

Институт физических проблем
им. П.Л. Капицы

Мясоедова Елена Анатольевна

**Фотоприемники
в далеком инфракрасном диапазоне**

Дипломная работа на соискание
степени бакалавра

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Завьялов В.В.

Москва 1999г.

Содержание

Введение	2
1. ДИК-техника.	2
1.1. Источники излучения.	2
1.1.1. Альтернативные источники излучения.	2
1.1.2. Лазер на парах воды.	2
1.2. Элементы оптического тракта.	7
1.2.1. Зеркала.	7
1.2.2. Линзы и окна.	7
1.2.3. Поляризаторы.	10
2. Приемники излучения.	11
2.1. Описание свойств приемников.	12
2.2. Тепловые приемники.	14
2.3. Фотонные или квантовые приемники.	16
2.4. Иммерсионные приемники.	20
2.5. Приемники изображения.	21
2.6. Приемники в ДИК области.	23
3. Измерение характеристик приемников.	24
Заключение	27
Литература	28

Введение.

Под инфракрасной областью понимают участок электромагнитного спектра, лежащий между диапазоном видимого излучения и диапазоном СВЧ — в интервале длин волн $0,75 \div 1000$ мкм. Инфракрасную область спектра принято разделять на четыре части: ближнюю ($\lambda = 0,75 \div 3$ мкм), среднюю ($\lambda = 3 \div 6$ мкм), дальнюю ($\lambda = 6 \div 15$ мкм) и очень далекую ($\lambda = 15 \div 1000$ мкм). Однако, мы, для краткости, будем называть далекой инфракрасной областью последние два поддиапазона (преимущественно последний).

Далекая инфракрасная (ДИК) область спектра, в особенности по сравнению с соседними миллиметровым и инфракрасным диапазонами, используется в физике сравнительно редко и недостаточно обеспечена технически. Поэтому для экспериментов в ДИК области приходится разрабатывать и самим изготавливать аппаратуру в лаборатории. Это касается как источников излучения и элементов оптического тракта, так и приемников ДИК-излучения. Конструкция и характеристики всей этой техники в существенной мере определяют успех экспериментов с излучением в ДИК области спектра.

Эта работа посвящена в основном различным фотоприемникам в ДИК диапазоне, но не лишним будет вкратце упомянуть и о другой ДИК-технике, так как без нее невозможны ни эксперименты в ДИК диапазоне, ни изучение свойств самих фотоприемников, необходимое для осмысленного выбора как типа фотоприемника, так и характеристик фотоприемника данного типа для нужд данного эксперимента.

1. ДИК-техника.

1.1. Источники излучения.

1.1.1. Альтернативные источники излучения.

Тепловые источники излучения. Традиционные тепловые источники излучения в интересующем нас диапазоне длин волн имеют чрезвычайно малую интенсивность. Из них наилучшими характеристиками обладают, пожалуй, ртутные лампы. Однако, излучение этих ламп, эквивалентное в отдельных частях ДИК диапазона излучению черного тела с температурой $\approx 6000^\circ\text{C}$, мало по интенсивности (на длине волны 100 мкм в полосе $\delta\lambda/\lambda = 1\%$ это излучение не превышает $0,5$ мВт/(см²стер)) и некогерентно.

Лазеры на свободных электронах. Лазеры на свободных электронах на основе компактного ускорителя – микротрона хорошо подходят как источники ДИК-инфракрасного излучения и обладают возможностью плавной перестройки по частоте. Однако, существуют трудности в их изготовлении и эксплуатации, связанные с получением электронного луча необходимой интенсивности.

Лазеры с оптической накачкой. Лазеры с оптической накачкой обладают в ИК и ДИК-диапазоне большим количеством достаточно сильных линий, возможностью работы в отпаянном режиме и большим, чем у H_2O -лазера КПД. Однако, возникают сложности из-за пространственного и частотного согласования излучения накачки с настроенным на рабочую длину волны резонатором. Кроме того, такие лазеры имеют несколько меньшую мощность, чем у H_2O -лазера.

1.1.2. Лазер на парах воды.

Лазер на парах воды удобен в качестве источника ДИК излучения, так как имеет достаточно много линий в диапазоне длин волн $28 \div 220$ мкм, обладает стабильными

характеристиками, малой расходимостью пучка, легко перестраивается и относительно прост в изготовлении и эксплуатации. Отличительной особенностью лазера является возможность одновременной генерации излучений с ортогональными линейными поляризациями с разностной частотой от нескольких килогерц до десятка мегагерц. Подробнее остановлюсь на конструкции и характеристиках лазера на парах воды, применяющегося в нашей лаборатории.

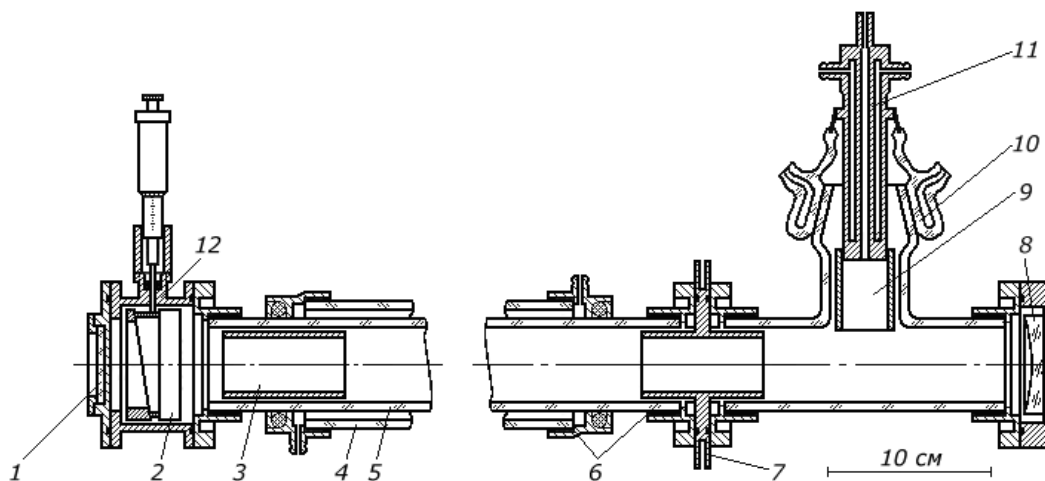


Рис. 1. Конструкция лазера.

Конструкция лазера на парах воды. Схематический чертеж лазера представлен на рис. 1. Лазер состоит из отдельных блоков, которые жестко крепятся друг к другу. Для вакуумного уплотнения служат тонкие резиновые прокладки. Разрядная труба 5 лазера изготовлена из плавленного кварца, имеет длину около трех метров, внутренний диаметр 65 мм и толщину стенок 3 мм. Труба подвешена на двух кольцевых резиновых уплотнениях внутри стеклянной трубы 4, за которую крепится весь лазер. Для охлаждения между кварцевой и стеклянной трубами пропускается вода.

Головки лазера прикрепляются к кварцевой трубе через переходные дюралюминиевые фланцы, приклеенные к торцам трубы составом Stycast-1266 6 с добавкой равного по весу количества кварцевого порошка. Состав заливался разогретым до $\approx 50^\circ\text{C}$ в кольцевой миллиметровый зазор между кварцевой трубой и тонкостенной ($\approx 0,6$ мм) манжетой дюралюминиевого фланца. Такие склейки вполне надежны по своим механическим и вакуумным свойствам, необходимо лишь предотвращать разогрев склеек во время работы лазера. Для этой цели служит медный радиатор 7 с манжетой, экранирующей место склейки от излучения газового разряда.

Во время работы через лазер непрерывно прокачивается газовая смесь: $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$ или $\text{D}_2\text{O} + \text{D}_2$. Лазер откачивается со стороны анода механическим форвакуумным насосом через охлаждаемую жидким азотом ловушку. Рабочая смесь подается через катод, а ее расход и парциальный состав регулируются специально изготовленными игольчатыми вентилями со стабильной регулировочной характеристикой. Оптимальные парциальные давления компонент рабочей смеси подбираются опытным путем и составляют ориентировочно $\approx 0,1$ и $\approx 0,5$ Торр для воды и водорода соответственно. Расход за 8 ч работы лазера: ≤ 1 г воды и ≤ 6 л водорода как для смеси $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$, так и для смеси $\text{D}_2\text{O} + \text{D}_2$.

Лазер питается от источника постоянного напряжения 3 кВ со схемой стабилизации тока, имеющей динамическое сопротивление > 1 МОм и долговременную относительную нестабильность $5 \cdot 10^{-4}$.

Анодом 3 служит тонкостенный цилиндр длиной ≈ 10 см, изготовленный из нержавеющей стали. Конструкция и материал анода не оказывают заметного влияния на характеристики разряда.

Напротив, форма и материал катода практически полностью определяют кратковременную стабильность тока газового разряда, от которой зависит и стабильность излучения лазера. При неудачном выборе конструкции и материала анода эмиссия с его поверхности сопровождается хаотически возникающими микровспышками дугового разряда, а в разрядном токе наблюдаются импульсы с длительностью фронта ≤ 1 мкс. При использовании медных катодов микровспышек не возникает, но создается другая проблема — медь сильно разрыхляется и осаждается на стенках разрядной трубы уже через несколько часов работы лазера. Эту сложность удается обойти выбором формы катода.

Катод смонтирован на охлаждаемом проточной водой стеклянном конусообразном шлифе 10, вакуумно-плотно надетом на шлиф отрезка кварцевой трубы. Для достижения вакуумной плотности соединения использовалась мазь типа рамзаевской. Стеклянный шлиф через коваровый переход соединен пайкой с коаксиальной медной трубкой 11, по внутреннему каналу которой в лазер подается рабочая смесь, а через кольцевой зазор пропускается охлаждающая вода. Длина канала — 150 мм, диаметр — 6 мм. Для пространственного ограничения разряда верхний конец канала заужен до $\varnothing 1$ мм. На нижнем конце коаксиальной трубки при помощи резьбового соединения закреплен катодный цилиндр 9 длиной 70 мм, $\varnothing 24$ мм и толщиной стенок 2 мм, изготовленный из нержавеющей стали. Для электрической развязки охлаждающая вода из водопроводной сети подается по длинным полиэтиленовым шлангам. Разряд с таким катодом обладает достаточно стабильными характеристиками, что характерно для разрядов с так называемыми полыми катодами [5].

Резонатор лазера образован плоским 2 и сферическим 8 зеркалами. Радиус кривизны сферического зеркала 700 см. Расстояние между зеркалами составляло в различных опытах от 320 до 380 см. Сферическое зеркало изготовлялось путем вакуумного напыления алюминия на обработанную по оптическому классу точности заготовку. При диаметрах плоского и сферического зеркал 60 и 70 мм соответственно дифракционными потерями для основного типа колебания резонатора можно пренебречь.

При изготовлении плоских полупрозрачных выходных зеркал лазера использовались тонкие ($5 \div 10$ мкм) никелевые сетки с квадратной ячейкой и периодом $20 \div 60$ мкм, технология электролитического изготовления которых приведена в работе [6]. Для получения максимальной мощности генерации для каждой длины волны необходимо подобрать оптимальную величину прозрачности выходного сеточного зеркала лазера. Для этого, а также для уменьшения омических потерь на зеркале, сетки электролитически частично заравнивались медью. Технология крепления и заравнивания сеток описана в [2]. По оценкам, коэффициент поглощения на таком сеточном зеркале не превышает 0,5 %. Зеркала остаются работоспособными в течение нескольких лет.

Юстировка резонатора проводится с помощью HeNe-лазера с точностью до 1 мрад, после чего дополнительной угловой подъюстировки зеркал обычно не требуется. Многократные напуски атмосферы в лазер и его откачка не приводят к нарушению юстировки. Для настройки резонатора на нужную длину волны генерации используется механизм 12 плоскопараллельного перемещения зеркала с ходом 50 мм с точностью

отсчета 0,5 мкм. В качестве иллюстрации, на рис. 2 показана запись сигнала с фотоприемника при изменении длины лазерного резонатора. Сигнал является периодической функцией с периодом в пол длины волны.

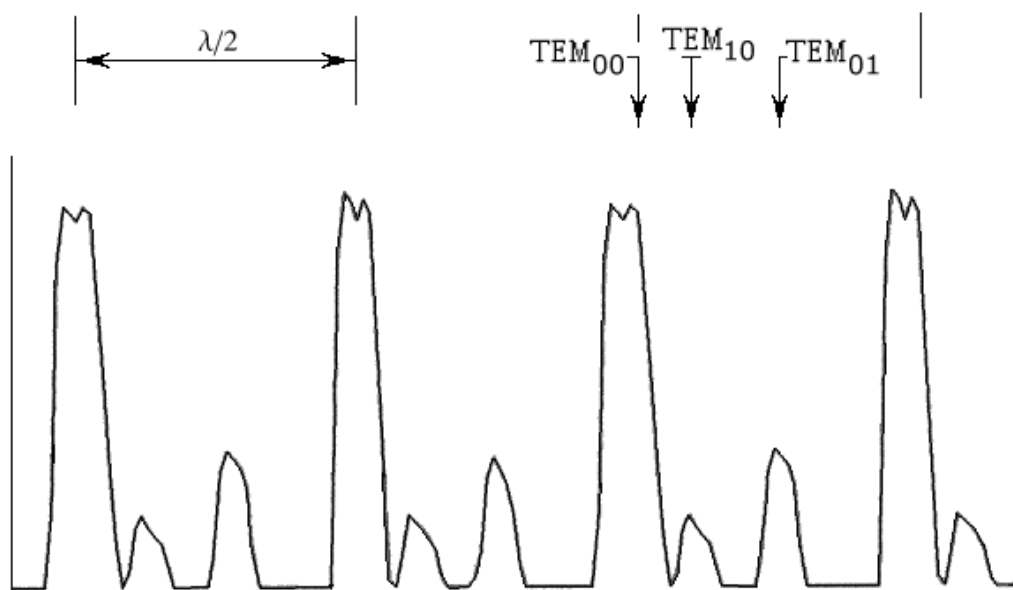


Рис. 2. Зависимость мощности генерации лазера от перестройки длины резонатора. Видны три поперечные (ТЕМ) моды с одной и той же длиной волны $\lambda = 118,6$ мкм.

Для выходных окон 1 лазера используется полиэтилен толщиной 1 мм, который хорошо выдерживает перепад давления в одну атмосферу на отверстиях $\varnothing 50$ мм. Полиэтилен, как показали измерения на спектрофотометре FIS-3 "Hitachi", имеет почти постоянный коэффициент пропускания, равный 85 ± 6 % во всем диапазоне длин волн $25 \div 250$ мкм (см. 1.2.2 и табл. 5).

Линии излучения лазера. Длины волн генерации лазера и энергетические характеристики его излучения представлены в таблице 1 и на рис. 3.

Таблица 1. Длины волн излучения лазера на парах воды.

Длина волны λ , мкм	$\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$									$\text{D}_2\text{O} + \text{D}_2$			
	28,0	33,0	47,2	55,1	78,4	79,1	115	118,6	220	71,9	84,3	107,7	171,7

Регулируя давление и соотношение компонент газовой смеси и настраивая длину резонатора лазера, можно с одним и тем же выходным зеркалом получить генерацию как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн.

Мощность излучения на линии 115,3 мкм резко возрастает при одновременном возбуждении линий 79,1 и 78,4 мкм. То же наблюдается и для линии 55 мкм при одновременном возбуждении линии 28 мкм. Эти результаты согласуются с известной схемой молекулярных уровней H_2O -лазера [8]. Однако, одновременной генерации на линиях простой и тяжелой воды получить не удастся.

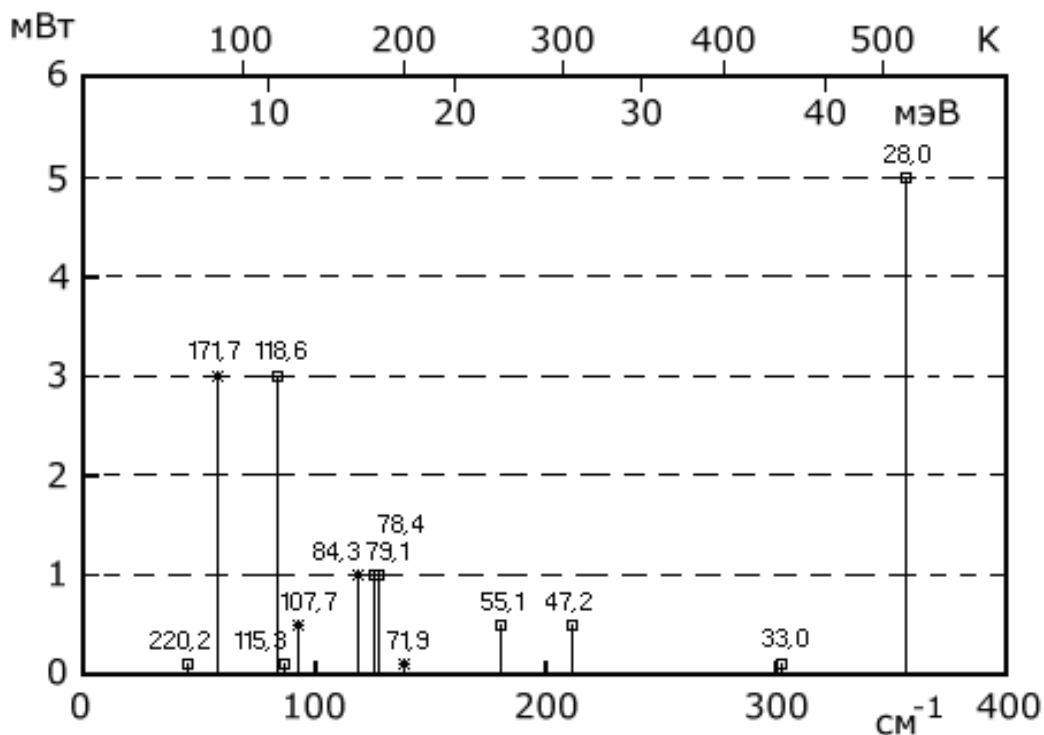


Рис. 3. Энергетические характеристики излучения лазера.

Ось ординат: ориентировочная мощность излучения, мВт;

Ось абсцисс: энергия фотона в см^{-1} , эВ, К.

× — D₂O-лазер,

□ — H₂O-лазер.

Расходимость лазерного луча и распределение мощности по его сечению.

Эти величины определяются типом (модой) возбужденного в резонаторе лазере колебания. Для основного TEM₀₀-колебания распределение мощности по сечению азимутально симметрично и имеет радиальный гауссовский профиль $\sim \exp(-R/r)^2$ с полушириной r , вычисляемой по формулам:

$$r = r_0 \sqrt{1 + \frac{l^2}{LR - L^2}}, \quad r_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{4\pi}} (LR - L^2)^{1/4},$$

где l — расстояние от плоскости рассматриваемого сечения до плоского зеркала, r_0 — полуширина распределения на плоском зеркале, L — расстояние между плоским и сферическим зеркалами, R — радиус кривизны сферического зеркала.

Для нашего лазера $R = 7$ м, $L = 3,4$ м и радиус сечения каустики на плоском зеркале для длин волн 47, 119, 220 мкм составляет соответственно 0,51, 0,81, 1,11 мм. Проведенные измерения подтвердили, что распределение мощности в пределах экспериментальной погрешности совпадает с расчетным.

При широкой апертуре резонатора лазера, кроме основного TEM₀₀-колебания, могут возбуждаться и высшие типы: TEM₀₁ и TEM₁₀, которые легко подавить, помещая в резонатор круглую диафрагму соответствующего размера.

Поляризация излучения лазера. Особенностью лазера является возможность работы в режиме генерации ортогональных поляризаций. Если сеточное зеркало лазера

анизотропно (а этого легко добиться, слегка деформируя сетку растягивая ее) эффективная длина резонатора для различных поляризаций электромагнитной волны оказывается разной. В результате, каждое из собственных колебаний резонатора расщепляется на две ортогонально и линейно поляризованные компоненты, ориентация которых определяется направлением внесенной анизотропии. Это явление можно изучать, деформируя сеточное зеркало непосредственно в работающем лазере.

Было обнаружено, что существенной для возникновения эффекта является квантовая природа участвующих в излучении молекулярных уровней. На линиях с длинами волн 28,0, 33,0 и 84,3 мкм, для которых изменение полного орбитального момента при переходе между соответствующими уровнями молекулы воды $\Delta J = 1$, излучение лазера с описанным выше анизотропным резонатором линейно поляризовано: возбуждается только одна из ортогональных линейно поляризованных компонент, для которой резонатор имеет большую добротность. Вторая компонента эффективно подавляется первой из-за сильной конкуренции. На остальных десяти линиях, для которых $\Delta J = 0$, взаимодействие между компонентами оказывается слабым и возникает режим генерации ортогональных поляризаций.

Этот режим удобно наблюдать, помещая на пути луча лазера поляризатор и регистрируя полученный таким образом на фотоприемнике сигнал в виде биений с разностной частотой. Наблюдаются биения с частотами в диапазоне от нескольких кГц до 300 кГц. Благодаря общему резонатору, обе волны имеют одинаковое пространственное распределение и высокую (≤ 100 Гц) стабильность разностной частоты.

Излучение лазера на всех его длинах волн имеет одинаковую направленность и расходимость. При полной идентичности оптических путей излучения с различными длинами волн существенно, чтобы их регистрация производилась одним фотоприемником. Поскольку в режиме генерации ортогональных поляризаций частоты биений для различных длин волн оказываются разными, их выделение из общего сигнала не представляет труда.

1.2. Элементы оптического тракта.

1.2.1. Зеркала.

Изготовление зеркал в ДИК-области спектра не вызывает сложности, так как металлы на этих длинах волн имеют близкий к единице коэффициент отражения (см. табл. 2) благодаря тому, что коэффициент отражения большинства металлов увеличивается при переходе в длинноволновую часть спектра (ср. табл. 3).

Зеркала (в том числе и «глухое» зеркало лазера) изготавливались вакуумным напылением алюминия на полированную стеклянную поверхность.

Таблица 2. Коэффициент отражения света металлами, $\lambda = 100$ мкм, в % [1]

Al	W	Mo	Fe	Ta	Ti
99,46	99,28	99,14	99,10	98,88	98,30

1.2.2. Линзы и окна.

Стандартно применяемые оптические материалы, такие как различные виды стекла, непрозрачны в диапазоне длин волн $30 \div 300$ мкм. Например, удовлетворительной пропускной способностью ($\alpha \leq 11$, что соответствует примерно 10%-ному пропусканию

Таблица 3. Коэффициент отражения металлических пленок, полученных испарением [3]

Длина волны, мкм	Коэффициент отражения, %				
	Алюминий	Серебро	Золото	Медь	Родий
0,5	90,4	97,7	47,7	60,0	77,4
1,0	93,2	98,9	98,2	98,5	85,0
3,0	97,3	98,9	98,3	98,6	92,5
5,0	97,7	98,9	98,3	98,7	94,5
8,0	98,0	98,9	98,4	98,7	95,2
10,0	98,1	98,9	98,4	98,8	96,0

при толщине образца 2 мм) боросиликатные оптические стекла обладают до длин волн 3 мкм, специально выпускаемые инфракрасные стекла до 7 мкм, материалы типа иртран до 30 мкм, плавленный кварц и сапфир имеют две полосы пропускания: одну до 5 и 7 мкм, другую начиная примерно с 70 и 100 мкм соответственно (см. например, [3]). У кристаллического кварца полоса пропускания в ДИК диапазоне начинается раньше, примерно с 40 мкм.

Поэтому для изготовления линз и окон подходят лишь следующие: полиэтилен, поли-4-метилпентен (ТРХ), кремний и германий высокой чистоты, кристаллический кварц, сапфир. В таблицах 4 и 5 приведены оптические постоянные этих материалов для некоторых длин волн излучения водяного лазера. Данные для полиэтилена были вычислены по спектрограммам, полученным на спектрофотометре FIS-3 "Hitachi" для образцов различной толщины. Данные для кристаллических материалов заимствованы из работы [4].

Показатель поглощения α определяется как величина обратная тому расстоянию, при прохождении которого в среде поток энергии излучения уменьшается в e раз. Тогда прошедший поток определяется выражением $P = P_0 e^{-\alpha x}$, где P_0 — падающий поток, а x — толщина материала.

Линзы. Линзы изготавливались методом горячего прессования. Материалом служила полиэтиленовая пленка. Стопка вырезанных из пленки кружочков закладывалась в прессформу и сжималась лабораторным гидравлическим прессом с усилием 6 тонн. Затем включали нагрев и, как только полиэтилен начинал течь (что было видно по падению давления масла в гидросистеме прессы), резко включали водяное охлаждение прессформы. Температура кристаллизации для полиэтилена всего на несколько градусов превышает температуру размягчения его аморфной фазы. А так как кристаллизация полиэтилена делает его непрозрачным для видимого света, важно, используя исходно прозрачный пленочный материал, не допустить его перегрева.

Линзы — плоско-выпуклые, имеют диаметр 50 мм и фокусное расстояние 13 или 27 см. Линзы наилучшего качества прозрачны для видимого света. По создаваемому ими изображению (например, электрической лампочки) легко судить о фокусном расстоянии и абберациях. Такая прозрачность, а также то, что показатель преломления полиэтилена в диапазоне от видимого до далекого ИК практически постоянен, позволяет юстировать и фокусировать ДИК линзовую систему с помощью обычного HeNe-лазера.

Оптические окна. Оптические окна необходимы для отделения вакуумных объемов в экспериментальной установке. На рис. 4 приведены спектральные зависимости коэф-

Таблица 4. Показатель преломления, n для ДИК материалов.

Длина волны, мкм	33	55	78	84	118	172
λ^{-1} , см $^{-1}$	303	182	128	119	84,7	58
полиэтилен $n(\lambda \rightarrow \infty) = 1,52$	1,7	1,7	1,65	1,65	1,65	1,65
кремний 300К	3,4200	3,4197	3,4191	3,4190	3,4181	3,4169
1,5К	3,3863	3,3856	3,3848	3,3846	3,3838	3,3831
германий 300К	4,006	4,006	4,006	4,006	4,006	4,006
$\rho \geq 40 \Omega \cdot \text{см}$ 1,5К	3,926	3,925	3,925	3,925	3,926	3,927
кварц 300К	–	2,19	2,15	2,14	2,13	2,12
крист., \perp 1,5К	2,35	2,18	2,16	2,13	2,12	2,11
кварц 300К	–	2,24	2,19	2,19	2,17	2,16
крист., \parallel 1,5К	2,52	2,24	2,19	2,18	2,16	2,15
сапфир, \perp 300К	–	3,22	3,13	3,12	3,09	3,08
1,5К	3,65	3,20	3,12	3,11	3,08	3,06
сапфир, \parallel 300К	–	–	–	3,51	3,46	3,49
1,5К	–	3,64	3,48	3,47	3,41	3,39

Таблица 5. Показатель поглощения, α , см $^{-1}$ для ДИК материалов

Длина волны, мкм	33	55	78	84	118	172
λ^{-1} , см $^{-1}$	303	182	128	119	84,7	58
кремний 300К	2,4	1,3	1,0	1,0	0,8	0,6
1,5К	1,5	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2
германий 300К	11,1	2,9	1,6	1,8	0,8	0,6
$\rho \geq 40 \Omega \cdot \text{см}$ 1,5К	5,36	1,2	0,5	0,4	0,2	0,2
кварц 300К	–	5,8	10,7	1,6	0,9	0,6
крист., \perp 1,5К	7,2	2,5	3,1	1,5	0,9	0,6
кварц 300К	–	3,0	1,1	0,9	0,4	0,2
крист., \parallel 1,5К	5,7	0,8	1,4	1,3	0,5	0,06
сапфир, \perp 300К	–	–	14	12	6,2	3,0
1,5К	–	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1
сапфир, \parallel 300К	–	–	–	21	11	4,4
1,5К	–	3,7	1,3	1,0	0,4	0,2

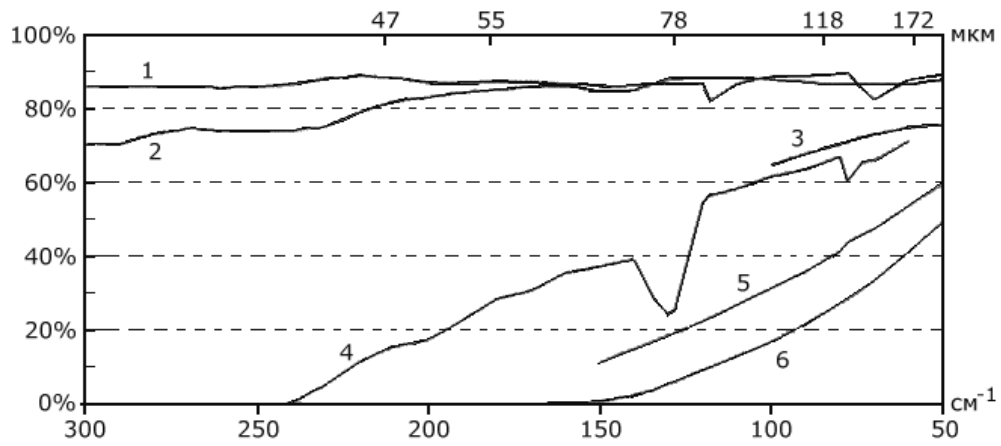


Рис. 4. *Спектральное пропускание пластин толщиной h из:*

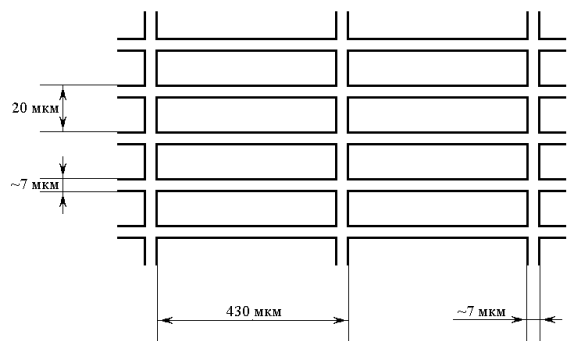
- 1 — полиэтилена, $h = 0,8$ мм;
- 2 — поли-4-метилпентена (TPX), $h = 1$ мм;
- 3 — тефлона, $h = 1,8$ мм;
- 4 — кварца, $h = 2$ мм (вырезанного \perp оптической оси);
- 5 — сапфира, $h = 1$ мм (вырезанного \perp оптической оси);
- 6 — плавленого кварца, $h = 1$ мм.

коэффициента пропускания для пластин из использовавшихся в качестве окон материалов. Спектры были сняты на спектрофотометре FIS-3 "Hitachi". Заметим, что при указанных на рис. толщинах пластин, условие пространственно-временной когерентности в спектрофотометре не выполняется и отражение света от двух поверхностей пластины оказывается некогерентным. При работе же с лазерным излучением интерференционную зависимость коэффициента пропускания от толщины пластины для материалов с малым поглощением необходимо учитывать.

1.2.3. Поляризаторы.

В качестве поляризаторов в ДИК диапазоне можно использовать металлические сетки с прямоугольной ячейкой. Типичный размер ячейки такой сетки 20×430 мкм спектрограмма коэффициента пропускания поляризатора, снятая на спектрофотометре FIS-3 "Hitachi", приведена на рис. 5.

Сетка с прямоугольной ячейкой оптически эквивалентна двум одномерным структурам наложенным друг на друга. От структуры с периодом 20 мкм (в рассматриваемом спектральном диапазоне) компонента излучения, поляризованная вдоль проволочек структуры, практически полностью зеркально отражается; другая же, ортогонально поляризованная компонента взаимодействует в основном со структурой с периодом 430 мкм, на которой она слабо дифрагирует.



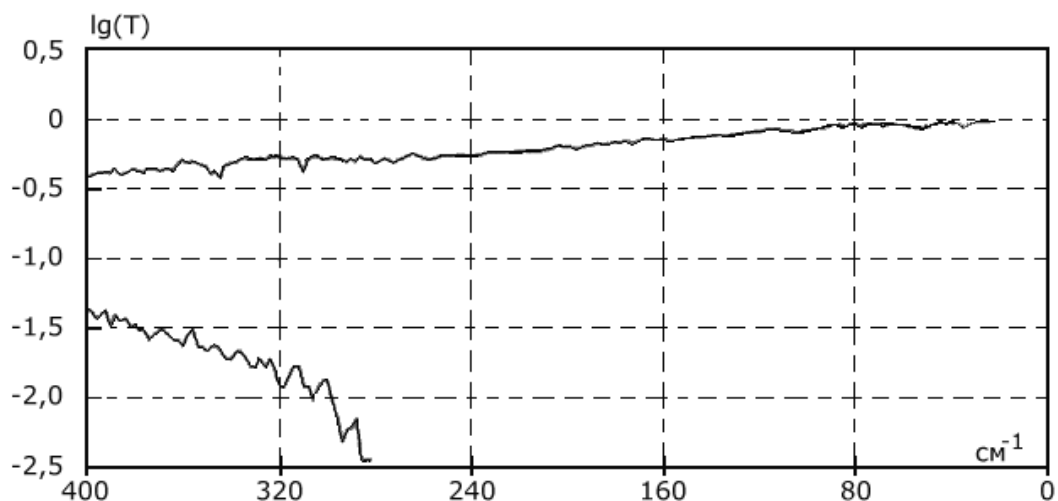


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента пропускания поляризатора. Поляризатор изготовлен из сетки с ячейкой $20 \times 430 \text{ мкм}^2$. Приведены графики для двух случаев поляризации проходящего излучения.

2. Приемники излучения.

Все приемники инфракрасного излучения являются по существу преобразователями энергии инфракрасного излучения в какую-либо удобную для непосредственного измерения форму — электрический ток, изменение того или иного физического свойства приемника или почернение фотоземлюли.

По способу образования изображения приемники можно разделить на приемники, дающие изображение, как фотопленка, и точечные, или одноэлементные приемники. При использовании одноэлементного приемника для создания изображения необходима последовательная развертка картины. Одноэлементный приемник, помещенный в плоскость изображения, реагирует на среднюю облученность изображения в пределах участка, занимаемого чувствительной поверхностью приемника. Приемник, дающий изображение, может быть представлен состоящим из большого числа точечных приемников, каждый из которых реагирует на излучение отдельной точки изображения.

Часто бывает удобно классифицировать приемники, исходя из механизма процесса обнаружения, на две группы: *тепловые*, в которых тепловое воздействие падающей радиации вызывает изменение тех или иных свойств приемника, и *фотонные*, или квантовые, приемники, в которых имеет место взаимодействие между падающими фотонами и электронами материала приемника. Поэтому чувствительность теплового приемника пропорциональна поглощенной энергии, а фотонного приемника — числу поглощенных фотонов.

Некоторые из приемников излучения, используемых в диапазоне $0,2 \div 50 \text{ мкм}$, приведены на рис. 6. Стрелки указывают интервал длин волн, в котором эти приемники имеют чувствительность не ниже 20 % чувствительности в максимуме спектральной характеристики. Для сравнения приведена кривая пропускания атмосферы. Большинство приемников, показанных на рис. 6 имеют весьма ограниченный интервал чувствительности и, кроме того, многие из них работают лишь в условиях глубокого охлаждения.

Остановимся чуть подробнее на разных типах приемников, но сначала рассмотрим величины, с помощью которых характеризуют свойства приемников.

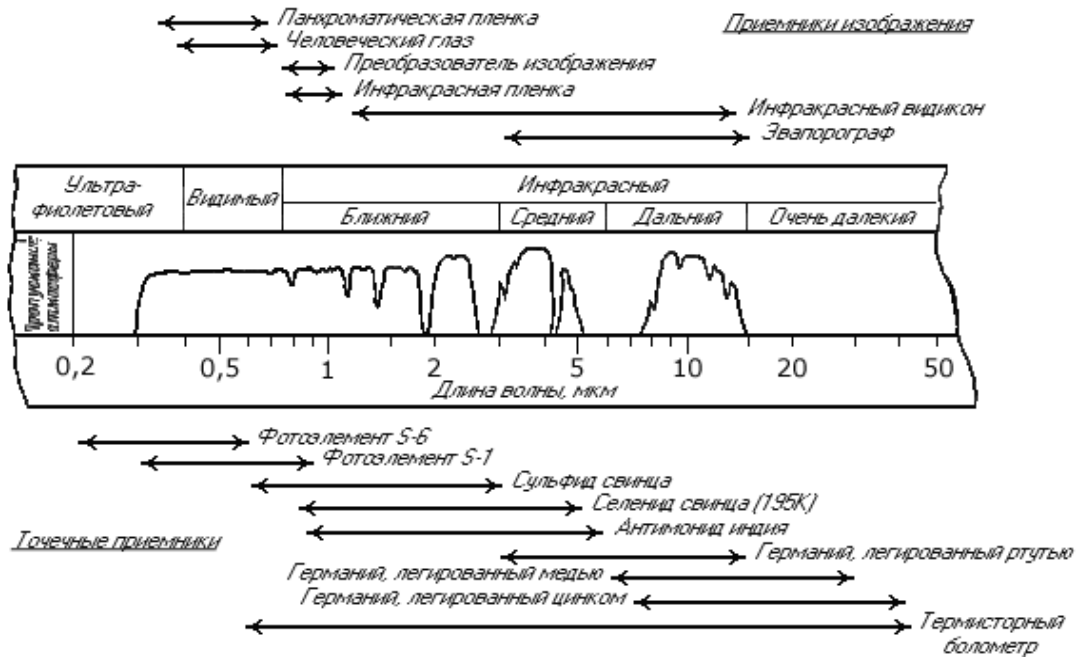


Рис. 6. Типичные приемники для диапазона 0,2–50 мкм

Приемники работают при температуре 300 К, кроме антимионида индия при 77 К, германия, легированного ртутью при 30 К, медью при 12 К и цинком при 4,2 К.

2.1. Описание свойств приемников.

До сих пор нет согласованной терминологии, касающейся приемников. Такое положение вещей объясняется отчасти тем, что для адекватного сравнения свойств различных приемников приходится подробно указывать условия при которых эти свойства были измерены.

Чувствительность. Чувствительность определяется как отношение выходного сигнала к мощности на входе. Так как большинство инфракрасных приемников используется с прерывателем, то на входе и на выходе приходится иметь дело с переменными величинами. Выходной сигнал характеризуют его среднеквадратичной величиной. Так как выходной сигнал может содержать возникающие при прерывании гармоники более высокого порядка, они должны быть исключены, а измерять следует лишь составляющую основной частоты. Входной сигнал также выражается в среднеквадратичных единицах колебаний основной частоты.

Чувствительность \mathcal{R} равна

$$\mathcal{R} = \frac{V_s}{H A_d} \quad [\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}],$$

где V_s — среднеквадратичная величина напряжения сигнала основной частоты; H — среднеквадратичная величина облученности на приемнике, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; A_d — площадь чувствительной поверхности приемника, см^2 . Необходимо оговаривать и другие условия измерений, главными из которых является выбор рабочей точки и указание, измеряется ли напряжение сигнала на приемнике при разомкнутой цепи или на сопротивлении нагрузки. Обычно выбирают рабочую точку так, чтобы обнаружительная способность

была максимальной, и понимают под сигналом величину напряжения, измеренную для разомкнутой цепи.

Постоянная времени. Время срабатывания приемника характеризуется *постоянной времени*, т.е. временем, за которое выходной сигнал достигает 0,63 ($0,63 = 1 - 1/e$) полной величины после резкого изменения облученности.

Многие приемники реагируют на изменение облученности по простой экспоненте. Чувствительность, частота прерывания и постоянная времени связаны соотношением

$$\mathcal{R}_f = \frac{\mathcal{R}_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}},$$

где \mathcal{R}_f — чувствительность на частоте прерывания f ; \mathcal{R}_0 — чувствительность на нулевой (очень низкой) частоте; τ — постоянная времени приемника.

На низких частотах прерывания ($f \ll \pi\tau/2$) чувствительность не зависит от частоты; это часто используют для того, чтобы исключить влияние частоты прерывания при измерении чувствительности.

Эквивалентная мощность шума. Хотя чувствительность приемника, определенная при $f \rightarrow 0$, и является удобным параметром, она не дает представления о минимальной величине обнаруживаемого потока лучистой энергии. Для определения этой величины необходимо знать значение величины шума на выходе приемника. Удобный способ учета величины шума — использование понятия эквивалентной мощности шума $P_{\text{пор}}$, т.е. потока радиации, необходимого для получения выходного сигнала, равного шуму приемника. Так как измерение сигнала при отношении сигнала к шуму, равном единице, затруднительно, обычно измерения производят при большом сигнале и подсчитывают $P_{\text{пор}}$ по формуле

$$P_{\text{пор}} = \frac{H A_d}{V_s/V_n},$$

где $P_{\text{пор}}$ выражено в ваттах, а V_n — среднеквадратичная величина шума на выходе детектора.

При таком расчете полагается, что выходной сигнал — линейная функция входного сигнала. Практически такое предположение оказывается верным, если только интервал изменения входного сигнала не слишком велик. Поэтому формула остается верной для значений отношения сигнала к шуму не превосходящих 10^3 . Должна быть оговорена и полоса частот измерительной схемы.

Эквивалентная облученность. Для описания свойств системы в целом часто используется и эквивалентная шуму облученность $H_{\text{пор}}$, т.е. облученность, необходимая для получения выходного сигнала, равного шуму приемника:

$$H_{\text{пор}} = \frac{H}{V_s/V_n},$$

где $H_{\text{пор}}$ выражено в $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Величина $H_{\text{пор}}$ имеет смысл облученности входного зрачка, необходимой для получения на выходе отношения сигнала к шуму, равного единице.

Обнаружительная способность. При сравнении нескольких приемников считают, что приемник, имеющий самый высокий выходной сигнал при данной облученности, имеет лучшую чувствительность. Однако, если приемники сравнивают по способности к обнаружению минимального потока излучения, то лучший приемник тот, который

обладает наименьшей $P_{\text{пор}}$, т.е. создается такое положение вещей, когда по мере усовершенствования приемника основной параметр, характеризующий его качество, уменьшается. Иногда считают, что логичнее использовать величину, обратную $P_{\text{пор}}$, которую и называют *обнаружительной способностью*. При этом лучший приемник характеризуется более высокой обнаружительной способностью. Обнаружительная способность

$$D = \frac{1}{P_{\text{пор}}},$$

где D выражается в Вт^{-1} .

Обнаружительная способность зависит от следующих величин: длины волны падающего излучения, температуры приемника, частоты прерывания, тока питания приемника, площади приемника, полосы частот для обнаружения шума приемника. Определенной теоретической зависимости обнаружительной способности от длины волны и температуры приемника не установлено. Следовательно, эти величины нужно оговаривать при указании обнаружительной способности приемника.

Чтобы устранить колебания чувствительности из-за частоты прерывания, выбирают достаточно низкую частоту, при которой отсутствует влияние на результаты измерений постоянной времени приемника (это условие соблюдается при $f \ll \pi\tau/2$). Рабочую точку выбирают таким образом, чтобы обнаружительная способность была максимальной (это нетрудно подобрать экспериментально).

Обнаружительная способность обратно пропорциональна квадратному корню из площади приемника, т.е.

$$D\sqrt{A_d} = \text{const.}$$

Так как шум на выходе приемника содержит много гармоник разной частоты, напряжение шума зависит от полосы частот измерительного устройства. Предполагая, что средний квадрат напряжения шума, отнесенный к полосе частот, не зависит от частоты (например, тепловой шум $\bar{u}^2 = 4kTR\Delta f$), получим, что обнаружительная способность меняется обратно пропорционально квадратному корню из полосы частот Δf .

Используя это предположение вводят удельную обнаружительную способность, т.е. обнаружительную способность в полосе частот 1 Гц при площади приемника 1 см^2 :

$$D^* = D(A_d\Delta f)^{1/2}.$$

При измерении D^* , $P_{\text{пор}}$ или $H_{\text{пор}}$ в качестве источника обычно используют черное тело. Для уточнения условий измерения принято за величиной D^* в скобках указывать температуру черного тела и частоту прерывания. Например, $D^*(500 \text{ К}, 840)$ означает, что измерения проводились с черным телом при 500 К и частоте прерывания 840 Гц. Так как характеристики многих приемников зависят от длины волны падающего излучения, то часто измеряют спектральную величину D^* . В этом случае первое число в скобках относится к длине волны монохроматического источника, с которым проведены измерения, например, $D^*(3,7 \text{ мкм}, 840)$. Если измерения проведены на максимуме чувствительности, то пишут $D^*(\text{макс.}, 840)$.

2.2. Тепловые приемники.

Вследствие теоретически одинаковой чувствительности этих приемников во всем спектральном диапазоне их часто используют для калибровки других приемников излучения. Однако свойства реальных чернящих покрытий приводят к отличию их спектральной чувствительности от константы. Постоянная времени таких приемников достаточно велика и составляет несколько миллисекунд или более.

Термопара. Простейший тепловой приемник — зачерненный элемент, соединенный с устройством, чувствительным к возрастанию температуры в результате поглощения приемником падающей энергии. Одним из наиболее простых таких устройств является *термопара*. Хорошая термопара обнаруживает минимальное изменение температуры порядка 10^{-6}°C . Зачерненный приемник, являющийся чувствительным элементом, подсоединяется непосредственно к спаю термопары. Второй спай термопары контактирует с массивным металлическим держателем, обеспечивающим неизменную температуру. Приемник обычно изготавливают из черненой золотой фольги толщиной примерно 0,5 мкм. Электрическое сопротивление большинства термопар очень мало — типичные значения лежат в пределах $1 \div 10$ Ом. Постоянная времени — от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Постоянная времени термопары может быть выражена в виде

$$\tau \approx \frac{C}{\Lambda},$$

где C — теплоемкость спаю с чувствительным элементом, Λ — скорость, с которой устройство теряет энергию, и составляет порядка 25 мсек. Таким образом, для малой постоянной времени необходима низкая теплоемкость и эффективная связь приемника с теплоотводящим блоком. Чувствительность

$$\mathcal{R} \approx \frac{\tau}{C}.$$

Из этого соотношения следует, что снижать постоянную времени можно только за счет потери чувствительности. Эти соотношения применимы также к другим тепловым приемникам.

Термостолбик. Несколько термопар могут быть соединены последовательно, образуя *термостолбик*. Преимущество такой конструкции в том, что термо-ЭДС каждого спаю складываются, соответственно повышается чувствительность. Кроме того, последовательное соединение термопар повышает выходное сопротивление приемника, облегчая его согласование с усилителем. В связи с большой постоянной времени (несколько секунд) в прерывистом режиме облучения термостолбики использовать затруднительно.

Болометр. Тепловые приемники, изменяющие свое электрическое сопротивление под воздействием падающего на них излучения, называются *болометрами*. В своем первоначальном виде они состояли из тонкой зачерненной полоски платиновой фольги, причем полоска устанавливалась в одном из плеч моста Уитстона. В современных вариантах болометров используются материалы, имеющие температурный коэффициент сопротивления примерно 0,5 %/К. Зачерненная полоска служит чувствительной площадкой приемника, любые изменения температуры которой приводят к разбалансу моста. Типичный болометр состоит из двух металлических элементов (по возможности одинаковых). Один, называемый *рабочим элементом*, подвергается воздействию падающей радиации; другой, называемый *компенсационным элементом*, тщательно экранирован от падающего излучения. При использовании этих элементов в двух плечах моста медленные изменения температуры приемника не приведут к разбалансу моста.

Термисторный болометр. В *термисторном болометре* элементы представляют собой тонкие слои, образованные спеканием смеси окислов металлов. Эти слои помещены на электрически изолированную подложку, установленную в металлический

теплоотводящий блок. Используя подложки, имеющие различные температурные характеристики изменяют постоянную времени от 1 до 50 мсек и достаточно большое сопротивление. Коэффициент сопротивления таких приемников доходит до 4,2 %/К. Так как материал термистора сам по себе не является хорошим поглотителем, он должен быть зачернен в процессе изготовления.

Сверхпроводящий болометр использует резкое изменение сопротивления, наблюдаемое при переходе от нормального состояния к сверхпроводящему. В переходном диапазоне, составляющем доли градуса, температурный коэффициент сопротивления достигает 5000 %/К. Необходимость поддержания температуры в переходном диапазоне сильно ограничивает возможности их применения.

Угольный болометр используется для спектроскопии в дальнем ИК-диапазоне. Чувствительным элементом этого болометра является пластинка угольного сопротивления, охлажденная до 2,1 К. Его обнаружительная способность D^* на порядок выше, чем у термисторного болометра, но необходимость охлаждения не всегда удобна.

Германиевый болометр — монокристалл германия, легированный галлием и охлажденный до 2,1 К. Его обнаружительная способность D^* почти на два порядка выше, чем у термисторного болометра, а так как его спектральная характеристика простирается до 1000 мкм и далее, то этот болометр позволяет регистрировать как ИК-излучение, так и излучение субмиллиметрового диапазона.

Пневматический приемник (элемент Голея). *Пневматический приемник* основан на принципе газового термометра. Он состоит из поглотителя излучения, расположенного в газовой камере. Поглотитель нагревается падающим излучением и нагревает газ в камере. Возрастание давления наблюдается оптически по отклонению маленького гибкого зеркала. Эти приемники обеспечивают получение чувствительности лишь в несколько раз отличающейся от теоретической предельной величины. Однако они хрупки, имеют большую постоянную времени и достаточно трудны в обращении.

Калориметрический приемник. *Калориметрический приемник* сделан по принципу модели черного тела. Используется как эталон для определения спектральной характеристики других приемников. Основной его частью является миниатюрный малоинерционный калориметр, выполненный в виде конической полости. Подсчеты показывают, что излучательная способность и, следовательно, коэффициент поглощения этого приемника имеют величину не менее 0,995 от видимого диапазона до 40 мкм.

2.3. Фотонные или квантовые приемники.

Большинство фотонных приемников имеет чувствительность на один-два порядка выше, чем чувствительность тепловых приемников. Однако, большинство из них может функционировать только в условиях глубокого охлаждения. Вследствие прямого взаимодействия между падающими фотонами и электронами материала приемника время срабатывания фотонных приемников очень мало (в большинстве случаев несколько микросекунд) по сравнению с несколькими миллисекундами у тепловых приемников. Спектральная чувствительность фотонных приемников в отличие от чувствительности термических приемников меняется с изменением длины волны.

Результат взаимодействия между фотонами и веществом называется *фотоэффектом*. Если фотон обладает достаточно большой энергией, то электрон при взаимодействии с фотоном может приобрести энергию, достаточную для выхода из поверхности. Это называется *внешним фотоэффектом*. Для длин волн, больших чем 1,2 мкм, энергия электронов не достаточна, чтобы они смогли преодолеть поверхностные силы.

Существуют, однако, явления внутреннего фотоэффекта, в которых энергия, переданная фотоном, переводит электрон из заполненной зоны в зону проводимости и приводит к образованию заряженного носителя. Такие явления наблюдаются, обычно, в полупроводниках. Если материал — собственный (чистый) полупроводник, фотон образует пару электрон–дырка, содержащую носители обоих знаков. В несобственных (примесных) полупроводниках фотоны образуют носители какого-либо одного знака. Если к приемнику приложено электрическое поле, изменение числа носителей приводит к протеканию через приемник тока. Это явление называется *фотопроводимостью*.

Если фотон вызывает образование электронно-дырочной пары вблизи р–п-перехода, электрическое поле на переходе разделяет носители, вызывая фото-ЭДС. Это называется *фотовольтаическим* эффектом. Для фотовольтаического приемника не требуется никакого внешнего напряжения, т.к. это напряжение создается самим р–п-переходом.

Когда пары электрон–дырка образуются вблизи поверхности полупроводника, они имеют тенденцию диффундировать в глубь материала и тем самым восстанавливать электро-нейтральность. Во время этого процесса заряженные носители могут разделяться сильным магнитным полем, создавая фото-ЭДС. Это явление известно как *фотоэлектромагнитный* эффект.

Приемник с внешним фотоэффектом. Кинетическая энергия фотоэлектрона, покинувшего поверхность, как известно, равна разности между энергией, полученной от фотона, и работой выхода:

$$E' = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A.$$

Так как энергия фотона изменяется с частотой, имеется низкочастотная (длинно-волновая) граница фотоэффекта, за пределами которой энергия фотонов меньше работы выхода. Среди элементов, обладающих фотоэмиссией, наиболее низкая работа выхода у щелочных металлов. Цезий имеет самую низкую работу выхода, равную 1,9 эВ, что соответствует пороговой длине волны 0,65 мкм. Поверхности, образованные несколькими материалами, могут обладать более низкой работой выхода. Предельно низкая величина 0,98 эВ соответствует серебряно-кислородно-цезиевой поверхности. Эта поверхность, обычно называемая фотокатодом типа S-1, имеет пороговую длину волны 1,25 мкм. Характеристики приемников с внешним фотоэффектом лишь немного заходят в ближнюю ИК-область и редко используются в инфракрасной технике.

Фотопроводящие приемники. В наиболее распространенных приемниках, работающих в ИК-диапазоне, использованы различные виды фотоэффекта в полупроводниках. Это возможно благодаря тому, что в полупроводниках запрещенная зона относительно узка, она может быть равна долям электронвольта по сравнению с 3 эВ или более для изолятора.

В результате даже при комнатной температуре некоторые валентные электроны приобретают энергию, достаточную для перехода через запрещенную зону в зону проводимости. Состояния, ранее занятые этими электронами положительно заряжены и

называются *дырками*. При наличии электрического или магнитного поля дырки передвигаются аналогично электронам, но в противоположном направлении. Следовательно, в чистом полупроводнике переход электрона в зону проводимости создает электронно-дырочную пару носителей заряда, повышающую проводимость. Этот вид проводимости носит название *собственной*, а материал — соответственно собственный или чистый полупроводник. Примером таких материалов являются чистые кристаллы кремния и германия.

Валентные электроны могут получить от падающих фотонов энергию, достаточную для образования электронно-дырочной пары. В результате под воздействием фотонов меняется проводимость. Приемники, основанные на этом явлении, называются *фотосопротивлениями*. Как и в случае внешнего фотоэффекта, существует длинноволновая граница внутреннего фотоэффекта. Пороговая длина волны

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g},$$

где в знаменателе стоит E_g — ширина запрещенной зоны.

Все известные приемники с собственной проводимостью имеют ширину запрещенной зоны не менее 0,18 эВ (при комнатной температуре), что соответствует области длин волн до 7 мкм. Как правило ширина запрещенной зоны при охлаждении снижается и пороговая длина волны немного увеличивается.

Приемниками с собственной фотопроводимостью являются кремний, германий, сульфид и селенид свинца, арсенид индия, антимонид индия.

Для сдвига порога в сторону более длинных волн необходимы материалы с шириной запрещенной зоны, меньшей, чем у собственных полупроводников. Обычным способом понижения ширины запрещенной зоны является *легирование*, т.е. введение небольших примесей других чистых полупроводников. Полученные материалы называют *несобственными* или *примесными* полупроводниками.

В несобственных материалах проводимость определяется лишь одним типом носителя — электронами в материале n-типа и дырками в материале p-типа.

Во многих инфракрасных приемниках с несобственной фотопроводимостью в качестве основного материала используют германий. На энергетической диаграмме энергетический уровень акцепторной примеси лежит не на много выше верхнего уровня валентной зоны основного материала. Поэтому для перехода валентного электрона на уровень дырки, создаваемой примесью, требуется очень небольшая энергия. Дырки, возникающие в валентной зоне, становятся зарядоносителями и образуется материал p-типа. Хотя в принципе могут использоваться материалы как n-типа, так и p-типа, но практически почти во всех инфракрасных приемниках используется лишь последний. Типичные примесные приемники на основе германия активированы золотом, медью или цинком, хотя с германием могут использоваться и многие другие легирующие примеси. Наибольшая пороговая длина волны (около 140 мкм) обеспечивается примесью бора.

Антимонид индия — единственный материал, обеспечивающий получение еще более низких энергетических уровней примеси. При использовании в сочетании с магнитным полем такие приемники чувствительны до 8000 мкм. Таким образом эти приемники позволяют ликвидировать разрыв между оптическим и СВЧ-диапазонами спектра.

Для достижения высокой чувствительности приемника необходима малая проводимость в отсутствие фотонного возбуждения, т.е. число носителей, возбужденных любым другим способом кроме облучения полезным сигналом должно быть сведено к минимуму. Для получения чувствительности в длинноволновой области материал приемника

должен иметь узкую запрещенную зону. К сожалению, чем уже запрещенная зона, тем больше число термически возбужденных носителей; однако их количество может быть снижено охлаждением приемника. Фактически большинство фотосопротивлений, обладающих чувствительностью при $\lambda > 3$ мкм, работают лишь при охлаждении. Причина заключается в том, что при комнатной температуре все носители термически возбуждены, а носители способные возбудиться фотонами отсутствуют. В первом приближении можно считать, что для фотосопротивлений, чувствительных к длинам волн до 3 мкм, никакого охлаждения не требуется, в диапазоне 3–8 мкм необходимо умеренное охлаждение (до 77 К), а для фотосопротивлений, работающих за 8 мкм, необходимы очень низкие температуры — порядка нескольких градусов Кельвина. Фотоны фона могут создавать паразитные зарядоносители. Этот эффект может быть снижен экранированием приемника.

Для обеспечения высокой чувствительности необходим также высокий квантовый выход. Этот вывод очевиден: желательно наиболее эффективно использовать все фотоны полезного сигнала. Полупроводящий материал, используемый для изготовления фотоприемников относительно прозрачен, так что часть фотонов проходит сквозь материал без взаимодействия с веществом. Если прошедшие фотоны могут быть снова направлены в приемник, они могут повысить чувствительность. Это можно реализовать помещением за приемником зеркала или использованием интегрирующей полости, обеспечивающей возвращение рассеянных фотонов в приемник. Для предотвращения потерь на отражение от фронтальной поверхности могут использоваться просветляющие покрытия.

Фотовольтаические приемники. Фотовольтаический приемник содержит р–п-переход, образованный в собственном полупроводнике. Падающие фотоны создают электронно-дырочные пары, которые в свою очередь разделяются электрическим полем на переходе, создавая фото-ЭДС.

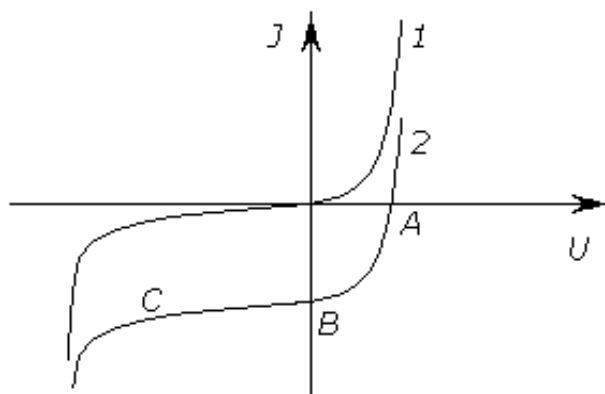


Рис. 7. Вольтамперная характеристика приемника с р–п-переходом

1 — облучение отсутствует;

2 — при облучении.

Типичная нелинейная вольтамперная характеристика фотовольтаического приемника приведена на рис.7. Для приемника экранированного от падающего излучения вольтамперная характеристика имеет вид кривой 1. Падающее излучение смещает эту кривую в положение 2. При эксплуатации такого приемника положение рабочей точки

может выбираться в широком диапазоне. Если приемник предназначен для работы с высоким импедансом (рабочая точка A), падение напряжения на приемнике соответствует режиму разомкнутой цепи.

Работа в режиме малого импеданса соответствует рабочей точке B , и при этом ток равен току короткого замыкания. Наконец, на приемник может быть подано обратное напряжение смещения (точка C); приемник является высокоомным элементом, и напряжение сигнала снимается с нагрузочного сопротивления, включенного последовательно с приемником.

Чаще всего, фотовольтаические приемники обладают максимальной обнаружительной способностью, когда работают в режиме короткого замыкания при нулевом напряжении смещения (в точке B).

Фотовольтаический приемник является самогенерирующим устройством, не нуждающимся в источнике питания. Иногда это приводит к существенному упрощению схемы. Теоретический предел обнаружительной способности у фотовольтаических приемников на 40 % выше, чем у фотосопротивлений.

В связи с требованием, чтобы падающие фотоны вызывали появление электронно-дырочных пар, для фотовольтаических приемников пригодны только собственные полупроводниковые материалы. Эти материалы не обладают чувствительностью к излучению с длиной волны больше 7 мкм. Наиболее распространенные фотовольтаические приемники — приемники из кремния, арсенида индия и антимонида индия.

Фотоэлектромагнитный приемник. Фотоэлектромагнитный приемник содержит пластинку, вырезанную из куска полупроводникового материала и магнит. Падающие фотоны образуют электронно-дырочные пары, которые разделяются наложенным внешним магнитным полем. Подобные приемники чувствительны до 7 мкм без охлаждения и очень малым временем срабатывания, но используются редко, главным образом из-за того, что их обнаружительная способность относительно низка по сравнению с фотосопротивлениями или фотовольтаическими приемниками.

2.4. Иммерсионные приемники.

Весьма простым способом повышения чувствительности является применение линзы, находящейся в оптическом контакте с поверхностью приемника. Поясним принцип иммерсии. Пусть на приемник сфокусировано два луча: один попадает на его центр, другой — на край. Поместим теперь перед приемником полусферическую линзу из материала с показателем преломления n_s . Линза отделена от приемника воздушным зазором в сотые доли миллиметра. Так как лучи от края линзы падают на приемник под значительным углом, они могут испытать полное внутреннее отражение от плоской поверхности линзы и не попасть на приемник. Это отражение можно предотвратить, если создать оптический контакт между приемником и плоской поверхностью линзы. Подобный приемник называют *иммерсионным*. Если приемник находится в оптическом контакте с линзой, даже сильно наклоненные лучи попадут на приемник, т.к. воздушный зазор, в котором может происходить полное внутреннее отражение, отсутствует. Луч, направленный в центр приемника, проходит по прежнему пути; так как поверхность линзы концентрична относительно центра приемника, этот луч не преломится. Луч, ранее направленный к краю приемника, преломится линзой и сфокусируется значительно ближе к центру приемника. В результате прежний размер приемника может

быть уменьшен, но будет обеспечено прежнее поле зрения. Снижение размера приемника важно потому, что внутренние шумы пропорциональны корню из его площади.

При использовании в качестве иммерсионного элемента концентрической линзы размеры приемника уменьшаются по обеим координатам и шум уменьшается в n_s раз, отношение сигнала к шуму и D^* возрастают в n_s раз. При использовании гиперполусферической линзы шум уменьшается в n_s^2 раз, но эта конструкция не может быть использована со светосильной оптикой (относительное отверстие не больше $2/n_s$).

2.5. Приемники изображения.

Характеристики современных приемников изображения недостаточно высоки, чтобы они могли конкурировать с мозаичными устройствами, использующими комбинацию точечных приемников с механическим или оптическим сканированием.

Инфракрасная пленка. При использовании некоторых чувствительных красителей могут быть созданы фотоматериалы с чувствительностью до 1,3 мкм. Такие сенсibilизаторы используются в спектроскопических фотопластинках; инфракрасная пленка, используемая в обычной фотографии не чувствительна за пределами длин волн 0,9 мкм.

Электронно-оптический преобразователь изображения. Электронно-оптический преобразователь — это фотоэмиссионный прибор, который преобразовывает инфракрасное изображение в видимое. Изображение объекта проектируется на кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод, который имеет максимальную чувствительность при 0,85 мкм и пороговую длину волны около 1,3 мкм. Фотоэлектроны, вылетающие с катода, образуют электронное изображение, проектируемое с помощью электронной оптики на люминесцентный экран, который начинает светиться при электронной бомбардировке. Таким образом инфракрасное изображение преобразуется в видимое.

Видикон. Видикон — это небольшая передающая телевизионная трубка, в которой электронный луч сканирует фотопроводящую мишень. Он состоит из вакуумной колбы с плоским оптическим прозрачным торцевым стеклом. На внутренней поверхности этого стекла находится прозрачная электропроводящая пленка, являющаяся сигнальным электродом и подложкой тонкопленочного фотопроводящего слоя. На противоположном конце колбы находится электронная пушка. Электронный луч развертывается по слою фотосопротивления. Потенциал сигнальной пластины примерно на 20 В выше потенциала катода. При отсутствии облучения потенциал мишени поддерживается электронным лучом, равным потенциалу катода. Фотоны, падающие на участок мишени, освобождают носители, что приводит к локальному изменению проводимости, снижая таким образом разность потенциалов между передней и задней поверхностями мишени. Затем при сканировании электронным лучом через этот участок на заднюю поверхность мишени попадает достаточное количество электронов, чтобы привести мишень в первоначальное равновесное состояние. К сигнальному электроду подсоединена электрическая схема, в которой импульс, генерируемый при электронной зарядке мишени, превращается в сигнал.

Для изготовления мишени могут быть использованы различные фотопроводящие материалы. Спектральная характеристика и условия охлаждения аналогичны имеющим место для фотосопротивлений. Существуют мишени чувствительные до 13 мкм.

Преимущество видикона состоит в том, что он является накопительным, или суммирующим устройством. Разность потенциалов между передней и задней поверхностями мишени в данной точке определяется числом фотонов, попавших в эту точку между двумя моментами сканирования электронным лучом. Продольное растекание заряда малó, изменение проводимости локализовано и сфокусированный электронный луч в каждый момент времени воздействует лишь на малый элемент площади, называемый элементом разложения. В результате каждый элемент разложения суммирует фотоны, попадающие на него за полный период сканирования (1/30 сек в стандартной телевизионной системе). Типичная мишень видикона имеет около 10^5 элементов разложения. Чтобы достичь такой эффективности с помощью мозаики, требуется 10^5 элементарных приемников при облучении каждого в течение 1/30 сек. Одиночный элементарный приемник теоретически может совместно с устройством сканирования охватить тот же угол обзора за тот же период сканирования, что и видикон. Но так как отношение сигнала к шуму пропорционально корню из времени накопления, то отношение сигнала к шуму у видикона почти в 300 раз выше, чем у одноэлементного приемника, так как одноэлементный приемник не обеспечивает накопления.

Фототермический преобразователь напряжения. Действие этого прибора, выпускающегося под названием «термикон», основано на изменении величины фотоэмисии при тепловом воздействии. Мишень, называемая в этой трубке сетчаткой, представляет собой многослойную пленку толщиной в доли микрона. При проектировании картины на сетчатке создается тепловое изображение. Луч от устройства с бегущим пятном сканирует по сетчатке, управляя фотоэмисией. Число фотоэлектронов, эмитируемых каждой точкой, пропорционально температуре этой точки. Для обнаружения объекта большой площади достаточно отличие температуры объекта всего на 10–12 К от окружающего фона комнатной температуры. Спектральная характеристика чувствительности термикона простирается по крайней мере до 12 мкм.

Эвапорограф. В эвапорографе использована различная скорость испарения масляной пленки, на которую спроектировано тепловое изображение. Основной элемент прибора — тончайшая пленка, зачерненная с одной стороны материалом, обладающим большим коэффициентом поглощения в инфракрасной области. Другая сторона пленки покрыта тонким масляным слоем, скорость испарения которого пропорциональна его температуре. Изображение, созданное на поглощающей пленке, избирательно нагревает трехслойную систему, изменяя скорость испарения масляной пленки. Тепловое изображение можно увидеть в отраженном свете благодаря интерференционным явлениям. Эвапорограф позволяет обнаружить разность температур до 1 К при комнатной температуре, но имеет постоянную времени не менее 1 мин и нуждается в постоянной откачке воздуха, обеспечивающей постоянное давление в масляной камере (равное давлению насыщенных паров масла).

Люминофоры. Люминофор — относительно простое средство преобразования инфракрасного изображения в видимое. При его использовании следует сначала возбудить люминофор коротковолновым излучением, а после того, как видимое послесвечение погаснет, снова возбудить видимое свечение облучением люминофора стимулирующим инфракрасным излучением. Одним из лучших люминофоров является сульфид стронция, дающий зеленое стимулированное свечение. Он обладает полезной особенностью — может быть возбужден α -частицами, эмитируемыми небольшим источником. Другие

люминофоры, на основе сульфида цинка, чувствительны до 1,3 мкм и выше. Охлаждением до температуры жидкого азота спектральная характеристика селенидного люминофора может быть продлена до 2 мкм.

2.6. Приемники в ДИК области.

Из всего описанного выше многообразия в ДИК-области могут применяться лишь немногие типы приемников. Это болометры и фотосопротивления на основе легированных кристаллов германия и антимонида индия. Ситуация осложняется тем, что дело пока ограничивается экспериментальными разработками. Промышленность же пока не выпускает фотоприемники, предназначенные для работы в ДИК-области спектра, что, по-видимому, связано с отсутствием спроса. Наиболее длинноволновая граница выпускаемых фоторезисторов (ФСГ-28РТА, ФРО-Х1-142) — 14 мкм, различных тепловых фотоприемников — до 25 мкм [10]. Поэтому фотоприемники для работы в ДИК-диапазоне приходится изготавливать в лаборатории самостоятельно.

Болометрический приемник излучения. Хотя охлаждаемые фотоприемники из легированного германия и антимонида индия (InSb) полностью перекрывают ДИК-диапазон и, кроме того, обладают достаточной чувствительностью и быстродействием, их спектральная характеристика довольно неровная. Для сравнения интенсивности излучения различных длин волн желательно иметь фотоприемник с монотонно гладкой спектральной чувствительностью, величину которой несложно было бы оценить. Болометр был изготовлен из промышленного медного остеклованного микропровода. Диаметр медной жилы ≈ 8 мкм, диаметр провода ≈ 15 мкм. Измерения проводились компенсационным методом: определялась величина тока выделяющего такое же количество тепла, что и излучение. Доля поглощенного микропроводом излучения оценивалась по формулам из работы [9].

Охлаждаемый InSb-фотоприемник.[11] Фотопроводимость под действием длинноволнового излучения наблюдается в кристаллах антимонида индия n-типа как в отсутствие, так и при наличии магнитного поля. В нулевом магнитном поле в образцах InSb достигнутой в настоящее время чистоты водородоподобные примесные центры не создают состояний, отделенных от зоны проводимости. В таком материале длинноволновая инфракрасная проводимость обусловлена «разогревом» электронного газа свободных электронов электромагнитным излучением, в результате которого изменяется концентрация электронов (как при фотопроводимости), а их подвижность. Приемники, использующие это явление относятся к числу наиболее чувствительных детекторов в области от 300 мкм до нескольких миллиметров.

В достаточно сильном магнитном поле ($H \gtrsim 6$ кЭ) зона проводимости разбивается на подзоны Ландау, происходит отщепление примесных состояний, которые располагаются под каждой из зон Ландау. При таких условиях оптическое поглощение и соответствующая фотопроводимость наблюдаются в двух спектральных областях: в субмиллиметровой (500–2000 мкм) — за счет фотоионизации примесного центра и в более коротковолновой области (25–300 мкм) — в результате переходов между нулевой и первой зонами Ландау (циклотронный резонанс). При чем, при каком-либо заданном магнитном поле спектральная характеристика в более коротковолновой части имеет вид сравнительно узкой резонансной кривой, которая при возрастании магнитного поля перемещается в более коротковолновую часть спектра. Это явление можно использовать

для создания узкополосного перестраивающегося детектора в области 25–300 мкм.

В области длин волн от 300 до 2000 мкм в нулевом или слабом магнитном поле он работает как неселективный «электронный болометр», его чувствительность мало зависит от длины волны, начиная от длин волн в несколько миллиметров и вплоть до 600 мкм. При меньших длинах волн (до 200 мкм) чувствительность приемника уменьшается из-за ослабления поглощения излучения свободными электронами. Сравнительно небольшое сопротивление приемника (5–10 кОм) позволяет реализовать малую постоянную времени, чем выгодно отличается от легированного мелкими примесями Ge, сопротивление которого гораздо выше.

Охлаждаемый Ge-фотоприемник. Основной фотоприемник используемый в области до 100–150 мкм — охлаждаемое до гелиевой температуры фотосопротивление, изготовленное из монокристаллического германия, легированного такими примесями, как Sb, In, Ga, P, As. Энергия фотоионизации таких примесей порядка 10^{-2} эВ, что и соответствует длинноволновой границе фотопроводимости ≈ 100 мкм.

Спектральная область чувствительности приемников (по данным из работы [12]) приведена на рис.8.

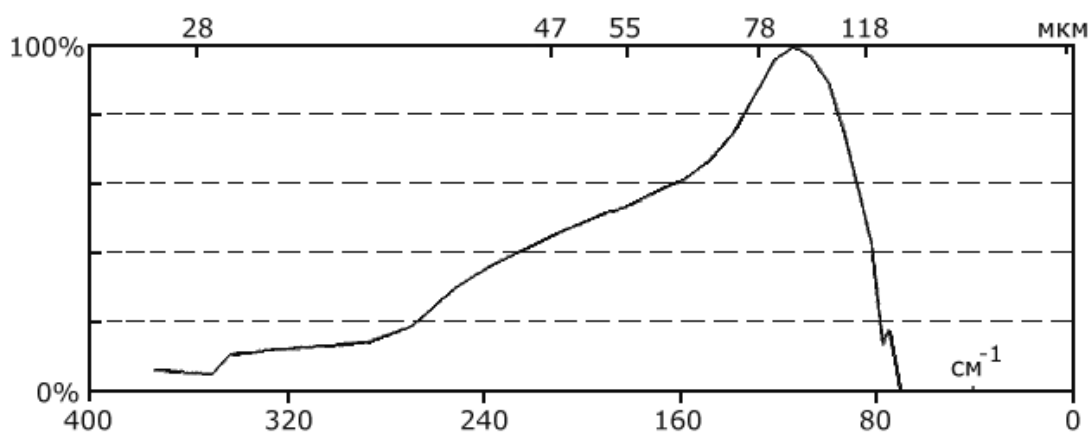


Рис. 8. Относительная спектральная характеристика фотопроводимости Sb-примеси в Ge

3. Измерение характеристик приемников.

В этом разделе я подробнее расскажу об измерении свойств Ge-фотоприемника.

Изготовление Ge-фотоприемников. Существуют различные рекомендации относительно оптимальной степени легирования и компенсации германия для фотоприемника, однако, как оказалось, раздобыть кристаллы с заранее заданными параметрами — дело безнадежное. Поэтому при изготовлении фотоприемников пришлось воспользоваться тем фактом, что Sb является наиболее трудно удалимой примесью при производстве чистого германия, и достаточно легированный материал можно найти среди доступных «чистых» образцов.

Фотоприемники изготавливались следующим образом: образцы с размером 4×4 мм² и толщиной $0,5 \div 2$ мм вырезали алмазным абразивным диском из различных кусков «чистого» монокристаллического германия. После очистки в концентрированной H_2O_2 места для контактов лудили сплавом InGa с помощью ультразвукового паяльника. Фотоприемники отбирали по отношению сигнал/шум. Вполне работоспособные фотоприемники получились из кристалла, обладающего величинами удельного сопротивления, указанными в таблице 6.

Таблица 6. Удельное сопротивление материала Ge-фотоприемника.

Температура Ge образца, К	4,2	77	300
Удельное сопротивление, Ом · см	$150 \cdot 10^3$	600	16

Измерения. Измерения свойств фотоприемников проводились с помощью специально изготовленной вставки в транспортный гелиевый дьюар. Вставка представляет собой световод, изготовленный из полированной внутри трубки из нержавеющей стали. На одном конце световода, опускаемом в жидкий гелий, помещаются фотоприемники (один или два непосредственно друг за другом), через другой, закрытый полиэтиленовым оптическим окном, вводится излучение. На свободном конце световода крепится также металлический заземленный корпус, в котором помещена простейшая измерительная схема (см. рис. 9).

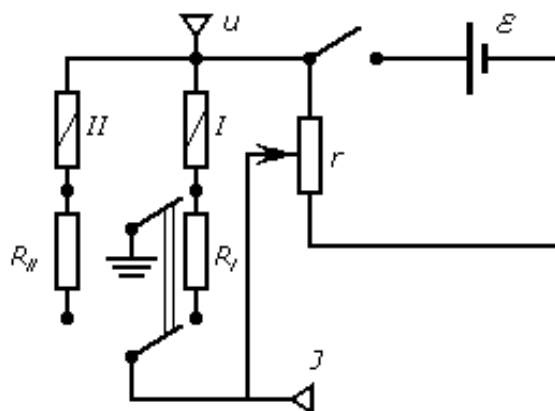


Рис. 9.

На ней I и II — вынесенные на другой конец световода фотоприемники, R_I и R_{II} — согласованные с ними нагрузочные сопротивления, r — многооборотный переменный резистор в 2,2 кОм, необходимый для подбора рабочей точки. Схема питается от батареи постоянного тока в 4,5 В. Ключ предназначен для переключения измерений характеристик первого или второго фотоприемника.

Световое излучение, подаваемое на фотоприемники модулируется прерывателем с переменной регулируемой частотой прерывания от 120 до 200 Гц. Сигнал с фотоприемника снимается с выхода u и подается на вольтметр со встроенным узкополосным усилителем, перестраиваемым по частоте. Центральная частота полосы усиления выставляется по максимуму показаний вольтметра при подаче на его вход сигнала синхронизации от прерывателя. Среднеквадратичное напряжение шума измерялось по сигналу

с фотоприемника, измеренному при выключенном источнике излучения, и учитывает шумы, создаваемые фоном. Эквивалентная полоса частот усилителя составляет 10 Гц на частоте 130 Гц.

С выхода J можно было снимать постоянную составляющую напряжения на известном сопротивлении нагрузки, пропорциональную току питания. Это было необходимо для определения оптимальной рабочей точки. Для этого снималась зависимость отношения сигнал – шум от тока питания. Зависимости напряжений сигнала и шума от тока питания приведены на рис. 10 и 11.

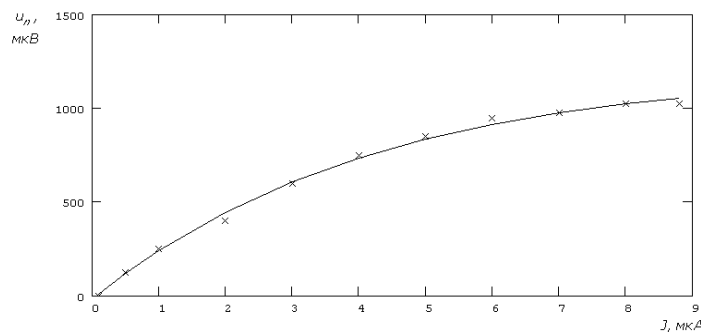


Рис. 10. Зависимость сигнала от тока питания

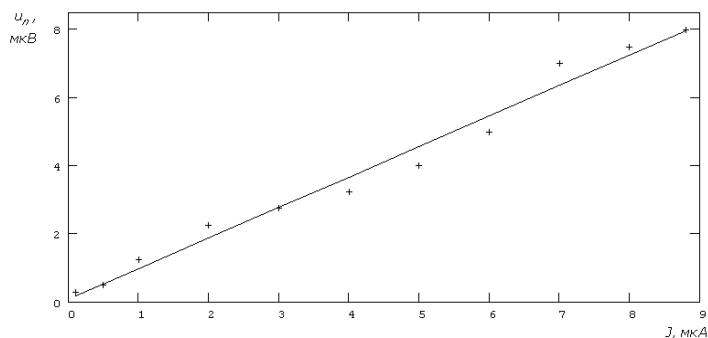


Рис. 11. Зависимость шума от тока питания

Кривые на этих рисунках аппроксимируют экспериментальные точки экспонентой и прямой соответственно. На рис. 12 приведен график отношения сигнал – шум от тока питания и кривая его аппроксимирующая.

Исходя из этого графика можно сказать, что оптимальный ток питания составляет 1–2 мкА. Результаты не зависели от частоты прерывания в пределах от 120 до 200 Гц.

Для предварительных измерений в качестве источника использовалась лампа накаливания мощностью 75 Вт. Фокусирующая линза диаметром 5 см, располагалась на расстоянии 90 см от лампы. В световод попадало около 70 % энергии собранной линзой, что составляло около 10 мВт. Так как сигнал после прерывания модулятором имеет форму, близкую к прямоугольной, то его нужно привести к среднеквадратическому значению основной гармоники (см. стр. 12). Коэффициент перехода составляет 0,45 для прямоугольного сигнала и несколько меньше, если модулятор производит сигнал иной формы. Таким образом, на приемник попадало около 4 мВт, что, при площади приемника 16 мм², эквивалентно облученности в 25 мВт · см⁻². Значения основных параметров фотоприемника для двух значений тока питания приведены в таблице 7.

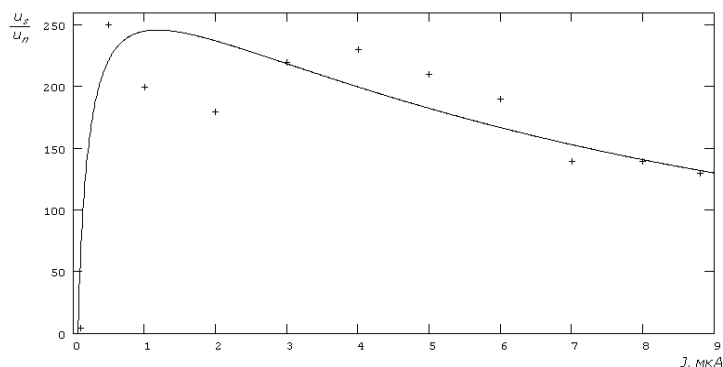


Рис. 12. Зависимость отношения сигнал – шум от тока питания

Таблица 7. Удельное сопротивление материала Ge-фотоприемника.

Ток питания, J , мкА	Чувствительность, \mathcal{R} , В · Вт ⁻¹	Обнаружительная способность, D , Вт ⁻¹	Удельная обнаружи- тельная способность, D^* , см · Гц ^{1/2} · Вт ⁻¹
2	0,1	$6,0 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4$
9	0,26	$3,3 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^4$

Для образцов был измерен также коэффициент поглощения ими ДИК-излучения. Для этого два фотоприемника с различной толщиной закреплялись один за другим на конце погруженного в жидкий гелий световода. Измерялось отношение сигналов с образцов при двух возможных положениях. Поглощение в образце толщиной 0,8 мм на длинах волн 78 и 118 мкм составило 96 % и 98 % соответственно.

Заключение.

В данной работе проведен обзор различных типов фотоприемников в ИК и ДИК-области спектра. Рассмотрены их свойства, характеристики и принципы действия, дано сравнение возможностям их применения в различных спектральных диапазонах. Перечислены основные величины, которыми характеризуются фотоприемники и их зависимости друг от друга и от условий измерений. Подробно описаны фотоприемники, которые могут применяться в ДИК-области спектра.

Кратко рассматривается также все прочее оборудование, необходимое для работы в ДИК-диапазоне, в том числе источники излучения и элементы оптического тракта. Для того оборудования, которое приходится изготавливать самостоятельно кратко изложена также технология изготовления.

В этой работе описан также простейший эксперимент по определению характеристик Ge фотоприемника. Такое несложное измерение необходимо всякий раз, когда возникает необходимость в использовании не откалиброванного ранее фотоприемника в измерительной цепи.

Литература

- [1] *Ordal M.A. et al.*
Optical properties of Al, Fe, Ti, Ta, W & Mo at submillimeter wavelengths.
// Appl.Opt. 27, no. 6, p. 1203 - 1209, 1988
- [2] *Завьялов В.В.*
Дис. на соискание уч.ст.канд.физ.-мат.наук, М.: ИФП АН СССР, 1976.
Лазер на парах воды с генерацией ортогональных поляризаций для диагностики плазмы.
- [3] *Хадсон Р.*
Инфракрасные системы.
/Пер. с англ.; Под ред. Н.В. Васильченко. — М.: Мир, 1972.
- [4] *Loewenstein E.V., Smith D.R., Morgan R.L.*
Optical constants of far infrared materials. 2:Cryst. Solids.
// Appl.Opt. 12, no. 2, p. 398 - 406, 1973
- [5] *Москалев Б.И.*
Разряд с полым катодом.
М.: Энергия, 1969.
- [6] *Браверман Н.Р., Воробьев Л.И., Согласнова В.А., Шоломицкий Г.Д.*
Полосовые сеточные фильтры для длинноволновой ИК-области.
Препринт ИКИ АН СССР, №223, М., 1975.
- [7] *Завьялов В.В., Воронин В.И.*
Сканирующий прибор для визуализации поперечного распределения полей субмиллиметрового излучения.
//ПТЭ, 1976, №6, с. 102 - 104
- [8] *Benedict W.S., Pollack M.A., Tomlinson W.J.*
The water-vapor laser.
// IEEE Journal of Quantum electronics QE-5, no. 2, p. 108 - 124, 1969
- [9] *van de Hulst H.C.*
// Astrophys.J. 112, p. 1, 1950
- [10] *Аксененко М.Д., Бараночников М.Л.*
Приемники оптического излучения (справочник).
М. "Радио и связь", 1987.
- [11] *Надь Ф.Я., Панков В.Г., Рулев К.А.*
Перестраиваемый приемник длинноволнового ИК излучения.
//Р.и Э., 1970, №2, с. 371 - 375.
- [12] *Carli B., Mechiorri F.*
Considerations about far-infrared detectors for astronomical purposes.
//TESRE-CNR Infrared section.