

03, март 2016

УДК 535.215.5/621.383.51

Разработка установки для определения спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей

*Кузнецов С.Д., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Шевченко А.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: Онуфриев В.В., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»
onufryev@bmstu.ru*

Особенности работы фотоэлектрических преобразователей.

Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) – устройство, предназначенное для прямого преобразования световой энергии (солнечного излучения) в электрическую.

ФЭП классифицируют по:

- материалу подложки — кремниевые, германиевые;
- типу легирования — элементы III и V главных групп Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева;
- типу фотоэффекта — внутренний, внешний;
- числу p-n-переходов — одно- и многопереходные;
- типу перехода — гомопереходные и гетеропереходные [3–7];
- рабочему диапазону спектра поглощаемого солнечного излучения (СИ);
- области применения — космические, наземные и т.д.

Работа ФЭП основан на внутреннем фотоэффекте. Квант света падает на n -слой полупроводниковой пластины, проходя сквозь него, и поглощается p -слоем, выбивая электрон со дна запрещенной зоны и переводя его в зону проводимости. Однако для этого энергия кванта света должна быть больше ширины запрещенной зоны полупроводника E_g :

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g, \quad (1)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света, λ – длина волны излучения, м. Поэтому, исходя из физического принципа работы ФЭП, граничная длина волны λ_g , согласно (1), начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале ФЭП

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \quad (2)$$

Область излучения, преобразуемого ФЭП, показана на рис. 1, более длинноволновое излучение не поглощается в полупроводнике, и, следовательно, бесполезно с точки зрения фотоэлектрического преобразования [1].

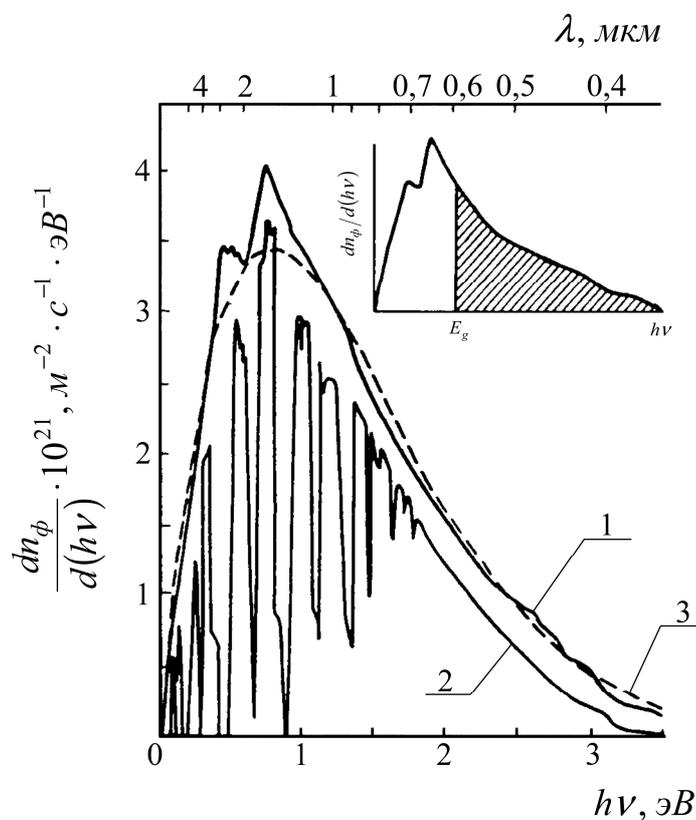


Рис. 1. Спектральное распределение потока фотонов солнечного излучения [1].
 1 – внеатмосферное излучение (AM 0); 2 – наземное стандартизированное излучение (AM 1,5); 3 - спектр излучения абсолютно черного тела при $T = 5800$ К. На вставке заштрихована доля полезно используемых фотонов

Спектральные характеристики ФЭП

Каждый тип фотоэлементов характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих не только его свойства, но и пределы его применения в той или иной

области. К важнейшим характеристикам фотоэлемента следует отнести его спектральную чувствительность, отражающую тот факт, что фотоэлемент неодинаково реагирует на излучения с различными длинами волн [1].

Спектральная чувствительность i_λ характеризует величину фототока, возникающую под действием единицы светового потока определенной длины волны, и определяется как отношение тока короткого замыкания $I_{к.з.}$ к падающему на фотопреобразователь потоку монохроматического излучения Φ_λ [2]:

$$i_\lambda = \frac{I_{к.з.}}{\Phi_\lambda}.$$

Для получения полного представления о спектральных свойствах фотоэлектрического преобразователя необходимо также знать распределение чувствительности по спектру, т.е. спектральную характеристику, которая отражает характер зависимости величины фототока короткого замыкания от воздействия на ФЭП световых потоков различных длин волн. Спектральную характеристику фотопреобразователя обычно изображают в виде $i_\lambda = f(\lambda)$. Максимум спектральной чувствительности кремниевого ФЭП лежит в интервале длин волн 0,7-0,8 мкм и довольно близко подходит к максимуму распределения фотонов как функции длины волны в солнечном спектре [2].

Спектральная чувствительность ФЭП ограничена по максимальному значению длины волны соотношением (2). Получив экспериментальную спектральную характеристику, можно определить ширину запрещенной зоны материала ФЭП. Зная спектральную чувствительность фотоэлемента, можно рассчитать величину тока, возникающего во внешней цепи при падении на ФЭП светового потока от любого источника с известным законом распределения энергии по спектру.

Часто применяют понятие относительной спектральной чувствительности, где максимальное значение чувствительности принимается за единицу, а минимальное за ноль. В этом случае относительная спектральная характеристика показывает изменение чувствительности ФЭП относительно своего максимального значения.

Установка для исследования спектральных характеристик ФЭП

При проектировании установки были определены следующие основные требования:

- обеспечение возможности получения спектральных характеристик ФЭП;

- возможность работы, как с узкополосным, так и с когерентным монохроматическим излучением;
- обеспечение возможности замены элементов ФЭП для исследования различных типов фотоэлементов;
- возможность замены элементов установки, а так же добавления новых элементов с целью повышения функциональности установки;
- требования эргономичности и безопасности.

В качестве узкополосного источника излучения были выбраны полупроводниковые светодиоды. Установка (рис. 2) состоит из двух основных узлов: блока питания и управления и камеры для исследования ФЭП. Блок питания и управления осуществляет питание светодиодов с известной длиной волны. В камере для исследования ФЭП узкополосное излучение от светодиодов попадает на скоммутированные фотоэлементы. Ток короткого замыкания ФЭП может быть измерен с помощью амперметра, подключенного к соответствующим разъемам.

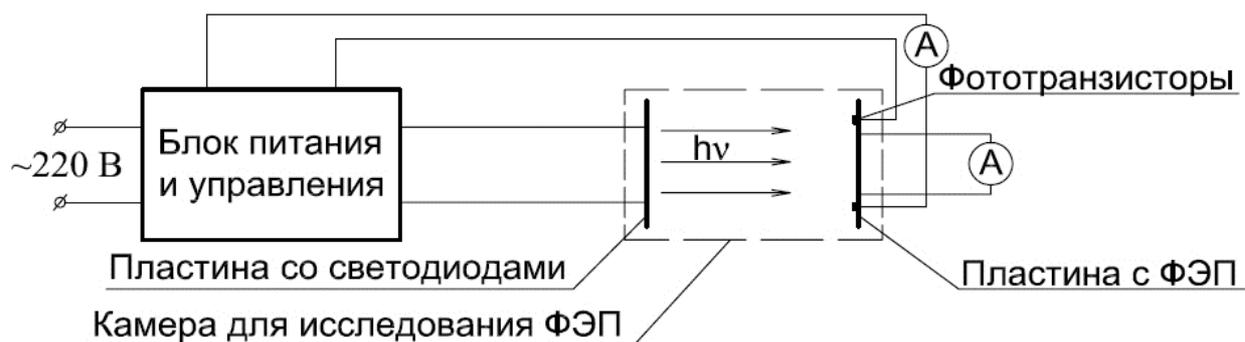


Рис. 2. Схема установки для исследования спектральных характеристик ФЭП

Для оценки уровня освещенности ФЭП использовались фототранзисторы, установленные на пластине с фотоэлементами. Фототранзисторы имеют свою спектральную характеристику, известную из паспортных данных. Ток на фототранзисторе измеряется с помощью амперметра, подключенного к соответствующим разъемам.

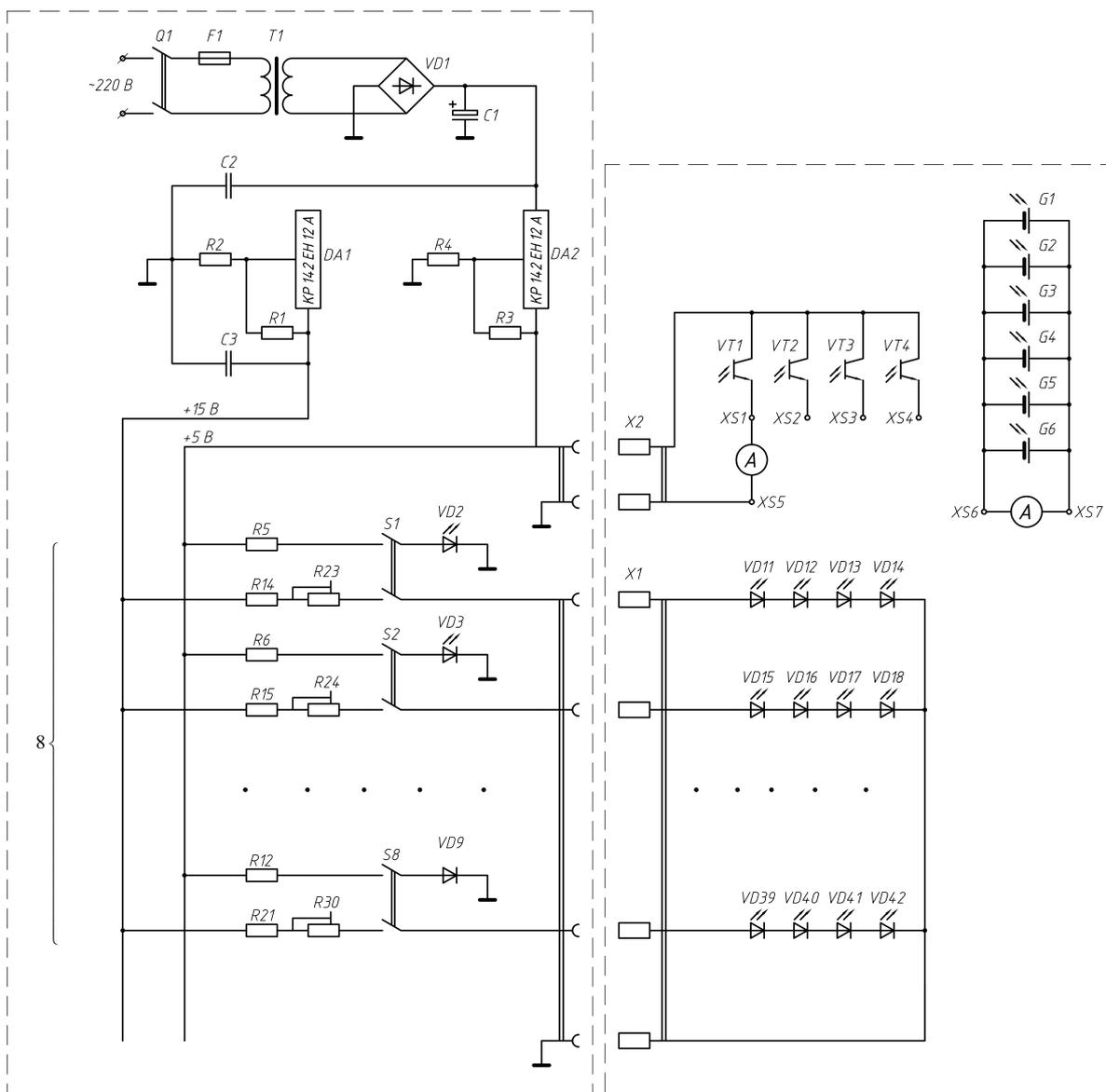


Рис. 3. Электросхема установки для исследования спектральных характеристик ФЭП.

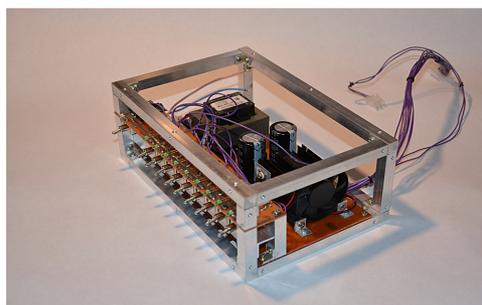
Q1 – тумблер; F1 – плавкий предохранитель; T1 – понижающий трансформатор;
 VD1 – диодный мост; DA1, DA2 – линейные стабилизаторы напряжения;
 C1...C3 – конденсаторы; R1...R21 – резисторы; R23...R30 – подстроечные резисторы;
 VD2...VD42 – светодиоды; X1, X2 – штыревые разъёмы; XS1...XS7 – контакты (гнезда);
 VT1...VT4 – фототранзисторы; G1...G6 – модули ФЭП

Электрическая схема установки приведена на рис. 3. Блок питания и управления создан по схеме простейшего трансформаторного источника питания. Включение и выключение установки осуществляется тумблером Q1. Последовательно первичной обмотке трансформатора T1 установлен плавкий предохранитель F1. Сглаживающий конденсатор C1 уменьшает величину пульсаций напряжения, выпрямленного диодным

мостом VD1. Линейные стабилизаторы напряжения DA1 и DA2 создают две ветки напряжения +15 В и +5 В соответственно. Подача напряжения на светодиоды осуществляется с помощью тумблеров S1 – S8. С целью получения одинакового светового потока от каждого светодиода, светодиоды одной длины волны соединены последовательно. Все элементы распаяны на заранее протравленной печатной плате из текстолита. Для охлаждения тепловыделяющих элементов (линейных стабилизаторов напряжения и трансформатора) установлен, не показанный на схеме (рис. 3), вентилятор.



а)



б)

Рис. 4. Установка для исследования спектральных характеристик ФЭП:

а) общий вид; б) блок питания и управления (без стенок)

Корпус блока питания и управления, также как и корпус камеры для исследования ФЭП (рис. 4а), выполнен из алюминиевого прутка, к которому прикручены листы из оргстекла (рис. 4б). Оргстекло в качестве стенок использовано для того, чтобы можно было наблюдать смену длины волны источника излучения в видимом диапазоне спектра. Для снижения влияния окружающего света оргстекло затонировано.

В данной конфигурации установки в камере для исследования ФЭП установлено шесть параллельно соединённых кремниевых ФЭП, четыре фототранзистора и восемь групп светодиодов с длинами волн 430, 525, 590, 660, 700, 850, 880, 953 нм.

Список используемых светодиодов и их характеристики приведены в таблице 1. На рис. 5 представлены спектры излучения светодиодов. Номера на графике соответствуют номеру светодиода из таблицы. Для снижения разброса измеряемых токов к светодиодам подобраны соответствующие токоограничивающие резисторы (рис. 3).

Используемый фототранзистор L-32P3С по паспортным данным имеет темновой ток коллектора 100 нА (при напряжении коллектор-эмиттер 10 В), видимый угол 50° . На рис. 6 приведена схема расположения светодиодов, фототранзисторов и фотоэлектрических преобразователей.

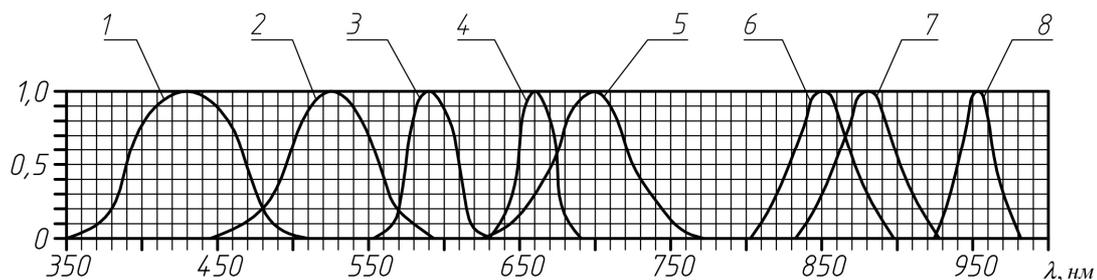


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности излучения светодиодов от длины волны. Светодиоды: 1 – BL-L324BC; 2 – ARL-184PGC; 3 – BL-L314UYC; 4 – BL-L314URC; 5 – L-132XHD; 6 – L-7113SF7C; 7 – L-34SF4C; 8 – АЛ1107Б

В связи с малостью угла падения излучения и равномерного распределения светодиодов снижение освещённости ФЭП по закону Ламберта не учитывалось.

На разработанной установке были измерены ток короткого замыкания ФЭП $I_{кз}$ и токи через фототранзисторы $I_{\phi i}$ при облучении каждой из групп светодиодов. Был посчитан средний пропускаемый фототранзисторами ток $\langle I_{\phi} \rangle$, по которому, с учётом спектральной чувствительности фототранзисторов (выраженной коэффициентом k) из их паспортных данных, был посчитан ток $I_{\phi}' = \langle I_{\phi} \rangle / k$ (таблица 2). График зависимости относительной спектральной чувствительности ФЭП i от длины волны падающего излучения приведён на рис. 8.

В таблице 2 также приведены среднеквадратичные погрешности измерений, помноженные на коэффициент Стьюдента. Горизонтальные планки погрешностей соответствуют полуширине спектра излучения светодиодов.

При расширении технических возможностей (увеличении длины волны падающего на ФЭП излучения) возможно экспериментальное определение ширины запрещённой зоны материала ФЭП.

Таблица 1

Паспортные характеристики светодиодов

номер светодиода	Модель	Материал	диаметр линзы, мм	угол половинной яркости, град.	сила излучения, мВт/ср	номинальный ток, мА	прямое напряжение, В	длина волны пика спектра излучения, нм
1	BL-L324BC	InGaN	3,0	13	53	20	3,80	430
2	ARL-184PGC	InGaN	1,8	30	2	20	3,50	525
3	BL-L314UYC	AlGaInP	3,0	30	4	20	2,10	590
4	BL-L314URC	AlGaAs	3,0	30	13	20	1,95	660
5	L-132XHD	GaP	3,0	60	3	20	2,00	700
6	L-7113SF7C	GaAlAs	5,0	20	40	20	1,40	850
7	L-34SF4C	GaAlAs	3,0	50	4	20	1,30	880
8	АЛ107Б		2,4	15	9	100	1,80	953

Таблица 2

Экспериментальные данные и результаты вычислений

Длина волны, нм	№ измер.	I _{фи} , мкА				<I _ф >, мкА	ΔI _{фи} , мкА				ΔI _ф , мкА	I _{кз} , мкА	<I _{кз} >, мкА	ΔI _{кз} , мкА	k	I _ф ', мкА	i	Δi
		1	2	3	4		1	2	3	4								
430	1	429	593	360	409	448,3	373,8	20928	7803	1547	396,8	760	758,3	2,8	0,40	1121	0,68	1,50
	2	429	595	359	410		373,8	21511	7980	1469		758						
	3	430	596	360	410		336,1	21805	7803	1469		757						
525	1	341	253	355	388	334,8	39,1	6683	410,1	2836	224,3	470	469,7	1,1	0,56	597,8	0,79	0,94
	2	342	254	356	389		52,6	6521	451,6	2943		470						
	3	341	254	355	389		39,1	6521	410,1	2943		469						
590	1	106	117	126	111	115,2	84,0	3,4	117,4	17,4	32,1	166	165,7	1,1	0,61	187,6	0,88	0,40
	2	108	118	126	111		51,4	8,0	117,4	17,4		166						
	3	107	117	125	110		66,7	3,4	96,7	26,7		165						
660	1	234	243	278	264	254,3	413,4	128,4	560,1	93,4	79,3	576	575,7	1,1	0,73	350,8	1,64	0,71
	2	233	242	278	263		455,1	152,1	560,1	75,1		575						
	3	233	242	279	263		455,1	152,1	608,4	75,1		576						
700	1	11	12	11	11	11,3	0,1	0,4	0,1	0,1	2,1	40	39,7	1,1	0,79	14,4	2,75	0,66
	2	11	11	12	12		0,1	0,1	0,4	0,4		40						
	3	12	11	11	11		0,4	0,1	0,1	0,1		39						
850	1	540	679	663	499	595,3	3053	7014	4590	9264	347,7	1409	1407,3	2,8	0,95	628,6	2,24	1,38
	2	540	680	662	500		3053	7183	4456	9073		1407						
	3	539	679	663	499		3164	7014	4590	9264		1406						
880	1	346	363	326	342	342,3	14,1	430,6	264,1	0,1	60,6	1291	1284,3	10,8	0,97	353,2	3,64	0,67
	2	344	361	323	340		3,1	361,6	370,6	5,1		1282						
	3	343	359	321	339		0,6	280,6	451,6	10,6		1280						
953	1	208	245	229	192	217,8	96,7	738,0	124,7	667,4	90,0	1631	1625,7	8,7	0,97	225,0	7,22	3,08
	2	209	243	227	190		78,0	633,4	84,0	774,7		1624						
	3	210	244	227	190		61,4	684,7	84,0	774,7		1622						

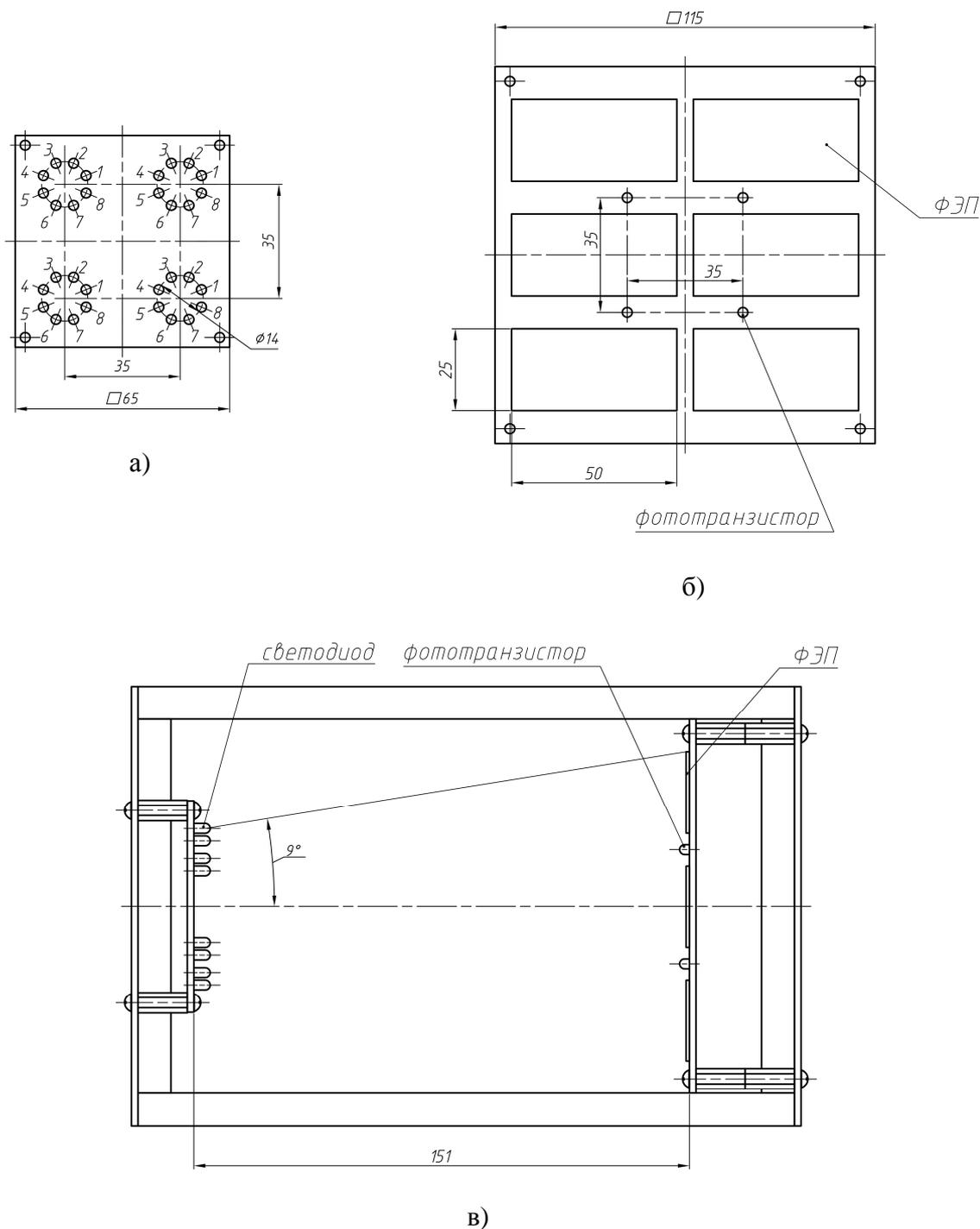


Рис. 6. Схемы расположения элементов в камере для исследования ФЭП:
 а) размещение светодиодов: 1 – BL-L324BC; 2 – ARL-184PGC; 3 – BL-L314UYC;
 4 – BL-L314URC; 5 – L-132XHD; 6 – L-7113SF7C; 7 – L-34SF4C; 8 – АЛ107Б;
 б) расположение ФЭП и фототранзисторов; в) взаимное положения ФЭП и светодиодов

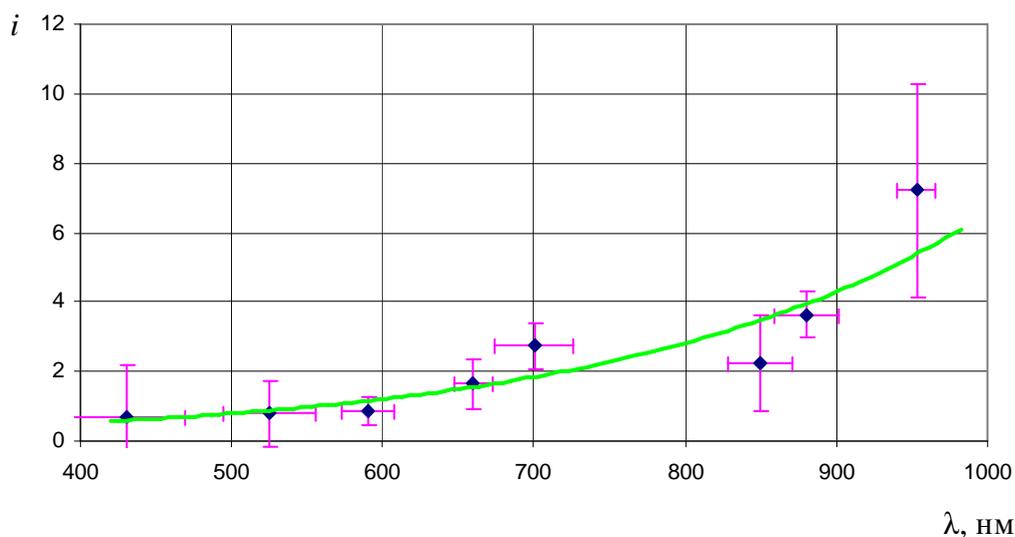


Рис. 8. Зависимость относительной спектральной чувствительности ФЭП от длины волны падающего излучения

Разработанная конструкция позволяет:

- проводить исследования ФЭП из других материалов (например, арсенид-галлиевые ФЭП);
- расширить диапазон по длинам волн и/или повысить точность построения спектральных характеристик с помощью добавления светодиодов с определённой длиной волны;
- использовать любые другие источники излучения (например, лазеры);
- проводить другие исследования ФЭП (например, добавление нагревательного элемента позволит проводить исследование температурного влияния на генерацию тока ФЭП).

Выводы:

- разработана установка для определения спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей для диапазона длин волн 430...953 нм;
- разработанная установка позволяет подбирать типы ФЭП в зависимости от поставленных задач с целью повышения эффективности преобразования энергии;
- разработанная установка может использоваться при разработке новых ФЭП с учётом их спектральных характеристик, что является важной и актуальной задачей.

Список литературы

- [1]. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.
- [2]. Глиберман А.Я., Зайцева А.К. Кремниевые солнечные батареи. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 72 с.
- [3]. Комащенко В.Н., Колежук К.В., Ярошенко Н.В., Шереметова Г.И., Бобренко Ю.Н. Спектральная чувствительность гетероструктур $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/n\text{-A}^{\text{IV}}$ // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40. Вып. 3. С. 332–335.
- [4]. Левин Р.В., Маричев А.Е., Шварц М.З., Марухина Е.П., Хвостиков В.П., Пушный Б.В., Мизеров М.Н., Андреев В.М. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе $\text{InGaAsP}(1.0\text{эВ})/\text{InP}$ -гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 5. С. 715–718.
- [5]. Бобренко Ю.Н., Павелец С.Ю., Павелец А.М., Ярошенко Н.В. Фотоэлектрические преобразователи с вариозными слоями на основе ZnSe // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 10. С. 1381–1384.
- [6]. Катеринчук В.Н., Кудринский З.Р., Хомяк В.В., Орлецкий И.Г., Нетяга В.В. Электрические и фотоэлектрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$ // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 7. С. 935–938.
- [7]. Солован М.Н., Брус В.В., Марьянчук П.Д. Электрические и фотоэлектрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Si}$ // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 9. С. 1185–1190.