

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

В. В. Пятов, А. Н. Голубев

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

для студентов специальности 1-43 01 07
«Техническая эксплуатация энергооборудования организаций»

Витебск
2022

УДК 620.22
ББК 30.3
П 99

Рецензенты:

д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Технология текстильных материалов»
учреждения образования «Витебский государственный технологический
университет» Рыклин Д. Б.;

доцент кафедры «Технология машиностроения» учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет»
Ковчур А. С.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО ВГТУ», протокол № 2 от 28.10.2022.

Пятов, В. В.

П99 Электротехнические материалы : конспект лекций / В. В. Пятов,
А. Н. Голубев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2022. – 55 с.
ISBN 978-985-481-726-2

Курс лекций содержит необходимый минимум информации по дисциплине «Электротехнические материалы», облегчает понимание и ускоряет изучение соответствующего курса. Курс предназначен для студентов специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования предприятий».

УДК 620.22
ББК 30.3

ISBN 978-985-481-726-2

УО «ВГТУ», 2022

Содержание

Введение	4
Глава 1. Общие сведения об электротехнических материалах	4
Лекция 1. Классификация электротехнических материалов	4
Глава 2. Проводники	7
Лекция 2. Физические процессы в проводниках	7
Лекция 3. Проводники первого рода	9
Лекция 4. Проводники второго рода	12
Лекция 5. Аморфные проводники	14
Лекция 6. Углеродные проводники	16
Лекция 7. Сверхпроводники	17
Глава 3. Полупроводники	20
Лекция 8. Физические процессы в полупроводниках	20
Лекция 9. Простые полупроводники	22
Лекция 10. Сложные полупроводники	25
Глава 4. Диэлектрики	28
Лекция 11. Физические процессы в диэлектриках	28
Лекция 12. Неорганические диэлектрики	30
Лекция 13. Органические диэлектрики	32
Лекция 14. Активные диэлектрики	35
Глава 5. Магнитные материалы	38
Лекция 15. Физические основы магнетизма	38
Лекция 16. Магнитомягкие материалы	40
Лекция 17. Магнитотвердые материалы	42
Глава 6. Материалы с особыми свойствами	46
Лекция 18. Наноматериалы	46
Лекция 19. Редкоземельные элементы	48
Лекция 20. Материалы аддитивного производства	50
Литература	54

Введение

В курсе «Электротехнические материалы» изучают материалы, используемые в современной энергетике, электротехнике. Это проводники, полупроводники, диэлектрики и магнитные материалы, используемые для создания элементной базы в приборостроении и электронике.

Глава 1. Общие сведения об электротехнических материалах

Лекция 1. Классификация электротехнических материалов

По удельному электрическому сопротивлению материалы делят на проводники ($\rho < 10 \text{ мкОм}\times\text{м}$), полупроводники и диэлектрики ($\rho > 100 \text{ МОм}\times\text{м}$).

У проводников первого рода (металлы, графит) проводимость электронная, а у проводников второго рода (электролиты) — проводимость ионная: электрический ток в них переносит вещество, что используют в гальваническом производстве.

Проводники первого рода делят на две группы: металлы с высокой проводимостью и сплавы с большим сопротивлением. Из первых делают провода и шины, из вторых — нагреватели и нити накаливания.

Удельное сопротивление металлов при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (ρ , $\text{мкОм}\times\text{м}$) — Ag: 0,016, Cu: 0,017, Au: 0,024, Al: 0,028; и далее идут Ir, W, Mo, Zn, Ni, Fe, Pt, Sn, Hg.

Криопроводники приобретают высокую проводимость при глубоком охлаждении. Из них делают кабели, охлаждаемые жидким водородом ($-253 \text{ }^\circ\text{C}$), неоном ($-246 \text{ }^\circ\text{C}$) и азотом ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$). Это очень чистые Al, Cu, Be.

Сопротивление сверхпроводников полностью исчезает при критических значениях температуры и напряженности магнитного поля. Температура перехода — Al: 1К, Pb: 7К, Nb: 9К. У высокотемпературных сверхпроводников она выше температуры кипения кислорода (90 К). У некоторых сортов ртутной керамики температура перехода достигает 135 К.

Сплавы с большим удельным сопротивлением ($\rho > 0,3 \text{ мкОм}\times\text{м}$) незаменимы в измерительных и нагревательных приборах. Это нихром, манганин, константан, фехраль, хромаль и другие.

У контактных материалов высокая коррозионная и эрозионная стойкость (стойкость к электрической искре). Контакты делают из сплавов тугоплавких и благородных металлов, электротехнического угля и металлокерамики (Cu-C, Ag-C).

Электрические свойства материалов зависят от ширины запрещенной зоны (энергии перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости). У металлов ее нет: электронный газ в них образуется без затрат энергии.

Материалы с шириной запрещенной зоны до 0,1 эВ называют полуметаллами. У полупроводников ширина запрещенной зоны 0,1...4 эВ, а у диэлектриков — больше 4 эВ.

Работа полупроводниковых элементов основана на зависимости их электросопротивления от каких-либо внешних воздействий: напряженности электрического поля (варистор), освещения (фоторезистор), механических напряжений (тензорезистор), температуры (терморезистор).

Полупроводники бывают простые и сложные, собственные и примесные, электронные и дырочные, узкозонные и широкозонные.

Простой полупроводник: химический элемент: Si, Ge, Se. Сложный полупроводник: химическое соединение или твердый раствор.

Собственный полупроводник сам себя обеспечивает электронами проводимости. Дырок и свободных электронов в нем поровну; при сильном охлаждении он вырождается в диэлектрик. Большинство используемых в технике полупроводников примесные. Примеси в полупроводниках делят на доноры (отдают электроны) и акцепторы (забирают их).

Диэлектриками называют материалы, поляризующиеся в электрическом поле. Поляризация: смещение связанных зарядов (электронов и ионов) от положения равновесия. Она бывает вынужденная и спонтанная.

Диэлектрические свойства материала: сквозная и поверхностная проводимость, электрическая прочность, диэлектрическая проницаемость, потери мощности в диэлектрике, рабочие частоты и температуры.

Сквозная проводимость связана с движением свободных зарядов, которые в небольшом количестве есть в любом реальном диэлектрике; она вызывает объемный ток утечки и нагрев материала. Поверхностная проводимость связана с наличием влаги и загрязнений, она может значительно превышать сквозную проводимость.

Электрическая прочность: напряженность поля, вызывающая пробой диэлектрика. Численно равна пробивному напряжению, деленному на толщину изоляции.

Пробой бывает сквозной, поверхностный, тепловой и электрохимический. При сквозном пробое диэлектрический материал необратимо разрушается. Тепловой пробой связан с прожогом материала токами утечки. При электрохимическом пробое состав и свойства диэлектрика постепенно изменяются.

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз поляризация среды ослабляет электрическое поле по сравнению с вакуумом. У полярных диэлектриков (слюда, керамика) она велика (≈ 200), а у неполярных диэлектриков (алмаз, парафин, полиэтилен) — мала (меньше 6).

Потери мощности в диэлектрике связаны с его поляризацией и токами утечки.

Диэлектрики бывают пассивные (резина, полимеры) и активные.

Свойства активных диэлектриков зависят от внешних воздействий. Это сегнето- и пьезоэлектрики, пироэлектрики и электреты.

У сегнетоэлектриков спонтанная поляризация и огромная диэлектрическая проницаемость: BaTiO_3 , сегнетоэлектрическая керамика.

Пьезоэлектрики поляризуются от механических напряжений (и меняют размеры в электрическом поле: обратный пьезоэффект). Их используют в микрофонах, детонаторах, зажигалках, датчиках давлений. Это кварц монокристаллический и некоторые виды керамики.

Свойства пирозэлектриков сильно зависят от температуры, их используют в индикаторах электромагнитных излучений; это минералы турмалин и янтарь.

Электреты очень долго сохраняют остаточную поляризацию. Их используют в микрофонах, телефонах, дозиметрах; это лавсан, фторопласт.

Магнитные свойства материала: магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость, намагниченность, коэрцитивная сила, потери энергии на перемагничивание.

По магнитной восприимчивости материалы делят на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

У диамагнетиков малая отрицательная магнитная восприимчивость, они слабо выталкиваются из неоднородного магнитного поля: Si, Zn, Cu, Au, Ag.

У парамагнетиков малая положительная магнитная восприимчивость, они слабо притягиваются неоднородным полем: Al, Pt.

У ферромагнетиков большая положительная магнитная восприимчивость, они сильно притягиваются полем: Fe, Ni, Co.

У антиферромагнетиков малая положительная восприимчивость: Cr, Mn.

У ферримагнетиков большая положительная магнитная восприимчивость, они сильно притягиваются полем; это оксидные соединения — ферриты.

Коэрцитивная сила: напряженность магнитного поля, размагничивающая намагниченный до насыщения материал. По ее величине ферромагнетики делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

У магнитомягких материалов коэрцитивная сила мала: это железо, электротехническая сталь, пермаллой, альсиферы, некоторые ферриты. Из них делают сердечники электромагнитов, пластины электродвигателей...

У магнитотвердых материалов коэрцитивная сила велика. Это магнитные стали (ЕХ3, ЕХ5К5), литые и порошковые магнитные сплавы, некоторые ферриты, сплавы с редкоземельными элементами. Из таких материалов делают постоянные магниты. Сильные магниты из сплава Nd-Fe-B есть во многих электротехнических устройствах.

Глава 2. Проводники

К проводникам относят материалы с удельным электросопротивлением менее $10 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ и нулевой шириной запрещенной зоны. В проводниках первого рода ток переносят электроны, а в проводниках второго рода — ионы.

Лекция 2. Физические процессы в проводниках

Проводники встречаются в любом агрегатном состоянии: твердом, жидком, газообразном и плазменном. Жидкие проводники: расплавленные металлы и электролиты. Газ проводит ток в сильных полях, вызывающих ударную ионизацию; термически ионизированный газ называют плазмой. Твердые проводники: металлы и углерод.

Проводимость металлов связана с электронным газом, состоящим из обобщенных валентных электронов, перемещающихся при приложении электрического поля. Обычно у металлов поликристаллическая структура, но используют также монокристаллы и аморфные сплавы.

Прямую пропорциональность между напряженностью электрического поля и силой тока называют законом Ома. Движущиеся электроны сталкиваются с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки и тормозятся: так возникает электросопротивление.

Углеродные проводники: графит, графен, волокна и углеродные нанотрубки. В них проводимость также связана с наличием электронного газа.

Важная характеристика проводника: средний пробег электрона между соударениями. При комнатной температуре он равен $10\text{...}100 \text{ нм}$; таким образом, электроны проходят без соударений сотни периодов кристаллической решетки.

В классической физике сопротивление объясняют влиянием дефектов и тепловым колебанием ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Увеличение сопротивления при нагреве связывают с уменьшением пробега электрона. Но эта теория не объясняет сверхпроводимость.

Квантовая физика утверждает: в идеальном кристалле электронная волна идет без потерь энергии; пробег электрона бесконечен и сопротивления нет. Но идеальных кристаллов не бывает, а сверхпроводимость все-таки существует.

При плавлении металла его сопротивление обычно возрастает в $1,5\text{...}2$ раза, но есть и исключения: у некоторых металлов (Bi, Ga) при плавлении плотность увеличивается, а сопротивление уменьшается.

Проводимость сплавов ниже, чем у чистых металлов, даже при легировании основного металла лучшим проводником, чем он сам. Так, при легировании меди серебром сопротивление увеличивается.

У твердых растворов с неограниченно растворимыми компонентами (Cu-Au, W-Mo) проводимость минимальна в середине диаграммы состояния и увеличивается к ее краям.

Кроме примесей на проводимость металлов влияют кристаллические дефекты: атомы внедрения и замещения, вакансии и дислокации.

Плотность дефектов в кристалле растет при нагреве и радиационном облучении. Это используют для диагностики: по росту сопротивления судят о степени повреждения структуры и о величине былой радиации.

По остаточному электрическому сопротивлению оценивают чистоту металла. Измеряют отношение сопротивления при комнатной температуре и в жидком гелии. Чем оно больше, тем чище металл: у чистых металлов сопротивление при охлаждении падает сильнее.

Влияет на сопротивление и напряженно-деформированное состояние. При упругом сжатии сопротивление уменьшается, а при растяжении и кручении — возрастает. Пластическая деформация металла также повышает его электрическое сопротивление.

Высокочастотные токи распределяются по сечению проводника неравномерно: чем выше частота поля, тем больше поверхностная плотность тока. Такой скин-эффект объясняют действием магнитного поля проводника и используют для поверхностного нагрева металлов в индукторах.

Глубина проникновения поля зависит от его частоты, магнитной проницаемости материала и его проводимости. На высоких частотах центральная часть провода по назначению не используется и его сопротивление будет выше, чем для постоянного тока; оно зависит от частоты поля.

Миниатюризация электроники ведет к переходу от традиционных проводов и дорожек к тонкопленочным проводникам, физические процессы в которых отличаются рядом особенностей, связанных с технологией их получения и проявлением квантовых эффектов.

У очень тонких (~ 1 нм) пленок повышенное электрическое сопротивление с отрицательным температурным коэффициентом. Такие пленки применяют в электрических соединениях, контактных площадках, обкладках конденсаторов, магнитных и резистивных элементах ИС. Тонкопленочные проводники обычно делают из W, Mo, Ta, Re и Cr.

При контакте разных металлов электроны перераспределяются между ними и в очень узкой зоне устанавливается контактная разность потенциалов. Элемент, состоящий из замкнутых в цепь двух разных проводников, называют термопарой. В такой цепи разность потенциалов есть на каждом контакте; полярность этих ЭДС встречная, они взаимно компенсируются и тока не порождают. Однако при разной температуре контактов компенсация будет неполная и в цепи возникает термоэлектрический ток. Если цепь разорвать, то на ее концах появится разность потенциалов — термоэлектродвижущая сила (это эффект Зеебека).

В некотором температурном интервале термо-ЭДС пропорциональна разности температур контактов, что используют для измерения температуры.

Термопара измеряет температуру с точностью $0,1 \dots 1,0$ К в диапазоне, зависящем от ее материалов. Прибор для измерения ЭДС включают в разрыв одной из ветвей цепи.

В электровакуумной технике широко используют термоэлектронную эмиссию металлов, заключающуюся в испускании ими электронов при нагреве. Для изготовления таких катодов нужны тугоплавкие металлы, легко испускающие электроны. Для этого, например, вольфрамовый электрод покрывают пленкой тория: такой катод работает до температуры 1900 °С.

В сильных электрических полях возможна холодная эмиссия электронов (квантово-механическое туннелирование), ее используют для создания мощных электронных пучков.

Электромагнитное излучение вызывает фотоэлектронную эмиссию, ее используют в фотоэлементах и электронных умножителях.

При облучении металла электронами и ионами происходит выбивание новых электронов, это вторичная эмиссия. Катоды, используемые для ее создания, называют динодами. Для усиления вторичной эмиссии на металл часто наносят тонкую пленку из халькогенидов, антимонидов (Cs_3Sb , Rb_3Sb), оксидов (Ag_2O , Cs_2O) или легированных полупроводников ($GaAs$, GaP).

Вторичную эмиссию используют для усиления электронных потоков. В фотоэлектронных умножителях ток усиливают динодной системой, дающей усиление ~ 100 млн. Такое огромное усиление позволяет детектировать очень слабые сигналы. Приборы на фотоэлектронных умножителях с динодной системой используют в астрофизике для регистрации слабого свечения далеких звезд и других областях науки и техники.

Лекция 3. Проводники первого рода

Это материалы с электронной проводимостью — металлы и некоторые формы углерода. Высокая проводимость у Ag , Cu , Au , Al , Fe , W .

Серебро окисляется в присутствии серы, образуя темную патину. Сера есть в резине, поэтому контакт серебра с резиновой изоляцией нежелателен. Серебро реагирует с галогенами, а с ртутью образует жидкую амальгаму. Из серебра делают клеи, краски, контакты, зеркала и припои: двойные ($Ag-Cu$), тройные ($Ag-Cu-Zn$) и многокомпонентные ($Ag-Cu-Zn-Cd-Ni-Mn$). Серебро в 100 раз дороже меди.

У меди стабильный температурный коэффициент электросопротивления, она устойчива к окислению при нагреве до 200 °С. Медь очень технологична: она хорошо паяется, шлифуется и полируется. Из чистой меди (M0: 99,95 % Cu , M1: 99,9 % Cu) делают провода, из технической — тепловые трубки, радиаторы, теплообменники. Высокая (50 %) пластичность меди позволяет прокатывать бесшовные трубы. Медные инструменты не искрят при ударах, их используют во взрывоопасных средах.

Золото мягкое (НВ 250) и непрочное (120 МПа). Нагартовкой прочность можно удвоить. Золото очень пластично: из 1 грамма вытягивают проволоку километровой длины. Оно растворяется в царской водке и цианистом калии, реагирует с I, Br и Hg. Самые вредные примеси — Pb, Te, Bi — снижают проводимость и коррозионную стойкость золотых сплавов. Механические свойства золота улучшают лигатурами: Hg, Cu, Zn; цвет сплава при этом изменяется от белого до черного. Например, Pd и Pt делает сплав белым (белое Au). Изделия с пробой ниже 375 относят к бижутерии. У самого популярного ювелирного сплава 585 проба. Из сплавов 900 пробы еще недавно делали зубные протезы. В электротехнике из золота делают электропроводные покрытия, контакты, припои и термопары.

Алюминий проводит ток в 1,6 раза хуже меди и уступает ей по прочности, но он дешевле и в 3,5 раза легче. Алюминий плавится при 660 °С, устойчив на воздухе и в воде, но его разрушают щелочи, контакт с Cu и Ni. Алюминий очень пластичен, из-за чего хорошо затянутые клеммы со временем слабеют: для ответственной проводки он непригоден. Из алюминия делают силовые кабели, корпуса приборов, зеркала, батареи отопления, экраны, радиаторы, электроды конденсаторов. Он отражает 89 % падающего света (серебро отражает 98 %, но оно темнеет со временем).

В электротехнике используют алюминий технической чистоты АД0 (менее 0,5 % примесей, в основном Si и Fe) и алюминий высокой чистоты АД00 (содержит не более 0,03 % примесей).

На воздухе алюминий пассивируется: покрывается плотной оксидной пленкой с высоким сопротивлением. Эта пленка сильно затрудняет пайку: нужны специальные пасты-припои и ультразвуковые паяльники.

Оксидную пленку можно дополнительно усилить электрохимической обработкой и получить термостойкую изоляцию. Пробивное напряжение оксидного слоя толщиной 0,03 мм около 100 В, а слоя 0,04 мм — уже 250 В.

Из оксидированного алюминия делают катушки без дополнительной межвитковой и межслойной изоляции, его используют в конденсаторах и выпрямителях. Недостатки: ограниченная гибкость провода и гигроскопичность оксидного слоя, который защищают лаком.

Железо уступает меди и алюминию по проводимости, но оно дешевле; его используют в электротехнике как магнитомягкий металл.

Из тугоплавкого вольфрама делают катоды электронных и осветительных ламп, сварочные электроды и аноды рентгеновских трубок.

Легкоплавкие олово (232 °С) и свинец (327 °С) используют для припоев:

ПОС-61: 61 % Sn и 39 % Pb, $T_{пл} = 183$ °С;

сплав Розе: 25 % Sn, 25 % Pb и 50 % Bi, $T_{пл} = 94$ °С;

сплав Вуда: по 12,5 % Sn и Cd, 25 % Pb, 50 % Bi, $T_{пл} = 69$ °С.

Оловянные припои не годятся для ремонта ювелирных изделий.

Из луженой оловом жести делают консервные банки. Оно подвержено т. н. «оловянной чуме»: на морозе изменяется тип кристаллической решетки и олово рассыпается. Это погубило в 1912 г. антарктическую экспедицию

англичанина Скотта, лишив ее запасов горючего в запаянных оловом бочках. Суровой русской зимой 1812 года боеспособность армии Наполеона пострадала из-за рассыпавшихся на морозе оловянных пуговиц.

Ртуть: жидкий ($T_{пл} = -39\text{ }^{\circ}\text{C}$) проводник, образующий интерметаллидные сплавы (амальгамы) со многими металлами даже без нагрева. Ртутные амальгамы применяют для выделения Au и Pt в производстве зеркал. Ртуть используют в датчиках положения (замыкают цепь при наклоне), в обычных и контактных термометрах, в манометрах и барометрах.

Ртуть утилизирует служба демеркуризации. Опасна не сама ртуть, а ее соединения и пары — рабочий газ в люминесцентных лампах. При возбуждении током он излучает яркий свет, в основном синий и ультрафиолетовый.

Сплавы с большим сопротивлением ($\rho > 0,3\text{ мкОм}\times\text{м}$) незаменимы в измерительных и нагревательных приборах. Это нихром, манганин, константан, фехраль, хромаль и другие.

Нихром (55...78 % Ni, 15...23 % Cr): жаростойкий сплав с $T_{раб} < 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\rho = 1,1\text{ мкОм}\times\text{м}$. Из него делают нагревательные элементы и резисторы. Нихром технологичен: он протягивается в ленту и проволоку, сваривается. Нихромы бывают двойные (X20H80) и легированные (X20H80T).

Манганин (86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni): термостабильный сплав с удельным сопротивлением $\rho = 0,45\text{ мкОм}\times\text{м}$. Из него делают резисторы и другие элементы. Выпускают в виде проволоки и ленты.

Константан (59 % Cu, 40 % Ni, 1 % Mn): термостабильный сплав с $T_{раб} < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и удельным сопротивлением $\rho = 0,5\text{ мкОм}\times\text{м}$. Из него делают резисторы, реостаты, термопары, нагреватели.

Фехрали и хромали: железные сплавы, содержащие до 25 % Cr и до 7 % Al. Удельное сопротивление $1,4\text{ мкОм}\times\text{м}$, $T_{раб} < 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из них делают нагреватели и реостаты. Выпускают проволоку, прутки, ленту.

Сплавы для термопар: хромель (90 % Ni, 10 % Cr), копель (43 % Ni, 3 % Fe, 54 % Cu), алюмель (95 % Ni, 2 % Al, 2 % Mn, 1 % Si), платинородий (20 % Rh). Соединяя два таких проводника, получают термопару: Cu-Fe (работает до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$), хромель-алюмель (до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), Pt-платинородий (до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У контактных сплавов высокая коррозионная и эрозионная стойкость. Это сплавы тугоплавких (Mo, W) и благородных (Au, Ag, Pt, Rh) металлов, металлокерамика (Ag-CdO, Cu-C, Ag-C), электротехнический уголь. Слабонагруженные контакты делают из сплавов Ag-Cu (COM-10: 10 % Cu), а сильнонагруженные — из тугоплавких металлов.

Уголь электротехнический содержит сажу, графит, антрацит и связку (жидкое стекло). Из него делают щетки электромашин, электроды прожекторов и дуговых печей, аноды гальванических элементов.

Металлокерамику получают спеканием или пропиткой порошков. У нее три фазы: электропроводная, упрочняющая и газовая (поры). Хорошо гасят электрическую дугу псевдосплавы Ag-W, Ag-Mo, Cu-W.

Композиционные проводники содержат какую-либо проводящую фазу — металлическую или графитовую. Пластик с графитом не накапливает статический заряд и не искрит. Из таких композитов делают пленочные нагреватели для теплых полов и одежды, кабели систем водоснабжения с подогревом. Из медно-графитовых композитов делают скользящих контакты.

Лекция 4. Проводники второго рода

Это материалы с ионной проводимостью — твердые и жидкие электролиты.

Твердые электролиты: растворы на основе ионных кристаллов: AgI , Ag_2S . У них $\rho \sim 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что близко к жидким электролитам и расплавленным солям. Суперионные кристаллические проводники получают в виде пленок, порошков и монокристаллов; на них делают конденсаторы огромной емкости.

Твердые оксидные электролиты относят к высокотемпературным; при нормальной температуре это диэлектрики, а при высокой — проводники.

Проводимость жидких электролитов (растворов и расплавов солей, кислот и щелочей) зависит от степени диссоциации молекул растворенного вещества.

Диссоциация молекул уравнивается обратным процессом ассоциации ионов в молекулы, поэтому в растворе диссоциирована лишь часть молекул. Точка динамического равновесия, определяющая степень диссоциации (отношение числа распавшихся молекул к числу всех растворенных), зависит как от самого раствора, так и от внешних условий (температуры и давления).

По степени диссоциации молекул электролиты делят на сильные и слабые. Четкой границы нет: одно и то же вещество в одном растворе проявляет свойство сильного электролита, а в другом — слабого.

В сильных электролитах степень диссоциации молекул равна 1 и она не зависит от концентрации раствора. Это соли, щелочи и сильные кислоты: HCl , HNO_3 , H_2SO_4 . В слабых электролитах степень диссоциации меньше 1 и она уменьшается с ростом концентрации раствора. Это вода и слабые кислоты (например, плавиковая кислота HF).

Электрохимия изучает процессы электролиза, коррозии и пассивации металлов. Реакции в электролите называют первичными, а реакции на электродах — вторичными.

Электролиз: процесс осаждения на электродах веществ из электролита. Электролизом получают Al , H , Cl , извлекают металлы (электроэкстракция) и очищают их (электрорафинирование), очищают стоки (электрокоагуляция, электрофлотация). На электролизе работают химические источники тока и электролитические конденсаторы.

В химических источниках тока электроэнергию получают из химических реакций. Два электрода погружают в электролит и в цепи возникает ЭДС. Анод делают из Pb, Cd или Zn, а катод — из оксидов свинца или Mn. По составу электролита химические источники тока разделяют на кислотные (свинцово-кислотный аккумулятор), солевые (цинк-хлорный аккумулятор) и щелочные (никель-цинковый аккумулятор).

По особенностям использования их делят на гальванические элементы, топливные элементы и аккумуляторы (электрохимические генераторы).

Гальванический элемент превращает химическую энергию электродов-реагентов в электрическую. Его характеристики: ЭДС, емкость и величина отдаваемого тока. В щелочных Mn-Zn элементах электролит — паста из гидроксида калия, у них высокая емкость и большой ток, они хорошо работают на морозе.

В топливных элементах реагенты подают извне и электроды не расходуются. Их применяют в аварийных батареях, при производстве электроэнергии, на транспорте и даже в мобильных устройствах.

В аккумуляторах электроэнергия источника превращается в химическую и накапливается, а при работе — снова превращается в электрическую. Аккумуляторы бывают кислотные (серная кислота, свинцовые электроды), щелочные (никель-металлогидридные, никель-кадмиевые), литий-полимерные и литий-ионные (без эффекта памяти).

В электролитических конденсаторах катод делают из жидкого или твердого электролита, а анод — из алюминиевой фольги или танталовой губки, покрытой оксидной пленкой. У них высокая емкость и низкая стоимость, но электролит постепенно высыхает. Работают такие конденсаторы на частотах до 30 кГц в цепях выпрямителей переменного тока для сглаживания пульсаций.

Гальванотехника основана на электрохимическом осаждении металла; она подразделяется на гальваностегию и гальванопластику.

Гальваностегия занимается осаждением металлов из электролитов. Гальванические покрытия делят на защитные, электропроводные, декоративные, износостойкие, диэлектрические и противозадирные.

Покрытия (в гальванотехнике их называют осадками) должны быть мелкозернистыми и плотными. Этого достигают составом электролита, температурным режимом электролизной ванны и силой тока.

Особенно важно осаждение меди: ее используют как основной слой при гальваническом меднении и как промежуточный слой при никелировании, хромировании, серебрении и золочении.

Гальванопластику применяют для копирования небольших предметов сложной формы: скульптур, ювелирных изделий. Толщина металлического слоя обычно не превышает 2 мм. Этот старый метод точного копирования конкурирует с новыми: литьем в эластичные формы, литьем по выплавляемым моделям, трехмерным сканированием и печатью.

В обычном состоянии газ — диэлектрик: в нем мало носителей заряда. Ионизируют газ излучениями, полями, нагревом. У ионизированных газов проводимость смешанная: в ней участвуют ионы и электроны.

Термическая или электрическая ионизация газа ведет к образованию плазмы, которую делят на низкотемпературную (ниже 1 млн К, ионизация менее 1 %) и высокотемпературную. В отличие от газов плазма является проводником, в ней много свободных зарядов.

Низкотемпературную плазму используют для обработки металлов, нанесения покрытий (алмазные и нитридные пленки), в осветительных приборах, газовых лазерах и плазмотронах. В полупроводниковой промышленности используют плазменное травление поверхностей. Плазму применяют при очистке газов и жидкостей (озонирование воды, очистка выхлопных газов).

Освоение высокотемпературной плазмы из дейтерия и трития — важный шаг к управляемому термоядерному синтезу.

Для создания плазмы обычно используют газовый разряд. В плазменных горелках (дуговых и высокочастотных плазмотронах) она образуется в разрядной камере, сквозь которую продувают газ.

При плазменной резке между электродом и металлом зажигают электрическую дугу. В сопло подают газ, превращаемый дугой в струю плазмы с температурой $\sim 30\,000$ °С. Толщина разреза — до 1,5 м.

В плазменных телевизионных панелях люминофор светится под воздействием ультрафиолетовых лучей, возникающих при электрическом разряде в ионизированном газе (холодной плазме). Такие панели долговечны (~ 30 лет) и контрастны, но они потребляют много энергии и выгорают от неподвижного изображения (эффект памяти).

Лекция 5. Аморфные проводники

Аморфные проводники (металлические стекла) — неравновесные системы с уникальными свойствами. В природе таких материалов нет, а в технике они начали появляться во второй половине XX века. Возможность получения стекла зависит от состава металла.

Чтобы получить аморфный металл, расплав надо охладить так быстро, чтобы кристаллы не успели образоваться. Для чистых металлов такая скорость охлаждения пока недостижима, но у некоторых сплавов она не превышает 1 млн К/с и их можно перевести в стеклообразное состояние. Это сплавы переходных металлов (Fe, Co, Mn, Cr, Ni), в которые для образования аморфной структуры добавляют В, С, Si, Р, S.

Аморфные сплавы получают закалкой из жидкого состояния прокаткой или спиннингом. При прокатке расплав формируют между холодными вращающимися валками, получая тонкую аморфную ленту, фольгу и

проволоку. При спининговании расплав газовой струей выдувают через отверстие в тигле на поверхность вращающегося диска, где он застывает в тонкую аморфную ленту. Скорость охлаждения при этом ~ 1 млн К/с, а толщина получаемой ленты около 0,1 мм. Процесс очень производителен: скорость спинингования достигает 2 км/мин.

Для получения аморфных волокон используют метод вытягивания из расплава: экструзию и формование в стеклянном капилляре.

Еще аморфные металлы получают ионно-плазменным распылением, лазерным облучением и ионной имплантацией. Эти методы применяют в производстве интегральных схем. Лазерный луч расплавляет тонкий слой металла и он быстро охлаждается за счет теплоотвода вглубь детали. Для аморфизации применяют углекислотные лазеры непрерывного действия.

Металлическое стекло метастабильно. При его нагреве до критической температуры $\approx \frac{1}{2} T_{пл}$ начинается кристаллизация. Это сложный многоэтапный процесс, сопровождающийся формированием промежуточных фаз.

По электрическим свойствам металлические стекла близки к жидким металлам. Хотя это и проводники I рода, но удельное сопротивление у них больше (1...3 мкОм×м) и стабильнее, чем у кристаллических металлов. Сопротивление аморфного сплава Ni-Si-B в 1,5 раза выше, чем у кристаллического. Тройной аморфный сплав $Ni_{68}Si_{10}B_{22}$ термостабилен, его используют для создания эталонных электросопротивлений. Из резистивных аморфных сплавов делают микропровод в стеклянной изоляции.

У металлических стекол на порядок ниже термический коэффициент сопротивления, они парамагнитны и устойчивы к коррозии. Плотность стекол на 1...2 % меньше плотности кристаллов. Магнитомягкие аморфные сплавы выпускают на основе Fe, Ni и Co.

Структура аморфных сплавов однородна: в них нет ликвации и дефектов кристаллического строения. Это отражается на свойствах: металлические стекла по прочности и твердости близки к нитевидным монокристаллам. Из них можно делать отличные лезвийные инструменты.

Высокая коррозионная стойкость металлического стекла объясняется его аморфной структурой. Легированные хромом аморфные сплавы превосходят нержавеющие стали. Аморфные сплавы Ni-Nb, Zr-Fe и Zr-Ti-Ni по стойкости в морской воде почти не уступают платине, их используют при катодной защите гидротехнических сооружений.

Аморфные сплавы — перспективный материал для изготовления упругих элементов. Некоторые железные стекла обладают инварным эффектом: у них низкий и стабильный коэффициент теплового расширения, их используют в датчиках температуры и термических весах.

Аморфные припои применяют при соединении сложных профилей и для создания тонкостенных конструкций. Обладая высокой пластичностью и прочностью, они дают надежный паяный шов. Эвтектический состав таких припоев обеспечивает хорошие литейные свойства: высокую жидкотекучесть и

низкую температуру плавления. Хотя аморфная фольга и кристаллизуется при пайке, это не ухудшает свойств соединения.

Благодаря высокой гомогенности и отсутствию кристаллических дефектов у металлических аморфных пленок низкая скорость диффузии (атомы через них проходят с трудом). Из таких пленок делают барьерные слои, защищающие металл от загрязнений.

Лекция 6. Углеродные проводники

Это графит, технический углерод, углеродные волокна и фуллерены.

Структура графита пластинчатая, в пластинках связи ковалентные, а между ними — Ван-дер-Ваальсовы. Из-за этого у графита сильная механическая и электрическая анизотропия: внутри пластин это хороший проводник, а между ними — плохой. Из графита делают нагреватели, экраны, тигли, электроды и щетки электрических машин. Он входит в состав многих композиционных и антифрикционных материалов. Слабая связь между слоями позволяет использовать графит как твердый смазочный материал.

Стеклоуглерод: модификация графита, полученная полимеризацией некоторых смол. Этот химически стойкий материал легко узнать по стекловидному излому.

Пиролитический углерод получают разложением углеводородных паров в вакууме или инертном газе. Такие пленки используют для изготовления линейных резисторов.

Синтетические наноструктуры: углеродные нанотрубки и фуллерены.

Диаметр нанотрубок исчисляются в нм, а длину — в мкм. Они состоят из коаксиально вложенных друг в друга цилиндров графена с расстоянием между слоями 0,34 нм (период кристаллической решетки графита). В зависимости от структуры ширина запрещенной зоны и проводимость нанотрубок изменяются в широких пределах от металлов до полупроводников.

Уникальные свойства (малая толщина, высокая электропроводность и огромная прочность) позволяют использовать углеродные нанотрубки в качестве зондов электронных микроскопов.

Фуллерены: большие почти сферические молекулы, состоящие из 60 и более атомов углерода. Получают их дуговым разрядом между электродами из графита в гелиевой атмосфере. При нагревании в защитной атмосфере они устойчивы до 1500 °С, но на воздухе сгорают. Исследуют возможность использования фуллеренов в производстве смазочных материалов, аккумуляторов, твердотельных лазеров, магнитных носителей информации.

Исследуют также и фуллериты: молекулярные полупроводниковые кристаллы, переходное звено между неорганической и органической материей.

В 2004 году в Манчестерском университете был получен графен — монослой атомов углерода, собранных в гексагональную кристаллическую

решетку. Это перспективный материал, вероятно способный заменить кремний в интегральных схемах.

Лекция 7. Сверхпроводники

Сверхпроводники полностью теряют сопротивление при охлаждении ниже некоторой критической температуры. Электрический ток, запущенный в сверхпроводящем кольце, не затухает. На любом участке такой цепи разности потенциалов нет, что говорит об отсутствии магнитного поля. Классическая физика сверхпроводимость не объясняет. Понять ее удалось только посредством квантовой физики.

Магнитное поле не проникает в сверхпроводник и затухает в тонком поверхностном слое, это эффект Мейсснера. Таким образом, сверхпроводник является идеальным диамагнетиком с нулевой магнитной проницаемостью. Выталкивание из магнитного поля можно использовать как бесконтактную подвеску: магнит висит над сверхпроводящим кольцом; работа при этом не совершается и энергия не расходуется.

Сверхпроводимость исчезает, если напряженность магнитного поля превысит некоторое критическое значение. У сверхпроводников первого рода такой переход происходит скачком, а у сверхпроводников второго рода — постепенно.

Критическая напряженность магнитного поля максимальна при нулевой температуре. У сверхпроводников первого рода (чистые химические вещества с ярко выраженным эффектом Мейсснера) она не превышает 100 кА/м, а у сверхпроводников второго рода (Nb, V, многие сплавы) — достигает 100 МА/м.

Сверхпроводимость разрушается также электрическим током, если он превысит некоторое критическое значение. Ток течет лишь в поверхностном слое сверхпроводника, толщина которого зависит от структуры материала.

Сверхпроводимость обнаружена у 26 металлов: Sn, Pb, Al, Ta, Zn, W, Nb (9,25 К). Еще 13 элементов переходят в сверхпроводящее состояние при высоком давлении: Si, Ge, Se, Sb. Сверхпроводимости нет у таких хороших проводников, как Ag, Cu и Au.

Сверхпроводимостью обладают ~2000 интерметаллидных соединений и сплавов, все они — сверхпроводники второго рода. У некоторых сплавов ниобия температура перехода в сверхпроводящее состояние превышает 20 К и для их охлаждения можно использовать не жидкий гелий (4,2 К), а более дешевый жидкий водород (20 К). Сверхпроводимости не бывает в ферромагнетиках, но она встречается в некоторых полупроводниковых соединениях.

Изготовление сверхпроводящих проволок и лент затрудняет хрупкость таких материалов. Особенно нетехнологичны интерметаллиды. Поэтому вместо проволоки все чаще используют биметаллы, такие как сверхпроводник-медь.

Многожильные интерметаллидные провода получают твердофазной диффузией: сначала волочением формируют композит на бронзовой матрице, армированной волокнами ниобия; затем заготовку нагревают и олово диффундирует в ниобий, образуя на поверхности пленку сверхпроводящего станнида ниобия Nb_3Sn . При изгибании провода такие пленки не разрушаются.

У ниобиевых металлических пленок и сплавов $Pb-In-Au$, $Pb-Bi$ температура перехода в сверхпроводящее состояние выше, чем у объемных образцов. Пленки постепенно вытесняют другие материалы из приборов криоэлектроники.

Основное применение сверхпроводников — создание сильных магнитных полей (до 10 МА/м, а обычные электромагниты с железными сердечниками дают менее 1 МА/м). Кроме того, в сверхпроводящих соленоидах циркулирует незатухающий ток и их не надо подпитывать.

Сильные магнитные поля нужны для научных исследований, они позволяют уменьшить габариты ускорителей элементарных частиц и удерживают плазму в термоядерных реакторах. В магнитогидродинамических преобразователях сильные магнитные поля превращают тепло в электрическую энергию, а в индуктивных накопителях — сглаживают пиковые мощности в крупных энергосистемах.

Сверхпроводящие обмотки в электромашинках позволяют избавиться от сердечников и в пять раз уменьшить габариты двигателя при сохранении мощности. Поезда на бесконтактной магнитной подушке используют выталкивание сверхпроводника из магнитного поля.

Сверхпроводники применяют в мощных трансформаторах и линиях электропередач. В обычных проводах теряется до одной трети передаваемой электроэнергии. В сверхпроводниках потерь нет, но их охлаждение тоже дорого.

Разрушение сверхпроводящего состояния магнитным полем используют в пленочных криотронах, осуществляющих очень быстрые переключения. На них уже создана быстрая память для компьютеров, в которой биты информации представлены токами в сверхпроводящем контуре.

На сверхпроводниках делают чувствительные квантовые интерферометры и индикаторы сверхмалых напряжений. В современной медицине широко используют электронную томографию. Ее проводят на сканере с мощными сверхпроводящими электромагнитами. Они создают сильное магнитное поле, позволяющее получать точные срезы тканей человеческого тела.

В 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость: керамика $La-Ba-Cu-O$ перешла в сверхпроводящее состояние при 35 К. Сейчас границу между обычной и высокотемпературной сверхпроводимостью проводят по температуре кипения азота (77 К).

По характеру потери сверхпроводимости в магнитном поле высокотемпературные сверхпроводники относят ко II роду, в некоторых из них критическая напряженность магнитного поля достигает 10 МА/м. Применение

высокотемпературной сверхпроводимости ограничивают низкая плотность критического тока и хрупкость материалов.

Для защиты криогенных приборов от магнитных полей используют однослойные экраны из высокотемпературной сверхпроводящей керамики. Аппараты для снятия электроэнцефалограмм на высокотемпературных сверхпроводящих пленках измеряют очень слабое магнитное поле сердца напряженностью всего 10^{-7} А/м. Слабые отклонения магнитного поля Земли фиксируют геофизическими приборами на высокотемпературных сверхпроводниках; их уже используют при поиске нефтяных и минеральных месторождений. Пленки из высокотемпературных сверхпроводников есть в приемниках инфракрасного излучения — болометрах. Небольшой нагрев активного элемента болометра при поглощении излучения вызывает скачок сопротивления такой пленки, что и регистрирует прибор. Время срабатывания ключа с лазерным управлением на такой пленке составляет всего 10^{-10} с. При подаче на активный элемент очень слабого оптического излучения пленка теряет сверхпроводимость. Такой ключ может быть использован для управления работой микропроцессора.

В 2018 году установлен рекорд — при охлаждении наноструктурированного серебра на золотой подложке получен переход при температуре -37 °С.

Глава 3. Полупроводники

К полупроводникам относят материалы с удельным сопротивлением $10 \text{ мкОм}\cdot\text{м} \dots 100 \text{ МОм}\cdot\text{м}$ и шириной запрещенной зоны $0,1 \dots 4 \text{ эВ}$.

Свойства полупроводников зависят от разнообразных внешних воздействий: температуры, давления, полей, излучений; это делает возможным их использование в цепях управления энергией и информацией. В отличие от проводников, с ростом температуры проводимость полупроводников увеличивается.

Лекция 8. Физические процессы в полупроводниках

Свойства полупроводников определяются примесями, изменяющими их удельное сопротивление. Полупроводниковый монокристалл надо сначала очистить от примесей, а затем очень точно легировать нужными элементами. Легирование осуществляют при выращивании монокристалла, в процессе осаждения тонких слоев, диффузионного отжига или ионной имплантации.

Нужная чистота монокристаллов была достигнута лишь к середине XX века. За 70 лет пройден путь от первого транзистора до микропроцессоров, содержащих миллиарды транзисторов. Применение полупроводников привело к революции в радиотехнике, средствах связи, измерительной и вычислительной технике, автоматике, астрономии и медицине.

Полупроводники бывают собственные и примесные.

В собственном полупроводнике примесей мало, при сильном охлаждении он вырождается в диэлектрик. Каждый свободный электрон в нем образуется вместе с дыркой, поэтому электроны валентной зоны также участвуют в проводимости. Это часто представляют как движение положительно заряженных дырок определенной массы. При появлении собственной проводимости работа полупроводниковых приборов обычно нарушается.

Донорами называют примеси, поставляющие электроны в зону проводимости (полупроводник n-типа); акцепторы же забирают электроны (полупроводник p-типа). Бывают примеси внедрения и замещения.

Примеси замещения, валентность которых превосходит валентность основных атомов, будут донорами: для кремния и германия это Sb, P и As. Примеси замещения с валентностью меньшей, чем у основных атомов, будут акцепторами: для кремния и германия это Al, B, Ga, In. Преобладающие носители заряда называют основными. В полупроводниках n-типа основные носители заряда — электроны, а неосновные — дырки.

Простейшая полупроводниковая структура — p-n переход. Его получают, легируя материал таким образом, чтобы в одной части преобладали доноры, а в другой — акцепторы. Ток в p-n переходе зависит от полярности напряжения:

прямой ток сильно превосходит обратный: то есть р-п переход работает как выпрямитель. Один р-п переход называют диодом, а два, включенные во встречном направлении — транзистором.

При увеличении содержания доноров полупроводник вырождается. Концентрация электронов в вырожденном полупроводнике n-типа не зависит от температуры, он проводит ток и при сильном охлаждении. Такие материалы называют полуметаллами.

Концентрация неосновных носителей заряда сильнее зависит от температуры, чем основных; она определяет обратный ток диода.

Важна и подвижность носителей, зависящая от длины их пробега и ускорения носителя в электрическом поле; электроны подвижнее дырок. Подвижность носителей в полупроводниках может превосходить подвижность электронов в металлах на несколько порядков, но в металлах носителей неизмеримо больше.

Температурная зависимость удельного сопротивления полупроводника представляет собой суперпозицию зависимостей концентрации и подвижности носителей. Нагрев увеличивает концентрацию носителей и проводимость материала. У вырожденных полупроводников концентрация носителей не зависит от температуры и у них температурная зависимость сопротивления такая же, как и у металлов.

В полупроводниках одновременно идут процессы генерации и рекомбинации противоположно заряженных носителей заряда (электронов и дырок), в результате чего устанавливается динамическое равновесие. Генерацию носителей, кроме температуры, вызывают электрические поля, свет и механические напряжения. Из-за этого образуются избыточные носители. После прекращения нетеплового возбуждения рекомбинация носителей возвращает полупроводник в равновесное состояние.

Рекомбинация определяет время жизни неравновесных носителей заряда. Оно зависит от температуры и максимально в собственном полупроводнике. Это время жизни изменяется в широких пределах от 10^{-2} с до 10^{-12} с, по нему можно судить о чистоте и структурном совершенстве материала.

Поглощение света полупроводником влияет как на свободные, так и на связанные электроны, а также на энергию колебания атомов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Есть несколько механизмов поглощения света, каждому соответствует своя область спектра. Квантовым выходом внутреннего фотоэффекта называют отношение числа неравновесных носителей заряда к числу поглощенных фотонов.

Фотопроводимость (фоторезистивный эффект): изменение сопротивления полупроводника при воздействии электромагнитного излучения. Это разность между проводимостью на свету и в темноте.

К неравновесным явлениям относят и люминесценцию — нетепловое излучение, длительность которого сильно превышает период световых колебаний. Для этого вещество надо вывести из равновесия, то есть возбудить.

При люминесценции процессы возбуждения и излучения разделены во времени промежуточными процессами.

Различают электролюминесценцию (возбуждение электрическим полем), фотолюминесценцию (возбуждение электромагнитным полем) и катодную люминесценцию (возбуждение электронами). Люминесценция связана с рекомбинацией неравновесных носителей. Работа светоизлучающих диодов основана на электролюминесценции.

Люминофоры — полупроводниковые кристаллы с широкой запрещенной зоной. Люминофор преобразует невидимое излучение в видимое. Так, в лампах дневного света УФ излучение электрического разряда в парах ртути преобразуется в видимый свет. Люминофоры используют в электронно-лучевых трубках и электронных микроскопах.

Спонтанные и вынужденные квантовые переходы вызывают электромагнитное излучение. Вынужденное излучение когерентно (колебания согласованы во времени), а спонтанное — нет.

Когерентное излучение генерирует инжекционный лазер, созданный в 1962 году американцем Холлом на кристалле арсенида галлия. Это полупроводниковый диод, преобразующий электрическую энергию в световую; у него большой КПД и высокое быстродействие.

Полупроводники могут быть кристаллическими и аморфными. Кристаллические полупроводники делят на простые (чистые химические элементы) и сложные (химические соединения и твердые растворы).

Лекция 9. Простые полупроводники

К простым полупроводникам относят 12 химических элементов: Si, Ge, Se, некоторые модификации Sn и C. Графит ближе к проводникам (у него ширина запрещенной зоны $< 0,1$ эВ), чистый алмаз — диэлектрик. Искусственный алмаз из-за вводимых в него при производстве примесей уже относят к полупроводникам. Наибольшее применение из простых полупроводников находит кремний.

Земная кора на $\frac{1}{3}$ состоит из Si, добывают его из чистого кварцевого песка, на 99 % состоящего из кремнезема SiO_2 . У кремния три стабильных изотопа: ^{28}Si (92 %), ^{29}Si (5 %) и ^{30}Si (3 %). Кремний плавится при 1414°C , его удельное сопротивление ≈ 3 кОм \times м, плотность $2,33$ т/м 3 , в холодной воде он не растворяется, с большинством кислот не реагирует. При нагреве на воздухе устойчив до 900°C .

Технология производства кремниевых монокристаллов включает следующие операции: получение технического кремния из кремнезема; превращение его в летучее соединение и глубокая очистка; восстановление кремния из этого соединения; выращивание и легирование монокристалла.

Технический кремний получают восстановлением диоксида кремния SiO_2 коксом при $1800\text{ }^\circ\text{C}$; его чистота достигает 99,9 %. Такой кремний используют для раскисления и легирования сплавов, производства поликристаллического кремния и кремнийорганических материалов.

Вытягивают кремниевые монокристаллы из расплава методом Чохральского и родственными методами. Промышленные установки позволяют получить огромные кристаллы диаметром до 200 мм и длиной до 1 м. Недостаток метода: небольшое загрязнение кристалла кислородом от кварцевого тигля. Метод бестигельной зонной плавки дает чистые, но сравнительно мелкие (диаметром до 125 мм) и более дорогие кристаллы.

Легировать кремниевые монокристаллы имплантацией и радиацией. Ионная имплантация нарушает поверхностный слой, его восстанавливают отжигом. Радиационным методом получают высокоомные кристаллы.

При изготовлении интегральных схем широко применяют эпитаксию (послойное осаждение) кремния на диэлектрические подложки из сапфира и кварца. Это дает отличную изоляцию между элементами схемы.

Кремний на воздухе пассивируется, но для серьезной защиты этого недостаточно. Оксидное покрытие дополнительно усиливают окислением в кислороде при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Такой защитный слой выполняет и барьерные функции: он препятствует загрязнению материала.

Хорошие защитные свойства у пленок аморфного нитрида кремния Si_3N_4 ; их получают азотированием кремния в среде аммиака при высокой температуре.

В кремниевой электронике используют только поверхность кристалла, поэтому очень важно ее качество. При создании некоторых элементов поверхность модифицируют: обрабатывают реагентами и облучают.

Поликристаллический кремний также применяют в производстве ИС. Его наносят на окисленную поверхность монокристаллической пластины для уменьшения размеров и снижения энергоемкости изделия. Его используют в солнечных батареях с малым ($\sim 10\%$) КПД. Высокоомный поликристаллический кремний в сочетании с оксидным слоем SiO_2 используют для создания изоляции между элементами ИС.

Из кремния делают диоды, транзисторы, интегральные схемы, солнечные батареи, зеркала для лазеров. Силовая кремниевая электроника работает при напряжениях до 10 кВ и токах до 7 кА.

Химические соединения кремния служат основой для производства стекла, цемента и силикатной керамики: кирпича, фарфора, фаянса. В технике широко применяют силикатный клей и разнообразные кремнийорганические соединения — силиконы.

У аморфных кремниевых пленок удельное сопротивление $\approx 100\text{ МОм}\cdot\text{м}$. Их нельзя получить закалкой расплава, это не стекло: при нагревании этот материал не течет. Аморфный кремний осаждают в водороде и называют гидрогенизированным.

Пленки аморфного кремния получают из моносилана SiH_4 в плазме тлеющего разряда и применяют в фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии. Для управления оптическими свойствами аморфных полупроводников наряду с гидрогенизированным кремнием все чаще применяют его сплавы с углеродом и азотом.

Германий: хрупкий полупроводник с узкой (0,7 эВ) запрещенной зоной. Он плавится при 936 °С, плотность 5,3 т/м³. В литосфере $\text{Ge} < 0,001 \%$, это рассеянный элемент, его трудно добывать. Получают германий как побочный продукт цинкового производства, коксования углей, а также из германиевых концентратов Cu-Pb-Zn .

Германий устойчив на воздухе, в воде и некоторых слабых кислотах. При плавлении его плотность возрастает (как и у Si). В жидком состоянии это проводник с удельным сопротивлением $\approx 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ и его можно разогреть индукцией, что используют при очистке кристаллов.

Германиевые монокристаллы получают методом Чохральского и затем легируют Ga, Sb и As. У низколегированных монокристаллов из-за малой подвижности носителей заряда положительный температурный коэффициент удельного сопротивления. При сильном легировании германий вырождается.

Германий устойчив при нагреве до 650 °С, затем окисляется до GeO_2 . Оксид, в отличие от SiO_2 , не защищает германий от дальнейшего окисления.

Из германия делают лавинно-пролетные и туннельные диоды, импульсные и СВЧ-диоды, фотодиоды, транзисторы, варикапы и тензодатчики. Узкая запрещенная зона ограничивает рабочую температуру 80 °С.

На германии были созданы первые транзисторы, но он оказался непригоден для производства интегральных схем и ушел в тень кремния. Высокая подвижность носителей заряда позволяет делать из германия датчики Холла (реагируют на магнитное поле) и детекторы радиации.

У германия очень большой (~ 4) коэффициент преломления инфракрасных лучей. Для тепловой оптики нужны крупные кристаллы, из них делают линзы для тепловизоров и приборов дистанционного измерения температуры.

У селена четыре аллотропные модификации: две кристаллические и две аморфные. Он резко увеличивает проводимость при освещении, из селена делают светочувствительные барабаны ксероксов и лазерных принтеров, фотоэлементы солнечных батарей и экспонометров. Селеновые выпрямители способны преобразовывать огромные мощности.

В полупроводниковых технологиях применяют много сплавов и химических соединений селена (селенидов). На изотопе ^{74}Se создан плазменный УФ-лазер. Радиоактивный изотоп ^{75}Se используют как источник гамма-лучей в дефектоскопах. Селеновые диоды при пробое восстанавливаются и не требуют замены — редкое качество.

Теллур — узкозонный полупроводник. Его сплавы применяют в компакт-дисках, соединения используют в термоэлектрогенераторах с высоким (теоретически до 75 %) КПД.

Лекция 10. Сложные полупроводники

К сложным полупроводникам относят химические соединения, твердые растворы, аморфные сплавы и органические материалы.

Полупроводниковые химические соединения бывают многокомпонентные и бинарные. Из бинарных особенно часто применяют карбид кремния SiC и арсенид галлия GaAs.

Чистый карбид кремния представляет собой бесцветные кристаллы. Технический карбид кремния (карборунд) бывает белым, серым, желтым, зеленым и даже черным.

Получают карбид кремния восстановлением кварцевого песка углеродом при температуре 2700 °С. Затем из этого порошка выращивают монокристаллы диаметром до 75 мм и легируют их азотом и алюминием. После эпитаксией или ионной имплантацией формируют поверхностную структуру.

Карбид кремния прочен (~1 ГПа, а нитевидные монокристаллы ~30 ГПа), очень тверд (9 баллов), хрупок, теплопроводен, химически инертен и устойчив к радиации. Это тугоплавкий и широкозонный полупроводник с рабочей температурой, достигающей 700 °С.

Методы вытягивания монокристаллов из расплава к тугоплавкому (3000 °С) карбиду кремния неприменимы. Монокристаллы выращивают в вакууме из газовой фазы или из растворов. В качестве сырья используют порошок карбида кремния, синтезированный из кремния и углерода. Площадь микросхем из карбида кремния мала, она не превышает 3×3 мм из-за высокой пористости материала.

Основной метод формирования приборных структур на подложках из карбида кремния — эпитаксия. Ее ведут осаждением из газа при температуре 1500 °С. Применяют и ионную имплантацию. У кристаллов карбида кремния проводимость примесная; собственная появляется лишь при нагреве до 1500 °С.

Интересная особенность карбида кремния — образование множества (более сотни) кристаллических модификаций (политипов), устойчиво существующих в широком интервале температур.

Карбид кремния генерирует излучение в видимой области спектра, на нем была открыта электролюминесценция (Лосев, 1923 год). Подбирая подходящий политип, можно получить любой цвет, что используют при создании разноцветных светодиодов. Так, голубой цвет получают, легируя кристаллы карбида кремния алюминием.

Уникальное сочетание свойств (высокая теплопроводность, прочность и твердость) обеспечивает карбиду кремния перспективы применения в силовой электронике. Его используют в приборах, работающих в горячих, агрессивных и радиоактивных средах. Из карбида кремния делают зеркала лазеров, светодиоды, транзисторы, нагреватели и варисторы. Ограничение: малая (3×3 мм) площадь микросхем. В металлообработке и стоматологии карбид кремния используют как абразив для шлифования твердых материалов.

Керамика из карбида кремния химически инертна, жаропрочна и жаростойка. Получают ее из субмикронных порошков спеканием при температуре выше 2000 °С.

Арсенид галлия из-за большой подвижности электронов способен работать на высоких частотах. Из него делают светодиоды и ИС, полевые транзисторы. Это второй после кремния полупроводник. На кристалле GaAs в 1962 г. был создан инжекционный лазер. Такие светодиоды и лазеры есть в вычислительной, космической и бытовой технике. Арсенид галлия — лучший материал для солнечных батарей. Он превосходит кремний по термической и радиационной стабильности, у него выше КПД термоэлектрического преобразования. Монокристаллы GaAs выращивают методами Чохральского и Бриджмена. Диаметр — до 150 мм.

Нитрид галлия GaN и фосфид галлия GaP используют для генерации видимого (а не инфракрасного) излучения.

Антимонид галлия GaSb чувствителен к механическим напряжениям. Из него делают тензометры, термофотоэлектрические генераторы, инфракрасные светодиоды и туннельные диоды.

У антимонида индия узкая запрещенная зона и очень подвижные электроны. Его относят к вырожденным полупроводникам со слабой зависимостью проводимости от температуры. Из антимонида индия делают туннельные диоды, магниторезисторы, детекторы ИК излучения, датчики Холла (реагируют на магнитное поле).

Фосфид индия InP используют при производстве полевых транзисторов и других СВЧ-приборов. На его подложке выращивают гетероструктуры для инжекционных лазеров и светодиодов, фотоприемники для систем волоконно-оптических линий связи.

Технология получения полупроводниковых соединений отличается от технологии простых полупроводников наличием операции синтеза. Синтез антимонидов осуществляют сплавлением компонентов, например, индия и сурьмы. Операции очистки, выращивания и легирования монокристаллов не отличаются.

У тонких пленок халькогенида свинца высокая фоточувствительность в инфракрасной области спектра. Их используют для фоторезисторов и применяют в качестве детекторов инфракрасного излучения.

Твердые полупроводниковые растворы замещения образуют компоненты с близким размером атомов и одним типом кристаллической решетки. Хорошо изучены двойные и некоторые тройные растворы.

Полупроводниковые сверхрешетки состоят из последовательности различных монокристаллических слоев. Период чередования слоев должен быть меньше длины пробега электрона, но больше периода решетки. В этой группе синтетических полупроводниковых гетероструктур сильно проявляются эффекты размерного квантования. Сверхрешетки позволили уменьшить расходимость лазерного луча в пространстве, повысить мощность лазеров.

Аморфные полупроводники получают резким охлаждением расплава. Их делят на оксидные и халькогенидные ($As_{40}S_{60}$, GeS_2 , Te_2Se). Оксидные стекла в электрическом поле резко изменяют сопротивление, их используют в качестве элементов памяти и пороговых переключателей. Халькогенидные стекла обладают внутренним фотоэффектом, они прозрачны для инфракрасных лучей. Их используют для создания датчиков температуры, светодиодов, для оптической записи информации.

Органические полупроводники эластичны, из них делают гибкие элементы (шлейфы с микросхемами), фотоэлементы и OLED панели.

Глава 4. Диэлектрики

У диэлектриков удельное сопротивление более $100 \text{ МОм}\cdot\text{м}$, а ширина запрещенной зоны превышает 4 эВ.

Лекция 11. Физические процессы в диэлектриках

Диэлектриками Майкл Фарадей назвал материалы, пропускающие электрическое поле. Оно отклоняет связанные заряженные частицы (электроны и ионы) от положения равновесия, это называют поляризацией. В идеальном диэлектрике свободных носителей заряда нет и его сопротивление бесконечно. В реальных материалах свободные заряды есть, и их движение при приложении поля вызывает ток утечки.

Диэлектрические свойства материала: диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность, вид и степень поляризации, потери мощности...

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в вакууме больше, чем в материале (то есть во сколько раз материал ослабляет поле). Она зависит от степени поляризации материала.

Поляризация может быть вынужденная и спонтанная. Ее вызывают механические напряжения и изменение температуры.

Вынужденная поляризация бывает упругая и релаксационная. К упругой поляризации относят электронную и ионную.

Электронная поляризация состоит в деформации электронных оболочек атомов в электрическом поле. Она очень быстрая: завершается за 10^{-15} с, энергию не рассеивает и материал не нагревает.

Ионная поляризация заключается в смещении ионов от положения равновесия. Она не такая быстрая (завершается за 10^{-12} с), так как ионы значительно тяжелее электронов.

Релаксационная поляризация бывает дипольная и ионная.

Дипольная поляризация встречается у материалов с полярными молекулами и связана с их поворотом в электрическом поле. Завершается она за время $\sim 10^{-6}$ с, это время зависит от подвижности молекул (от температуры). После снятия поля происходит релаксация и материал возвращается к прежнему состоянию.

Ионная поляризация встречается в диэлектриках с ионными связями между атомами: стекле, керамике, ситаллах.

За пределами радиочастотного диапазона ($f > 100 \text{ ГГц}$) возможна только упругая поляризация. В УФ и видимой областях спектра возможна лишь электронная поляризация. На частотах $f > 10^7 \text{ ГГц}$ (рентген) поляризации нет, а диэлектрическая проницаемость любого материала равна 1.

По реакции на электрическое поле диэлектрики делят на нелинейные и линейные. В нелинейных диэлектрическая проницаемость сильно зависит от внешнего электрического поля. Пример: сегнетоэлектрики. У линейных диэлектриков диэлектрическая проницаемость не зависит от поля. Они бывают неполярные, полярные и ионные.

У неполярных диэлектриков поляризация электронная, диэлектрическая проницаемость мала (меньше 3) и слабо зависит от температуры. Это алмаз, полистирол, полиэтилен, сера, парафин; жидкости: бензин, масло, бензол.

Полярные диэлектрики состоят из дипольных молекул; это эпоксидные смолы, вода (диэлектрическая проницаемость равна 80), жидкие кристаллы, кремнийорганические соединения, глицерин.

У ионных диэлектриков есть и упругая, и релаксационная поляризация. Это ионные кристаллы: каменная соль NaCl (диэлектрическая проницаемость 6), корунд Al_2O_3 (диэлектрическая проницаемость 10), рутил TiO_2 (80).

У аморфных сред диэлектрическая проницаемость 4...20.

Смещение зарядов при поляризации порождает быстро затухающие токи смещения, а наличие свободных носителей заряда — сквозные токи. Ток утечки складывается из тока смещения и сквозного тока. Ток смещения зависит от частоты поля, его нет при постоянном напряжении.

Ток утечки состоит из объемной и поверхностной составляющих. Объемный ток зависит от вида носителей заряда (обычно это ионы), их концентрации и подвижности. Поверхностный ток связан с наличием влаги, он зависит от смачиваемости материала. Хорошо смачиваемые материалы называют гидрофильными, а плохо смачиваемые — гидрофобными.

Потери мощности в диэлектрике связаны с превращением электрической энергии в тепловую. В переменном электрическом поле потери мощности вызывают не только токи утечки, но и такие процессы в материале, как релаксация, ионизация, резонанс и электрический гистерезис.

Важной характеристикой диэлектрика является его электрическая прочность — пробивное напряжение, деленное на толщину изоляции.

Электрическая прочность газов зависит от многих параметров. Для воздуха при межэлектродном расстоянии 1 см она равна 30 кВ/см, а для зазора 0,1 мм — в 3 раза больше. Такую же электрическую прочность имеют азот и кислород.

Электрическая прочность жидкостей зависит от их чистоты. Очень чистые жидкости превосходят газы по этому показателю на 1...2 порядка. У чистого трансформаторного масла электрическая прочность ≈ 400 кВ/см, но даже незначительное (0,01 %) загрязнение водой в несколько раз снижает ее. Пробой в жидкости развивается медленно, она хорошо держит импульсные нагрузки.

Газы после пробоя восстанавливают свойства, жидкости восстанавливают частично, а твердые диэлектрики необратимо разрушаются.

Пробой диэлектрика: электрический, тепловой и электрохимический.

При электрическом пробое материал разрушается электрическим полем. Когда энергия ускоренных полем электронов превысит ширину запрещенной зоны, начинается ударная ионизация. Каждый свободный электрон выбивает из узлов решетки несколько новых: образуется лавина. Электрическая прочность твердых диэлектриков лежит в пределах 1...10 МВ/см. Электропробой обычно происходит при импульсных нагрузках, не успевающих нагреть материал.

При тепловом пробое происходит термическая деструкция материала. Такой прожог развивается медленно и завершается электрическим пробоем.

Электрохимический пробой вызывается химическими превращениями в материале. Этот процесс называют электрическим старением диэлектрика.

Поверхностный пробой материал не разрушает. Его затрудняют увеличением длины разрядного пути, делая поверхность волнистой.

Физико-химические свойства диэлектриков: теплопроводность, тепловое расширение, рабочие температуры, влагостойкость и радиационная стойкость.

Диэлектрик с высокой теплопроводностью меньше нагревается и лучше сопротивляется термической деструкции и тепловому пробоем.

Радиация увеличивает концентрацию дефектов в кристаллической решетке, вызывает химические превращения, нагревает диэлектрик. Высокая радиационная стойкость у кварца, слюды, глинозема, оксидов циркония и бериллия. Многие облученные материалы восстанавливают первоначальные свойства после отжига.

Лекция 12. Неорганические диэлектрики

Керамика, стекло, слюда, асбест; некоторые жидкости и газы.

Керамику получают спеканием (обжигом) минеральной шихты, состоящей из хорошо очищенных глин. Керамика содержит аморфную, кристаллическую и газовую фазы. Ее механические свойства зависят от состава кристаллической фазы, а технологические — от аморфной. Диэлектрические свойства керамики ухудшают газовые поры.

По назначению керамику делят на установочную, конденсаторную, нагревостойкую и вакуумную; по структуре — на грубую (кирпич, шифер, черепица), тонкую однородную (фарфор), пористую мелкозернистую (фаянс) и высокопористую теплоизоляционную.

Фарфор — жаропрочная керамика, полученная обжигом минеральной шихты, состоящей из кварца, полевого шпата, каолина и глины. Для уменьшения поверхностной проводимости фарфоровые изоляторы обычно покрывают гидрофобной глазурью. Недостаток фарфора — высокая хрупкость. По твердости его делят на два класса: твердый (изоляторы, посуда) и мягкий (художественные изделия).

Диэлектрическая керамика: стеатитовая, алюмооксидная, титановая, электрофарфор и радиофарфор.

Стеатитовая керамика (на основе талька) бывает высоковольтная и высокочастотная. Она прочнее фарфора и работает до 300 °С. Из нее делают корпуса катушек и конденсаторов, ламповые панели.

Твердая и прочная алюмооксидная керамика (спеченный порошок Al_2O_3) по диэлектрическим свойствам превосходит фарфор. Из нее делают корпуса микросхем и электровакуумных приборов.

Электрофарфор содержит 70 % SiO_2 и 25 % Al_2O_3 . У него низкая пористость, высокое (10^{12} Ом×м) удельное сопротивление и электрическая прочность, достигающая 30 кВ/мм. Электрофарфор хорошо работает на низких частотах: из него делают изоляторы для воздушных линий электропередач и нагревательных элементов, патроны ламп накаливания, предохранители, розетки, корпуса резисторов.

Радиофарфор дополнительно обогорожен тяжелым оксидом ВаО. Его развитием является прочный ультрафарфор с высоким содержанием Al_2O_3 .

Стекла для электроизоляции используют разные: от легкоплавких натриевых до тугоплавких кварцевых. Электрическая прочность стекла достигает 50 кВ/мм, но с повышением частоты поля она уменьшается. Лучшие диэлектрические свойства у кварцевых стекол.

Из стекла делают электронные и осветительные лампы, кварцевые трубки нагревателей, изоляторы линий электропередач. Недостатки у стекла те же, что и у керамики: высокая хрупкость и малая прочность на растяжение.

Прочность стекла повышают закалкой и химической обработкой. Закалка стекла состоит в нагреве и быстром (но равномерном: иначе треснет) охлаждении. Возникающие сжимающие напряжения повышают прочность на растяжение. Закаленное стекло безопасно: при разрушении оно дает мелкие осколки, его используют в автомобилях и торговых центрах. Закаленное стекло нельзя резать, оно рассыпается.

Химическая закалка стекла заключается в обработке реактивами, замещающими ионы натрия более крупными ионами калия. Возникающие при этом сжимающие напряжения упрочняют стекло. Химическая обработка особенно эффективна для тонких стекол.

Слюда — прочный минеральный алюмосиликат, расщепляющийся на тонкие (до 1 мкм) гибкие пластинки. Плотность 2,5 т/м³, твердость 3 балла. У слюды высокая электрическая прочность и термостойкость. В электротехнике обычно используют мусковит и флогопит.

Синтетическая слюда (фторфлогопит) превосходит минеральную по прочности и термостойкости. Из нее делают изоляцию в конденсаторах, радиолампах и нагревателях. Детали из слюды применяют для крепления арматуры в электронных приборах.

Асбест — природное волокно, «горный лен». Выпускают его в виде листов, нитей и пряжи. Используют для тепло- и электроизоляции в низковольтных (до 1 кВ) установках. Это уникальный материал: прочную и огнестойкую асбестовую ткань можно очищать огнем. Цемент, упрочненный асбестом, называют шифером. Пыль асбеста токсична.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, состоящие из аморфной и кристаллической фаз. От стекол они отличаются кристаллической фазой, а от керамики — однородной структурой. Получают ситаллы кристаллизацией специальных стекол в уже сформированном изделии. Ситаллы бывают технические (оксидные), петроситаллы (на основе базальтов) и шлакоситаллы (на основе металлургических шлаков). Свойства стекол в основном определяются их составом, а для ситаллов важны структура и фазовый состав.

Ситаллы твердые, термически и химически стойкие, прочные (5 ГПа) на сжатие и слабые (150 МПа) на растяжение, их удельное сопротивление достигает 10^{12} Ом \times м, а электрическая прочность — 70 кВ/мм. Ситаллы используют для высоковольтной изоляции и изоляции печатных схем, из ситаллов делают жаропрочную посуду (кастрюли, жаровни).

Жидкие диэлектрики применяют для заливки электронной аппаратуры, в трансформаторах и генераторах электроэнергии, конденсаторах и кабелях, выключателях (дугогасителях) и для пропитки бумаги. По электрической прочности и теплопроводности они превосходят газы. Это специальные электроизоляционные масла (нефтяные, растительные) и разнообразные синтетические жидкости.

Нефтяные масла: трансформаторное, конденсаторное, кабельное... Недостатки масла — пожароопасность и гигроскопичность.

Трансформаторное масло — неполярный диэлектрик. Его электрическая прочность лежит в пределах 10...30 кВ/мм. Основная примесь — вода — сильно увеличивает электропроводность масла и диэлектрические потери.

Конденсаторное масло получают из трансформаторного глубокой очисткой; его диэлектрические свойства лучше. Это масло используют для пропитки конденсаторной бумаги.

Синтетические жидкости: кремнийорганические и фторорганические.

Кремнийорганические соединения экологически безопасны, нетоксичны, не гигроскопичны и не вызывают коррозии. Популярны в недалеком прошлом хлорированные углеводороды (совол, совтол) сейчас запрещены.

Диэлектрическая проницаемость газов близка к 1. Для изоляции в электротехнике используют воздух, элегаз (гексафторид серы SF₆) инертные и другие газы.

Элегаз в пять раз плотнее воздуха и в три раза превосходит его по электрической прочности. Этот нетоксичный газ используют как диэлектрик, теплоноситель, хладагент и звукоизолятор в стеклопакетах. Скорость звука в нем ниже, чем в воздухе, что приводит к комическому эффекту при вдыхании: голос становится низким и грубым.

Лекция 13. Органические диэлектрики

Органика бывает природного и синтетического происхождения.

Природные смолы при нагревании размягчаются, в воде нерастворимы, но растворяются в спиртах. Это шеллак, канифоль и янтарь.

Шеллак получают переработкой веществ, производимых из древесного сока тропическими насекомыми, выращиваемыми на специальных фермах. Используют его в виде электроизоляционных, клеящих и декоративных лаков, а также в пиротехнике как горючее. До изобретения винила из шеллака делали грампластинки. Шеллак съедобен: из него делают глазурь для таблеток и конфет.

Канифоль получают из хвойной смолы. Это хрупкое аморфное вещество используют для пропитки диэлектрической бумаги, как флюс для пайки меди, стали и цинка, для производства электроизоляционных компаундов. Канифоль входит в состав фенолформальдегидных пластмасс.

Янтарь — окаменевшая смола древних хвойных растений. Хрупкий аморфный полимер, хороший диэлектрик с очень большим ($\approx 10^{17}$ Ом \times м) удельным сопротивлением. Плавится янтарь при 300 °С, на воздухе окисляется и горит, при трении электризуется. Янтарным лаком повышают поверхностное сопротивление изоляторов.

Органические полимерные материалы синтезируют полимеризацией и поликонденсацией. Полимеризация объединяет однородные момеры в макромолекулы без выделения побочных веществ, а поликонденсация — с выделением.

В полусинтетических материалах есть природные и синтетические компоненты. Это парафин, минеральное масло, электротехническая бумага, синтетический шелк, фанера, модифицированная древесина.

У трансформаторного масла высокая чистота и низкая вязкость. Заливка маслом улучшает изоляцию и теплоотвод в электромашинах.

Бумага электротехническая пропитана парафином или маслом. Она бывает конденсаторная, кабельная, телефонная и картонная.

Синтетический шелк применяют как дополнительную изоляцию. Провод МГШВ: монтажный гибкий шелковая и виниловая изоляция.

Фанера: деревянный шпон (широкая стружка твердой древесины: бука, тополя, березы), склеенный фенолформальдегидной смолой. Из фанеры делают корпуса колонок и другие изделия.

Синтетические диэлектрики — полимеры (полиэтилен, полипропилен, полистирол) и пластмассы (фторопласты, текстолиты, гетинаксы).

Полиэтилен устойчив во многих кислотах и щелочах. Он размягчается при 80 °С и плавится при 140 °С; его трудно клеить и красить, но можно сваривать. Из полиэтилена делают корпуса приборов, трубы для холодной воды, упаковку, тару для жидкостей, изоляторы высокочастотных разъемов. Изоляция из полиэтилена для кабелей работает десятки лет.

Полиэтилен низкой плотности получают при высоком давлении, его молекулярные цепи сильно ветвятся, он эластичнее. Полиэтилен высокой плотности получают при низком давлении, он жестче.

Полипропилен похож на полиэтилен высокой плотности. Химически менее стойкий, но более жесткий и тугоплавкий. Из него делают трубы для воды, изоляцию конденсаторов, упаковку, волокна. Из нетканого полипропилена делают влажные салфетки и фильтры для воды.

Полистирол — прозрачный хрупкий пластик. Из него делают линзы для очков. Пенополистирол (пенопласт) — теплоизоляция и упаковка.

Если при полимеризации стирола добавить акрилонитрил и бутадиен, то получится прочный АБС-пластик — популярный материал для 3D-печати.

Политетрафторэтилен (фторопласт-4) химически очень инертен, из-за чего его трудно красить и клеить. Этот мягкий белый полимер работает до температуры 250 °С. При нагреве он размягчается, но не течет. Формуют фторопласт прессованием и спеканием порошка.

Фторопласт и другие фторполимеры выпускают под торговой маркой «тефлон». Это антипригарное и антифрикционное покрытие, из него делают накладки на трущихся поверхностях (направляющих столов станков). Фторопласт — хороший диэлектрик. Монтажный гибкий теплостойкий провод (МГТФ) во фторопластовой изоляции при пайке не течет. Ленту ФУМ (фторопластовый уплотнительный материал) используют как герметик.

Из поливинилхлорида (ПВХ) делают изоляцию, изоленту, игрушки.

Полиэтилентерефталат (ПЭТ, полиэстер) — пластик, прозрачный в аморфном и белый в кристаллическом состоянии. Из него делают платы, изоляцию, бутылки, пленку, флисовую ткань для толстовок.

Силиконы — полимерные кремнийорганические соединения с основой -Si-O-Si-O-. Они очень разные: от жидких составов до смол и эластомеров. Силиконы химически инертны, из них можно делать импланты и посуду. У силиконов малая адгезия, к ним ничего (кроме стекла) не липнет, их трудно клеить. На морозе они не дубеют, при нагреве не оплывают. Из силиконов делают изоляцию, герметики, эластичные элементы: трубки, прокладки.

Полиимид (каптон) — термостойкий (400 °С) желтый полимер. Из него делают гибкие печатные платы (шлейфы со схемами) и изоляторы.

Из полиамидных волокон (капрон, нейлон) делают прочные нити и тросы. Из полиамида, упрочненного стекловолокном, делают детали мебели, слабо нагруженные шестерни.

Полиметилметакрилат (плексиглас, оргстекло, акрил) — прозрачный пластик. Устойчив к горюче-смазочным веществам и ультрафиолету. Хорошо формуется в разогретом состоянии. Этот самый доступный из прозрачных полимеров широко используется в торговом оборудовании.

Поликарбонат — прочный прозрачный пластик. Из него делают компакт-диски и защитные шлемы.

Бакелит (карболит) — твердый реактопласт, формуемый горячим прессованием. Был популярен в прошлом веке, сейчас вытеснен термопластами.

Гетинакс — прессованная бумага, пропитанная эпоксидной смолой. Из него делают печатные платы, отделку вагонов, автобусов, столешниц.

Текстолит — ткань, пропитанная термореактивным связующим. Из него делают шайбы, перегородки, шестерни. Устойчив в воде и горюче-смазочных веществах. Стеклотекстолит — стеклоткань с эпоксидной смолой; из него делают печатные платы, корпуса малых судов, баллоны...

Резина — многокомпонентный материал на основе каучуков. Резина из натуральных каучуков прочна и термопластична, но горит и быстро стареет. Изоляция из натурального каучука применяется в гибком кабеле КГ.

Синтетические каучуки получают полимеризацией бутадиена. Из них делают морозостойкую устойчивую к старению изоляцию кабелей.

Лекция 14. Активные диэлектрики

Свойства активных диэлектриков сильно зависят от разнообразных внешних воздействий, что позволяет использовать их в цепях управления. Это сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты.

У сегнетоэлектриков (ферроэлектриков) спонтанная поляризация и огромная (сотни тысяч) диэлектрическая проницаемость, зависящая от напряженности электрического поля и температуры. Это ионные (BaTiO_3 , LiNbO_3 , PbTiO_3) и дипольные кристаллы (сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$).

Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков связана с их доменной структурой, она нелинейно зависит от напряженности электрического поля. В переменном поле они обнаруживают диэлектрический гистерезис, площадь петли которого — важная характеристика сегнетоэлектрика: чем она больше, тем выше потери энергии.

Сегнетоэлектрические свойства проявляются лишь в определенном интервале температур. При нагреве до температуры Кюри сегнетоэлектрическое состояние сменяется параэлектрическим, доменная структура и спонтанная поляризация при этом исчезают.

Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от напряженности поля позволяет использовать их для изготовления датчиков напряженности и варикондов — нелинейных конденсаторов, емкость которых зависит от напряжения.

Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от температуры позволяет делать датчики температуры, приемники инфракрасного излучения и очень емкие конденсаторы.

Сегнетокерамику используют как диэлектрик в конденсаторах, емкость которых изменяется при нагреве таким образом, чтобы компенсировать изменение емкости других конденсаторов в электрической цепи.

У некоторых сегнетоэлектриков ярко выражен электрооптический эффект, заключающийся в изменении коэффициента преломления световых лучей в электрическом поле. Такие свойства сегнетоэлектрических кристаллов используют для модуляции лазерного излучения электрическим полем.

Пьезоэлектрики поляризуются при механическом воздействии (прямой эффект) и деформируются в электрическом поле (обратный эффект). Самый известный пьезоэлектрик — кварц монокристаллический: безводный диоксид SiO_2 , крупные прозрачные кристаллы которого называют горным хрусталем.

Пьезоэлектрики используют в датчиках деформаций, детонаторах, акселерометрах, зажигалках, трансформаторах и излучателях ультразвука. Это пьезоэлектрическая керамика, кварц, топаз и другие минералы.

Пьезоэлектрические преобразователи используют в кварцевых часах и устройствах позиционирования, а трансформаторы — в подсветке ноутбуков. Акустические преобразователи находят применение в ультразвуковой диагностике. В японском метро есть станция с пьезоэлектрическим полом, где электричеством, получаемым от давления ног, запитаны турникеты.

Пироэлектрики поляризуются при изменении температуры. Это янтарь, минерал турмалин, некоторые полимерные пленки. Обычно они являются и пьезоэлектриками, а многие еще и сегнетоэлектриками. Пироэлектрики используют в индикаторах излучений.

Электреты долго (от нескольких часов до нескольких лет) сохраняют поляризацию и создают вокруг себя электрическое поле. Бывают термоэлектреты, фотоэлектреты, электроэлектреты (электризуются полем), короноэлектреты, радиоэлектреты и трибоэлектреты. Они могут быть органическими (фторопласт, лавсан) и керамическими.

Электреты применяют для создания электрических полей (фильтры для очистки газов, линзы для фокусировки электронов), для преобразования малых перемещений в электросигналы (микрофоны, клавиши), в электрофотографии, дозиметрах и датчиках вибраций.

Жидкие кристаллы находятся в промежуточном (мезоморфном) состоянии между жидкой и кристаллической фазами. У них сильна зависимость свойств от разнообразных внешних воздействий (температура, давление, поля). Известны тысячи соединений, способных находиться в мезоморфном состоянии. Жидкие кристаллы — общее название мезоморфных фаз с разной структурой и свойствами. Их делят на смектические, нематические и холестерические.

Смектические жидкие кристаллы слоистые, в каждом слое молекулы параллельны. Слои смещаются и смектики на ощупь мыльные. Некоторые из них обладают сегнетоэлектрическими свойствами.

У нематических кристаллов молекулы доменов ориентированы вдоль одного общего направления, эти нити подвижны и вязкость такой среды низкая. У них сильная оптическая и электрическая анизотропия свойств.

Форма молекул холестерических жидких кристаллов пластинчатая: это плохо упорядоченные нематические кристаллы. У таких сред уникальные оптические свойства: они меняют цвет при изменении температуры и состава, их используют для визуализации высокочастотных полей, в термоиндикаторах цвета, для преобразования инфракрасного излучения в видимое и для создания ячеек оптической памяти.

По способу получения жидкие кристаллы делят на термотропные и лиотропные. Лиотропные кристаллы образуются при растворении твердых кристаллов в определенных растворителях. Термотропные кристаллы мезоморфны лишь в определенном интервале температур: ниже него это твердый кристалл, а выше — жидкость.

Недостатки жидкокристаллических устройств: они сравнительно медленные и быстро стареют.

Кристаллы квантовой электроники: рубин, гранат.

Рубин — красный кристалл корунда Al_2O_3 , легированный хромом (синий корунд называют сапфиром). Это очень твердый (9 баллов) и легкий (4 т/м^3) драгоценный камень первой категории. В лазерной технике используют синтетический бледно-розовый рубин с содержанием хрома 0,05 %.

Гранатами называют разноцветные твердые растворы двух минералов; отдельного камня с таким названием нет. Обычно их именуют по основному минералу, но бывают и собственные названия: родолит, гессонит. Прозрачные гранаты относят к драгоценным камням. Раньше гранат называли карбункулом и приписывали ему магические свойства.

В квантовой электронике обычно используют иттрийалюминиевый гранат $Y_3Al_5O_{12}$, легированный неодимом (~2 %). Лазеры на нем могут работать в режиме непрерывной генерации с мощностью в сотни Ватт и в режиме единичных импульсов с мощностью до 50 МВт.

Стекла для лазерной техники активируют редкоземельными элементами. Они дешевле камней, технологичны и изотропны.

Если основа стекла кварц (SiO_2), то такое стекло называют силикатным. Тяжелые стекла с высоким содержанием оксида свинца называют свинцовыми. Лазерные стекла очень чистые.

Глава 5. Магнитные материалы

Лекция 15. Физические основы магнетизма

Магнетизм порождается движением электрических зарядов. Магнитные свойства материала: магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость, коэрцитивная сила — зависят от движения электронов и их спинов.

Спин — квантовая характеристика элементарной частицы, не имеющая аналогов ни в классической, ни в релятивистской физике. Спин не связан с пространственным движением, но порождает магнитный момент. Принимает целые и полуцелые значения: 0, 0.5, 1, 1.5... Частицы с целым спином называют бозонами, а с полуцелым — фермионами.

Намагниченностью называют магнитный момент единицы объема вещества $J = M/V = kH$, где k — магнитная восприимчивость среды, отражающая ее способность намагничиваться. Размерность у J , как и H , А/м.

Силовая характеристика поля — магнитная индукция $B = \mu_0 \mu H$, где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu = 1+k$ — относительная магнитная проницаемость (показывает, во сколько раз индукция поля в материале больше, чем в вакууме). Размерность B — Тл.

По магнитной восприимчивости материалы делят на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

У диамагнетиков малая отрицательная магнитная восприимчивость (порядка -10^{-6}), не зависящая от внешнего поля и температуры. Диамагнетизм связан с движением электронов на орбитах; он присущ всем веществам, но часто маскируется более сильными магнитными эффектами и заметен лишь там, где магнитный момент атомов равен нулю. Это инертные газы, нефтепродукты, H, N, вода, Cu, Ag, Au, Zn, Hg, Si, Ge, графит, стекло.

Диамагнетик выталкивается из неоднородного магнитного поля, этот эффект Мейсснера особенно ярко выражен у сверхпроводников, являющихся идеальными диамагнетиками с $k = -1$, что в миллион раз больше, чем у других материалов. Магнитное поле генерирует на поверхности сверхпроводника незатухающий ток, экранирующий материал.

У парамагнетиков малая положительная магнитная восприимчивость ($10^{-6} \dots 10^{-3}$), не зависящая от напряженности поля. Атомы в таких средах обладают магнитными моментами, но они не ориентированы и общей намагниченности у материала нет. Магнитное поле их ориентирует, а тепловое движение вносит хаос, поэтому магнитная восприимчивость парамагнетиков зависит от температуры. Парамагнетики слабо втягиваются в неоднородное магнитное поле. Это O, Al, Ti, Mo, Pt...

У ферромагнетиков большая положительная магнитная восприимчивость ($\approx 10^6$), зависящая от напряженности поля и температуры. Они намагничиваются до насыщения в слабых полях, а в переменных полях обнаруживают сильный магнитный гистерезис. Ферромагнитны Fe, Ni, Co и

некоторые редкоземельные элементы (РЗЭ). Есть ферромагнитные сплавы, состоящие только из неферромагнитных компонентов: это сплавы Гейслера.

Свойства ферромагнетиков объясняют их доменным строением. Домен: область, сильно намагниченная даже в отсутствии внешнего поля. Спонтанная намагниченность доменов связана с параллельностью магнитных моментов их атомов. Размер доменов не достигает 100 мкм, поэтому мелкие зерна могут состоять из одного домена. Когда магнитные моменты всех доменов ориентируются вдоль поля, наступает состояние магнитного насыщения. Если ферромагнетик намагнитить до насыщения и убрать поле, его индукция не исчезнет, а уменьшится до величины, называемой остаточной индукцией. Это метастабильное состояние сохраняется долго, что используют для изготовления постоянных магнитов. Чтобы убрать остаточную индукцию, надо приложить поле в обратном направлении. Напряженность этого поля называют коэрцитивной силой материала.

Кривая намагничивания — зависимость магнитной индукции материала от напряженности поля. Кривые намагничивания и размагничивания не совпадают, это называют магнитным гистерезисом.

У антиферромагнетиков ориентация атомных магнитных моментов встречная, у них небольшая положительная магнитная восприимчивость ($10^{-5} \dots 10^{-3}$), зависящая от температуры. При нагреве до точки Нееля магнитная упорядоченность исчезает, и они переходят в парамагнитное состояние. Это Cr, Mn, некоторые редкоземельные элементы и химические соединения.

У ферромагнетиков антиферромагнетизм не скомпенсирован: магнитная восприимчивость большая, она зависит от температуры и напряженности магнитного поля. Это некоторые упорядоченные сплавы и ферриты.

Ферриты: соединения Fe_2O_3 с оксидами других металлов. В технике используют сотни разных ферритов. Часто встречается феррит со структурой минерала шпинели $MgAl_2O_4$, состав которого можно выразить формулой $MeFe_2O_4$, где Me — двухвалентный металлический катион.

К слабомагнитным материалам относят диамагнетики, парамагнетики и антиферромагнетики. К сильномагнитным — ферри- и ферромагнетики.

Магнитострикция — изменение объема среды при намагничивании, ее используют для генерации ультразвука. Магнитострикция может быть спонтанная и индуцированная (линейная).

Спонтанная магнитострикция заключается в искажении кристаллической структуры, вызванном спонтанной намагниченностью вещества. Она возникает при переходе из парамагнитного в ферромагнитное состояние при охлаждении материала ниже точки Кюри.

Индукцированная магнитострикция — искажение кристаллов внешним магнитным полем, она может быть как положительной, так и отрицательной, то есть размеры образца могут, как увеличиваться, так и уменьшаться. Большая магнитострикция в ферромагнетиках и ферримагнетиках, где магнитные взаимодействия частиц велики. В антиферромагнетиках, парамагнетиках и диамагнетиках магнитострикция мала.

Обратное явление — изменение намагниченности ферромагнетика при деформации — называют магнитоупругим эффектом Виллари.

Потери энергии при перемагничивании материала складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи, они нагревают ферромагнетик. Вихревые токи порождает самоиндукция, они зависят от частоты поля. Для снижения этих потерь надо уменьшать проводимость материала и делать сердечник из тонких металлических пластин.

По величине коэрцитивной силы материалы делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

У магнитомягких материалов коэрцитивная сила (КС) не достигает 1 кА/м, петля гистерезиса узкая и потери на перемагничивание малы. Из таких материалов делают магнитопроводы и сердечники контуров. Это пермаллой (Fe-Ni сплав, КС = 16 А/м), альсифер (Fe-Al-Si, КС = 2 А/м) и другие сплавы.

У магнитотвердых материалов КС > 4 кА/м, из них делают постоянные магниты. Это стали с W, Mo, Cr, Co (EX3, EX5K5: КС = 13 кА/м). У литых сплавов КС = 30...110 кА/м; это сплавы Fe-Ni-Al (ални), Fe-Ni-Co-Al. У магнитотвердых ферритов КС = 120...240 кА/м. У сплавов Nd-Fe-B она достигает 800 кА/м, их применяют в металлодетекторах, жестких дисках и медицинских томографах.

Лекция 16. Магнитомягкие материалы

У магнитомягких материалов большая индукция насыщения, высокая магнитная проницаемость (до 10^6) и КС < 100 А/м. Они пропускают большие магнитные потоки с малыми потерями. Основной компонент большинства магнитомягких сплавов — железо. Из всех химических элементов у него максимальная индукция насыщения. Самое чистое железо производят электролизом и разложением карбониллов.

Электролитическое железо получают из раствора сернокислого или хлористого железа. Анод делают из железа, а катод — из стали. Осажденный на катоде слой железа толщиной ~5 мм промывают и измельчают в шаровой мельнице, затем отжигают или переплавляют в вакууме.

Карбонильное Fe получают термическим разложением пентакарбонила: $\text{Fe}(\text{CO})_5 = \text{Fe} + 5\text{CO}$; оно чистое по S и P, но не по углероду. Полученный порошок удобен для изготовления магнитных сердечников.

Электротехнической сталью называют технически чистое железо, содержащее С < 0,05 %. Получают ее рафинированием чугуна и используют для изготовления деталей реле, сердечников электромагнитов, магнитных экранов. Главный недостаток железа — малое удельное сопротивление, ограничивающее его применение низкочастотными полями.

Кремнистая электротехническая тонколистовая сталь — основной магнитомягкий металл. Лучшие магнитные свойства у нее при Si = 6,8 %. Но

для улучшения механических свойств содержание кремния ограничивают значением 5 %. В генераторах и динамо-машинах используют изотропные стали, а в силовых трансформаторах — текстурированные анизотропные стали.

Магнитомягкие сплавы: пермаллои, альсиферы...

Пермаллои: Fe-Ni сплавы с малой КС и большой магнитной проницаемостью. Дорогие высоконикелевые пермаллои содержат 72...83 % Ni, а в более дешевые низконикелевые — менее 50 %. На высоких частотах лучше работают низконикелевые пермаллои: у них больше удельное сопротивление. Из низконикелевых сплавов 45Н и 50Н делают сердечники трансформаторов и дросселей, детали магнитных систем.

Альсиферы: твердые и хрупкие сплавы Fe-Si-Al. По свойствам они похожи на высоконикелевые пермаллои: $КС \approx 2 \text{ А/м}$ и $\rho \approx 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Альферы: жаростойкие Fe-Al сплавы, похожие по магнитным свойствам на низконикелевые пермаллои. Из них делают магнитные головки для записи информации.

У Fe-Co сплавов высокая (1050 °С) точка Кюри, большая (до 2,4 Тл) индукция насыщения и $T_{\text{раб}} < 1000 \text{ °С}$. Они проводят большие магнитные потоки. Из сплава 49КФ делают телефонные мембраны, магнитные усилители, роторы и статоры электромашин, сердечники трансформаторов и электромагнитов, ультразвуковые генераторы и преобразователи.

Магнитомягкие аморфные сплавы содержат неферромагнитные и ферромагнитные компоненты. Точка Кюри и коэрцитивная сила у них ниже, чем у кристаллических сплавов того же состава. Стеклообразных магнетиков много, особенно хорошо изучены системы, состоящие на 67 % из Fe или Co, а на 33 % — из редкоземельных элементов.

У аморфных железных сплавов большая индукция насыщения (до 1,5 Тл) и малые магнитные потери. Перспективны аморфные сплавы Fe-Co-Ni с высоким содержанием Co. Они втрое превосходят электротехнические стали и пермаллои по сопротивлению и могут работать на более высоких частотах. Выпускают их в виде ленты и микропроволоки.

Аморфные сплавы тверды, устойчивы к износу и коррозии. Из них делают оплетку для магнитного экранирования проводов, головки для видео- и звукозаписи, фильтры, усилители, модуляторы, обмотки электродвигателей, сердечники трансформаторов, гидроакустические излучатели и приемники, магнитострикционные вибраторы.

Нанокристаллические магнитомягкие железные и кобальтовые сплавы не уступают аморфным, а по температурной стабильности превосходят их.

На звуковых, ультразвуковых и низких радиочастотах используют тонколистовые (30 мкм) холоднокатаные электротехнические стали и очень тонкие (3 мкм) ленты пермаллоя.

Высокочастотные магнитомягкие материалы — некоторые ферриты и разнообразные магнитодиэлектрики.

Ферриты — оксидные материалы, в которых спонтанная намагниченность доменов вызвана нескомпенсированным

антиферромагнетизмом. У них большое удельное сопротивление и малые потери энергии на высоких частотах. Ферриты бывают керамические и монокристаллические.

Керамические ферриты формуют экструзией и прессованием. Прессовки спекают при $T > 1000$ °С в защитной атмосфере около пяти часов. Ферриты твердые и хрупкие, их обрабатывают абразивом.

Из магнитомягких ферритов делают сердечники трансформаторов, катушек, фильтры в радиоаппаратуре, магнитные экраны и антенны. Из ферритовых монокристаллов делают магнитные головки для записи видео- и аудиосигналов. Из Ni-Zn ферритов делают датчики температуры.

Магнитодиэлектрики прессуют из ферромагнитных порошков со связкой из бакелита, полистирола, полипропилена, эпоксидной смолы или стекла. Магнитная проницаемость их мала и уступает ферритам, рабочие частоты до 100 МГц. Такие сердечники применяют в дросселях, катушках индуктивности и трансформаторах.

Специальные магнитомягкие материалы: ферриты для сверхвысоких частот, магнитострикционные сплавы...

СВЧ диапазон соответствует длинам волн 1м ... 1мм. Электромагнитные волны идут по диэлектрикам, а от металлов отражаются. Волноводы СВЧ представляют собой полые или заполненные ферритом металлические трубы. У СВЧ ферритов большое сопротивление, малые магнитные потери, высокая температура Кюри, хорошая температурная стабильность свойств. Это Mg-Mn, Ni-Zn и Li-Zn ферриты.

Магнитострикционные материалы: металлы (Ni), сплавы и некоторые ферриты. Никель прочен и устойчив к коррозии, но из-за малого сопротивления его рабочие частоты не превышают 10 кГц.

Магнитострикционные сплавы: Fe-Co (пермендюр 49K2Ф); Fe-Al (альфер 12Ю). Сплавы Fe-Co и Fe-Al хрупкие. Сильна магнитострикция у дорогих Fe-Pt сплавов.

У магнитострикционной ферритовой керамики большое удельное сопротивление и малые магнитные потери, что позволяет использовать ее на частотах до 10^7 ГГц. Пример: феррит $NiFe_2O_4$.

Свойства термомагнитных сплавов зависят от температуры. Это Ni-Fe, Ni-Cu и сплавы Ni-Fe-Cr. Их применяют в реле, срабатывающих по заданной температуре.

Лекция 17. Магнитотвердые материалы

У магнитотвердых материалов большая коэрцитивная сила. Их делят на две группы: сплавы для постоянных магнитов и материалы для записи и воспроизведения информации. Это магнитные стали, литые, деформируемые и порошковые сплавы, магнитопласты.

Магнитотвердые стали: высокоуглеродистые, легированные W, Mo, Cr и Co: EX3, EX5K5. Высокая (до 13 кА/м) коэрцитивная сила у них достигается закалкой на мартенсит или холодной пластической деформацией. Стали относительно дешевые, но и магнитные свойства у них так себе.

Литые магнитные сплавы твердые и хрупкие: Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Co-Al. Высокая КС = 30...110 кА/м у них после закалки и старения, при котором происходит распад первичной фазы на две вторичные.

В сплавах Fe-Ni-Al ферромагнитная фаза по составу близка к железу, а матричная слабомагнитная фаза состоит в основном из никеля и алюминия. Высококоэрцитивное состояние достигается при Ni = 22...33 % и Al = 11...17 %.

Усилить магнитные свойства сплава в нужном направлении можно текстурой: как кристаллической, так и магнитной. Кристаллическую текстуру получают направленной кристаллизацией в литейной форме, а магнитную — охлаждением материала в сильном магнитном поле. Магнитное текстурирование особенно эффективно в кобальтовых сплавах. Сочетание кристаллической и магнитной текстур дает наилучшие магнитные свойства.

Бескобальтовые сплавы (ЮНД) дешевле, а у сплавов с кобальтом (ЮНДК15) лучше магнитные свойства. У сплавов, содержащих 24 % Co, хорошие магнитные свойства в направлении кристаллической текстуры, их обычно используют при направленном магнитном потоке.

Велика энергия у текстурированных сплавов типа ЮН13ДК25БА. Буква А обозначает кристаллическую текстуру; магнитную текстуру не указывают. Хорошие магнитные свойства у монокристаллов (АА): ЮНДК35Т5АА.

Магниты намагничивают как постоянными, так и импульсными полями. Напряженность намагничивающего поля должна в 3...6 раз превышать КС материала, тогда он будет намагничен до насыщения.

Порошковые магниты получают по керамической технологии: порошки смешивают, прессуют и спекают. Так делают мелкие магниты разной формы. Порошковые магниты уступают литым по механическим и магнитным свойствам, но они дешевле и технологичнее.

Деформируемые магнитные сплавы: Fe-Co-Mo (комол), Fe-Co-V (викаллой), Fe-Ni-Cu (кунифе), Co-Ni-Cu (кунико). У них КС = 10...55 кА/м; эти сплавы, в отличие от литых, не хрупкие, но они дороже.

Магнитотвердые ферриты (оксидные магниты) — ферримагнетики с сильной кристаллографической анизотропией. Они могут быть бариевые ($BaO \times 6Fe_2O_3$), стронциевые и кобальтовые.

Бариевые магниты выпускают изотропными (БИ) и анизотропными (БА). Их коэрцитивная сила достигает 240 кА/м, это намного больше, чем у сплавов. Из-за большого удельного сопротивления они могут работать на высоких частотах. Это хрупкие и дешевые материалы.

Перспективны, но недостаточно изучены сплавы на основе РЗЭ. Интересны сплавы RCO_5 и R_2Co_{17} , где R — какой-либо редкоземельный металл (обычно лантан или иттрий). У таких материалов высокая температура Кюри,

сильная магнитная анизотропия и большая коэрцитивная сила (до 800 кА/м).

Магнитопласты состоят из диэлектрической резиновой или полимерной связки и ферромагнитного наполнителя, они технологичны и дешевы. По свойствам ничего выдающегося, зато можно сделать магнит любой формы. Такие магниты стоят в шаговых двигателях, в микрофонах и телефонах, плоских динамиках. Из магнитных композитов делают уплотнители дверей холодильников, магнитные защелки и ключи. Из магнитофоров (магнитных резин) делают пластины для медицины. Листы, пластины, трубы и ленты формуют литьем под давлением, прокаткой, прессованием или экструзией.

Материалы для записи и хранения информации используют в магнитных носителях и записывающих головках. Такие носители обычно двухслойные: магнитный слой нанесен на немагнитную основу. В жестких дисках основу делают из легких алюминиевых сплавов.

Важная характеристика магнитного носителя: плотность записи информации, измеряемая в битах на единицу длины. Она определяется дисперсностью и структурой магнитного слоя. Важна и коэрцитивная сила магнетика: ее увеличение уменьшает саморазмагничивание и повышает устойчивость носителя к воздействию внешних полей.

Максимальную плотность при продольной записи получают не в порошке, а на металлической пленке с тонким магнитным слоем толщиной около 0,1 мкм. Высокая плотность достигается при перпендикулярной записи. Дорожки имеют форму концентрических окружностей, а магнитная головка перемещается по радиусу быстро вращающегося диска.

В магнитных носителях информации применяют порошки железа и гамма-оксида железа Fe_2O_3 , а также диоксида хрома CrO_2 .

Гамма-оксид железа по электрическим свойствам относят к полупроводникам, а по магнитным — к ферримагнетикам. Диоксид хрома тоже ферримагнетик, у него выше коэрцитивная сила и меньше удельное сопротивление, что снижает электризацию ленты и повышает ее скорость.

При записи аналогового сигнала применяют носители с двойным магнитным слоем — снизу гамма-оксид железа, а сверху диоксид хрома. Такие носители хорошо воспринимают как низкие, так и высокие частоты при небольших токах подмагничивания. Магнитные свойства лент и жестких дисков зависят от размера частиц порошка, их ориентации и плотности в рабочем слое.

Жесткий диск представляет собой носитель, совмещенный в единой системе с магнитной головкой. В его состав входят система позиционирования головки и блок электроники. Между головкой и магнитной пластиной при быстром вращении (более 100 об/с) диска возникает очень тонкий (10 нм) зазор. При простое головки находятся в парковочной зоне и пластин не касаются. Бесконтактная запись обеспечивает высокое быстродействие и долговечность винчестера; такое хранение информации не требует затрат энергии.

В жестких дисках запись перпендикулярная: биты информации сохраняются в вертикальных доменах. Это позволяет повысить плотность записи выше 70 ГБит/см² и использовать сильные магнитные поля.

Устройство позиционирования головок состоит из пары сильных магнитов и легкого соленоида на подвижном кронштейне. Магниты обычно делают из высококоэрцитивного сплава Nd-Fe-B с большой индукцией.

Глава 6. Материалы с особыми свойствами

Лекция 18. Наноматериалы

Нанонаука изучает мир атомов и молекул — нижнюю границу пространства, где еще действуют законы классической физики. За ней лежит квантовый мир, который мы не в состоянии даже представить. Приходится полагаться на математику. В макромире материю делят на вещество и поле, в квантовом мире это не имеет смысла.

Вещество состоит из атомов — квантовых объектов, не подчиняющихся классической физике. Они не изнашиваются, в них нет трения и рассеяния энергии. Представить атом нельзя: в нашем мире нет аналогов. Планетарная модель атома далека от реальности. Когда-то атомы считались неделимыми; сейчас мы знаем, что они состоят из электронов, протонов и нейтронов.

Электроны находятся на дискретных орбитах, но не вращаются на них, подобно планетам. У них вообще нет явных границ, это частицы и волны одновременно. Электроны могут переходить с орбиты на орбиту, но в пространстве между ними при этом не появляются.

Протоны живут очень долго, а нейтроны распадаются через 15 минут, если не успевают соединиться с протоном.

Существует более сотни разных атомов, они соединяются друг с другом, образуя молекулы и кристаллы: без такой самоорганизации эволюция материи была бы невозможна. Часто одинаковые атомы могут создавать разные молекулы, образуя аллотропные модификации элемента; у кислорода их 2, у фосфора — 11, у S и C — много.

Аллотропия — способность одинаковых атомов создавать разные молекулы и кристаллы. В первом случае говорят об аллотропии состава: атомы кислорода образуют молекулы O_2 и O_3 . Во втором случае говорят об аллотропии формы или полиморфизме: атомы углерода образуют кристаллы алмаза и графита.

Микромиром условно называют диапазон размеров от 1 мм до 1 мкм; он виден в оптический микроскоп и неплохо изучен. Наномиром называют диапазон размеров от 1 мкм до 1 нм; он виден лишь в электронный микроскоп и изучен намного хуже.

Размер атома водорода около 0,1 нм. Белковая молекула и толщина диэлектрика в новых микросхемах ~5 нм. Пробег молекулы газа между столкновениями ~100 нм. Размер бактерии ~500 нм. Толщина волоса ~80 мкм.

Нанотехнологии требуют приборов для наблюдения и манипуляций с очень мелкими частицами. Разрешающая способность оптического микроскопа не превышает 200 нм, он для нанотехнологий не годится. Электронный сканирующий микроскоп имеет разрешение 5 нм, а просвечивающий — 1 нм. Разрешение зондовых микроскопов достигает 0,2 нм, но такие устройства не дают реальной фотографической картинки. Рентгеноструктурный анализ

определяет положение атома в кристаллической решетке с точностью до 0,1 нм (но косвенно, путем математических вычислений).

Сканирующий туннельный микроскоп захватывает атомы тончайшим нанозондом. Атомно-силовой микроскоп фиксирует отклонения зонда, вызванные его взаимодействием с образцом: на расстояниях до 0,1 нм атомы отталкиваются, а на больших — притягиваются.

В 1959 году нобелевский лауреат по физике Ричард Фейнман указал на огромную емкость наномира и предложил собирать материалы прямым перемещением отдельных атомов. Однако расчеты показывают, что для последовательной сборки атом за атомом даже 1 мл воды требуется столько же операций, как для вычерпывания океана чайной ложкой.

Идеи Фейнмана вот уже 50 лет подтверждает т. н. закон Мура: число транзисторов на кристалле ИС удваивается раз в 2 года. Но предел плотности уже почти достигнут: дальнейшему росту дисперсности микросхем мешают нарастающие квантовые эффекты.

Живая материя очень эффективно использует свое пространство. Геном человека записан чрезвычайно компактно: внутри каждой клетки находится 46 молекул ДНК, в каждой 160 млн пар нуклеотидов. 4 нуклеотида в разных сочетаниях содержат план строения и функционирования всего организма.

Самосборка белковых молекул — одно из чудес наномира, скрывающее тайну зарождения жизни. Такие молекулы состоят из тысяч аминокислот.

Развитие нанотехнологий началось в 1985 году с открытия новых форм углерода — фуллеренов, сферические молекулы C_{60} которых состоят из 60 атомов; затем нашли молекулы C_{70} и C_{80} . Развернутые плоские фуллерены назвали графеном, а свернутые — углеродными нанотрубками.

Графен — атомарный слой из гексагональных углеродных ячеек; это двумерная модификация графита. Оптическая прозрачность графена позволяет делать из него светодиоды, солнечные батареи и чипы оптической электроники.

Углеродные нанотрубки представляют из себя свернутый графен диаметром менее 100 нм. Они обладают огромной (~50 ГПа) прочностью. Из нанотрубок уже делают нити и провода, топливные элементы, светодиоды, арматуру для композитов.

Наноматериалы применяют в биосенсорах, микросхемах и имплантах. Биосенсоры глюкозы диагностируют сахарный диабет в самой начальной стадии, когда еще нет никаких симптомов.

Квантовые точки — полупроводниковые наночастицы, свойства которых зависят от их размера. Они позволили создать считавшиеся невозможными голубые лазеры. КПД обычного фотоэлемента менее 30 % (в них 1 фотон генерирует 1 электрон), а в квантовой точке фотон генерирует до 3 электронов: теоретически КПД может достигать 65 %.

Наноматериалы получают конденсацией, синтезом, электролизом и литографией.

Литографию используют для производства интегральных схем. Она бывает фотографическая, рентгеновская и печатная.

Фотолитография состоит в репликации чертежа: сильно уменьшенное изображение схемы проецируют на светочувствительную подложку и фиксируют, затем незасвеченный материал убирают травлением.

Коротковолновая рентгеновская литография позволила преодолеть при производстве ИС рубеж 10 нм.

Печатная литография изображение штампует: она позволяет получать 10 нм структуры сразу на сравнительно большой площади.

Жидкости с ферромагнитными наночастицами применяют в уплотнениях быстро вращающихся жестких дисках и в лечении онкологических заболеваний. Их магнитом вводят в опухоль, затем нагревают индукцией и избирательно разрушают только раковые клетки.

В квантовых коммуникациях из одного энергичного фотона получают два запутанных. Изменение характеристик одного из них непостижимым образом мгновенно отражается на другом: это называют телепортацией информации. Такую передачу принципиально нельзя перехватить.

Квантовые вычисления из-за параллельности выполняются в миллионы раз быстрее, чем обычные последовательные. В квантовых компьютерах используют не сами электроны, а их спины.

Спин — квантовая характеристика элементарной частицы, порождающая магнитный момент. Он переносит один кубит информации. Кубиты используют для операций сразу с четырьмя состояниями. Однако пока квантовые операции очень чувствительны к помехам и требуют чрезвычайно низких температур.

Спинтроника создает магнитные схемы на основе спина элементарной частицы. Методы сохранения и передачи информации на основе спина сложны, так как его значение до измерения неизвестно.

Перспективное направление нанотехнологий — создание молекулярных квантовых схем. Надо подобрать молекулы (или создать новые) для элементов схемы таким образом, чтобы они не создавали помех квантовым вычислениям.

Лекция 19. Редкоземельные элементы

17 элементов: 21 скандий Sc, 39 иттрий Y, 57 лантан La и лантаноиды: 58 церий Ce, 59 празеодим Pr, 60 неодим Nd, 61 прометий Pm, 62 самарий Sm, 63 европий Eu, 64 гадолиний Gd, 65 тербий Tb, 66 диспрозий Dy, 67 гольмий Ho, 68 эрбий Er, 69 тулий Tm, 70 иттербий Yb и 71 лютеций Lu.

Редкоземельные элементы в земле существуют совместно, их суммарное содержание около 100 г/т. Добывать их грязно, дорого и сложно. Основной производитель этих материалов — Китай. Редкоземельные элементы называют материалами XXI века.

Все редкоземельные элементы — серебристые пластичные металлы. Их делят на иттриевые: Y, La, Gd...Lu и цериевые: Ce...Eu. По атомной массе лантаноиды делят на легкие: Ce...Eu и тяжелые: Gd...Lu. Все они химически

очень активны; исключение представляют пассивирующиеся на воздухе Sc и Y: они устойчивы при нагреве до 1000 °С.

Применение РЗЭ дало импульс развитию нового транспорта, солнечной энергетики, лазеров. Использование даже малых долей неодима уменьшает на 1/3 вес металлоконструкций и повышает срок их службы в 2 раза.

РЗЭ используют в металлургии, приборо- и машиностроении, атомной технике, радиоэлектронике, химической промышленности. Они нужны в аккумуляторах электромобилей, волоконной оптике, сверхпроводниках, телевизорах, системах наведения ракет, реактивных двигателях.

Монокристаллические соединения РЗЭ применяют в оптической электронике и лазерной технике. Из сплавов Fe-B-Nd, Fe-B-Y и Fe-B-Sm делают сильные магниты. Лишь 25 % РЗЭ используют для производства продукции гражданского назначения.

Скандий — легкий серебристо-желтый металл. Им упрочняют сплавы магния и алюминия. Сплавы скандия используют в авиации, лазерах, высокотемпературных сверхпроводниках. Оксид скандия перспективен при изготовлении зубных протезов.

Иттрий — легкий (4,5 т/м³) и прочный (300 МПа) серый металл, химический аналог лантана. У сплава Al-Y проводимость выше, чем у чистого алюминия. Радиоактивный изотоп ⁹⁰Y применяют в онкологии.

Лантаном легируют сплавы Ni, Mg и Co. Высокая жаропрочность у мишметалла (сплав La с РЗЭ). При изготовлении одного гибридного автомобиля Toyota Prius надо 10...15 кг лантана. Он хорошо поглощает водород и используется в металлургических аккумуляторах водорода.

Церий на воздухе окисляется, порошок горит. Им упрочняют сплавы Fe, Mg и Al; это дешевле, чем лантаном. Церий бурно реагирует с рядом металлов (с Zn реакция взрывная). В стоматологии применяют цериевую сталь для инструментов и керамику CeO₂ для изготовления зубных протезов.

Празеодим используют в лазерной и сверхпроводниковой технике, для легирования сплавов.

Неодим — золотисто-белый металл, самый востребованный РЗЭ. На воздухе он окисляется. Сильно упрочняет титановые сплавы. Ценный компонент авиационных сплавов Al-Mg-Nd. Мощные магниты из сплавов Fe-B-Nd и Nd-Y-Co используют в смартфонах для создания вибрации, в наушниках, электрокарах и ветрогенераторах электроэнергии.

Прометий стабильных изотопов не имеет, его на Земле осталось мало.

Самарий — твердый белый металл, по внешнему виду похожий на свинец, а по свойствам — на цинк. Его используют в ферромагнитных сплавах.

Европий очень активен химически, из-за чего хранят его в парафине. Находят в атомных реакторах. Это компонент люминофоров, защищающих от подделки купюры евро.

Гадолиний используют в магнитных носителях информации, атомной энергетике, производстве ультрафиолетовых лазеров, для легирования титановых сплавов и в сверхпроводящей керамике.

Сплав тербия с железом — лучший магнитострикционный материал для ультразвуковых излучателей. Магниты из монокристаллов сплава Tb-Co при криогенных температурах в 5 раз сильнее магнитов, сделанных из сплавов Fe-B-Nd и Nd-Y-Co. Огромный магнитокалорический эффект тербиевых сплавов используют в магнитных холодильниках.

Магнитокалорический эффект состоит в изменении температуры вещества при изменении магнитного поля.

Диспрозий используют для легирования сплавов, в медицинских лазерах, атомной технике. Это мощный магнитострикционный металл.

Гольмий используют в сверхпроводящих магнитах. Атом гольмия стал первым, на который была записана информация в 1 бит.

Оксид эрбия используют в атомной и лазерной технике, в хирургии.

Тулий — редкий лантаноид. Его используют в термоэлектрических и лазерных материалах, в магнитных носителях информации. КПД термоэлектрических преобразователей, изготовленных на основе тулия, очень высок; при снижении цены на тулий его применение в производстве термоэлементов резко возрастет.

Иттербий используют в инфракрасных и волоконных лазерах, в магнитных и термоэлектрических материалах, в ядерной энергетике и электронике.

Лютеций — плотный ($9,8 \text{ т/м}^3$) и тугоплавкий ($1660 \text{ }^\circ\text{C}$) лантаноид. Используют его для легирования сплавов, в ядерной энергетике и магнитах.

Лекция 20. Материалы аддитивного производства

Аддитивным синтезом формируют изделие, послойно добавляя материал, в то время как традиционные процессы обработки его удаляют.

В электронной промышленности намечается переход к нанотехнологиям аддитивного синтеза, способным конкурировать с литографическими методами производства интегральных схем.

В 1948 году американец Чарльз Халл предложил идею стереолитографии SLA, однако первый 3D-принтер появился лишь в 1987 году. Он выращивал изделия из жидкого фотополимера, послойно нанося его на подвижную платформу. Материал затвердевал под лазерным или УФ излучением.

В 1988 году была изобретена послойная экструзионная заливка расплавом FDM. Жидкий пластик или металл продавливают через экструзионную головку принтера, постепенно формируя изделие нужной формы.

В 1989 году Карл Декард запатентовал процесс селективного лазерного спекания SLS. Он работал с полимерами, металлами и керамикой.

Метод селективного лазерного сплавления металлических порошков SLM позволяет получать сложные по форме металлические изделия.

Метод многоструйного моделирования MJM похож на FDM, только вместо экструзии используется струйная печать. Этот метод нашел применение при производстве однослойных и многослойных печатных плат.

Термопласты: полиэтилен, полипропилен, полиуретан и другие.

Полиэтилен $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ химически инертен, при нагревании размягчается, плотность $0,94 \text{ т/м}^3$, прочность 15 МПа , относительное удлинение до 500% . Нестабилизированный полиэтилен на воздухе довольно быстро стареет.

Полипропилен $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$ выпускают в виде гранул. Его плотность $0,91 \text{ т/м}^3$, прочность около 20 МПа , в воде не набухает, $T_{\text{раб}} = -15 \dots 130 \text{ }^\circ\text{C}$. Превосходя полиэтилен по теплостойкости, полипропилен уступает ему по хладостойкости. Это гибкий, химически инертный и экологически безопасный материал. Усадка у полипропилена большая, печатать им сложно.

Термополиуретан (TPU): легкий ($0,9 \text{ т/м}^3$) эластичный износостойкий пластик. Его используют в машиностроении и обувной промышленности. Прочность до 50 МПа , $T_{\text{раб}} = -60 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$, запаха при печати не выделяет. Использование полиуретана в аддитивных технологиях невелико (4%).

Поливинилхлорид $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$ — прозрачный химически стойкий полимер. Его плотность $1,4 \text{ т/м}^3$, прочность 40 МПа , $T_{\text{раб}} = -15 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$. Из ПВХ делают электроизоляцию, оконные рамы, натяжные потолки, пленки и волокна, искусственную кожу, линолеум, обувные подошвы.

Полистирол $(\text{C}_8\text{H}_8)_n$ — легкий ($1,1 \text{ т/м}^3$) прозрачный хладостойкий ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$) полимер. Хороший диэлектрик, в воде не растворяется. Выпускают гранулы, формуемые экструзией при $T = 190 \dots 230 \text{ }^\circ\text{C}$. Из полистирола делают упаковку, одноразовую посуду, игрушки, теплоизоляцию.

Полиметилметакрилат $(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$ (оргстекло, плексиглас): прозрачная, прочная (70 МПа), легкая ($1,2 \text{ т/м}^3$) акриловая смола с $T_{\text{пл}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{раб}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Устойчив к действию влаги и микроорганизмов. Формуют литьем и экструзией. Из оргстекла делают иллюминаторы, детали интерьера, аквариумы, акриловые ванны, изоляторы, полимерное оптическое волокно, контактные линзы.

Поликарбонат — твердый и прочный прозрачный пластик с $T_{\text{раб}} < 110 \text{ }^\circ\text{C}$. Формуют его экструзией и литьем. Из поликарбоната делают защитные очки, шлемы, пуленепробиваемые стекла, компакт-диски, осветительные приборы.

Полиамид (нейлон) легкий ($1,13 \text{ т/м}^3$), прочен (85 МПа), эластичен (300%) и термостоек ($200 \text{ }^\circ\text{C}$); он хорошо режется и сваривается. Используют для изготовления контейнеров, инструментов, игрушек. Полиамидный порошок в аддитивном производстве спекают лазером. Список полиамидов обширен.

Полиэтилентерефталат (ПЭТ, лавсан, полиэстер) — прочный (50 МПа) и легкий ($1,3 \text{ т/м}^3$) полимер с $T_{\text{пл}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Из него делают волокна, магнитные ленты и дискеты, чехлы для телефонов, бутылки.

Поликапролактон (PCL) прочен (40 МПа) и безопасен для организма. Из него делают рассасывающиеся хирургические нити и биоразлагаемые пакеты. Он устойчив в воде и маслах. Используется как термоклей.

Фотополимеры — жидкие материалы, затвердевающие под воздействием лазерных или ультрафиолетовых лучей. Фотополимерные смолы используют в стереолитографии и многоструйной печати.

Clara — прозрачный водостойкий фотополимер от китайской компании ProtoFab. Изделия отличаются гладкой поверхностью, точностью размеров, прочностью и устойчивостью к ударам. Используют в производстве фар и других автокомпонентов, электроники, ламп и линз.

Formula — высокопрочные термостойкие фотополимеры, альтернатива ABS-пластику. Используются в машиностроении и других областях.

Magna — фотополимеры, похожие на ABS-пластик. Используются в машиностроении, приборостроении и стоматологии.

Пластические массы — сложные составы, включающие полимеры, пластификаторы, наполнители, красители, стабилизаторы и другие компоненты.

Акрилонитрилбутадиенстирол или ABS-пластик ($C_{15}H_{17}N$) дешев и легок ($1,05 \text{ т/м}^3$), прочность 22 МПа, пластичность 6 %, $T_{пл} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{раб} = -40 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Выпускают шнур и порошок. При нагревании токсичен, нужна вытяжка, но при комнатной температуре безопасен (однако игрушки и бутылки делать нельзя). При охлаждении деформируется, нужна платформа с подогревом. Стареет под действием ультрафиолета. Можно смешивать с другими полимерами. Из него делают детали автомобилей, корпуса пылесосов, мониторов, принтеров, спортивный инвентарь, лодки, элементы мебели, канцтовары, игрушки.

Полилактид (PLA) получают из силоса свеклы и кукурузы. Он экологически чист, при нагревании нетоксичен. Выпускают нить с прочностью 50 МПа и пластичностью 4 %. Из него делают игрушки и сувениры. Можно смешивать с ABS-пластиком, металлическим порошком и углеродом. Наполненный карбоном полилактид — прочный и жесткий композит.

Бакелит (карболит) — легкоплавкая химически инертная пластмасса. При нагреве на воздухе устойчив до $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Используется в качестве связующего для абразивных изделий и композитов.

Целлулоид — горючая пластмасса на основе нитрата целлюлозы. Из него делают фотопленку, линейки, музыкальные инструменты, галантерейные товары, игрушки, шарики для настольного тенниса.

Аминопласты — термореактивные пластмассы с плотностью $1,4 \text{ т/м}^3$ и прочностью около 40 МПа. Из таких порошков делают корпуса приборов, галантерейные и канцелярские товары, игрушки.

Композиционные материалы содержат разнородные компоненты.

В электротехнике используют наполненные графитом композиты. Из них распечатывают трехмерные электронные схемы. Можно изготовить простую печатную плату прямо на платформе 3D-принтера.

Nylon-glass: нейлон со стекловолокном. Позволяет печатать точные модели с гладкой поверхностью. Температура экструзии $240 \text{ }^\circ\text{C}$, температура платформы $20 \text{ }^\circ\text{C}$, прочность 95 МПа, плотность $1,07 \text{ т/м}^3$.

Nylon-carbon: нейлон с углеродным волокном. Температура экструзии 240 °С, температура платформы 20 °С, прочность 100 МПа, плотность 1 т/м³.

Набирают популярность фотополимеры с керамическим порошком. Из них делают оснастку, шаблоны. Могут использоваться в большинстве аддитивных установок на базе технологии SLA.

Литература

1. Конструкционные и электротехнические материалы : учеб. пособие / В. А. Гольдаде [и др.]; под ред. В. А. Гольдаде, В. А. Струка. – Минск : РИВШ, 2022. – 536 с.
2. Дробов, А. В. Электротехнические материалы : учеб. пособие / А. В. Дробов, Н. Ю. Ершова. – Минск : Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2019. – 236 с. – Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROОбразование.
3. Основы современной энергетики : учебник для вузов : в 2 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016.
4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник : в 2 т. / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2015. – 448 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Конспект лекций

Пятов Владислав Владимирович
Голубев Алексей Николаевич

Редактор *Т.А. Осипова*
Корректор *А.В. Пухальская*
Компьютерная верстка *В.В. Пятов*

Подписано к печати 01.11.2022. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 3,4.
Уч.-изд. листов 4,4. Тираж 50 экз. Заказ № 289.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

В. В. Пятов, А. Н. Голубев

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Витебск
2022