

Рис. 1.1. Дифракционные картины (а, с, е) и электронно-микроскопические изображения высокого разрешения (b, d, f) монокристалла (а, b), поликристалла (с), нанокристалла в аморфной матрице (d) и некристаллического материала (е, f).

№ п/п	ОБРАБОТКА	Скорость охлаждения, град/сек	Характеристика образцов	Стеклообразующая способность
1	Отжиг больших зеркал телескопов	10^{-3}	Объемные	Хорошая
2	Отжиг оптических стекол	$\sim 2 \cdot 10^{-4}$	Объемные	Хорошая
3	Отжиг обычных стекол	$10^{-3} - 10^{-2}$	Объемные	Хорошая
4	Закаливание на воздухе	1 - 2	Объемные	Хорошая
5	Закаливание в воду	8 - 10	Объемные	Плохая
6	Закаливание в воду в тонкостенной (0,5 мм) ампуле	35	1 грамм вещества	Плохая
7	Закаливание в воду в тонкостенной (0,5 мм) ампуле	180	15 мг вещества	Очень плохая
8	Разбрызгивание расплава	$\sim 10^3$	Порошок	–
9	Спиннингование	$10^5 - 10^6$	Лента толщиной десятки мкм	–
10	Распылительная закалка под действием ударной волны	$10^6 - 10^{10}$	Порошок	–

Рис. 1-2. Скорости охлаждения расплава, используемые в различных случаях.

Система	Содержание халькогена, атомные %
As - S	34 – 49. 55 -95
As - Se	40 – 100
As - Te	42 – 54
Sb - S	66
Sb - Se	-----
Sb - Te	-----
Si - S	50 – 69
Si - Se	80 – 100
Si - Te	78 – 80
Ge - S	55 – 60. 66 – 90
Ge - Se	75 – 100
Ge - Te	78 - 88

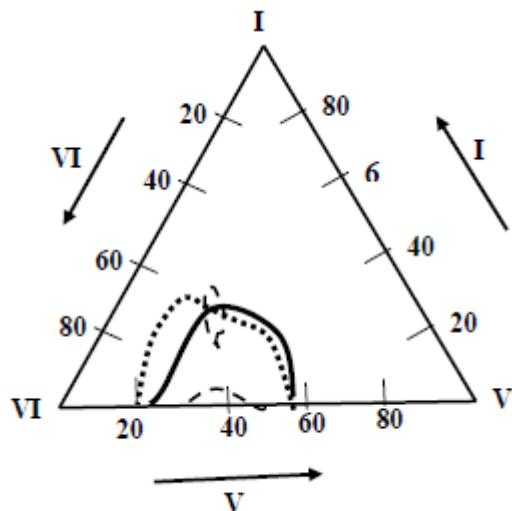


Рис.1.3. Области стеклообразования в системах $A^{IV}B^{VI}$ и A^VB^{VI}

Рис. 1.4. Области стеклообразования в системах $A^I B^V C^{VI}$: Cu – As – Se (сплошная линия), Ag – As – S (пунктирная линия) Ag – As – Te (точки).

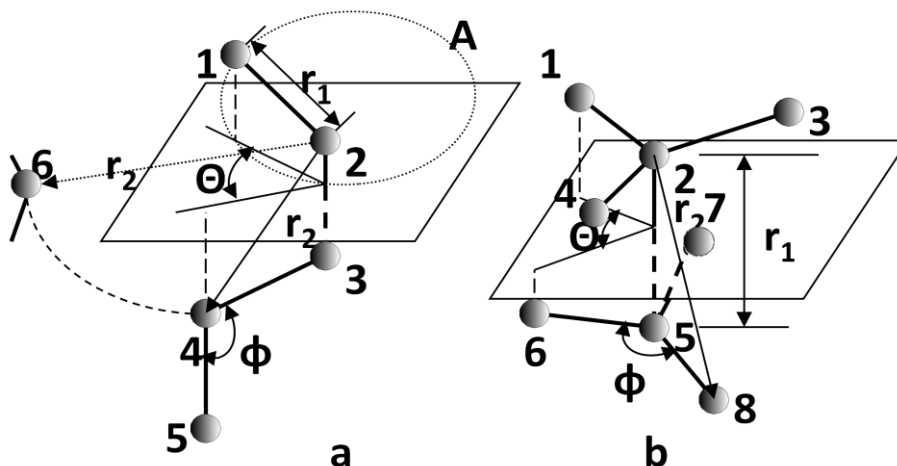


Рис.1.5. Характеристики взаимного расположения атомов в случае линейной (a) и тетраэдрической (b) структур.

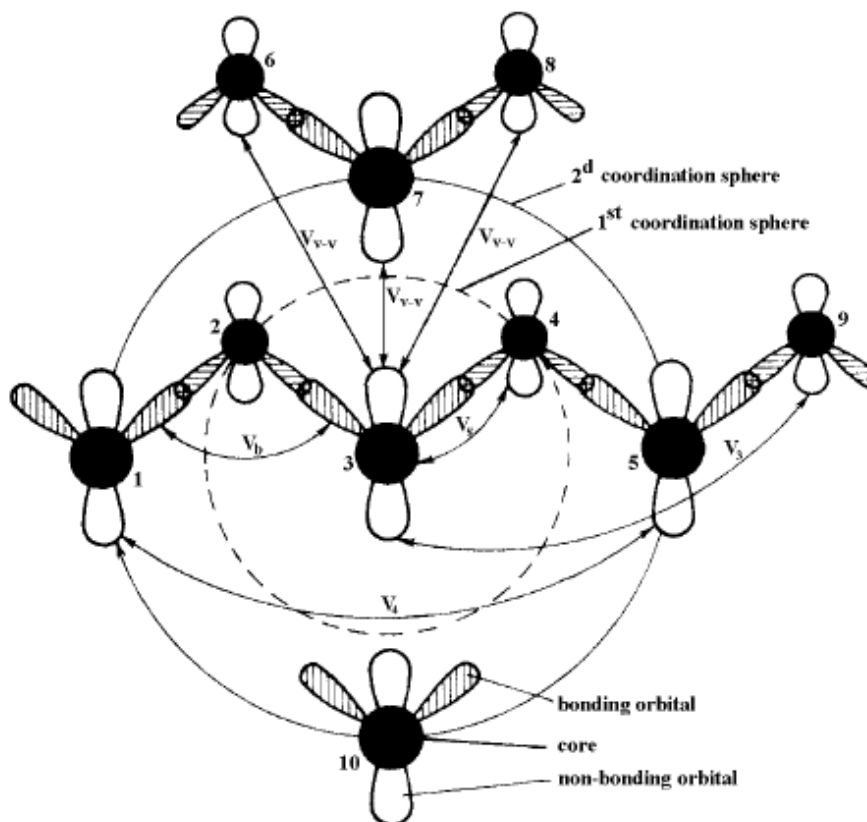


Рис. 1.6. Межатомные взаимодействия в линейном полимере.

$$I_s(S) = I(S) + \varphi(S) \quad (1) \quad \int I_s(S) S^2 dS = \int I_c(S) S^2 dS, \quad (3)$$

$$\frac{1}{j} \int I(S) S^2 dS = \int f^2(S) S^2 dS, \quad (2) \quad I_c(S) = \varphi(S) + j f^2(S), \quad (4)$$

$$i(S) = \frac{I_w(S) - f^2(S)}{f^2(S)} = \frac{1}{j} \left[\frac{I_s(S)}{f^2(S)} - \frac{I_c(S)}{f^2(S)} \right] = \frac{1}{j} i_1(S) \quad (5)$$

$$\int i(S) dS = 0 \quad (6); \quad \int i_1(S) dS = 0 \quad (6a) \quad j_{\min} > \text{MAX} \left\{ \frac{I_c(S)}{f^2(S)} - \frac{I_s(S)}{f^2(S)} \right\} \quad (9)$$

$$I_w(S) = f^2(S) \left[\frac{1}{j} i_1(S) + 1 \right] \quad (7) \quad j_{\max} < \text{MIN} \left\{ \frac{I_c(S)}{f^2(S)} \right\} \quad (10)$$

$$\varphi_w(S) = \frac{1}{j} \varphi(S) = f^2(S) \left[\frac{1}{j} \frac{I_c(S)}{f^2(S)} - 1 \right] \quad (8)$$

$$j_{\text{cp}} = \frac{j_{\max} + j_{\min}}{2} = \frac{1}{2} \left[\text{MAX} \left\{ \frac{I_c(S)}{f^2(S)} - \frac{I_s(S)}{f^2(S)} \right\} + \text{MIN} \left\{ \frac{I_c(S)}{f^2(S)} \right\} \right] \quad (11)$$

$$\int \frac{I_s(S)}{f^2(S)} dS = \int \frac{I_c(S)}{f^2(S)} dS \quad (12) \quad i_1(S) = \frac{I_s(S)}{f^2(S)} - \frac{I_c(S)}{f^2(S)} \quad (13)$$

$$\Phi_{PPA}(r) = 4\pi r^2 \rho(r) = 4\pi r^2 \rho_0 + \frac{2r^2}{\pi} \int_{S_1}^{S_2} S \cdot i(S) \cdot \sin(Sr) dS \quad (14)$$

Расчет нормированной интенсивности рассеяния электронов

S, Å	D, отн. ед.					t=2''		t=4''		t=8''		t=16''		t=32''		I _s ^н , отн. ед.	f ²	I _s ^н / f ²	I _c ^н / f ²	i ₁	I _w
	2	4	8	16	32	t	%	t	%	t	%	t	%	t	%						
0.2																					
0.4																					
0.6																					
5.8																					
6.0																					

Рис. 1.7. Расчет нормированной интенсивности рассеяния электронов.

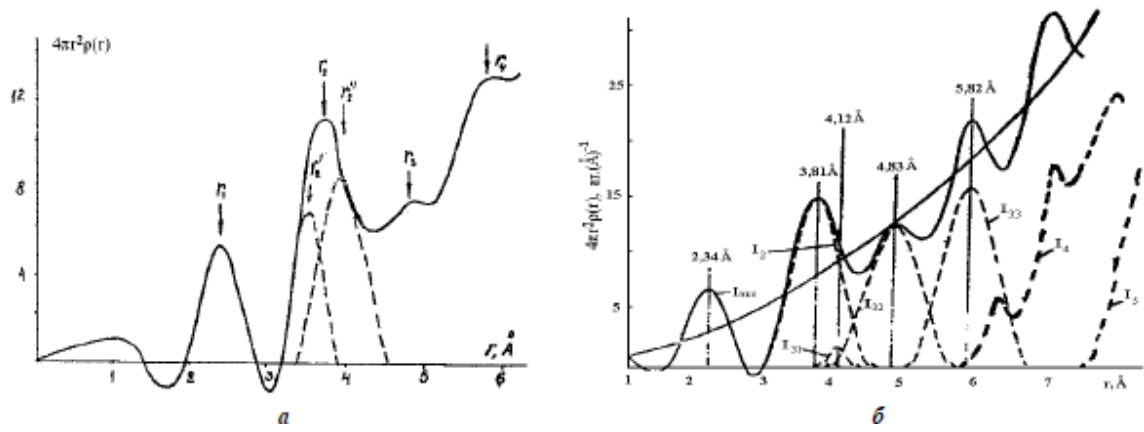


Рис. 1.8. ФРРА некристаллических селена (а) и кремния (б).

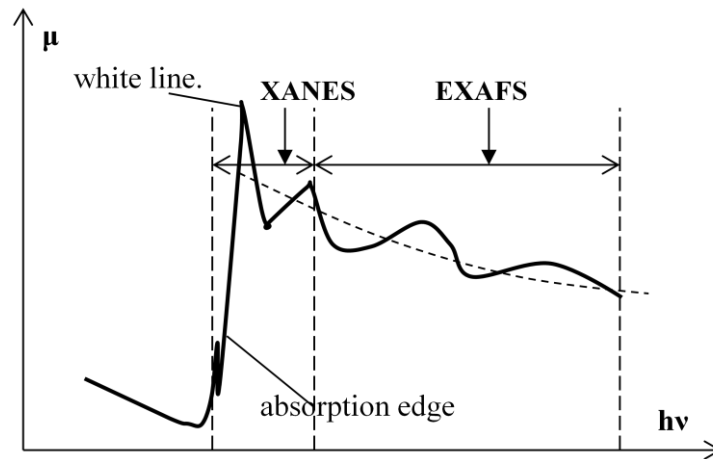


Рис. 1.9. Тонкая структура края поглощения рентгеновского излучения.

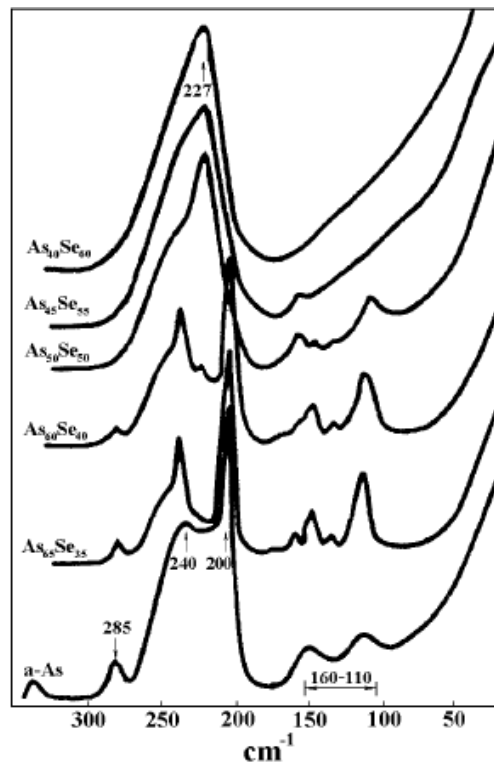


Рис. 1.10. Спектры КР стеклообразных материалов системы As – Se.

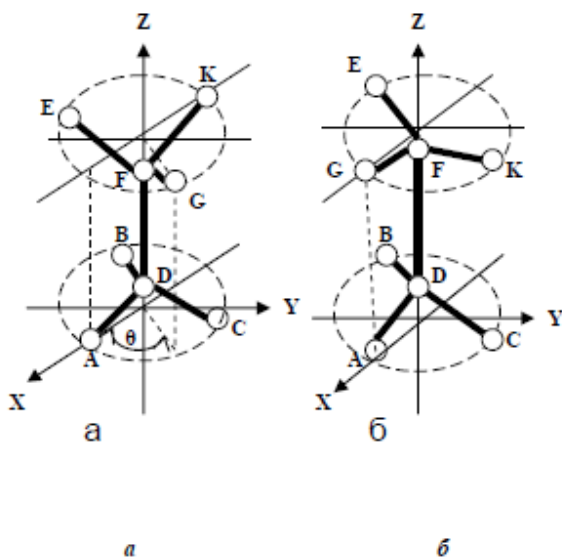


Рис. 1.11. Звездообразная (а) и затененная (б) конфигурации атомов кремния.

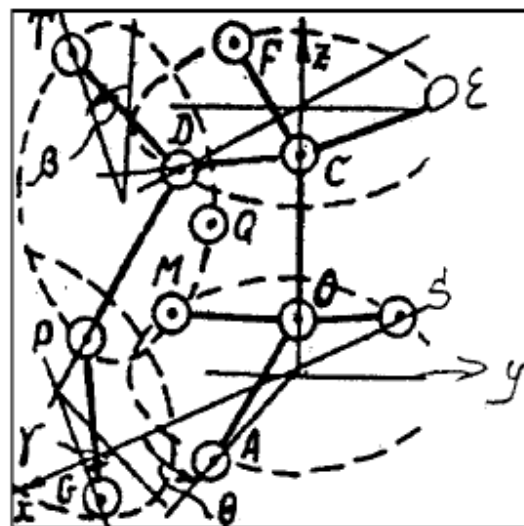


Рис. 1.12. Модель ячейки аморфного кремния.

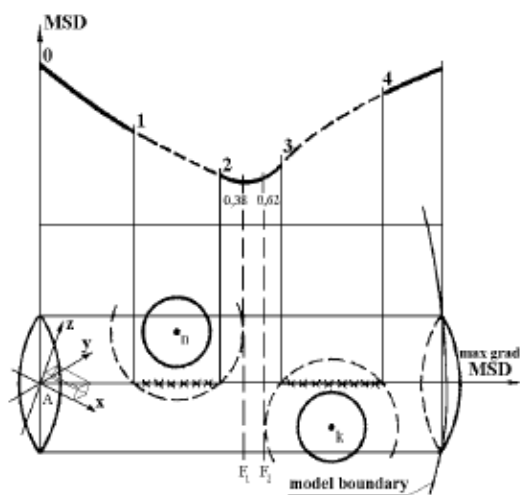


Рис. 1.13. Нахождение положения атома, соответствующего минимуму СКО.

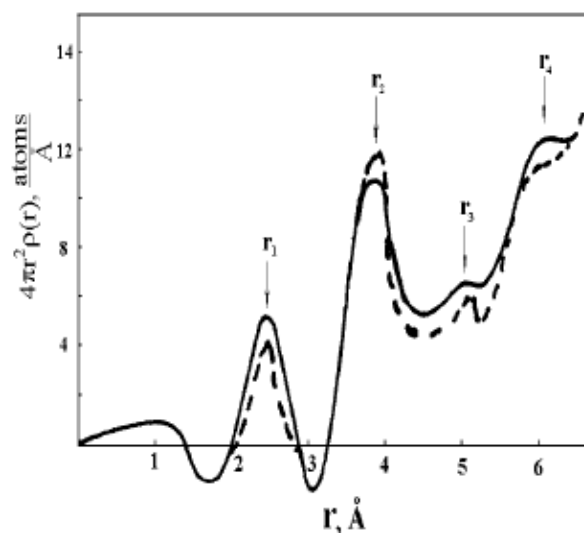


Рис. 1.14. Экспериментальная ФРРА (—) и ФРРА модели (---) стеклообразного селена.

Энергия деформации ковалентных связей для тетраэдрических систем:

$$V = \frac{3\alpha}{16d_0^2} \sum_{ij} [(R_i - R_j)^2 - d_0^2]^2 + \frac{3\beta}{8d_0^2} \sum_{ijkl} [(R_j - R_i)(R_l - R_i) - \frac{d_0^2}{3}]^2,$$

где: d_0 - ; ij, l - ; $R_{i(j,l)}$ - ; α, β - .

Двухкоординированные системы:

Энергия деформации длин связей: $V_b = 0.5\alpha \sum (R_{ij}^2 - d_0^2)^2$, (1)

где: $R_{ij} = |R_i - R_j|$ - ; d_0 - ; α - .

Энергия деформации угла связи: $V_a = 0.5\beta \sum (|R_{ij} \cdot R_{kl}| - c)^2$, (2)

где: $R_{ij} = R_i - R_j$, $R_{kl} = R_k - R_l$ - ; c - ; β - .

Энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия: $V_{v-v} = \sum V_{ij}$

$$V_{ij} = \begin{cases} -\frac{A}{(R_{ij})^6} + \frac{B}{(R_{ij})^{12}}, & R_{ij} \leq R_c \\ 0 & R_{ij} > R_c \end{cases},$$
 (3)

где: A и B - ; $R_c \approx 4-5 \text{ \AA}$ -

Энергия деформации двугранных углов: $V_d = \gamma \sum [(R_{ij} \cdot R_{jk})(R_{jk} \cdot R_{kl}) - K]^2$, (4)

где: γ - ; ij, k, l - ; K - ;

Рис. 1.15. Энергия деформации ковалентных связей для тетраэдрических и линейных систем.

АЛЛОТРОПНЫЕ ФОРМЫ СЕЛЕНА		
№	Аллотропные формы	Молекулярный состав
Кристаллические		
1	Тригональная	Параллельные спиралевидные цепи Se_n
2	α - моноклинная	Кольца Se_8
3	β - моноклинная	Кольца Se_8
4	Ромбоэдрическая	Кольца Se_6
Некристаллические		
1	Красная аморфная	Кольца Se_6
2	Черная аморфная	?
3	Стеклообразная	Цепи и/или кольца

Рис. 1.16. Аллотропные формы селена

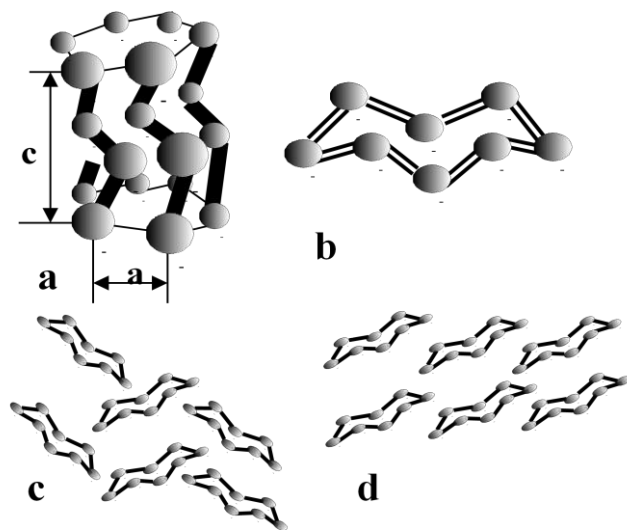


Рис. 1.17. Элементарные ячейки кристаллических модификаций селена: а - элементарная ячейка тригональной модификации; б- кольцевая молекула; с и d - упаковка кольцевых молекул в кристаллическую решетку α и β - моноклинного селена (а и с – постоянные кристаллической решетки).

Инфракрасное поглощение в диапазоне частот 50-300 см ⁻¹							Комбинационное рассеяние				
Стеклообразный селен	Положение, см ⁻¹	95	120	135	230	254	Сдвиг, см ⁻¹	110-115	140	~235	250-256
	характер	пик	плечо	пик	плечо	пик	характер	пик	плечо	плечо	пик
α -моноклинный селен	Положение, см ⁻¹	92-95	120	-	-	254	Сдвиг, см ⁻¹	113	-	-	250
	характер	дублет	пик	-	-	пик	характер	пик	-	-	пик
Тригональный селен	Положение, см ⁻¹	-	-	144	230	-	Сдвиг, см ⁻¹	-	143	237	-
	характер	-	-	пик	пик	-	характер	-	пик	пик	-

Рис. 1.18. Результаты исследований селена методами колебательной спектроскопии.

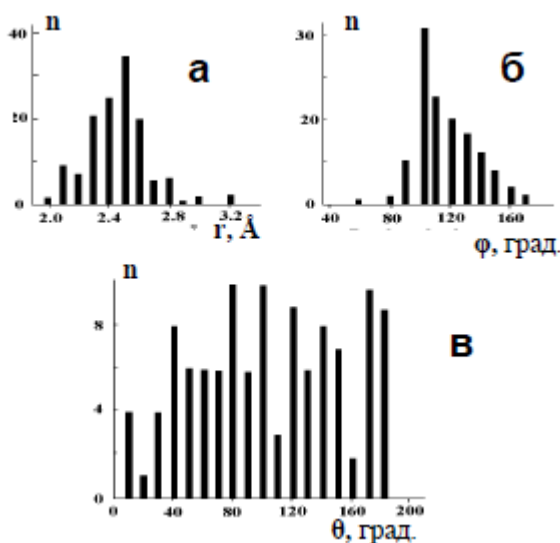


Рис. 1.19. Распределение длин (а), углов связей (б) и двугранных углов (в) в модели некристаллического селена.

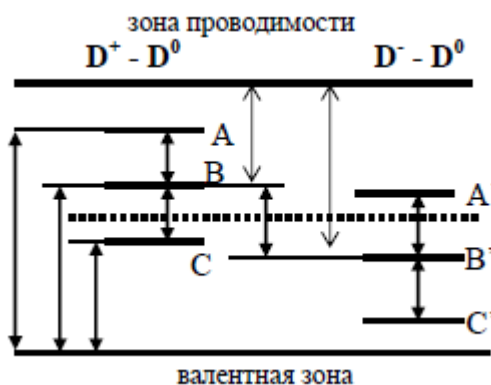


Рис. 1.20. Уровни локализованных состояний, соответствующие точечным дефектам в некристаллических полупроводниках.

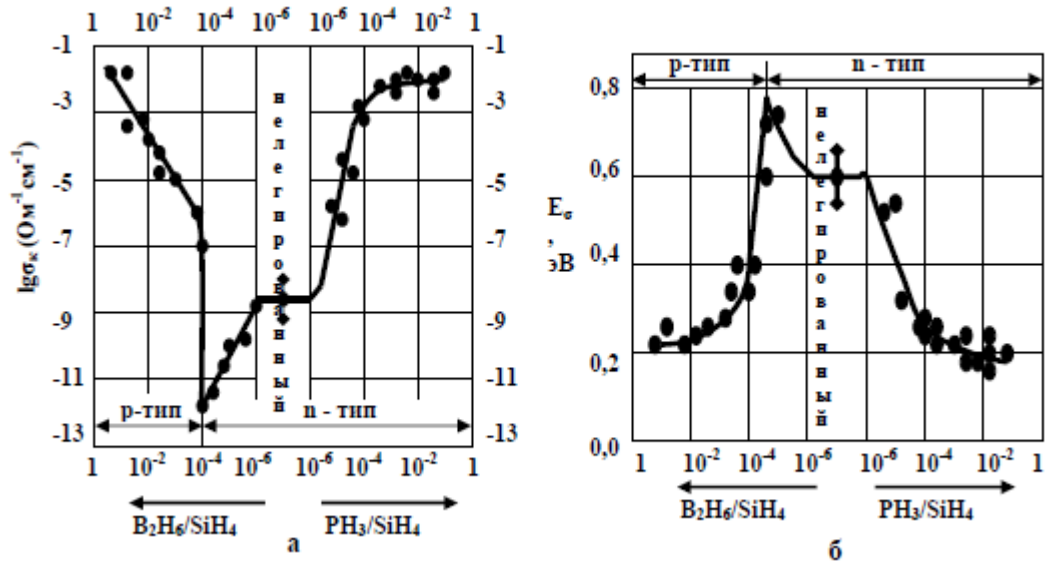


Рис. 1.21. Зависимость электропроводности (а) и её энергии активации (в) от уровня легирования a – Si:H.

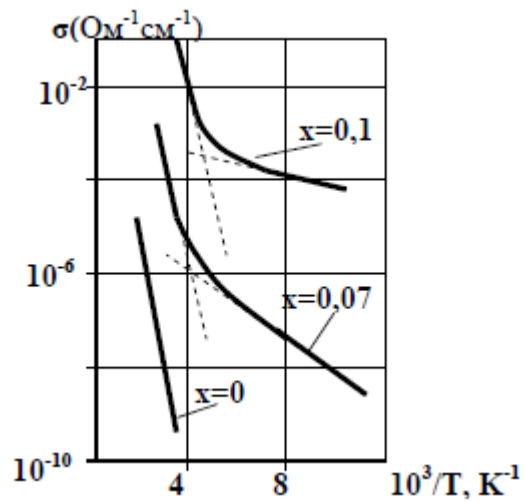


Рис. 1.22. Влияние химической модификации на температурную зависимость электропроводности пленок ХСП.

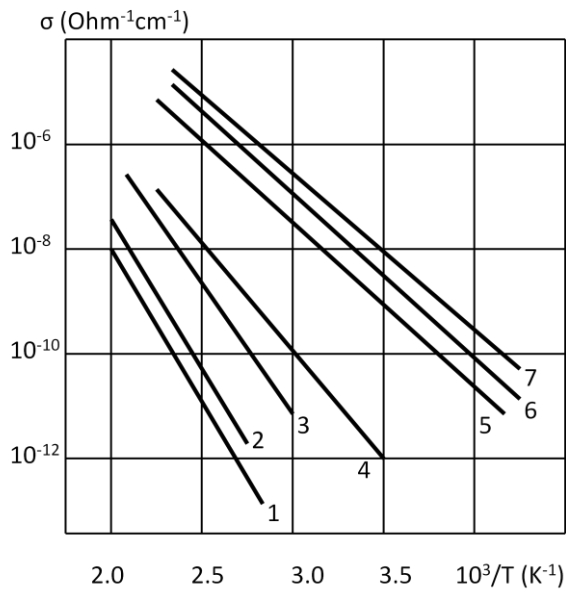


Рис. 1.23. Температурная зависимость электропроводности ХСП $(\text{GeSe}_{3.5})_{1-x}\text{Bi}_x$ для $x = 0$ (1), $x = 0.04$ (2), $x = 0.06$ (3), $x = 0.08$ (4), $x = 0.10$ (5), $x = 0.12$ (6) и $x = 0.14$ (7).

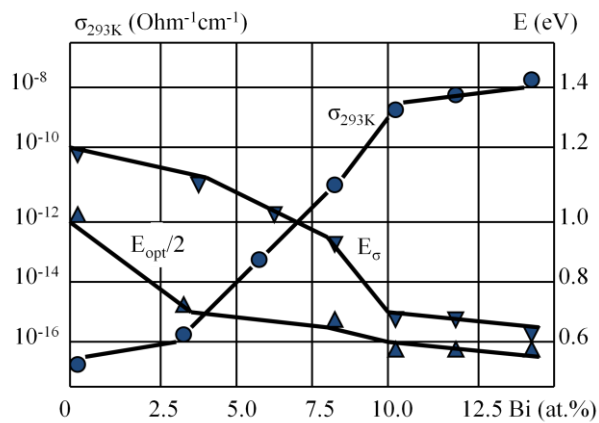


Рис. 1.24. Концентрационные зависимости электропроводности ($\sigma_{293\text{K}}$), энергии активации электропроводности (E_σ) и половины ширины оптической запрещенной зоны ($E_{\text{opt}}/2$) ХСП системы $(\text{GeSe}_{3.5})_{1-x}\text{Bi}_x$.

Уровни структурной модификации

	способ воздействия	характеристика чувствительных свойств	группы чувствительных свойств	примеры чувствительных свойств
Ближний порядок	Различные методы и режимы получения	Все свойства	Все свойства	Все свойства
Средний порядок	Воздействия в период или после изготовления внешними факторами	Свойства, связанные с перегруппировкой структурных единиц	Механические свойства, фазовые переходы	
Морфология	Изменения режимов получения	Свойства, зависящие от макрон неоднородностей	Электрические оптические	Электропроводимость на переменном токе
Подсистема дефектов	Обработки, воздействующие на подсистему дефектов	Свойства, зависящие от распределения плотности локализованных состояний	Электрические, фото-электрические	Полевая зависимость электропроводимости

Рис. 1.25. Уровни структурной модификации неупорядоченных полупроводников

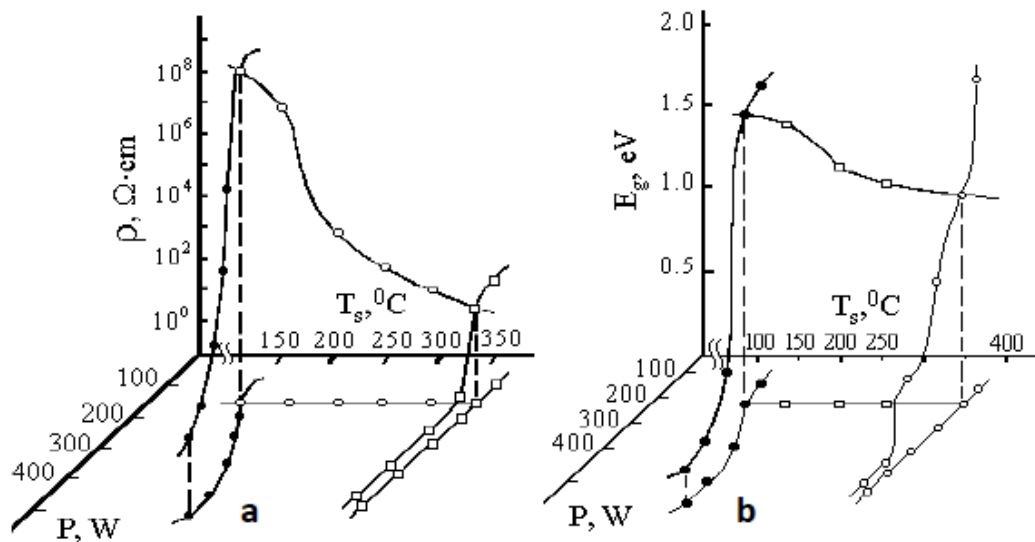


Рис. 1.26. Зависимости удельного сопротивления (а) и ширины оптической запрещенной зоны (б) пленок а-С:Н от режимов их изготовления (T_s – температура подложки, P – мощность высокочастотного разряда).

Период	Группа Координационное число (N_c)					
	IVA	N_c	VA	N_c	VIA	N_c
2	6 C 12	2 3 4				
3	14 Si 28	2 3 4	15 P 31	3	16 S 32	2
4	32 Ge 72,5	4	33 As 75	3	34 Se 79	2 4 6
5			51 Sb 122	3	52 Te 128	2 3-рас- плав

Рис. 1.27. Структурная модификация на уровне ближнего порядка.

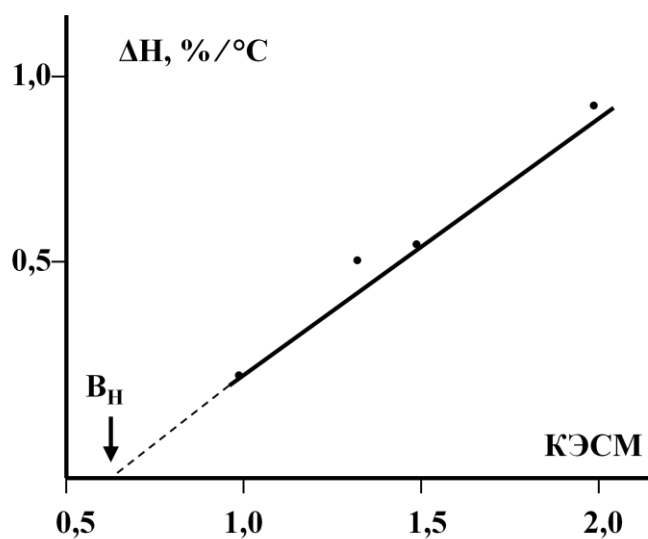


Рис. 1.28. Зависимость величины изменения микротвердости ХСП в результате изменения тепловой предыстории материала от величины КЭСМ.

группы		системы $A_x^{IV}(A_x^{V})B_{1-x}^{VI}$							группа
		значения x							
IV A	V A	0.60	0.50	0.40	0.33	0.25	0.20	0.11	VI A
Ge 4 4					GeSe ₂ 2.66 2.40	GeSe ₃ 2.50 2.30	GeSe ₄ 2.40 2.24	GeSe ₈ 2.22 2.12	Se 2 2
Ge 4 4			GeS 3.00 2.73	Ge ₂ S ₃ 2.80 2.49	GeS ₂ 2.66 2.30	GeS ₃ 2.50 2.23	GeS ₄ 2.40 2.19	GeS ₈ 2.22 2.10	S 2 2
	As 3 3	As ₂ Se 2.60 2.53	AsSe 2.50 2.42	As ₂ Se 2.40 2.31	AsSe ₂ 2.33 2.25	AsSe ₃ 2.25 2.19	AsSe ₄ 2.20 2.16	AsSe ₈ 2.11 2.09	Se 2 2
	As 3 3	As ₃ S ₂ 2.60 2.49	AsS 2.50 2.38	As ₂ S ₃ 2.40 2.26	AsS ₂ 2.33 2.22	AsS ₃ 2.25 2.17	AsS ₄ 2.20 2.14	AsS ₈ 2.11 2.08	S 2 2

Рис. 1.29. Структурная модификация на уровне среднего порядка и морфологии.

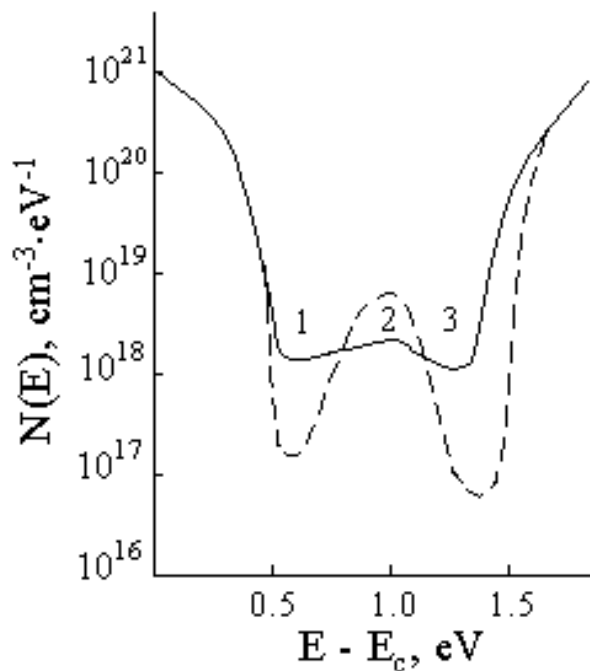


Рис. 1.30. Распределение плотности локализованных состояний в щели подвижности а-Si:H до (сплошная линия) и после (пунктирная линия) обработки ультрафиолетовым излучением (доза 10^{19} см^{-2}) по результатам: 1 – метода постоянного фототока, 2 – моделирования температурной зависимости проводимости, 3 – анализа токов, ограниченных пространственным зарядом.

группы		системы		группа
IV A	V A			VI A
C				
Si	P			
Ge	As	As ₂ S ₃	S - Se	S
		As ₂ Se ₃	Se - Te	Se
		As ₂ Te ₃		Te

Рис.1.31. Структурная модификация на уровне подсистемы дефектов.

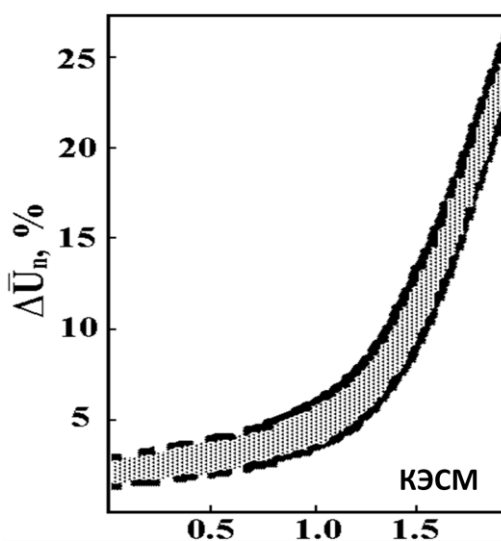


Рис. 1.32. Зависимость величины статистического разброса порогового напряжения переключения от величины КЭСМ.

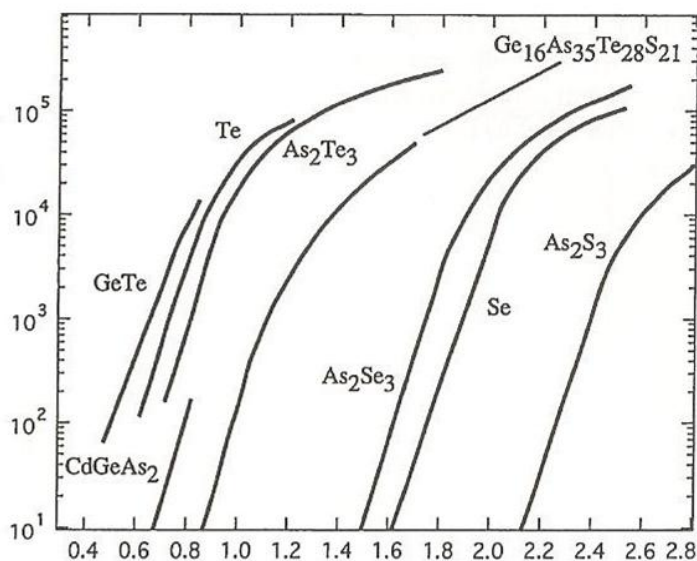


Рис. 1. 33. Экспоненциальная форма края оптического поглощения в некристаллических полупроводниках (при комнатной температуре).

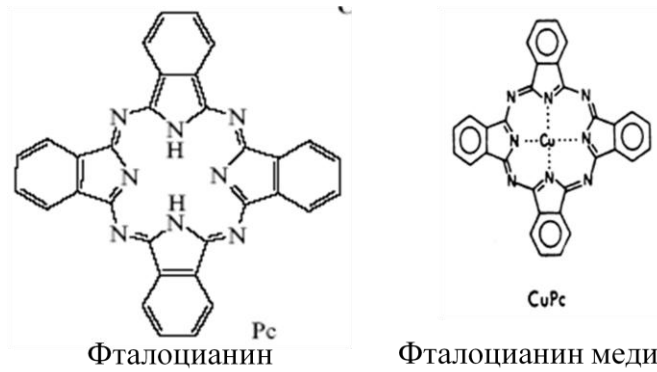


Рис. 1.34. Материалы, состоящие из фиксированных по размеру молекул.

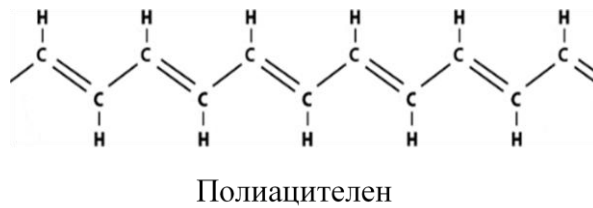


Рис. 1.35. Полимерные материалы

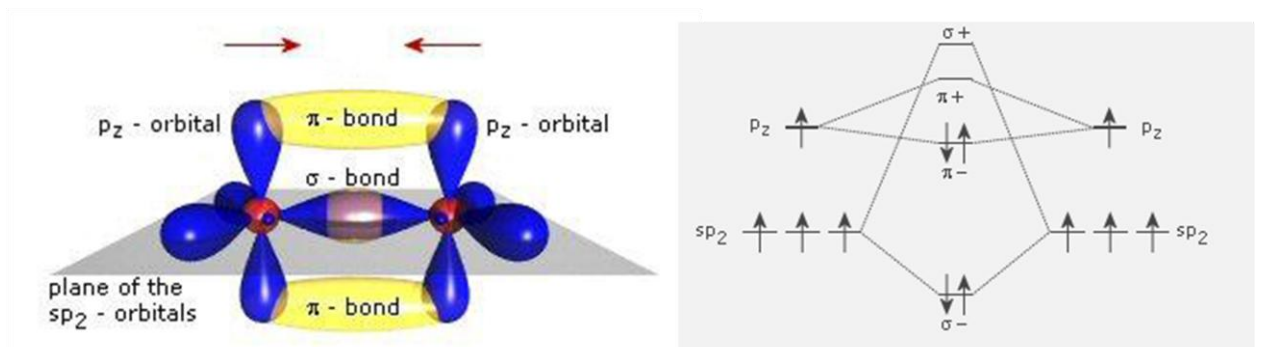


Рис. 1.36. Схема орбиталей и связей для двух sp^2 гибридизированных атомов углерода.

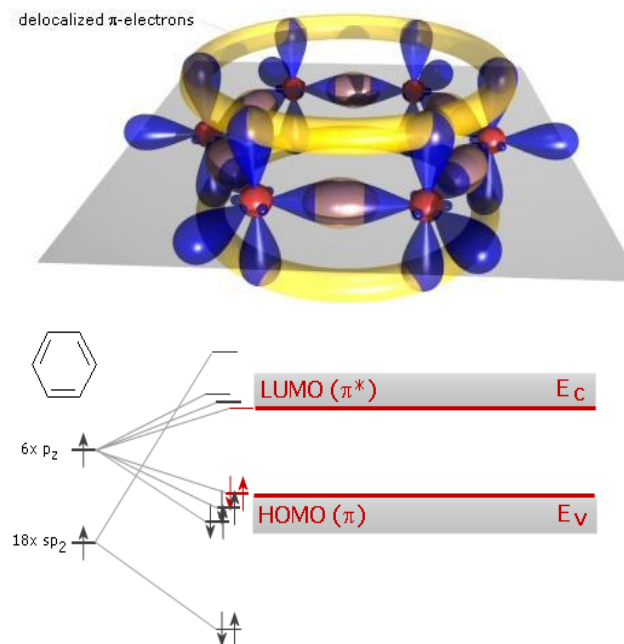


Рис. 1.37. Схема бензольного кольца и энергетической структуры органической молекулы.

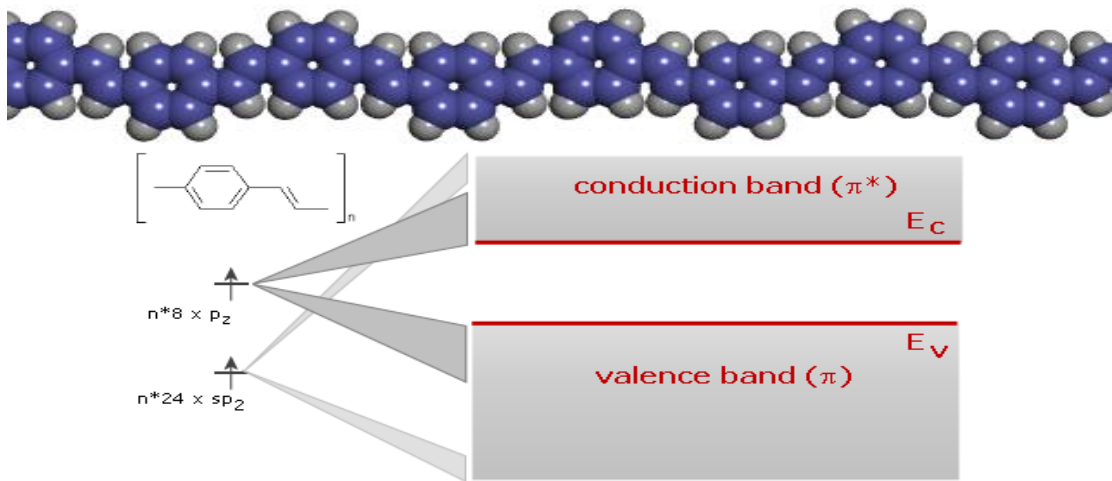


Рис. 1.38. Полупроводниковый полимер (poly-p-phenylene-vinylene PPV).

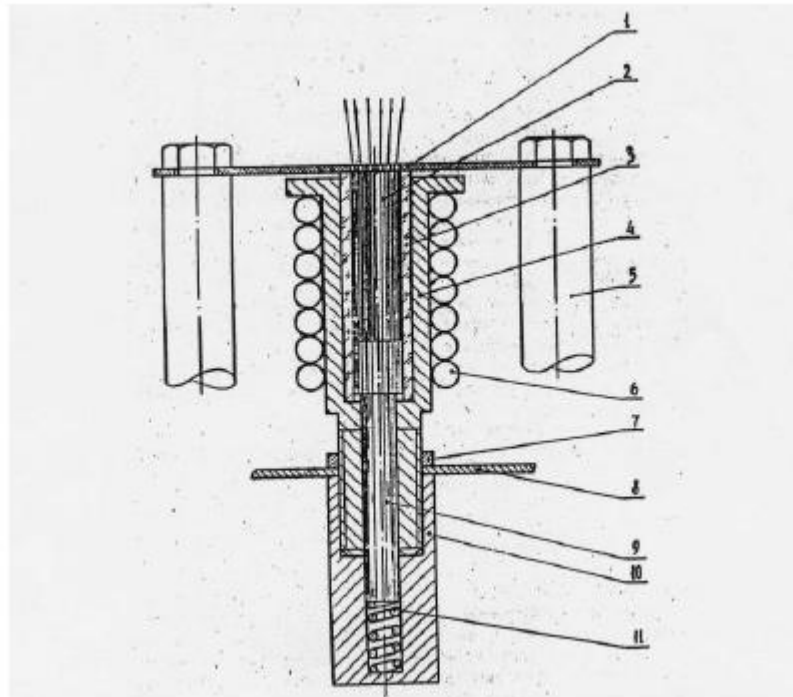


Рис.2.1. Схема испарителя для напыления пленок многокомпонентных ХСП.

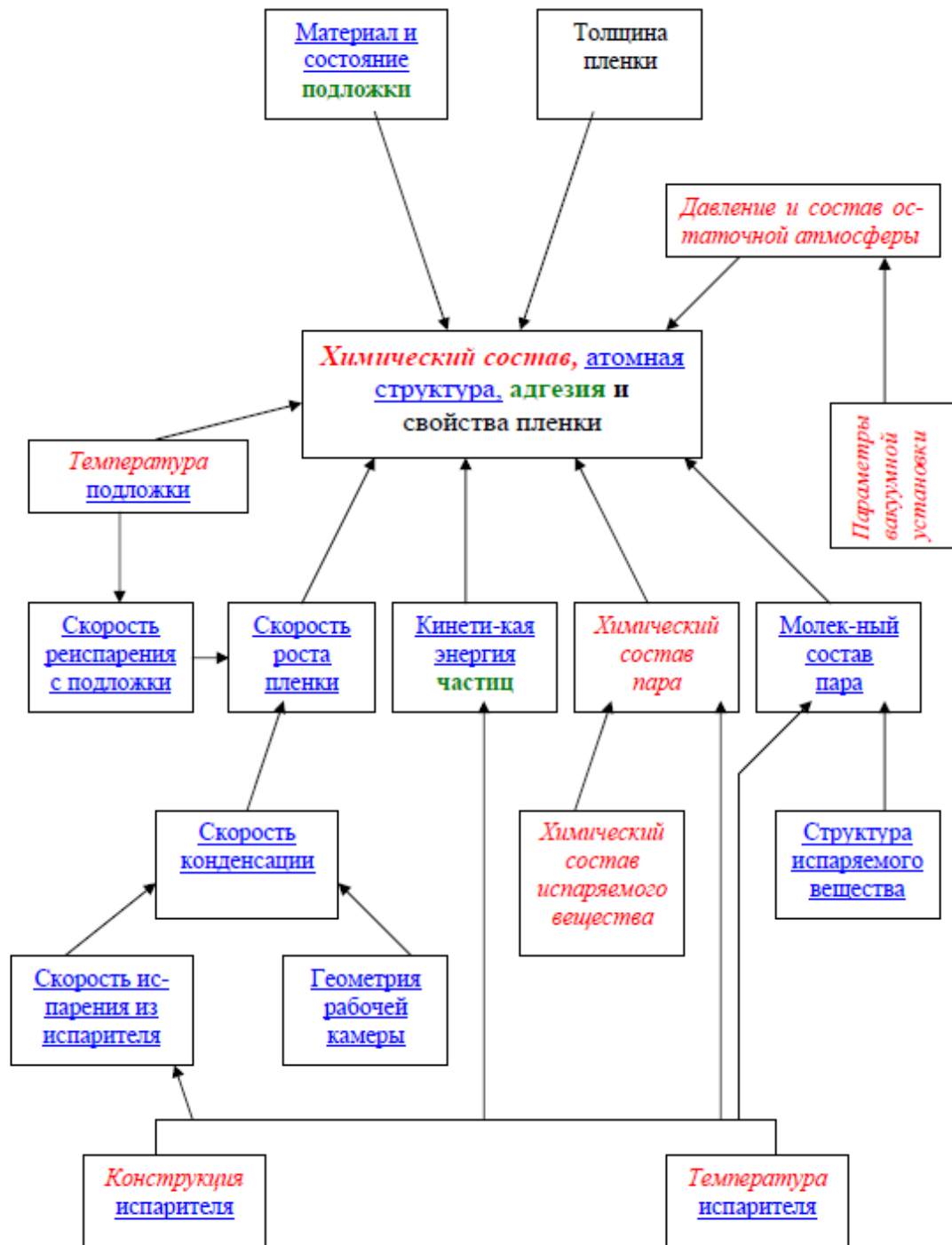


Рис.2.2. Факторы, определяющие параметры пленок при вакуумном напылении.

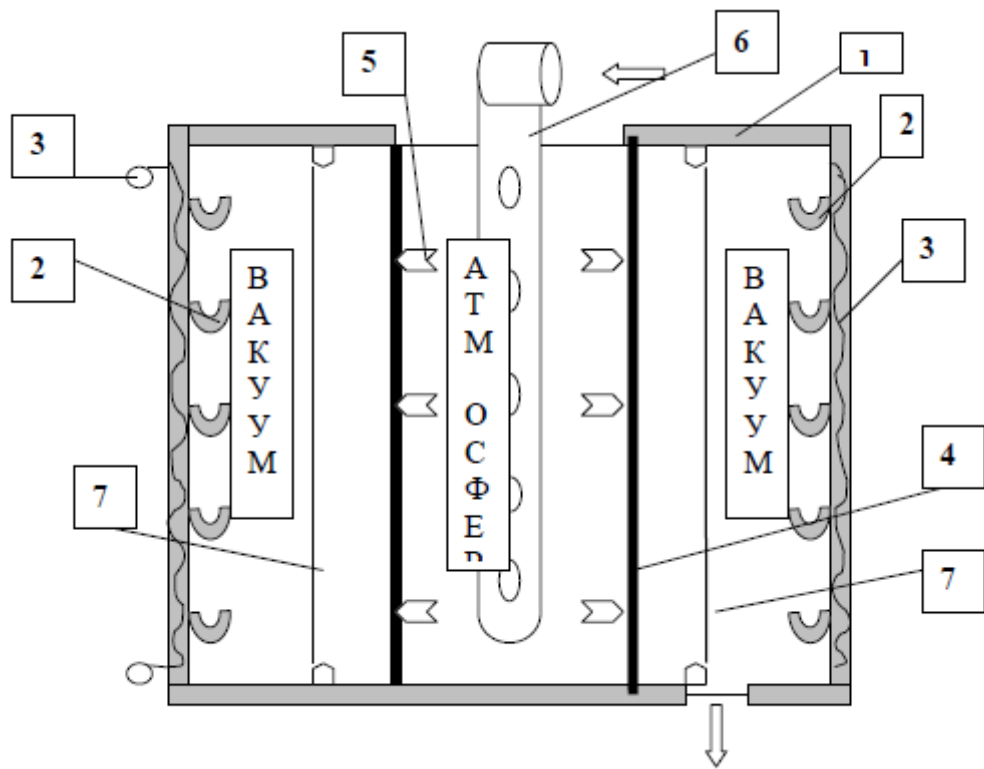


Рис. 2.3. Вакуумная установка для изготовления электрофотографических цилиндров.

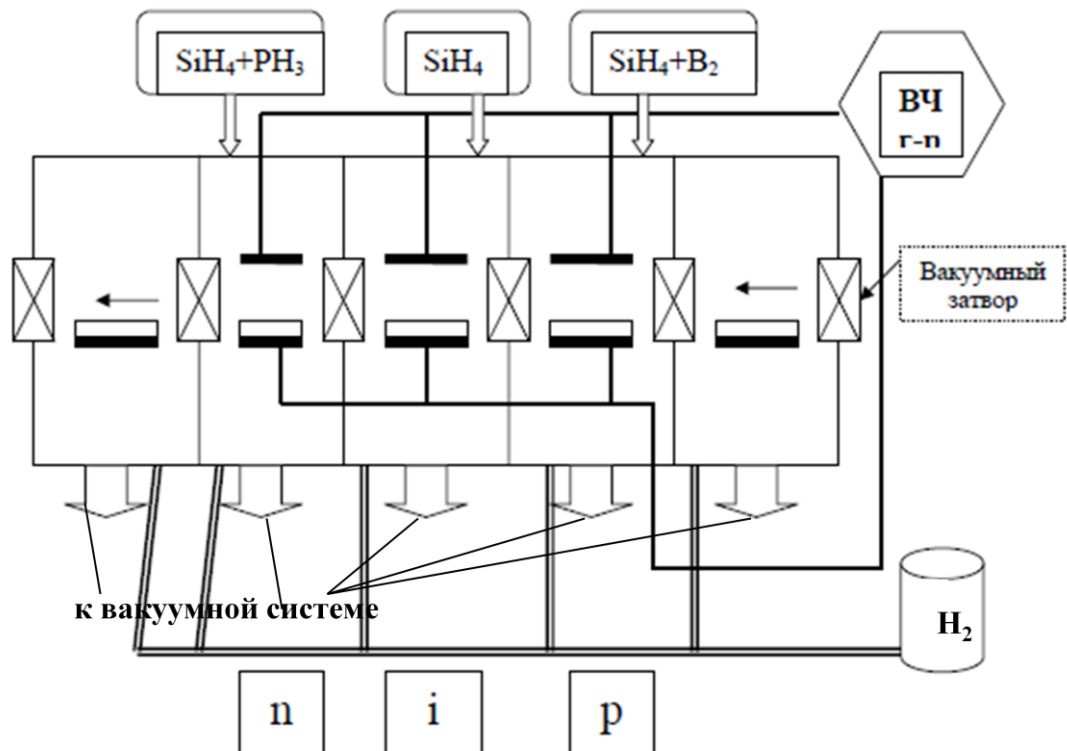


Рис. 2.4. Установка полунепрерывного действия для получения приборов на основе a-Si:H методом разложения силана в плазме тлеющего разряда.

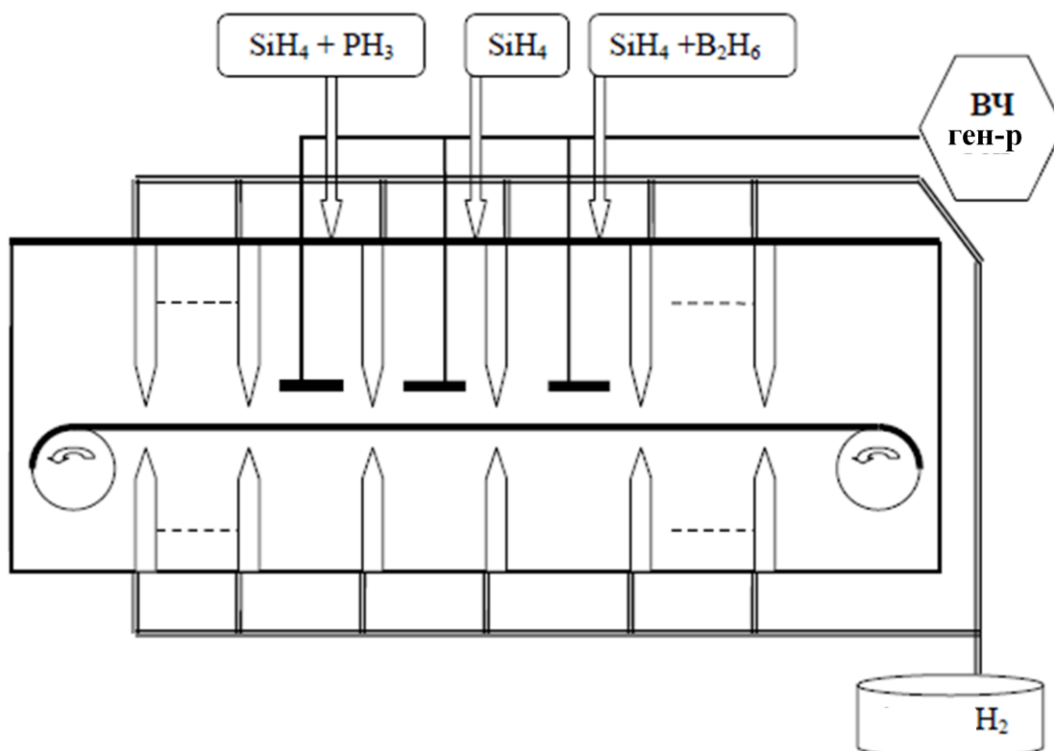


Рис. 2.5. Установка непрерывного действия для получения фотоэлектрических преобразователей на основе a-Si:H методом разложения силана в плазме тлеющего разряда.

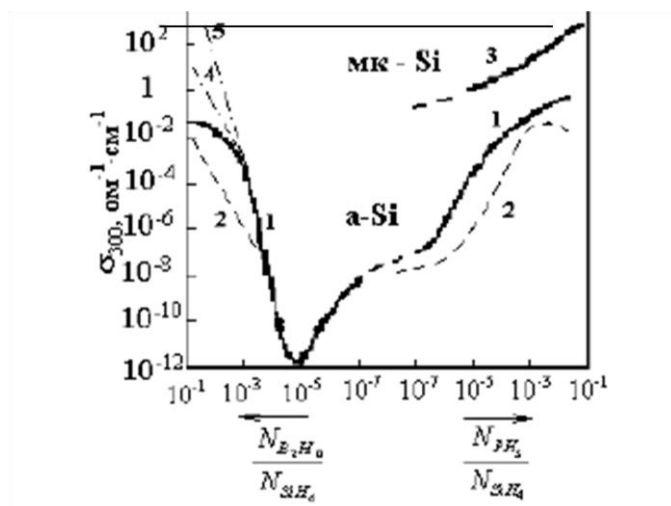


Рис.2.6. Электропроводность микрокристаллического гидрогенизированного кремния.

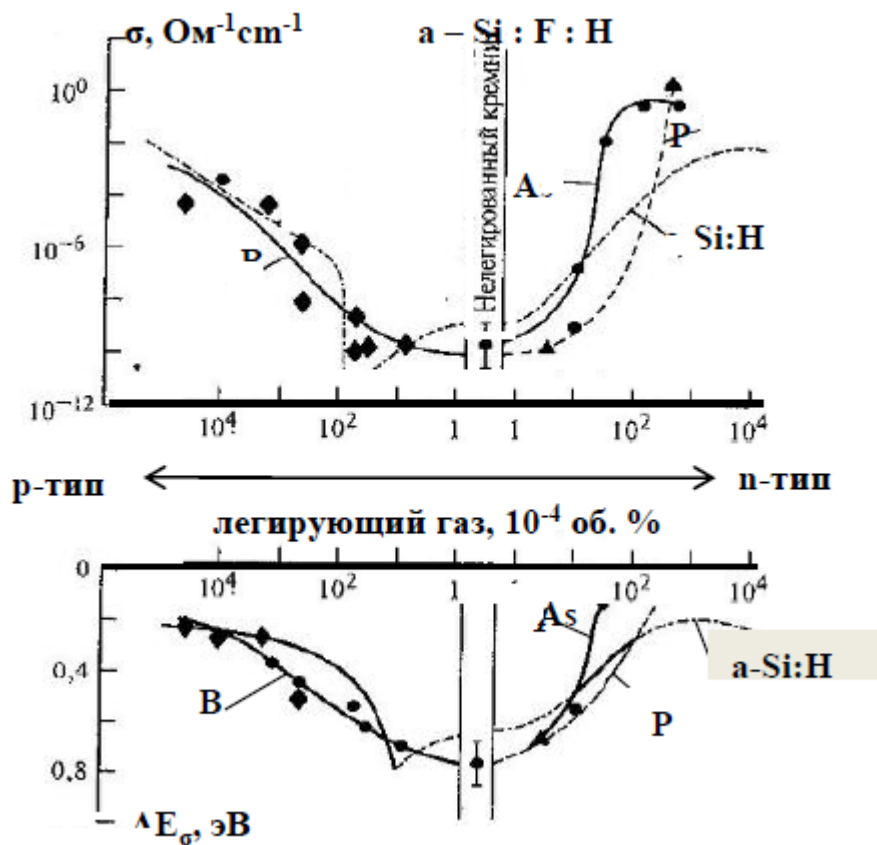


Рис. 2.7. Концентрационные зависимости проводимости и энергии активации проводимости фторированного (легирующие элементы мышьяк, фосфор и бор) и гидрогенизированного аморфного кремния.

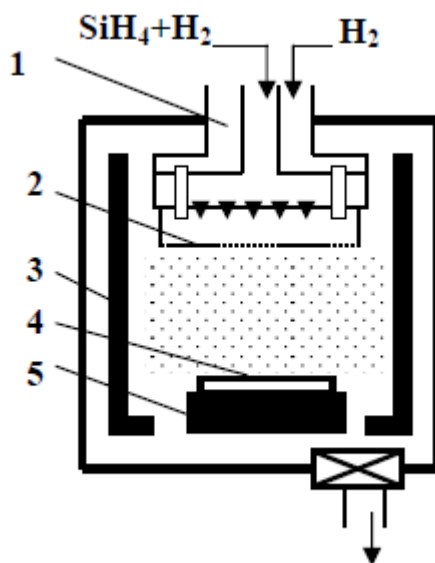


Рис. 2.8. Схема установки для получения пленок a-Si:H каталитическим осаждением из газовой фазы.

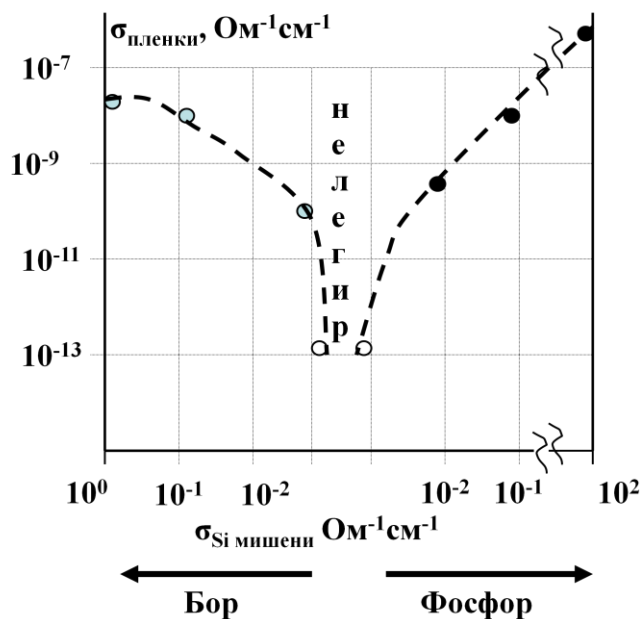


Рис. 2.9. Зависимость электропроводности пленок a-Si:H, полученных методом ионно-плазменного распыления, от электропроводности мишени.

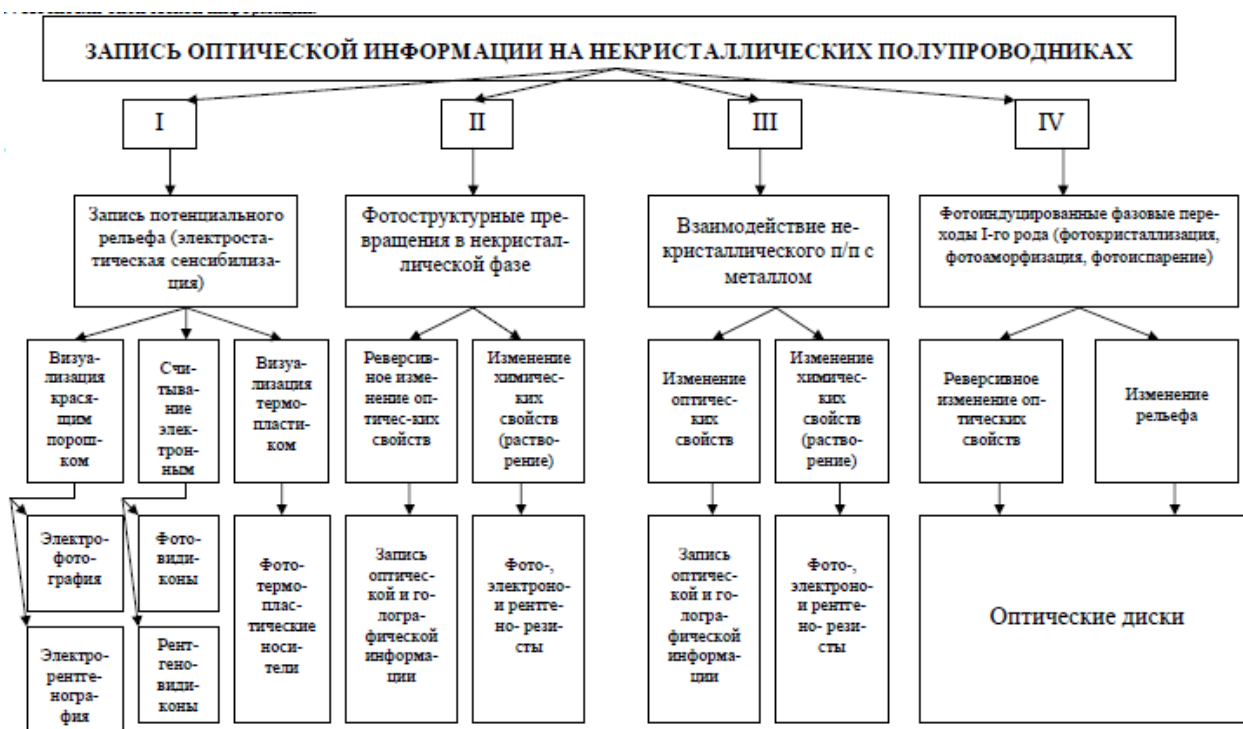


Рис. 2.10. Запись оптической информации.

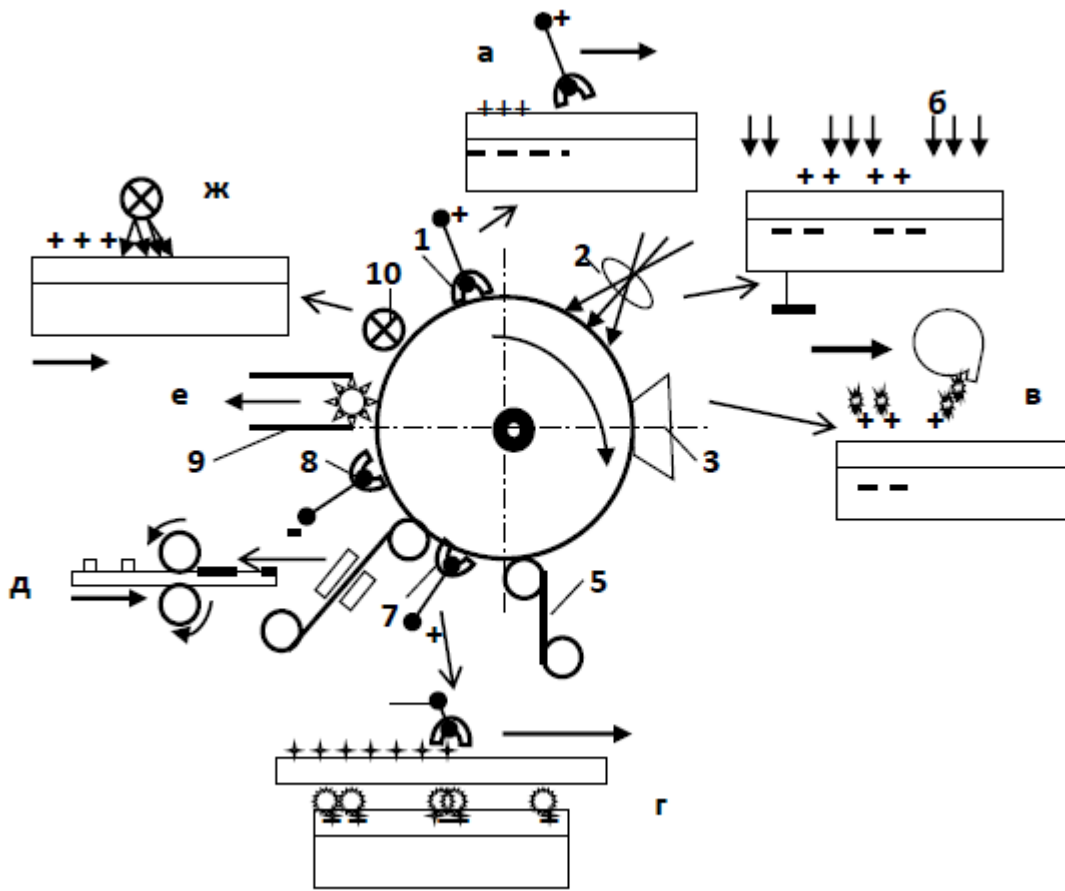


Рис. 2.11. Схема электрофотографического процесса.

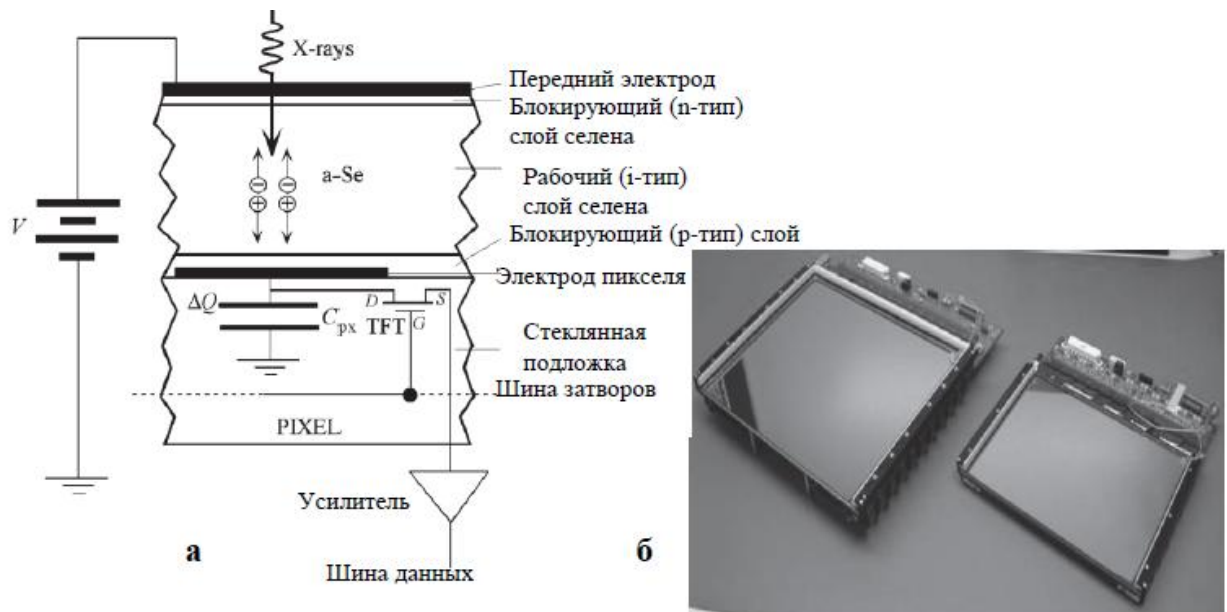


Рис. 2.12. Схематическое изображение пикселя (а) и внешний вид (б) медицинского электрорадиографического детектора.

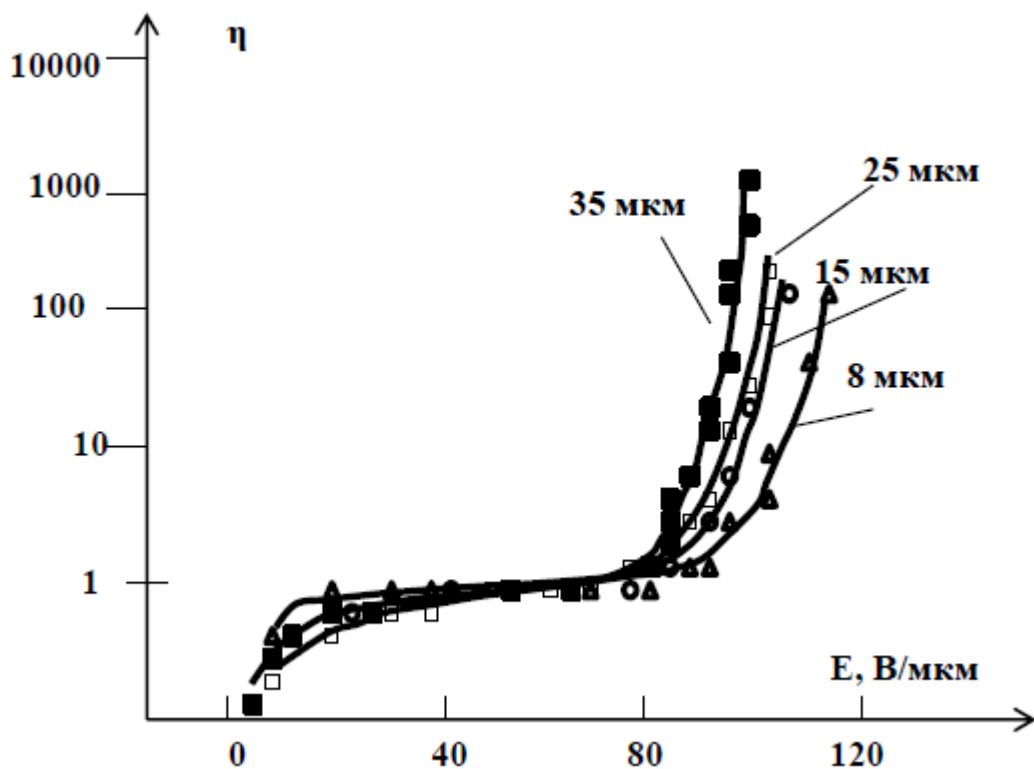


Рис. 2.13. Зависимости квантового выхода в видиконах от напряженности поля при различных толщинах селенового слоя.

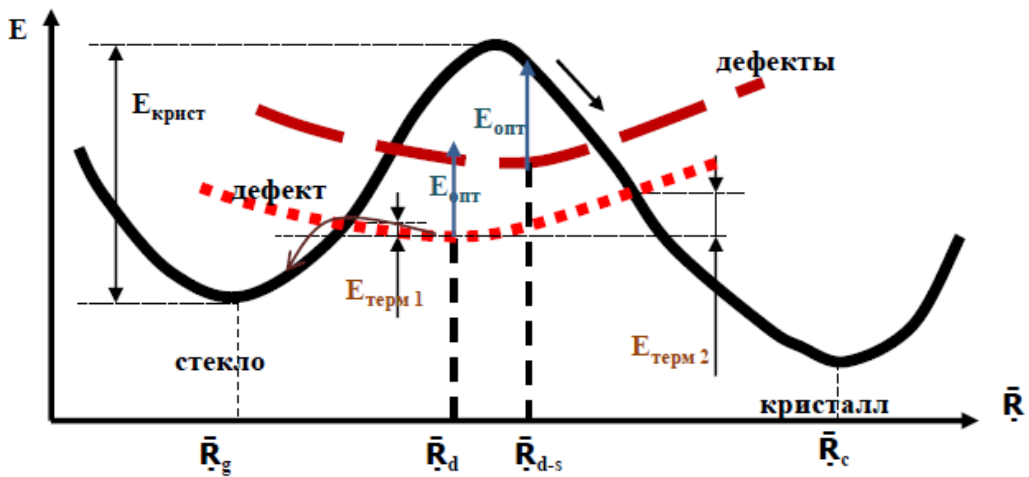


Рис.2.14. Конфигурационная диаграмма, иллюстрирующая эффект фотоиндуцированной кристаллизации селенового слоя в видиконе.



Рис. 2.15. Аэрофотографии ночного города, сделанные обычным видеоконом и видеоконом с лавинным умножением носителей заряда.

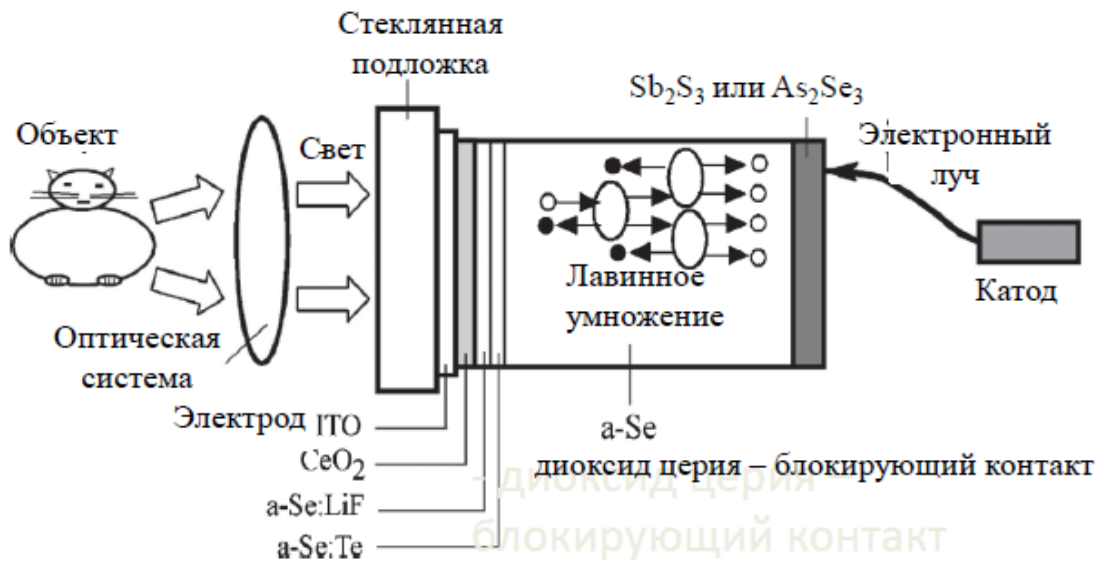


Рис. 2.16. Конструкция видеокона высокой чувствительности

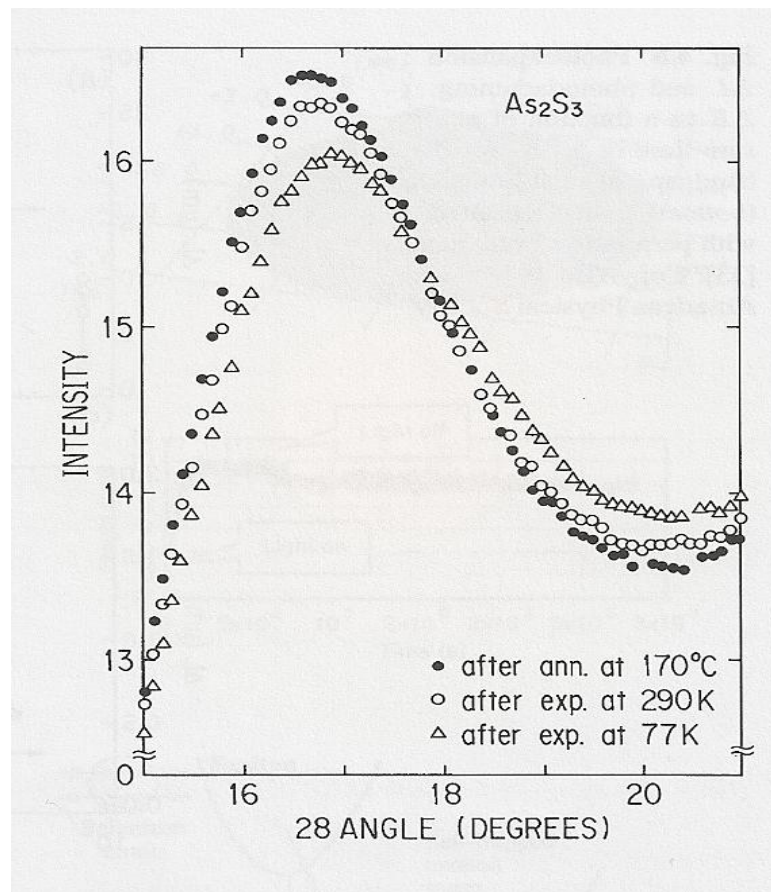


Рис. 2.17. Реверсивные изменения интенсивности рассеяния рентгеновского излучения в трисульфиде мышьяка при облучении светом и отжиге.

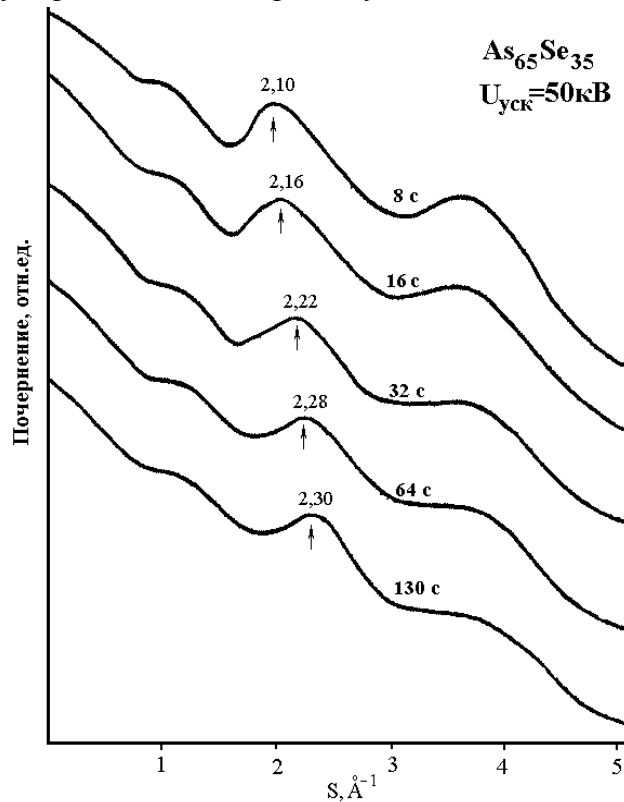


Рис.2.18. Влияние облучения электронами на результаты дифракционного эксперимента в ХСП.

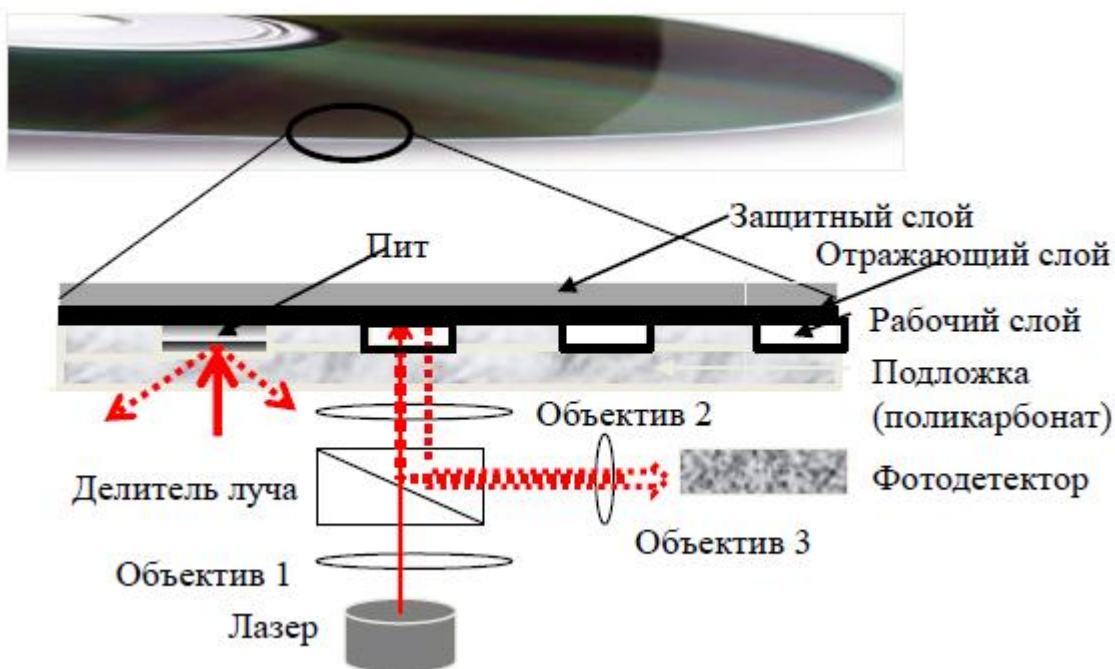


Рис. 2.19. Считывание информации в оптических дисках.

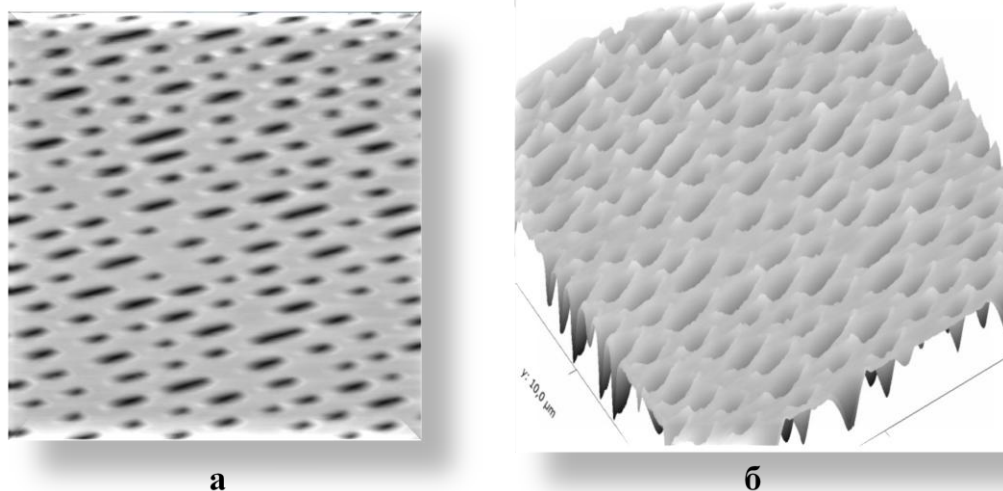


Рис. 2.20. Двухмерное (а) и трехмерное (б) изображения поверхности ROM-диска в сканирующем зондовом микроскопе.

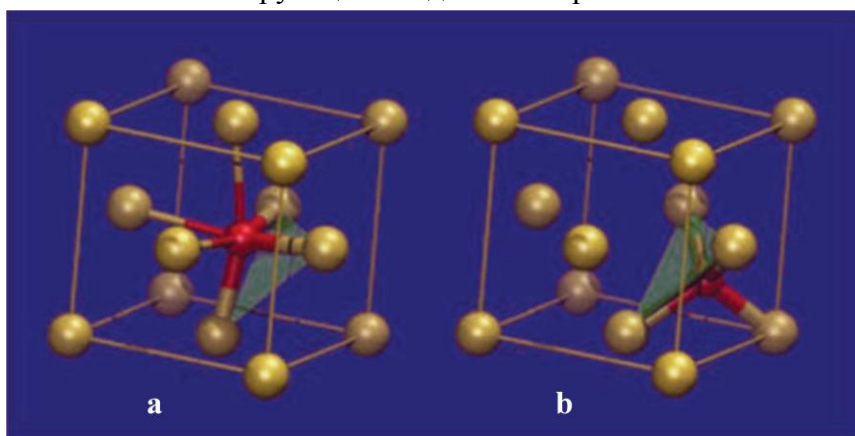


Рис. 2.21. Окружение атома германия в GST225 в кристаллической (а) и аморфной (б) фазах (слабые связи атома германия обозначены более тонкими линиями).

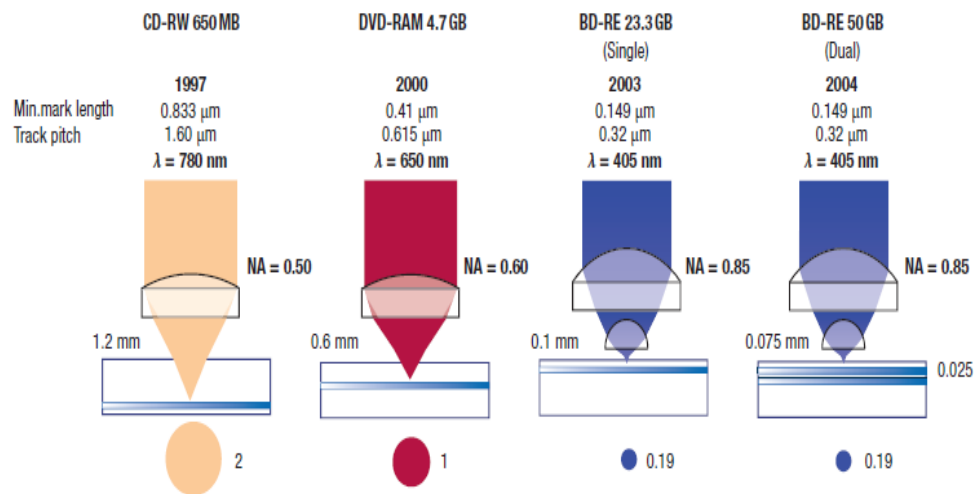


Рис. 2.22. Сравнение характеристик перезаписываемых оптических дисков.

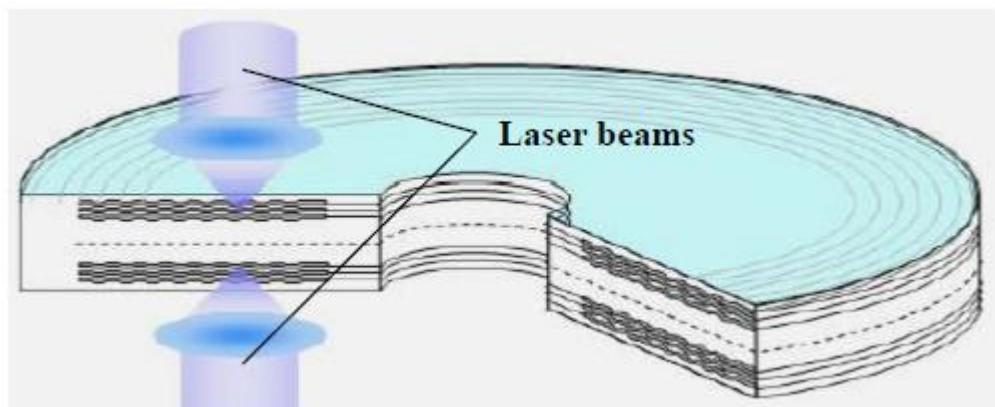


Рис. 2.23. Структура шестислойного архивного диска.



Рис. 2.24. Электроснабжение на территории России.

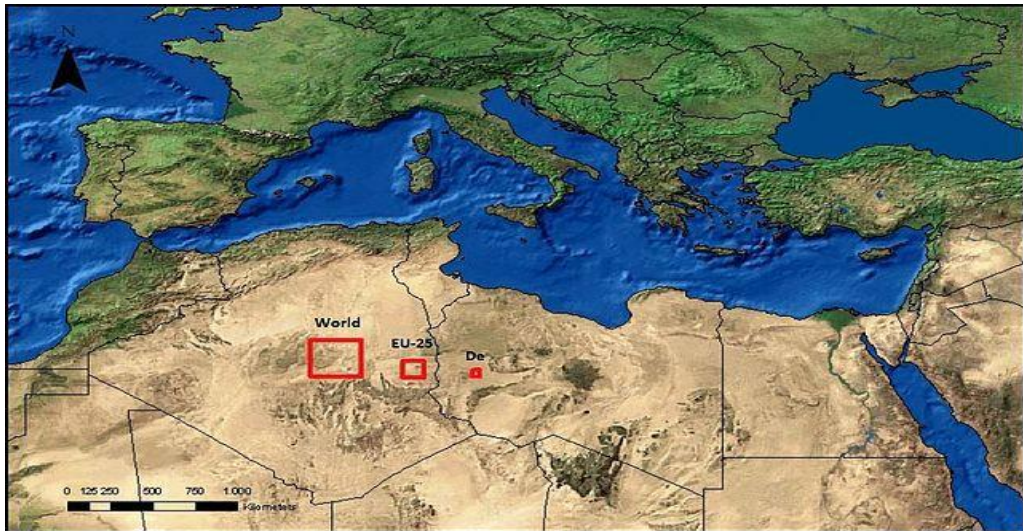


Рис. 2.25. Площадь, которую необходимо закрыть батареями для удовлетворения потребности в энергии всего мира (левый квадрат), Европы (средний квадрат) или только Германии (правый квадрат).



Рис. 2.26. Фотоэлектрическая станция на a-Si:H в Калифорнии, США (4800 модулей размером $5.4 \times 0.4 \text{ м}^2$, 0,5 МВт).



Рис. 2.27. Фотоэлектрические станции на a – Si:H на 5 МВт (а) и 100 кВт (в) Сибири.

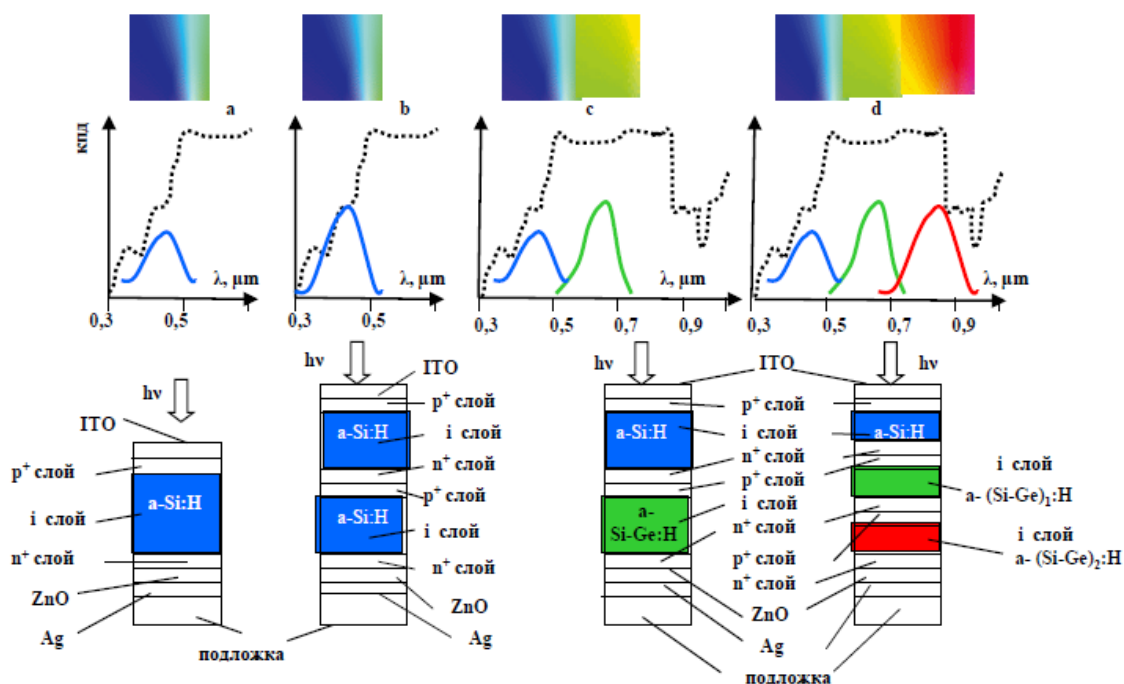


Рис. 2.28. Спектральная зависимость КПД и структура солнечных элементов с одним р-п переходом (а), с двумя р-п переходами на основе одного материала (б), с двумя р-п переходами на основе материалов с разной шириной запрещенной зоны (с) и с тремя р-п переходами на основе материалов с разной шириной запрещенной зоны (д) (пунктирной линией обозначен спектр солнечного излучения на поверхности Земли).

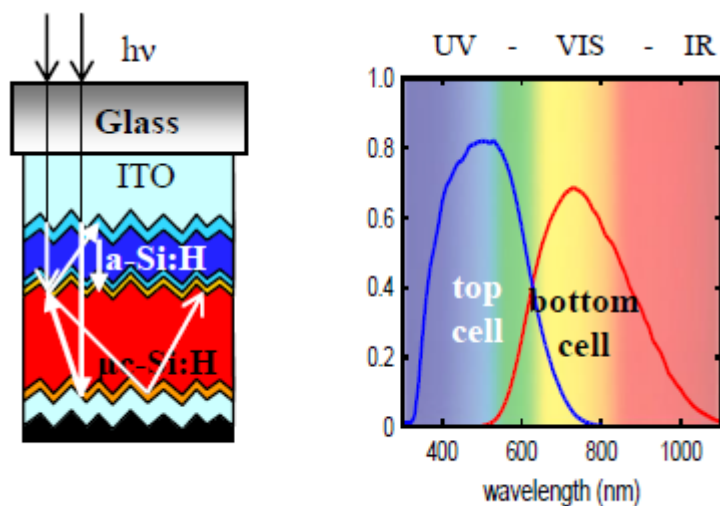


Рис. 2.29. Структура и спектральная зависимость КПД (отн. ед.) ФЭП с эффектом оптического удержания на основе аморфный – микрокристаллический кремний.

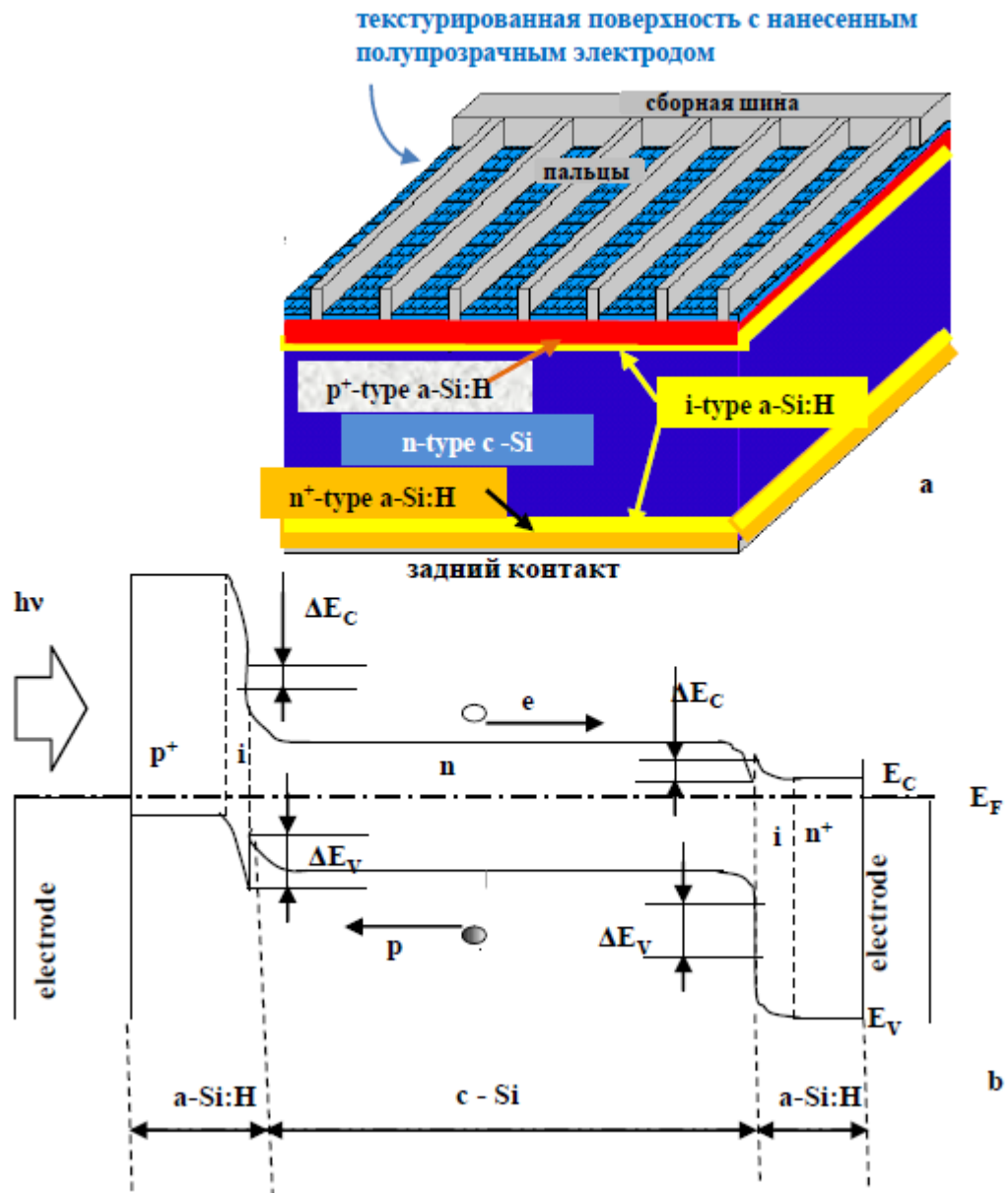


Рис. 2.30. Конструкция (а) и энергетическая диаграмма (б) ФЭП на основе гетероперехода монокристаллический – аморфный кремний

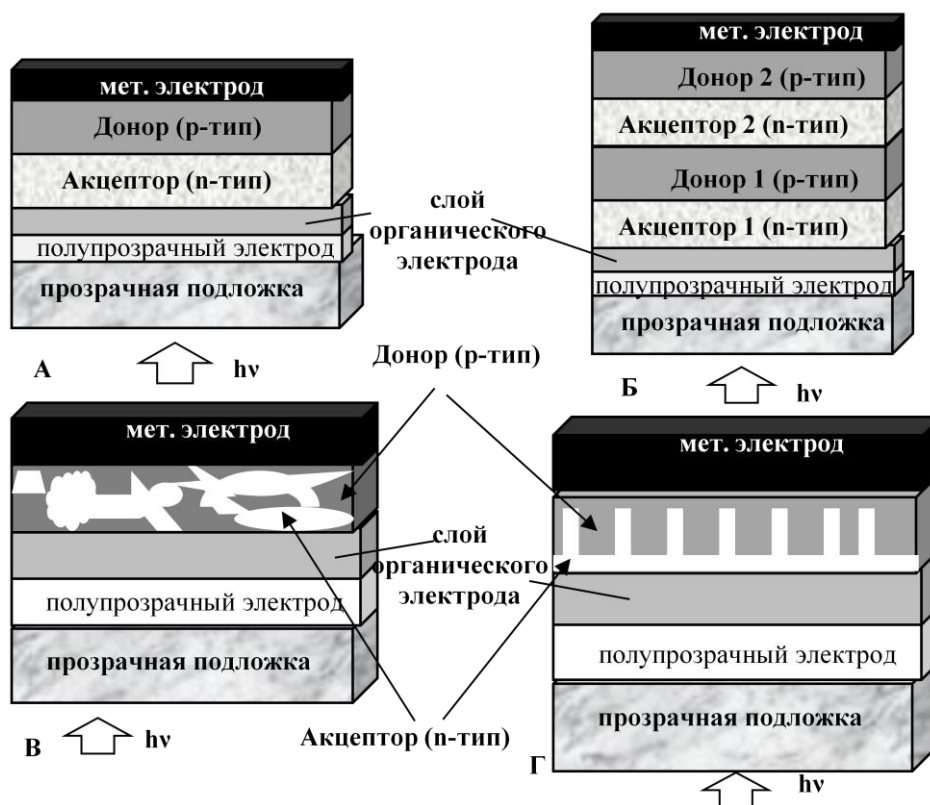


Рис. 2.31. ФЭП на основе органики: с одним гетеропереходом (А), с двумя гетеропереходами (Б), с объемным гетеропереходом (В) и с упорядоченным гетеропереходом (Г).

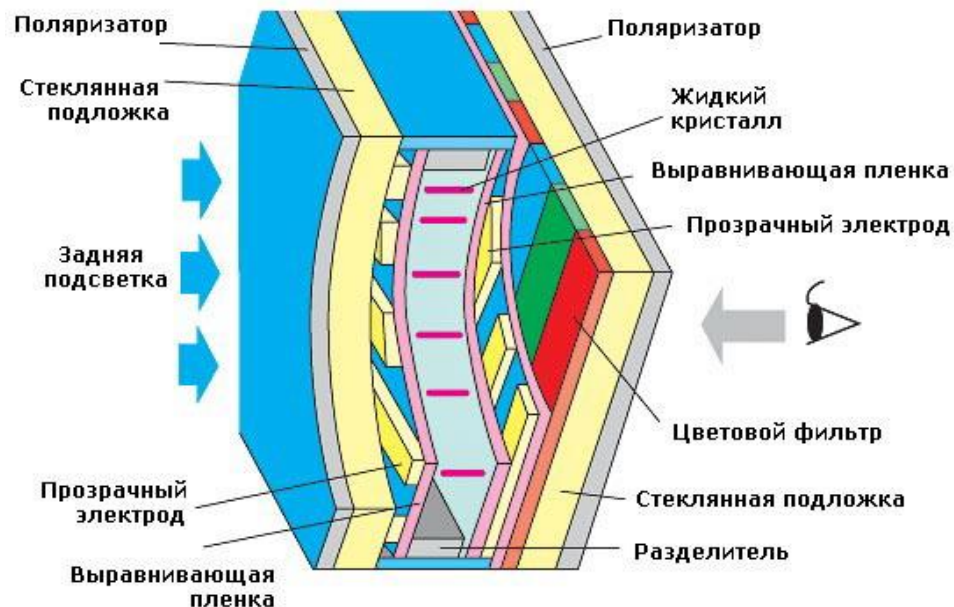


Рис. 2.33. Конструкция жидкокристаллического дисплея.

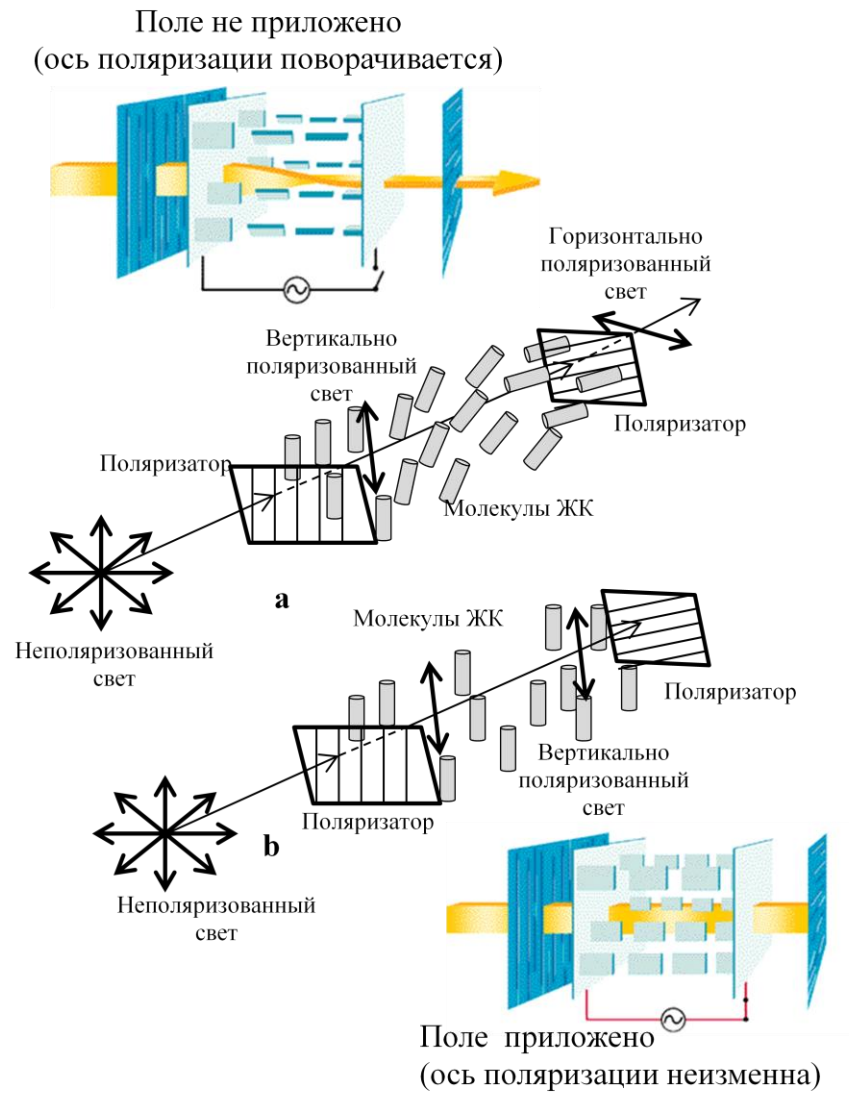


Рис. 2.32. Принцип действия жидкокристаллического дисплея

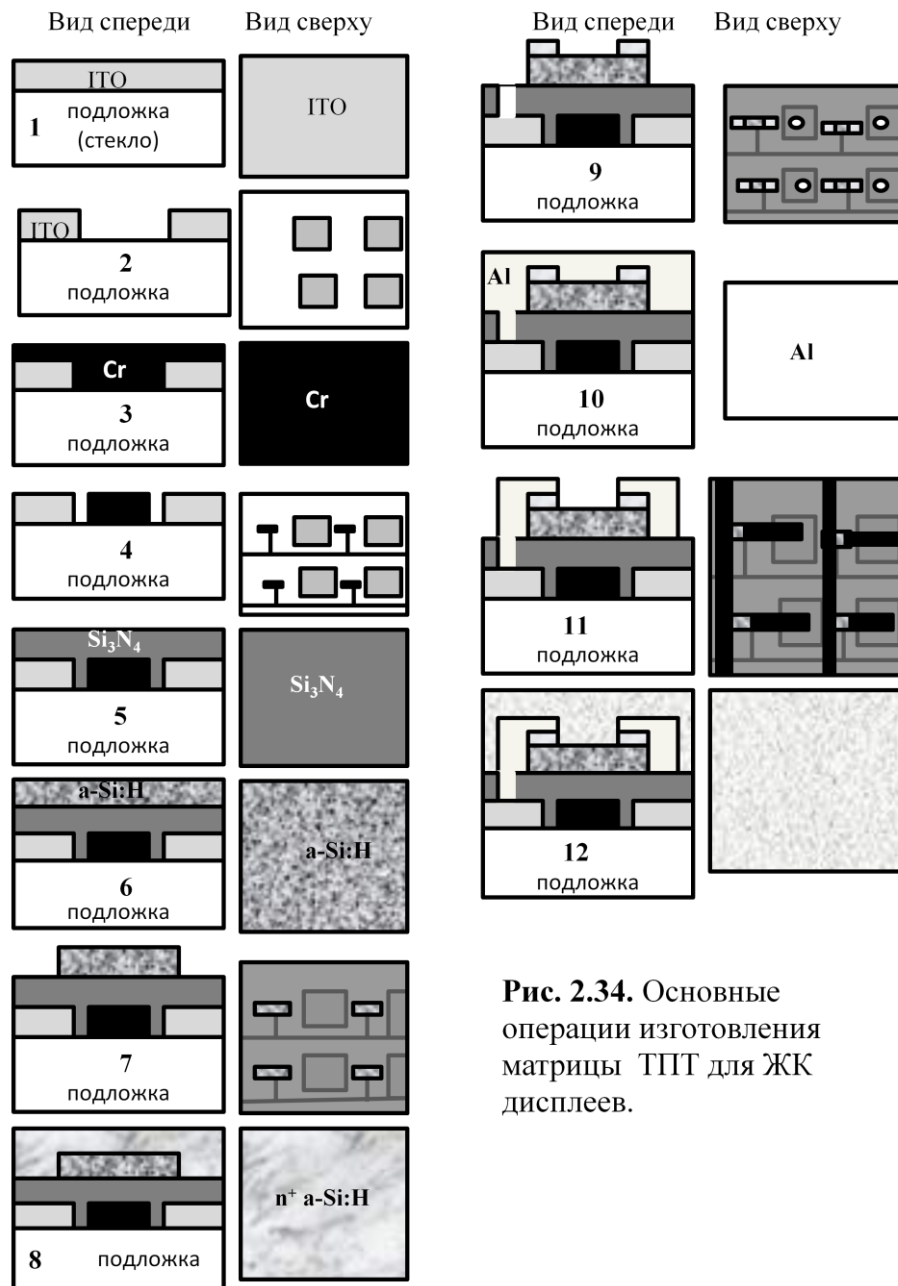


Рис. 2.34. Основные операции изготовления матрицы ТПТ для ЖК дисплеев.



Рис. 2.35. Гибкий 45-ти сантиметровой дисплей на органических светодиодах с разрешением 1200 x 810 пикселей (LG, 2016 год).

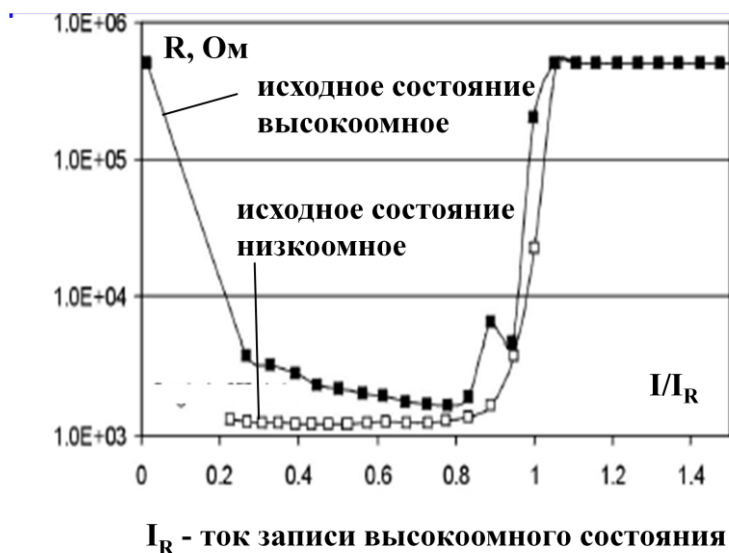


Рис. 2.36. Зависимость сопротивления элемента памяти от величины тока программирования.

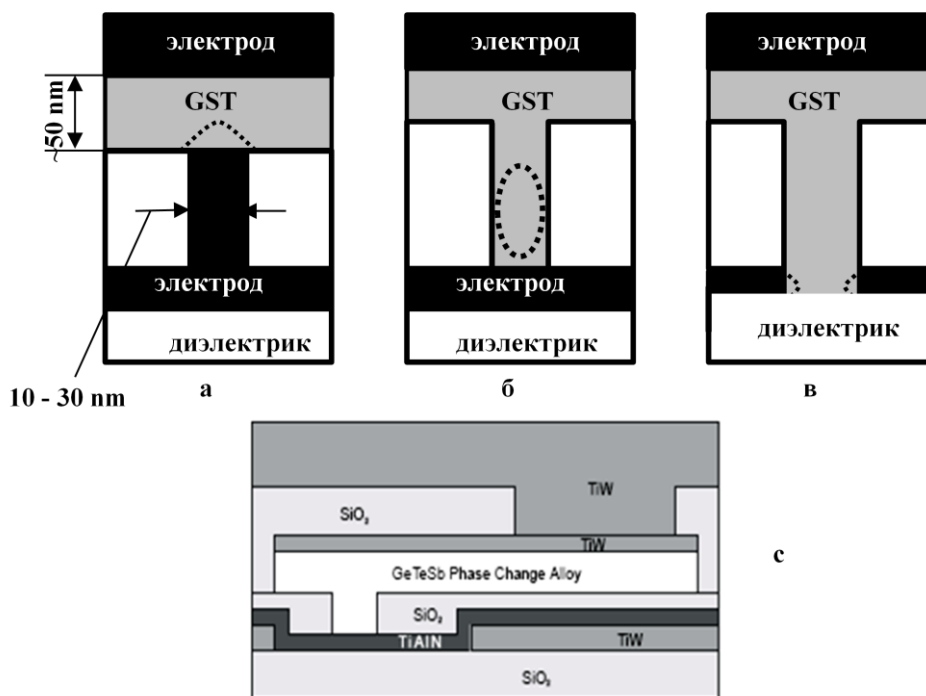


Рис. 2.37. Структура ячеек памяти на фазовых переходах: а – с минимизацией сечения контакта, б – с минимизацией объема GST, в – с торцевым электродом, с – пример практической реализации (активная область отмечена пунктирной линией).

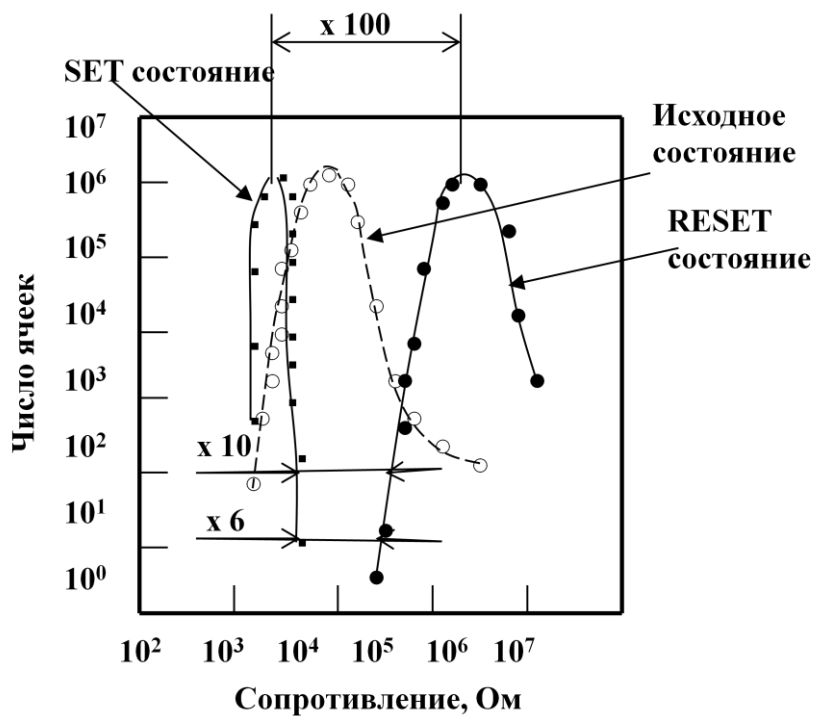


Рис.2.38. Распределение сопротивлений ячеек энергонезависимой памяти в интегральной схеме.

Хим. состав	% GeTe	% Sb ₂ Te ₃	Температура кристаллизации	Время записи	Стабильность
Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ (GST 225)	66	33	уменьшается ↓	↑ увеличивается	уменьшается ↓
Ge ₁ Sb ₂ Te ₄ (GST 124)	50	50			
Ge ₁ Sb ₄ Te ₇ (GST 147)	33	66			
GST + N			увеличивается	R _{SET} увеличивается	
GST + O ₂			Отношение R _{RESET} /R _{SET} увеличивается		

Рис.2.39. Влияние химического состава на характеристики ячеек памяти на фазовых переходах.

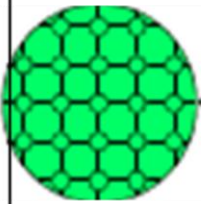
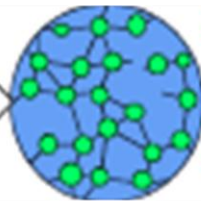
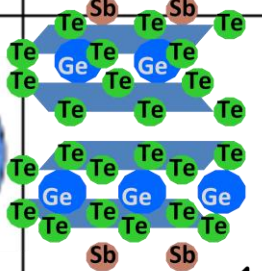
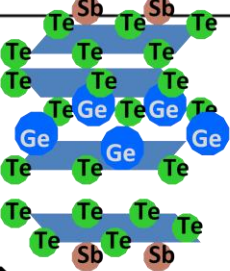
Память на фазовых переходах		Топологическая память	
PRAM		TRAM	
$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)		$\text{GeTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (GT/ST)	
Сплав		Сверхрешетка	
Нагрев		Инжекция носителей заряда	
Переключение с плавлением		Переключение без плавления	
Переход порядок-беспорядок		Изменения ближнего порядка	
Низкоомное состояние (кристалл)	Высокоомное состояние (аморфный)	Низкоомное состояние	Высокоомное состояние
			

Рис. 2.40 . Сравнение памяти на фазовых переходах и топологической памяти.

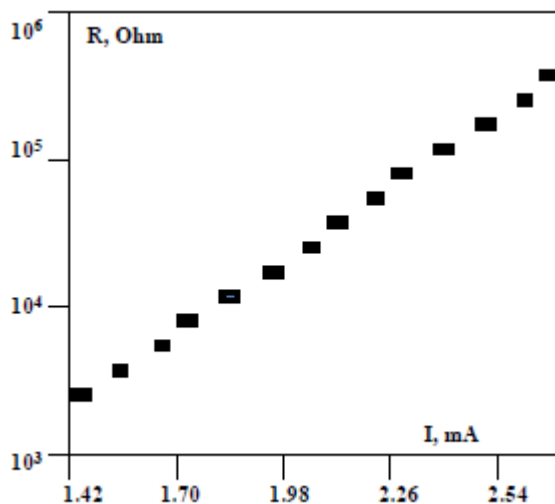


Рис. 2.41. Зависимость сопротивления от величины тока программирования для многоуровневого элемента памяти на фазовых переходах.

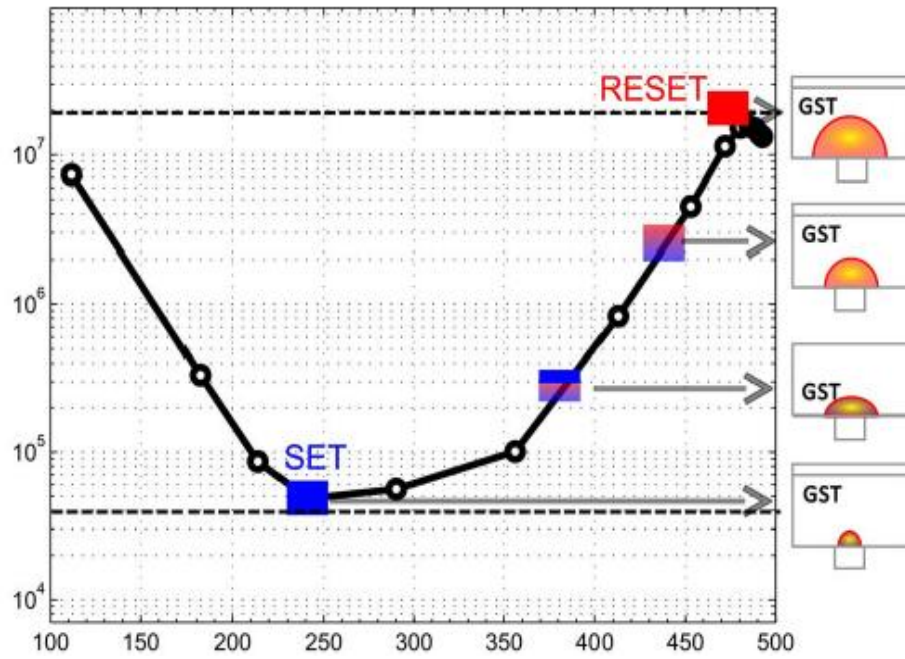


Рис. 2.42. Зависимость сопротивления от тока записи для 2-х битовой ячейки.