – питома теплоємність, Дж/кг·К;
 α – температурний коефіцієнт лінійного розширення, град⁻¹;
 $\Delta\alpha$ – коефіцієнт чутливості термобіметалу, град⁻¹;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;
 $t_{\text{пл}}$ – температура плавлення, град.;
 $T_{\text{нп}}$ – температура надпровідного переходу, К;
 t_p – температура розм'якшення, град.;
 $t_{\text{сп}}$ – температура спалаху, град.;
 TI – температурний індекс, град.;
 W – ширина забороненої зони, еВ;
 $\mu_{\text{п}}$ – початкова магнітна проникність, безрозм. велич.;
 μ_{max} – максимальна магнітна проникність, безрозм. велич.;
 H_C – коерцитивна сила, А/м;
 B_{max} – максимальна індукція магнітного поля, Тл;
 B_r – залишкова індукція, Тл;
 $B_{\text{кр}}$ – критична магнітна індукція, Тл;
 ϑ – точка Кюрі, град;
 W_{max} – максимальна магнітна енергія, Дж/м³;
 $f_{\text{гр}}$ – гранична частота електромагнітного поля, Гц;

І. ДІЕЛЕКТРИКИ

Діелектрики (електроізоляційні матеріали) – це матеріали, які за нормальних умов експлуатації практично не проводять електричний струм. Питомий об'ємний електричний опір різних діелектриків є надзвичайно великим у порівнянні з опором провідників і знаходиться у межах $\rho_v=10^6 \dots 10^{22}$ Ом·м. Діелектрики мають здатність поляризуватися у електричному полі. За цією здатністю їх поділяють на неполярні (нейтральні), полярні і сильнополярні. За агрегатним станом розрізняють газоподібні, рідкі і тверді діелектрики.

Електричні характеристики діелектриків

Відносна діелектрична проникність (ϵ) – безрозмірна величина, що показує у скільки разів сила взаємодії між зарядами в однорідному діелектричному середовищі менша ніж у вакуумі.

Тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) – безрозмірна величина, що характеризує втрати енергії у діелектрику, які спричиняють його розігрів у перемінному електричному полі.

Питомий об'ємний електричний опір діелектрика (ρ_v) характеризує електричний опір діелектрика одиничної площі і довжини постійному струму.

Питома об'ємна електрична провідність (γ_v) – величина, обернена до питомого об'ємного електричного опору, $\gamma_v=1/\rho_v$.

Питомий поверхневий електричний опір діелектрика (ρ_s) характеризує електричний опір поверхні твердого діелектрика у формі квадрата при протіканні постійного електричного струму між двома його протилежними сторонами.

Питома поверхнева електрична провідність (γ_s) – величина, обернена до питомого поверхневого електричного опору, $\gamma_s=1/\rho_s$.

Температурний коефіцієнт питомого електричного опору (α_p) характеризує залежність питомого електричного опору матеріалу від температури.

Напруженість пробою (електрична міцність) діелектрика ($E_{\text{пр}}$) характеризує його здатність витримувати електричну напругу і визначається як відношення напруги пробою ($U_{\text{пр}}$) до товщини діелектрика (h): $E_{\text{пр}}=U_{\text{пр}}/h$.

Механічні властивості діелектриків

Границя міцності (σ_b) характеризує статичну міцність матеріалу. Визначається при різних видах деформування зразків (розтяг, стиснення, згинання і скручування).

Відносне видовження (δ) і звуження (ψ) – відносні величини, що характеризують пластичні властивості матеріалу.

Пластична (холодна) текучість – здатність матеріалу пластично деформуватись при тривалій дії статичних навантажень.

В'язкість руйнування (KCV) характеризує динамічну міцність матеріалу, тобто здатність протистояти силі, прикладеній за короткий час (удар).

Твердість (HB) – здатність матеріалу протистояти механічному проникненню в його поверхню іншого, більш твердого тіла (індентора).

Кінематична в'язкість характеризує опір переміщенню одних шарів рідини (газу) щодо інших.

Теплові характеристики діелектриків

Теплоємність (C) – характеристика матеріалу, яка визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення його температури на один градус.

Питома теплоємність (c_m) визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення температури одного кілограму матеріалу на один градус.

Теплопровідність – властивість матеріалу проводити тепло. Характеризується коефіцієнтом теплопровідності (λ).

Теплове розширення матеріалів – це їх здатність збільшувати свій об'єм при нагріванні. Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення (α).

Температура плавлення ($t_{пл}$) – це температура, при якій тверде тіло переходить у рідкий стан.

Температура розм'якшення (t_p) – це температура, при якій агрегатний стан твердої речовини починає змінюватись. Температура розм'якшення визначається методами «Кільце і шар» або «Кільце і стрижень».

Теплостійкість – це здатність тіла з даного матеріалу зберігати форму і розміри при підвищенні температури. Оцінюється за методами Мартенса і Віка і вимірюється у град.

Нагрівостійкість – це здатність діелектриків і виробів з них витримувати тривалий час, що вимірюється у год., вплив високої температури без погіршення їх властивостей.

Холодностійкість – здатність діелектрика працювати без погіршення експлуатаційних властивостей при низьких температурах. Вимірюється у град.

Стійкість до термоударів визначається перепадом температури нагріву і охолодження зразків (зразки охолоджують у воді нормальної температури), при якому на поверхні зразків з'являються помітні тріщини. Вимірюється у град.

Теплове старіння ізоляції – погіршення якості ізоляції при тривалому впливові підвищеної температури через інтенсифікацію хімічних процесів.

Температура спалаху ($t_{сп}$) – це температура рідини, при нагріванні до якої суміш її випарів з повітрям спалахує при піднесенні відкритого полум'я.

Температура запалення – це температура, при якій загоряється випробувана рідина (більш висока, ніж температура спалаху). Вимірюється у град.

Температурний індекс (TI) – це температура, при якій термін придатності матеріалу складає не менше 20 тис. годин.

Таблиця 1. Класи нагрівостійкості діелектриків

Класи нагрівостійкості	Максимальна допустима температура, °С	T_I , °С	Діелектрики, що відповідають даному класу нагрівостійкості
У	90	90	Волокнисті діелектрики с целюлози, бавовни, шовку
А	105	105	Просочені рідкими діелектриками волокнисті матеріали с целюлози, бавовни, натурального, синтетичного чи штучного шовку
Е	120	120	Синтетичні органічні матеріали (волокна, смоли, компаунди, плівки)
В	130	130	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з органічними зв'язуючими
F	155	155	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з синтетичними зв'язуючими
Н	180	180	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з кремнійорганічними зв'язуючими
С	>180	180	Слюда, керамічні матеріали, скло, фторопласт

Таблиця 2. Фізико-хімічні і електричні характеристики газів

Газ	Хімічна формула	λ , Вт/(м·К)	c_m , КДж/(кг·К)	Густина, кг/м ³	ϵ	$E_{пр}$, МВ/м	Застосування
Повітря	-	0,0257	1,01	1,29	1,00059	3	А
Водень	H ₂	0,175	14,5	0,09	1,00027	1,8	Б
Азот	N ₂	0,0269	1,06	1,25	1,00058	3	В
Елегаз	SF ₆	0,0146	0,652	6,39	1,00191	7,8	Г
Аргон	Ar	0,0163	0,52	1,78	1,00056	-	Д
Неон	Ne	0,0455	1,03	0,90	-	-	Д
Криптон	Kr	0,0087	0,25	3,47	-	-	Д
Ксенон	Xe	0,005	0,16	5,58	-	-	Д
Гелій	He	0,1423	5,27	0,18	1,00007	-	Є
Фреон	CCl ₂ F ₂	0,0105	0,993	1,49	1,0006	7,4	Е

Примітка: А – лінії електропередач, відкриті провідники; Б – охолодження турбогенераторів; В – конденсатори, кабелі; Г – вимикачі високої напруги, кабелі, конденсатори; Д – газотрони, тиратрони, розрядники, газорозрядні лампи; Є – дугогасіння, криотехніка; Е – холодильна техніка.

Таблиця 3. Електричні характеристики рідин при температурі 20°С

Рідина	Тип структури	ρ_v , Ом·м	ϵ
Бензол	неполярна	$10^{11} \dots 10^{12}$	2,2
Трансформаторне масло	неполярна	$10^{10} \dots 10^{13}$	2,3
Бензин	неполярна	$10^{10} \dots 10^{13}$	2,0
Совол	полярна	$10^8 \dots 10^{10}$	4,5
Касторове масло	полярна	$10^8 \dots 10^{10}$	4,6
Ацетон	сильнополярна	$10^4 \dots 10^5$	22,0
Етиловий спирт	сильнополярна	$10^4 \dots 10^5$	33,0
Дистильована вода	сильнополярна	$10^3 \dots 10^4$	81,0

Таблиця 4. Фізичні і електричні характеристики рідких діелектриків

Марка	Кінематична в'язкість, м ² /с	t _{сп} , °С	E _{пр} , МВ/м (при частоті струму 50 Гц)	tgδ	Застосування
Трансформаторні масла					
ТК	9,6·10 ⁶	135	25...50	0,025	Заливання трансформаторів, високовольтних вимикачів
Т-750	8·10 ⁶	135	25...50	0,005	
Т-1500	8·10 ⁶	135	25...50	0,005	
ПТ	9·10 ⁶	135	25...50	0,005	
Конденсаторні масла					
МСН	40·10 ⁶	136	-	-	Просочування конденсаторного паперу
СН	30·10 ⁶	160	-	-	
Кабельні масла					
МН-4	37·10 ⁶	135	180	-	Просочування паперової ізоляції кабелів, заповнення кабелів
С-220	80·10 ⁷	180	200	-	
КМ-25	17·10 ⁸	220	160	-	
Синтетичні масла на кремнійорганічній основі					
ПМС-10	10·10 ⁶	172	-	-	Теплоносії, амортизаторні і гідравлічні пристрої.
ПМС-20	20·10 ⁶	200	-	-	
132-12Д	110·10 ⁶	150	-	-	Просочування і заливання трансформаторів.
133-79	25·10 ⁶	200	-	-	
161-45	720·10 ⁶	340	-	-	
Синтетичні масла на основі хлорованих вуглеводнів					
ТХД	126·10 ⁶	-	20	-	Просочування конденсаторів.
Совтол-10	650·10 ⁶	-	20	-	Просочування і заливання трансформаторів.
Гексол	4·10 ⁶	-	24	-	

Смоли

Смоли – це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних, різного ступеню полімеризації. При низьких температурах смоли є аморфними, склоподібними і крихкими речовинами. При нагріванні смоли розм'якшуються, стають пластичними, а потім – рідкими. Розрізняють смоли природного походження і синтетичні.

Таблиця 5. Фізичні і електричні характеристики природних смол

Назва	Густина, кг/м ³	t _p , °С	ρ _v , Ом·м	Розчинник	Застосування
Каніфоль	1080	54...68	10 ¹⁷ ...10 ¹⁸	Спирт, бензин, скипидар, ацетон	Складова лаків, компаундів і флюсів
Копал	1060	75...170	10 ¹⁷ ...10 ¹⁸	Спирт, ефір	Складова лаків
Шелак	1020	50...80	10 ¹⁷ ...10 ¹⁸	Спирт, ацетон	Клеючі лаки
Бурштин	1070	175...200	<10 ²¹	Важкорозчинний	Виготовлення ізоляторів

Таблиця 6. Фізичні і електричні характеристики синтетичних смол

Назва	Густина, кг/м ³	$t_{сп}$, °C	ρ_v , Ом·м	Розчинник	Застосування
Гліфталева 1350	1325	-	$10^{11} \dots 10^{12}$	Суміш етилового спирту і бензола	Виготовлення міканітів
Крезольно-формальдегідна	1275	-	$10^9 \dots 10^{10}$	Етиловий спирт	Лакування ізоляційних стрічок
Кремній-органічна	1675	-	$10^{12} \dots 10^{14}$	Суміш бензола, толуола і ацетона	Виготовлення міканітів
Поліамідна	1140	-	$10^{11} \dots 10^{12}$	Феноли, оцтова кислота	Ізоляційні плівки і нитки
Поліефірна	-	-	-	Ацетон	Слюдяна ізоляція
Фенол-формальдегідна	1275	-	$10^{10} \dots 10^{12}$	Етиловий спирт, ацетон, ефіри	Гаряче пресування
Епоксидно-діанові:					
ЕД-22	-	150	-	Важкорозчинна	
ЕД-20	-	150	-	Важкорозчинна	Заливальні
ЕД-16	-	-	-	Важкорозчинна	компаннди, клеї,
ЕД-14	-	-	-	Важкорозчинна	зв'язуюче для
ЕД-10	-	60	-	Важкорозчинна	склопластиків
ЕД-8	-	65	-	Важкорозчинна	

Синтетичні полімери

Синтетичні полімери за своєю хімічною природою є високомолекулярними сполуками, тобто речовинами, молекули яких утворюються в результаті полімеризації і представляють собою циклічну сукупність великої кількості мономерів, що мають однакову будову груп атомів. Полімеризація – це хімічна реакція, в результаті якої з мономерів утворюється полімер. Розрізняють термопластичні і терморективні полімери. Термопластичні полімери відновлюють свої властивості після нагрівання і подальшого охолодження; терморективні полімери такої властивості не мають.

Таблиця 7. Електричні характеристики полімерів

Назва	ρ_v , Ом·м	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{пр}$, КВ/мм	Застосування
1	2	3	4	5	6
Полістирол	$10^{11} \dots 10^{12}$	2,4...2,7	$(2 \dots 4) \cdot 10^{-4}$	25...30	Плівки, ізолятори
Поліетилен низької густини	$10^{13} \dots 10^{15}$	2,3	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	40...42	Гнучка ізоляція проводів і кабелів
Поліетилен високої густини	$10^{13} \dots 10^{16}$	2,4	$5 \cdot 10^{-4}$	40...42	Каркаси, катушки, плівки
Поліпропілен	$10^{13} \dots 10^{15}$	2,1	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	30...35	Каркаси, катушки, плівки, плати

1	2	3	4	5	6
Поліформальдегід	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,7	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	24	Каркаси, катушки, плівки, плати
Поліуретан	$10^{12} \dots 10^{13}$	4,6	$1,2 \cdot 10^{-2}$	20...25	Гнучка ізоляція проводів і кабелів
Поликапролактама (капрон)	$10^{11} \dots 10^{12}$	4,0	$(1,5 \dots 4) \cdot 10^{-2}$	16...20	Ізоляція на низькі напруги
Поліметилметакрилат (органічне скло)	$10^{10} \dots 10^{12}$	3,6	$6 \cdot 10^{-2}$	15...18	Конструкційні елементи і ізолятори
Полівінілхлорид	$10^{10} \dots 10^{12}$	4,7	$(3 \dots 8) \cdot 10^{-2}$	15...20	Гнучка ізоляція проводів, шланги, стрічки
Вініпласт	$10^{10} \dots 10^{12}$	3,5...4,0	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-2}$	20	Ударо- і хімічно стійкі ізолятори
Поліетилентереталат (лавсан)	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,5	$(2 \dots 6) \cdot 10^{-3}$	30	Плівки і литі конструкційні елементи
Фторопласт-3	$10^{14} \dots 10^{15}$	2,5...3,0	$(1 \dots 1,5) \cdot 10^{-2}$	15...20	Плівки і пресовані вироби
Фторопласт-4	$10^{16} \dots 10^{18}$	2,0	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	27...40	Ізоляція в електроприладах
Ескапон	$10^{13} \dots 10^{14}$	2,8...3,0	$(5 \dots 8) \cdot 10^{-4}$	30...35	
Етилен	$10^{12} \dots 10^{14}$	3,0...3,5	$(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-2}$	15...20	

Примітка: характеристики отримані при частоті електричного поля 50 Гц

Таблиця 8. Механічні і фізичні характеристики полімерів

Назва	Густина, кг/м ³	σ_s , МПа	KCV, КДж/м ²	Теплостійкість за Мартенсом, °C	Холодостійкість, °C
Полістирол	1050	35...50	6...20	80	-60
Поліетилен низької густини	920	10...14	не руйнується	60	-70
Поліетилен високої густини	960	22...24	не руйнується	65	-60
Поліпропілен	910	30...35	70...80	160	-20
Поліформальдегід	1100	70	90...100	100	-45
Поліуретан	1210	50...60	50...60	60	-35
Поликапролактама (капрон)	1140	50...80	150...170	55	-25
Поліметилметакрилат (органічне скло)	1190	60...70	10...18	70	-60
Полівінілхлорид	1340	18...25	не руйнується	70	-50
Вініпласт	1400	40...50	90...120	70	-15
Поліетилентереталат (лавсан)	1340	20...30	15...30	-	-55
Фторопласт-3	2140	30...40	16...20	75	-185
Фторопласт-4	2200	35...40	120...150	250	-195
Ескапон	990	45...60	10...20	150	-60
Ебоніт	1200	30...50	4...15	60	-50

Шаруваті пластики

Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт, склотекстоліт та ін.) – це композитні матеріали, у яких наповнювачем є папір або тканина, а зв'язуючим – терморезистивна смола (фенолформальдегідна, крезолформальдегідна, епоксидна, кремнійорганічна, тощо). Гетинакс виробляють за допомогою гарячого пресування міцного і нагрівостійкого паперу, просоченого смолою. Текстоліт виготовляється з бавовняної тканини; має підвищену ударну в'язкість, стійкість до стирання і розколювання, однак значно дорожчий гетинаксу. Склотекстоліт виготовляється на основі склотканини, має порівняно високу нагрівостійкість, вологостійкість, механічну міцність і електроізоляційні властивості.

Фольговані шаруваті пластики використовуються як основа для виготовлення друкованих плат. Виготовляються шляхом наклеювання на одну чи обидві поверхні пластика тонкої мідної фольги товщиною 0,035 чи 0,050 мм.

Таблиця 9. Властивості шаруватих пластиків

Тип	Теплостійкість за Мартенсом, °С	ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	tg δ
Гетинакс				
I	150	10^8	20	-
II	150	10^8	20	-
III	150	-	-	-
VI	-	10^8	26	0,06
VII	-	10^9	33	0,045
VIII	-	10^{10}	30	0,035
Текстоліт				
A	135	10^8	8	-
B	135	10^8	6	-
G	135	10^8	8	-
BЧ	-	10^8	8	0,07
ЛТ	-	10^{11}	28	-
Склотекстоліт				
СТ	185	$5 \cdot 10^8$	9	-
СТ-Б	185	$5 \cdot 10^8$	9	-
СТ-І	185	$5 \cdot 10^8$	9	-
СТ-ІІ	-	10^{10}	13	-
СТЕФ	185	10^{11}	20	0,03
СТК	250	10^{10}	12	-
СТВК	250	10^{10}	12	0,07

Електроізоляційні лаки

Лаки є електроізоляційними матеріалами, що твердіють. Вони являють собою колоїдні розчини смол, бітумів, олій, що висихають, і тому подібних речовин, що утворюють так звану лакову основу, у летючих розчинниках. При сушінні лаку розчинник випаровується, а лакова основа переходить у твердий стан, утворюючи лакову плівку. Електроізоляційні лаки розділяють за застосуванням на просочувальні, покривні і клеючі лаки.

Таблиця 10. Властивості масляно-бітумних лаків

Марка	Час висихання (при t°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	E _{пр} при 20°C, МВ/м	Тип
БТ-95	16 (20°C)	15	70	Клеючий
БТ-99	3 (20°C)	1	56	Покривний
БТ-963	-	48	50	Просочувальний
БТ-980	10 (110°C)	-	60	Просочувальний
БТ-988	3 (110°C)	-	55	Просочувальний

Таблиця 11. Властивості масляно-алкідних (глифталевих) лаків

Марка	Час висихання (при t°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	ρ _v , Ом·м	E _{пр} при температурі 20°C, МВ/м	Тип
ГФ-95	2 (105°C)	48	10 ¹²	70	Просочувальний
ГФ-957	3 (20°C)	-	-	30	Клеючий
ГФ-937	3 (105°C)	48	-	70	Клеючий
ГФ-956	2 (105°C)	20	-	60	Клеючий
ГФ-985	0,3 (210°C)	-	-	40	Просочувальний

Таблиця 12. Властивості поліефірних лаків

Марка	Час висихання (при t°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	ρ _v , Ом·м	E _{пр} при температурі 20°C, МВ/м	Тип
ПЕ-969	2 (105°C)	30	-	60	Просочування
ПЕ-933	2 (150°C)	-	10 ¹²	80	обмоток
ПЕ-935	2 (150°C)	-	10 ¹²	70	електричних
ПЕ-936	1 (160°C)	-	10 ¹¹	70	машин (F)

Таблиця 13. Властивості поліефірно-епоксидних лаків

Марка	Час висихання (при 20°C), год.	ρ _v , Ом·м	E _{пр} при температурі 20°C, МВ/м	Тип
ЕП-934	150	10 ¹³	70	Просочувальні і покривні, клас нагрівостійкості F
ЕП-9125	150	-	60	
СЕНП-526	150	-	-	
ЕПМ-63	150	-	-	
АС-9115	20	10 ¹²	20	
БІД-9127	-	10 ¹²	25	

Таблиця 14. Властивості кремній-органічних лаків

Марка	Час висихання (при 20°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	ρ_v (при 20°C), Ом·м	$E_{пр}$ при темпера- турі 20°C, МВ/м	Тип
КО-991	1	20	10^{12}	65	Клеючий
КО-915	1,5	75	-	70	Просочувальний
КО-917	1,5	180	-	60	Просочувальний
КО-921	3	75	10^{12}	75	Просочувальний, покривний
КО-946	1	300	$10^{13} \dots 10^{14}$	75	Покривний

Компаунди

Компаунди є механічною сумішшю різних речовин, наприклад смол, бітумів, восків, олій і ін. Особливістю компаундів є відсутністю у їхньому складі розчинника. Перед використанням для зменшення в'язкості компаунд нагрівають до температури розм'якшення. При нормальній температурі компаунд затвердіває.

Компаунди бувають просочувальними і заливними. Просочувальні компаунди призначені для просочування пористої і волокнистої ізоляції, а заливні – для заповнення порівняно великих порожнин, проміжків між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для одержання порівняно товстого захисного покриття на електротехнічних виробках.

Таблиця 15. Електричні характеристики компаундів

Марка	ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$ при температурі 20°C, МВ/м	ϵ	$\text{tg}\delta$	Застосування
К-30	10^9	27	6	0,03	Заливання деталей
К-31	10^{12}	27	5	0,075	Заливання деталей
КТ-102	10^{10}	20	-	0,03	Демпфіруюче покриття
КТ-115	10^{12}	20	-	-	Просочування, заливання і склеювання
К-153	10^{11}	15	-	0,05	Просочування, заливання і склеювання
К-168	10^{10}	-	-	0,1	Просочування, склею- вання і герметизація
ЕПСК	10^{12}	20	-	0,01	Просочування
110	10^{13}	25	-	0,01	Просочування
К-18	10^{11}	15	3	0,02	Герметизація
К-43	-	50	-	0,05	Просочування

Волокнисті діелектрики

Волокнисті діелектрики – це матеріали, що утворюються з часток подовженої форми (волокон). До них відносять електротехнічний папір і картон, фібру, текстиль (нитки, стрічки, тканини). Розрізняють волокнисті матеріали рослинного походження (дерево, бавовняне волокно, папір і ін.), що складаються в основному з целюлози), тваринного походження (шовк), штучні волокна, одержувані шляхом хімічної переробки природного волокнистої сировини, і синтетичні волокна, що виготовляються з синтетичних полімерів. Лакотканини утворюють просочуванням тканини електроізоляційним лаком. Склотканини виготовляють з скляного волокна.

Таблиця 16. Електричні характеристики конденсаторного паперу

Марка	Густина, т/м ³	Кількість токопровідних включень на 1 м ² , не більше	$E_{пр}$, МВ/м	tgδ, (при температурі 100°С)
КОН-1	0,97...1,03	120	36	0,26
		7	31	
КОН-2	1,15...1,24	1800	60	0,32
		15	23	
СКОН-1	0,97...1,03	60	38	0,20
		3	31	
СКОН-2	1,10...1,24	1000	68	0,24
		10	27	
СКОН-3	1,26...1,34	750	50	0,32
		20	28	
МКОН 08	0,75...0,85	40	32	0,16
		4	24	
МКОН-1	0,97...1,03	100	57	0,20
		3	21	
МКОН-2	1,15...1,24	300	50	0,28
		5	23	
МКОН-3	1,26...1,34	400	52	0,32
		50	35	

Таблиця 17. Властивості електроізоляційного картону

Марка	Густина, т/м ³	$E_{пр}$, МВ/м	σ_{\parallel} , МПа (у поздовжньому напрямі)	σ_{\perp} , МПа (у поперечному напрямі)
ЕВС	1,25	12	127	34
ЕВП	1,25	12	127	34
ЕВТ	1,15	13	118	31
ЕВ	1,15	11	98	25
ЕВА	1,2	11	118	34

Таблиця 18. Фізичні і механічні властивості твердих ізоляційних матеріалів

Назва	Густина, т/м ³	σ_6 , МПа	KCV , КДж/м ²	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	$c_m \cdot 10^2$, Дж/кг·К	λ , Вт/м·К
Електро- технічний фарфор	2,45...2,7	30...60	1,3...2,5	6...10	3...8	8...9	1...3
Мікалекс	2,6...3,0	30...70	2...5	-	8	-	-
Стеатит	2,8	45	2,2...2,5	6...8	5...9	8...9	1...3
Кордіерит	-	25	1,8	9	0,5...2	8...12	1,5...2,5
Цельзіан	-	25	2,0	-	3...5	8...10	1,5...2,5
Пористий алюмосілі- кат магнія	2,1...2,2	-	0,8...1,4	4	3...5	7,5...9	1...2
Корунд	3,5...3,9	-	3,8...4,0	20...30	4,5...7	8,5...10,5	10...30

Таблиця 19. Електричні характеристики лако- і склотканин

Марка	ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	Застосування
Лакотканини			
ЛХМ-105	-	38	Ізоляція на повітрі
ЛХМС-105	-	42	Ізоляція на повітрі
ЛХММ-105	-	43	Ізоляція у трансформаторному маслі
ЛХБ-105	-	42	Ізоляція у гарячому трансформаторному маслі
ЛШМ-105	-	56	Ізоляція на повітрі, стійка до короткочасного підвищення температури
ЛШМС-105	-	10	Ізоляція на повітрі, стійка до короткочасного підвищення температури
ЛКМ-105	-	50	Ізоляція на повітрі, еластична
ЛКМС-105	-	60	Ізоляція на повітрі і у трансформаторному маслі
Склотканини			
ЛСМ-105/120	10^{11}	-	Ізоляція на повітрі
ЛСММ-105/120	10^{11}	-	Ізоляція у гарячому трансформаторному маслі
ЛСЛ-105/120	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі
ЛСЕ-105/130	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі
ЛСБ-120/130	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості
ДСП-130/150	10^{10}	-	Ізоляція на повітрі
ЛСК-155/180	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості (тропічні умови)
ЛСКР-180	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості і температурі
ЛСКЛ-155	10^{12}	-	Ізоляція на повітрі
ЛСУ-155	-	54	Ізоляція електричних машин

Таблиця 20. Електричні властивості твердих ізоляційних матеріалів

Назва	Стійкість до термоударів, °С	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом	$E_{пр}$, МВ/м	ϵ	$tg\delta$
Скло	-	-	-	100...300	-	0,002...0,125
Кераміка	-	-	-	10...30	-	-
Пориста кераміка	-	-	-	3...5	-	-
Слюда	-	-	-	100...200	-	-
Мусковіт	-	$10^{12}...10^{16}$	-	-	6...8	0,015
Флогопіт	-	$10^{11}...10^{12}$	-	-	5...7	0,05
Електро-технічний фарфор	150...160	$10^{11}...10^{13}$	10^{10}	20...30	5...7,5	0,025
Мікалекс	-	$10^{10}...10^{12}$	-	10...20	6...8,5	0,003...0,01
Стеатит	80...100	10^{13}	10^{10}	20	5...7	0,005...0,025
Кордіерит	250	10^8	10^{10}	10	4...6	0,025
Цельзіан	200	10^{14}	10^{12}	20	-	0,01
Пористий алюмосілікат магнія	150...350	$10^9...10^{10}$	-	-	-	-
Корунд	140...180	10^{14}	-	10...17	7...10	$(2...10)\cdot 10^{-4}$

Примітка: характеристики отримані при частоті електричного поля 50 Гц

II. ПРОВІДНИКИ

Провідники – це матеріали, що проводять електричний струм і характеризуються порівняно низьким електричним опором. Питомий електричний опір провідників знаходиться в межах $\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Провідниками є всі метали і сплави, а також рідини і гази при певних умовах. За здатністю проводити електричний струм металеві провідники умовно розділяють на матеріали високої і низької провідності (або, відповідно, на матеріали з низьким і високим опором).

За фізичним механізмом провідності матеріали розділяють на провідники першого і другого роду. Провідниками першого роду або провідниками з електронною провідністю називають матеріали, в яких механізм протікання струму зумовлений наявністю вільних електронів (головним чином це метали). Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини (в основному водні) кислот, лугів і солей, виникнення струму в яких пов'язано з рухом іонів.

Основними чинниками, від яких суттєво залежить питомий електричний опір металів, є температура, деформація і наявність домішок.

Електричні характеристики провідників

Питомий електричний опір (ρ) характеризує електричний опір провідника при протіканні через нього постійного струму.

Питома електрична провідність (γ) – величина, обернена до питомого електричного опору, $\gamma=1/\rho$.

Температурний коефіцієнт питомого електричного опору (α_ρ) характеризує залежність питомого електричного опору матеріалу від температури.

Фізичні характеристики провідників

Теплоємність (C) – це характеристика матеріалу, яка визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення його температури на один градус. Вимірюється у Дж/К.

Питома теплоємність (c_m) визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення температури одного кілограму матеріалу на один градус.

Теплопровідність – це властивість матеріалу проводити тепло. Характеризується коефіцієнтом теплопровідності (λ).

Теплове розширення матеріалів – це їх здатність збільшувати свій об'єм при нагріванні. Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення (α).

Температура плавлення ($t_{пл}$) – це температура, при якій тверде тіло переходить у рідкий стан.

Температура надпровідного переходу ($T_{\text{нп}}$) – це температура, при якій матеріал стає надпровідником.

Жаростійкість – здатність металу тривалий час протистояти окисленню при високих температурах.

Заборонена зона – діапазон значень енергії, які електрон не може мати у ідеальному кристалі. Вимірюється у еВ.

Ширина забороненої зони (W) визначається різницею енергій між дном зони провідності й верхом валентної зони, в якій відсутні дозволені енергетичні рівні для електрона.

Робота виходу електронів – найменша кількість енергії, яку необхідно надати електрону для того, щоб вивести його з твердого тіла у вакуум. Робота виходу є характеристикою речовини. Вимірюється у еВ.

Електродний потенціал – різниця електричних потенціалів між електродом та електролітом. Вимірюється у В.

Контактна різниця потенціалів – це різниця потенціалів, що виникає при контактуванні двох різних провідникових матеріалів, які перебувають при однаковій температурі.

Термічна електрорушійна сила (термо-ЕРС) – (ефект Зеебека) – явище виникнення ЕРС у замкнутому електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти між якими знаходяться при різних температурах.

Магнітні характеристики провідників

Критична магнітна індукція ($B_{\text{кр}}$) – значення індукції магнітного поля, при якому матеріал втрачає надпровідні властивості.

Таблиця 21. Фізичні і механічні властивості металів

Метал	σ_s , МПа	δ , %	$t_{\text{пл}}$, °С	c_m , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	Густина, т/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8
Срібло	100...200	48	961	234	415	19,5	10,5
Мідь	220...240	60	1083	385	390	16,8	8,94
Золото	100...140	30...50	1063	126	293	14,2	19,3
Алюміній	50...80	30...45	657	922	209	24	2,7
Берилій	200...550	0,2...2	1284	200	167	13	1,83
Магній	120...200	8...12	651	1040	167	26	1,74
Натрій	-	-	97,7	1260	125	70	0,97
Вольфрам	110...415	-	3380	218	168	4,4	19,8
Молибден	310...570	2...55	2620	264	151	5,1	10,2
Цинк	-	-	420	390	111	31	7,14
Кобальт	260...500	5...50	1490	435	79	12	8,71
Нікель	400...600	35...50	1455	444	95	13	8,9
Кадмій	100	44	321	230	93	30	8,65
Індій	2,3	-	156	243	25	25	7,28
Залізо	330	33	1535	452	73	11	7,87
Платина	150	30...35	1773	134	71	9	21,4

1	2	3	4	5	6	7	8
Паладій	185...200	25...40	1554	243	72	12	12,2
Олово	10...40	40	232	226	65	23	7,31
Хром	-	-	1857	-	94	-	7,19
Тантал	190...230	36...38	2970	142	54	6,5	16,6
Ніобій	350	50	2415	272	50	7,2	8,6
Торій	120	36	1850	113	-	11	11,5
Свинець	12...13	55	327	130	35	29	11,4
Реній	110...225	2...25	3180	138	71	4,7	20,5
Цирконій	250...270	20...25	1860	276	17	5,4	6,4
Титан	250...270	55...70	1680	577	15	8	4,5
Галій	20...40	-	29,7	385	-	183	5,91
Ртуть	-	-	-38,9	138	10	61	13,55

Таблиця 22. Електричні властивості металів

Метал	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-3}$, град $^{-1}$	W , еВ	Електродний потенціал, В
Срібло	0,016	4,0	4,4	0,799
Мідь	0,017	4,3	4,3	0,337...0,521
Золото	0,024	3,8	4,8	1,5...1,7
Алюміній	0,028	4,2	4,3	-1,66
Берилій	0,04	6,0	3,9	-1,69
Магній	0,045	4,2	3,6	-2,37
Натрій	0,046	5,0	2,3	-2,71
Вольфрам	0,055	4,6	4,5	0,11...0,68
Молібден	0,057	4,6	4,2	-0,2
Цинк	0,059	4,0	4,4	-0,763
Кобальт	0,062	6,0	-	0
Нікель (Ni)	0,073	6,5	5,0	-0,25
Кадмій	0,076	4,2	4,0	-0,403
Індій	0,09	4,7	-	-0,34
Залізо	0,098	6,0	4,5	-0,04...-0,44
Платина	0,105	3,9	5,8	1,20
Паладій	0,110	3,8	4,8	0
Олово	0,120	4,4	4,4	-0,136
Хром	0,128	-	-	-0,74
Тантал	0,135	3,8	4,1	0
Ніобій	0,152	3,95	4,0	0
Торій	0,186	2,3	3,3	-
Свинець	0,207	3,7	-	-0,126...0,80
Реній	0,210	3,2	4,8	-0,30
Цирконій	0,410	4,5	3,8	0
Титан	0,420	4,4	4,1	-1,63
Галій	0,56	-	-	0
Ртуть	0,958	0,9	4,5	0,854

Таблиця 23. Властивості мідного і алюмінієвого проводу

Метал	σ_s , МПа	δ , %	Густина, т/м ³	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-3}$, град ⁻¹
МТ	360...390	0,5...2,5	8,89	0,0179...0,0182	3,93
ММ	260...280	18...35	8,89	0,01754	3,93
АТ	160...170	1,5...2,0	2,703	0,0295	4,03
АМ	80	10...18	2,703	0,0290	4,03
Альдрей*	350	6,5	2,7	0,0317	3,6

* Склад: (0,3...0,5)%Mg, (0,4...0,7)%Si, (0,2...0,3)%Fe, інше – Al

Таблиця 24. Неізолювані проводи для повітряних ліній електропередач

Діаметр проводу, мм	Номинальна площа поперечного перерізу, мм ²	Електричний опір 1 км проводу (постійний струм, 20°C), Ом	Розривне зусилля, Н	Маса 1 км проводу без змащення, кг	Кількість проводів, шт. / діаметр проводу, мм	
					алюмінієва частина	сталева частина
Провід марки А (алюмінієві жили)						
3,57	10	2,8631	1950	27,4	7/1,3	-
5,1	16	1,8007	3021	43,0	7/1,7	-
7,5	35	0,8347	5913	94,0	7/2,5	-
10,7	70	0,4131	11288	189,0	7/3,55	-
16,37	160	0,1798	26400	439,8	(19/3,27)*2	-
25,6	400	0,0740	63420	1072,0	(37/3,66)*3	-
35,60	750	0,0386	119584	2062,0	(61/3,95)*4	-
Провід марки АС (сталевобалюмінієві жили)						
5,6	16/2,7	1,7818	6220	64,9	6/1,85	1/1,9
8,4	35/6,2	0,7774	13524	148,0	6/2,8	1/2,8
9,6	50/8,0	0,5951	17112	195,0	6/3,2	1/3,2
10,97	63/10,5	0,4553	21630	254,0	6/3,66	1/3,66
15,4	70/7,2	0,4194	96826	755,0	18/2,2	19/2,2
21,6	240/32	0,1182	75050	921,0	24/3,6	7/2,4
24,0	300/39	0,0958	90574	1132,0	24/4,0	7/2,65
27,5	400/51	0,0733	120481	1490,0	54/3,05	7/3,05

Надпровідні матеріали

Надпровідність – явище різкого зменшення практично до нуля питомого електричного опору матеріалів при температурах близьких до абсолютного нуля. Температура, при якій матеріал переходить в надпровідний стан називається температурою надпровідного переходу ($T_{нп}$). Матеріал, що переходить в надпровідний стан стає надпровідником. Срібло, мідь, золото, платина і деякі інші метали у надпровідний стан не переходять. При перевищенні деяких значень магнітної індукції ($B_{кр}$), яка характеризує магнітне поле на поверхні надпровідника, надпровідність зникає.

Таблиця 25. Температура переходу металів і сплавів у надпровідний стан

Метали і сплави	$T_{\text{нп}},$ К	$B_{\text{кр}},$ Тл	Метали і сплави	$T_{\text{нп}},$ К	$B_{\text{кр}},$ Тл
Чисті метали			Сплави		
Іридій	0,14	0,002	44%Nb+56%Ti	8,7	12,0
Титан	0,4	-	50%Nb+50%Zr	9,5	11,0
Молібден	1,0	-	Хімічні сполуки		
Алюміній	1,2	0,010	V_3Ga	14,0	50,0
Індій	3,4	0,030	Nb_3Sn	18,2	22,0
Олово	3,7	0,031	Nb_3Ge	39	-
Ртуть	4,2	0,046	MgB_2	77	-
Тантал	4,5	0,083	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	135	-
Ванадій	5,3	0,130			
Свинець	7,2	0,080			
Ніобій	9,5	0,195			

Сплави високого опору

Сплави високого опору за призначенням поділяють на радіотехнічні і електронагрівальні. Радіотехнічні сплави використовуються для виготовлення резисторів, реостатів, тензорезисторів тощо. Для таких сплавів важлива слабка залежність питомого опору від температури і мала термо-з.р.с. відносно міді. Електронагрівальні сплави використовуються для виготовлення нагрівальних елементів електронагрівальних приладів. Вони повинні бути довговічними при температурах до 1200°C, технологічними і відносно недорогими. Найбільш поширеними радіотехнічними сплавами є високоомні сплави на мідній основі (манганін і константан), а також на хромо-нікелевій і залізо-хромовій основі з додаванням алюмінію (ніхром, фероніхром, фехраль, хромаль).

Таблиця 26. Склад і механічні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів

Марка	Склад, %*				$\sigma_s,$ МПа			$\delta,$ %
	Cr	Al	Ni	Mn	20°C	800°C	1000°C	
Фехралі								
X13Ю4	12...15	3,5...5,5	0,6	0,7	700	-	-	10...20
X15Ю5	13...15	3,5...5,5	0,6	0,7	-	-	-	10...20
1X17Ю5	16...19	4,0...6,0	0,6	0,7	700	-	-	10...20
0X17Ю5	16...19	4,0...6,0	0,6	0,7	700	-	-	10...20
Хромалі								
X23Ю5	22...25	4,5...5,5	0,6	0,7	-	-	-	-
0X23Ю5Т	22...25	4,5...5,5	0,6	0,7	660	120	17	14
1X25Ю5	23...27	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	14
0X25Ю5	23...27	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	15
0X27Ю5А	25...28	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	15
0X27Ю5Т	25...28	4,5...6,5	0,6	0,7	675	89	13	12

* Інше – Fe

Таблиця 27. Фізичні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів

Марка	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-5}$, град ⁻¹	Оптимальна робоча температура, °С	Максималь- на робоча температура, °С	$R(1000^\circ\text{C}) /$ $R(20^\circ\text{C})$
Фехралі					
X13Ю4	1,26	15	750	-	-
X15Ю5	1,18...1,34	-	900	1000	1,112
1X17Ю5	1,30	6	850	-	-
0X17Ю5	1,30	6	950	-	-
Хромалі					
X23Ю5	1,40	6,5	1100	1200	-
0X23Ю5Т	1,29...1,45	-	1150	1200	1,033
1X25Ю5	1,40	5	1150	1200	-
0X27Ю5Т	1,37...1,47	5	1250	1300	0,998

Таблиця 28. Склад і механічні властивості хромо-нікелевих сплавів

Марка	Склад, %*			σ_b , МПа			δ , %
	Cr	Ni	Mn	20°С	800°С	1000°С	
Фероніхром							
X15Н60	15...18	55...61	1,5	660	170	60	22
X15Н60Н	15...18	55...61	1,5	660	170	60	22
Ніхром							
X20Н80	20...23	75...78	1,5	670	210	73	20
X20Н80Н	20...23	75...78	1,5	670	210	73	20

* Інше – Fe

Таблиця 29. Фізичні і електричні властивості хромо-нікелевих сплавів

Марка	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-5}$, град ⁻¹	Оптимальна робоча температура, °С	Максималь- на робоча температура, °С	$R(1000^\circ\text{C}) /$ $R(20^\circ\text{C})$
Фероніхром					
X15Н60	1,1...1,2	10...20	950	1000	1,139
X15Н60Н	1,1...1,2	10...20	1000	1100	1,138
Ніхром					
X20Н80	1,0...1,1	10...20	1050	1100	1,078
X20Н80Н	1,0...1,1	10...20	1150	1200	1,076

Таблиця 30. Склад і властивості радіотехнічних сплавів

Сплав	Склад, %			ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-5}$, град ⁻¹	Термо- е.р.с в парі з Cu, мкВ/град	σ_b , МПа	δ , %
	Cu	Mn	Ni					
Манганін	85	12	3	0,42...0,48	0,6...5	1...2	450...600	15...30
Константан	55	-	45	0,48...0,52	0,5...2,5	44...55	400...500	20...40

Біметали

Біметали є композицією двох металів чи сплавів. Розрізняють термічні і провідникові біметали. Термічні біметали складаються з двох (інколи – більше) шарів металів і сплавів з різними термічними коефіцієнтами лінійного розширення. Шар металу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення називають активним, а з меншим – пасивним. Основна експлуатаційна особливість термобіметалу – здатність деформуватися при нагріванні – зумовлює його використання в якості чутливого елемента термічних запобіжників.

Питомий згин термобіметалу характеризує його чутливість до зміни температури і визначається відносним згином вільного кінця пластинки термобіметалу довжиною 100 мм і товщиною 1 мм при нагріванні на 1°C. Вимірюється у град.

Коефіцієнт чутливості термобіметалу ($\Delta\alpha$) також характеризує його чутливість до зміни температури і визначається різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення активного і пасивного шарів термобіметалу. Вимірюється у град⁻¹.

Провідникові біметали – це поєднання двох металів чи сплавів, з яких один забезпечує високу провідність, а другий – механічну міцність. Прикладом такого провідника є сталеве осердя, вкрите шаром міді. З сталєво-мідного біметалу виготовляють шини розподільних пристроїв, елементи рубильників, тощо.

Таблиця 31. Склад і властивості термобіметалів

Марка	Сплави шарів		ρ , мкОм·м	Питомий згин, °C	$\Delta\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	Межа відхилення питомого згину, %
	активний	пасивний				
ТБ2013	75ГНД	36Н	1,08...1,18	0,20	30...36	±10
ТБ1613	75ГНД	45НХ	1,18...1,27	0,16	23...28	±12
ТБ1523	20НГ	36Н	0,77...0,82	0,15	21...28	±12
ТБ1423	24НХ	36Н	0,77...0,84	0,14	20...24	±12
ТБ1323	19НХ	36Н	0,76...0,83	0,13	18,5...22,5	±12
ТБ1353	Л62	36Н	0,14...0,20	0,13	19,5...25	±15
ТБ1254	Л90	36Н	0,09...0,14	0,12	19...24	±15
ТБ1243*	24НХ	36Н	0,38...0,43	0,12	18...22	±15
ТБ1253**	24НХ	36Н	0,15...0,18	0,12	18...22	±15
ТБ1132	24НХ	42Н	0,68...0,74	0,11	16...19	±12
ТБ1032	19НХ	42Н	0,67...0,73	0,105	16,5...18,5	±12
ТБ0921	28НХТЮ	45НТЮ	0,87...0,97	0,09	12...16	±15
ТБ0953	НПЗ	36Н	0,15...0,20	0,09	12...16	±15
ТБ0831	24НХ	50Н	0,55...0,60	0,075	10...13	±12

* Термобіметал має проміжний шар із сплаву НП2.

** Термобіметал має проміжний шар із сплаву М1.

Сплави для термопар

Явище термо-ЕРС використовується для вимірювання температури за допомогою термопар. Для виготовлення термопар застосовуються мідь, платина і спеціальні сплави. Найбільшу термо-ЕРС за інших рівних умов має термопара хромель-копель (0,6 мВ на 10°C). Національні стандарти в галузі електротехніки узгоджуються з міждержавними стандартами, які розробляються Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК).

Таблиця 32. Хімічний склад термоелектродів термопар

Тип термопар	Хімічний склад позитивного термоелектрода	Хімічний склад негативного термоелектрода
ТПП13 (R)	87%Pt, 13%Rh	Pt
ТПП10 (S)	90%Pt, 10%Rh	Pt
ТПР (B)	70%Pt, 30%Rh	94%Pt, 6%Rh
ТЖК (J)	Fe	55%Cu, 45%Ni
ТМК (T)	Cu	55%Cu, 45%Ni
ТМК (M)	Cu	56%Cu, 44%Ni
ТХА (K)	90,5%Ni, 9,5%Cr	94,5%Ni, 5,5%Al
ТХК (L)	90,5%Ni, 9,5%Cr	56%Cu, 44%Ni
ТХК (E)	90,5%Ni, 9,5%Cr	55%Cu, 45%Ni
ТВР (A)	95%W, 5%Re	80%W, 20%Re

Таблиця 33. Типи термопар і їх робочі характеристики

Термопара	Тип термопар за класифікацією МЕК	Тип термопар за державним стандартом	Робочий температурний діапазон, °C	Температура короткочасного використання, °C
Платинородій-платина	R	ТПП13	0...1300	-50...1600
Платинородій-платина	S	ТПП10	0...1300	-50...1600
Платинородій-платинородій	B	ТПР	300...1600	0...1820
Залізо-константан	J	ТЖК	-200...700	800
Мідь-константан	T	ТМК	-200...400	-250...400
Хромель-алюмель	K	ТХА	-200...1000	1300
Хромель-константан	E	ТХК	-200...700	900
Хромель-копель	L	ТХК	-200...600	-
Мідь-копель	M	ТМК	-200...100	-
Вольфрам-реній-1 -	A-1	ТВР	0...2200	0...2500
вольфрам-реній-2	A-2		0...1800	0...2500
	A-3		0...1800	0...2500

Припої

Припої – спеціальні сплави, що застосовуються для лудіння і паяння. Пайка здійснюється метою одержання електричного контакту з малим перехідним опором, а також з метою створення механічно міцного (за необхідності – герметичного) шва. Припої поділяють на дві групи – м'які і

тверді. До м'яких відносять припої з температурою плавлення до 400°C, до твердих – з температурою плавлення вище 500°C.

Таблиця 34. Олов'яно-свинцеві припої

Марка	Склад, %*		ρ , мкОм·м	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	$t_{пл}$, °C	σ_v , МПа	δ , %	НВ	Застосування
	Sn	Sb							
ПОС90	90	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	210	49	40	15	А
ПОС61	61	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	191	43	46	14	А
ПОС40	40	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	238	38	52	13	Б
ПОС30	30	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	266	30	45	13	Б
ПОС18	18	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	277	30	45	13	Б
ПОС10	10	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	299	32	44	13	В

* Інше – Pb.

Примітка: А – паяння посуду, медичинської апаратури; Б – паяння міді, латуні, срібла, заліза, оцинкованого заліза; В – лудіння і паяння міді, латуні, контактних поверхонь приладів, реле.

Таблиця 35. Срібні припої

Марка	Склад	ρ , мкОм·м	Густина, т/м ³	$t_{пл}$, °C	Застосування
М'які припої					
ПСр010-90	10%Ag, 90%Sn	0,129	7,6	280	Е
ПСр0Су8	8%Ag, 7,5%Sb, 94,5%Sn	0,197	7,4	250	А
ПСрМ05	5%Ag, 1%Sb, 2%Cu, 92%Sn	0,153	7,4	240	Д
ПСр3Кд	3%Ag, 1%Zn, 96%Cd	0,08	8,7	242	И
ПСр3	3%Ag, 97%Pb	0,204	11,4	315	И
ПСр2,5	2,5%Ag, 5,5%Sb, 92%Cd	0,214	11,0	300	А
ПСр2	2%Ag, 30%Sn, 5%Sb, 63%Cd	0,167	9,5	238	Е,И,З
ПСр2-58	2%Ag, 58%Sn, 0,5%Sb, 39,5%Cd	0,141	8,5	183	А,Ж
ПСр1,5	1,5%Ag, 15%Sn, 83,5%Cd	0,191	10,4	280	Е,Є
ПСр1	1%Ag, 35%Sn, 1%Sb, 63%Pb	0,26	9,4	235	Є
Тверді припої					
ПСр72	72%Ag, 28%Cu	0,021	10	779	А,Б,В
ПСр71	71%Ag, 1%Cd, 1%P, 27%Cu	0,043	9,8	795	А,Б
ПСр70	70%Ag, 26%Cu, 4%Zn	0,041	9,8	770	Г
ПСр65	65%Ag, 20%Cu, 15%Zn	0,086	9,45	722	З
ПСр40	40%Ag, 16%Cu, 17%Zn, 27%Cd	0,07	9,25	610	Г
ПСр50	50%Ag, 50%Cu	0,025	9,3	860	А,Г
ПСр50Кд	50%Ag, 34%Cd, 16%Cu	0,078	9,25	640	Д
ПСр45	45%Ag, 30%Cu, 25%Zn	0,1	9,1	730	А,З
ПСр25	25%Ag, 40%Cu, 35%Zn	0,077	8,7	775	А,В,З
ПСр25Ф	25%Ag, 40%Cu, 5%P, 30%Sn	0,186	8,3	725	А,В
ПСр15	15%Ag, 5%Fe, 80%Cu	0,207	8,5	810	А,З
ПСр12М	12%Ag, 52%Cu, 36%Zn	0,074	8,3	830	А
ПСр10	10%Ag, 53%Cu, 37%Zn	0,071	8,4	850	А

Примітка: А – паяння і лудіння міді, латуні, бронзи, нікеля; Б – паяння залізонікелевих сплавів шз сталлю; В – паяння сталі з міддю, нікелем, міднонікелевими сплавами; Г – паяння

Закінчення прим. до табл. 35

титану і титанових сплавів; Д – паяння міді і мідних сплавів з жароміцними і корозієстійкими сталями; Е – паяння і лудіння міді, міднонікелевих сплавів з керамікою; Є – паяння і лудіння срібних деталей; Ж – паяння і лудіння кольорових металів і сплавів; З – паяння і лудіння ювелірних виробів; И – паяння міді і нікеля зі склом, емаллю і керамікою.

Таблиця 36. Мідно-цинкові припої

Марка	Склад	ρ , мкОм·м	Щіль- ність, т/м ³	$t_{пл}$, °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	σ_b , МПа	δ , %	HV	Засто- суван- ня
ПМЦ-36	36%Cu–Zn	0,103	7,7	825	22	-	-	-	А
ПМЦ-48	48%Cu–Zn	0,045	8,2	865	21	205	3	130	Б
ПМЦ-54	54%Cu–Zn	0,040	8,3	880	21	345	20	128	В

Примітка: А – паяння латуні з вмістом міді до 68%; Б – паяння мідних сплавів з вмістом міді більше ніж 68%; В – паяння міді, томпака, бронзи і сталі.

Таблиця 37. Алюмінієві припої

Марка	Склад	$t_{пл}$, °С	Температура паяння, °С	Застосу- вання
В62	51%Al, 25%Zn, 20%Cu, 3,5%Si, 1,5%Mn	490...500	505...510	А
Германієвий-1	65%Al, 4,5%Si, 31%Ge	460...480	530...550	Б
Германієвий-1	67%Al, 5,5%Si, 28%Ge	440...460	-	Б
34А	66%Al, 28%Cu, 6%Si	525	530...550	В
П425А	20%Al, 15%Cu, 65% Zn	480	-	В
П550А	67%Al, 27%Cu, 6%Si	525	-	Г
П124	53%Al, 40%Cu, 7%Si	530	540...580	Г
П575А	80%Al, 20%Zn	575	-	Г
П590А	89%Al, 10%Cu	590	-	Г
Евтектичний силумін	88%Al, 12%Si	577	-	В,Г

Примітка: А – паяння скляних виробів з алюмінієвою підкладкою; Б – паяння металізованої кераміки, отримання паяних швів з високою вакуумною щільністю; В – паяння алюмінію і сплавів АМц і АМг; Г – паяння алюмінію і сплавів АМг і дуралюмінію.

Таблиця 38. Легкоплавкі припої

Припій	Склад	$t_{пл}$, °С	Застосу- вання
Сплав Вуда	12,5%Sn, 25%Pb, 50%Bі, 12,5%Cd	68,5	А
Сплав Ньютона	19%Sn, 31%Pb, 50%Bі	94	Б
Сплав Розе (ПОСВ-50)	25%Sn, 25%Pb, 50%Bі	95	В

Примітка: А – паяння при низьких температурах (токсичний); Б – паяння при невисоких температурах; В – паяння при невисоких температурах, плавкі електричні запобіжники;

Електротехнічне вугілля

Електротехнічне вугілля використовують для створення електричного контакту між рухомими частинами провідників, що досягається за рахунок відносно низького електричного опору і малого коефіцієнту тертя. З електротехнічного вугілля виготовляють щітки електричних машин, контакти для тролейбусів, трамваїв і електропоїздів, електроди для прожекторів, електроди для печей і електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів. Вугільні порошки використовують у мікрофонах для створення опору, що змінюється від звукового тиску. З вугілля виготовляють високоомні регульовані резистори, розрядники для телефонних мереж; вугільні вироби застосовують у електровакуумній техніці.

Таблиця 39. Властивості графіту і піролітичного вуглецю

Матеріал	ρ , мкОм·м	$\alpha \cdot 10^{-3}$, град ⁻¹	Густина, т/м ³	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹
Полікристалічний графіт	8	-1	2,26	7,5
Монокристалічний графіт:				
вздовж базових площин	0,4	-0,9	2...24	6,6
поперек базових площин	100	-40	2...24	2,6
Піролітичний вуглець	10...50	-0,2	2,1	6,5...7,0

Таблиця 40. Властивості вугільних електродів

Тип електродів	ρ , мкОм·м	Густина, т/м ³	σ_s , МПа (при розтягненні)	σ_s , МПа (при стисканні)
Вугільні	50	1,5	700...1100	2300...4100
Графітовані	15	2,0	600...700	200...500

Таблиця 41. Властивості вугільних щіток

Тип щіток	ρ , мкОм·м	Допустима щільність струму, МА/м ²	Допустима лінійна швидкість, м/с
Г	18...60	6...8	10...15
УГ	18...60	6...8	10...15
Г	10...46	7...11	12...25
ЕГ	10...45	9...11	25...45
М	0,05...1,2	12...20	12...25
МГ	0,05...1,2	12...20	12...25

III. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Магнітні матеріали – це матеріали, що є носіями магнітного поля, або здатні підсилювати зовнішнє електричне поле. Виготовляються як з провідникових, так і з напівпровідникових матеріалів. Магнітні матеріали поділяють на магнітом'які, магнітотверді і матеріали спеціалізованого призначення. Найбільш важливими в електротехніці магнітними матеріалами є феромагнітні речовини і феримагнітні хімічні сполуки – ферити.

Магнітні характеристики матеріалів

Абсолютна магнітна проникність – фізична величина, що характеризує зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля у середовищі. Вимірюється у Тл·м/А.

Початкова магнітна проникність (μ_p) – безрозмірна величина, що характеризує її значення при дуже слабких полях (близько 0,1 А/м).

Максимальна магнітна проникність (μ_{max}) – безрозмірна величина, що показує найбільше значення магнітної проникності для даного матеріалу. В сильних полях в області насичення значення магнітної проникності наближається до одиниці.

Коерцитивна (затримуюча) сила (H_C) – це напруженість магнітного поля, необхідна для повного ромагнічування феромагнетика.

Максимальна величина індукції магнітного поля для даного матеріалу (B_{max}) – досягається при його намагнічуванні до насичення.

Залишкова індукція (B_r) – значення магнітної індукції при нульовій напруженості магнітного поля у процесі розмагнічування зразка, намагніченого до насичення.

Гранична частота електромагнітного поля (f_{gr}) – частота, після перевищення якої починається стрімке зростання діелектричних втрат ферита.

Максимальна магнітна енергія (W_{max}) – є властивістю феромагнетика, що характеризує найбільше значення магнітної енергії, яку здатен створити даний феромагнетик при певних умовах.

Магнітні втрати – втрати енергії у феромагнетик у його перемагнічуванні.

Точка (температура) Кюрі (ϑ) – температура, при якій феромагнетик втрачає магнітні властивості і стає парамагнетиком.

Магнітом'які матеріали

Магнітом'які матеріали відрізняються тим, що мають високу магнітну проникність і відносно малу невелику коерцитивну силу, через що легко перемагнічуються. Використовуються як сердечники трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних приладах і в інших випадках, коли необхідно за найменших втрат енергії досягти найбільшої індукції.

Таблиця 42. Склад і магнітні властивості різновидів заліза

Тип заліза	Домішки, %		Магнітні властивості		
	С	O ₂	μ_n	$\mu_{max} \cdot 10^3$	H _c , А/м
Технічно чисте залізо	0,020	0,060	250	7	64,0
Електролітичне залізо	0,020	0,010	600	15	28,0
Електролітичне залізо, переплавлене у вакуумі	0,010	-	-	61	7,2
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3300	21	6,4
Залізо, відпалене у водні	0,005	0,003	6000	200	3,2
Монокристал заліза, відпалений у водні	-	-	-	1430	0,8

Таблиця 43. Магнітні властивості електротехнічної сталі

Марка	Товщина листа, мм	Питомі магнітні втрати, Вт/кг		Магнітна індукція (Тл) при напруженості магнітного поля (А/м)			
		P* _{1,0/50}	P* _{1,5/50}	100	2500	5000	30000
2013	0,5	2,5	5,6	-	1,65	1,75	2,05
2112	0,5	2,6	6,0	-	1,6	1,68	2,02
2212	0,5	2,2	5,0	-	1,6	1,68	2,0
2312	0,5	1,75	4,0	-	1,56	1,66	1,96
2412	0,5	1,3	3,1	-	1,5	1,6	1,95
3411	0,5	1,1	2,45	-	1,75	-	-
3414	0,5	0,7	1,5	1,6	1,88	-	-
3415	0,35	0,46	1,03	1,61	1,9	-	-

* Перша цифра означає індукцію магнітного поля (Тл), друга – частоту (Гц)

Таблиця 44. Магнітні і електричні властивості пермалоїв

Марка	$\mu_n \cdot 10^3$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	H _c , А/м	B _{max} , Тл	ρ , мкОм·м
Нелеговані, низьконікелеві					
45Н 50Н	1,7...3	16...35	32...10	1,5	0,45
Леговані, низьконікелеві					
50НХС	1,5...3,2	15...30	20...8	1,0	0,90
Леговані, високонікелеві					
79НМ 80НХС 76НХД 79НМ-У	16...35	50...220	5,2...1,0	0,65	0,55
Супермалой					
79%Ni–5%Mo– 15%Fe–0,5%Mn	100	до 1500	0,3	0,8	0,60

Таблиця 45. Магнітні і електричні властивості феритів

Марка	$\mu_r \cdot 10^3$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	H_c , А/м	B_r , Тл	$f_{гр}$, МГц	ϑ , °С	ρ , Ом·м	Густина, г/м ³
20000НМ	15	35	0,24	0,11	0,1	110	0,001	-
6000НМ	4,8...8	10	8	0,11	0,5	130	0,1	5,0
1000НМ	0,8...1,2	1,8	28	0,11	5	200	0,5	4,5
600НН	0,5...0,8	1,5	40	0,12	5	110	100	4,8
2000НМ1	1,7...2,5	3,5	25	0,12	1,5	110	5	5,0
700 НМ1	0,55...0,85	1,8	25	0,05	8	200	4	4,8
100ВЧ	0,08...0,12	0,28	300	0,15	80	200	10 ⁵	4,8
20ВЧ2	0,016...0,024	0,045	1000	0,10	300	400	10 ⁶	4,7
300НН	0,28...0,35	0,6	80	0,13	20	450	10 ⁶	4,8
9ВЧ	0,009...0,013	0,03	1500	0,06	600	120	10 ⁷	4,4
200ВЧ	0,18...0,22	0,36	70	0,11	-	360	10 ³	4,7
50ВЧ3	0,045...0,065	0,2	100	0,14	-	480	10 ⁴	4,6

Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали характеризуються невеликою магнітною проникністю і значною коерцитивною силою. Використовуються для виготовлення постійних магнітів, запам'ятовуючих пристроїв, звукозапису, тощо. Характеризуються за коерцитивною силою, залишковою індукцією і максимальною енергією, що розсіюється магнітом.

Таблиця 46. Склад і властивості мартенситних сталей для постійних магнітів

Марка сталі	Склад, %*					H_c , КА/м	B_r , Тл
	С	Cr	W	Co	Mo		
ЕХ	0,95...1,10	1,3...1,6	-	-	-	4,6	0,90
ЕХ3	0,90...1,10	2,8...3,6	-	-	-	4,8	0,95
Е7В6	0,68...0,78	0,3...0,5	5,2...6,2	-	-	5,0	1,0
ЕХ5К5	0,90...1,05	5,5...6,5	-	5,5...6,5	-	8,0	0,85
ЕХ9К15М	0,90...1,05	8,0...10,0	-	13,5...16,5	1,2...1,7	13,6	0,80

* Інше – Fe.

Таблиця 47. Магнітні властивості сплавів для постійних магнітів

Марка	H_c , КА/м	B_r , Тл	W_{max} , КДж/м ³	Тип кристалічної структури
1	2	3	4	5
ЮНД4	40	0,50	3,6	Рівновісна
ЮНД8	44	0,60	5,1	
ЮНТС	58	0,43	4,0	
ЮНДК15	48	0,75	6,0	
ЮНДК18	55	0,90	9,7	
ЮНДК18С	44	1,10	14,0	
ЮН13ДК24С	36	1,30	18,0	
ЮН13ДК24	40	1,25	18,0	
ЮН14ДК24	48	1,20	18,0	

1	2	3	4	5	
ЮН15ДК24	52	1,15	18,0	Стовпчата	
ЮН14ДК24Т2	60	1,10	15,0		
ЮН13ДК25А	44	1,40	28,0		
ЮН14ДК25А	52	1,35	28,0		
ЮН13ДК25БА	48	1,40	28,0		
ЮН14ДК25БА	58	1,30	28,0		
ЮН15ДК25БА	62	1,25	28,0		
ЮНДК31Т3БА	92	1,15	32,0		
ЮНДК34Т5	92	0,75	14,0		Рівновісна
ЮНДК35Т5Б	96	0,75	16,0		
ЮНДК35Т5	110	0,75	18,0		
ЮНДК35Т5БА	110	1,02	36,0	Стовпчата	
ЮНДК35Т5АА	115	1,05	40,0	Монокристалічна	
ЮНДК38Т7	135	0,75	18,0	Рівновісна	
ЮНДК40Т8	145	0,70	18,0	Рівновісна	
ЮНДК40Т8АА	145	0,90	32,0	Монокристалічна	

Таблиця 48. Магнітні властивості феритів барія і кобальта

Марка магніта	H_c , КА/м	B_r , Тл	W_{max} , КДж/м ³
Барієві ізотропні			
1БИ	128	0,19	3,2
1БИ1	128	0,19	3,2
1БИ2	136	0,2	3,4
1БИП	128	0,19	2,8
1БИС	128	0,21	3,6
Барієві анізотропні			
1БАР	128	0,245	4,0
2БА1	200	0,30	7,4
2,3БА	212	0,33	9,2
2,4БА	224	0,33	9,6
2,8БА	217	0,36	11,2
3,1БА	168	0,38	12,4
3БА1	208	0,37	12,0
3БА2	240	0,35	10,4
Кобальтові анізотропні			
1,5КА	128	0,24	5,6
2КА	128	0,28	7,2

IV. НАПІВПРОВІДНИКИ

Матеріали з електронною електропровідністю, питомий опір яких при нормальній температурі лежить між питомими опорами провідників і діелектриків, відносять до напівпровідників. Електропровідність напівпровідників суттєво залежить від зовнішніх енергетичних впливів (температура, світло, електромагнітне поле, високоенергетичні випромінювання, механічні зусилля, тощо), а також від наявності спеціальних домішок. Носіями заряду в напівпровідниках є електрони провідності і дірки (носії позитивного заряду). В ідеальних кристалах концентрації обох типів носіїв однакові. У кристалах, що містять домішки і дефекти структури, співвідношення концентрацій електронів і дірок порушується й один з видів провідності стає переважним.

Характеристики напівпровідників.

Рухливість носіїв зарядів (електронів і дірок) – коефіцієнт пропорційності між середньою швидкістю руху носіїв зарядів і напруженістю зовнішнього електричного поля. Чисельно дорівнює швидкості носіїв зарядів при напруженості електричного поля 1 В/м і вимірюється у $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Власна концентрація основних носіїв зарядів – кількість основних носіїв зарядів (електронів або дірок) у одиниці об'єму напівпровідника в умовах термодинамічної рівноваги. Вимірюється у $1/\text{м}^3$.

Постійна ґратки – величина, що характеризує відстань між атомами кристалічної ґратки. Для кристалів, які не мають кубічної симетрії, постійна ґратки для різних осей відрізняється.

Показник переломлення середовища (речовини) – величина, що визначається відношенням фазових швидкостей світла (електромагнітних хвиль) у вакуумі і в даному середовищі.

Прості напівпровідники

Прості напівпровідники – це хімічні елементи, що мають електричні властивості, характерні для напівпровідників. Деякі з них знайшли широке застосування у електротехніці, зокрема кремній і германій. Електричні властивості простих напівпровідників значною мірою залежать від чистоти, температури і інших енергетичних впливів. Прості напівпровідники є основою для виготовлення діодів, транзисторів, датчиків опромінення різної природи, датчиків Холла, варисторів, термісторів, фоторезисторів, тензорезисторів і багатьох інших напівпровідникових пристроїв. Германій і деякі інші хімічні елементи використовуються також для виготовлення оптичних пристроїв високої світлосили.

Таблиця 49. Фізичні і електричні простих напівпровідників

Елемент	Густина, т/м ³	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	λ , Вт/(м·К)	$t_{пл}$, °С	ρ , Ом·м	ϵ
Бор	2,34	-	27,4	2300	-	-
Кремній	2,328	-0,77...4,8	84...149	1415	2000*	12,5
Германій	5,323	6,0	60	938	0,47*	16
Фосфор	1,82	-	-	44	-	-
Арсен	5,73	-	-	817	-	-
Сірка	2,07	-	-	113	-	-
Селен	4,79	50	4	217	$1 \dots 10^{11}$	-
Телур	6,24	-	-	450	$29 \cdot 10^{-4}$	-
Йод	4,93	-	0,45	-160	-	-

* Характеристики отримані при температурі 20 °С

Таблиця 50. Фізичні властивості простих напівпровідників

Елемент	Атомна маса	W , еВ	Робота виходу електронів, еВ	Рухливість електронів, м ² /(В·с)	Рухливість дірок, м ² /(В·с)	Власна концентрація основних носіїв зарядів, м ⁻³
Бор	10,81	1,10	-	-	-	-
Кремній	28,086	1,08	4,3	0,135	0,048	$1,4 \cdot 10^{16}$
Германій	72,61	0,67	4,8	0,39	0,19	$2,33 \cdot 10^{19}$
Фосфор	30,97	1,50	-	-	-	-
Арсен	74,92	1,20	-	-	-	-
Сірка	32,07	2,50	-	-	-	-
Селен	78,96	1,70	-	-	$0,2 \cdot 10^{-4}$	-
Телур	127,6	0,36	-	0,17	0,12	$9,3 \cdot 10^{21}$
Йод	126,904	1,25	-	-	-	-

Напівпровідникові хімічні сполуки

Напівпровідникові хімічні сполуки складаються з елементів різних груп таблиці Менделєєва, що відповідають загальним формулам $A^{IV}B^{IV}$ (наприклад, SiC), $A^{III}B^{V}$ (InSb, GaAs, Ga), $A^{II}B^{VI}$ (Cd, ZnSe), а також деякі окисли (наприклад, Cu₂O). Карбід кремнію застосовується для виготовлення резисторів для вентильних розрядників, що захищають лінії передачі високої напруги й апаратуру, для виробництва низьковольтних варисторів, елементів обчислювальної техніки, для виготовлення сілітових стержнів нагрівачів високотемпературних електричних печей. Арсеніди використовуються для виготовлення чутливих фотоелементів, дозиметри рентгенівського випромінювання, тунельні діоди, напівпровідникові лазери. Антимоніди застосовуються для виготовлення фотоелементів високої чутливості, а також для термоелектричних генераторів і холодильників. Сірчистий свинець, вісмут і кадмій використовуються для виготовлення фоторезисторів і люмінофорів.

Таблиця 51. Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{III}B^V$

Хімічна сполука	Густина, т/м ³	Показник переломлення	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град ⁻¹	W , еВ	Рухливість електронів, м ² /(В·с)	Рухливість дірок, м ² /(В·с)	Застосування
Фосфіди							
AlP	2,4	-	-	-	0,008	0,003	А
GaP	4,1	3,4	4,8	2,25	0,019	0,012	
InP	4,8	3,3	4,5	1,29	0,50	0,015	
Арсеніди							
AlAs	3,6	-	3,5	-	0,03	-	Б
GaAs	5,4	3,2	5,4	1,43	0,95	0,045	
InAs	5,7	3,2	4,8	0,36	3,30	0,050	
Антимоніди							
AlSb	4,3	3,3	4,2	-	0,02	0,055	В
GaSb	5,7	3,7	6,2	0,67	0,40	0,140	
InSb	5,8	4,1	5,0	0,17	10,00	0,100	

Примітка: А – різнокольорові світлодіоди; Б – фотоелементи, дозиметри рентгенівського випромінювання, тунельні діоди, лазери; В – чутливі фотоелементи, датчик ЕРС Холла, оптичні фільтри, термоелектричні генератори

Таблиця 52. Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{II}B^{VI}$

Хімічна сполука	Густина, т/м ³	λ , Вт/м·К	$t_{пл}$, °С	W , еВ	Рухливість електронів, м ² /(В·с)	Рухливість дірок, м ² /(В·с)	Застосування
Сульфіди							
ZnS	3,98...4,09	-	1850	3,6	-	-	А
HgS				1,8	0,002...0,005	-	Б
CdS	4,82	-	1750	2,40	0,024	0,005	Б
Селеніди							
ZnSe	-	-	1525	2,7	0,07	-	В
CdSe	5,81	-	1258	1,80	0,058...0,08	0,005	В
HgSe	8,26	5,6	800	0,07...0,60	1,00...1,85	-	Г
Телуріди							
ZnTe	-	-	1239	2,2...2,25	-	-	Г
CdTe	5,86	8,5	1098	1,60	0,076...5,7	0,006	Д
HgTe	8,42	6,0	670	0,02...0,25	1,50...7	-	Є

Примітка: А – синтез люмінофорів для кольорових кінескопів, рентгенівських трубок, світних табло; Б – фоторезистори, люмінофори; В – фоторезистори, термоелементи, електролюмінісцентні прилади, лазери; Г – фоторезистори, термоелементи, випромінюючі прилади; Д – чутливі елементи гамма-випромінювання, світлодіоди, сонячні батареї; Є – чутливі елементи випромінювання і датчка ЕРС Холла

Таблиця 53. Властивості напівпровідникових хімічних сполук

Хімічна сполука	Щільність, г/м ³	λ , Вт/м·К	$t_{пл}$, °С	W , еВ	Рухливість електронів, м ² /(В·с)	Рухливість дірок, м ² /(В·с)	Застосування
Сульфіди							
PbS	7,60	2,9	1114	0,37	0,06	0,070	А
Bi ₂ S ₃	7,39	2,0	720	1,30	-	-	А
Селеніди							
PbSe	8,15	1,7	1076	0,25	0,12	0,100	Б
Bi ₂ Se ₃	7,40	2,5	706	0,28	0,10	-	Б
Телуріди							
PbTe	8,16	1,7	917	0,30	0,18	0,090	В
Bi ₂ Te ₃	-	1,1	585	0,15	0,12	0,050	В
Оксиди							
Cu ₂ O	5,90	6,1	1230	0,34	0	0,005	Г
ZnO	5,60	-	-	3,20	0,05	0	Д
TiO ₂	4,20	-	1640	2,90	0,001	-	Д

Примітка: А – фоторезистори, люмінофори; Б – фоторезистори, термоелементи, лазери; В – фоторезистори, термоелементи, випромінюючі прилади; Г – випрямлячі, фотоелементи; Д – терморезистори.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алиев И.И. Электротехнические материалы и изделия. Справочник. – М.: Радиософт, 2007.- 352 с.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.- 304 с.
3. Мастеров В.А., Саксонов Ю.В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе. – М.: Металлургия, 1979. – 296 с.
4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - СПб.: Лань, 2001.- 368 с.
5. Сологуб М.А. Конструкційні метали і сплави: Корот. довід. – К.: НУХТ, 2010.- 51 с.
6. Электрорадиоматериалы / Под ред. Тареева Б.М. – М.: Высш. шк., 1978.- 336 с.
7. Энциклопедия неорганических материалов. В 2-х т. Т. 1. – К.: Гл. ред. Украинской советской энциклопедии, 1977.- 840 с.
8. Энциклопедия неорганических материалов. В 2-х т. Т. 2. – К.: Гл. ред. Украинской советской энциклопедии, 1977.- 816 с.
9. Интернет ресурс Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page.