

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



Рис.1. классификация материалов электронной техники

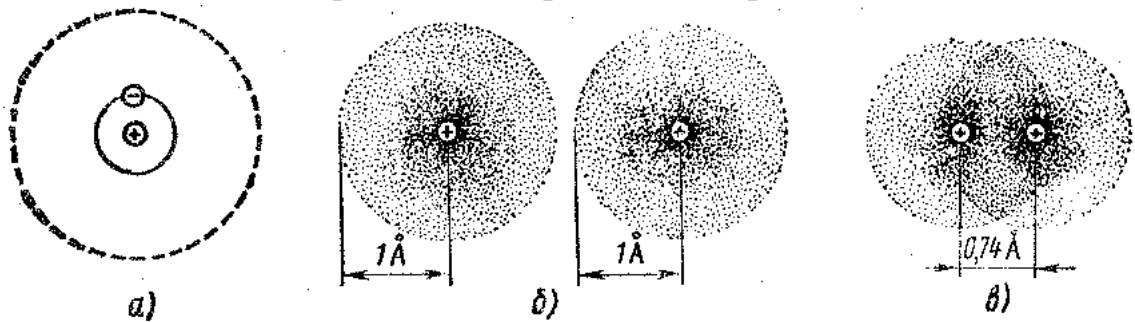


Рис.2. Структура атома и молекулы водорода: *a* — простейшая планетарная модель водородного атома (пунктиром показана разрешенная, но не занятая электроном в невозбужденном состоянии атома, орбита); *б* — квантовомеханическая модель электронной структуры двух уединенных атомов водорода; *в* — то же. для молекулы водорода (точками показана плотность заряда электрона).

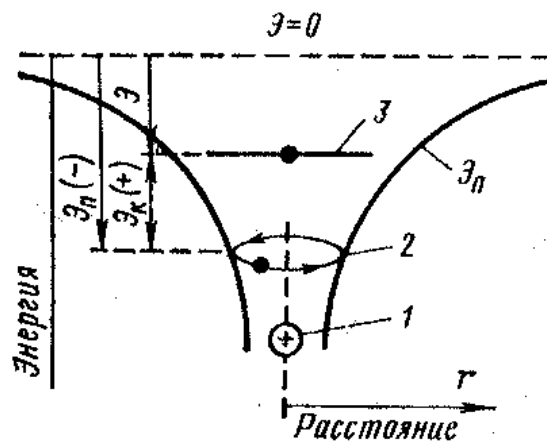


Рис. 3. Энергетические соотношения для простейшей модели атома водорода: 1 — ядро; 2 — орбита с электроном (для наглядности показана с наклоном); 3 — энергетический уровень электрона.

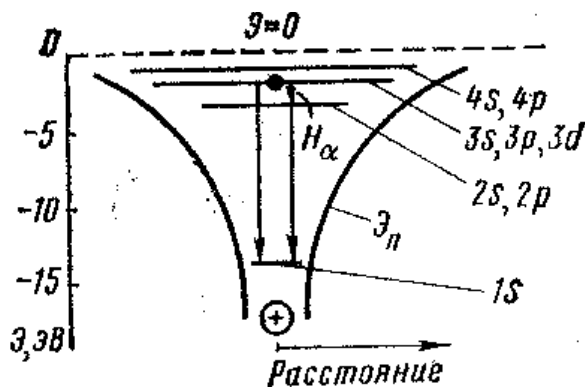


Рис.4. Энергетические уровни атома водорода.

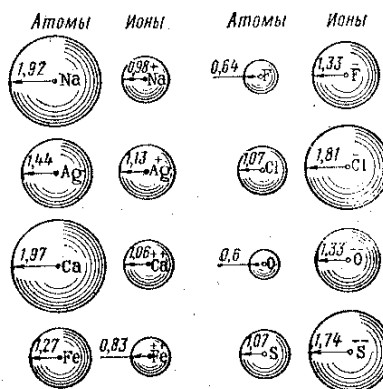


Рис.5. Размеры атомов, положительных и отрицательных ионов некоторых элементов в ангстремах.

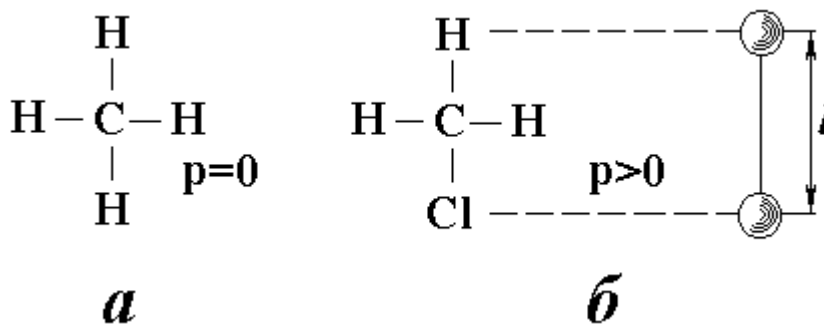


Рис.6. Примеры молекул: а - неполярной (симметричной), б - полярной (несимметричной)

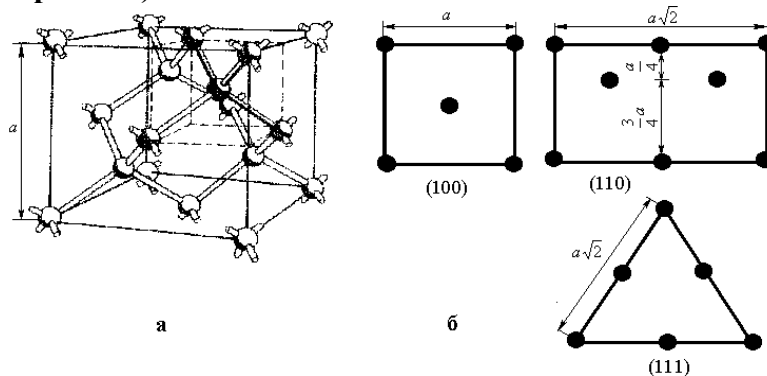


Рис. 7. Структура алмаза (германия, кремния): а – элементарная ячейка, б – проекции на кристаллографические плоскости.

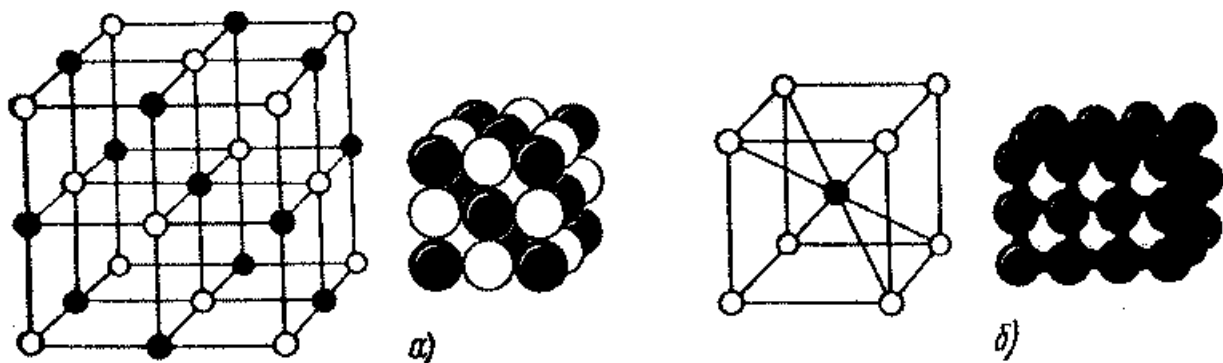


Рис.8. Структура и плотная упаковка ионов хлористого натрия (а) и структура и неплотная упаковка ионов хлористого цезия (б)

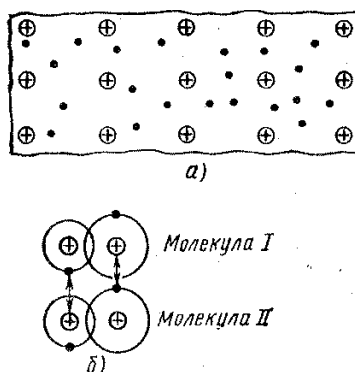


Рис.9. Схема строения металлического проводника (а) и образования межмолекулярной связи Ван-дер-Ваальса (б)

Таблица 1

Пространственные решетки кристаллических систем

Кристаллическая система	Пространственная решетка	Соотношения между осевыми углами и осевыми единицами
1. Триклинная	I Простая	$a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$
2. Моноклинная	II Простая	$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \beta \neq 90^\circ$
	III Базоцентрированная	
3. Ромбоэдрическая (ортодромическая)	IV Простая	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	V Базоцентрированная	
	VI Объемцентрированная	
4. Гексагональная	VII Гранецентрированная	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$
	VIII Простая	
5. Тетрагональная	IX Ромбоэдрическая	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	X Простая	
6. Кубическая	XI Объемцентрированная	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	XII Простая	
	XIII Объемцентрированная	
	XIV Гранецентрированная	

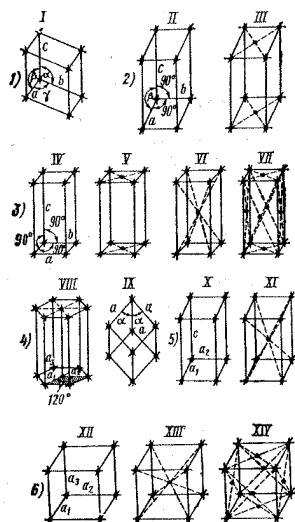


Рис.10. Пространственные решетки шести кристаллических систем, соответствующие таблице

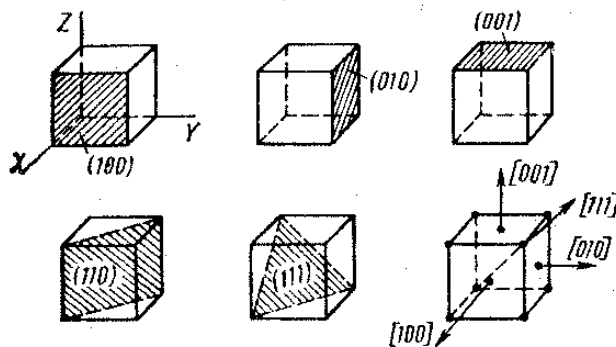


Рис.11. Примеры обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в кубических кристаллах с помощью индексов Миллера

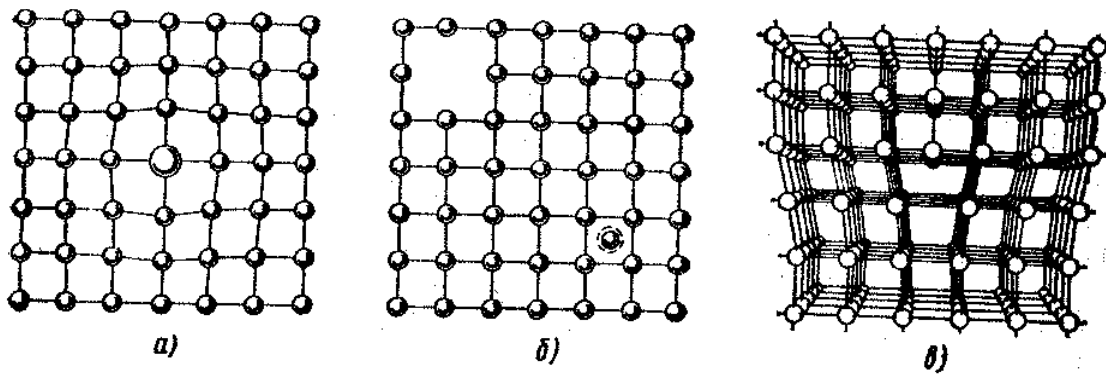


Рис. 12. Дефекты кристаллической решетки: а—посторонний атом я узле решетки; б—пустой узел (вакансия) и собственный атом в междуузлии; в — перспективное изображение расположения атомов около краевой Дислокации

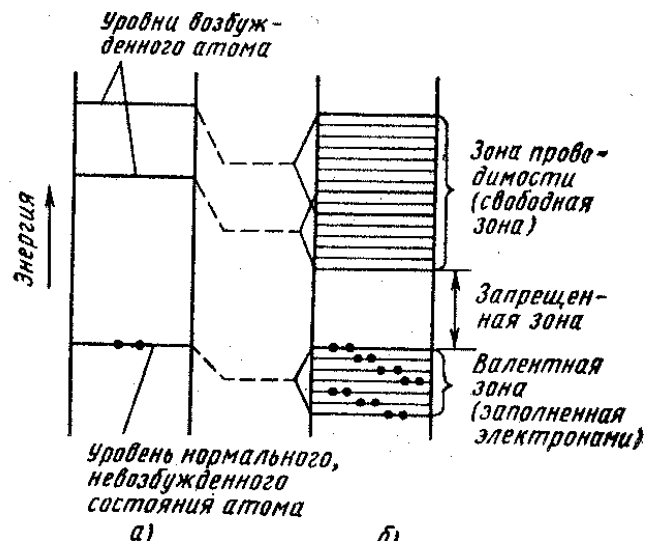


Рис.13. Схема расположения энергетических уровней: а – уединенного атома; б – неметаллического твердого тела.

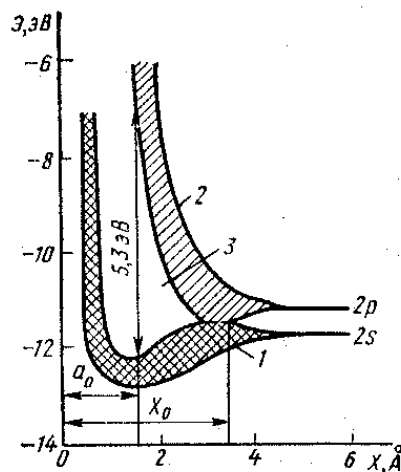


Рис. 14. Схема образования энергетических зон при сближении атомов углерода: 1 — объединенная валентная зона; 2 — объединенная зона проводимости; 3 — запрещенная зона; a_0 — расстояние между атомами в решетке алмаза; x_0 — расстояние между атомами, при котором имеется совпадение зон

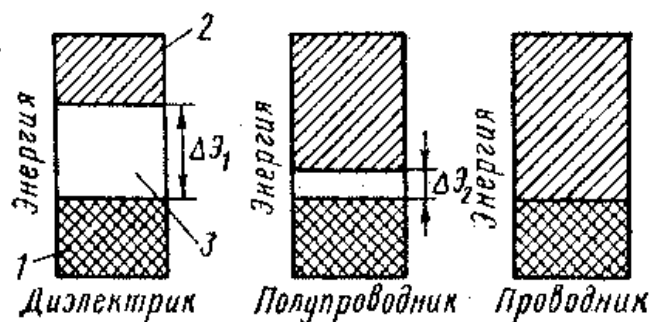


Рис.15. Энергетическое отличие диэлектриков от полупроводников и металлических проводников с точки зрения зонной теории твердого тела: 1 — заполненная электронами зона; 2 — зона свободных энергетических уровней; 3 — запрещенная зона шириной ΔE

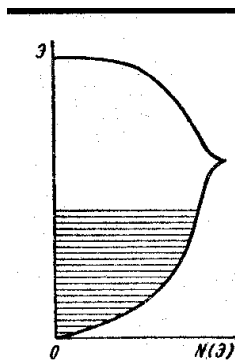


Рис.16. Распределение плотности состояний в энергетической зоне

ПРОВОДНИКИ

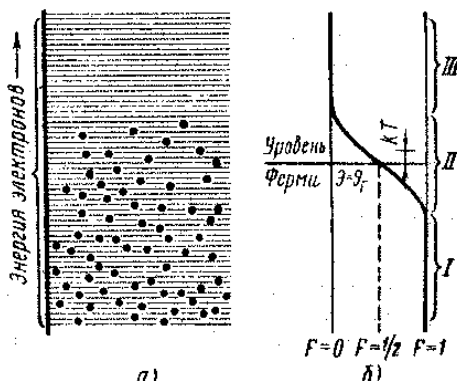


Рис.1. Распределение электронов в частично заполненной зоне (а) и функция вероятности заполнения электронами уровней (б): I — уровни, почти заполненные; II — интервал размывания; III — уровни, почти полностью свободные

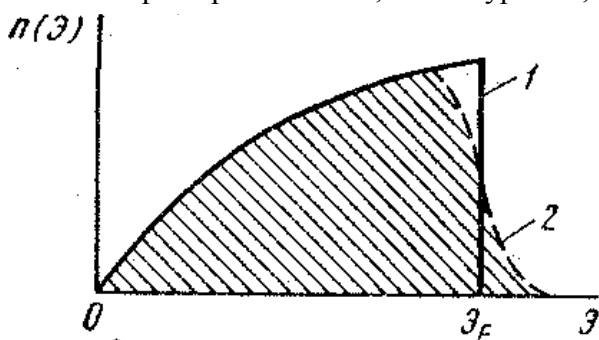


Рис.2. Распределение электронов по энергиям в металле: 1 – T=0 К; 2 – T>0 К

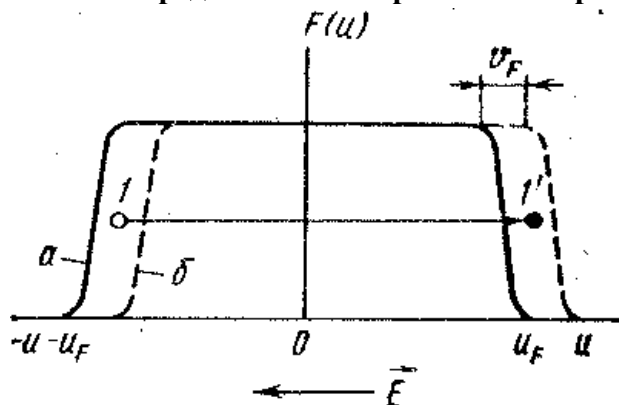


Рис.3. Распределение электронов в металле по скоростям: а – в отсутствие электрического поля; б – при воздействии поля

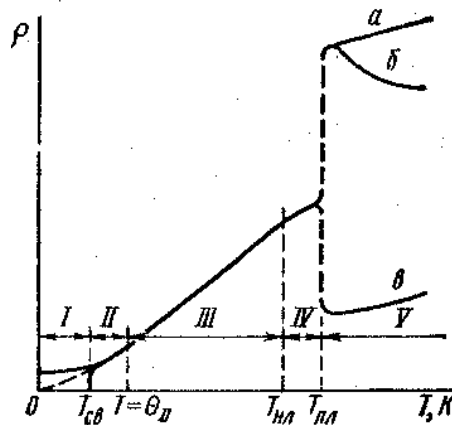


Рис.4. Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры в широком диапазоне температур: а, б, в — варианты изменения удельного сопротивления у различных расплавленных металлов

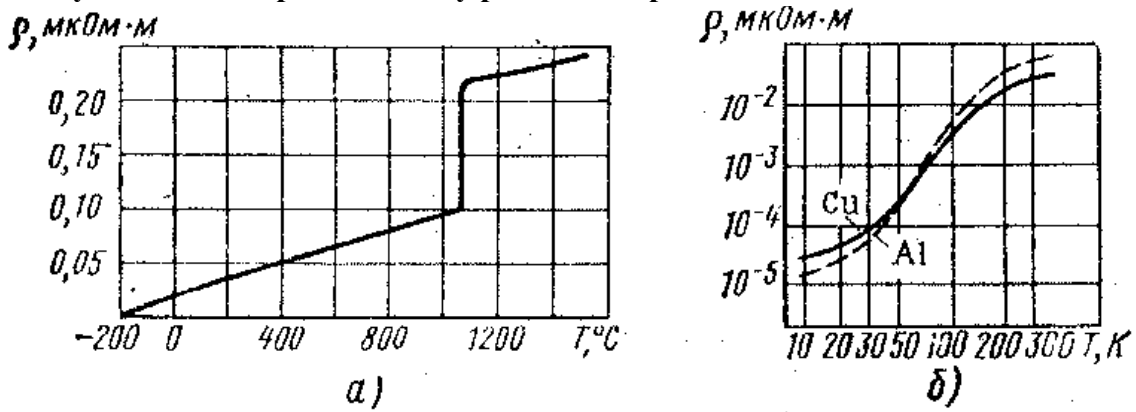


Рис.5. Зависимости удельного сопротивления от температуры в широком интервале температур для меди (а) и при низких температурах для меди и алюминия (б)

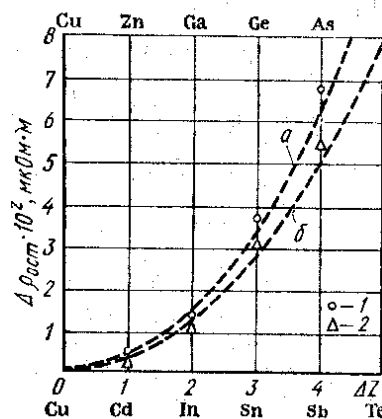


Рис.6. Остаточное сопротивление меди на 1 ат. % концентрации примеси: 1 — верхний ряд элементов; 2 — нижний ряд элементов; а — $\Delta\rho_{ост}=0,4(\Delta Z)^2$; б — $\Delta\rho_{ост}=0,32(\Delta Z)^2$

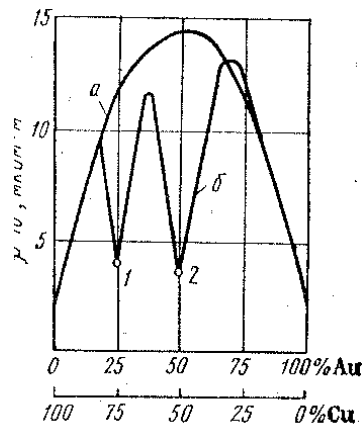


Рис.7. Зависимость удельного сопротивления от состава сплавов Au—Cu: а—для неупорядоченных сплавов (после закалки); б—для упорядоченных сплавов (после отжига); 1 — соответствует сплаву Cu₃Au; 2—CuAu

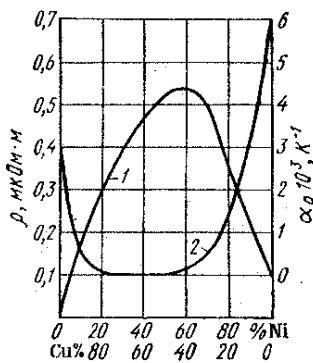


Рис.8. Зависимость удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента удельного сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от процентного содержания компонентов

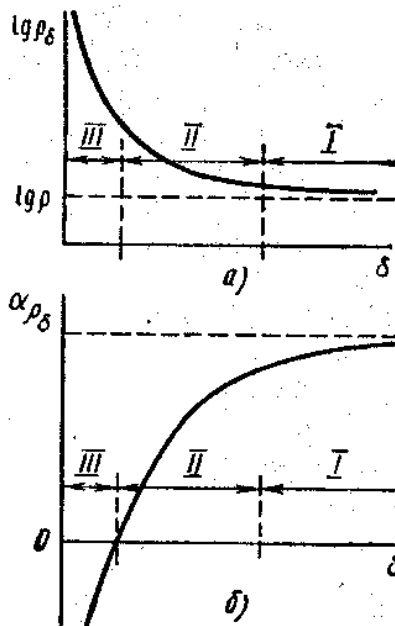


Рис.9. Зависимости удельного сопротивления (а) и температурного коэффициента удельного сопротивления (б) тонкой металлической пленки от ее толщины

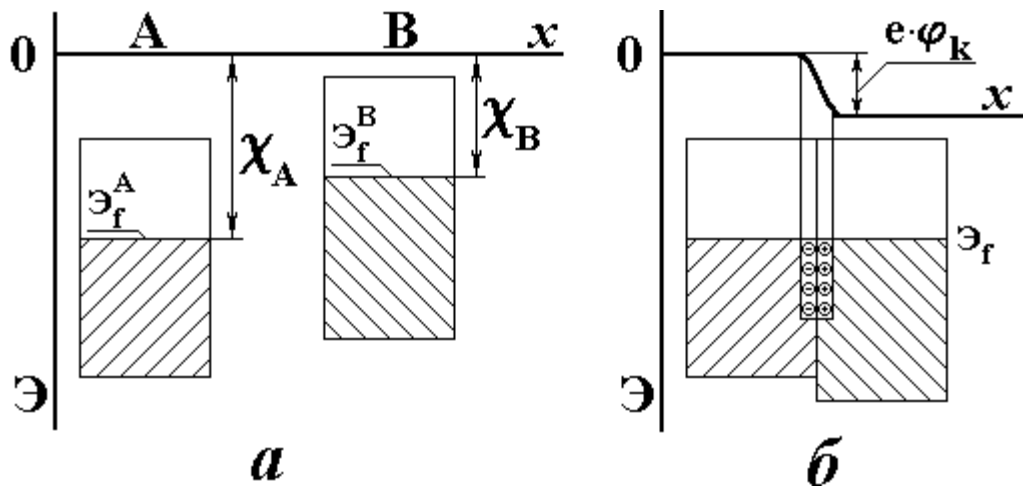


Рис.10. Энергетическая диаграмма контакта двух металлов (пояснения в тексте)

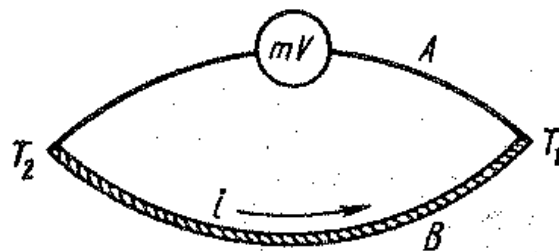


Рис.11. Схема устройства термопары

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

СПЛАВ	Удельное сопротивление ρ , мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, $\alpha_p \cdot 10^6, K^{-1}$	Терм-э.д.с. относительно меди, мкВ/К	Предельная рабочая температура, °С
Магнанин (86%Cu, 12%Mn, 2%Ni)	0.42-0.48	5-30	1-2	100-200
Константан (60%Cu, 40%Ni)	0.48-0.52	-(5-25)	40-50	450-500
Нихром X15H60 (55-61%Ni, 15-18%Cr, 1.5%Mn, остальное Fe)	1.0-1.2	100-200	--	1000
Нихром X20H80 (75-78%Ni, 20-23%Cr, 1.5%Mn, остальное Fe)	1.0-1.1	100-200	--	1100

ДИЭЛЕКТРИКИ

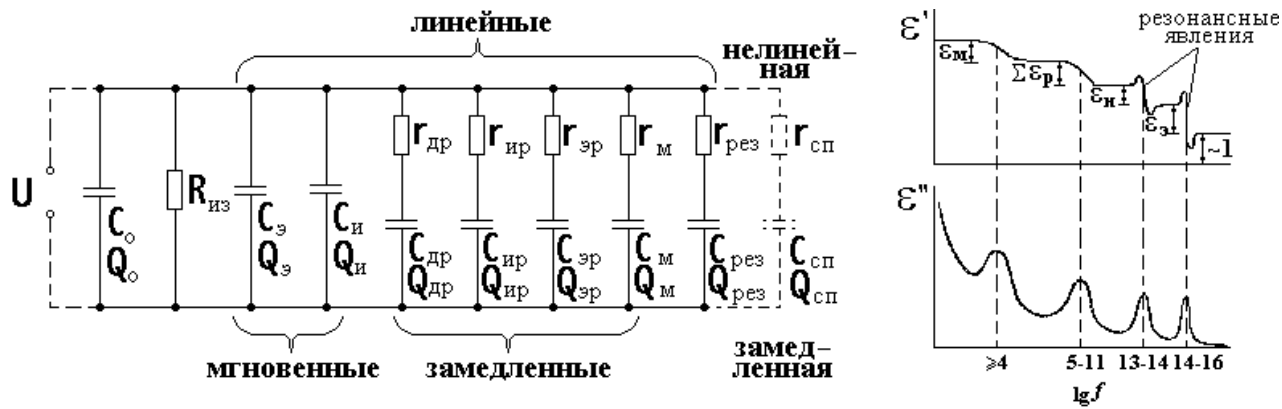


Рис.1. Эквивалентная схема (а) и частотная зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости (б) диэлектриков сложного состава с различными механизмами поляризации.

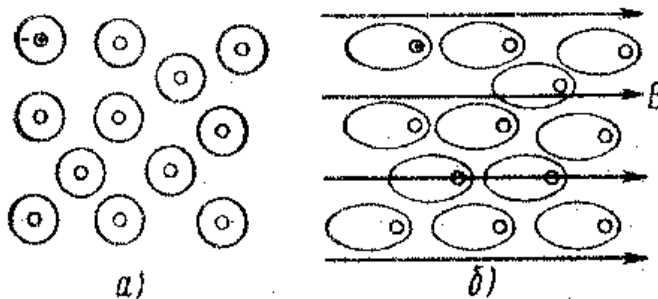


Рис.2. Упрощенная схема моделей атомов водорода

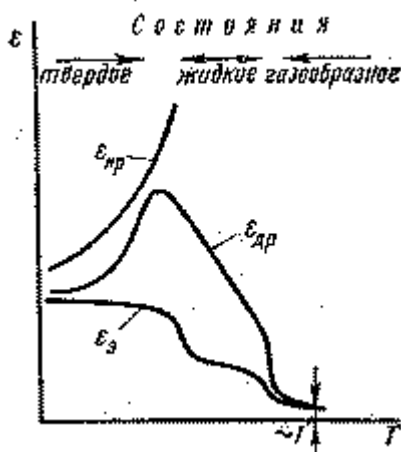


Рис.3. Кривые температурной зависимости диэлектрической проницаемости при электронной $\epsilon_э$, дипольно-релаксационной $\epsilon_{др}$ и ионно-релаксационной $\epsilon_{ир}$ поляризациях

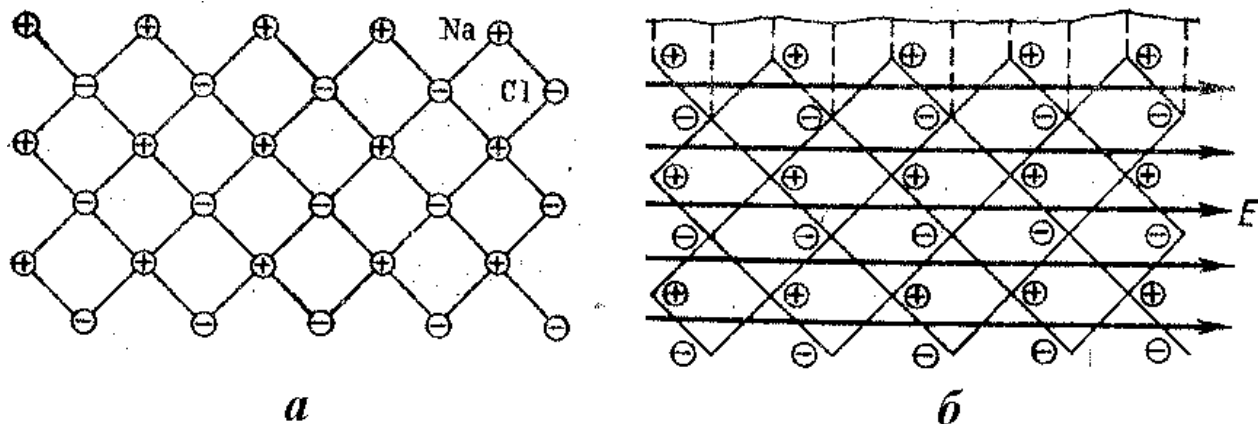
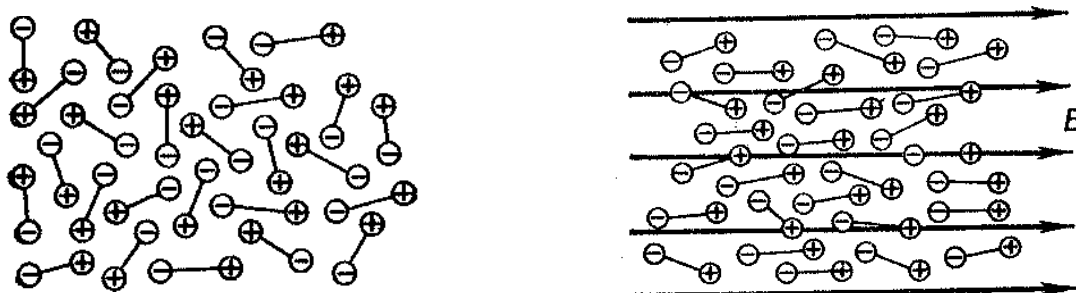


Рис.4. Идеализированная схема расположения ионов каменной соли: а—в узлах решетки в отсутствие электрического поля, б — смещенные из узлов на небольшие расстояния при воздействии поля.



Ориентация диполей под действием внешнего электрического поля

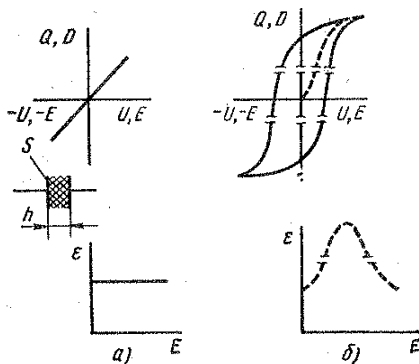


Рис.5. Зависимости заряда конденсатора от напряжения для линейных диэлектриков (а) и для сегнетоэлектриков (б) (по осям абсцисс отложены U и $E=U/h$, по осям ординат Q , $D=Q/S$ и ϵ)

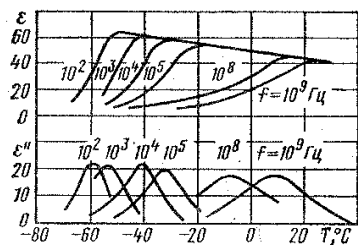


Рис.6. Диэлектрическая проницаемость глицерина при различных частотах и температурах

Материал	n	n^2	ϵ	Материал	n	n^2	ϵ
Парафин	1.43	2.06	1.9-2.2	Сера	1.92	3.69	3.6-4.0
полистирол	1.55	2.40	2.4-2.6	алмаз	2.40	5.76	5.6-5.8

кристалл	ϵ	$\alpha_\epsilon \cdot 10^6, K^{-1}$	кристалл	ϵ	$\alpha_\epsilon \cdot 10^6, K^{-1}$
Каменная соль ($NaCl$)	6	+150	Рутил (TiO_2)	110	-750
Корунд (Al_2O_3)	10	+100	Титанат кальция ($CaTiO_3$)	150	-1500

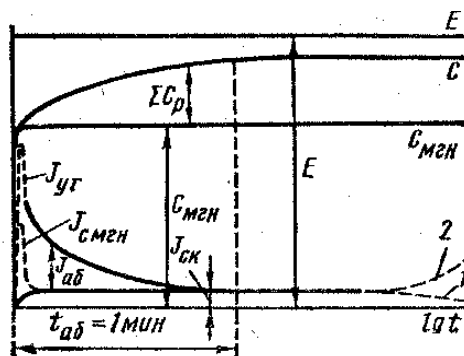


Рис.7. Зависимости емкости и плотности тока от времени в конденсаторе с диэлектриком, обладающим различными механизмами поляризации и сквозной электропроводностью (электрическое поле прикладывается мгновенно и в дальнейшем с течением времени не изменяется); ΣC_p — емкость, обусловленная замедленными (релаксационными) поляризации; $C_{мгн}$ — емкость от мгновенных механизмов поляризации

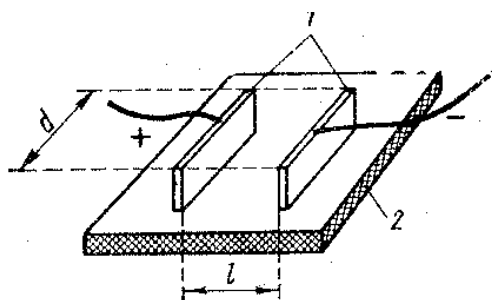


Рис.8. Эскиз размещения электродов (1) на поверхности образца из электроизоляционного материала (2) при измерении ρ_s

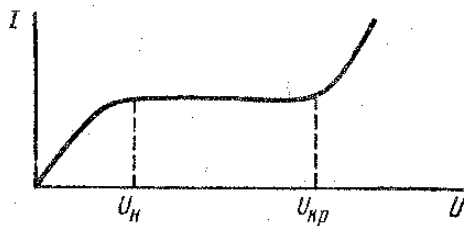


Рис.9. Зависимость тока от напряжения для газа

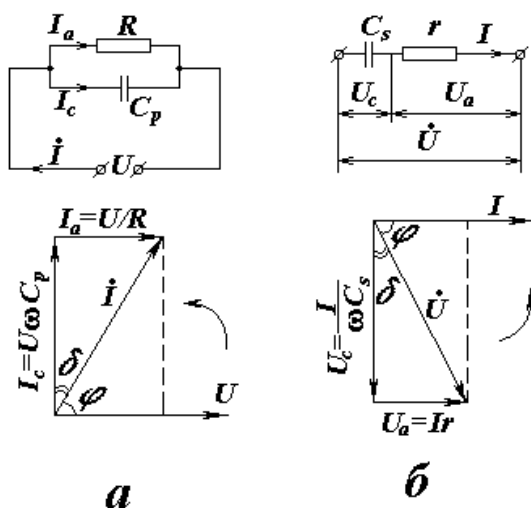


Рис.10. Параллельная (а) и последовательная (б) эквивалентные схемы диэлектрика с потерями и векторные диаграммы для них

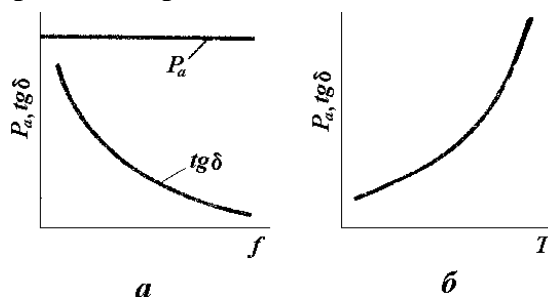


Рис.11. Частотные (а) и температурные (б) зависимости потерь на электропроводность

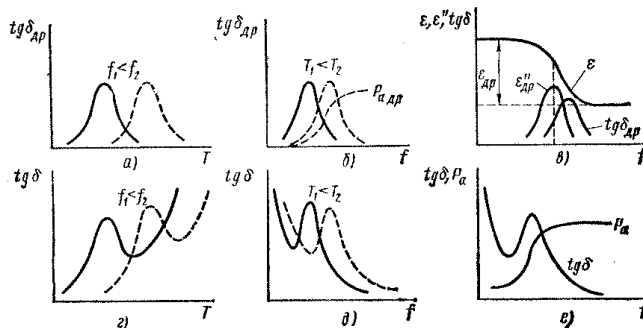


Рис.12. Особенности релаксационных потерь в диэлектриках

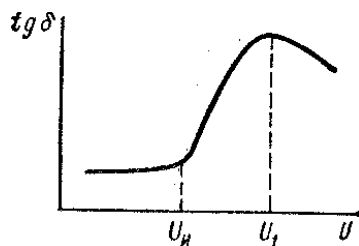


Рис.13. Изменение $\text{tg}\delta$ в зависимости от напряжения для твердой изоляции с газовыми включениями

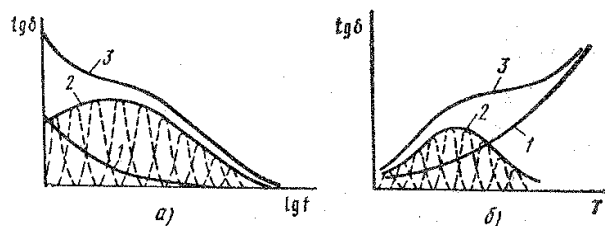


Рис.14. Частотная и температурная зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для неорганического стекла: 1 — потери на электропроводность; 2 — релаксационные потерн; 3 — суммарные потери

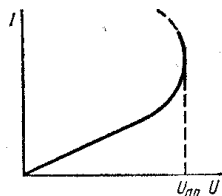


Рис.15. Вольтамперная характеристика электрической изоляции

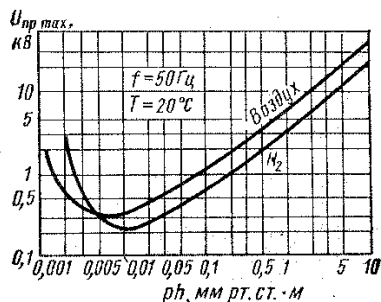


Рис.16. Зависимость пробивного напряжения от произведения давления газа p на межэлектродное расстояние h для воздуха и водорода.

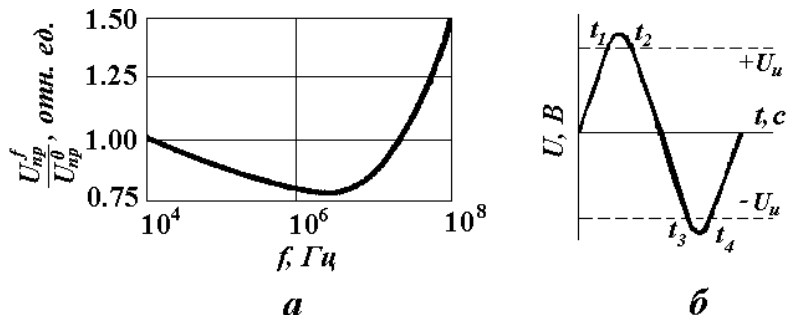


Рис.17. Пробой воздуха на переменном токе: а – отношение пробивного напряжения воздуха при заданной частоте к пробивному напряжению на постоянном токе; б – диаграмма, поясняющая особенности ионизации газа в переменном поле.

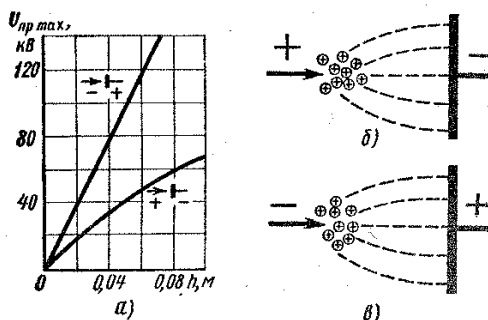


Рис.18. Зависимости пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле (а) и модель объемного заряда в разрядном промежутке при положительной (б) и отрицательной (в) полярности на игле

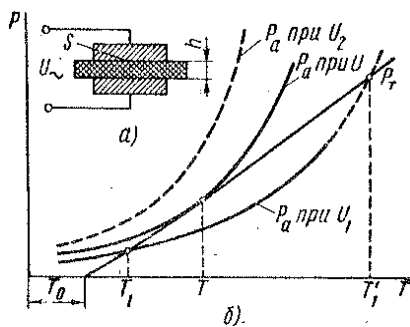


Рис.19. Пояснение к расчету пробивного напряжения при тепловом пробое

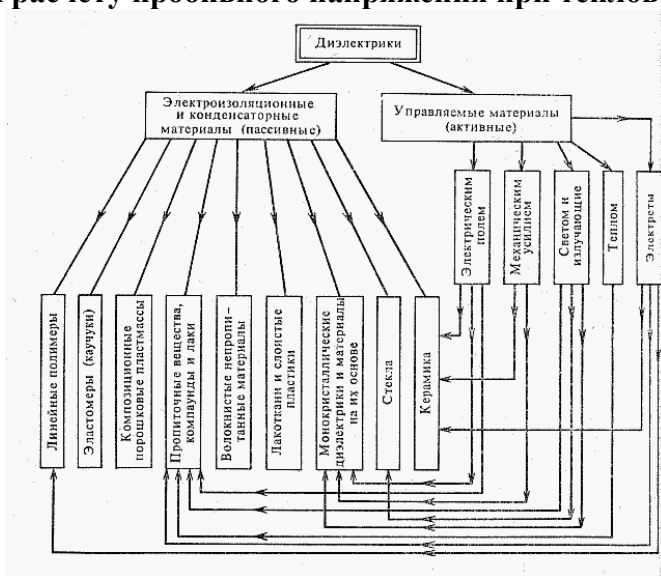


Рис.1. Общая классификация диэлектриков

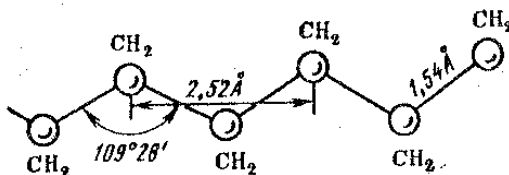


Рис.2. Фрагмент макромолекулы полиэтилена

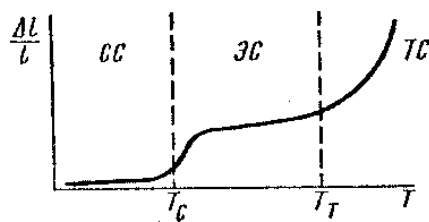


Рис.3. Зависимость деформации от температуры у линейных полимеров: СС- стеклообразное состояние, ЭС – высокоэластичное состояние, ТС – вязкотекучие состояние

Таблица 1. Основные свойства неполярных полимеров

Свойства	Полиэтилен	Полистирол	Фгоро-пласт-4
Удельное объемное сопротивление, Ом.м	$10^{14}-10^{15}$	$10^{14}-10^{16}$	$10^{14}-10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	2.3-2.4	2.5-2.6	1.9-2.2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц	$(2-5)10^{-4}$	$(2-4)10^{-4}$	$(2-3)10^{-4}$
Электрическая прочность, МВ/м	40-150*	20-110*	40-250*
Нагревостойкость, °С	105-130	75-80	~300

* Верхние пределы для материалов в виде пленки.

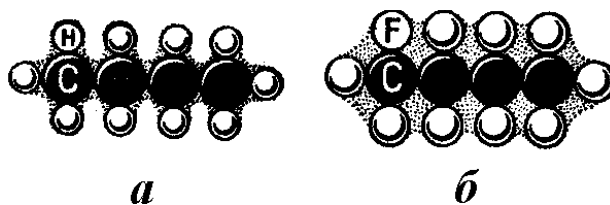
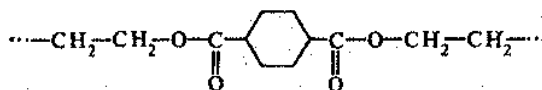


Рис.4. Схематическое изображение молекул углеводорода (а) и фторуглерода (б) при $n=2$.

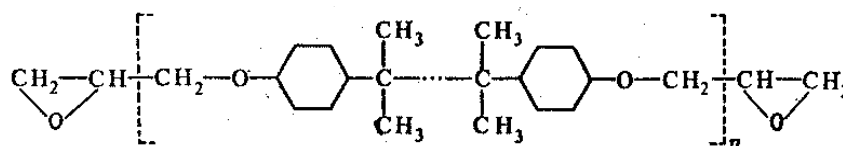
Таблица 2. Усредненные параметры полярных полимерных материалов

Свойство	значение
относительная диэлектрическая проницаемость	3—6
удельное объемное сопротивление	10^{11} — 10^{11} Ом·м
тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц	0.01—0.06
электрическая прочность	15—50 МВ/м

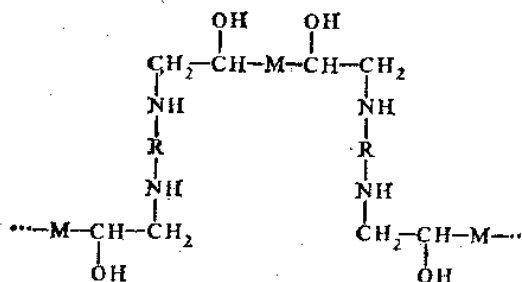
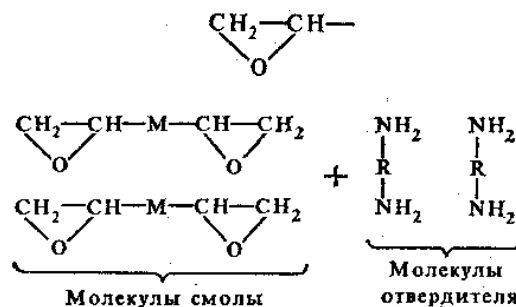
Полиэтилентерефталат (лавсан)



Структурная формула диановой смолы



Концевые группы



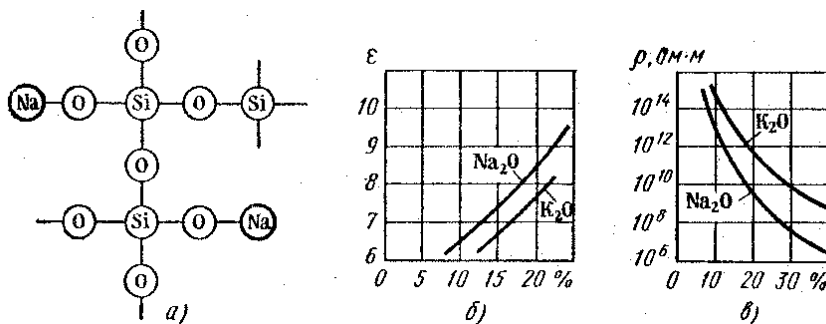


Рис.5. Влияние щелочных окислов на структуру (а) и свойства (б,в) силикатных стекол (по оси абсцисс отложено содержание Na_2O или K_2O в процентах по массе)

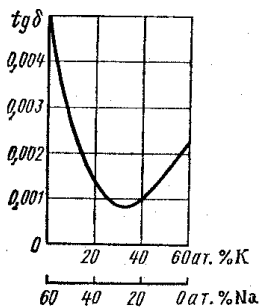


Рис.6. Зависимость $\text{tg}\delta$ стекол $\text{B}_2\text{O}_3\text{—Na}_2\text{O—K}_2\text{O}$ от состава (по оси абсцисс отложено число атомов Na и K, приходящихся на 100 молекул B_2O_3 ; сумма атомных концентраций Na и K во всех случаях равна 60%)

Таблица.3. Классификация электровакуумных стекол.

Электровакуумное стекло	ТКЛР, $\alpha \times 10^7 \text{ K}^{-1}$
платиновые (платинитовые)	85-92
Молибденовые	46-52
Вольфрамовые	35-42

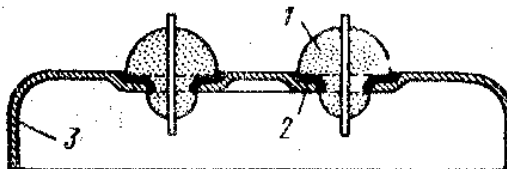


Рис.7. Стекланные изоляторы (1) со слоем вожженного серебра (2), припаянные к металлической крышке (3)

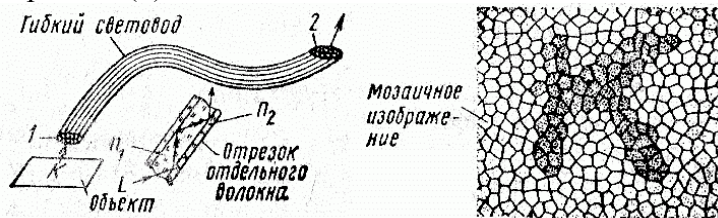


Рис.8. Пояснение к принципу действия световода

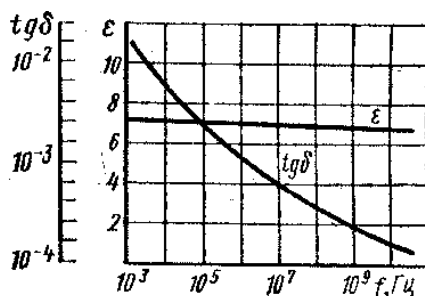


Рис.9. Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ситалла от частоты

Таблица.4. Свойства ситаллов

Свойство	Значение
Плотность	2.3-2.8 Мг/м ³
Водопоглощение	0.01%
Температурный коэффициент линейного расширения	(12-120)10 ⁻⁷ ·К ⁻¹
Удельная теплопроводность	0.8-2.5 Вт/(м·К)
Температура текучести	750-1300 ⁰ С
Предел прочности при изгибе	50-260 МПа
Удельное объемное сопротивление	10 ⁸ -10 ¹² Ом·м
Электрическая прочность	25-75 МВ/м
тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ⁶ Гц	(10-800)·10 ⁻⁴

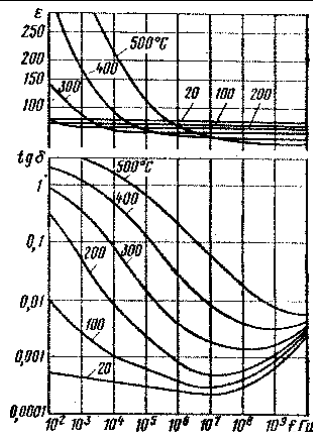


Рис.10. Зависимости ε и tgδ рутиловой керамики от частоты при различных температурах

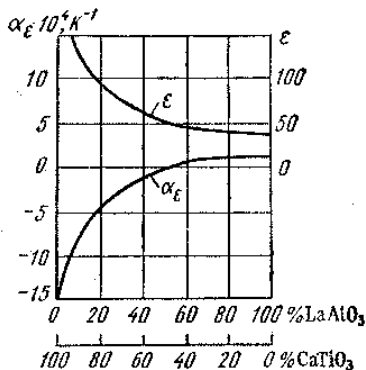


Рис.11. Зависимость диэлектрической проницаемости и ее температурного коэффициента от состава твердого раствора системы LaAlO₃—CaTiO₃

МАГНЕТИКИ

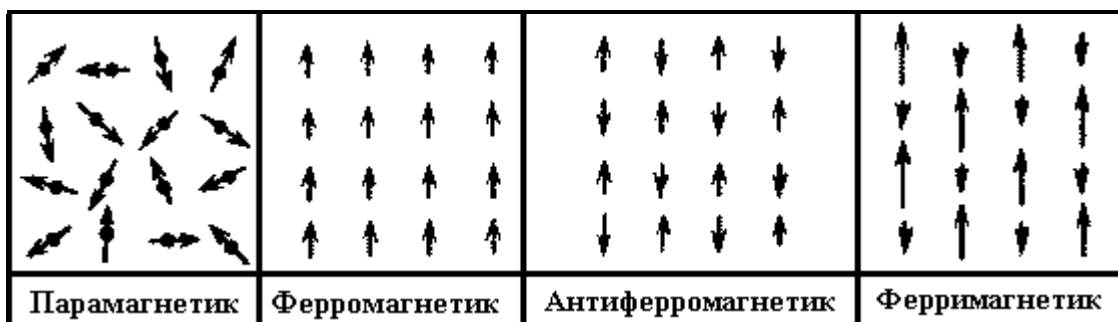


Рис.1. Ориентация магнитных моментов соседних атомов при 0°К в веществах разной магнитной природы

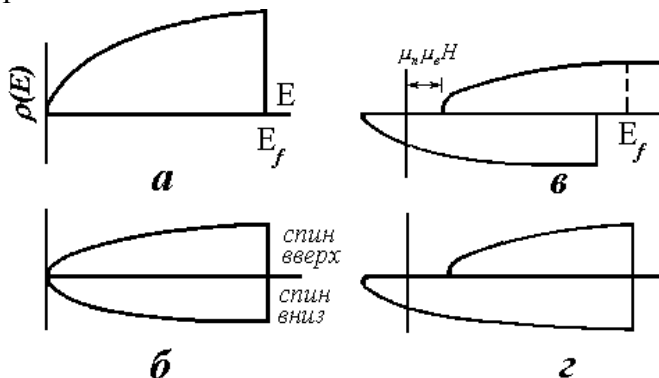


Рис.2. Перераспределение электронов по энергиям при наложении магнитного поля: а – плотность состояний для всей зоны; б – плотность состояний для каждой половины зоны в отсутствии поля; в – сдвиг энергетических уровней каждой половины зоны под действием внешнего поля; г – увеличение заселенности одной половины зоны за счет другой в результате действия поля

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Электронная конфигурация свободного атома		Количество нескомпенсированных электронов	Тип решетки	Радиус атома, Å	Намагниченность насыщения	T_c , К	$T_{пл}$, К
Fe	$4s^2 3d^6$	4	О.Ц.К.	1.24	1.69	1043	1808
Co	$4s^2 3d^7$	3	Г.К.	1.25	1.36	1404	1753
Ni	$4s^2 3d^8$	2	Г.Ц.К.	1.25	0.47	631	1728
Gd	$6s^2 4f^7 5d^1$	1	Г.К.	1.78	5.66	289	1585

Таблица 2

Значение атомного магнитного момента некоторых переходных металлов, выраженное в магнетонах Бора

металл	Fe	Co	Ni	Gd
μ	2.221	1.716	0.606	7.12

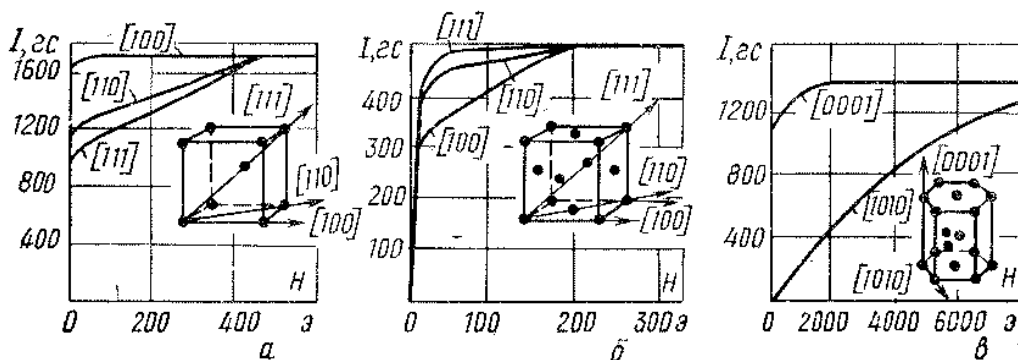


Рис.3. Анизотропия энергии намагничивания в решетках разного типа

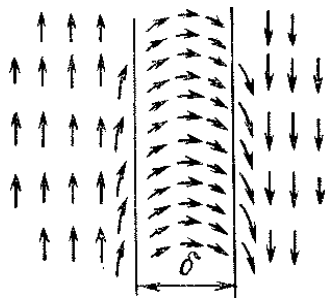


Рис.4. Доменные границы

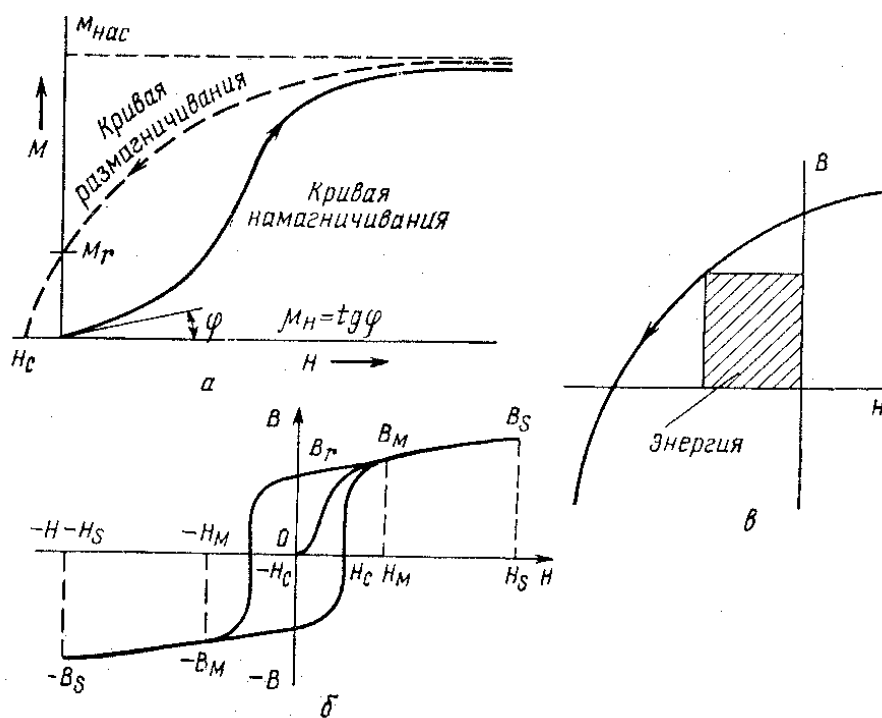


Рис.5. Кривые намагничивания и размагничивания (а), предельная петля гистерезиса (б) и магнитная энергия (в).

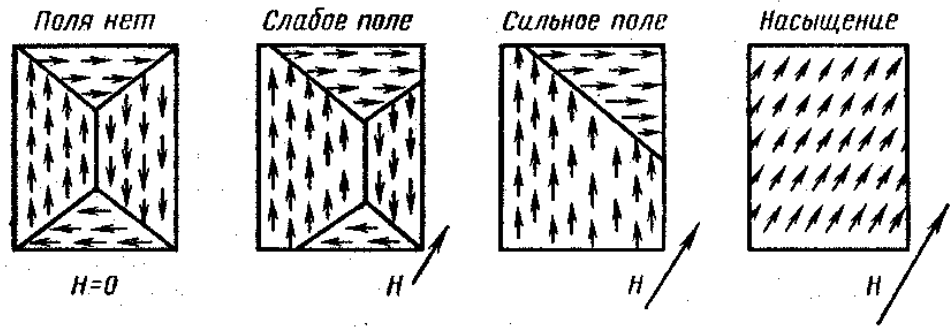


Рис.6. Схематическое изображение ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика.

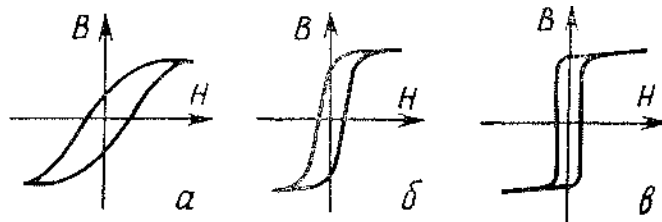


Рис.7. Пологая (а), крутая (б) и прямоугольная (в) петли гистерезиса

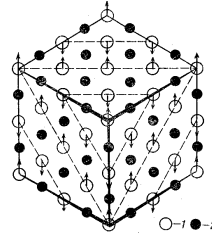


Рис.8. Магнитная структура окиси марганца: 1 – Mn; 2 – O

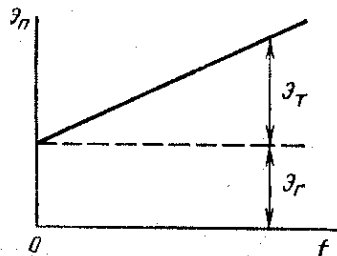


Рис.9. Зависимость потерь на перемагничивание ферромагнетика за один период изменения поля от частоты

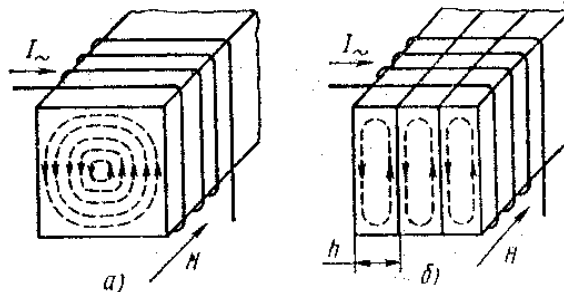


Рис.10. Схема распределения вихревых токов в поперечном сечении ферромагнитного сердечника: а — сплошной сердечник; б — сборный сердечник

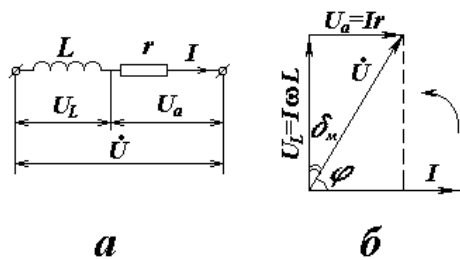


Рис.11. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) индуктивной катушки с магнитным сердечником

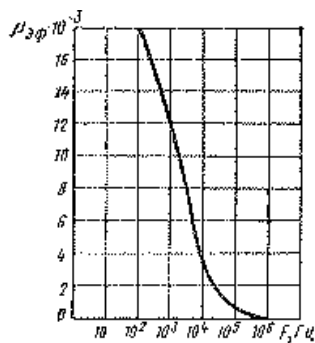


Рис.12. Зависимость эффективной магнитной проницаемости пермаллоя от частоты в слабом поле

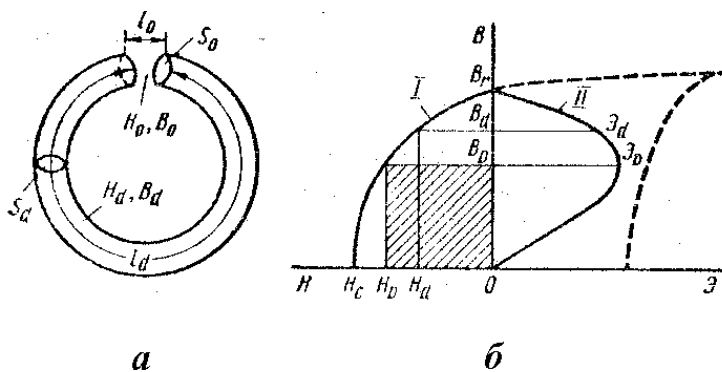


Рис.1. Кривые размагничивания (а) и магнитной энергии в воздушном зазоре (б)

ПОЛУПРОВОДНИКИ

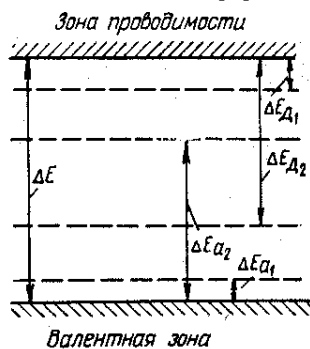


Рис.1. Мелкие и глубокие примесные уровни в запрещенной зоне полупроводника.

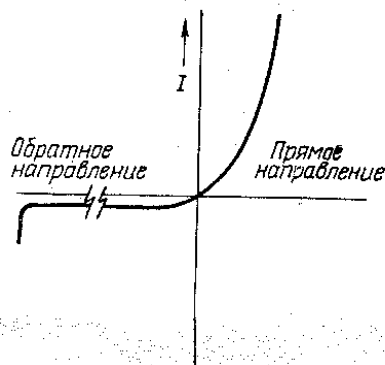


Рис.2. Вольтамперная характеристика р—п-перехода

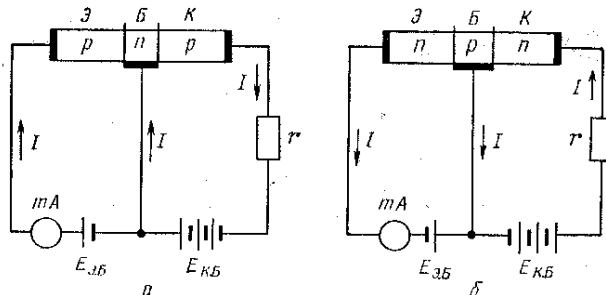


Рис.3. Схемы транзисторов типа р—п—р (а) и п—р—п (б): Э – эмиттер, Б – база; К – коллектор.

Маркировка промышленных сплавов кремния и германия

Марка материала	расшифровка		
	ρ , Ом·см (при 300К)	L, мм (при 300К)	примечание
КЭФ 0.02	0.01-0.03	-	Кремний <i>n</i> -типа (электронный), легированный фосфором
КЭФ 0.3/0.1	0.25-0.40	0.1	
КДБ 7.5/0.5	6.0-9.0	0.5	Кремний <i>p</i> -типа, легированный бором
ГЭС 0.004	0.003-0.005	-	Германий <i>n</i> -типа, легированный сурьмой
ГДГ 5.0/0.1	4.2-5.7	≥ 1.0	Германий <i>p</i> -типа, легированный галлием

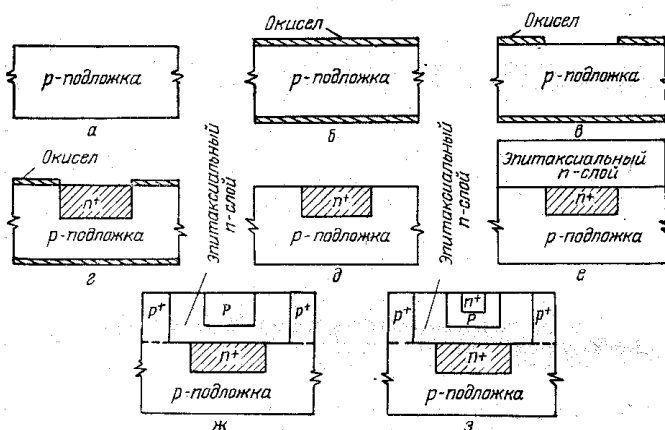


Рис.4. Последовательность операций при изготовлении в интегральной микросхеме изолированного транзистора со скрытым слоем:

а — исходная подложка *p*- типа; *б* — окисление; *в* — создание отверстий в окисле; *г* — получение диффузионного скрытого слоя; *д* — удаление окисла; *е* — нанесение эпитаксиального слоя; *ж* — создание диффузионного изолирующего пояса и диффузионной базы; *з* — получение диффузионного эмиттера

Схема технологического процесса изготовления маломощного сплавного транзистора

