

# **Фотоэлектрические преобразователи (фотовольтаика)**

# 1. Фотоэффект

- **Фотовольтаика** – преобразование света в электричество
- 1839 г. – открытие фотоэффекта
- 1954 г. – создание первого кремниевого полупроводникового фотодиода.
- КПД солнечного элемента  $\sim 20\%$

**Фотоэффект** – физический процесс, благодаря которому солнечная панель преобразует проходящую солнечную радиацию в электрическую.

- внешний фотоэффект (фотоэлектрическая эмиссия) - испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.
- внутренний фотоэффект – перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием электромагнитного излучения.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot \nu,$$

$\lambda$  - длина волны, м;  $\nu$  - частота волны, 1/с;  
 $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  скорость света в вакууме, м/с;  
 $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$  постоянная Планка, Дж·с.

## 2. Зонная теория

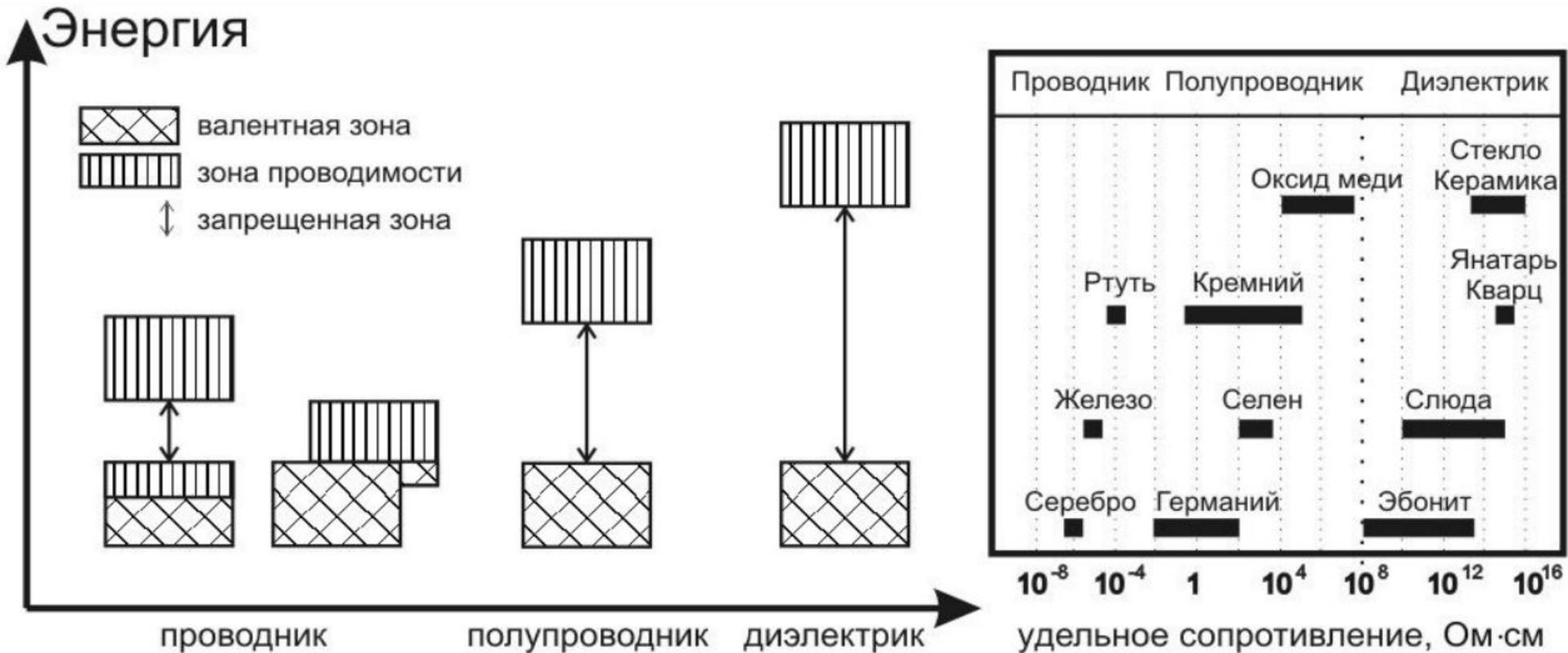


Рис. Удельное сопротивление и зоны проводников, полупроводников и диэлектриков.

### 3. Собственная и примесная проводимость полупроводников

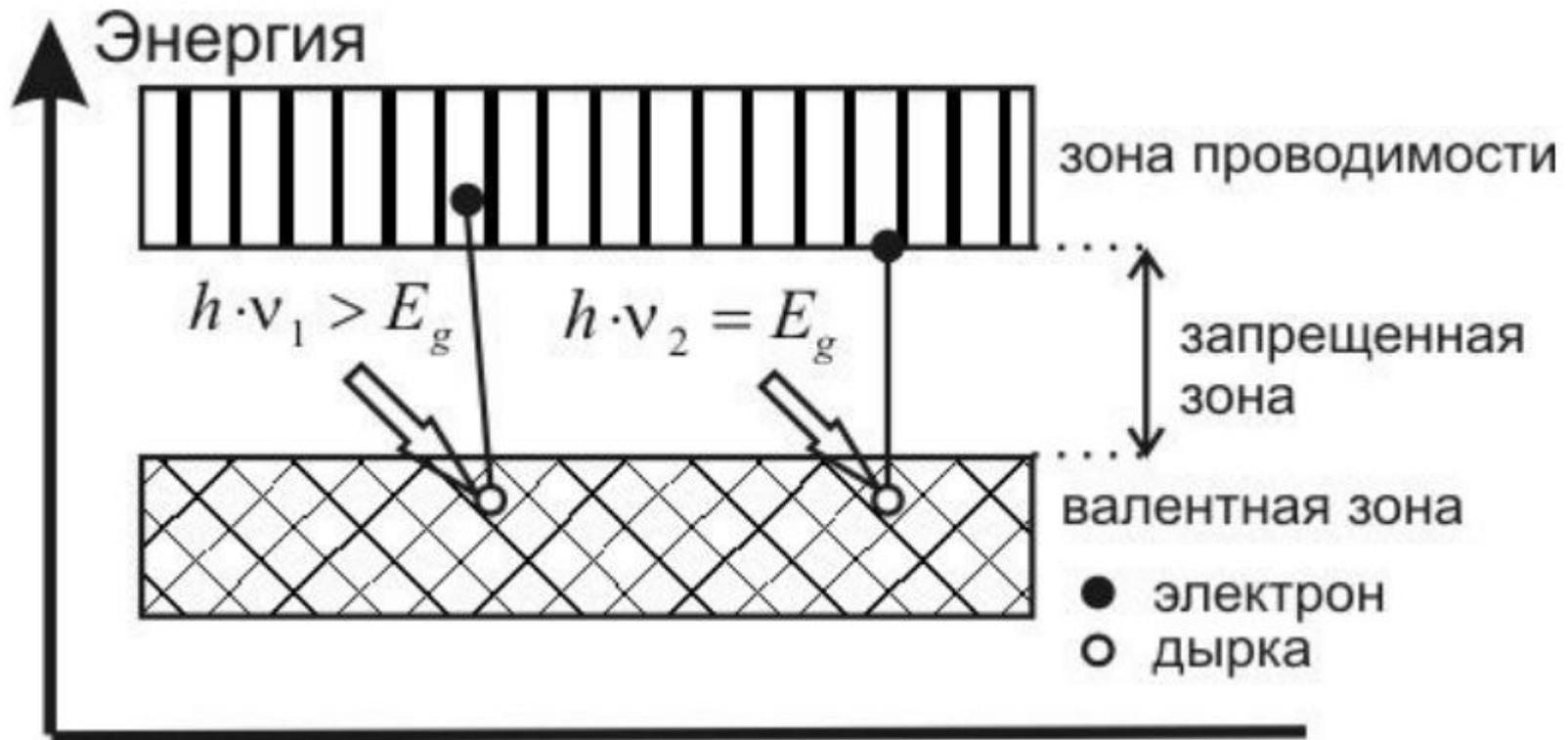


Рис. Зонная структура беспримесного полупроводника с собственной проводимостью

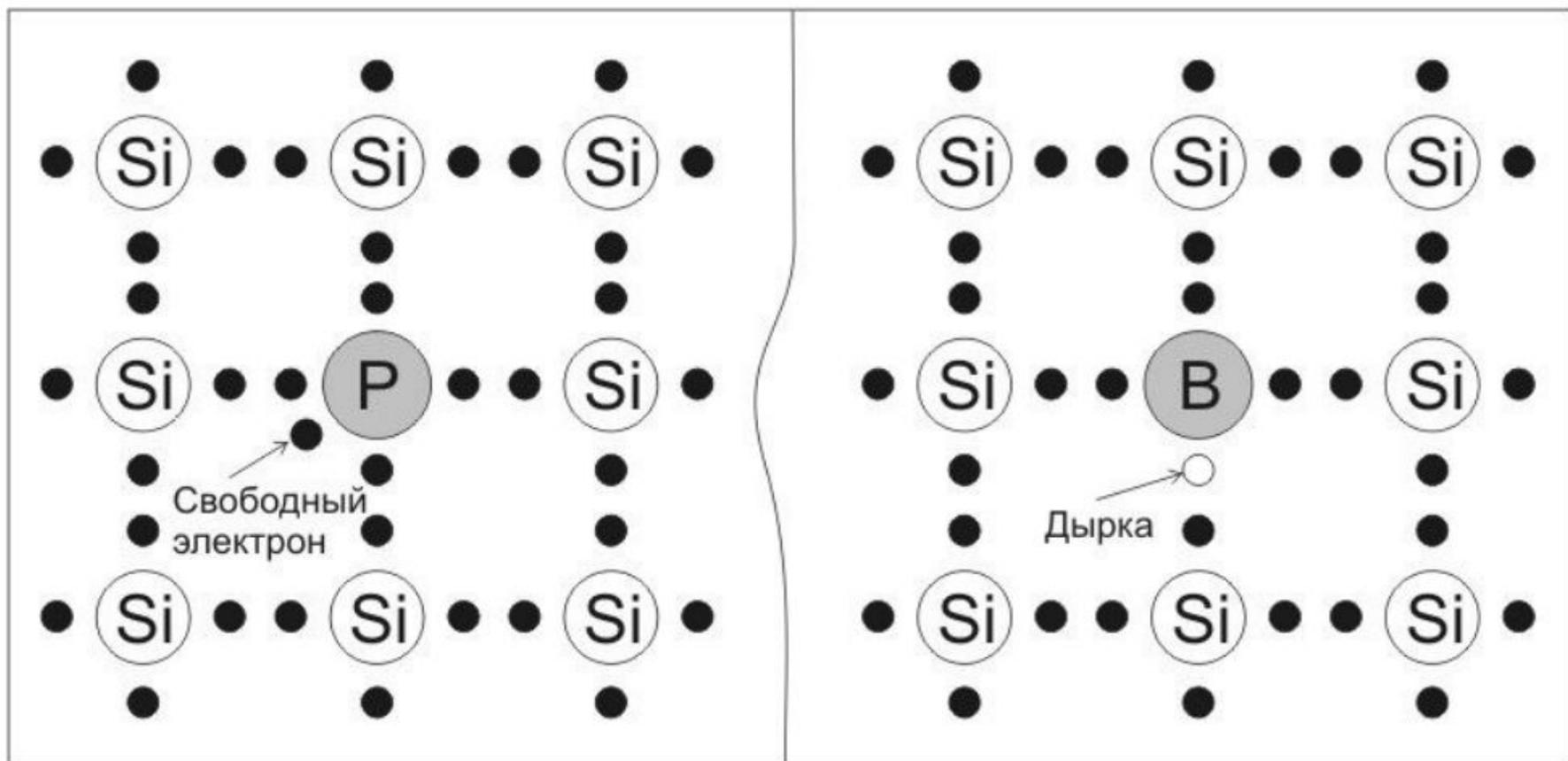
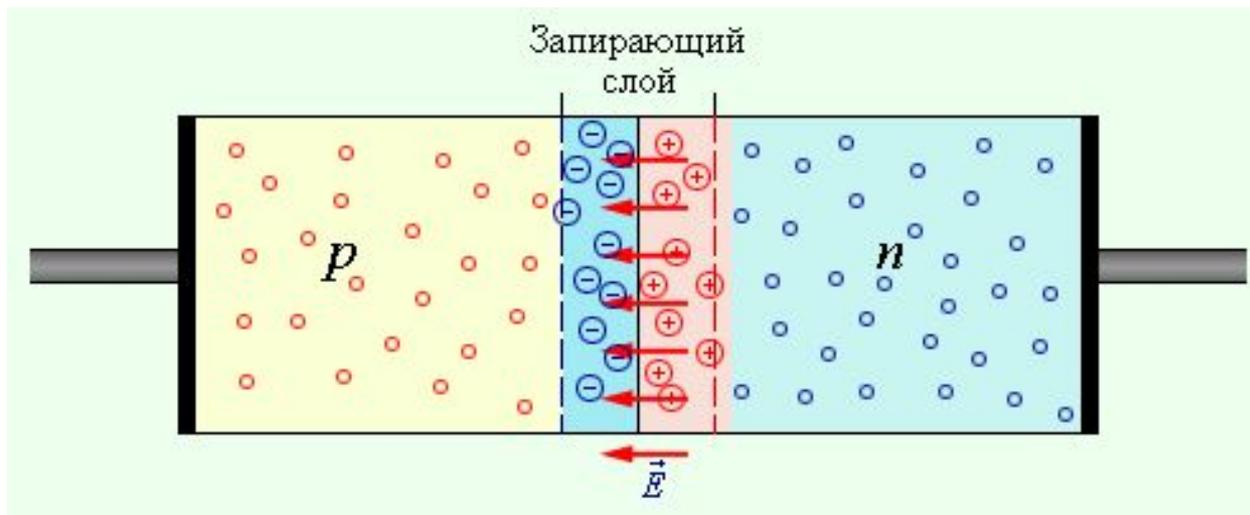
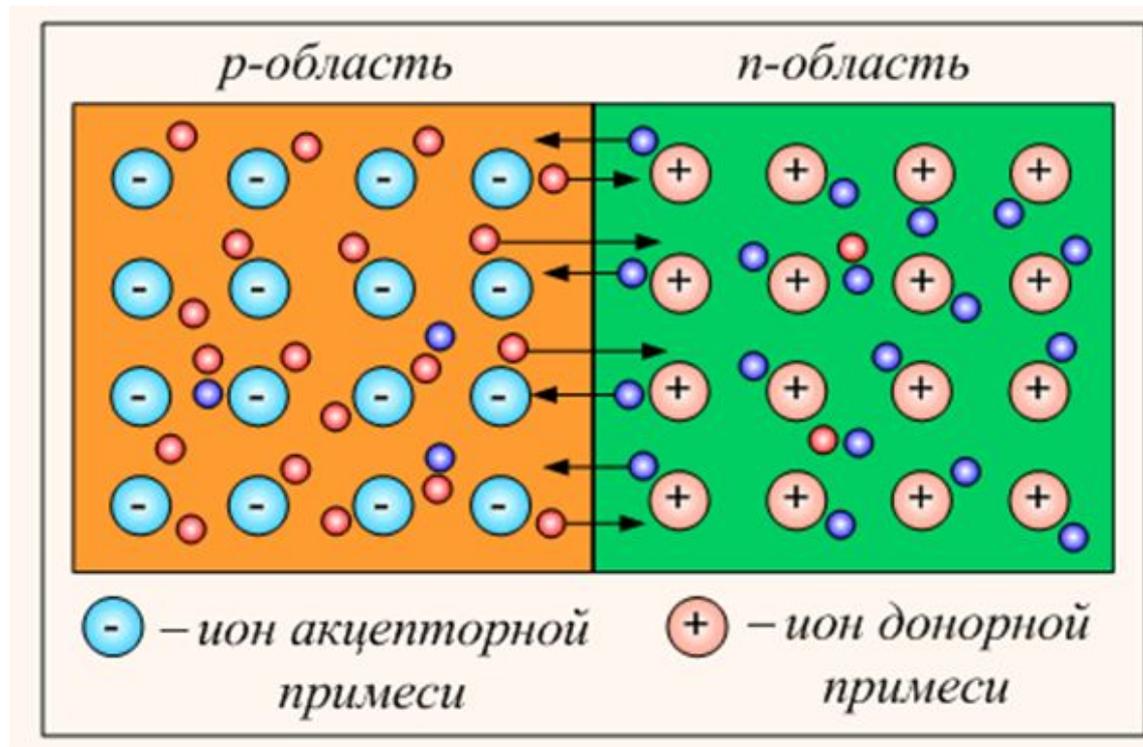


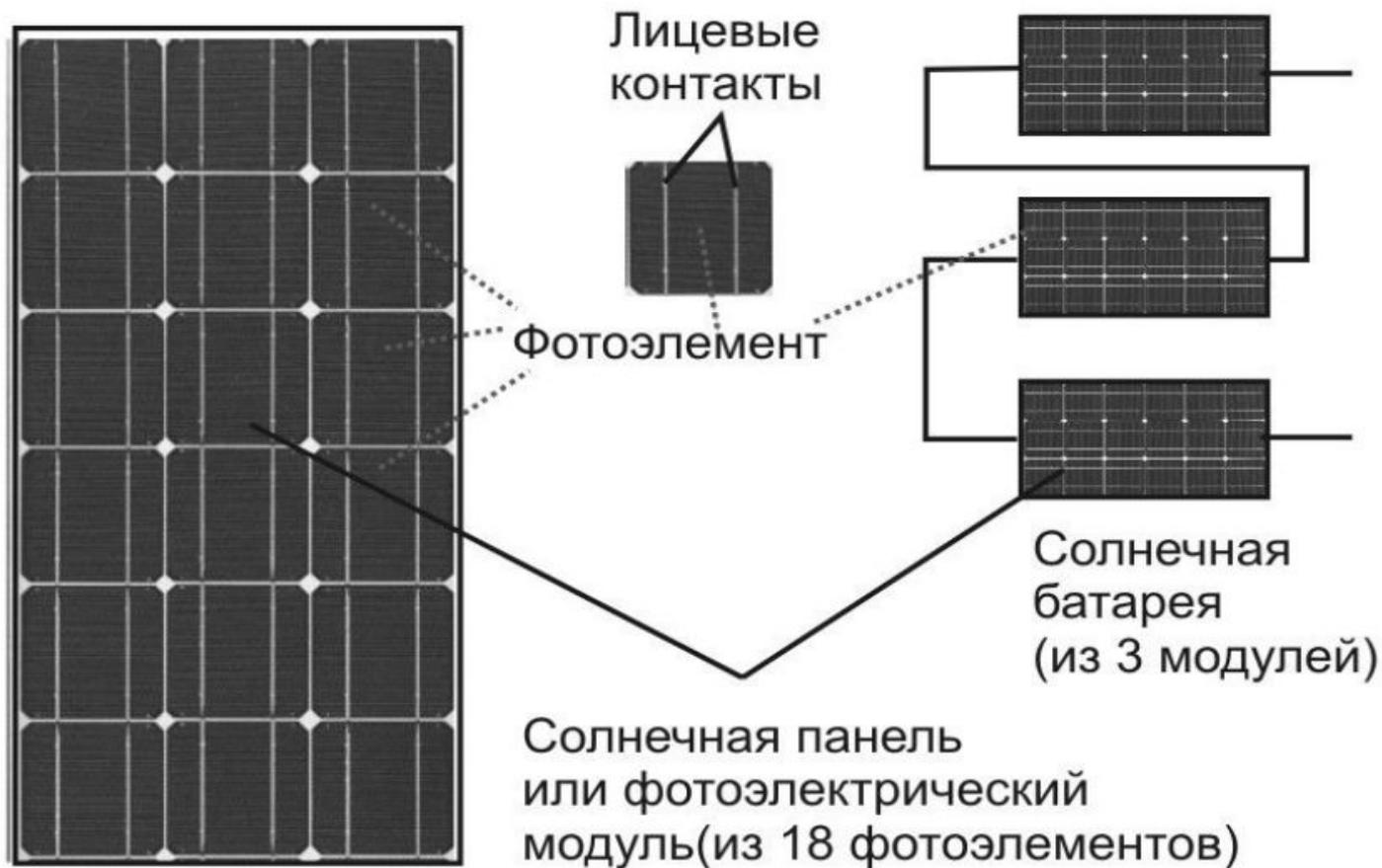
Рис. Примесная проводимость полупроводника кремния n-типа (слева) и p-типа (справа).

## 4. Электронно-дырочные переходы



## 5. Фотоэлектрический элемент, фотоэлектрический модуль и батарея.

Фотоэлектрический модуль – это комбинация электрически соединенных между собой фотоэлементов. Солнечная батарея – это электрическое соединение модулей.



**Фотоэлектрический элемент (фотоэлемент)** – используется для получения электроэнергии за счет преобразования солнечного излучения.

Неосвещенный фотоэлемент можно рассмотреть как диод

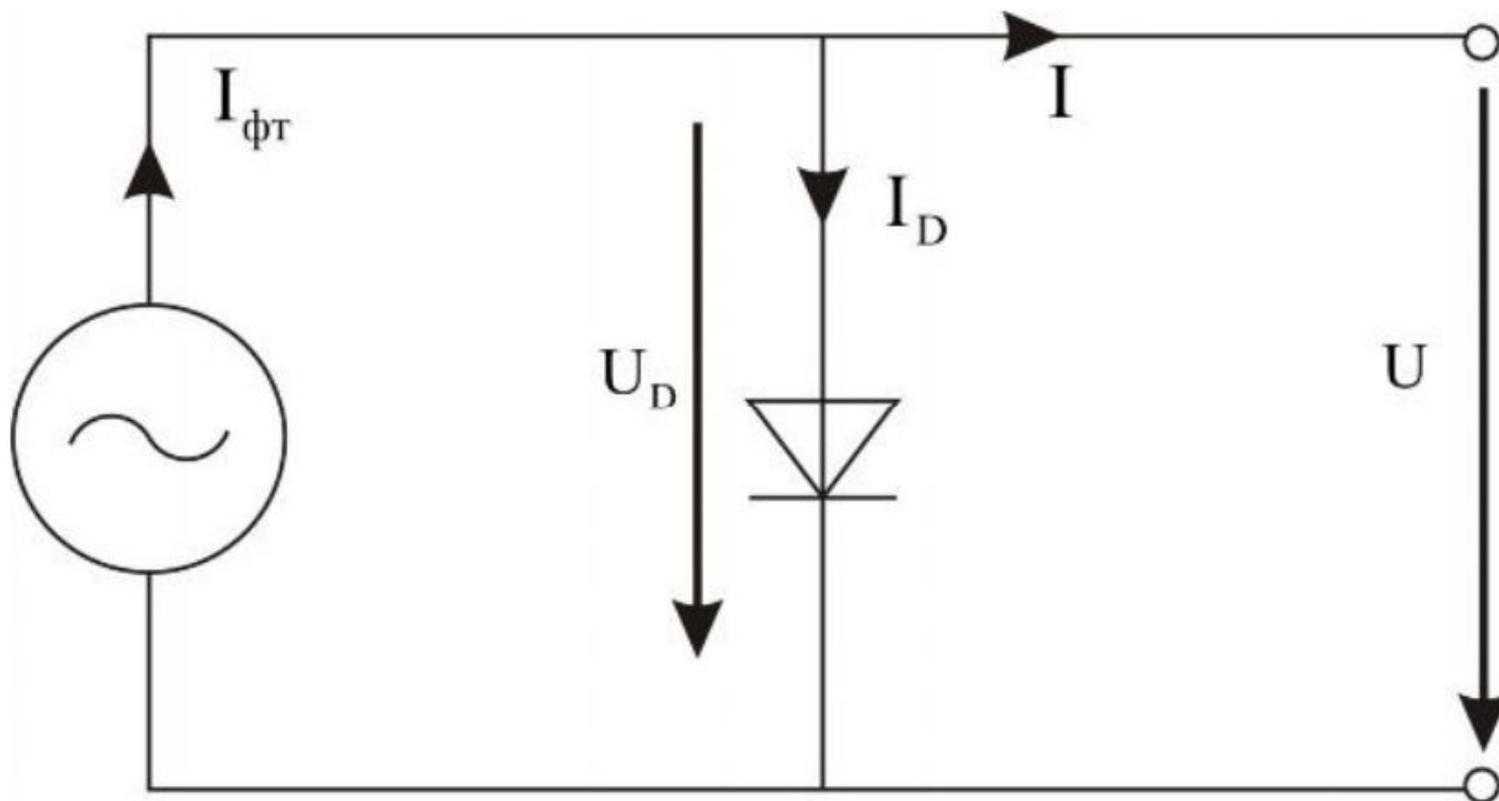


Рис. Упрощенная схема замещения освещенного солнечного элемента

Ток, протекающий по неосвещенному фотоэлементу:

$$I = -I_D = -I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{U_D}{m \cdot U_{тмр}}\right) - 1 \right),$$

где  $I_S$  - ток насыщения, А;  $m$  - фактор диода;  
 $U_D$  - напряжение на элементе, В;  $I_D$  - ток утечки,  
 $U_{тмр}$  - температурное напряжение при 25 °С,  
 $U_{тмр} = 25,7$  мВ.

Освещенный фотоэлемент можно рассматривать как источник питания, при этом вырабатывает фототок, который прямо пропорционален мощности приходящей солнечной радиации:

$$I_{\phi m} = k \cdot G_{gl},$$

$k$  - коэффициент пропорциональности приходящей солнечной радиации,  $A \cdot m^2 / Вт$ ;

$G_{gl}$  - приходящая солнечная радиация,  $Вт / м^2$ ;

$I_{\phi m}$  - фототок,  $A$ .

Вольт- амперная характеристика (ВАХ) освещенного солнечного элемента:

$$I = I_{\phi m} - I_D = I_{\phi m} - I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{U_D}{m \cdot U_{тмр}}\right) - 1 \right).$$

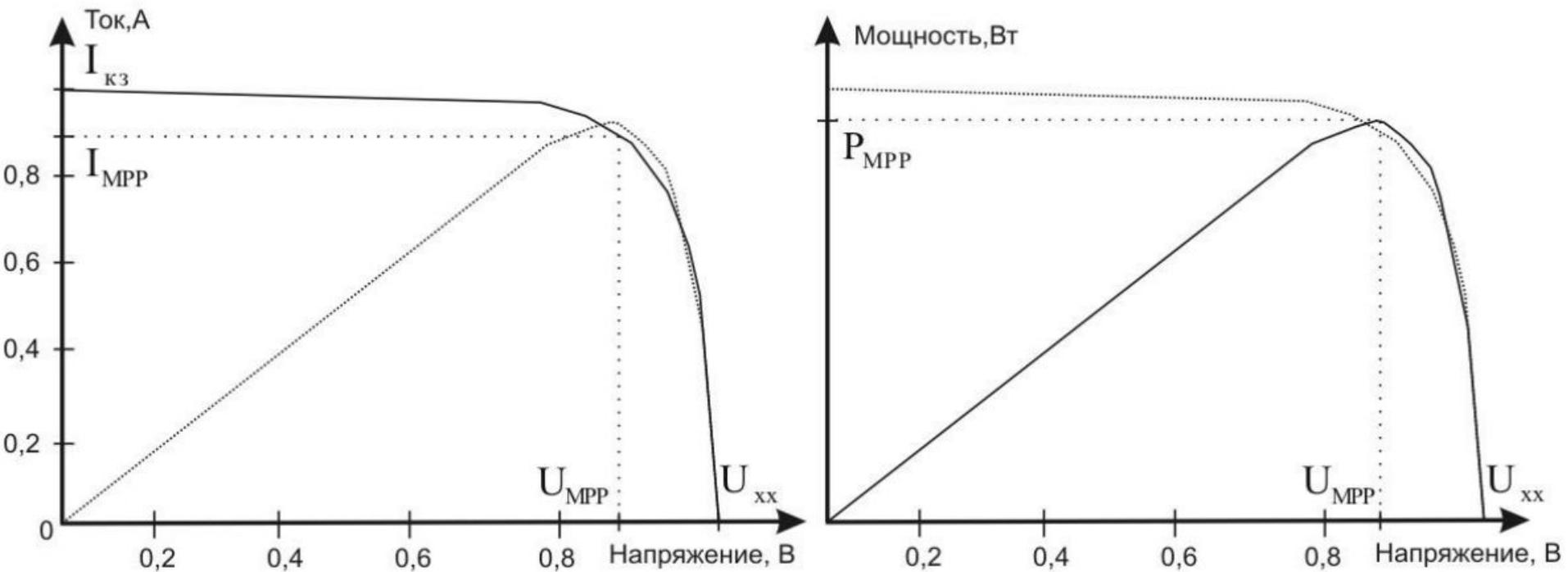


Рис. ВАХ солнечного элемента и зависимость мощности элемента от напряжения

- **Напряжение холостого хода  $U_{xx}$ , В.** В режиме холостого хода (цепь разомкнута) ток  $=0$ , а напряжение на контактах достигает максимального значения.
- **Ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , А.** В случае короткого замыкания (цепь замкнута) напряжение элемента  $=0$ , а  $I_{кз}$  достигает максимального значения.
- **MPP (maximum power point) точка пиковой мощности  $P_{mpp}$ , Вт пик.** Рабочая точка, в которой выходная мощность достигает своего максимального значения, называется точкой пиковой мощности (MPP). Значения тока и напряжения, соответствующие MPP, называют **током пиковой мощности  $I_{mpp}$**  и **напряжением пиковой мощности  $U_{mpp}$** .

- **Фактор кривизны (или параметр насыщения)  $\Phi_H$**  – отношение мощности МРР к продукту тока короткого замыкания на напряжение холостого хода:

$$\Phi_H = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_{xx} I_{кз}}$$

- **Коэффициент полезного действия (КПД) солнечного модуля %.**

$$КПД = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{G_{gl}} \cdot 100\% = \frac{\Phi_H \cdot U_{xx} I_{кз}}{G_{gl}} \cdot 100\% .$$

- **Солнечная батарея** – комбинация электрически соединенных между собой фотоэлектрических модулей.

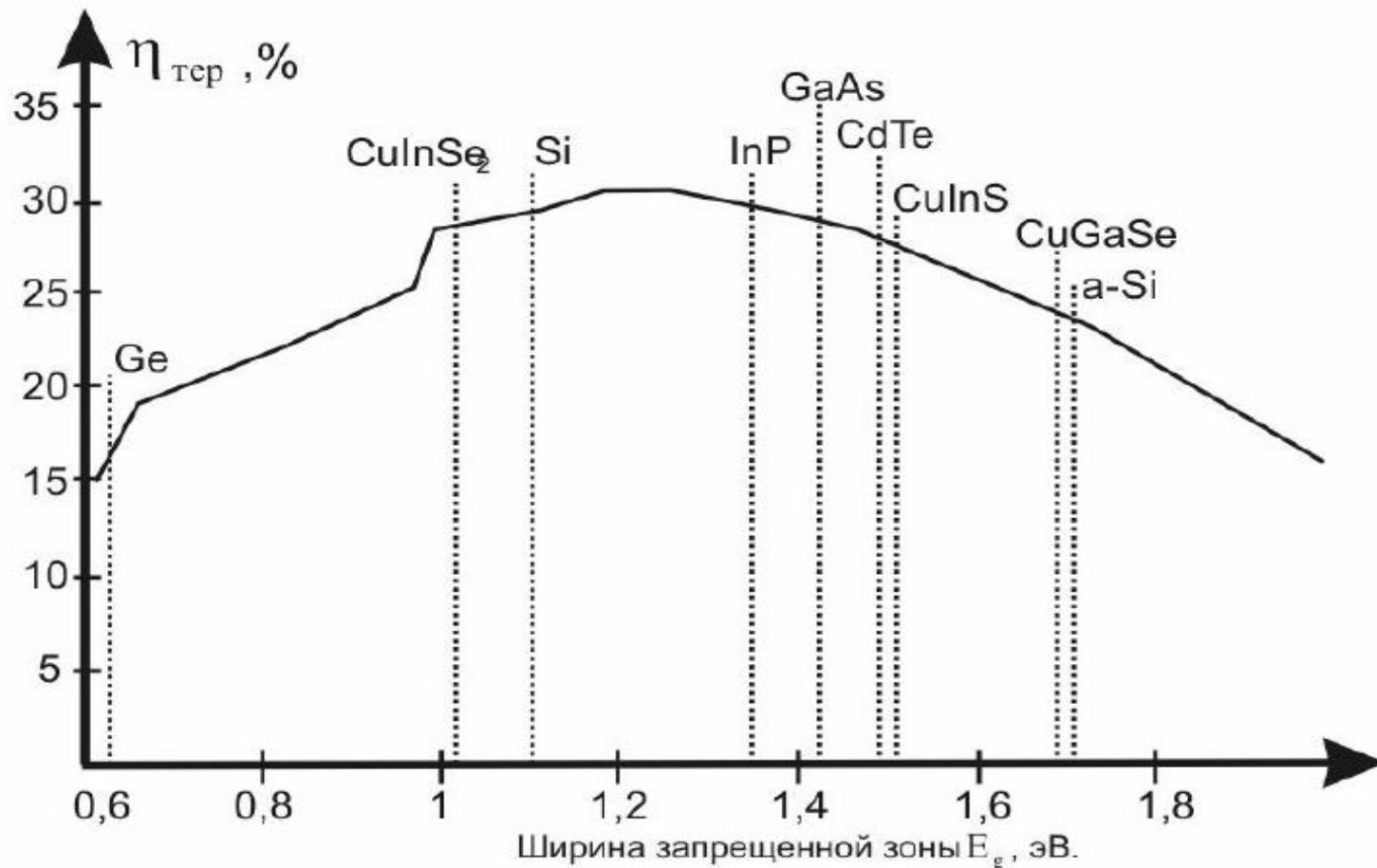


Рис. Теоретические КПД для различных солнечных элементов

***Фотоэлектрический модуль (солнечная панель)*** – состоит электрически последовательно и параллельно соединенных фотоэлементов.

«Стандартные условия» для измерения электрических характеристик различных солнечных модулей:  
интенсивность солнечного излучения равна  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  
температура солнечного модуля равна  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , масса атмосферы = 1.5.

## 6. Типы фотоэлементов

- Кремниевые элементы (Si)
- Элементы на основе арсенида галлия (GaAs)
- Тонкопленочные элементы
  - аморфный кремний ( $\alpha$ - Si)
  - телурид кадмия (CdTe)
  - купрум-индий диселенид (CuInSe<sub>2</sub>)

## 7. Вольтамперные характеристики

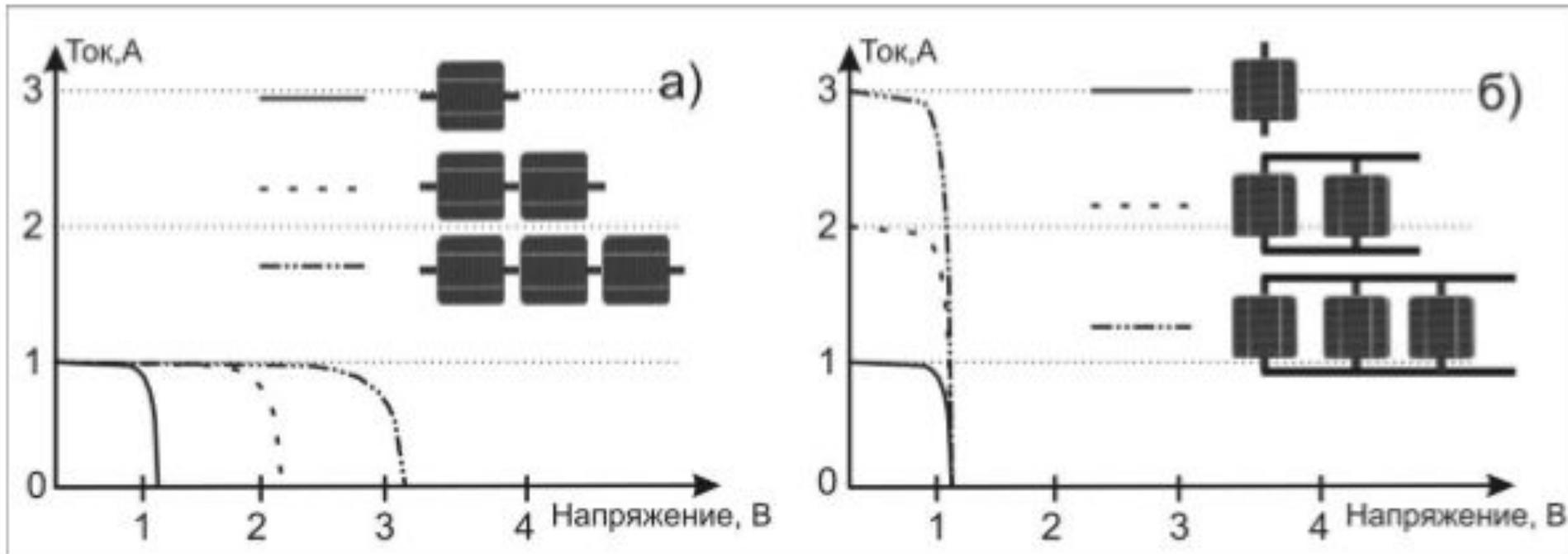


Рис. ВАХ для а) одного и последовательно соединенных 2,3 идентичных фотоэлементов; б) одного и параллельно 2,3 соединенных идентичных фотоэлементов

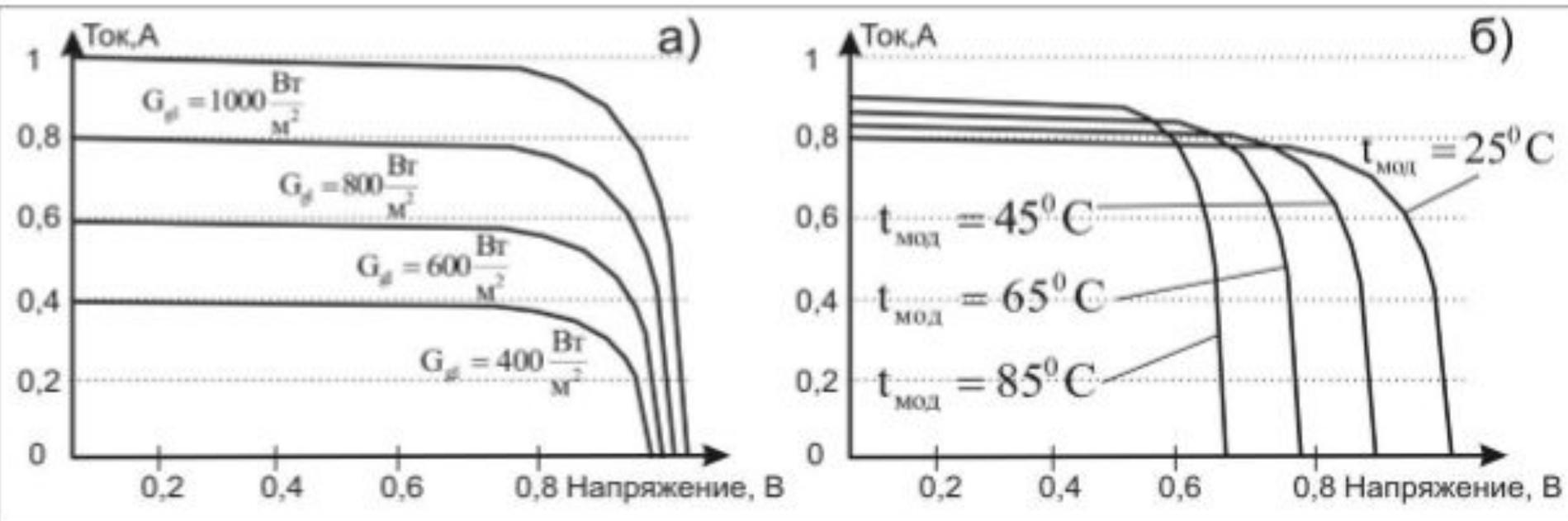


Рис. ВАХ для солнечной панели а) при одинаковой температуре и разной проходящей солнечной радиации; б) при разной температуре и одинаковой проходящей солнечной радиации.

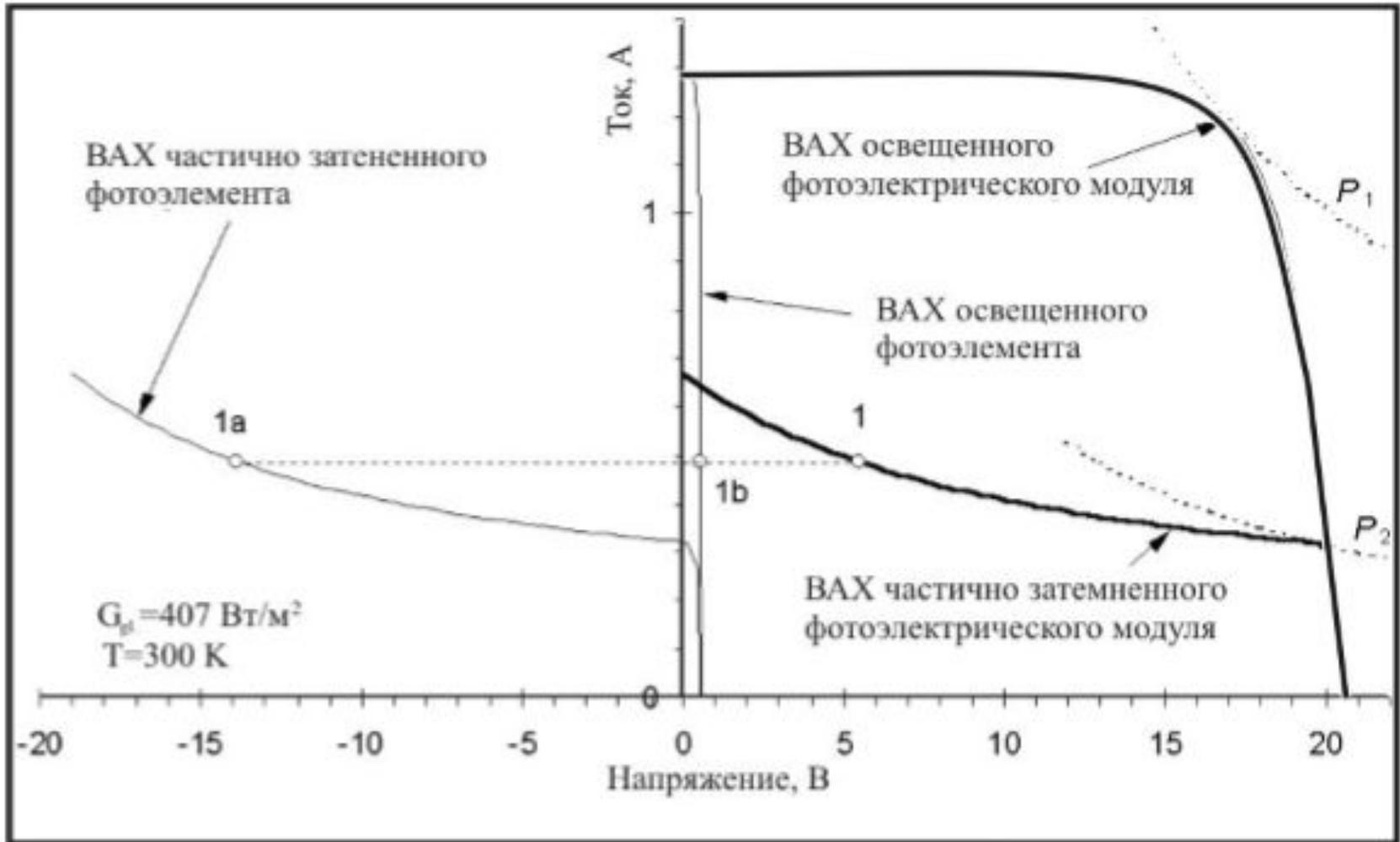
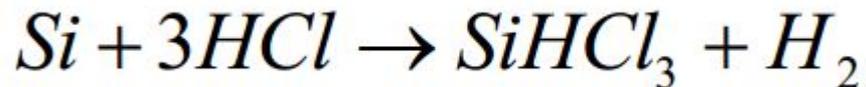
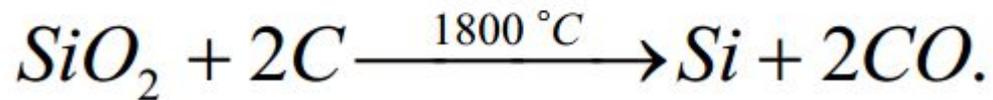
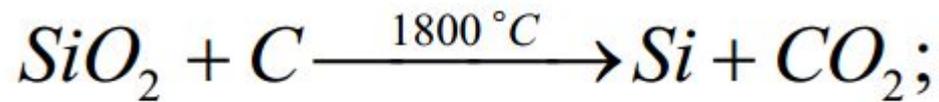


Рис. ВАХ модуля, один элемент которого затенен на 75%.

## 8. Производство фотоэлементов

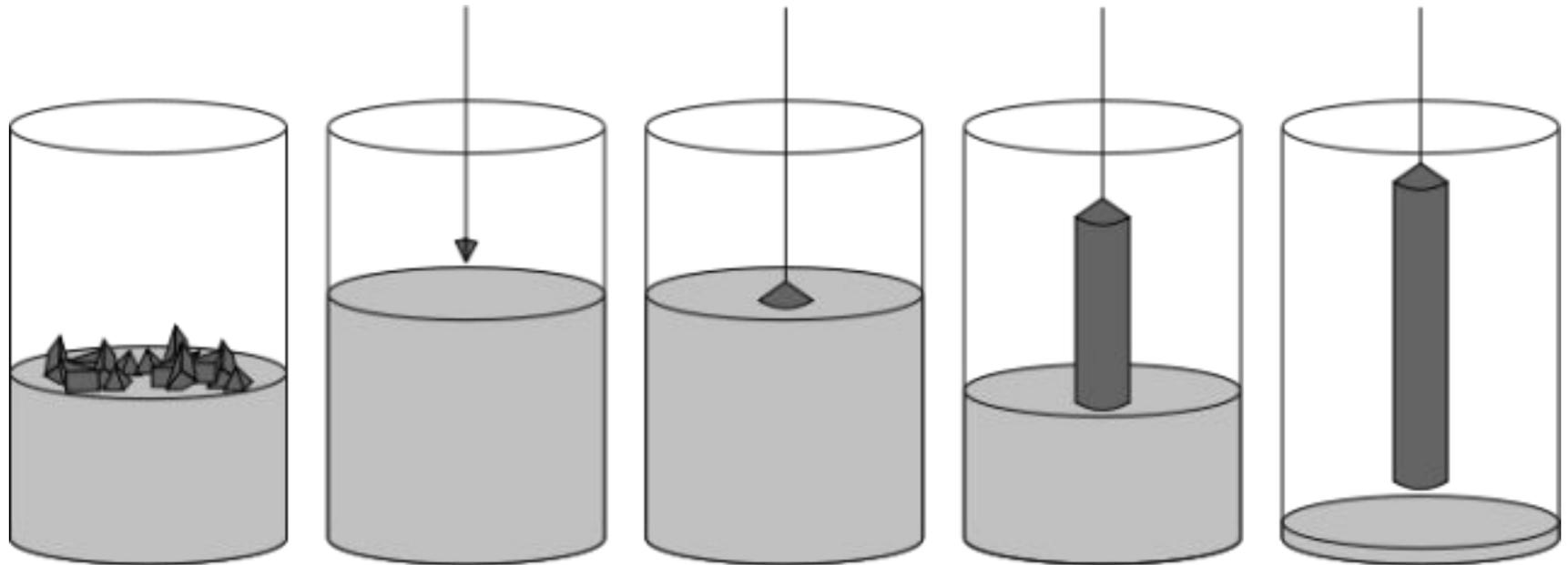
3 стадии производства:

- 1) производство кремния высокой степени чистоты;
- 2) изготовление тонких кремниевых шайб;
- 3) сборка фотоэлемента.



# Методы производства монокристаллического кремния:

## -Метод Чохральского



Расплавление кусков  
поликремния

Введение затравки  
для начала роста

Формирование  
кристалла

Вытягивание  
кристалла

Готовый кристалл

## -Метод зонного плавления

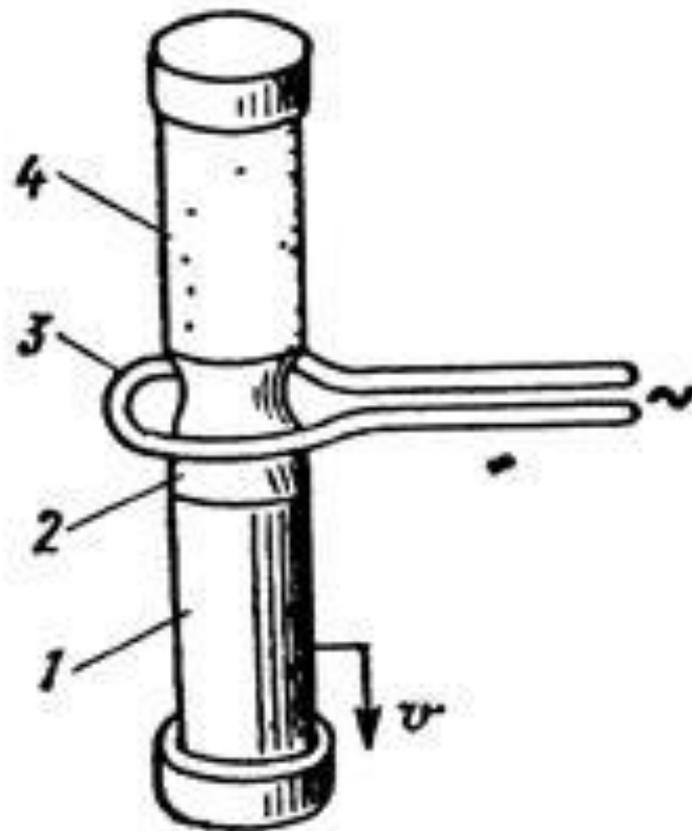


Схема бестигельной зонной плавки: 1 - монокристалл;  
2 - расплавленная зона; 3 - индуктор; 4 – поликристалл Si

# 9. Фотовольтаик-установки и их КОМПОНЕНТЫ

Два основных типа фотовольтаик- установок:

- .автономные фотовольтаик системы, неподключенные к сетям;
- .подключенные к сетям.



Рис. Принципиальная схема автономной фотовольтаик- установки

**Инвертор** – преобразователь постоянного тока в переменный

В зависимости от выходной характеристики напряжения различают инверторы, имеющие форму выходного напряжения в виде прямоугольника, трапеции или синусоиды

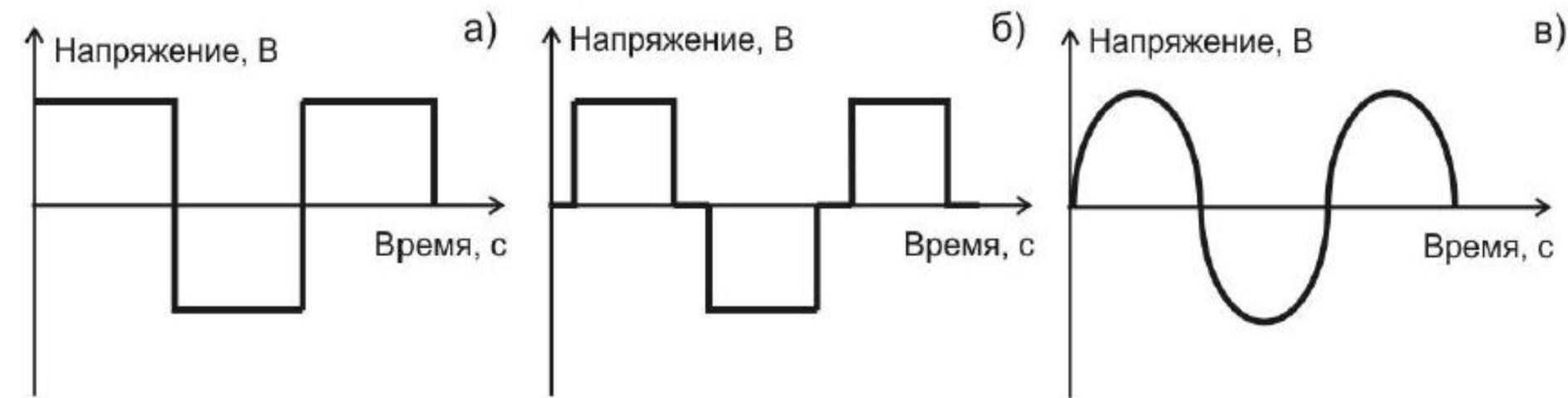
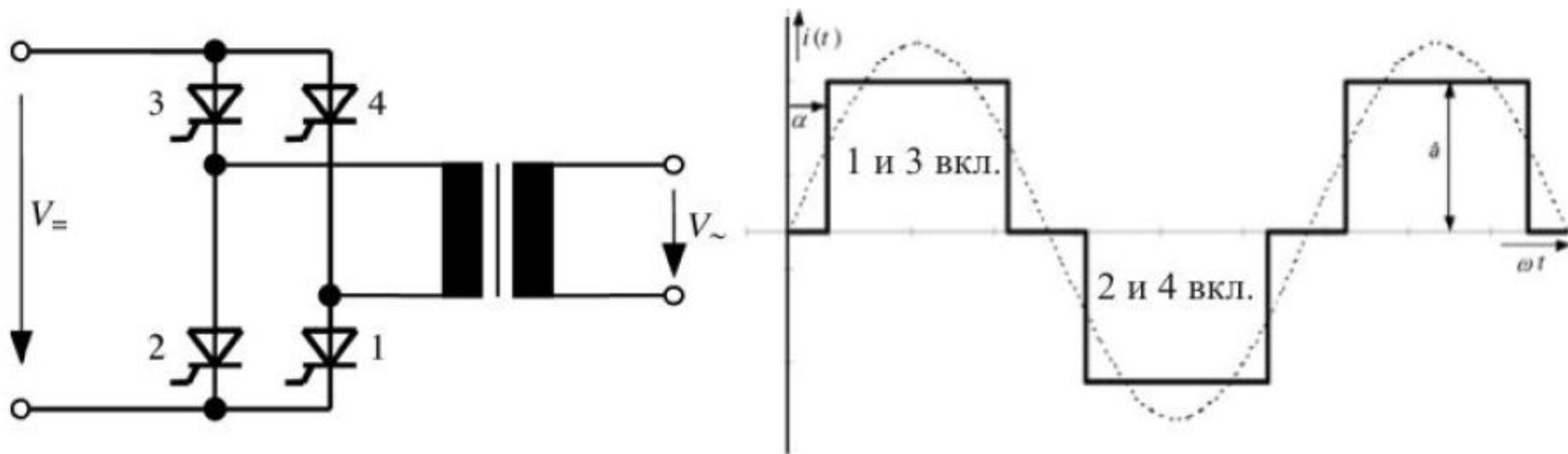


Рис. Форма выходного напряжения из инвертора  
а) прямоугольник, б) трапеция, в) синусоида.

Принципиальная схема инвертора с трапециевидной формой выходного сигнала напряжения – двухполупериодный мост

Тиристор – полупроводниковый прибор, способный переключаться.



*Аккумулятор (аккумуляторная батарея)* – позволяет накапливать электрическую энергию

Емкость аккумуляторной батареи (Ампер· час, А · ч)

Допустимая глубина разрядки – максимальная доля (в %) от полного заряда аккумуляторов, на которую его можно разряжать.

Типы аккумуляторов, используемые в фотовольтаике:

*Кисотно-свинцовые батареи* – запасает энергию путем превращения электрической энергии в химическую. При потреблении энергии происходит обратный процесс.

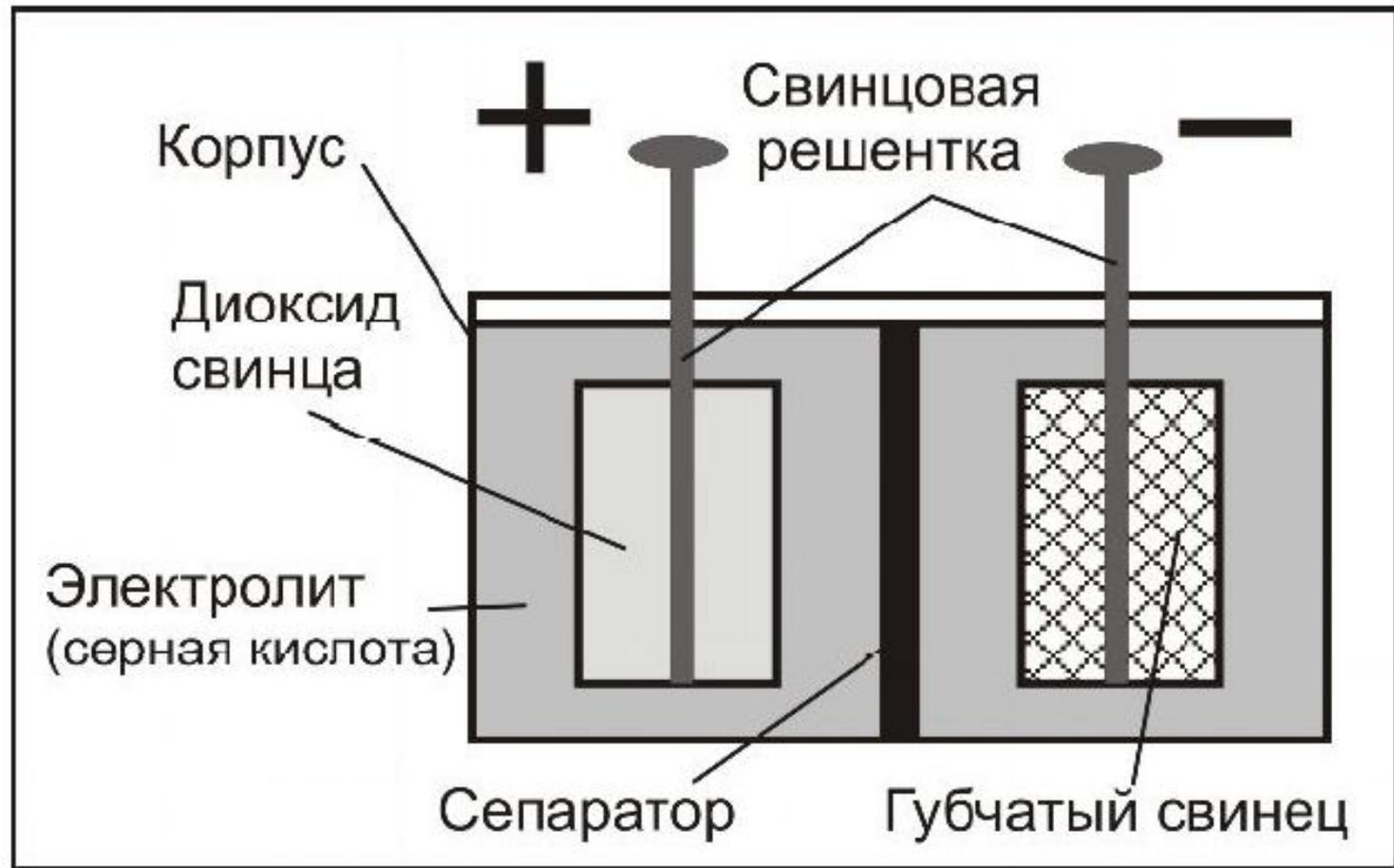
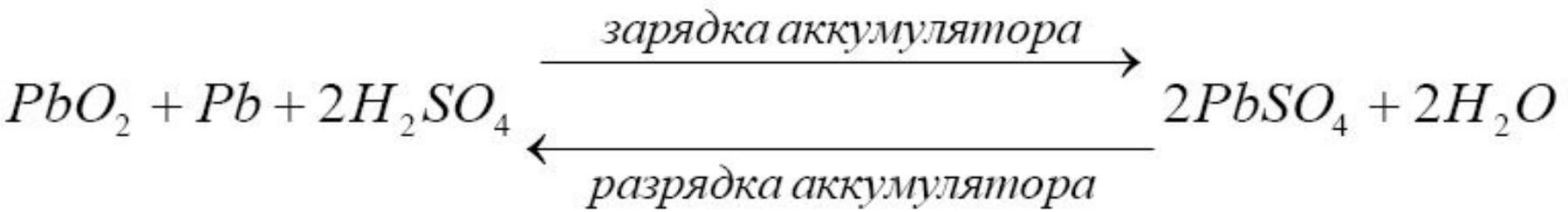


Рис. Кислотно-свинцовая аккумуляторная батарея.

- *Гелевые аккумуляторы* – электролит находится в состоянии геля, это происходит за счет содержания в нем соединений кремния.
- *Щелочные батареи* -

