

Фотоэлектрические преобразователи представляют собой полупроводниковые приборы с диодной структурой, содержащей встроенное электрическое поле р-п перехода или выпрямляющего контакта типа металл/полупроводник, которое пространственно разделяет генерируемые квантами света в полупроводниковом материале диодной структуры пары из отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных дырок, обеспечивая тем самым реализацию эффекта фото-ЭДС и напряжения холостого хода $U_{ХХ}$ на разомкнутых электродах ФЭП.

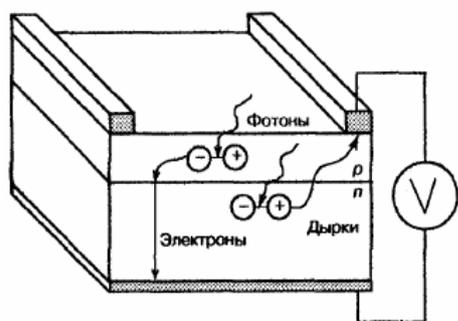


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение простейшего ФЭП с р-п переходом и механизма возникновения напряжения холостого хода, соответствующего разности потенциалов V между разомкнутыми электродами



Рисунок 1.2 - Монокристаллический кремниевый ФЭП серийного производства ПАО «Квазар» (г. Киев) с планарными размерами 12,5 см × 12,5 см (площадь фронтальной фотоприемной поверхности 156 см²), толщиной 170 мкм и КПД $\approx 17\%$ для наземного применения

В результате, при подключении ФЭП как источника тока к внешней электрической цепи в ней через потребитель (нагрузку) с активным сопротивлением R_H будет протекать электрический ток силой I_H , что согласно закону Ома для участка цепи обусловит возникновение напряжения на нагрузке

$$U_H = I_H R_H \quad (1.1)$$

Эквивалентная электрическая схема ФЭП с подключенной к его электродам внешней электрической цепью, состоящей из потребителя электроэнергии с сопротивлением R_H , приборов для измерения силы тока I_H и напряжения U_H , а также соединительных проводников с сопротивлением R_K показана на Рис. 1.3.

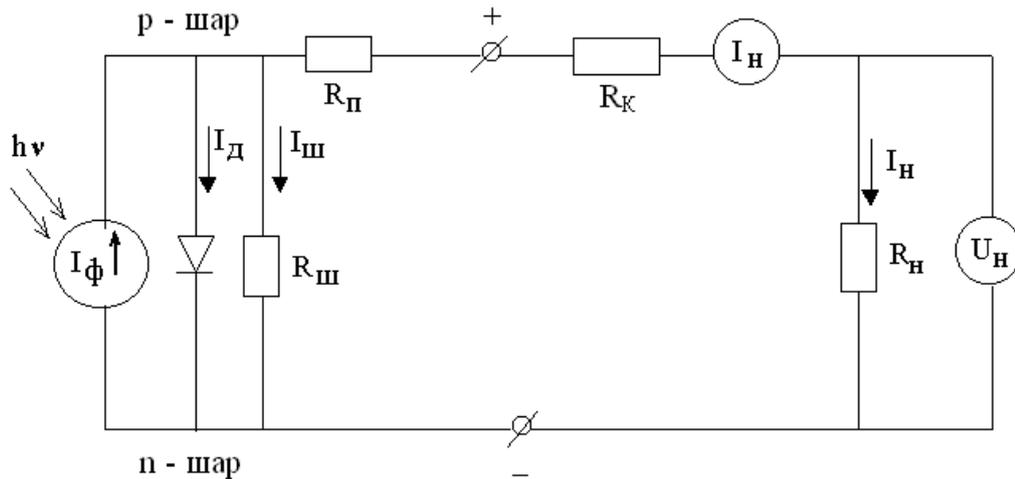


Рисунок 1.3 - Эквивалентная электрическая схема ФЭП с подключенной к его противоэлектродам внешней электрической цепью (I_ϕ - фототок, протекающий внутри освещаемого прибора; $I_д$ и $I_ш$ - диодный ток и ток шунта, протекающие навстречу фототоку; $I_н = I_\phi - I_д - I_ш$; $R_ш$ - шунтирующее сопротивление - сопротивление структурных дефектов полупроводниковой диодной структуры, шунтирующих выпрямляющий переход; $R_п$ - последовательное сопротивление ФЭП, являющееся суммой сопротивлений протеканию тока $I_н$ всех элементов конструкции прибора)

Поэтому в потребителе окажется возможным выделение полезной электрической мощности

$$P_н = I_н U_н, \quad (1.2)$$

обеспечивающей использование потребителем соответствующего количества механической, тепловой или электромагнитной (в частности, световой) энергии.

В случае оптимального согласования сопротивления потребителя $R_н$ с сопротивлением освещаемого и нагруженного на него ФЭП ($R_{н0} = R_{ФЭП}$) электрическая мощность, отдаваемая ФЭП в нагрузку при неизменной мощности излучения $P_и$ на фотоприемной поверхности ФЭП, достигает максимально возможного значения

$$P_{нм} = I_{нм} U_{нм}, \quad (1.3)$$

где $I_{нм}$ и $U_{нм}$ – сила тока в сопротивлении нагрузки и напряжение на нем, соответствующие режиму оптимального согласования сопротивлений нагрузки и ФЭП.

Для каждого конкретного ФЭП при $R_{НО} = R_{ФЭП}$ и используемом режиме облучения AMt величина $P_{НМ}$ зависит от уровня совершенства его конструктивно-технологического решения (КТР) и растет с повышением уровня КТР. При этом растет и КПД прибора, являющийся важнейшим параметром его качества.

Величина КПД любого ФЭП рассчитывается согласно формуле, хорошо известной из школьного курса физики для расчета КПД любого объекта, предназначенного для выполнения полезной работы за счет использования энергии, подводимой к этому объекту. При оперировании соответствующими мощностями школьная формула для расчета КПД имеет следующий вид

$$\eta = (P_{ПОЛЕЗНО\ ИСПОЛЬЗОВАННАЯ} / P_{ПОДВЕДЕННАЯ\ К\ ОБЪЕКТУ}) \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

В случае ФЭП эта формула выглядит таким образом

$$\eta = (P_{НМ} / P_{И}) \cdot 100 \% = [P_{НМ} / (P_{И} \cdot S_{ФЭП})] \cdot 100 \%, \quad (1.5)$$

где $P_{И}^*$ - удельная мощность излучения на фотоприемной поверхности ФЭП;
 $S_{ФЭП}$ – площадь фотоприемной поверхности ФЭП.

Мощность $P_{НМ}$ зависит от трех экспериментально определяемых ключевых выходных параметров ФЭП следующим образом:

$$P_{НМ} = I_{КЗ} U_{ХХ} FF, \quad (1.6)$$

где $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания, равный $I_{Н}$ при $R_{Н} = 0$;

FF – доля $P_{НМ}$ от полной мощности $P_{ФЭП} = I_{КЗ} U_{ХХ}$, вырабатываемой ФЭП при соответствующем режиме облучения его фотоприемной поверхности.

Поэтому для расчета КПД фотоэлектрического преобразователя наряду с формулой (1.5) используется соотношение

$$\eta = [I_{КЗ} U_{ХХ} FF / (P_{И} \cdot S_{ФЭП})] \cdot 100 \% \quad (1.7)$$

Как видно из соотношения (1.7), КПД растет с увеличением каждого из трех ключевых выходных параметров ФЭП – $I_{КЗ}$, $U_{ХХ}$ и FF , в связи с чем совершенствование КТР таких приборов направлено на повышение их $I_{КЗ}$, $U_{ХХ}$, FF и снижение стоимости изготовления.

На Рис. 1.4 *а, б* приведены примеры высших достижений в области КТР современных зарубежных (*а*) и отечественных (*б*) монокристаллических однопереходных кремниевых ФЭП с горизонтальной диодной структурой и минимодуля со слабоконцентрирующим гибким самораскрывающимся устройством на их основе для наземного (*а*) и космического (*б*) применения.

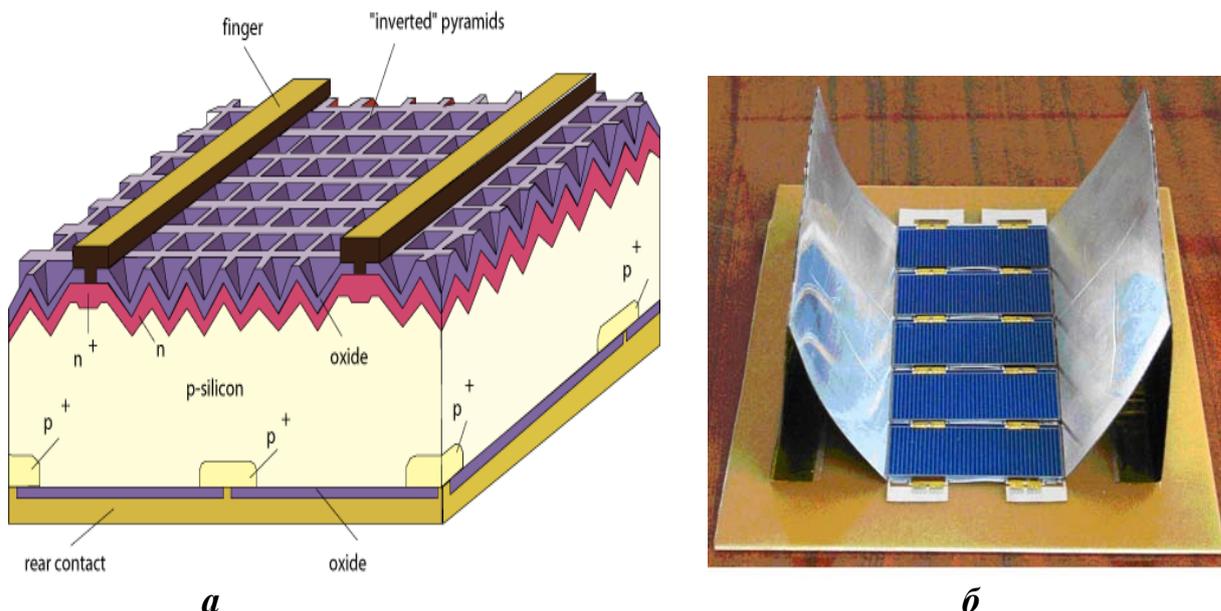


Рисунок 1.4 – Конструкции ФЭП и минимодуля со слабоконцентрирующим гибким самораскрывающимся устройством на их основе, разработанные: *а* – в Научно-исследовательском центре Университета Нового Южного Уэльса (Австралия); *б* – совместно кафедрой ФМЭГ НТУ «ХПИ» и Государственным предприятием «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения» Национального космического агентства Украины (ГП НИТИП НКАУ, г. Харьков)

Таблица 1.1 - Параметры ФЭП, показанных на Рис. 1.4

Параметры	Зарубежная разработка для наземного применения (режим AM1,5G)	Отечественная разработка для космического применения (режим AM0)
$S_{\text{ФЭП}}, \text{см}^2$	4,0 (2 см × 2 см)	8,0 (4 см × 2 см)
$t_{\text{ФЭП}}, \text{мкм}$	400	250
$J_{\text{КЗ}}, \text{мА/см}^2$	42,7	43,0
$U_{\text{ХХ}}, \text{мВ}$	706	640
FF, отн. ед.	0,83	0,76
$\eta, \%$	25,0	15,0*
Цена, \$США/Вт-пик	Не менее 20	Не более 4

Примечание: $t_{\text{ФЭП}}$ – толщина ФЭП; *- уровень высших достижений к 2005 г.

Использование слабоконцентрированного солнечного излучения в случае степени концентрации $K_{\text{и}} \approx 2$ позволяет примерно в аналогичное число раз повысить $I_{\text{КЗ}}$ при практически неизменных $U_{\text{ХХ}}$ и FF, что согласно формуле (1.6) обеспечивает соответствующее увеличение $P_{\text{НМ}}$.