

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ  
Факультет «Электроника и автоматика»  
Кафедра «Электроника и микроэлектроника»**

**Тиллаев Саидхон Хасанжон угли**

**Тема: «Разработка лабораторного стенда для изучения  
фотоэлектрических явлений»**

**Выпускная квалификационная работа**

для получения степени бакалавра по направлению

**5310800"Электроника и приборостроение"**

(шифр и название направления)

**Заведующий кафедрой:**

**проф. Илиев Х.М.**

**Руководитель:**

**доц. Рахмонов Б.Р.**

**Выпускник:**

**Тиллаев С.Х.**

**Ташкент - 2016**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>3</b>
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b>	
1.1 Основные законы геометрической оптики	8
1.2 Дифракция света	10
1.3 Интерференция световых волн	12
1.4 Поляризация света	18
1.5 Фотоэлектрический эффект	25
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ</b>	
2.1 Основные параметры и характеристики солнечных элементов	31
2.2 Преобразование оптического излучения в солнечных элементах	37
2.3 Анализ потерь в солнечных элементах	42
2.4 Электрические соединения солнечных элементов и батарей	45
2.5 Определение числа элементов в солнечных батареях	47
2.6 Разработанная конструкция лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений	50
2.7 Особенности измерения световой и темновой вольт – амперной характеристики.	52
<b>3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b>	<b>55</b>
<b>4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ</b>	<b>60</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>70</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>72</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян. По мере изобретения и совершенствования различных оптических приборов (параболических зеркал, микроскопа, зрительной трубы) эти представления развивались и трансформировались. В конце XVII века возникли две теории света: корпускулярная (И. Ньютон) и волновая (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно корпускулярной теории, свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами. Ньютон считал, что движение световых корпускул подчиняется законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика от плоскости. Преломление света объяснялось изменением скорости корпускул при переходе из одной среды в другую

Ньютон пытался также объяснить появление интерференционных полос, допуская определенную периодичность световых процессов. Таким образом, корпускулярная теория Ньютона содержала в себе элементы волновых представлений.

Волновая теория, в отличие от корпускулярной, рассматривала свет как волновой процесс, подобный механическим волнам. В основу волновой теории был положен принцип Гюйгенса, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, становится центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени. С помощью принципа Гюйгенса были объяснены законы отражения и преломления.

Закон преломления, полученный из волновой теории, оказался в противоречии с формулой Ньютона. Волновая теория приводит к выводу:  $v < c$ , тогда как согласно корпускулярной теории  $v > c$ .

Таким образом, к началу XVIII века существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса. Обе теории объясняли

прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления. Весь XVIII век стал веком борьбы этих теорий. Однако в начале XIX столетия ситуация коренным образом изменилась. Корпускулярная теория была отвергнута и восторжествовала волновая теория. Большая заслуга в этом принадлежит английскому физическому Т. Юнгу и французскому физическому О. Френелю, исследовавшим явления интерференции и дифракции. Исчерпывающее объяснение этих явлений могло быть дано только на основе волновой теории. Важное экспериментальное подтверждение справедливости волновой теории было получено в 1851 году, когда Ж. Фуко (и независимо от него А. Физо) измерил скорость распространения света в воде и получил значение  $v < c$ .

Электромагнитная природа света получила признание после опытов Г. Герца (1887–1888 гг.) по исследованию электромагнитных волн. В начале XX века после опытов П. Н. Лебедева по измерению светового давления (1901 г.) электромагнитная теория света превратилась в твердо установленный факт.

Важнейшую роль в выяснении природы света сыграло опытное определение его скорости. Начиная с конца XVII века предпринимались неоднократные попытки измерения скорости света различными методами (астрономический метод А. Физо, метод А. Майкельсона). Современная лазерная техника позволяет измерять скорость света с очень высокой точностью на основе независимых измерений длины волны  $\lambda$  и частоты света  $\nu$  ( $c = \lambda \cdot \nu$ ). Таким путем было найдено значение превосходящее по точности все ранее полученные значения более чем на два порядка:

$$c = 299792458 \pm 1,2 \text{ м/с}$$

Свет играет чрезвычайно важную роль в нашей жизни. Подавляющее количество информации об окружающем мире человек получает с помощью света. Однако, в оптике как разделе физике под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие диапазоны спектра электромагнитного излучения – инфракрасный ИК и ультрафиолетовый УФ.

По своим физическим свойствам свет принципиально неотличим от электромагнитного излучения других диапазонов – различные участки спектра отличаются друг от друга только длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ .

Для измерения длин волн в оптическом диапазоне используются единицы длины 1 нанометр (нм) и 1 микрометр (мкм):

$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-7} \text{ см} = 10^{-3} \text{ мкм}.$$

Видимый свет занимает диапазон приблизительно от 400 нм до 780 нм или от 0,40 мкм до 0,78 мкм.

Электромагнитная теория света позволила объяснить многие оптические явления, такие как интерференция, дифракция, поляризация и т. д. Однако, эта теория не завершила понимание природы света. Уже в начале XX века выяснилось, что эта теория недостаточна для истолкования явлений атомного масштаба, возникающих при взаимодействии света с веществом. Для объяснения таких явлений, как излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона и др. потребовалось введение квантовых представлений. Наука вновь вернулась к идее корпускул – световых квантов. Тот факт, что свет в одних опытах обнаруживает волновые свойства, а в других – корпускулярные, означает, что свет имеет сложную двойственную природу, которую принято характеризовать термином корпускулярно-волновой дуализм.

Согласно теории цветового зрения Юнга-Гемгольца (1821-1894) ощущение любого цвета можно получить смешиванием спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего цвета. Эта теория хорошо согласуется с наблюдаемыми фактами и предполагает, что в глазу есть только три типа светочувствительных приемников. Они отличаются друг от друга областями спектральной чувствительности. Красный свет воздействует преимущественно на приемники первого типа, зеленый - второго, синий - третьего. Сложением излучений таких трех цветов в различных пропорциях можно получить любую комбинацию возбуждения всех трех типов светочувствительных элементов, а значит и ощущение любого цвета. Если

все рецепторы возбуждены в одинаковой степени, мы имеем ощущение белого цвета, если рецепторы не возбуждены - черного. По этой причине, накладывающиеся области красного, зеленого и синего цвета выглядят как белое пятно. Наложение красного и синего цвета дает фиолетовый цвет, зеленого и синего - бирюзовый, красного и зеленого – желтый.

Солнце – ближайшая к нам звезда. Расстояние до него по астрономическим меркам невелико: лишь 8 минут идет свет от Солнца до Земли. На 1 квадратный метр обращенной к Солнцу поверхности площадки в окрестностях Земли каждую секунду поступает 1400 Дж энергии, переносимой солнечным электромагнитным излучением. Около 9 % энергии в солнечном спектре приходится на ультрафиолетовое излучение с длинами волн от 100 до 400 нм. Остальная энергия разделена приблизительно поровну между видимой 42% (400–760 нм) и инфракрасной 44% (760–5000 нм) областями спектра.

Глаз способен воспринимать свет на длинах волн примерно от 400 нм до 760 нм. В условиях адаптации к темноте глаз может также немного видеть инфракрасный свет с длиной волны до 950 нм и ультрафиолетовый свет с длиной волны не меньше 300 нм. Границы частотного диапазона видимого света, а также сама форма кривой видности человеческого глаза были сформированы в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещения земных предметов солнечным светом, а также к условиям сумеречного и ночного освещения. Действительно, было бы биологически нецелесообразно, если бы глаз обладал способностью принимать излучение с длинами волн короче 290 нм, так как из-за наличия озонового слоя в атмосфере земли, поглощающего ультрафиолетовые лучи, спектр солнечного излучения вблизи поверхности Земли практически обрывается на длине волны 290 нм. С другой стороны, из-за теплового излучения самого глаза, его высокая чувствительность к инфракрасному излучению сделала бы невозможной работу глаза в условиях солнечного освещения. Ультрафиолетовое излучение, невидимое для глаза, воздействует

тем не менее на кожу. Под действием ультрафиолета, который присутствует в солнечном свете, в коже вырабатывается особый пигмент, интенсивно отражающий эту часть солнечного спектра. При этом кожа приобретает характерный оттенок, известный как загар, а вероятность её ожога сильно уменьшается.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Основные законы геометрической оптики

Основные законы геометрической оптики были известны задолго до установления физической природы света.

**Закон прямолинейного распространения света:** в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении светом источника достаточно малых размеров («точечный источник»). Другим доказательством может служить известный опыт по прохождению света далекого источника сквозь небольшое отверстие, в результате чего образуется узкий световой пучок. Этот опыт приводит к представлению о световом луче как о геометрической линии, вдоль которой распространяется свет. Следует отметить, что закон прямолинейного распространения света нарушается и понятие светового луча утрачивает смысл, если свет проходит через малые отверстия, размеры которых сравнимы с длиной волны. Таким образом, геометрическая оптика, опирающаяся на представление о световых лучах, есть предельный случай волновой оптики при  $\lambda \rightarrow 0$ . На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а частично пройти через границу и распространяться во второй среде.

**Закон отражения света:** падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскость падения). Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$ .

**Закон преломления света:** падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{v}{c} = n,$$

Постоянную величину  $n$  называют относительным показателем преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления. Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n = n_2 / n_1.$$

Законы отражения и преломления находят объяснение в волновой физике. Согласно волновым представлениям, преломление является следствием изменения скорости распространения волн при переходе из одной среды в другую. Физический смысл показателя преломления – это отношение скорости распространения волн в первой среде  $v_1$  к скорости их распространения во второй среде  $v_2$ :

$$n = v_1 / v_2$$

Абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света  $c$  в вакууме к скорости света  $v$  в среде:

$$n = c / v$$

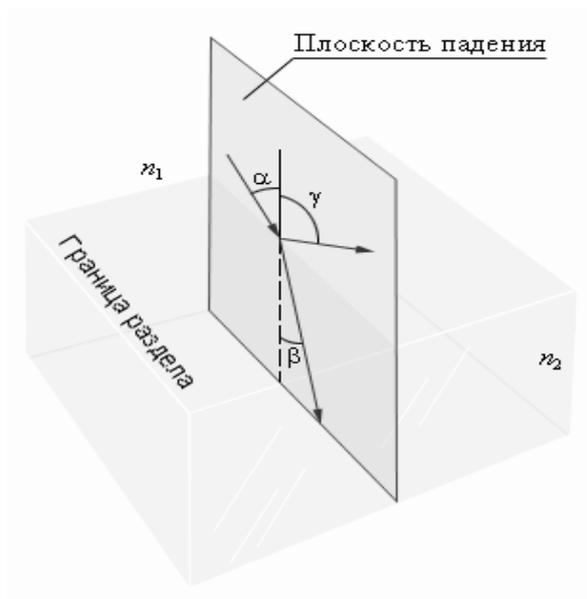


Рис 1.1 Законы отражения и преломления света

Законы отражения и преломления:  $\gamma = \alpha$ ;  $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$  рис. 1.1.

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления называют оптически менее плотной. При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную  $n_2 < n_1$  (например, из стекла в воздух) можно наблюдать явление полного отражения, то есть исчезновение преломленного луча. Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол  $\alpha_{\text{пр}}$ , который называется предельным углом полного внутреннего отражения угла падения  $\alpha = \alpha_{\text{пр}} \sin \beta = 1$  значение  $\sin \alpha_{\text{пр}} = n_2 / n_1 < 1$ .

## 1.2 Дифракция света.

**Дифракцией света** называется явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени. Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина – система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

Дифракционные явления были хорошо известны еще во времена Ньютона, но объяснить их на основе корпускулярной теории света оказалось невозможным. Первое качественное объяснение явления дифракции на основе волновых представлений было дано английским ученым Т. Юнгом. Независимо от него французский ученый О. Френель развил количественную теорию дифракционных явлений (1818 г.). В основу теории Френель положил принцип Гюйгенса, дополнив его идеей об интерференции вторичных волн. Принцип Гюйгенса в его первоначальном виде позволял находить только положения волновых фронтов в последующие моменты времени, т. е.

определять направление распространения волны. По существу, это был принцип геометрической оптики. Гипотезу Гюйгенса об огибающей вторичных волн Френель заменил физически ясным положением, согласно которому вторичные волны, приходя в точку наблюдения, интерферируют друг с другом.

### **Дифракция Фраунгофера.**

Рассмотрим экран с двумя щелями, на которые нормально падает плоская монохроматическая волна. Расчеты показывают, что интенсивность света за экраном будет зависеть от угла  $\theta$  между направлением распространения света и перпендикуляром к экрану :

$$I=2I_0[\text{Sin}(kb\theta/2)/ kb\theta/2]^2 [1+\cos(k\Delta+k d\theta)]$$

где  $I_0$  - интенсивность света в центре дифракционной картины, когда открыта только одна щель,  $b$  - ширина щели,  $d$  - расстояние между щелями,  $k=2\pi/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны света,  $\Delta$  - дополнительная разность хода между интерферирующими лучами (в случае наклонного падения плоской волны на экран или когда одна из щелей закрыта стеклянной пластинкой). Первый сомножитель в квадратных скобках описывает дифракцию Фраунгофера на одной щели, а второй сомножитель - интерференцию от двух точечных источников. Общая энергия, проходящая через одну щель, пропорциональна  $b$ , а ширина дифракционной картины пропорциональна  $1/b$ . Поэтому, интенсивность света  $I_0$  в центре дифракционной картины будет пропорциональна  $b^2$ . Если мы рассмотрим дифракцию на двух щелях, то в пределах первого дифракционного максимума мы можем наблюдать  $N$  интерференционных полос, где  $N=2d/b$ . Говоря о дифракции Фраунгофера, мы подразумеваем случай, когда наблюдение дифракционной картины производится на достаточно большом расстоянии от экрана с щелями. Количественный критерий дифракции Фраунгофера описывается следующей формулой:

$$z \gg d^2/\lambda$$

где  $z$  - расстояние от экрана с щелями до точки наблюдения. В непосредственной близости к щелям дифракционная картина будет описываться формулами Френеля.

### 1.3 Интерференция световых волн.

**Интерференция** – одно из ярких проявлений волновой природы света. Это интересное и красивое явление наблюдается при определенных условиях при наложении двух или нескольких световых пучков. Интенсивность света в области перекрытия пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей пучков.

При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых бабочек и жуков – все это проявление интерференции света.

Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону рис 1.2.. Он наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны. Интерференционная картина имела вид концентрических колец Ньютона

Исторически первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился опыт Юнга (1802 г.). В опыте Юнга свет от источника, в качестве которого служила узкая щель  $S$ , падал на экран с двумя близко расположенными щелями  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 1.3).

Проходя через каждую из щелей, световой пучок уширялся вследствие дифракции, поэтому на белом экране Э световые пучки, прошедшие через щели  $S_1$  и  $S_2$ , перекрывались. В области перекрытия световых пучков

наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

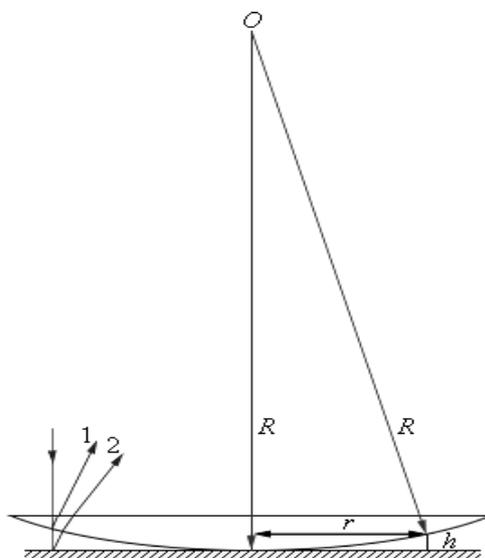


Рис. 1.2 Наблюдение колец Ньютона. Интерференция возникает при сложении волн, отразившихся от двух сторон воздушной прослойки. «Лучи» 1 и 2 – направления распространения волн;  $h$  – толщина воздушного зазора.

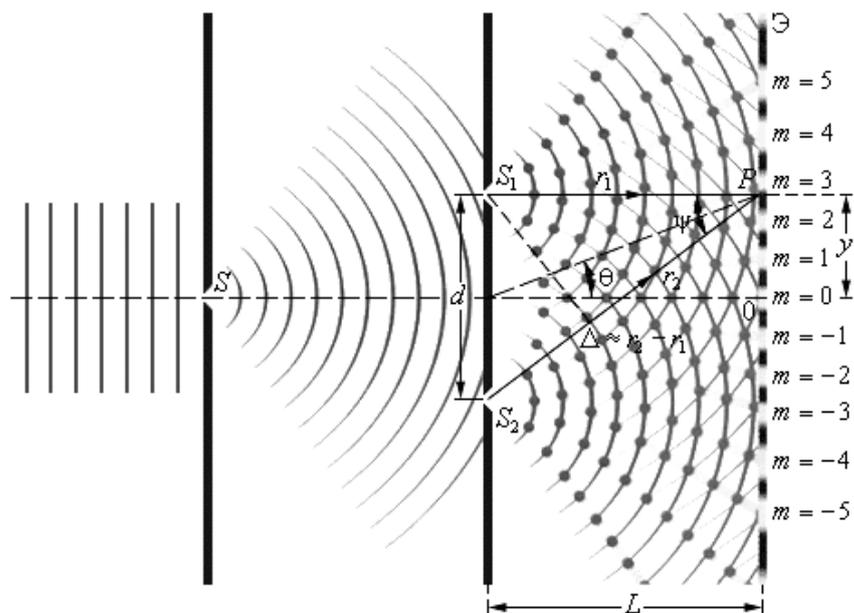


Рис. 1.3 Схема интерференционного опыта Юнга.

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели  $S_1$  и  $S_2$ , которые можно рассматривать в соответствии с принципом Гюйгенса как источники вторичных волн, освещались светом одного источника  $S$ . При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками  $S_1$  и  $S_2$ , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения  $P$  разные расстояния  $r_1$  и  $r_2$ . Следовательно, фазы колебаний, создаваемых волнами от источников  $S_1$  и  $S_2$  в точке  $P$ , вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название принципа суперпозиции.

**Монохроматическая волна**, распространяющаяся в направлении радиус-вектора  $r$ , записывается в виде

$$E = a \cos(\omega t - kr),$$

где  $a$  – амплитуда волны,  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота. В оптических задачах под  $E$  следует понимать модуль вектора напряженности электрического поля волны. При сложении двух волн в точке  $P$  результирующее колебание также происходит на частоте  $\omega$  и имеет некоторую амплитуду  $A$  и фазу  $\varphi$ :

$$E = a_1 \cdot \cos(\omega t - kr_1) + a_2 \cdot \cos(\omega t - kr_2) = A \cdot \cos(\omega t - \varphi).$$

Не существует приборов, которые способны были бы следить за быстрыми изменениями поля световой волны в оптическом диапазоне; наблюдаемой величиной является поток энергии, который прямо пропорционален квадрату амплитуды электрического поля волны. Физическую величину, равную квадрату амплитуды электрического поля волны, принято называть интенсивностью:  $I = A^2$ .

Несложные тригонометрические преобразования приводят к следующему выражению для интенсивности результирующего колебания в точке Р:

$$I = A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos k\Delta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos k\Delta, \quad (*)$$

Интерференционный максимум (светлая полоса) достигается в тех точках пространства, в которых  $\Delta = m\lambda$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). При этом  $I_{\max} = (a_1 + a_2)^2 > I_1 + I_2$ . Интерференционный минимум (темная полоса) достигается при  $\Delta = m\lambda + \lambda / 2$ . Минимальное значение интенсивности  $I_{\min} = (a_1 - a_2)^2 < I_1 + I_2$ .

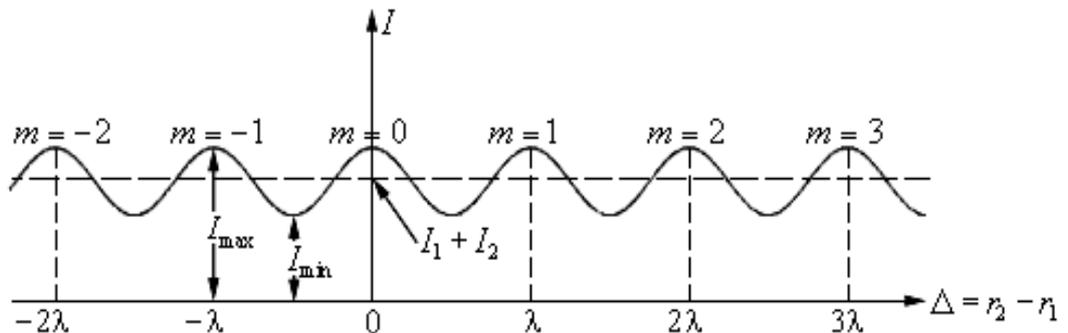


Рис 1.4 распределение интенсивности в интерференционной картине

На рисунке 1.4 показано распределение интенсивности в интерференционной картине. Целое число  $m$  — порядок интерференционного максимума.

В частности, если  $I_1 = I_2 = I_0$ , т. е. интенсивности обеих интерферирующих волн одинаковы, выражение (\*) приобретает вид:

$$I = 2I_0(1 + \cos k\Delta)$$

Следует подчеркнуть, что в волновой оптике, в отличие от геометрической оптики, понятие луча света утрачивает физический смысл. Термин «луч» употребляется здесь для краткости для обозначения направления распространения волны. В эксперименте Ньютона при нормальном падении волны на плоскую поверхность линзы разность хода

приблизительно равна удвоенной толщине  $2h$  воздушного промежутка между линзой и плоскостью. Для случая, когда радиус кривизны  $R$  линзы велик по сравнению с  $h$ , можно приближенно получить:

$$h = r^2/2R$$

где  $r$  – смещение от оси симметрии. При написании выражения для разности хода следует также учесть, что волны 1 и 2 отражаются при разных условиях. Первая волна отражается от границы стекло–воздух, а вторая – от границы воздух–стекло. Во втором случае происходит изменение фазы колебаний отраженной волны на  $\pi$ , что эквивалентно увеличению разности хода на  $\lambda / 2$ . Поэтому

$$\Delta = 2h + \lambda/2 = r^2/R + \lambda/2$$

При  $r = 0$ , то есть в центре (точка соприкосновения)  $\Delta = \lambda / 2$ ; поэтому в центре колец Ньютона всегда наблюдается интерференционный минимум – темное пятно. Радиусы  $r_m$  последующих темных колец определяются выражением

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}$$

Эта формула позволяет экспериментально определить длину волны света  $\lambda$ , если известен радиус кривизны  $R$  линзы.

Проблема когерентности волн. Теория Юнга позволила объяснить интерференционные явления, возникающие при сложении двух монохроматических волн одной и той же частоты. Однако повседневный опыт учит, что интерференцию света в действительности наблюдать не просто. Если в комнате горят две одинаковые лампочки, то в любой точке складываются интенсивности света и никакой интерференции не наблюдается. Возникает вопрос, в каких случаях нужно складывать напряженности (с учетом фазовых соотношений), и в каких случаях нужно складывать интенсивности волн, т. е. квадраты напряженностей полей? Теория интерференции монохроматических волн не может дать ответа на этот вопрос.

Реальные световые волны не являются строго монохроматическими. В силу фундаментальных физических причин излучение всегда имеет статистический характер. Атомы светового источника излучают независимо друг от друга в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится очень короткое время ( $\tau \leq 10^{-8}$  с). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка  $\tau$  вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и, что особенно важно, другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка  $\tau$ . Отдельные «обрывки» излучения длительности  $\tau$  называются цугами. Цуги имеют пространственную длину, равную  $c\tau$ , где  $c$  – скорость света. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно меняющейся фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени  $\tau$ , в течении которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют временем когерентности.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, т. е. колебаний, относящихся к одному и тому же цугу. Хотя фазы каждого из этих колебаний также подвержены случайным изменениям во времени, но эти изменения одинаковы, поэтому разность фаз когерентных колебаний остается постоянной. В этом случае наблюдается устойчивая интерференционная картина и, следовательно, выполняется принцип суперпозиции полей. При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Интерференционные полосы испытывают беспорядочные перемещения из стороны в сторону, и за время  $\Delta t$  их регистрации, которая в оптических экспериментах значительно больше времени когерентности ( $\Delta t \gg \tau$ ), происходит полное усреднение. Регистрирующее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент)

зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей  $I_1 + I_2$  обоих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны, создающие в точке наблюдения когерентные колебания, также называются когерентными. Волны от двух независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции. Т. Юнг интуитивно угадал, что для получения интерференции света нужно волну от источника разделить на две когерентные волны и затем наблюдать на экране результат их сложения. Так делается во всех интерференционных схемах. Однако, даже в этом случае интерференционная картина исчезает, если разность хода  $\Delta$  превысит длину когерентности  $l_c$ .

#### 1.4 Поляризация света.

В начале XIX века, когда Т. Юнг и О. Френель развивали волновую теорию света, природа световых волн была неизвестна. На первом этапе предполагалось, что свет представляет собой продольные волны, распространяющиеся в некоторой гипотетической среде – эфире. При изучении явлений интерференции и дифракции вопрос о том, являются ли световые волны продольными или поперечными, имел второстепенное значение. В то время казалось невероятным, что свет – это поперечные волны, так как по аналогии с механическими волнами пришлось бы предполагать, что эфир – это твердое тело (поперечные механические волны не могут распространяться в газообразной или жидкой среде).

Однако, постепенно накапливались экспериментальные факты, свидетельствующие в пользу поперечности световых волн. Еще в конце XVII века было обнаружено, что кристалл исландского шпата ( $\text{CaCO}_3$ ) раздваивает проходящие через него лучи. Это явление получило название двойного лучепреломления рис. 1.5.

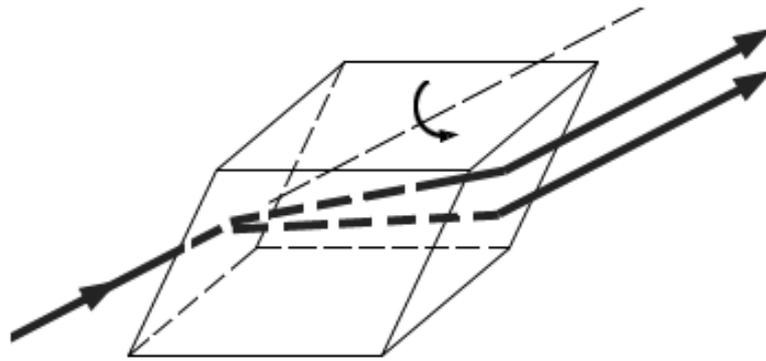


Рис. 1.5 Двойное лучепреломление

Прохождение света через кристалл исландского шпата (двойное лучепреломление). Если кристалл поворачивать относительно направления первоначального луча, что поворачиваются оба луча, прошедшие через кристалл.

В 1809 году французский инженер Э. Малюс открыл закон, названный его именем рис. 1.6. В опытах Малюса свет последовательно пропусклся через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки могли поворачиваться друг относительно друга на угол  $\varphi$ .

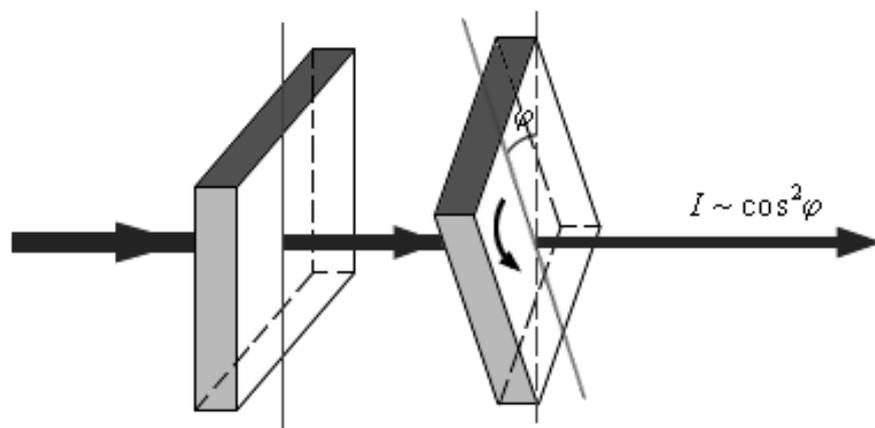


Рис. 1.6 Закон Малюса

Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной  $\cos^2 \varphi$ :

$$I \sim \cos^2 \varphi.$$

Ни двойное лучепреломление, ни закон Малюса не могут найти объяснение в рамках теории продольных волн. Для продольных волн направление распространения луча является осью симметрии. В продольной волне все направления в плоскости, перпендикулярной лучу, равноправны. В поперечной волне (например, в волне, бегущей по резиновому жгуту) направление колебаний и перпендикулярное ему направление не равноправны.

Таким образом, асимметрия относительно луча является решающим признаком, который отличает поперечную волну от продольной. Впервые догадку о поперечности световых волн высказал Т. Юнг (1816 г.). Френель, независимо от Юнга, также выдвинул концепцию поперечности световых волн, обосновал ее многочисленными экспериментами и создал теорию двойного лучепреломления света в кристаллах.

В середине 60-х годов XIX века Максвелл сделал вывод о том, что свет – это электромагнитные волны. Этот вывод был сделан на основе совпадения известного значения скорости света со скоростью распространения предсказанных Максвеллом электромагнитных волн. К тому времени, когда Максвелл сделал вывод о существовании электромагнитных волн, поперечность световых волн уже была доказано экспериментально. Поэтому Максвелл справедливо полагал, что поперечность электромагнитных волн является еще одним важнейшим доказательством электромагнитной природы света.

В электромагнитной теории света исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения особой среды распространения волн – эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело.

В электромагнитной волне вектора  $E$  и  $B$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор  $E$  поэтому его называют световым вектором. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют линейно-поляризованной или плоско-поляризованной (термин поляризация волн был введен Малюсом применительно к поперечным механическим волнам). Плоскость, в которой колеблется световой вектор  $E$  называется плоскостью колебаний (плоскость  $yz$ ), а плоскость, в которой совершает колебание магнитный вектор  $B$  – плоскостью поляризации (плоскость  $xz$ ).

Если вдоль одного и того же направления распространяются две монохроматические волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то в результате их сложения в общем случае возникает эллиптически-поляризованная волна рис. 1.7.

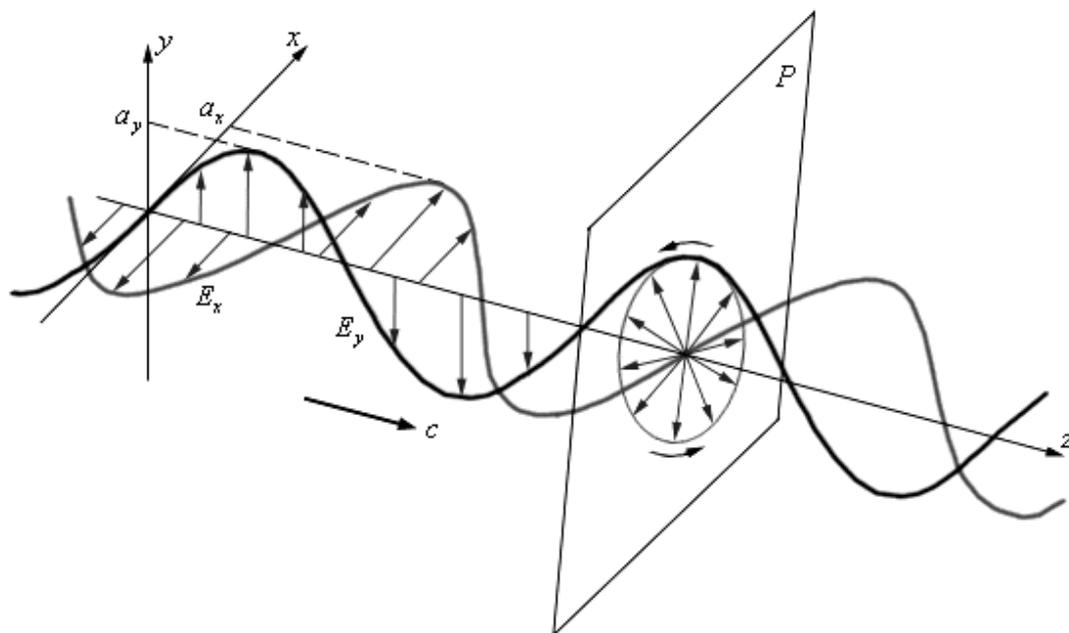


Рис. 1.7 Сложение двух взаимно перпендикулярно поляризованных волн и образование эллиптически поляризованной волны

В эллиптически-поляризованной волне в любой плоскости Р, перпендикулярной направлению распространения волны, конец результирующего вектора  $E$  за один период светового колебания обегает эллипс, который называется эллипсом поляризации рис.1.8. Форма и размер эллипса поляризации определяются амплитудами  $a_x$  и  $a_y$  линейно-поляризованных волн и фазовым сдвигом  $\Delta\phi$  между ними. Частным случаем эллиптически-поляризованной волны является волна с круговой поляризацией ( $a_x = a_y, \Delta\phi = \pm \pi / 2$ ).

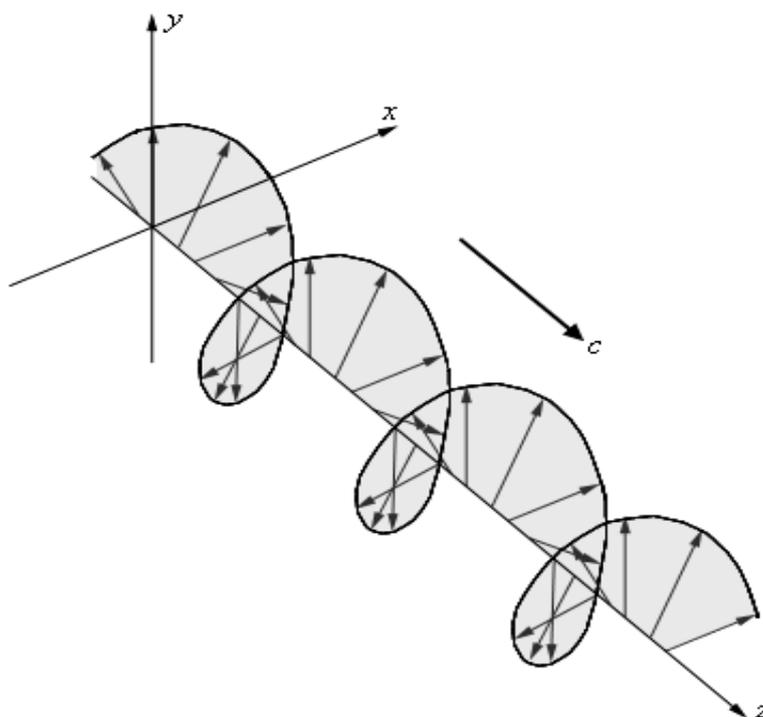


Рис. 1.8 Электрическое поле в эллиптически-поляризованной волне

Линейно-поляризованный свет испускается лазерными источниками. Свет может оказаться поляризованным при отражении или рассеянии. В частности, голубой свет от неба частично или полностью поляризован. Однако, свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.), неполяризован. Свет таких источников состоит в каждый момент из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора в излучаемых этими атомами волнах. Поэтому в результирующей волне

вектор  $E$  беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными. Неполяризованный свет называют также естественным светом.

В каждый момент времени вектор  $E$  может быть спроектирован на две взаимно перпендикулярные оси рис.1.9.

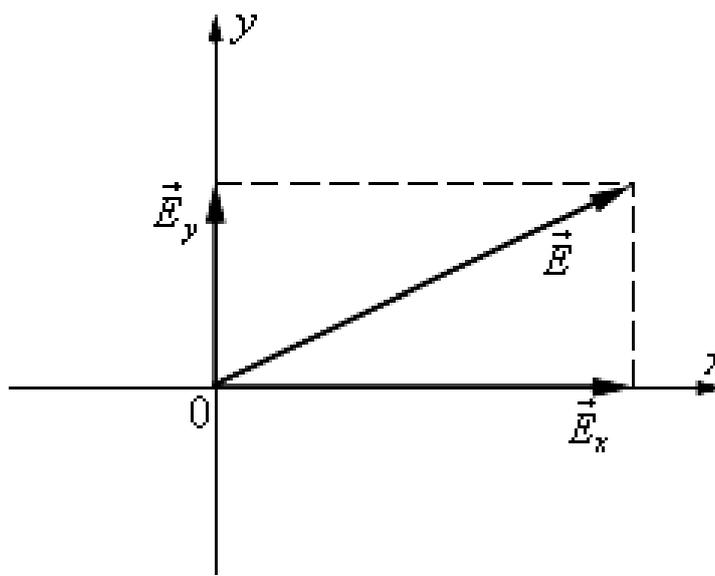


Рис. 1.9 Разложение вектора  $E$  по осям.

Это означает, что любую волну (поляризованную и неполяризованную) можно представить как суперпозицию двух линейно-поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях волн:

$$E(t) = E_x(t) + E_y(t)$$

Но в поляризованной волне обе составляющие  $E_x(t)$  и  $E_y(t)$  когерентны, а в неполяризованной – некогерентны, т. е. в первом случае разность фаз между  $E_x(t)$  и  $E_y(t)$  постоянна, а во втором она является случайной функцией времени.

Явление двойного лучепреломления света объясняется тем, что во многих кристаллических веществах показатели преломления для двух взаимно перпендикулярно поляризованных волн различны. Поэтому кристалл раздваивает проходящие через него лучи. Два луча на выходе

кристалла линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. Кристаллы, в которых происходит двойное лучепреломление, называются анизотропными.

У многих кристаллов поглощение света сильно зависит от направления электрического вектора в световой волне. Это явление называют дихроизмом. Этим свойством, в частности, обладают пластины турмалина, использованные в опытах Малюса. При определенной толщине пластинка турмалина почти полностью поглощает одну из взаимно перпендикулярно поляризованных волн (например,  $E_x$ ) и частично пропускает вторую волну ( $E_y$ ). Направление колебаний электрического вектора в прошедшей волне называется разрешенным направлением пластинки. Пластинка турмалина может быть использована как для получения поляризованного света, так и для анализа характера поляризации света (поляризатор и анализатор). В настоящее время широко применяются искусственные дихроичные пленки, которые называются поляроидами. Поляроиды почти полностью пропускают волну разрешенной поляризации и не пропускают волну, поляризованную в перпендикулярном направлении. Таким образом, поляроиды можно считать идеальными поляризационными фильтрами.

Рассматривая прохождение естественного света последовательно через два идеальных поляроида, разрешенные направления которых развернуты на некоторый угол  $\varphi$ . Первый поляроид играет роль поляризатора. Он превращает естественный свет в линейно-поляризованный. Вторым поляроидом служит для анализа падающего на него света. Если обозначить амплитуду линейно-поляризованной волны после прохождения света через первый поляроид через  $E_0 = \sqrt{I_0}/2$  то волна, пропущенная вторым поляроидом, будет иметь амплитуду  $E = E_0 \cos \varphi$ . Следовательно, интенсивность  $I$  линейно-поляризованной волны на выходе второго поляроида будет равна

$$I = E^2 = E_0^2 \cos^2 \varphi = 1/2 I_0 \cos^2 \varphi$$

Таким образом, в электромагнитной теории света закон Малюса находит естественное объяснение на основе разложения вектора  $E$  на составляющие.

## 1.5 Фотоэлектрический эффект

Открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А. Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (Д. Томсон, 1897 г.), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света рис. 1.10.

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение  $U$ , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод  $K$ ) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ , и при неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения рис. 1.11.

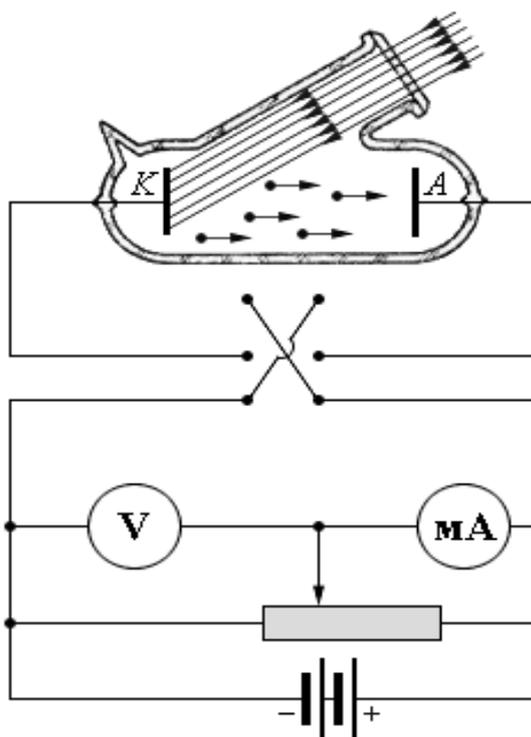


Рис. 1.10 Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта.

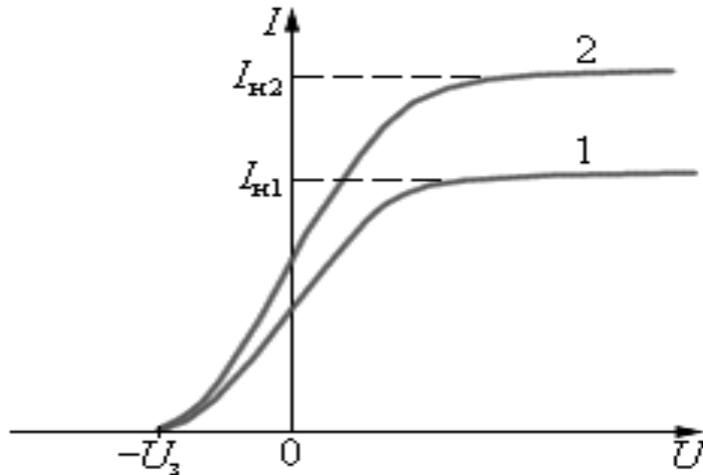


Рис. 1.11 Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $I_{н1}$  и  $I_{н2}$  – токи насыщения,  $U_z$  – запирающий потенциал.

Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде А фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Тщательные измерения показали, что ток насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света. Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU|$ . Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_z$ , фототок прекращается. Измеряя  $U_z$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$(mv^2/2)_{\max} = eU_z$$

Величина  $U_z$  не зависит от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  света рис. 1.12.

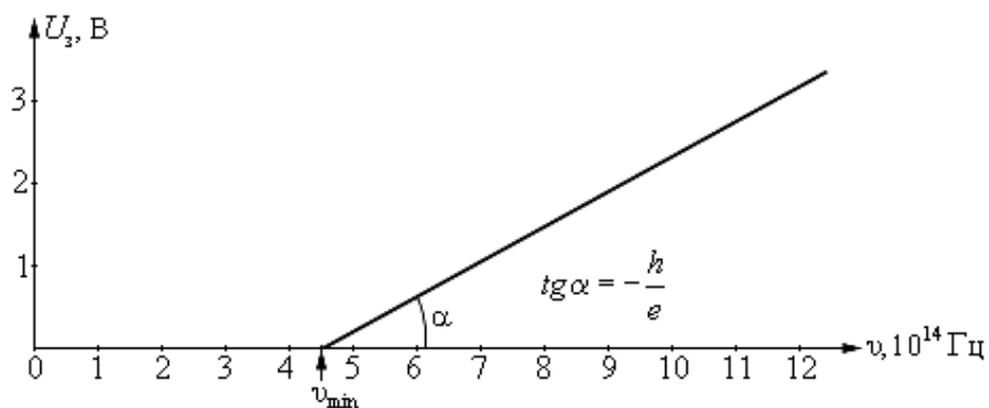


Рис. 1.12 Зависимость запирающего потенциала  $U_s$  от частоты  $\nu$  падающего света.

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.
2. Для каждого вещества существует так называемая красная граница фотоэффекта, т. е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.
3. Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.
4. Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света  $\nu > \nu_{\min}$ .

Все эти закономерности фотоэффекта в корне противоречили представлениям классической физики о взаимодействии света с веществом. Согласно волновым представлениям электрон при взаимодействии с электромагнитной световой волной должен был бы постепенно накапливать энергию, и потребовалось бы значительное время, зависящее от интенсивности света, чтобы электрон накопил достаточно энергии для того, чтобы вылететь из катода. Как показывают расчеты, это время должно было

бы исчисляться минутами или часами. Однако, опыт показывает, что фотоэлектроны появляются немедленно после начала освещения катода

Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано Эйнштейном на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой  $E = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка. Эйнштейн сделал следующий шаг в развитии квантовых представлений. Он пришел к выводу, что и свет имеет прерывистую дискретную структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию  $h\nu$  одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл–вакуум. Для этого электрон должен совершить работу выхода  $A$ , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии. Эту формулу принято называть уравнением Эйнштейна для фотоэффекта:

$$(mv^2/2)_{\max} = eU_3 = h\nu - A$$

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость от интенсивности света, существование красной границы, безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность. Из этого следует, что ток насыщения должен быть прямо пропорционален интенсивности светового потока. Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$ , равен отношению постоянной Планка  $h$  к заряду электрона  $e$ :

$$tga = h/e$$

Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены Р. Милликенем (1914 г.) и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком. Эти измерения позволили также определить работу выхода  $A$ :

$$A = hv_{\min} = hc/\lambda_{\text{кр}}$$

где  $c$  – скорость света,  $\lambda_{\text{кр}}$  – длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта. У большинства металлов работа выхода  $A$  составляет несколько электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). В квантовой физике часто используется электрон-вольт в качестве энергетической единицы измерения. Значение постоянной Планка, выраженное в электрон-вольтах в секунду, равно:

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}.$$

Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы. Например, у натрия  $A = 1,9 \text{ эВ}$ , что соответствует красной границе фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} \approx 680 \text{ нм}$ . Поэтому соединения щелочных металлов используют для создания катодов в фотоэлементах, предназначенных для регистрации видимого света.

Итак, законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов. Энергия фотонов равна:

$$E = hv$$

Фотон движется в вакууме со скоростью  $c$ . Фотон не имеет массы,  $m = 0$ . Из общего соотношения специальной теории относительности, связывающего энергию, импульс и массу любой частицы,

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2,$$

следует, что фотон обладает импульсом

$$p = E/c = hv/c$$

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах – корпускулах. Но это не был механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом – корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название корпускулярно-волнового дуализма.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Основные параметры и характеристики солнечных элементов

В простейшем случае солнечный элемент содержит единственный р-п-переход, расположенный на небольшой глубине от освещаемой поверхности полупроводника (до 2 мкм). В пластине создаются области с р- и п-типами проводимости путем введения в полупроводник соответствующих примесей. Получив р-п-переход, изготавливаются нижний и верхний электроконтакты, причем нижний контакт – сплошной, а верхний выполняется в виде гребенчатой структуры, тонкие полосы, соединенные более широкой шиной. Контакт р- и п-полупроводников приводит к образованию между ними контактного электрического поля, играющего важную роль в работе солнечного фотоэлемента.

Поглощение света с энергией квантов  $h\nu$  больше ширины запрещенной зоны материала  $E_g$  приводит (за счет внутреннего вентильного фотоэффекта) к возникновению свободных электронов и дырок как в р- и п-областях перехода, так и в непосредственно примыкающей к границе их раздела области пространственного заряда (ОПЗ). Существующее в ОПЗ электрическое поле разделяет созданные светом свободные носители заряда в зависимости от их знака: свободные электроны выбрасываются в п-область перехода, а дырки – в р-область. В однородном полупроводнике фотовозбуждение увеличивает только энергию электронов и дырок, не разделяя их в пространстве, то есть электроны и дырки разделяются в «пространстве энергий», но остаются рядом в геометрическом пространстве. Для разделения носителей тока и появления фотоэлектродвижущей силы должна существовать дополнительная сила. Наиболее эффективное разделение неравновесных носителей имеет место именно в области р-п-перехода. Генерированные вблизи р-п-перехода «неосновные» носители (дырки в п-полупроводнике и электроны в р-полупроводнике) диффундируют к р-п-переходу, подхватываются полем р-п-перехода и

выбрасываются в полупроводник, в котором они становятся основными носителями: электроны будут локализоваться в полупроводнике n-типа, а дырки – в полупроводнике p-типа. В результате полупроводник p-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник n-типа – отрицательный. Между n- и p-областями фотоэлемента возникает разность потенциалов – фотоЭДС, или напряжение в режиме холостого хода. Полярность фотоЭДС соответствует «прямому» смещению p-n-перехода, которое понижает высоту потенциального барьера и способствует инжекции дырок из p-области в n-область и электронов из n-области в p-область. В результате действия этих двух противоположных механизмов – накопления носителей тока под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера – при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС в широком диапазоне освещенностей растет пропорционально логарифму интенсивности света.

При коротком замыкании (когда фотоэлемент подключен во внешнюю электрическую цепь) освещенного p-n-перехода во внешней электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар. Электроны из n-слоя, совершив работу на нагрузке, будут возвращаться в p-слой и там рекомбинировать (объединяться) с дырками, движущимися внутри солнечного элемента в противоположном направлении. При включении в электрическую цепь полезной нагрузки, величина тока в цепи несколько уменьшится. Обычно электрическое сопротивление полезной нагрузки в цепи солнечного элемента выбирают таким, чтобы получить максимальную отдаваемую этой нагрузке электрическую мощность. Для сбора и отвода электронов во внешнюю цепь на поверхности полупроводниковой структуры солнечного элемента, как было отмечено, имеется контактная система. На передней, освещенной поверхности преобразователя, контакты выполняются в виде сетки или гребенки, а на тыльной могут быть сплошными.

Таким образом, во время освещения солнечного элемента происходит преобразование энергии квантов света в энергию движущихся по внешней цепи электрических зарядов. Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик полупроводниковой структуры, а также оптических свойств солнечного элемента, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость, обусловленная явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  - напряжение между p- и n- областями прибора, отсоединенного от внешней электрической цепи. Значения напряжения холостого хода в основном определяются электрофизическими параметрами и степенью легирования материала, на основе которого изготовлен солнечный элемент.

Ток короткого замыкания  $I_{кз}$  - ток, определяемый при коротком замыкании между металлизированными контактами к p- и n- областям фотоэлектрического преобразователя. Естественно, что величина  $I_{кз}$  зависит не только от электрофизических параметров прибора, но и от его площади, поэтому часто вместо  $I_{кз}$  используют другую характеристику – плотность тока короткого замыкания  $J_{кз}$ , которая равна частному от деления  $I_{кз}$  на площадь освещаемой поверхности прибора. Типичные значения этого параметра для используемых на практике фотоэлектрических преобразователей находится в пределах от единиц до нескольких десятков миллиампер на квадратный сантиметр освещаемой площади прибора.

На рис. 2.1 показана типичная световая вольт-амперная характеристика кремниевого солнечного элемента, измеренная при условиях освещения АМ0 (1, сплошная линия) и темновая (измеренная в отсутствии освещения) вольт-амперная характеристика этого же прибора (2, пунктирная линия). Здесь символами  $U_n$  и  $J_n$  обозначены значения напряжения и плотности тока в нагрузочной цепи при режиме работы солнечного элемента, соответствующему максимальной выделяемой мощности на сопротивлении нагрузки: максимальной площади прямоугольника с противолежащими

вершинами в начале координат и на принадлежащем первому квадранту участка световой вольт-амперной характеристики солнечного элемента.

Поскольку в простейшем варианте солнечный элемент представляет собой полупроводниковый диод, то его световая вольт-амперная характеристика определяется соотношением, полученным модификацией соответствующего соотношения для неосвещаемого р-п-перехода:

$$I_n = I_L - I_{S0} \cdot \left[ \exp \left[ e \cdot \frac{(U + I_n \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \right],$$

где  $R_S$  – последовательное сопротивление солнечного элемента,  $A$  – коэффициент, получаемый из сравнения теоретической и экспериментальной вольт-амперных характеристик (обычно принимает значения от 1 до 5),  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура прибора,  $R_p$  – шунтирующее сопротивление солнечного элемента.

Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики  $FF$  – коэффициент, определяемый отношением площади под световой вольт-амперной характеристикой прибора в первом квадранте системы координат на рис. 1.2 к площади прямоугольника со сторонами  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$ :

$$FF = U_m \cdot I_m / U_{xx} \cdot I_{кз}$$

У современных солнечных элементов на основе кристаллического кремния величина параметра  $FF$  обычно находится в пределах 0,75 – 0,8.

Для солнечных элементов, используемых как источники электроэнергии, наиболее важное значение имеет такой параметр как коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$ , значение которого определяет эффективность преобразования световой энергии в электрическую. Коэффициент полезного действия (КПД) – отношение мощности, выделяемой солнечным элементом на нагрузке, к падающему световому потоку:

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{\Phi_{пад}} = \frac{FF \cdot U_{xx} \cdot I_{кз}}{\Phi_{пад}}$$



нагрузки, освещенностью и температурой). Существенную роль играют световые потери, определяемые в первую очередь коэффициентом отражения. Отраженная часть световой энергии не участвует в процессе преобразования. К световым потерям относят также ту часть фотонов, которая при поглощении не создает пар носителей электрических зарядов (поглощение решеткой, свободными носителями зарядов, экситонное поглощение и др.). Процесс преобразования сопровождается также энергетическими потерями.

К их числу относятся процессы рекомбинации, образования пар зарядов на расстоянии от запирающего слоя, превышающем длину диффузии, потери в сопротивлении перехода, объема полупроводника и др.

Коэффициент полезного действия солнечного элемента увеличивается с ростом светового потока  $\xi$  и фотоэлектро-движущей силы. Однако при больших значениях  $\xi$  с ростом концентрации свободных носителей возрастает вероятность их рекомбинации, а также снижается коэффициент собирания  $\eta_Q$ . Кроме того, в результате разогрева прибора при больших  $\xi$  увеличивается ток насыщения, что также служит причиной снижения КПД

Рост фото-ЭДС и напряжения ограничен высотой  $\phi_k$  потенциального барьера перехода. Увеличения напряжения можно достигнуть при использовании полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной и высокой степенью легирования.

Введенные выше параметры вольт-амперной характеристики солнечного элемента позволяют построить эквивалентную схему солнечного элемента (рис. 2.2). Появление в эквивалентной схеме шунтирующего сопротивления обусловлено наличием различного рода токов утечки в приборе, а последовательное сопротивление учитывает наличие контактных сопротивлений между полупроводниковым материалом и металлизированными внешними контактами прибора, сопротивление р- и n-областей солнечного элемента.

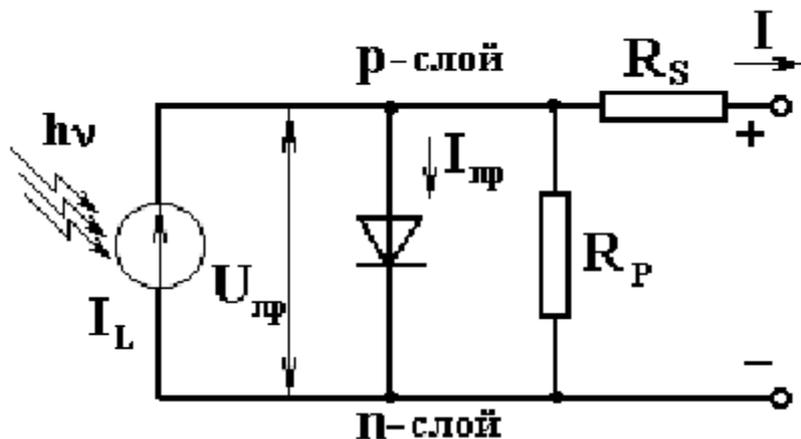


Рис. 2.2. Эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии. На схеме обозначено направление протекания прямого тока  $I_{пр}$  через р-п-переход (диод) и прямое напряжение на нем  $U_{пр}$

## 2.2 Преобразование оптического излучения в солнечных элементах

Оптическое излучение различных длин волн проникает на разную глубину (поскольку эта величина существенно зависит от энергии квантов) и создает свое пространственное распределение рожденных светом пар электрон—дырка. Дальнейшая судьба рожденных пар зависит от их диффузионной длины в данном полупроводниковом материале. Если она достаточно велика, то созданные светом избыточные неосновные носители заряда успеют (даже без участия тянущего электрического поля) только за счет процесса диффузии дойти до области р—п-перехода и будут разделены его полем.

Решающую роль в эффективности этой стадии преобразования оптического излучения внутри полупроводника играет соотношение между диффузионной длиной  $L$  и расстоянием от р-п-перехода  $l$ , на котором создаются светом пары электрон — дырка.

Рассмотрим два крайних случая расположения р-п-перехода в полупроводниковом кристалле по отношению к направлению падения оптического излучения: перпендикулярно (рис. 2.3, а) и параллельно (рис. 2.3, б). Условимся, что в первом случае свет проникает на всю глубину

кристалла и  $l$  равно толщине полупроводниковой пластины, а во втором — освещается вся поверхность пластинки шириной  $d$ .

Эффективность собирания носителей заряда (т.е. коэффициент разделения носителей потенциальным барьером р-п-перехода, показывающий, какая часть из общего числа пар, созданных оптическим излучением, участвует в формировании тока короткого замыкания солнечного элемента при подключении внешнего регистрирующего прибора) для перпендикулярного и параллельного расположения р—п-перехода определяется соответственно соотношениями

$$\gamma = (L_n + L_p)/l; \quad \gamma = (L_n + L_p)/d,$$

где  $d$  — ширина освещаемой пластинки.

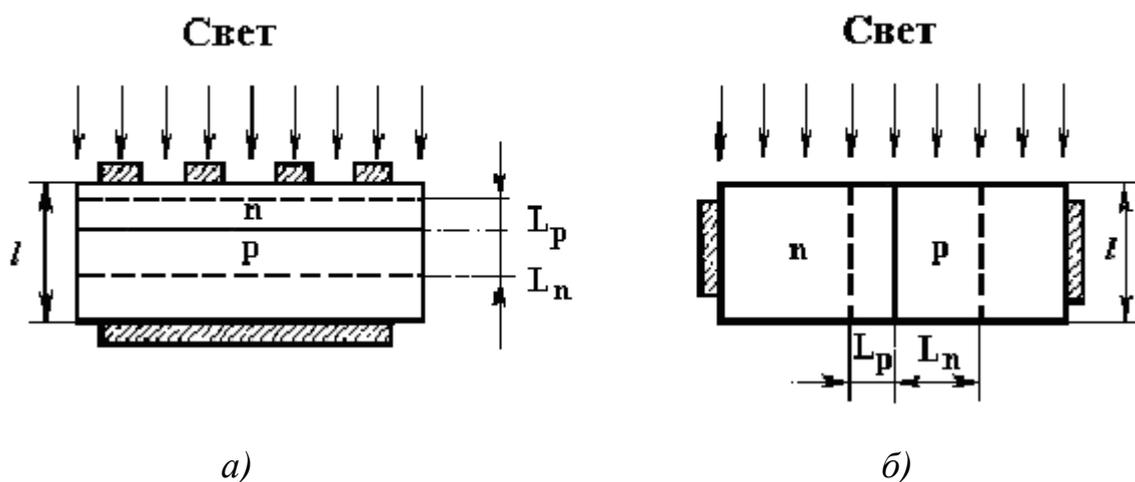


Рис. 2.3. Схема расположения р-п-перехода в полупроводниковом кристалле при перпендикулярном (а) и параллельном (б) плоскости р-п-перехода падении оптического излучения  $L_n$ ,  $L_p$  — диффузионная длина неосновных носителей заряда в р- и п-областях соответственно;  $l$  — глубина проникновения света в полупроводник; заштрихованы контактные металлические слои к р- и п-областям полупроводника

На первый взгляд параллельное расположение кажется более предпочтительным, ибо для полного собирания и разделения носителей наиболее существенным является распределение пар носителей в

направлении, перпендикулярном р-п-переходу: равномерная генерация носителей по глубине кристалла создает благоприятные условия для их диффузии к р-п-переходу и последующего пространственного разделения.

Разработанные на основе такого расположения р-п-перехода по отношению к свету многопереходные матричные солнечные элементы, состоящие из большого числа микроэлементов, плоскости которых параллельны по отношению к падающему солнечному излучению (или расположены под небольшим углом к нему), действительно обладают высокой эффективностью собирания носителей в длинноволновой области спектра и позволяют получить значительную фото-ЭДС с единицы освещаемой поверхности.

Однако расчетным и экспериментальным путем было установлено, что из-за весьма небольших размеров микроэлементов рекомбинация созданных светом пар на освещаемой поверхности играет при параллельном расположении р-п-перехода относительно падающего излучения значительно большую роль, чем при перпендикулярном. Вследствие этого для увеличения эффективности собирания в коротковолновой области спектра необходимо создать на обращенной к свету поверхности дополнительный слой, легированный примесью противоположного типа проводимости, т. е. использовать частично структуру с перпендикулярным расположением р-п-перехода.

Если при параллельном расположении концентрация созданных светом пар  $M$  убывает от поверхности в глубь полупроводника как в п-, так и в р-области, то при перпендикулярном расположении это характерно лишь для обращенной к свету области кристалла, например, п-области, в то время как в р-области наибольшее количество пар образуется у р-п-перехода. Концентрация пар на глубине  $l$  подчиняется соотношению, полученному в результате дифференцирования выражения, определяющего убывание энергии волны в  $e$  раз при поглощении света полупроводником:

$$M = n_{\phi} \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha l),$$

где  $n_{\phi}$  — число квантов, падающих на единицу поверхности полупроводника.

Результаты таких расчетов для кремния, выполненных при нескольких значениях длины волны, показаны на рис. 2.4. Вертикальные линии, ограничивающие области, определяемые диффузионной длиной носителей заряда в материале n- и p-типа, позволяют наглядно оценить процесс собирания носителей заряда при перпендикулярном расположении p-n-перехода относительно падающего излучения (см. рис. 2.3, а).

Ординаты построенных кривых пропорциональны  $\alpha \cdot \exp(-\alpha l)$ , абсциссы — расстоянию в глубь полупроводника от освещаемой поверхности, площадь между осями и каждой из кривых — потоку падающих квантов, а площадь, ограниченная кривой и ординатами, соответствующими  $l = x_j + L_n$  и  $l = x_j - L_p$  (заштрихованная часть), — току короткого замыкания кремниевой пластины с p — n-переходом.

Таким образом, отношение заштрихованной площади к общей площади под кривой дает возможность в соответствии с соотношением для квантового выхода внутреннего фотоэффекта определить эффективность собирания  $\gamma$  (при условии, конечно, что квантовый выход фотоионизации  $\beta=1$ ).

Планарная конструкция солнечных элементов, изображенная на рис. 2.3, а, стала основной и получила наибольшее распространение. Такие солнечные элементы были созданы из самых разнообразных материалов, причем направления оптимизации этой конструкции можно легко определить, анализируя результаты расчетов, аналогичные выполненным для кремния и представленным в графической форме на рис. 2.4. В целом развитие высокоэффективных кремниевых СЭ на основе p-n- перехода в гомогенном материале в основном происходит путем снижения глубины залегания p-n-перехода, применением многослойных просветляющих покрытий, тянущих полей, изотипного перехода и текстуированием поверхности элементов.

Очевидно, что для повышения  $\gamma$  и  $I_{к.з.}$  необходимо увеличивать диффузионную длину неосновных носителей заряда по обе стороны р-п-перехода, что может быть достигнуто выбором соответствующих исходных материалов и сохранением высоких значений  $L$  в процессе изготовления р-п-переходов.

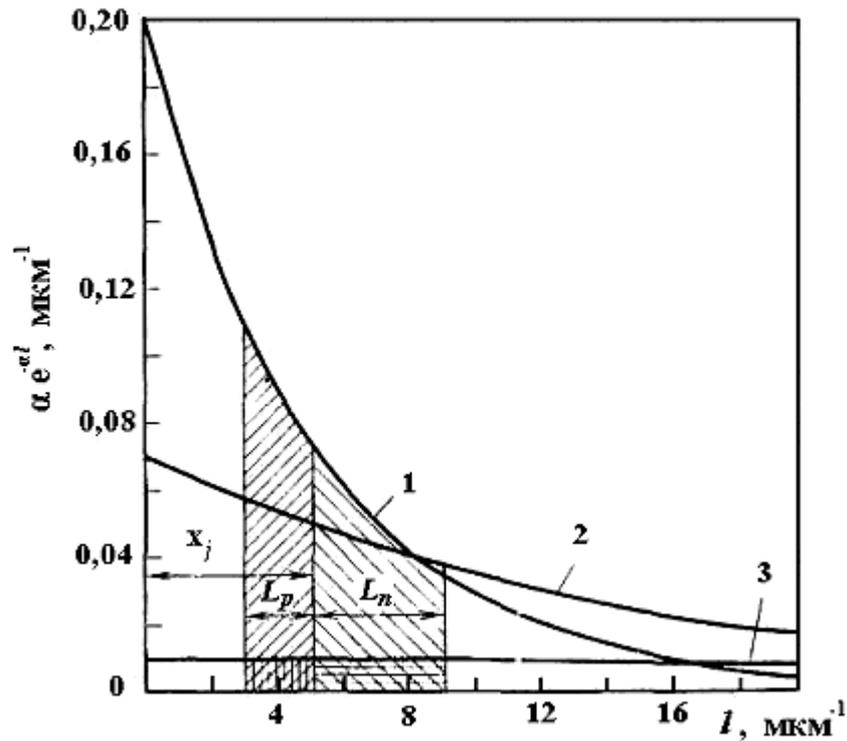


Рис. 2.4. Распределение числа созданных оптическим излучением пар электрон—дырка по глубине кремния при падении излучения разной длины волны перпендикулярно плоскости р-п-перехода:

1 -  $\lambda = 0,619$  мкм,  $\alpha = 2000$  см<sup>-1</sup>; 2 —  $\lambda = 0,81$  мкм;  $\alpha = 700$  см<sup>-1</sup>; 3— $\lambda = 0,92$  мкм;  $\alpha = 90$  см<sup>-1</sup>

При невозможности увеличить  $L$  в области полупроводника, примыкающей к освещаемой поверхности, необходимо приблизить р-п-переход к освещаемой поверхности, чтобы удовлетворялось соотношение  $L_p > x_j$ , где  $x_j$  — глубина р-п-перехода, и все созданные светом носители заряда могли быть собраны и разделены полем р — п-перехода. Подобное же условие следует выполнять и для базовой области солнечного элемента (расположенной за р-п-переходом). Толщина солнечного элемента, определяемая в основном

базовой областью, не должна быть меньше глубины проникновения в полупроводник излучения длинноволновой части фотоактивной области спектра (энергия квантов  $h\nu > E_g$ ), а диффузионная длина неосновных носителей заряда в базовой области должна соответствовать толщине элемента и глубине проникновения света.

### 2.3 Анализ потерь в солнечных элементах

Анализ потерь энергии очень важен при оптимизации солнечных элементов. Оценив перспективы снижения потерь энергии каждого вида, оптимизацию приборов можно проводить, устраняя потери какого-либо одного вида. Такой способ анализа, аналогичный выполненному Вольфом, иллюстрирует рис. 2.5.

Потери энергии можно охарактеризовать по следующим видам: термализация горячих носителей заряда с энергией вблизи края соответствующей зоны,  $h\nu > E_g$  (передача энергии решетке, перевод в тепловую части энергии фотонов, большей, чем ширина запрещенной зоны); прохождение через элемент фотонов низких энергий, не сопровождающееся генерацией электронно-дырочных пар,  $h\nu < E_g$ ; неполное собиране фотогенерированных носителей заряда,  $\eta_Q$ ; рекомбинационные потери носителей заряда в переходе, определяемые диодными параметрами  $qU_{xx} < E_g$ ; потери мощности в диоде при прямом напряжении смещения; омические ( $I^2R$ ) потери мощности на последовательном и шунтирующем сопротивлениях (обычно учитываемые в FF),  $R_s$ ,  $R_p$ ; потери на отражение — отражение света от фотоприемных поверхностей; доля полезной фотоактивной площади элемента — затенение поверхности контактной сеткой; не фотоактивное поглощение — поглощение света просветляющим покрытием, дефектами и т. д., фактор напряжения ( $qU_{xx}/E_g$ ).

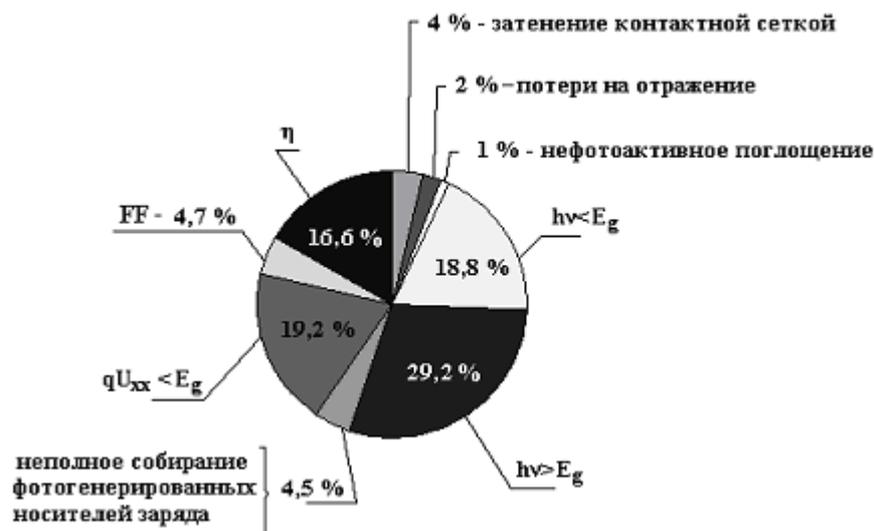


Рис. 2.5. Распределение потерь энергии в кремниевых солнечных элементах при работе в условиях AM 1,5. Потери на  $R_s$  включены в FF.

Диодные параметры  $J_{S0} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  и  $A = 1$ .

Разделенные полем p-n-перехода неосновные носители заряда должны попасть во внешнюю цепь нагрузки. После разделения полем p-n-перехода дырки из n-области переходят в p-область, а электроны из p-области оказываются в n-области; те и другие становятся уже при этом основными носителями заряда в соответствующих областях солнечных элементов. В верхней n-области полупроводника, обращенной к свету, избыточные носители заряда передвигаются вдоль слоя, а в базовой области p-типа - поперек слоя.

Диффузионная длина неосновных носителей заряда в сильнолегированном верхнем слое обычно составляет не более 0,2 - 0,6 мкм, а в базовом слое 100 - 200 мкм, что зависит от концентрации примеси и режима термообработки (число термоциклов, скорость нагрева и охлаждения, максимальная температура) при получении исходного кристалла и изготовлении из него затем солнечного элемента (например, при термодиффузии легирующих примесей и операциях нанесения и упрочнения просветляющих покрытий).

Так как фронтальный слой солнечных элементов имеет достаточно высокую концентрацию примеси, то в значительной степени начинают проявляться эффекты сильного легирования, обуславливающие насыщение  $U_{xx}$ , а именно:

1) кластеризация примесей обуславливает трехмерную пространственную неоднородность р-п перехода и облегчает процессы туннелирования по дефектам в обедненном слое;

2) сужение запрещенной зоны в сильно легированном п слое из-за появления примесных зон энергий "хвостов" плотностей состояний и эффектов механических напряжений;

3) наличие тормозящего поля, обусловленного снижением концентрации носителей с ростом  $N_d$ , которое повышает эффективную скорость поверхностной рекомбинации;

4) совместное влияние рекомбинации на поверхности легированного слоя и сужения запрещенной зоны;

5) сужение запрещенной зоны из-за наличия сильных электрических полей, т. е. эффекта, являющегося тепловым аналогом эффекта Франца-Келдыша, и изменение генерационно-рекомбинационного тока через р-п-переход.

Малая диффузионная длина в легированном слое диктует необходимость мелкого залегания р-п-перехода (у современных серийных солнечных элементов в интервале 0,3 - 0,6 мкм). При этом, чтобы обеспечить поглощение всех падающих фотонов солнечного излучения с энергией больше  $E_g$  толщина базовой области солнечного элемента на основе Si должна быть не менее 200 мкм. Стремление приблизить р-п-переход к поверхности вполне понятно, если учесть, сколь большая часть солнечного света поглощается на малой глубине и насколько велики потери носителей заряда из-за их рекомбинации в переднем легированном слое элементов. Логическим пределом движения в этом направлении являются поверхностно-барьерные солнечные элементы разных типов, вовсе не содержащие

легированного слоя, так что поле объемного заряда подходит вплотную к поверхности.

Разработка солнечных элементов с p-n-переходом, расположенным на глубине менее 0,2 мкм (фиолетовых солнечных элементов), в значительной мере решила проблему пространственного разделения носителей заряда, генерированных коротковолновым излучением. Действительно, коэффициент собирания у подобных солнечных элементов даже при длине волны 0,4 мкм достигает 0,9, тогда как при глубине залегания 0,4 мкм коэффициент собирания в этой области спектра равен 0,5 - 0,6.

Для создания «фиолетовых» элементов используют пониженную концентрацию легирующей примеси вблизи лицевой поверхности и меньшую глубину залегания перехода. При этом благодаря повышению времени жизни неосновных носителей вблизи лицевой поверхности и относительно тонкому фронтальному легированному слою спектральный отклик для высокоэнергетичных фотонов сильно возрастает.

#### **2.4 Электрические соединения солнечных элементов и батарей**

Электрическую энергию, вырабатываемую солнечными элементами батарей, необходимо собрать и подвести к нагрузке, которой может быть, в частности, аккумуляторная электрохимическая батарея, накапливающая электрическую энергию.

Электрические соединения проводят электрический ток от одного элемента к другому, а в конце цепочки элементов обеспечивают вывод тока на выходные шины или точечные контакты. Связь между такими точечными контактами различных рядов или групп солнечных элементов обеспечивается посредством электрических проводов. Ряды или группы солнечных элементов могут быть соединены между собой параллельно или последовательно (последнее соединение встречается редко).

Межэлементными (межконтактными) соединениями являются проводящие элементы, обеспечивающие электрические соединения

отдельных элементов в параллельные или последовательные цепи. Межэлементные соединения выполняются либо из простой проволоки, либо (и чаще всего) из проволочной сетки, либо из фигурных металлических полос.

Солнечные элементы собирают в модули различной размерности, состоящие из двух и более элементов. После установки модулей на несущую панель солнечных батарей они соединяются электрически между собой с помощью межмодульных контактов (межмодульных соединяющих проводов). Межмодульные контакты могут иметь форму и размеры межэлементных соединений, но могут иметь и совершенно другую конструкцию.

Часть солнечной батареи, называемая группой или цепью, состоит из большого числа солнечных элементов, соединенных последовательно и параллельно. Эта группа или цепь генерирует электрическую мощность на выходных шинах. Солнечные батареи могут иметь несколько шин--шунтирующие шины, шины для съема первичной мощности, шины для передачи энергии к аккумуляторным батареям и т. п. В конце электрической цепи солнечные элементы присоединяются к собирающим токоведущим шинам помощью концевых устройств или выводов. Токоведущие шины обычно выполняются в виде изолированных одинарных круглых проводов, многожильных проводов или проводов (кабелей) плоского сечения.

Электрические цепи используемые в солнечных батареях, часто имеют большую длину, чем сами панели солнечных батарей. В этих случаях электрическая цепь должна быть повернута на  $90^\circ$  или даже на  $180^\circ$  таким образом, чтобы можно было разместить все входящие в батарею электрические соединения на поверхности панели.

Электрические соединения, выполненные в виде U-образной петли или поворотного витка, могут по форме напоминать межэлементные или межконтактные соединения, но иногда соединения могут иметь и другую конфигурацию.

Соединение панелей солнечных батарей между собой осуществляется с помощью кабельных разъемов, которые имеют конструкцию, позволяющую быстро замыкать и размыкать отдельные участки батарей. Проводящие части кабельных разъемов называют контактами. Контакты выполняются в виде либо штырьков, либо гнезд. Разъемы с контактами в виде гнезд называют также приемными или захватными. Имеются разъемы, которые предназначены для круглых или для плоских кабелей.

Терминалами являются электрические элементы, закрепленные на изолирующих подставках, колодках или контактных полосках, которые позволяют многократно соединять и разъединять два или большее число проводников различных электрических цепей..

Проводники могут иметь круглое (цилиндрическое) сечение или плоское (ленточное) с использованием изоляции или без нее. Несколько проводников, связанных вместе, называют кабелем. Большое число плоских проводников, нанесенных на изолирующую подложку или пластину, называют печатной схемой.

## 2.5 Определение числа элементов в солнечных батареях

Число последовательно соединенных солнечных элементов. Значительное число солнечных элементов надо соединить последовательно для получения требуемого рабочего» напряжения и дополнительного напряжения, компенсирующего падение напряжения в блокирующих диодах и проводах. Найдем это число из соотношения

$$N_{пс} = \frac{V_{ш} V_{д} V_{п}}{V_{опт}}$$

где  $V_{ш}$  — напряжение на нагрузке космического аппарата или напряжение на выходных шинах солнечной батареи;  $V_{д}$  — падение напряжения на блокирующем диоде, включенном в прямом направлении;  $V_{п}$  — общее падение напряжения в проводах между солнечными элементами и между нагрузкой космического аппарата или электрохимическими аккумуляторами (на освещенной и на темновой сторонах панелей);  $V_{опт}$  —

напряжение солнечного элемента в конце срока службы (или в какой-либо критической ситуации во время полета) в точке максимальной мощности при рабочих значениях температуры и плотности падающего излучения.

Напряжение на нагрузке  $V_{ш}$  определяют отдельно для каждого конкретного случая; оно зависит в основном от параметров электрохимических батарей. Значения  $V_n$  лежат вблизи 0,7 В для кремниевых диодов. Падение напряжения в проводах  $V_{п}$  целиком зависит от конструкции, однако дан способ выбора  $V_{п}$  из условий минимальной массы батареи и проводки.

Для каждого типа солнечного элемента и определенного защитного покрытия выходное напряжение при максимальной выходной мощности к концу периода эксплуатации одного солнечного элемента, покрытого стеклом, находят из уравнения

$$V_{\text{опт}} = V_{\text{оптф}} + \Delta V_{S'} + \beta_{V_{\text{опт}}} V_p (T_{\text{раб}} - T_0).$$

Где  $V_{\text{оптф}}$  - выходное напряжение при максимальной выходной мощности покрытого стеклом солнечного элемента при стандартной температуре  $T_0$  после облучения электронами с энергией 1 МэВ до уровня Fe, см<sup>-2</sup> (Fe — число частиц, попавших на элемент за время его работы);  $\Delta V_{S'}$ , — изменение выходного напряжения при максимальной выходной мощности вследствие изменения плотности потока излучения от  $S$  до  $S'$ . Соответствующее изменение напряжения определяется из характеристик солнечных элементов;  $\beta_{V_{\text{опт}}}$  — температурный коэффициент для выходного напряжения при максимальной выходной мощности;  $T_{\text{раб}}$  — рабочая температура солнечного элемента;  $T_0$  — стандартная температура испытаний солнечных элементов (25 или 28 °С).

Представим группу из  $N_{п}$  с солнечных элементов, соединенных последовательно, в виде цепочки элементов. Вся солнечная батарея состоит из  $N_{пр}$  последовательных цепочек, соединенных между собой параллельно и обеспечивающих необходимый ток нагрузки. Число элементов  $N_{пр}$ , находят из следующего уравнения:

$$N_{пр} = I_{\phi} / \bar{I}_{опт}$$

где  $\bar{I}_{опт}$  — среднее значение выходного тока при максимальной выходной мощности в конце срока службы  $N_{пр}$  элементов, соединенных последовательно и покрытых стеклом. Этот параметр определяют при рабочей температуре  $T_{раб}$  в условиях уменьшенного освещения, соответствующего потемнению покрытия, падающего под углом солнечного излучения:

$$\bar{I}_{опт} = \sum_{i=1}^n I_{опт\ i} / n.$$

Здесь

$$I_{опт\ i} = I_{опт\ \phi} S'_i [1 + \beta'_{I_{опт}} (T_{раб} - T_0)] F_{д.к} (F_z)_i ;$$

$I_{опт\ \phi}$  — выходной ток при максимальной выходной мощности солнечного элемента, покрытого стеклом (с исходной прозрачностью), при стандартной температуре  $T_0$  после облучения электронами с энергией 1 МэВ до уровня Fe, см<sup>-2</sup>;  $S'_i$  — эффективная интенсивность солнечного излучения для  $i$ -го числа цепочек элементов с учетом снижения прозрачности покрытия вследствие деградации, увеличения расстояния до Солнца и отсутствия перпендикулярности падения излучения ( $S'_i$  измерено в долях солнечной постоянной; для плоской батареи солнечных элементов все  $S_i$  равны между собой, поэтому индекс  $i$  можно опустить;  $\beta'_{I_{опт}}$  — температурный коэффициент для  $I_{опт}$ ;  $T_{раб}$  — рабочая температура солнечного элемента;  $T_0$  — температура стандартных испытаний солнечных элементов (25 или 28°C);  $F_{д.к}$  — фактор, учитывающий деградационные и коммутационные потери, для многих конструкций значение  $F_{д.к}$  лежит в диапазоне от 0,95 до 1,00;  $(F_z)_i$  — фактор, учитывающий затемнение  $i$ -го

числа параллельно соединенных цепочек. Для незатемненных цепочек  $F_3=1,00$

Параллельные цепи. Все последовательные цепочки элементов соединены параллельно между собой по крайней мере в начале и конце цепочек. Однако обычно в последовательно-параллельной группе элементов два или более элементов из соседних последовательных цепочек соединены параллельно.

При таком параллельном соединении повышается надежность солнечной батареи, создаются обходные параллельные цепи для прохождения тока при отказе типа обрыв, происходящего у одного или нескольких солнечных элементов вследствие механического повреждения элементов, отслоения контактов или неисправности в межэлементных соединениях.

В случае отказа типа обрыв одного из элементов соседние параллельно соединенные солнечные элементы будут частично или полностью проводить ток, который проводил через отказавший элемент до его выхода из строя. Значение тока, который могут проводить исправные солнечные элементы, зависит от рабочего тока элементов до выхода из строя одного из них и суммарного тока короткого замыкания соединенных параллельно исправных элементов после отказа. Если разность этих токов меньше тока, пропускаемого вышедшим из строя элементом до его отказа, то на исправные элементы будет подаваться обратное напряжение смещения. Обратное напряжение смещения, в свою очередь, может приводить к выходу из строя элемента в результате превышения уровня допустимого перегрева.

## **2.6 Разработанная конструкция лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений**

В результате выполнения выпускной работы разработан и изготовлен лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений позволяющий измерять вольтамперные и люксамперные характеристики фотоэлементов.

Разработанный лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений позволяет получать световые и темновые вольтамперные характеристики фотоэлементов.

Конструкция лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений образована из простых прямоугольных объемов. Сочленения, округления и сопряжения поверхностей прибора выполнены чисто, нет зазоров, углублений и стыков элементов формы, где возможно большое скопление пыли и грязи. Поверхность измерительного блока с источником напряжения тщательно отделана и покрыта черной нитро краской устойчивой к повреждениям.

Измерительный блок лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений конструктивно выполнен в виде корпуса, на передней панели которого расположены два цифровых прибора мультиметра DT-830B, регулятор управления напряжением блоков питания и разъемы крепления для подключения фотоэлементов вольтамперную характеристику которых необходимо определить.

Питание лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений осуществляется от сети переменного тока 50 Гц, напряжением 220 В, через выход на боковой поверхности стенда. Весь монтаж и соединение измерительных приборов и блоков питания скрыт и выполнен внутри объема электробезопасного корпуса. Пределы измерения силы постоянного тока составляют значения: 200 мкА; 2000 мкА; 20 мА; 200 мА. Пределы измерения напряжения постоянного тока составляют значения: 200 мВ; 2000 мВ; 20 В. Диапазон изменения постоянного напряжения источников питания с помощью делителя напряжения: от 0 до 12 В.

Разработанный лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений имеет небольшие размеры и надежен в работе. Габариты установки для измерения вольтамперных характеристик солнечных элементов учитывают необходимость её компактного размещения на рабочем месте при максимальной обозреваемости отдельных особенно важных компонентов.

Время, затрачиваемое на подготовку лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений элементов к работе, на достижение основного режима работы с момента включения, на осуществление поставленных задач и целей небольшое, точно рассчитанное и сопоставимое с ограниченным временем урока. Конструкция лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений обеспечивает время на его подготовку к работе - не более 5 минут.

Принцип работы лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений построен по компенсационной схеме. Источники питания на 12 В и 5 В, а также верхняя и нижняя части резистора  $R_n$  (220 Ом) образуют мост, в диагональ которого включен фотоэлемент – ФЭПП (фотоэлектрический преобразователь).

Такое включение позволяет менять полярность напряжения и тока через фотоэлемент, что необходимо для точного измерения основных параметров – тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

Максимальный измеряемый ток короткого замыкания ФЭПП определяется характеристикой источника 5 В, и составляет 1000 мА. Максимальное измеряемое напряжение холостого хода ФЭПП – 12 В. Максимальный измеряемый прямой ток ФЭПП – 1000 мА.

## **2.7 Особенности измерения световой и темновой вольт – амперной характеристики.**

Изменяя положение движка переменного резистора  $R_n$ , для каждого его положения записать значение напряжения  $U$  на солнечном элементе (по показаниям вольтметра) и тока  $I$  в измерительной цепи (по показаниям амперметра). Изменять положение движка переменного резистора на каждом шаге необходимо с таким расчетом, чтобы число точек вольт – амперной характеристики было не меньше 15.

Измерения желателно проводить с шагом в 0,05 В. Измерения прямой ветви следует считать законченными при достижении напряжения на солнечном элементе максимально допустимой величины в 0,8 В.

Для измерения темновой вольт – амперной характеристики следует полностью закрыть от света фотоэлемент.

Далее измерения характеристик обратной ветви темновой вольт – амперной характеристики солнечного элемента выполняются полностью аналогично описанным выше измерениям прямой ветви, включая одинаковую величину шага напряжения на солнечном элементе.

Измерения прямой ветви следует считать законченными при достижении напряжения на солнечном элементе максимально допустимой величины в 0,8 В.

После завершения измерений темновую вольтамперную характеристику прибора следует представить в графическом виде на одном рисунке со световой характеристикой солнечного элемента.

Расчет параметров эквивалентной схемы и вольт - амперной характеристики фотоэлемента проводится по следующей методике.

Часть световой характеристики ФЭПП в первом квадранте и ее продолжение в четвертом квадранте представляют собой прямую линию. Наклон этой прямой к оси токов характеризует последовательное сопротивление ФЭПП ( $R_{\text{посл.}} = dU_{\text{пр}}/dI_{\text{пр}}$ ):

$$R_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{с}}}{\Delta I_{\text{с}}}$$

Величину шунтирующего сопротивления с приемлемой степенью точности можно определить по наклону обратной ветви световой, а лучше темновой вольт – амперной характеристики ( $R_{\text{шунт.}} = dU_{\text{обр}}/dI_{\text{обр}}$ ):

$$R_{\text{ш}} = \frac{\Delta U_{\text{т}}}{\Delta I_{\text{т}}}$$

Построение темновой характеристики позволяет также найти обратный ток насыщения  $I_{\text{ОН}}$ . Продолжение линейного участка на обратной ветви

темновой характеристики до пересечения с осью ординат (токов), дает искомую величину  $I_{OH}$ .

В рабочем состоянии ФЭПП его  $p-n$  – переход включен в прямом направлении, поэтому правильнее определять ток насыщения не по обратной, а по прямой ветви темновой вольт – амперной характеристики прибора. Для этого можно воспользоваться темновой характеристикой ФЭПП, представленной в виде уравнения прямой в отрезках (в логарифмическом масштабе):

$$\ln(I_D + I_{OH}) = \ln(I_{OH}) + \frac{eU}{AkT}$$

Это уравнение применяется только в случае больших токов ( $I_D \gg I_{OH}$ ), а также рекомбинационного механизма протекания обратного тока насыщения через  $p-n$  – переход. Тангенс угла наклона прямой, описываемой уравнением (4) в координатах  $\ln I_D = f(U)$  равен  $e/AkT$  (что позволяет рассчитать величину параметра  $A$  в уравнении (1)), а отрезок, отсекаемый на оси ординат, дает значение  $\ln I_{OH}$ .

Отключение лабораторного стенда осуществляется путем выключения питания цифровых приборов мультиметров DT-830B, переводом их ручки управления в положение OFF и извлечением вилки из розетки сети переменного тока.

### 3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

I. Техничко-экономические обоснование проекта

II. Определить объем инвестиции

- Стоимость основных фондов
- Объем инвестиции на покупку материально-производственных запасов
- Объем инвестиции на покупку малоценного инвентаря и контрольно-измерительных приборов
- Расчет заработной платы производственных рабочих

III. Определить экономическую эффективность, годовой доход

IV. Определить срок окупаемости инвестиции

1. Техничко-экономическое обоснование проекта

- Цель, сущность и задачи проекта и его актуальность
- Экономическая эффективность проекта

2. Определить объем инвестиции

Нижеследующим таблице дано приведенные затраты на ВКР

Таблица 1

**Объём инвестиций на покупку инвентаря  
и контрольно-измерительных приборов**

№	Наименование	Кол во	Цена за ед, сум	НДС 20%, сум	Стоимость с учетом НДС, сум	Общая стоимость с учетом НДС, сум
1	фотоэлемент	2	5 800,00	1 160,00	6 960,00	13 920,00
2	шнур	1	2 300,00	460,00	2 760,00	2 760,00
3	выключатель	2	2 100,00	840,00	2 940,00	5 880,00
	блок питания	1	7 300,00	1 460,00	8 760,00	8 760,00
5	вилка сетевая	1	800,00	160,00	960,00	960,00
6	выключатель	1	2 100,00	420,00	2 520,00	2520,00
7	болты	70	30,00	420,00	450,00	31500,00
8	гайки	70	30,00	420,00	450,00	31500,00
9	подставки	2	3 200,00	1 280,00	4 480,00	8960,00
10	держатель	1	7 200,00	1 440,00	8 640,00	8640,00
11	корпус	1	8 500,00	1 700,00	10 200,00	10200,00
12	провода монтажные	10	300,00	600,00	900,00	9000,00
13	ацетон	1	9 400,00	1 880,00	11 280,00	11280,00
14	краска	0,5	9 500,00	950,00	10 450,00	5225,00
15	оргстекло	0,5	14 600,00	1 460,00	16 060,00	8030,00
16	припой	0,05	110 000,0	1 100,00	111 100,00	5555,00
17	канифоль	0,1	7 000,00	140,00	7 140,00	714,00
18	бумага шлиф.	1	6 300,00	1 260,00	7 560,00	7560,00
19	блок ввода	1	5 100,00	1 020,00	6 120,00	6120,00
20	датчик	1	7 800,00	1 560,00	9 360,00	9360,00
21	переходник	1	5 700,00	1 140,00	6 840,00	6840,00
22	лампа	1	800,00	160,00	960,00	960,00
	Итого					196244,00

Таблица 2

**Объем инвестиции на покупку малоценного инвентаря и контрольно-измерительных приборов**

№	Наименование	Кол-во	Цена за единицы	НДС 20%	Общая стоимость с учетом НДС
1	Задающий генератор	2	23700	4740	56880
2	Плата	1	21600	4320	25920
	<b>Итого</b>				<b>82800</b>

Амортизационные отчисления составляет 20 % от стоимости ОФ:

$$A_{отч} = 16560 \text{ сум.}$$

Затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание 12% от стоимости ОФ:

$$P_m = 16560 \text{ сум.}$$

Таблица 3

**Расчет заработной платы производственных рабочих**

№	Должность	Количество	Рабочие дни в году	Дневная плата	Годовая заработная плата
1	Руководитель проекта	1	5	58500	292500
2	Техник	1	20	18750	375000
	<b>Итого</b>				<b>667500</b>

Основная заработная плата определяется как сумма оплаты труда всех рабочих и премии в размере 40 % :  $Z_{осн} = 267000 \text{ сум.}$

Дополнительная заработная плата производственных рабочих берется 10 % от основного З/п:  $Z_d = 26700 \text{ сум}$

Фонд оплаты труда определяется как сумму основной и дополнительной заработной платы:  $ФОТ = 961200 \text{ сум}$

Затраты на социальное страхование рассчитывается 25% от ФОТ

$$O_{фсс} = 240300 \text{ сум}$$

Транспортные расходы рассчитывается 20% от Зосн:  $P_{тр} = 53400 \text{ сум}$

Таблица 4

## Смета затрат на производство продукции

№	Наименование статей затрат	Сумма
<b>1.</b>	<b><i>Электроэнергия (W)</i></b>	
1.1.	кВт.Установленная мощность	1
1.2.	(Т), Рабочее время	100
1.3.	1 кВт (S), сум. Стоимость Электроэнергии	182
	<i>Всего затрат</i>	18200
<b>2.</b>	<b><i>(Тпк) Годовой фонд раб времени</i></b>	
2.1.	(Nм), месяцы	12
2.2.	(Nd), Количество рабочих дней в месяц	25
2.3.	(Nч), Продолжительность рабочего дня	4
	<i>(Тпк), Годовой фонд рабочего времени</i>	1200
3.	Расходы периода	1500
<b>4.</b>	<b><i>Стоимость машино-час</i></b>	
4.1.	(За), сум в год.Амортизация	16560,00
4.2.	(Звм), сум в год.Затраты на дополнительные материалы	15000
4.3.	(Зт),Текущий ремонт.	0
	<i>(С), сум/год.Стоимость машино-час</i>	26
5.	<i>(Звм).Стоимость машино-час</i>	
5.1.	, рассчитывается;Стоимость машино-час	26
5.2.	Затраты времени на в часах (tn)	
5.3.	Затраты времени на отладку в часах (totл)	
	<i>Стоимость машино-час</i>	16573
5	ФЗП	961200,00
6	Страхование	240300,00
7	Амортизация	16560,00
	Расходы на производство продукции	1254332,50

Таблица 5

## Расчет экономической эффективности

№	С. Себестоимость	Единица измерения	Сумма
1	Q.Объем производства	сум	1254332,50
2	Расчет затраты по ВКР	мБт	15000
3	Реальные затраты на производство продукции	сум/мБт	83,62
4	Э.Экономическая эффективность	сум/мБт	108,71
5	Э.Экономическая эффективность	сум	25,09
6	Э.Экономическая эффективность	%	23,08

Таблица 6

## Расчет инвестиций

№	Показатели	Единица измерения	Сумма
1	ОФ	сум	82800
2	Мин	сум	196244
3	Инвестиции	сум	279044

Таблица 7

## Рентабельность

№	Показатели	Единица измерения	Сумма	
1	Производственные затраты	сум	1254333	В год
2	Инвестиции	сум	196244	Всего
3	Цена	сум	1489825	
4	Прибыль	сум	235493	В год
5	Окупаемость	месяц	5	
6	Рентабельность	%	120,0	

## 4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В данном разделе выпускной работы рассматриваются вопросы безопасной жизнедеятельности человека, которых необходимо решать на всех стадиях жизненного цикла.

Обеспечение безопасной жизнедеятельности человека в значительной степени зависит от правильной оценки опасных, вредных производственных факторов. Одинаковые по тяжести изменения в организме человека могут быть вызваны различными причинами. Это могут быть какие-либо факторы производственной среды, чрезмерная физическая и умственная нагрузка, нервно-эмоциональное напряжение, а также разное сочетание этих причин.

**БЖД** — система знаний, направленных на обеспечение безопасности в производственной и непроизводственной среде с учетом влияния человека на среду обитания.

Обеспечение безопасной жизнедеятельности человека в значительной степени зависит от правильной оценки опасных, вредных производственных факторов. Одинаковые по тяжести изменения в организме человека могут быть вызваны различными причинами. Это могут быть какие-либо факторы производственной среды, чрезмерная физическая и умственная нагрузка, нервно-эмоциональное напряжение, а также разное сочетание этих причин.

Жизнедеятельность — это способ существования или повседневная деятельность человека. В процессе своей жизнедеятельности любой человек постоянно взаимодействует со средой обитания. Последняя — это окружающая человека среда в процессе его деятельности, обусловленная совокупностью физических, химических, биологических, психофизиологических и социально-экономических факторов, способных оказать прямое или косвенное, немедленное или отдаленное воздействие на деятельность человека, его здоровье и потомство. Основными средами обитания человека являются производственная среда, городская среда или среда населенных мест, бытовая или жилая среда и природная среда (ПС).

Оптимальное взаимодействие человека со средой обитания возможно, если будут обеспечены комфортность среды, минимизация негативных воздействий и устойчивое развитие системы “человек – среда обитания – машина – чрезвычайная ситуация”. Изучением элементов, составляющих эту систему, и явлений, происходящих в ней занимается безопасность жизнедеятельности (БЖД) – наука о комфортном и безопасном взаимодействии человека со средой обитания. Ее основная задача состоит в сохранении работоспособности и здоровья человека, выборе параметров состояния среды обитания и применении мер защиты от негативных факторов естественного и антропогенного происхождения. Основной целью изучения БЖД является приобретение теоретических знаний и практических навыков, необходимых для:

1) создания оптимального состояния среды обитания в зонах трудовой деятельности и отдыха человека;

2) идентификации (распознавание и количественная оценка) опасных и вредных факторов среды обитания естественного и антропогенного происхождения;

3) разработки и реализации мер защиты человека и среды обитания от негативных воздействий (опасностей);

4) проектирования и эксплуатации техники, технологических процессов и объектов народного хозяйства (ОНХ) в соответствии с требованиями по безопасности и экологичности;

5) обеспечения устойчивости функционирования ОНХ и ТС в штатных и чрезвычайных ситуациях;

6) прогнозирования развития и оценки последствий ЧС;

7) принятия решений по защите производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий и применения современных средств поражения, а также принятия мер по ликвидации их последствий.

Взаимодействие человека со средой обитания может быть позитивным или негативным, характер взаимодействия определяют потоки веществ, энергий и информации. Любое превышение привычных уровней потоков сопровождается негативными воздействиями на человека или природную среду.

В условиях техносферы негативные воздействия обусловлены элементами техносферы (машины, сооружения и т.д.) и действиями человека. Изменяя величину любого потока от минимально значимой до максимально возможной, можно пройти ряд характерных состояний взаимодействия в системе «человек- среда обитания»:

- комфортное (оптимальное), когда потоки соответствуют оптимальным условиям взаимодействия: создают оптимальные условия деятельности и отдыха; предпосылки для проявления наивысшей трудоспособности и как следствие продуктивности деятельности; гарантируют сохранение здоровья человека и целостности компонент среды обитания.
- допустимое, когда потоки, воздействуя на человека и среду обитания, не оказывают негативного влияния на здоровье, но приводят к дискомфорту, снижая эффективность деятельности человека. Соблюдение условий допустимого взаимодействия гарантирует невозможность возникновения и развития необратимых процессов у человека и в среде обитания.
- опасное, когда потоки превышают допустимые уровни и оказывают негативное воздействие на здоровье человека, вызывая при длительном взаимодействии заболевания, и/или приводят к деградации природной среды.
- чрезвычайно опасное, когда потоки высоких уровней за короткий период времени могут нанести травму, привести человека к летальному исходу, вызвать нарушения в природной среде.

Из четырёх характерных состояний взаимодействия человека со средой обитания лишь первые два (комфортное и допустимое) соответствуют позитивным условиям повседневной деятельности, а два других (опасное и чрезвычайно опасное) – недопустимы для процессов жизнедеятельности человека, сохранения и развития природной среды. Следовательно, поддержание комфортного и/или допустимого состояний является способом повышения защищённости человека.

Комфортное состояние жизненного пространства по показателям микроклимата и освещения достигается соблюдением нормативных требований. В качестве критериев комфортности устанавливают значения температуры воздуха в помещениях, его влажности и подвижности, соблюдение нормативных требований к искусственному освещению помещений и территорий.

Параметры – температура окружающих предметов и интенсивность физического нагревания организма характеризуют конкретную производственную обстановку и отличаются большим разнообразием. Остальные параметры – температура, скорость, относительная влажность и атмосферное давление окружающего воздуха – получили название параметров микроклимата.

Параметры микроклимата воздушной среды, которые обуславливают оптимальный обмен веществ в организме и при которых нет неприятных ощущений и напряжённости системы терморегуляции организма, называют комфортными или оптимальными.

**Влаговыделение.** Влага выделяется в результате испарения со свободной поверхности воды и влажных поверхностей материалов и кожи, в результате дыхания людей, а также химических реакций, работы оборудования и т.д. Количество влаги, выделяемое людьми (см. табл. 1), г/ч, определяется по формуле:  $W = n / w$ ,

где  $n$  - число людей;  $w$  - количество влаги, выделенное одним человеком, г/ч.

Таблица 1. Количество тепла и влаги, выделяемое человеком.

Характер Выполняемо й Работы	Тепло, Вт				Влага, г/ч	
	полное		явное		при 10 °С	при 35 °С
	при 10 °С	при 35 °С	при 10 °С	при 35 °С		
Умственная	160	93	140	16	30	115
Физическая						
Легкая	180	145	150	8	40	200
Средняя	215	195	165	8	70	280
Тяжелая	290	290	195	16	135	415

Количество влаги, испаряющейся с открытой поверхности не кипящей воды, кг/ч, определяется по формуле:

$$W_B = (a + 0,13V) \cdot (P_{\text{пов}} - P_{\text{окр}}) \cdot \frac{101,325}{B} \cdot F$$

где  $a$  - коэффициент, зависящий от температуры поверхности испарения (табл. 2);  $V$  - скорость движения воздуха над поверхностью испарения, м/с.;  $P_{\text{пов}}$ ,  $P_{\text{окр}}$  - давление водяного пара, соответственно, при температуре поверхности испарения и полном насыщении и в окружающем воздухе, кПа;  $F$  - площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>;  $B$  - барометрическое давление, кПа.

Таблица 2. Значение коэффициента  $a$

$t_{\text{исп}}$ , °С	≤30	40	50	60	70	80	90
$a$	0,02	0,028	0,033	0,037	0,041	0,046	0,051

Для не кипящей воды температура поверхности испарения  $t_{\text{исп}}$  находится из таблицы 3 по средней температуре воды  $t_{\text{в}}$

Таблица 3. Температура поверхности испарения воды

$t_{\text{исп}}$ , °С	20	30	40	50	60	70	80	90
$t_{\text{в}}$ , °С	18	28	37	45	51	58	69	82

Количество влаги, испарившейся при кипении воды,  $W_{\text{кип}}$ , кг/ч, зависит от количества подводимого к воде тепла и вида укрытия воды и может быть определено по формуле:

$$\boxed{\phantom{W_{\text{кип}} = K_{\text{укр}} \cdot N_{\text{ист}} / q}},$$

где  $K_{\text{укр}}$  - опытный коэффициент, учитывающий вид укрытия:

для плотных укрытий без отсоса воздуха - 0,1, при отсосе воздуха - 0,2...0,25;  $N_{\text{ист}}$  - мощность теплового источника испарения, Вт;  $q$  - скрытая теплота испарения, кДж/кг.

Ориентировочно интенсивность испарения может быть принята равной 40...50 кг в 1 час с 1 м<sup>2</sup> поверхности.

Количество водяных паров, образующихся при химических реакция, в том числе и при горении веществ, определяется по опытным данным. При сжигании 1 кг горючего количество образовавшейся влаги может быть определено по таблице 4.

Таблица 4. Количество влаги  $W_{\text{гор}}$ , образующейся при сгорании 1 кг топлива

Горючей вещество	$W_{\text{гор}}$ , кг/кг
Водный генераторный газ	0,61
Ацетилен	0,7
Бензин	1,4

Количество испаряющейся влаги  $W_{\text{охл}}$  (кг/ч) при применении охлаждающих эмульсий при охлаждении металлорежущих станков определяется по формуле  $W_{\text{охл}} = 0,15 \cdot N$ , где  $N$  - мощность станков, кВт.

Влаговыведения от технологического оборудования обычно принимаются по справочным данным.

## Расчет местной вытяжной вентиляции

Искусственная (механическая) вентиляция устраняет недостатки естественной вентиляции. При механической вентиляции воздухообмен осуществляется за счет напора воздуха, создаваемого вентиляторами (осевыми и центробежными); воздух в зимнее время подогревается, в летнее—охлаждается и кроме того очищается от загрязнений (пыли и вредных паров и газов). Механическая вентиляция бывает приточной, вытяжной, приточно-вытяжной, а по месту действия — общеобменной и местной.

При **приточной системе вентиляции** (рис. 4.1, *а*) производится забор воздуха извне с помощью вентилятора через калорифер, где воздух нагревается и при необходимости увлажняется, а затем подается в помещение. Количество подаваемого воздуха регулируется клапанами или заслонками, устанавливаемыми в ответвлениях. Загрязненный воздух выходит через двери, окна, фонари и щели неочищенным.

При **вытяжной системе вентиляции** (рис. 4.1, *б*) загрязненный и перегретый воздух удаляется из помещения через сеть воздуховодов с помощью вентилятора. Загрязненный воздух перед выбросом в атмосферу очищается. Чистый воздух подсасывается через окна, двери, неплотности конструкций.

**Приточно-вытяжная система вентиляции** (рис. 4.1, *в*) состоит из двух отдельных систем — приточной и вытяжной, которые одновременно подают в помещение чистый воздух и удаляют из него загрязненный. Приточные системы вентиляции также возмещают воздух, удаляемый местными отсосами и расходуемый на технологические нужды: огневые процессы, компрессорные установки, пневмотранспорт и др.

Рассчитываемая местная вытяжная вентиляционная установка предназначена для удаления запыленного воздуха от фасовочной машины и включает в себя приемник запыленного воздуха, расположенный над

машиной, воздуховод, одну задвижку, два поворота на  $90^\circ$ , очистное сооружение (циклон), вентилятор.

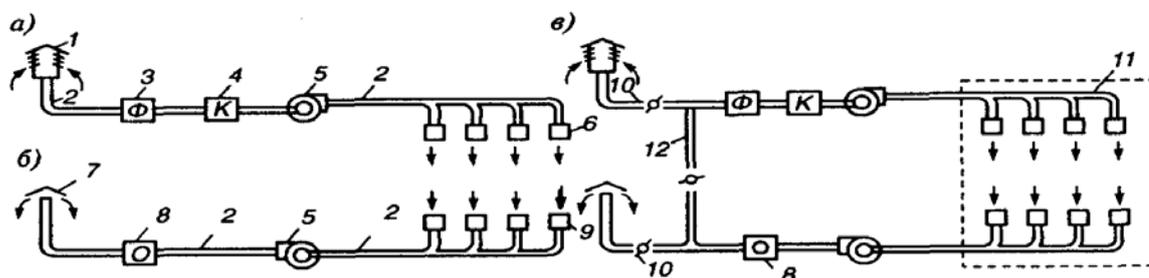


Рис. 4.1. Схема приточной, вытяжной и приточно-вытяжной механической вентиляции: *a* — приточная; *б* — вытяжная; *в* — приточно-вытяжная; 1 — воздухоприемник для забора чистого воздуха; 2 — воздуховоды; 3 — фильтр для очистки воздуха от пыли; 4 — калориферы; 5 — вентиляторы; 6 — воздухораспределительные устройства (насадки); 7 — вытяжные трубы для выброса удаляемого воздуха в атмосферу; 8 — устройства для очистки удаляемого воздуха; 9 — воздухозаборные отверстия для удаляемого воздуха; 10 — клапаны для регулирования количества свежего вторичного рециркуляционного и выбрасываемого воздуха; 11 — помещение, обслуживаемое приточно-вытяжной вентиляцией; 12 — воздуховод для системы рециркуляции

### Исходные данные:

1. площадь сечения приемника (зонта) —  $F_{\text{раб}} = 1 \text{ м}^2$ ;
2. дополнительные отверстия в воздуховоде отсутствуют —  $F_{\text{дон}} = 0$ ;
3. коэффициент запаса —  $\alpha = 1,1$ ;
4. объемный расход выделяющейся пыли —  $V_t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{с}$ ;
5. температура удаляемого воздуха —  $20^\circ \text{C}$ ;
6. динамическая вязкость воздуха —  $\mu_c = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ ;
7. длина воздуховода —  $L = 20 \text{ м}$ ;

8. скорость воздуха в воздуховоде –  $W_g = 5 \text{ м/с}$ ;
9. гидравлическое сопротивление циклона –  $\Delta P_{\text{ц}} = 500 \text{ Па}$ ;
10. общий к.п.д. вентиляционной установки –  $\eta = 0,5$ ;
11. диаметр частицы пыли –  $d = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;
12. кажущаяся плотность частицы –  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ .

При расчете необходимо найти мощность электродвигателя вентилятора.

### Выполнение работы:

#### 1. Вычисление критерия Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho \cdot \rho_c \cdot g}{\mu_c^2}, \text{ где}$$

$d$  – диаметр частицы пыли, м;

$\tilde{\rho}$  кажущаяся плотность частицы,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_c$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\mu_c$  – динамическая вязкость воздуха.

$$Ar = \frac{(100 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1600 \cdot 1,2047 \cdot 9,81}{(1,8 \cdot 10^{-5})^2} = 58,361$$

#### 2. Вычисление критерия $Re_{\text{вум}}$

$$Re_{\text{вум}} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} = \frac{58,361}{18 + 0,61\sqrt{58,361}} = 2,576$$

#### 3. Вычисление объемного расхода удаляемого запыленного воздуха

$$V = W_{\text{np}} \cdot (F_{\text{раб}} + F_{\text{дон}}) \cdot \alpha + V_T, \text{ м}^3 / \text{с},$$

где  $W_{\text{np}} = 1,2 \cdot W_{\text{вум}} = 1,2 \cdot 0,385 = 0,462 \text{ м/с}$ ,

$$V = 0,462 \cdot (1+0) \cdot 1,1 + 5 \cdot 10^{-5} = 0,508 \text{ м}^3 / \text{с}$$

#### 4. Вычисление диаметра воздуховода

$$d_g = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot W_g}} = \sqrt{\frac{0,508}{0,785 \cdot 5}} = 0,36 \text{ м}$$

## 5. Вычисление гидравлического сопротивления вентиляционной установки

$$\Delta p = \Delta p_{ск} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.с.} + \Delta p_{ц},$$

где  $\Delta p_{ск}$  – скоростной напор, *Па*;

$\Delta p_{тр}$  – потери напора на трение, *Па*;

$\Delta p_{м.с.}$  – потери напора на местные сопротивления, *Па*;

$\Delta p_{ц}$  – потери напора в циклоне, *Па*.

$$\Delta p_{ск} = \frac{W_g^2 \cdot \rho_c}{2} = \frac{5^2 \cdot 1,2047}{2} = 15,059 \text{ Па},$$

$$\Delta p_{тр} = \frac{\lambda \cdot L \cdot \Delta p_{ск}}{d_g}$$

$\Delta p_{ск}$  – коэффициент трения, его значение зависит от критерия

Рейнольдса:

$$Re = 1,5223 \cdot 10^5;$$

## 6. Вычисление мощности электродвигателя вентилятора

$$N_{дв} = \frac{V \cdot \Delta p}{1000 \cdot \eta} = \frac{0,508 \cdot 553,292}{1000 \cdot 0,5} = 0,562 \text{ кВт}$$

$$\Delta p_{тр} = \frac{0,016 \cdot 20 \cdot 15,059}{0,36} = 13,386 \text{ Па}$$

$$\Delta p_{м.с.} = 1,65 \cdot \Delta p_{ск} = 1,65 \cdot 15,059 = 24,847 \text{ Па}$$

$$\Delta p = 15,059 + 13,386 + 24,847 + 500 = 553,292 \text{ Па}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной работы разработан и изготовлен лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений позволяющий измерять вольтамперные и люксамперные характеристики фотоэлементов. Разработанный лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений позволяет получать световые и темновые вольтамперные характеристики фотоэлементов.

Измерительный блок лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений конструктивно выполнен в виде корпуса, на передней панели которого расположены два цифровых прибора мультиметра DT-830B, регулятор управления напряжением блоков питания и разъемы крепления для подключения фотоэлементов вольтамперную характеристику которых необходимо определить.

Питание лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений осуществляется от сети переменного тока 50 Гц, напряжением 220 В, через выход на боковой поверхности стенда. Весь монтаж и соединение измерительных приборов и блоков питания скрыт и выполнен внутри объема электробезопасного корпуса. Пределы измерения силы постоянного тока составляют значения: 200 мкА; 2000 мкА; 20 мА; 200 мА. Пределы измерения напряжения постоянного тока составляют значения: 200 мВ; 2000 мВ; 20 В. Диапазон изменения постоянного напряжения источников питания с помощью делителя напряжения: от 0 до 12 В.

Разработанный лабораторный стенд для изучения фотоэлектрических явлений имеет небольшие размеры и надежен в работе. Габариты установки для измерения вольтамперных характеристик солнечных элементов учитывают необходимость её компактного размещения на рабочем месте при максимальной обозреваемости отдельных особенно важных компонентов.

Время, затрачиваемое на подготовку лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений элементов к работе, на достижение основного режима работы с момента включения, на осуществление поставленных задач

и целей небольшое, точно рассчитанное и сопоставимое с ограниченным временем урока. Конструкция лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений обеспечивает время на его подготовку к работе - не более 5 минут.

Принцип работы лабораторного стенда для изучения фотоэлектрических явлений построен по компенсационной схеме. Источники питания на 12 В и 5 В, а также верхняя и нижняя части резистора  $R_n$  (220 Ом) образуют мост, в диагональ которого включен фотоэлемент – ФЭПП (фотоэлектрический преобразователь).

Такое включение позволяет менять полярность напряжения и тока через фотоэлемент, что необходимо для точного измерения основных параметров – тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

Максимальный измеряемый ток короткого замыкания ФЭПП определяется характеристикой источника 5 В, и составляет 1000 мА. Максимальное измеряемое напряжение холостого хода ФЭПП – 12 В. Максимальный измеряемый прямой ток ФЭПП – 1000 мА.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов И.П. "Основы электроники"// М., Энергоатомиздат, 1990.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. "Электроника"// М., Высшая школа, 1991.
3. Тугов Н.М. "Полупроводниковые приборы"// М., Высшая школа, 1990.
4. "Справочник по полупроводниковым приборам"// М., 1993.
5. Щука А.А., Электроника, С-Петербург, БХВ Петербург, 2005.
6. Стешенко В. Б. ACCEL EDA. Технология проектирования печатных плат: Для конструкторов. М.: изд. Нолидж, 2000.
7. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника (Лабораторные работы на ПК) СПб.: Изд-во Корона принт, 2002.
8. П.А.Воронин Силовые полупроводниковые ключи. М. ДОДЭКА. 2002
9. Бирюков С. А. Цифровые устройства на МОП-интегральных микросхемах. - М.: Радио и связь, 1990. - 128 с.; ил. - (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1132).
- 10.П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники М. Мир, 2003.
- 11.Раннев Г. Г. Методы и средства измерений: М.: Издательский центр «Академия», 2003.
- 12.Калашников В. И., Нефедов С. В., Путилин А. Б. Информационно-измерительная техника и технологии: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2002.
- 13..Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справ./ Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок – Мн.: Беларусь, 1994. – 591 с.:ил.
- 14.Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным требованиям к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы: Сан Пин 2.2.2 542-96. – М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2009.
- 15.Зотов Б.И., Курдюмов В.И. Безопасность жизнедеятельности.- М.: КолосС, 2004.

16. Основы медицинских знаний учащихся, пробный учебник для средних учебных заведений, под редакцией М.И. Гоголева”, изд. “Просвещение”, Москва, 2001.
17. Первая помощь при повреждениях и несчастных случаях, под редакцией В.А. Полякова, изд. “Медицина”, Москва, 2009.
18. Строителю о первой медицинской помощи, под редакцией Н.Л. Хафизулиной, изд. “Стройиздат”, Москва, 2011.
19. Носов В.Б. Безопасность труда/Под ред. В.В. Амбарцумяна. – М.: Машиностроение, 2004. – 144с.
20. <http://www.Внешний фотоэффект/Википедия>
21. <http://www.Внутренний фотоэффект/Википедия>
22. <http://www.Принципиальные электрические схемы блоков питания.>
23. <http://www.gelezo.com>
24. <http://www.lib.qrz.ru>.
25. <http://www.electronics.ru>
26. <http://www.Техническая библиотека. Фоторезистор.>
27. <http://www.Техническая библиотека. Фотодиод.>
28. <http://www.Техническая библиотека. Фототранзистор.>