

Факультет: «Автоматики и электроники».

Кафедра №27.

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
«ОПТОЭЛЕКТРОНИКА»**

Выполнили студенты группы А9-11  
Власов Евгений Владимирович  
Смирнов Владимир Юрьевич

Преподаватель: Мочалкина О.Р.

Москва, 2010 г.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Поглощение света в полупроводниках</b>	<b>5</b>
2.1	Собственное(фундаментальное) поглощение . . . . .	5
2.2	Примесное поглощение . . . . .	5
2.3	Поглощение свободными носителями заряда . . . . .	6
2.4	Решеточное поглощение . . . . .	7
2.5	Закон Бугера-Ламберта . . . . .	7
2.6	Спектральная зависимость коэффициента поглощения . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Фотопроводимость</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Параметры фотоприемников</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Фотодиоды</b>	<b>13</b>
5.1	Суть . . . . .	13
5.2	Возможные конструктивные исполнения . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Фототранзистор</b>	<b>16</b>
6.1	Принцип работы . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Фототиристор</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Фоторезисторы</b>	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Примесные фотоприемники</b>	<b>20</b>
<b>10</b>	<b>Твердотельные излучатели</b>	<b>21</b>
10.1	Характеристики излучателя . . . . .	21
<b>11</b>	<b>Светодиоды</b>	<b>22</b>
11.1	Главные параметры светодиодов . . . . .	22
11.2	Материалы для изготовления светодиодов . . . . .	25
<b>12</b>	<b>Лазеры</b>	<b>26</b>
<b>13</b>	<b>Электролюминисцентный конденсатор</b>	<b>28</b>
<b>14</b>	<b>Оптроны</b>	<b>29</b>
14.1	Параметры оптронов . . . . .	29
14.1.1	Коэффициент передачи тока . . . . .	30
14.1.2	Быстродействие . . . . .	30

14.1.3	Развязывающее сопротивление . . . . .	30
14.1.4	Линейность характеристики передачи . . . . .	30
14.2	Классификация оптронов по типу фотоприемника . . . . .	30
<b>15</b>	<b>Оптоэлектронное реле</b>	<b>32</b>
<b>16</b>	<b>Многоэлементные фотоприемники (фотоприемные передающие матрицы)</b>	<b>33</b>
16.1	МОП фотодиод . . . . .	36
16.1.1	Сдвиговой резистор . . . . .	37
16.2	Еще один способ . . . . .	37
<b>17</b>	<b>ПЗС</b>	<b>38</b>
<b>18</b>	<b>Физические эффекты. ЖК ячейки</b>	<b>40</b>
18.1	Эффект динамического рассеяния . . . . .	41
18.2	Твист-эффект . . . . .	42
18.3	Эффект гость-хозяин . . . . .	43
<b>19</b>	<b>ВОЛС</b>	<b>45</b>
19.1	Факторы, которые приводят к потерям в линии . . . . .	47
<b>20</b>	<b>Пленочные световоды</b>	<b>48</b>
<b>21</b>	<b>Твердотельные дефлекторы света</b>	<b>50</b>
21.1	Дефлекторы Брэгга . . . . .	50

# 1. Введение

Прежде всего, что такое свет? Излучение очень широкого диапазона, от 50нм до 1 мм. В некоторых источниках говорят, что от 10нм. Эта граница определяется различием “свет - рентген”. Приближаясь к обозначенному нижнему пределу свет теряет способность преломляться. Мы об это уже много раз говорили - излучение приобретает другие качества. Верхняя граница - 1к мкм - радиоволны, ниже - свет. Тут тоже есть физические эффекты, ограничивающие планку сверху.

Волноводная обычная техника не соответствует решению определенных задач. Тогда выручает свет, потому что информация передается модулированным световым сигналом, вместо модулированного электрического сигнала.

Вы, конечно, ряд вещей, связанных со светом, изучали весьма подробно. Это будет последний курс, потому что некоторые курсы вроде квантовой радиофизики делали упор на отдельные приборы, в частности на лазеры. Здесь же постараемся коснуться всех приборов, которые так или иначе могут относиться к оптоэлектронике - излучатели, модуляторы, оптоволоконная техника, интегральная - пленочные световоды, фотоприемники, передача и прием картинок(твердотельная). Но курс маленький, так что пройдем поверхностно. Многие приборы работают на разных физических эффектах, что лишь усложняет курс. Что касается пп лазеров, то опустим тему, если вы ее знаете, иначе - рассмотрим.

Излучение в диапазоне также очень разнообразно.

- 50нм - 0.4 мкм - УФ
- 0.4мкм - 0.76мкм - видимый свет.
- 0.76мкм - 1000мкм - ИК.
  - 0.76мкм - 3мкм - ближний ИК.
  - 3мкм - 6мкм - средний ИК.
  - >6мкм - дальний ИК.



## 2. Поглощение света в полупроводниках

Если свет падает на поверхность пп кристалла, то он может:

- Отразиться от поверхности.
- Преломиться и войти в полупроводник и поглотиться не дойдя до нижней границы подложки.
- Преломиться и пройти насквозь, практически не поглощаясь.

Рассмотрим все варианты. Нас будут интересовать те эффекты, которые будут связаны с поглощением света. То есть свет вошел в пп, поглотился и на основе неких явлений мы можем строить некие приборы.

Нас будет интересовать, как идет поглощение света в пп. Есть несколько способов поглощения:

### 2.1. Собственное(фундаментальное) поглощение

Что происходит в этом случае? Квант света - фотон, поглощается связанным электроном, связанный электрон приобретает дополнительную энергию и переходит в зону проводимости, в результате чего в пп появляется дополнительная проводимость - фотопроводимость. Доп энергия, которую приобретает связанный электрон, должна быть больше ширины ЗЗ - это совершенно очевидно.

При таком поглощении всегда есть длинноволновая граница поглощения.

$$h\omega > E_g$$

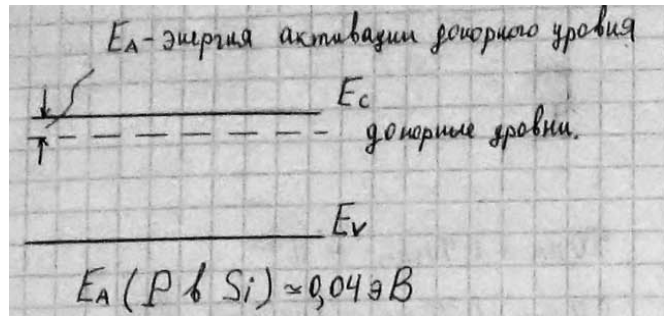
$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

$$\lambda_{гр} = \frac{hc}{E_g}$$

Для Si -  $\lambda \approx 1.1\text{мкм}$ . Для всего огромного спектра волн кремний прозрачен. А что такое 1.1мкм? Такое излучение можно применять в оптронах, например. Но это не интересно. А интересны другие области излучение, например, в области 10мкм. Такое излучение дают земля, летающие аппараты. Так что используют материалы с другим типом поглощения.

### 2.2. Примесное поглощение

Что такое примесное поглощение для, например, кремния? Есть определенный донорный уровень. Они как правило в кремнии и германии располагаются на очень малом расстоянии от  $E_c$ . То есть  $E_A(P \text{ в } Si) \approx 0.04 \text{ эВ}$ . Но тут есть проблема - в нормальном состоянии все электроны уже заняты, так что свети - не свети ничего переходить не будет. При такой  $E_A$  электрон можно удержать на донорном уровне только при гелевых температурах - 4.2К.



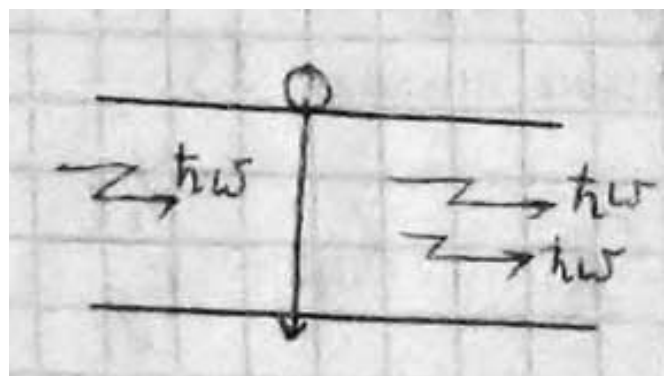
Только в таких условиях мы получим прибавку в проводимости, если посветим длинноволновым излучением на пп. Но это очень сложная техника. Можно ли получить и как на фундаментальном поглощении реакцию на длинноволновое поглощение? Можно, в случае если у него узкая ЗЗ. Но и тут тоже нужно такое же охлаждение. Технологически наиболее разработанные - антиманит индия (сотые доли эВ), КРТ (кадмий ртуть теллур). Процентным соотношением Зх элементных составов можно регулировать ширину ЗЗ. ИК техника - огромный курс, по ней можно читать и читать. Это же все системы слежения, слежение за землей. Все можно определить такими фотоприемниками, потому что они отличаются температурой в 0.1К. Но при этом всегда надо учитывать атмосферные окна. Дело в том, что ИК излучение - например интересно ИК излучение Земли из космоса, но там огромное расстояние, и атмосфера поглощает очень много. Но к счастью есть атмосферное окно 8-14 мкм, 3-5 мкм, около 1.5 мкм - так что бессмысленно делать приемник на 7 мкм - такое излучение через атмосферу не пройдет. К примесному поглощению мы еще как-нибудь вернемся.

### 2.3. Поглощение свободными носителями заряда

На это поглощении строятся приборы вроде:

- Лазеры.

Что там происходит? Электрон, поглощающий излучение, энергию теряет, переходит вниз, но зато дает два идентичных фотона.



## 2.4. Решеточное поглощение

Оно существует, но приборов на его основе мы не строим. Оно дает нам только потери на взаимодействии фотонов с атомам кристаллической решетки.

Все пп приборы основаны на том, что мы должны знать, где именно рождаются доп. носители и т.д. Надо знать - свет сразу поглотится на поверхности, или же постепенно по толщине.

## 2.5. Закон Бугера-Ламберта

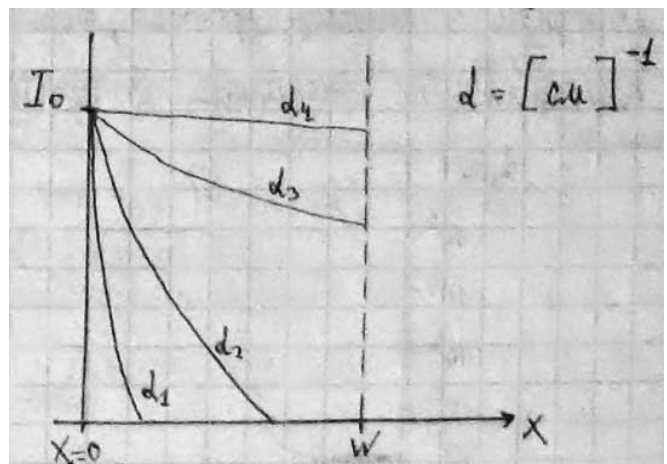
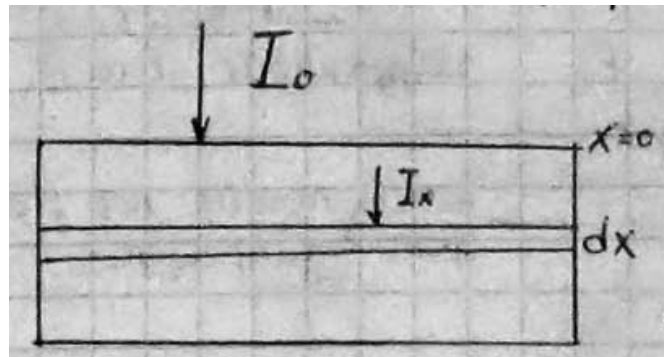
Это закон распределения света по толщине, по нему можно узнать где именно свет остановится. Размерность интенсивности - энергия на площадь в единицу времени. Часть излучения отразится от подложки. Обозначим:

- $I_0$  - падающее излучение.
- $R_\lambda = \frac{I_{от}}{I_0}$
- $I = I_0(1 - R_\lambda)$ , где  $R_\lambda$  - коэффициент отражения.  $I$  - то, что прошло внутрь(не отразилось).

Пусть поверхность пп -  $x = 0$ . Выберем в пп некий элемент  $dx$ , ему соответствующее излучение  $I_x$ . То, что поглотится в этом слое будет равно:  $dI_x = I_x \cdot dx \cdot \alpha$ .  $dI_x$  - то, что поглотится слоем  $dx$ . Есть также граничное условие:  $x = 0 : I_x = I_0(1 - R_\lambda)$ . Тогда

$$I(x) = I_0(1 - R_\lambda)e^{-\alpha \cdot x}$$

$\alpha$  -  $\text{см}^{-1}$  Если делаем приемник очень близко от поверхности, а распределение поглощения весьма крутое, то будет очень малое количество рожденных свободных носителей заряда, так что фотоприемник будет ничуть не чувствительный. Или наоборот - очень



глубоко сделаем приемник, таким образом свободные носители могут рекомбинировать в толще пп до того, как дойдут до рп-прехода. Так что очень важно знать реальную характеристику поглощения, чтобы сконструировать работающий фотоприемник.

## 2.6. Спектральная зависимость коэффициента поглощения

Всегда должны выполняться два закона: ЗСЭ и ЗСИ(квазиимпульса).

1. ЗСЭ:

$$E_2 = E_1 + h\omega$$

2. ЗСИ(квазиимпульса):

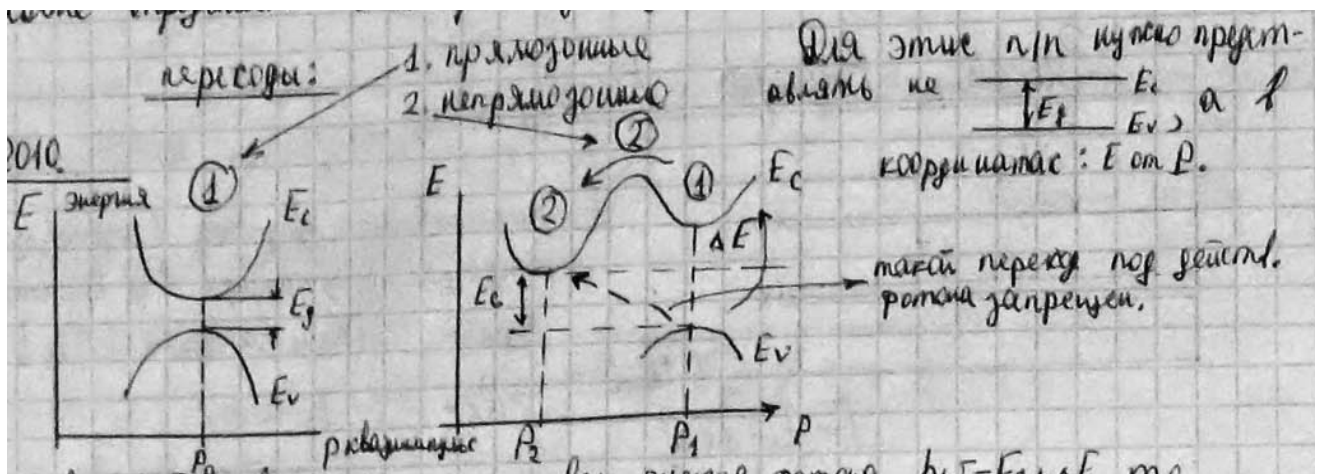
$$P_2 = P_1 + h\eta$$

Для электрона квазиимпульс порядка  $P = \sqrt{2m^*kT} = 10^{-25}$  кг · м/см. Для фотона же:  $P_\phi = \frac{2\pi \cdot \hbar}{\lambda} \approx 10^{-28}$ , при  $\lambda = 1 \mu m$ .

$P_2 = P_1$  - правило отбора. Когда меняется энергия, но импульс остается постоянным.

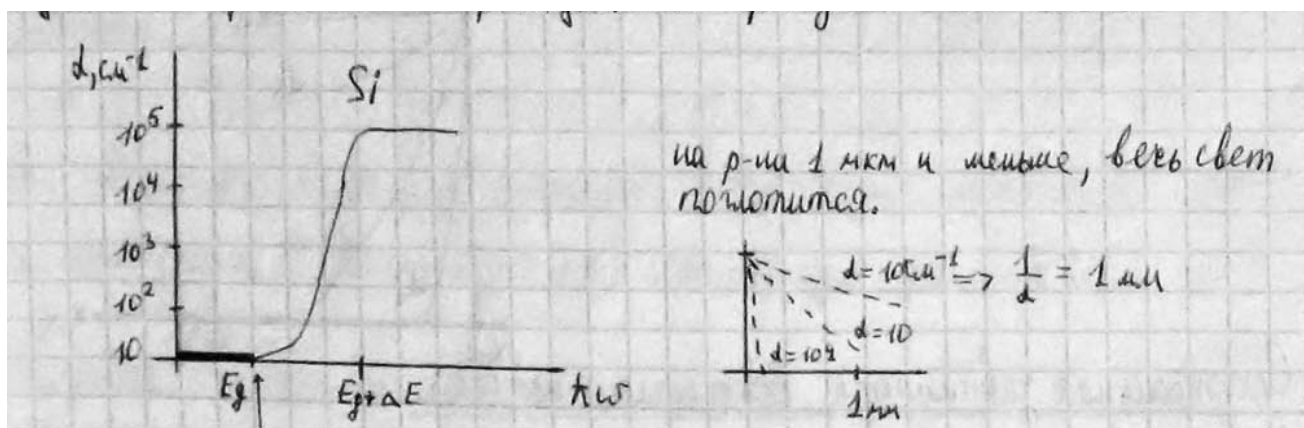
В прямозонных пп правило отбора выполняется как бы автоматически. Чтобы рассмотреть не прямозонные полупроводники...

Если по горизонтали откладывать квазиимпульс, а по вертикали - энергию, то характеристика будет иметь вид:



Стандартная зонная диаграмма(две параболы). ТАКже рядом еще рисунок, где у зоны проводимости два минимума. Для второго рисунка ширина ЗЗ также определяется минимальным расстоянием., но минимум находится у квазиимпульса  $p_2$ . Только такой переход невозможен, ибо энергии хватает, но импульс, очевидно, не совпадает. Для рисунка также справедливо, что если энергия

электрона  $E_g + \Delta E$ , то переход возможен. Также переход возможен, если электрон получит дополнительно энергию от фотона и импульс от фонона.



До  $E_g$  нет поглощения фотона.

### 3. Фотопроводимость

Под действием света сопротивление полупроводника падает, появляется дополнительная проводимость.  $\Delta\sigma = q(\mu_n\Delta n + \mu_p\Delta p)$

$$\frac{\delta\Delta n}{\delta t} = G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

$$\frac{\delta\Delta p}{\delta t} = G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Возьмем  $\frac{\delta\Delta p}{\delta t} = \frac{\delta\Delta n}{\delta t} = 0$ , тогда:  $\Delta\sigma = q(\mu_n G_n \tau_n + \mu_p G_p \tau_p)$

$$\Delta n = G_n \tau_n \quad \Delta p = G_p \tau_p$$

Приведем к интенсивности света.  $dI = \alpha I dx$

$$\frac{dI}{dx} = \alpha I; \quad \frac{1}{\hbar\omega} \frac{dI}{dx} = \alpha \frac{I}{\hbar\omega} = \alpha\phi - \text{количество поглощенных фотонов.}$$

$G$  - количество носителей заряда, возникающих в результате поглощения этих фотонов.  $G = \alpha\phi\eta$

$$\Delta n = G_n \eta_n \tau_n$$

$$\Delta p = G_p \eta_p \tau_p$$

$$j_{др} = \Delta\sigma E = q\alpha\phi(\mu_n \tau_n \eta_n + \mu_p \tau_p \eta_p)$$

$\alpha$  очень большое, ибо все носители в слое субмикронного размера, следовательно возрастает вероятность рекомбинации.  $\tau, \mu$  - функции количества носителей заряда.

Почему фотоприемники имеют спектральный экстремум? Должно выпол-

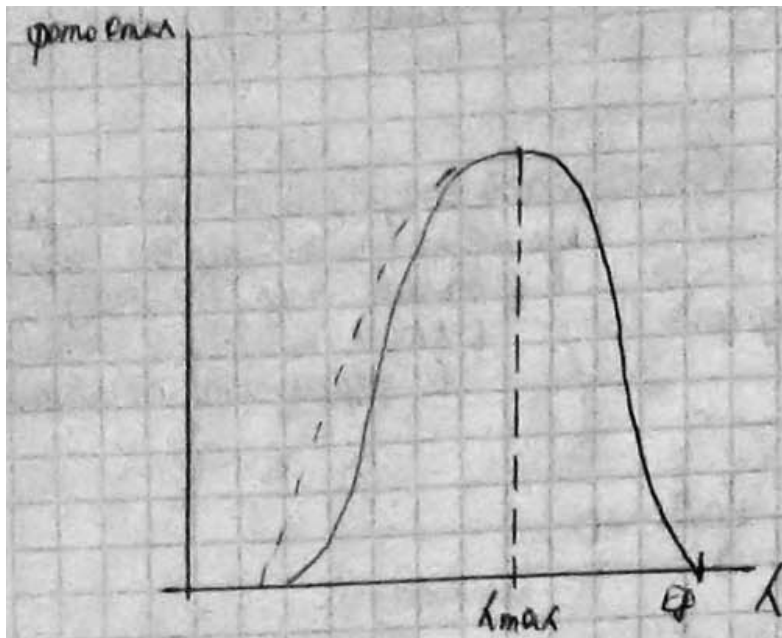


Рис. 1: Спектральная характеристика

няться условие постоянности интенсивности на разных длинах волн. Фотоот-

клик резко падает. Почему? Ибо интенсивность света - константа. Чем крупнее фотоны, тем меньшим количеством их набирается нужная мощность. Фотоотклик уменьшается прямо пропорционально количеству фотонов, т.к. при их уменьшении уменьшается генерация заряда, а более резкое уменьшение происходит из-за уменьшения подвижности заряда.

## 4. Параметры фотоприемников

1. Чувствительность.

а) По току

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta P} \text{А/Вт}$$

б) По напряжению

$$S_v = \frac{\Delta v}{\Delta P} \text{В/Вт}$$

с) По частоте

$$S_f = \frac{S_{v0}}{\sqrt{1 - 2\pi f\tau}}$$

2. Пороговая чувствительность - чувствительность, показывающая на какой минимальный ток (на какую минимальную интенсивность света) может прореагировать приемник.

Токовый шум характеризуется  $\sqrt{\Delta U_{\text{ш}}^2}$

$$P = m \frac{U_{\text{ш}}^2}{S_{\text{и}}} \text{Вт}$$

Но чаще берется  $\sqrt{\frac{\Delta U_m^2}{f}} \rightarrow P = m \frac{\sqrt{\frac{\Delta U_m^2}{f}}}{S_{\text{и}}} [\text{Вт} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{-\text{frac}12}]$

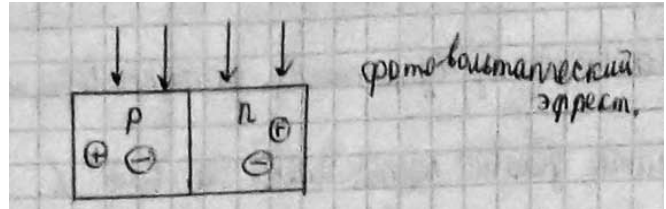
Книги - Носов, Оптоэлектроника.



## 5. Фотодиоды

### 5.1. Суть

По сути - те же диоды, но можно облучать обе стороны. Предположим, что мы не включили прибор в электр. сеть. Естественно заряды начинают диффундировать и могут подойти к рп-переходу. Дырки перейти в п-область не могут, а электроны могут перейти. Также и в п-области электроны перейти не могут, а дырки - могут. Таким образом р-область заряжается положительно, из п-области уходят дырки и она заряжается отрицательно. Возникает разность потенциалов, которая обусловлена фотовольтаическим эффектом. Этот эффект сопровождается работой фотодиода, но не является основным.



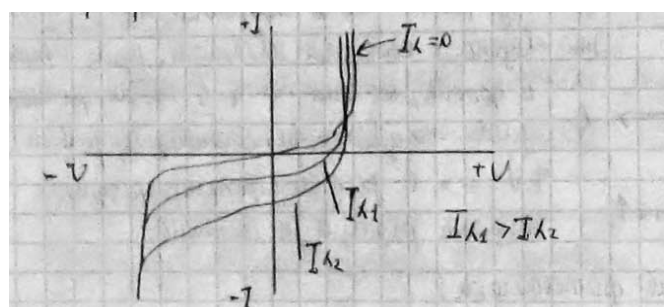
Это источники тока - солнечные батареи, но это не наша тема.

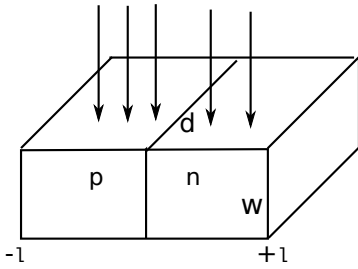
Что будет происходить с возрастанием времени? Постоянное накопление положительного заряда? Конечно, нет. Какой процесс прекращает лавину? То есть устанавливает определенное стационарное напряжение. Это - открытие диода из-за положительного смещения на нем. При работе фотодиода на него надо подать напряжение - обычно, отрицательное. Тогда, если цепь замкнута и света нету, течет обычный темновой ток. Если начать освещать - темновой ток увеличится. Что будет, если включить диод в прямом направлении? Все то же самое. Однако, на фоне прямого тока сложно выделить добавочную компоненту светового тока. Поэтому фотодиоды всегда работают при обратном смещении.

У кремниевых приборов нету обратного тока насыщения в отличие германиевых. Тогда теорию ШХЛ заменили на теорию Са-Нойса-Шокли.

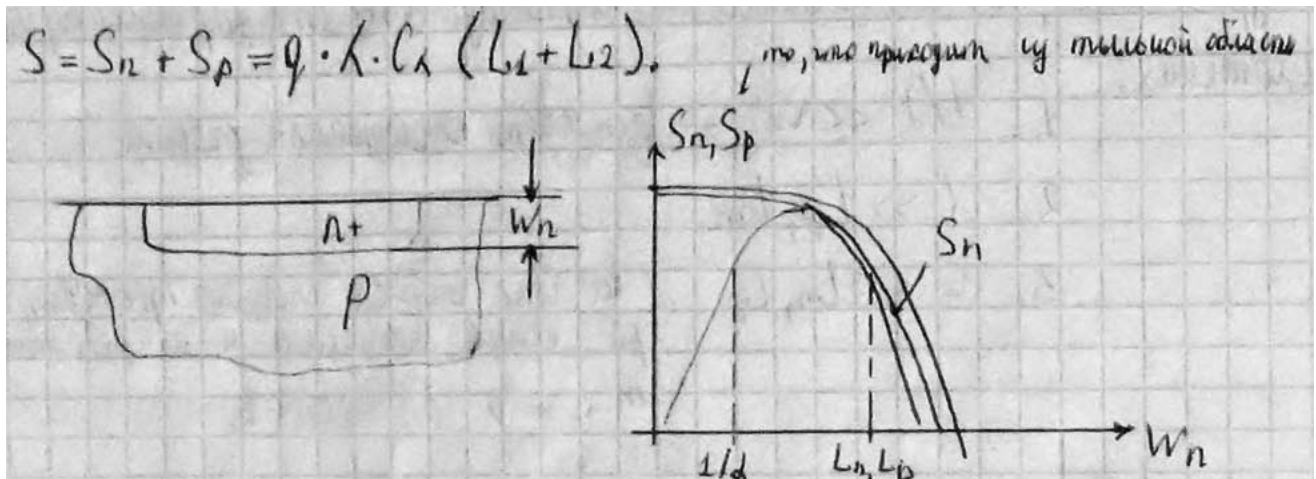
### 5.2. Возможные конструктивные исполнения

1. Свет падает параллельно плоскости рп-перехода.





2. Просто планарный pn-переход.



Надо найти приращения  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  для фундаментального поглощения.

$$\Delta n = \Delta p$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G_n + D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} \text{ для p-области, аналогично для n.}$$

Граничные условия:  $x = -l$ ,  $n = n_p$

$$x = 0, n = n_p \left[ \frac{qU}{e k T} - 1 \right]$$

$$x = l, p = p_n$$

$$x = 0, n = p_n \left[ \frac{qU}{e k T} - 1 \right]$$

Носители рождаются не по всей толщине.

Упрощающие предположения:

1.  $\frac{1}{\alpha} \ll W$
2.  $l \gg L_p, L_n$
3.  $W \ll L_n, L_p$  - все что генерируется, без проблем проходит до конца эпитаксиального слоя, не рекомбинируя. Отсюда  $G = const$ .

Решаем:

$$j_n = qD_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=0}$$

$$j_p = qD_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0}$$

Получим:

$$J = A \left\{ q \left( \frac{n_p D_n}{L_n} + \frac{p_n D_p}{L_p} \right) \left[ \exp \left( \frac{qU}{kT} \right) - 1 \right] - qG(L_n + L_p) \right\}$$

$$S = \frac{J_s}{P} = \frac{\Phi(1 - R_\lambda)\eta}{W}$$

$$S_i = \frac{J_\Phi}{P} = \frac{q \cdot G(L_p + L_n)d \cdot W \lambda}{2l \cdot d \cdot h \cdot c \cdot \Phi} = \frac{q \cdot \Phi(1 - R_\lambda)\eta d \cdot W \cdot \lambda}{W \cdot 2l \cdot d \cdot h \cdot c \cdot \Phi} = \frac{q(q - R_\lambda)\eta \lambda}{2l \cdot h \cdot c};$$

Планарный переход решается также - берется уравнение непрерывности, плотности тока и т.д. Аналитически все решается, но есть одно но: формула чувствительности будет выглядеть:  $S = S_n + S_p = q\lambda C_\lambda(L_1 + L_2)$ , но формулы для  $L_1$ ,  $L_2$  имеют в себе кучу тригонометрических функций, делая анализ по формуле совершенно нереальным. То есть надо строить графики разные и т.д., чтобы понять что к чему.

Для зеленого цвета - большие тяжелые фотоны, будут поглощаться у поверхности. Так что нужен мелкий рп-переход вплоть до субмикронной глубины. Аналогично для всего видимого спектра.

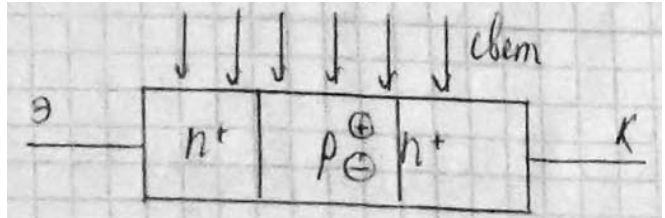
Для ИК - мелкие, проходят глубоко, нужен глубокий рп-переход.

## 6. Фототранзистор

Происходит усиление фототока наряду с фотоэл. преобразователем.

### 6.1. Принцип работы

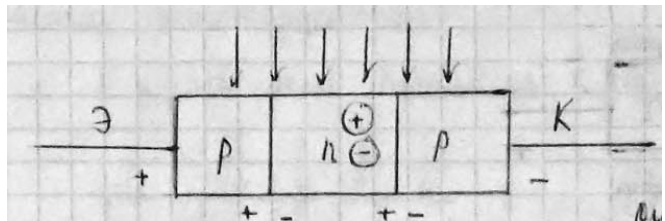
Под действием света на  $n^+ - p - n$  транзистор в р-области рождаются носители заряда. Приложим напряжение. Что будет с носителями в базовой области? Дырки оттуда уйти не могут, так что уходят электроны. В КП создается фототок за счет протекания тех самых элеткронов, назовем его  $J_{\text{ф0}}$ . Дырки должны были бы переходить в  $n^+$  область, но не переходят, почему? Потому что мы сделали хороший транзистор.



Откуда получается усиление в фототранзисторе?

Основные носители остаются, а неосновные уходят!

КБ - закрыт с очень большим сопротивлением. ЭБ - открыт, но с очень малым током.



Дырки, образующиеся за счет света, дают диодный ток. Тока через прямосмещенный ЭБ переход нет, т.к. мы сделали большую разницу в легировании областей (хороший транзистор). База заряжается, т.к. дырки ушли, следовательно, ЭБ переход приоткрывается, начинается инжекция из эмиттерного перехода. А значит происходит усиление.

Ток электронов ( $J_{\text{ф0}}$ ) должен быть равен току рекомбинации.

Условие стационарности:  $J_R = -J_{\text{ф0}}$

$$J_R = \frac{qAp_nW_n}{2\tau} \left( \exp\left(\frac{qU_{\text{э}}}{kT}\right) \right) = -J_{\text{ф0}}$$

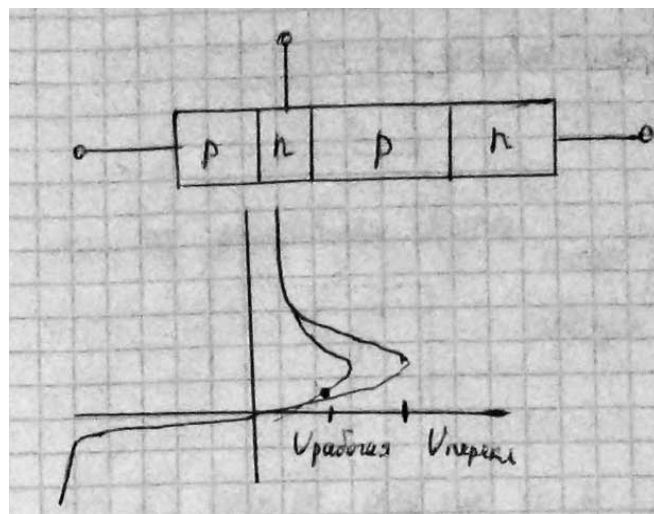
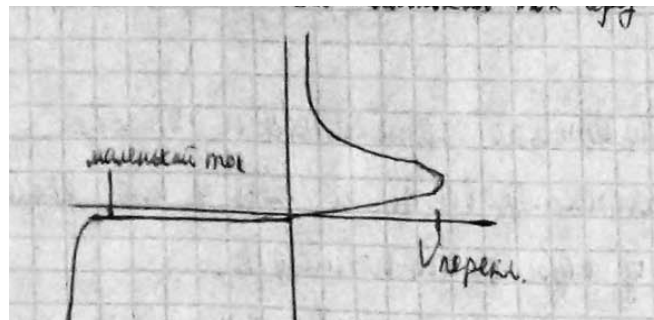
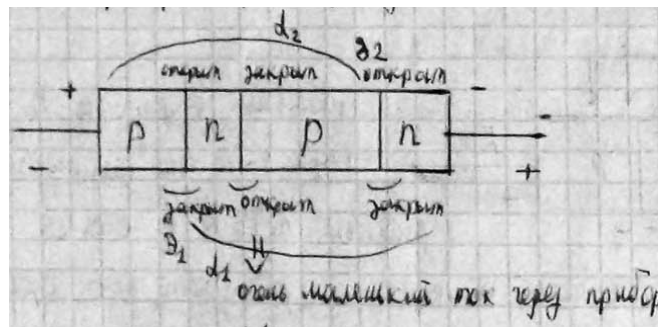
Находим  $\exp\left(\frac{qU_{\text{э}}}{kT}\right)$ .

$$J = qAD_p \frac{dp}{dx}; \quad J = qAG_0 \frac{p(0) - p(W_n)}{W_n};$$

$$\frac{J_{\text{ф}}}{J_{\text{ф0}}} = \beta; \quad \beta = \frac{L_i^2}{W_n^2}$$

$\beta$  - коэффициент усиления в транзисторе в схеме с ОЭ.

## 7. Фототиристор

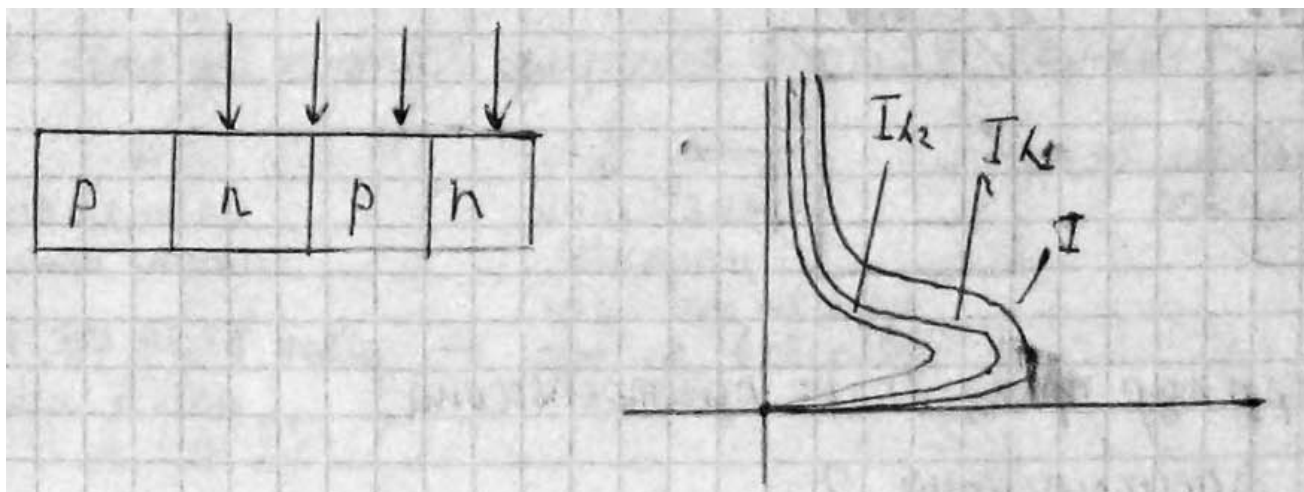


4х слойный прибор, 3 pn перехода.

Напряжение на центральном переходе меняется тогда, когда у нас по мере нарастания тока растут коэф-ты усиления и они становятся такие высокие, что как и в обычном тиристоре наступает насыщение, а при насыщении может измениться знак. Насыщение наступает при  $\alpha_2 + \alpha_1 = 1$ .

У Ge нет нарастания тока, они выходят в насыщение. Можно ли сделать тиристор из Ge? Да, можно. Условие выполнится, когда войдет в лавинный пробой и тогда он переключится.

Касаемо фототиристора - у него неут контакта к базе.



## 8. Фоторезисторы

Изготавливаются из холькагенидов. За увеличение чувствительности заплачено быстрое действие.

CdS, CdGe, GdTe → В теории там соединены как бы мельчайшие фотодиоды. Если увеличить светочувствительность, то будет страдать быстрое действие.

Высокое количество носителей, появляющихся после воздействия фотона связано ТОЛЬКО со строением этих полупроводников. Но тут надо говорить осторожно, так как теории не существует.

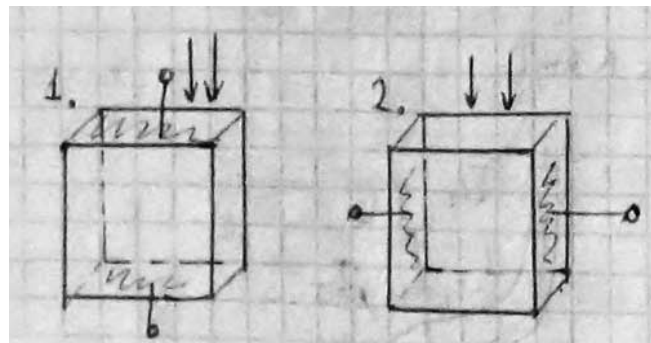
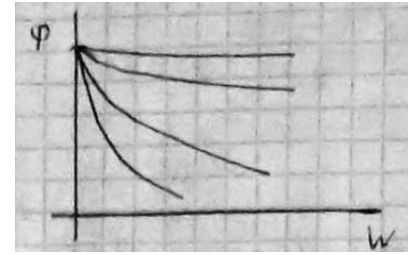
ФЭУ - фотоэлектрический умножитель - самый чувствительный прибор.

Фотозаряд не диффундирует!

## 9. Примесные фотоприемники

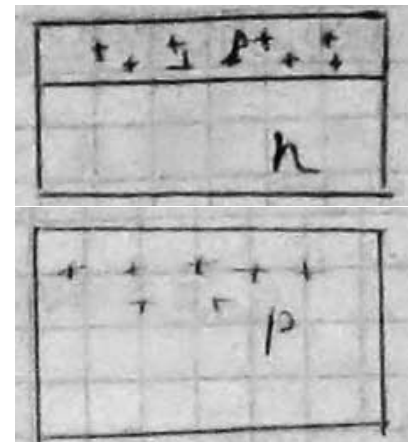
Есть два резистора, работающие на примесном поглощении. Одинаковые, из одного и того же материала. На них падает свет.

Какая из структур принципиально не работоспособна? Вторая. На второй структуре на куб резистора свет падает сверху, а контакты подведены по бокам. На первой - освещение также сверху, а контакты сверху и снизу.



Носители заряда будут рождаться по всей толщине в обоих случаях, в 1ом случае не будет прибавления тока. Фотогенерируемый заряд не диффундирует в примесных полупроводниках.

Допустим, легируем N-полупроводник бором, получили дырки. Дырки не смогут уйти, не могут диффундировать. Под действием света также получаем дырки, и они также не смогут диффундировать. А значит вторая структура не работоспособна, так как рождающиеся дырки под действием света не могут диффундировать под действием градиента концентрации, то есть дырки не дойдут до контактов. Если бы они диффундировали, то не было бы понятия п-н перехода.



(Электроны более подвижны и уйдут вглубь, а дырки останутся на поверхности. Получится ЭДС)



# 10. Твердотельные излучатели

## 10.1. Характеристики излучателя

### 1. Спектральная составляющая

- Сплошной спектр(эл. энергия в тепло, а потом в свет).
- Линейчатый спектр(эл энергия сразу преобразуется в световую).
- Смешанный спектр.

Характеристик делятся на:

- Энергетические
  - $P$  - лучистый поток, Вт.
  - $E$  - облученность, Вт/м<sup>2</sup>.
  - $I$  - сила облучения, Вт/стерадиан.
- Световые
  - $F$  - световой поток, лм.
  - $E_\lambda$  - освещенность, лм/м<sup>2</sup>=лк.
  - $I_\lambda$  - сила света, лм/стерадиан=кд.
  - $V$  - яркость на площадь излучения- нит(кд/м<sup>2</sup>), стильб(кд/см<sup>2</sup>)

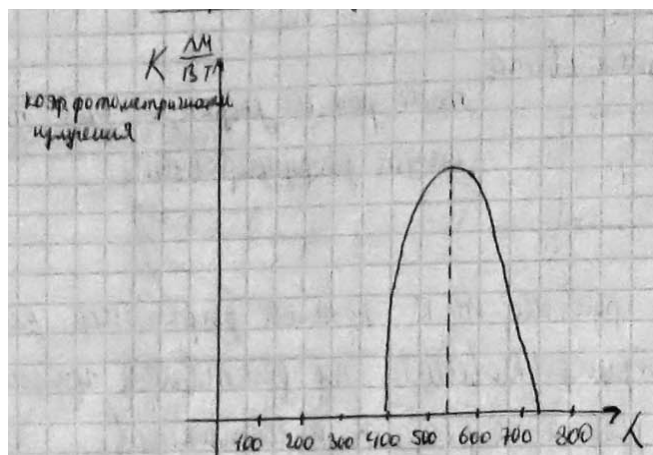


Рис. 2: Кривая видимости

# 11. Светодиоды

Обычный диод - рекомбинация носителей заряда. Свободный носитель заряда рекомбинирует с освобождением энергии, которая может быть выражена в виде фотона.

Выполняется ЗСЭ и ЗСкв.Имп. Но также необходимо нарушить термодинамическое равновесие. В п/пке мало р, и наоборот, поэтому рекомбинация мала. Вывести из ТДР можно созданием рп-перехода → инжекция.

Излучательная рекомбинация или нет определяется прямозонностью.

## 11.1. Главные параметры светодиодов

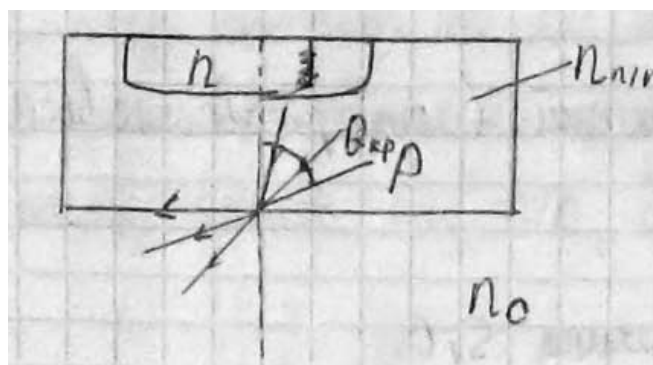
1. Квантовая эффективность (интенсивность излучения, коэф излучения)  $\eta$  - отношение концентрации излученных фотонов к количеству электронов, прошедших через р-переход.

$$\eta = \frac{N_{\text{И}}}{J/q}; \quad \eta = \eta' \cdot \eta''$$

$$\eta' = \frac{N_{\text{Г}}}{J/q} - \text{количество генерированных фотонов к количеству электронов, прошедших через рп-переход.}$$

$$\eta'' = \frac{N_{\text{И}}}{N_{\text{Г}}}$$

Свет преломляется на границе Si-воздух.

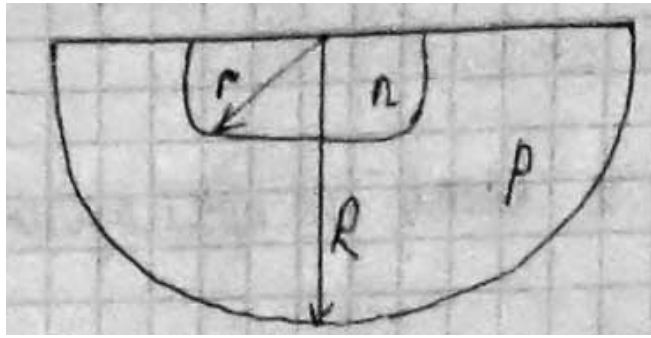


$\theta_{\text{кр}} = \arcsin \frac{n_0}{n}$  - такой угол, при падении под которым свет отразится и пойдет вдоль поверхности полупроводника.

GaAs:  $\theta_{\text{кр}} \rightarrow \eta \sim 3,6\%$

Учитывая отражение Френеля  $\eta \sim 2,6\%$

Увеличение интенсивности излучения:



1. Сделать кристалл в виде полусферы.

$$\theta_{кр} = \arcsin \frac{r}{R}; \eta = 30\%$$

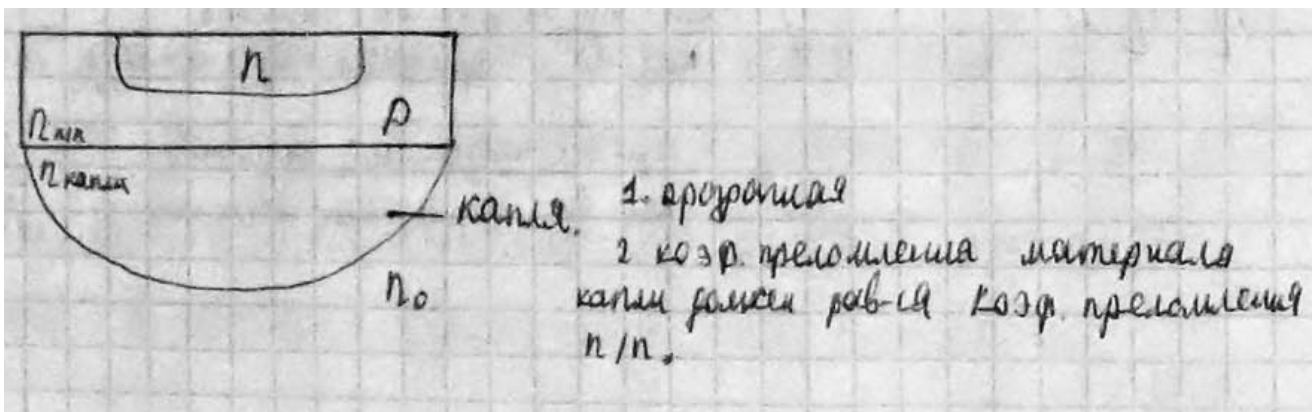
Но шлифовать каждый диод - не используется в массовом производстве.

2. Кристалл стандартный, а на него нанесена капля в виде полусферы.

Требования к капле:

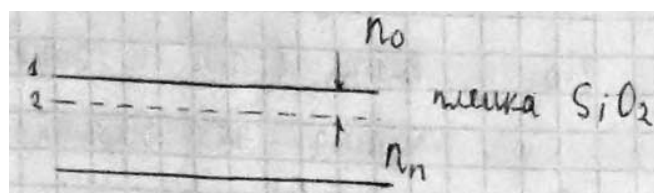
- $n_k \sim n_{п/п}$
- Прозрачность.

$$\eta \sim 23 - 30\%$$



3. Нанесение оптикоотражающих покрытий (четвертьволновых пленок).

$\text{SiO}_2$  - из парогазовых смесей. Отраженный свет проходит четное число



длин полуволин и выходит за пределы п/п.

$$R = \frac{(n_{\text{п}}^2 - n_{\text{в}}^2)^2}{(n_{\text{п}}^2 + n_{\text{в}}^2)^2}$$

Но бывают ситуации, когда образуется не структура “полупроводник-воздух”, а “полупроводник-пленка-воздух”.

Тогда формула будет выглядеть иначе:

$$R = \frac{(n_{\text{п}}n_{\text{в}} - n_{\text{пл}}^2)^2}{(n_{\text{п}}n_{\text{в}} + n_{\text{пл}}^2)^2}$$

Тогда отражение на границе будет нулевое, если  $n_{\text{пл}} = \sqrt{n_{\text{п}}n_{\text{в}}}$

Но отражение также зависит и от толщины пленки.

$$2n_{\text{пл}}d = \frac{(2l - 1)\lambda}{2}$$

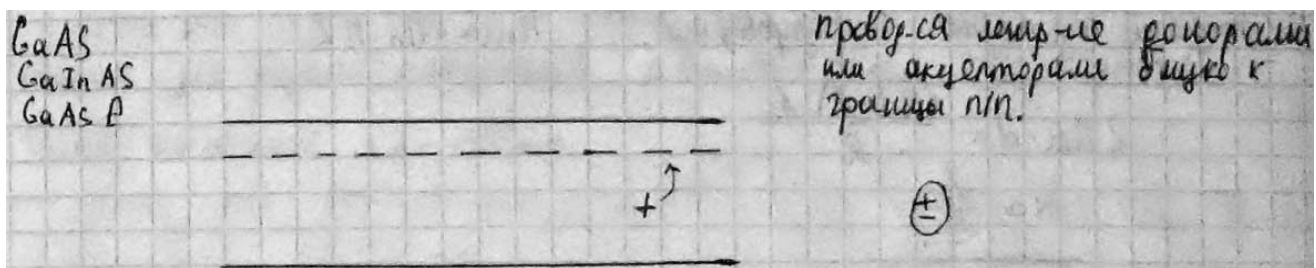
Значит толщина пленки должна быть равна  $l \approx \frac{\lambda}{4}$

#### 4. Шлифовка или полировка.

Создание микрорельефа, который увеличивает кр углы в опр. точках поверхности.

#### 5. Нарушение закона сохранения квазиимпульса.

П/п с изоэлектронными ловушками.



Из-за очень сложной решетки п/п электрон удерживается всей совокупностью силами в данном месте решетки.

GaAs

GaInAs

GaAsP

При рекомбинации дырка теряет свою энергию и образуется экситон  $\pm$  (в кружочке) и фотон. Образующийся фотон имеет энергию  $E_G - E_{\text{актив. донорного уровня}}$  и находится на донорном уровне. Поэтому в п/п он не сможет поглотиться из-за своей энергии.

## 11.2. Материалы для изготовления светодиодов

Поговорим еще немного о светодиодах.

Материал	Цвет	$\lambda_{max}$	$\Delta\lambda$
GaAs	ИК	950нм	
GaP(легир. Zn,O)	Красный	690нм	
GaP(легир. N)	Зеленый	550нм	
$GaAs_{1-x}P_x$ (x=0,45)	Красный	640нм	
$In_{1-x}Ga_xP$ (x = 0,6)	Желто-зеленый	570нм	40нм
SiC(не актуально)	Желтый	590нм	140нм

На SiC были изготовлены первые светодиоды, но технология изготовления была очень сложна. Сейчас такие диоды уже не делают.

Надо заметить, что диоды все-таки дают спектр излучения, однако он достаточно быстро спадает. Таким образом обычно  $\Delta\lambda$  составляет 10-40нм. Только для SiC он составлял 140нм.

Также есть характеристика - **лепесток излучения**. Что под этим понимают? Ну интересно же знать направление излучения. Четко ли оно направлено, или же в большом телесном угле излучает? Соответственно для каждого светодиода приводят такой лепесток. Строится лепесток следующим образом - горизонталь, от горизонтали лепесток. И указывается направление, градусы.

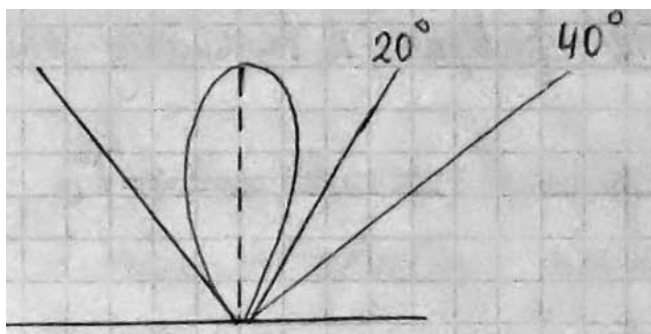


Рис. 3: Лепесток излучения для GaP

Есть, конечно, еще одна полезная характеристика для разработчиков.

Обычно она в справочниках не указывается. Если ток увеличивать, будет расти интенсивность излучения или не будет? По идее должна до определенного предела, но, конечно, все быстро переходит в насыщение.

Считаем, что светодиоды рассмотрели.

## 12. Лазеры

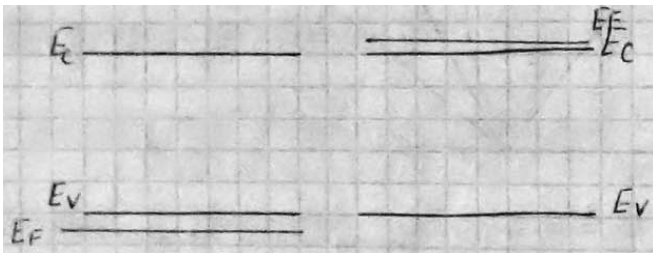
Обязательно должна быть инверсная населенность. В добавок к тем условиям, что мы поставили для светодиодов. Самый простой способ - оптическая накачка.

И еще одно условие - между стенками резонатора должно укладываться целое число длин волн.

Итого:

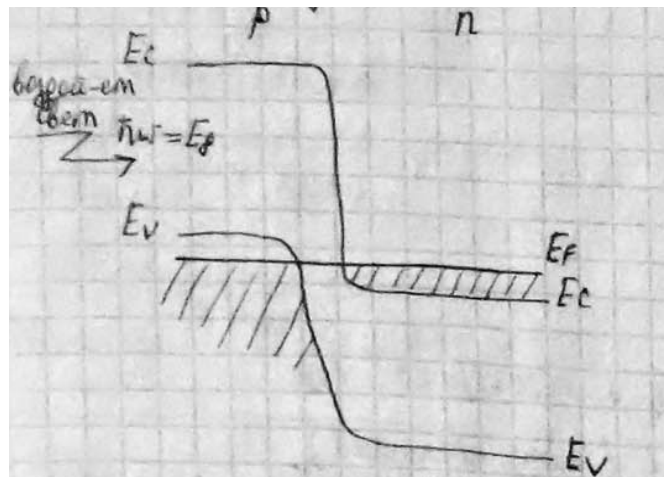
1. ЗСЭ
2. ЗСКВИ
3. Нарушение равновесия.
4. Инверсная населенность.
5. Резонатор с целым числом длин волн.

Мы должны сделать GaAs диод из вырожденного полупроводника. Вернее, как минимум одна составляющая должна быть такой. Рассмотрим, почему использование вырожденного  $n$ /ка создает инверсную населенность.



Из картинки ясно, почему использование вырожденного  $n$ /ка дает нам инверсную населенность.

Надо обратить внимание, что действительно мы потом создаем резонатор. Конструкция Фабри-Перо, очевидно, заставляет фотоны пройти резонатор кучу раз. Однако, все равно частично фотоны выходят. Есть область, получившая название активной. В ней то и происходит стимулированная эмиссия. Например, некая мощность  $P$ , Вт, подходит к зеркальной стенке и отражается от нее. Эта мощность является причиной создания носителей заряда

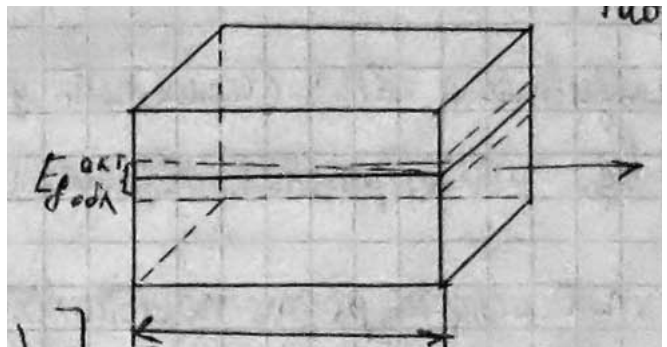


$PR_s \left[ \exp \left( g \frac{d}{D} - \alpha \right) \lambda \right] = P$ ,  $g$  - скорость рождения заряда. То есть внутри резонатора НЕТУ увеличения/усиления мощности!

По идее должно было бы быть лавинообразное нарастание мощности, но этому препятствует истощение инверсной населенности. Тогда в игру вступает процесс поглощения связанными носителями заряда.

В отличие от светодиодов мы по сути имеем одну длину волны, однако это может быть не сразу после включения, а лишь спустя некоторое время, когда диапазон уже сузится по существу до одной длины волны. И, конечно, излучение будет когерентное в пространстве, потому что мы так сделали резонатор. То есть излучение на краю резонатора идет всегда одной и той же фазы.

Надо только понимать, что прохождение когерентного света через оптические системы отличается от прохождения обычного света.



## 13. Электролюминисцентный конденсатор

На электрод наносится намазыванием сернистый цинк.

Если прикладывается напряжение к этой структуре, то полкчается излучение желтого цвета. Излучение обусловлено только рекомбинацией, а значит нужно нарушение ТДР. Оторвать от атома электрон может полевая ионизация, но поле должно быть очень большим.

Если у нас 100мкм и хотим получить 10 в 8, то надо подать 1кВ. Для полевой ионизации нужны сотни вольт, от 100 до 300, и с этим мирились, почему? Отрывается электрон от пп материала, Сернистый цинк - очень широкозонный, у него  $ZV=3.7V$ , если такая широкая зона, то переходы с одного ловушечного уровня на другой ловушечный уровень дает большое количество фотонов. Вводят либо медь, магний, которые создают ловушечные уровни. Полня где-то около границ, и у границ создались неравновесные носители заряда, способные рекомбинировать, но они перемещаются к электроду с большой дрейфовой скоростью и в такой ситуации не может пройти рекомбинация, а авсоком электрическом поле, значит ничего не будет высвечиваться, значит чтобы было высвечивание, то надо убирать поле, то есть надо подавать переменное напряжение. Почему же так долго ими занимались?

Особенность - эти приборы деградируют, по непонятным причинам, то есть по истечении времени свечение уменьшается и окончательно пропадает. Но когда появились светодиоды, ими все равно занимались.

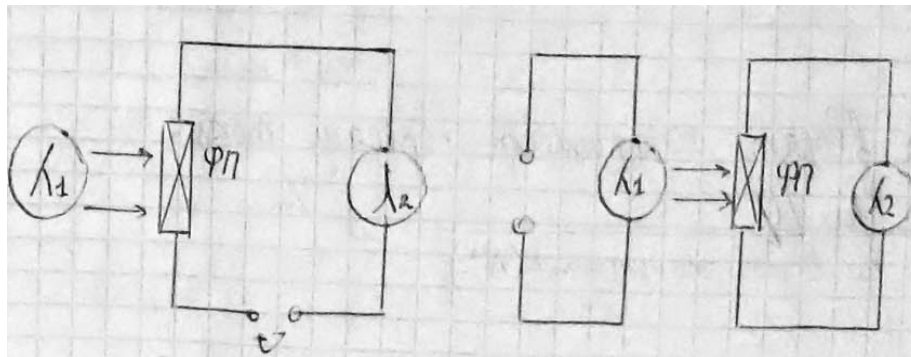
Светодиоды и э/л конденсаторы НЕ равнозначные вещи!!!



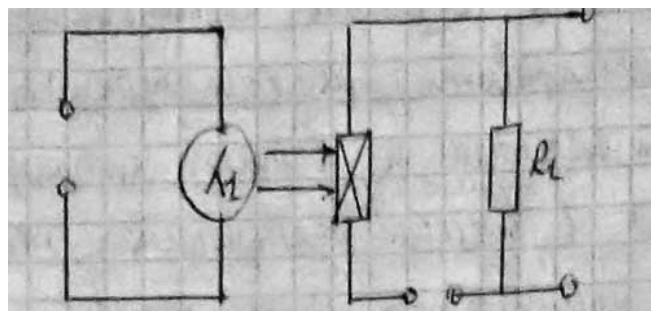
## 14. Оптроны

Оптопара - комбинация излучателя и фотоприемника.

1. Оптроны с внешней оптической связью и внутренней электрической.



2. Оптроны с внутренней оптической связью.



3. Ключевой оптрон.

Фундаментальное назначение: получение излучения, преобразование длины волны. Преобразование ИК излучения в видимое - это у 1го типа.

Ключевые оптроны изготавливаются для управления большими токами - это тиристорные оптроны. Ну самый популярный оптрон - гальваническая развязка.

### 14.1. Параметры оптронов

Теперь рассмотрим немножко параметры оптронов. По существу они определяются параметрами излучателя и фотоприемника. Некую коррективу вводит, конечно, среда. Как обычно изготавливается оптрон? К кристаллу передатчику приклеивается кристалл приемника. Вот вещество между кристаллами и может повлиять на параметры. Какие требования необходимо предъявить

к среде между передатчиком и приемником? По существу их два, но вообще-то три. Прозрачность. Коэффициент преломления должен быть равен  $n$  пр излучателя. Коэффициент теплового расширения. Что еще нужно учесть? В принципе на излучателе и фотоприемнике желательно иметь антиотражающие и осветляющие пленки для лучшей передачи. Такими пленками обычно являются пленки  $\text{SiO}_2$ .

#### **14.1.1. Коэффициент передачи тока**

Обычно для оптрона вводят коэффициент передачи тока  $K_i =$  - по сути показывает количество потерь в среде между кристаллами, либо не сработало.

#### **14.1.2. Быстродействие**

Второй параметр оптрона - быстродействие, это обычно сумма двух  $\tau$  - когда идет включение и выключение оптрона.

#### **14.1.3. Развязывающее сопротивление**

Третий параметр - развязывающее сопротивление, которое разделяет входные и выходные цепи. И оно не зависит от излучателя или приемника, а зависит просто от конструкции самого оптрона и лежит в промежутке от  $10^{11} - 10^{13}$  Ом.

#### **14.1.4. Линейность характеристики передачи**

—

### **14.2. Классификация оптронов по типу фотоприемника**

1. Диодные.
2. Транзисторные.
3. Тиристорные.
4. Резисторные.

У такого коэф. предчи тока принято определять отношением светового тока к темновому.

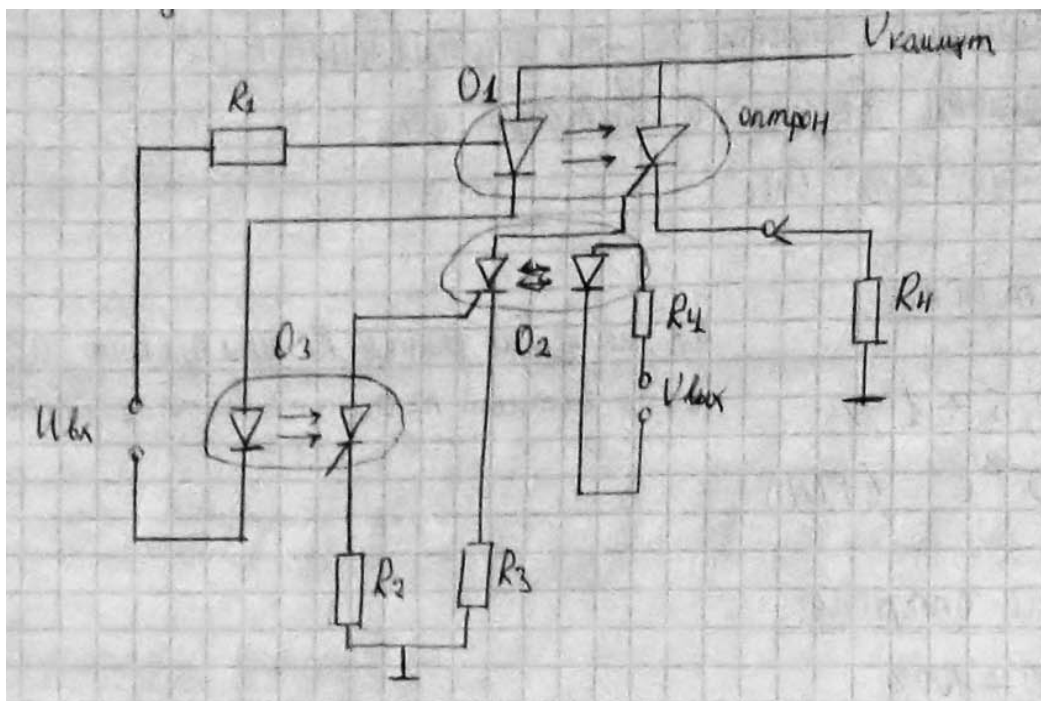
Оптрон	Коэф. пер. тока, %	Быстродействие
Диодный	0.5-0.1	$10^{-8}$ с
Транзисторный	10-100	$(2 - 5) \cdot 10^{-6}$ с
Тиристорные	10-1000	$(20 - 100) \cdot 10^{-6}$ с
Резисторные		$10^{-1} - 10^{-2}$ с

Как обычно тут идет борьба между параметрами - диодный быстрый, но малые токи. У тиристорного огромные токи, но малое быстродействие. А зачем же тогда изготавливаются другие? Из-за линейности характеристики передачи. Т.к. из-за фотовольтаического эффекта мы никогда не будем иметь линейную характеристику передачи. Причем, умеют подавлять фотовольтаический эффект, когда требуется большое быстродействие. Но рассказывать времени не хватает.

Но физические эффекты, на которых основана ЖК ячейка все же будут рассказаны.

## 15. Оптоэлектронное реле

Оптореле состоит из 3х тиристорных оптронов. Достаточно сложная девай- сина, но делали так: O1 - оптрон 1 - находится в выключенном состоянии, имеет



высокое сопротивление, а если подаем напряжение на вход, то тиристор начи- нает высвечивать, на тиристоре ничего не падает и напряжение окммутации падает на нагрузке. Теперь его надо выключить. На O2 подается напряжение выхода и закрывает по базе тиристор в O1.

O3 - обычный тиристорный оптрон, ставится для предотвращения защелки схемы, то есть от какого-то случайного импульса. То есть он закрывает своим током O2.

Обозначения оптронов: АОД101 – диодный оптрон, АОТ123 – транзистор- ный оптрон, АОУ103 – тиристорный оптрон, ТО-2 – силовые оптроны.

## 16. Многоэлементные фотоприемники (фотоприемные передающие матрицы)

Телевизионный стандарт 625х625 элементов разложения.

Режим накопления заряда (интегрирования). Каждое устройство передачи изображения работает в режиме накопления заряда.

Каждый элемент передающей матрицы должен содержать емкость накопления, и эта емкость должна быть шунтирована сопротивлением  $R = f(I_\lambda)$ . Начало работы - это полностью заряженная емкость, то есть замкнутый ключ, емкость зарядилась и прибор готов к передаче изображения.

$$Q = C_H V$$

$$\Delta Q = Y_\Phi t_{\text{и}}$$

$$V_c = \frac{Q - \Delta Q}{C_H} = U - \frac{Y_\Phi t_{\text{и}}}{C_H}$$

$$V_H = V - V + \frac{Y_\Phi t_{\text{и}}}{C_H}$$

Емкость нагрузки измеряем, когда периодически замыкаем ключ и отслеживаем периодическое изменение.

$$V_{\text{н. мгновенная}} = Y_\Phi R_H$$

$$V_H = \frac{Y_\Phi t_{\text{и}}}{C_H}$$

$$Y = \frac{V}{R_H} e^{(-t/\tau)}$$

$$\tau = C_H R_H$$

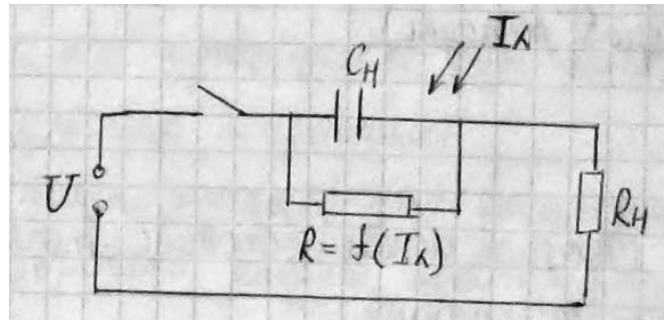
$$V = \frac{Y_\Phi t_u R_H}{\tau}. \text{ Здесь } t_{\text{и}} - \text{ время воздействия света (время между двумя замыканиями ключа).}$$

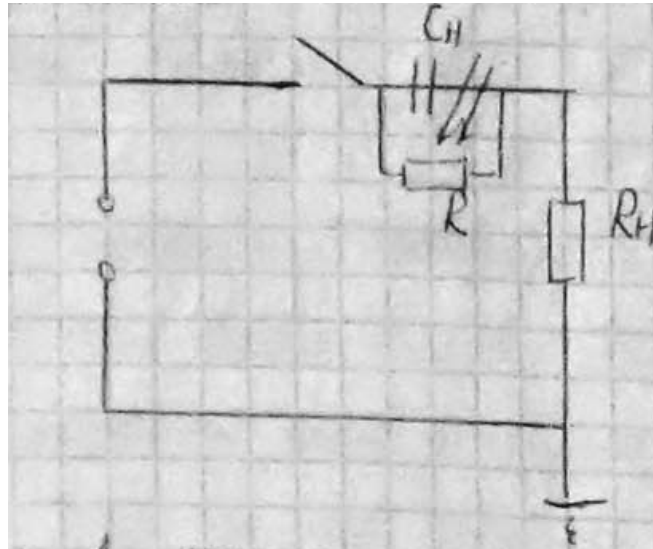
$$\frac{V_{\text{н. мгнов}}}{V_{\text{н. на период вкл ключа}}} = \frac{t_u}{\tau} \quad (*)$$

Режим накопления заряда придуман ради того, чтобы получить выигрыш в напряжении, то есть соотношение (\*) должно быть очень большим.

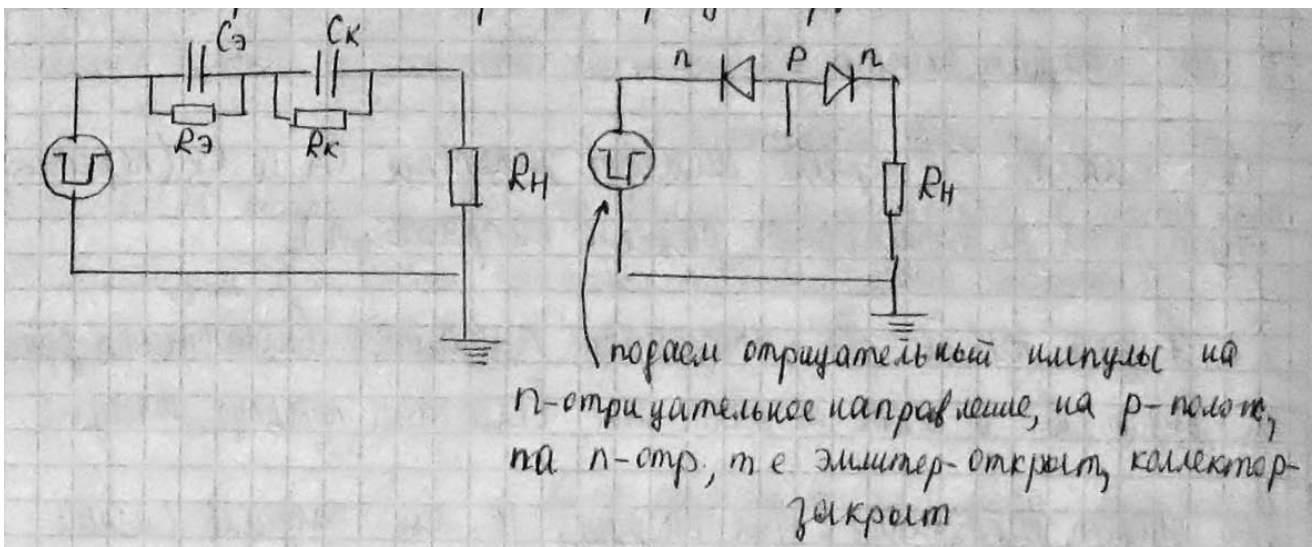
Например, при нагрузке 10пФ, токе 10нА, времени импульса 20мс, и нагрузке 1кОм, получаем 1мкВ на нагрузке, а в режиме накопления 2В. Выигрыш в 6 порядков.

Выходной сигнал - состояние степени разряда емкости. Когда прибор отключен от источника питания, происходит разряд конденсатора. И пока опрашиваем массив 800х600 элементов, первый элемент работает, так как емкость





разряжается. После опроса всех, замыкаем цепь на 1 Ом элементе и происходит дозарядка конденсаторов. Дозарядка очень быстрая. Когда дозарядка - фотоэлектрический преобразования не происходит - нам не важен в этот момент фототок. Эту структуру можно реализовать на 2х диодах. 1ый - накопитель, 2ой - ключ. Но берется не два диода, а БТ. ЭП как ключ, КП - как накопитель. Рассмотрим БТ.



Передаем отрицательный импульс на n. То есть эмиттер открыт, КП - закрыт.

Когда в цепи импульс такой полярности, это значит, что я замкнул ключ, так как низкое сопротивление перехода. И емкость заряжается до импульсного напряжения. Импульс кончился, прямо смещенный диод выключился и со временем приобретает напряжение обратно смещенного перехода.

По окончании импульса появляется в цепи емкость, но она не заряжена. (емкость

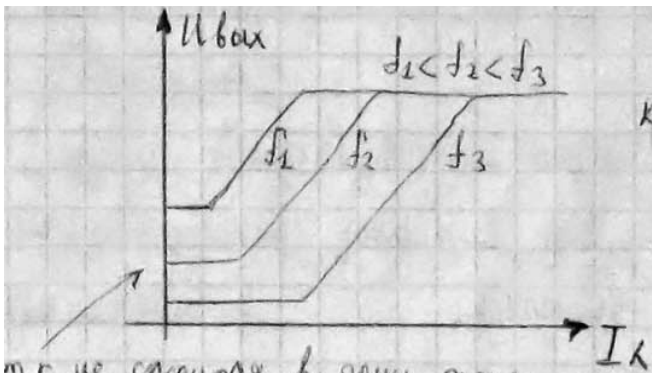
эмиттера)

То есть коллекторная заряжена, а эмиттерная пустая, поэтому начнется перезарядка емкостей. Роль ключа - он не только включает, когда есть импульс и выключает, когда заряд емкость эмиттера.

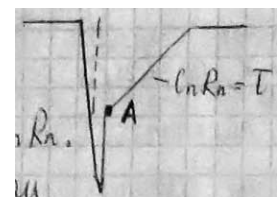
Даже, если нет света - нулевой сигнал мы не получим, потому что с коллекторной емкости заряд немного переходит на эмиттерную - это сигнал коммутационной помехи, он всегда присутствует.

Если я опрашиваю импульсом прямоугольным, я не получаю никакой информации об освещенности, вне зависимости от того разряжалась или нет коллекторная емкость, значит роль фронта нарастания импульса играет большую роль!!

Мы получаем импульс, равный импульсу опроса. Прямоугольный импульс - мы его подали и в первый момент у нас открыт эмиттер. Обе емкости в первый момент заряжены. То есть в цепи как бы два источника питания, включенных друг на друга, и в этот момент мы включаем прямоугольный импульс. Где упадет напряжение? На нагрузке. И мы получим сигнал помехи, равный максимальному выходному сигналу. Часть заряда уйдет с К на Э. Желательно, чтобы не было емкости эмиттера, но так нельзя и надо стараться сделать ее минимальной. Так как маленький эмиттер, маленькая емкость, значит маленький сигнал помехи. Получаем сигнал помехи, равный максимальному входному сигналу. Емкость коллектора получается очень большой, а емкость эмиттера малюккая.



Выигрыш, который мы получили - это отношение времени интегрирования(увеличили) и общему времени(уменьшили). Насколько мы можем повышать время интегрирования? Оно ограничено размером емкости и темновым обратным током. То есть темновой ток может разрядить эту собственную емкость. Можем мы уменьшать время опроса -  $\tau$  - или нет и до какого предела? Если мы возьмем время опроса меньше постоянной времени дозаряда емкости, то выходной сигнал будет зависеть от предистории.



Пусть время фронта равняется времени опроса импульса, то в этом случае получи: когда мы подали импульс опроса, то мы имеем две емкости и требуется время ключения, и если время включения будет маленьким, то тогда очень большое время действует в цепи две емкости, то есть на нагрузке падает довольно большое напряжение. Время дозаряда емкости, где емкость меньше эмиттерной и у нас идет ситуация, что выходной сигнал примерно равен импульсу опроса. Но если все-таки ключился ключ, то у нас сразу появится одна емкость и сразу меняется постоянная времени нагрузки. И нести от обесценности будет точка.

Время фронта всегда БОЛЬШЕ времени включения диода ключа!!!

Пусть фронт имеет очень большую величину. Импульс меняется медленно, но время то идет и коллекторная емкость заряжается, но импульс только стремится к максимальному, а выходной сигнал будет равен времени заряда емкости, то есть не полная амплитуда будет, так как емкость уже целиком зарядилась и все, а импульс еще стремится к максимальному. Никто сейчас из БТ передающие матрицы не делает? БТ, матрицы должны состоять из тр-ов с воспроизводимыми параметрами.

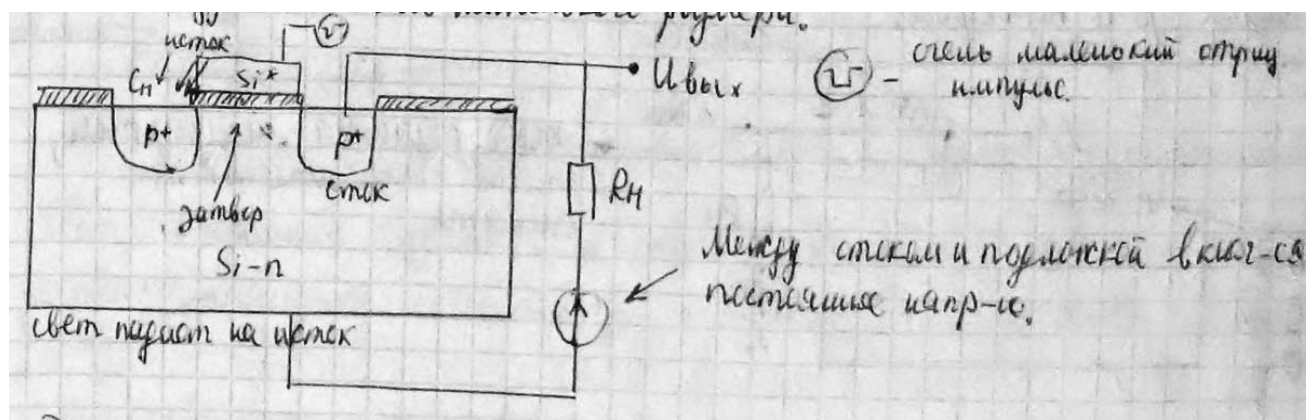
Режим накопления заряда - режим для очень многоэлементных приемников. В чем главная особенность этого: Заставить фотоприемник производить фотоэлектрическое преобразование, пока опрашиваются другие приемники, то есть за время кадра порядка 20мс.

Это для получения усиления выходного сигнала - не мВ, а Вольты.

Реализовать ее можно: накопит емкость, ее шунтирующее сопротивление, элетрический ключ(в нем главные проблемы).

Причина: трудно воспроизвести параметры разных транзисторов - например, коэф усиления сделать.

## 16.1. МОП фотодиод



Накопитель - диод, являющейся истоком МОПТ.



Сток создается очень маленького размера. Между стоком и подложкой включается постоянное напряжение. Подавая импульс на затвор, образуется канал, область образуется - сток-исток. У истока емкость нагрузки (как диод).

Импульс прекращается, канал убирается. Светим на сток, емкость истока нагрузки разряжается.

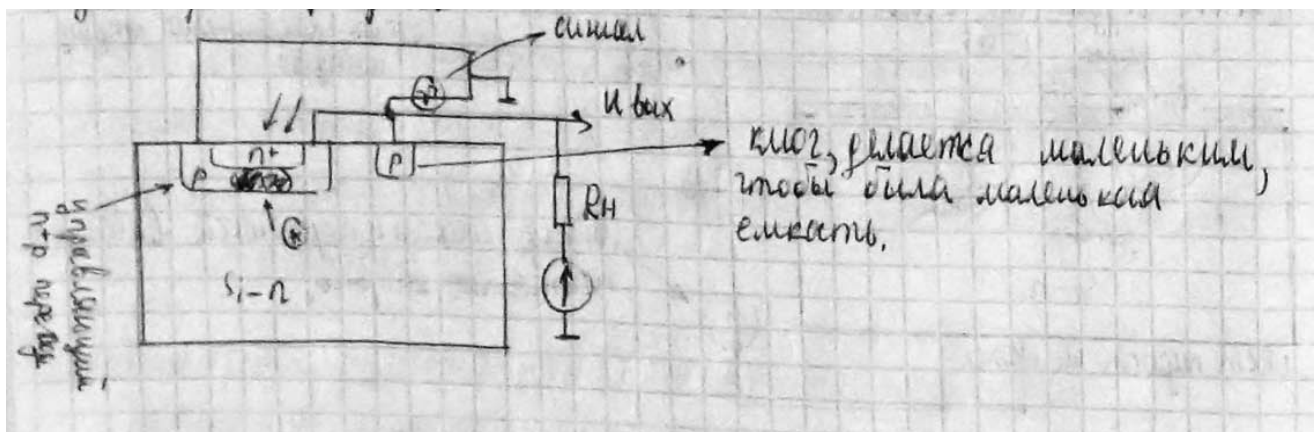
Через время кадра, подадим на затвор напряжение и опять канал образуется и придит дозаряд емкости нагрузки и по току протекаемому узнаем насколько сильной была эта емкость разряжена.

Такие структура потому что сделать одинаковые МОПТ сделать легче.

### 16.1.1. Сдвиговый резистор

Последовательную подачу импульсов на линейку МОПов можно гораздо легче реализовать. Линейки делали до 40к МОПТ, чаще всего на ?? МОП диодов со встроенным сдвиговым резистором для опросов.

### 16.2. Еще один способ

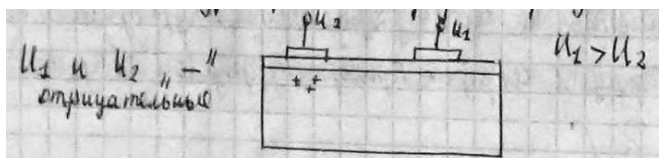
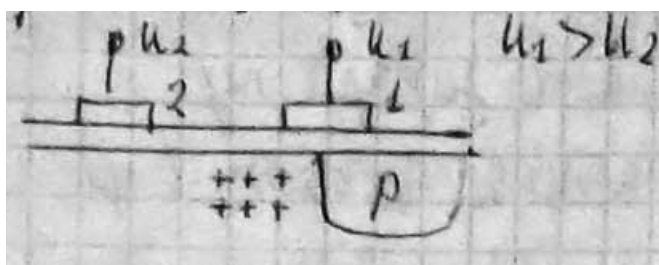
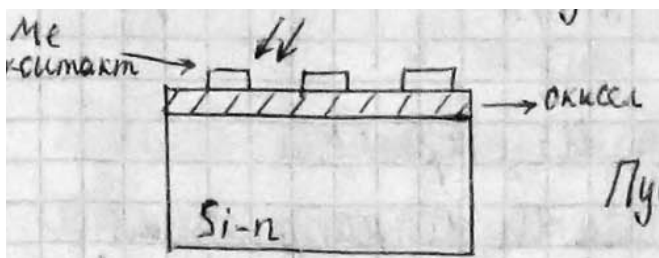


Получение накопления заряда на полевом транзисторе с управляющими рп переходом. Ключ делается маленьким, чтобы маленькая была емкость.

К базе полевого транзистора 2 контакта и подаем постоянное напряжение, когда открыт ключ. Можем подать напряжение таким, что области объемного заряда смыкаются.

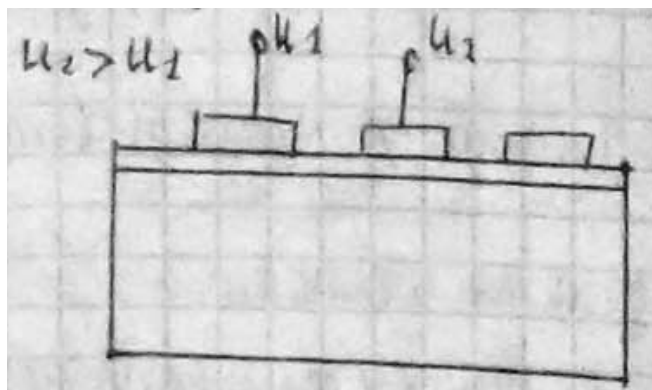
Напряжение не поступает и происходит освещение, после увеличивается ток, область объемного заряда под действием этого напряжения уменьшается и появляется просвет в пэ области и начинает проходить ток. Чем больше просвет, тем больше ток. Сейчас передающие (?) камеры они двухмерные и не изготавливаются ни на БТ, ни на МОП, ни на полевых транзисторах. Они изготавливаются на основе диодных структур (диод накопитель, емкость шунтирующих сопротивлений) и прибор с зарядовой связью.

## 17. ПЗС



Далее емкость металл-диэл-пн. Это уже прибор с накоплением заряда. Пусть падает свет, и затвор пропускает свет. Свет в кремнии создает электроны и дырки, если делать компактно - дырки притянутся к контакту, а электроны отойдут вглубь (если напряжение отрицательное). Если большая интенсивность - дырок много. Если есть матрица таких конденсаторов, то под этими контактами формируются заряды, соответствующие световому сигналу. А как его вывести и распознать? На выходе структуры плавающая, ни к чему не подключенная, область. То есть надо так изготовить чтобы расстояние между затворами было мало и заряд ключа перемещается под действием дрейфа. При  $U_1$  больше  $U_2$  весь дрейфовый заряд перейдет в 1.

И так далее, но при этом напряжение при 500 затворах увеличится очень сильно, поэтому регулируются все напряжения. Минимум нужно 3 напряже-



ния:  $U_0$  - близко к пороговому, не может ничего удержать.  $U_{хр}$  - напряжение зранения, напряжение, большее, чем  $U_{хр}$ . Почему эта идея “не очень”?

Под каждым электродом - свой зарядовый пакет, соответствующий освещаемости. Есть большой заряд, есть маленький, и он искажается.

Накопление заряда - время кадра, и перенос заряда быстрый. Искажается картинка, так как по одной и той же структуре мы и копим, и переносим. Можно из-под одного затвора под другой перенести 99.99 процентов заряда.

Есть поверхность, а значит какая-то доля заряда оседает на поверхностных состояниях, а значит, что когда полная темнота, с поверхностных состояний может выйти заряд и будет свечение. Конченное  $\epsilon = \epsilon \cdot \eta$

Борются - переносить заряд не по поверхности, а по каналу в глубине - создают скрытый слой. Не так легко и создать структуру выше описанную.

Например, алюминий даже в тонких пленках не пропускает свет, значит зарядовых пакетов быть не должно, а они есть, так как собрался заряд с округи, для устранения стали делать охранные кольца. И работать в диапазоне от очень черного до очень яркого она не может, есть предела для черного и белого.

То есть мы сделали линейку, а она не может переварить такое количество дырок, а остальные надо сбрасывать - нужно сбрасывающее устройство. Но суть в том, что мы не хотели опрашивать линейку по той же структуре, что и накапливать.

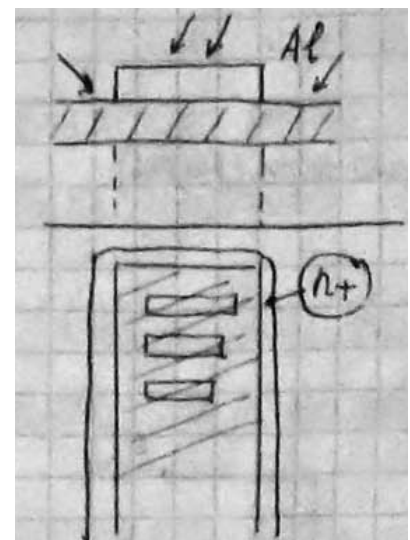
От Алуминия отказались, делали их окисла индия, а окислы плохо пропускают голубые цвета, и возникает искажение. И тогда решали: зачем вообще нужен МОП? Можно ли сделать и диод и все будет тоже самое, но возникает вопрос, а как вывести сигнал?

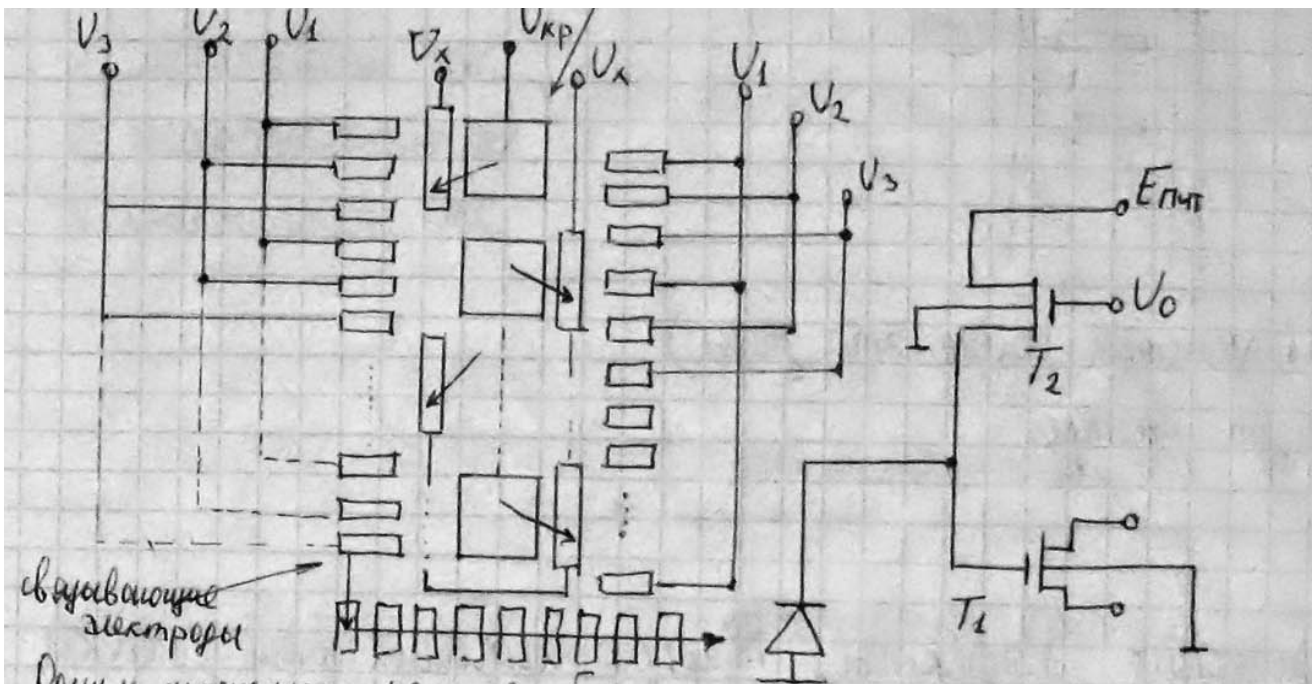
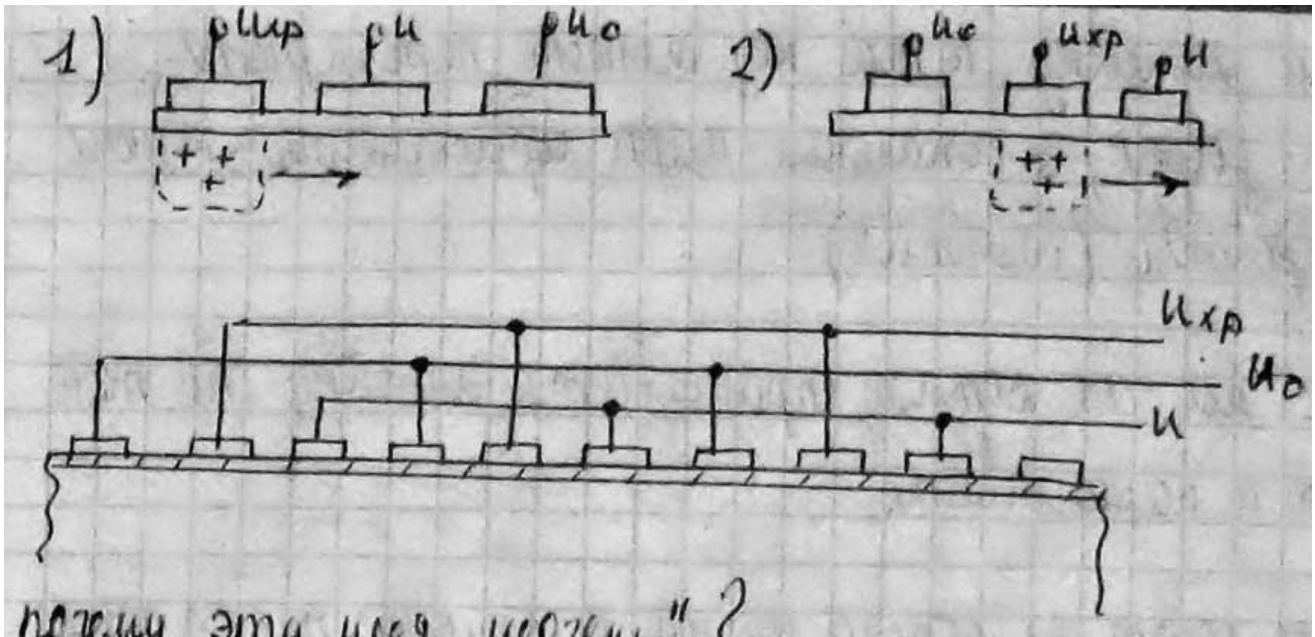
В каждом диоде столько дырок, сколько светило, А как вывести информацию? Стали использовать для вывода ПЗС. С диода очень быстро перенести заряда, желательно за один такт в ПЗС линейку, закрытую от света и вывести по ней и все.

В 3х фазном ПЗС три элемента действуют как ???? передающий элемент.

Теперь надо вывести заряд на выходное устройство: на первый элемент ПЗС линейки и продвигать вниз, но потом надо соединить выходы этих сигналов, поэтому снизу строится еще одна ПЗС линейка: то есть последовательно выводим заряда от первого диода и так далее, и затем на выходное устройство(плавающая п-область) на затвор МОПТ и по току в МОПТ судим о сигнале. Т2 нужен для напускания в плавающую область электронов, для убыстрения рекомбинации.

Фоточувствительные элементы сейчас - это диоды. Вывод идет быстро.





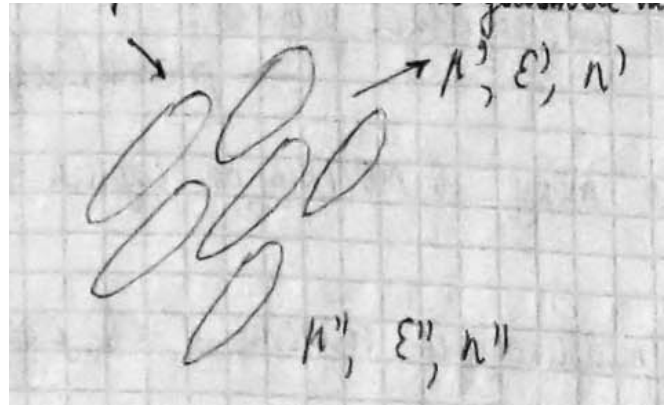
## 18. Физические эффекты. ЖК ячейки

1888 год. Органика при нагреве меняет свою прозрачность. То прозрачная, то молочно белая. Малый температурный диапазон - от минус 6 до 40 градусов, и главные исследования шли в этой области, то есть подобрать такие жидкости, чтобы расширить этот температурный диапазон. Этот материал имеет очень длинные молекулы:

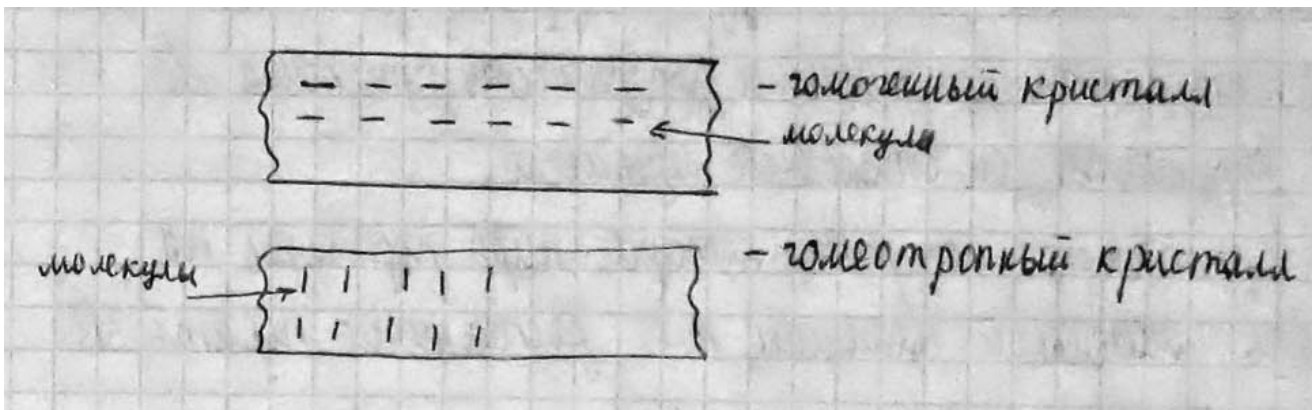
Эти молекулы легко подвергаются воздействиям внешних факторов, легко ориентируются в пространстве.

1 тип ЖК - это когда их свойство проявляется в определенном температурном диапазоне.

2 тип ЖК - это когда свойство проявляется при изменении концентрации.



1. Нематические ЖК
2. Холестерические ЖК
3. Смектические ЖК



Эффекты, на которых строятся ЖК: эффект динамического рассеяния, эффект двулучепреломления, твист эффект (эффект скручивания нематического ЖК), эффект “гость-хозяин”.

ЖК с электрической точки зрения: ЖК - это жидкость, которая является хорошим диэлектриком, с  $\rho$  порядка  $10^9$  в  $10^{12}$  Ом см.

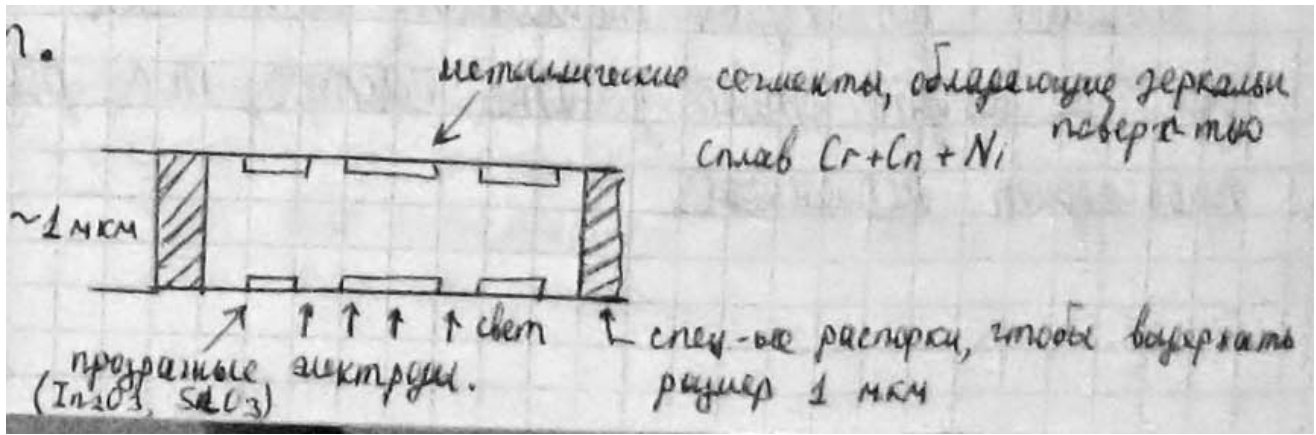
## 18.1. Эффект двулучепреломления

с. 37 методички, в самом низу.

## 18.2. Эффект динамического рассеяния

Эффект динамического рассеяния - в ЖК вводятся специальные вещества - добавки, которые снижают удельное сопротивление и  $\rho$  падает на 4 порядка.

Строение ячейки:



... Начинает протекать ионный ток между электродами, этот ток начинает разориентировать кристаллы и прозрачность кристалла в этом месте нарушается, он становится мутным. Но это критическое напряжение, которое надо подавать на электроды очень маленькой величины, то есть достаточно отдать 3 Вольта для появления ионного тока. Расстояние в 1 мкм для того, чтобы не было взаимного влияния. Это единственный эффект, который строится на протекающих токах.

ЖК не могут работать на постоянно напряжении, в том числе в этом эффекте, это связано с тем, что происходит деградация самого ЖК, он быстро утрачивает свою работоспособность, поэтому надо работать по переменному напряжению. Достаточно 20 Гц, чтобы ЖК становился устойчивым. Верхний предел - это сотни Гц, то есть низкий по частоте.

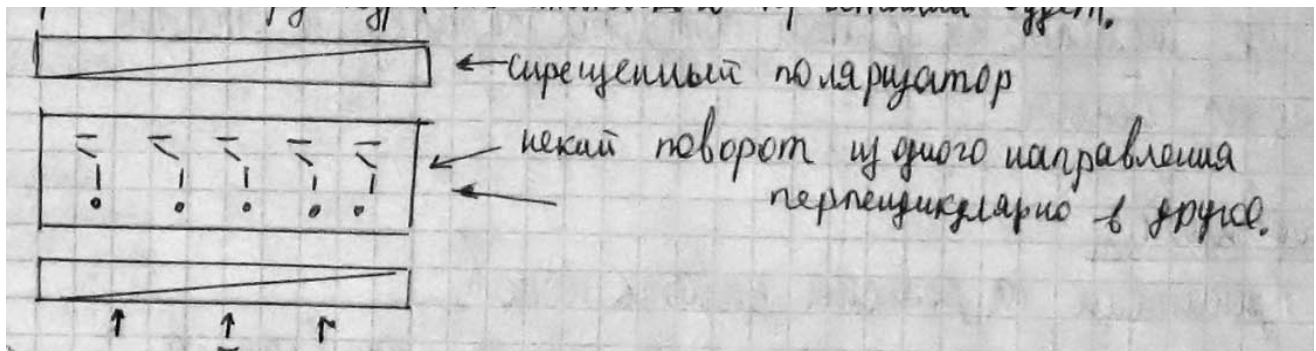
Длинные молекулы начинают хаотически вращаться, но они не могут этого делать быстро, то есть разориентация происходит медленно. Если создаются системы отображения информации, то они работают в мультиплексном режиме. Системы высвечивания: сдвигающее устройство, дешифратор и так далее. Но в каждый данный момент у нас светится одна цифра, но из-за инерционности нашего глаза мы видим, что светятся все 8 цифр, например, а не совсем одна. А другие - темные. Это и есть мультиплексный режим.

### 18.3. Твист-эффект

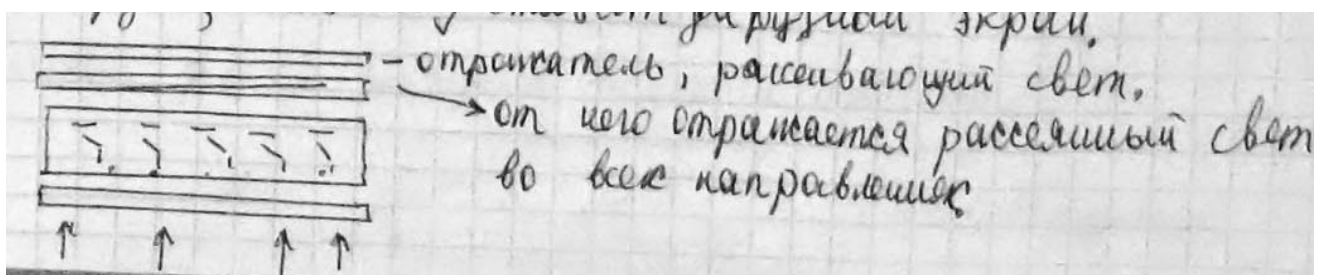
При нем структура нематического кристалла будет:

Ячейка работает только на поляризованном свете. Возможность прохождения света реализуется напряжением на электродах от 0.9 до 1.5 В.

Когда напряжение не подано, но здесь должны быть понятно электроды прозрачные и наверху и внизу (но я их не рисую), как и в прошлый раз. Ибо свет проходит сквозь ячейку. Когда напряжение не подано эта структура пропускает свет, а подача напряжения изменяет плоскость поляризации таким образом, что при подаче напряжения, если включены поляроиды, то свет не проходит



- получается темно. В силу этого свойства эта ячейка в сравнении с ячейкой динамического рассеивания выигрывает по получаемому контрасту. Оценивается контраст очень по-разному, от 300 до тысяч. Сняли напряжение это малое, и структура (жидкий кристалл) восстанавливается. В этом собственно особенность этих кристаллов. Если свет падает снизу (но в дин рассеивании были зеркальные электроды и свет отражался в сторону наблюдателя), то здесь свет принципиально должен пройти через анализатор, а значит ячейка работает на просвет, но вряд ли это нужно для систем отображения информации. Здесь нам нужно отражение, а для того, чтобы его получить нужно выше этой структуры поставить так называемый диффузный экран. Это отражатель, но рассеивающий свет. От этого диффузного экрана отражается свет во всех направлениях. А строятся эти экраны следующим образом - они должны быть шероховатыми и обладать специальным отношением с длиной волны (по шероховатости). Тогда такого типа ячейки мы можем использовать для построения экранов.



## 18.4. Эффект гость-хозяин

Этот эффект используется для придания окраски ЖК. Окрасить кристалл дело в принципе не хитрое - запустил краситель и он поменял цвет ;) Но, оказывается, таким красителем могут быть далеко не все материалы. Как должно проходить окрашивание? Один из красителей - бриллиантовая зелень. Она подходит в качестве красителя. Но особенность эффекта вот в чем - в данный



момент мы имеем цвет жидкого кристалла, но в следующий момент он должен потерять окраску и снова стать, например, белым. Тогда должны быть особые красители, которые смогут терять окраску. На основе индиго - синие красители. Прежде всего красители не должны давать ионов. Молекулы красителя, как и молекулы собственно ЖК должны также очень легко управляться внешними факторами, например, электрическим полем или механическими воздействиями.

Плеохроические молекулы - таким образом, чтобы плоскость поляризации красителя совпадала с плоскостью ЖК. Второе условие- эти молекулы по отношению к молекулам ЖК должны быть как бы перпендикулярны.

В этом первоначальном состоянии молекулы поглощают все цвета кроме своего собственного, этот цвет отражается и ЖК приобретает окраску красителя, но достаточно подать электрическое поле порядка 1В/мкм и оно начинает разориентацию молекул к плоскости поляризации света, они начинают хаотически вращаться, и условие поглощения света нарушается. Начинается поглощение спектра белого света и опять видим окраску белую ЖК, сняли напряжение и опять зеленый цвет.

Параметр	Светодиоды	ЖК	Электролампы	ЭЛТ
Яркость, $\frac{\text{Кд}}{\text{м}^2}$	Высокая, 50-350	Средняя, 30-50	низкая	очень высокая
Мощность, $\frac{\text{мВт}}{\text{знак}}$	10-100	0,01-0,1	0,1	250
Светопередача, $\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$	1	—	0,1	40
Быстродействие, с	$10^{-6}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$

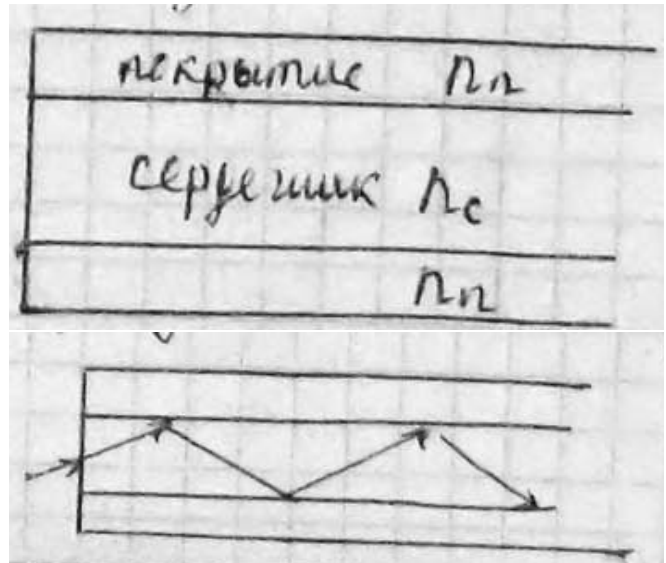
Для ЖК нету понятия светопередачи! Там же просто подсветка.



# 19. ВОЛС

Волоконно-Оптические Линии Связи

Оптоволокно должно быть двух-слойное, сердечник и покрытие. Соответственно сигнал должен идти только по сердечнику. Но для чего же нужно покрытие? Что будет, если не будет покрытия? Соотношение выполняется. Но его тогда никуда нельзя будет положить, потому что он может прикоснуться к другому материалу и тогда нарушится выполнение условия.



Требования к материалу:

1. Не должен поглощаться свет.
2. Разница  $n_c - n_n \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ .  
С - сердечник, П - покрытие.
3. Технология должна отвергать наличие дефектов.

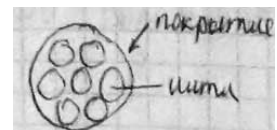
Условия объясняются разными там механическими параметрами, например на изгиб кабель.

Если в качестве сердечника мы используем оксид кремния, но дополняем такими компонентами как оксид титана, оксид хрома, то коэф преломления увеличивается.

Если добавляем оксид бора, то уменьшается.

Обычно, кабель состоит из нитей, нити вместе составляют структуру, причем в каждой нити есть сердечник и покрытие.

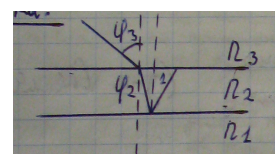
Задача. Есть структура из 3х слоев с 3мя коэф преломления. Угол падения  $\varphi_3$ , преломляется до  $\varphi_2$ . Соответственно и коэф преломления имеют те же коэффициенты.



1 - отражение луча на верхнюю границу и надо показать, что оно выйдет и не будет распределяться по сердечнику.

$$\varphi_3 - \varphi_2 = \varphi_{kr}$$

Если  $\varphi_2 = \varphi_{kr}$ , то это предельный случай. Если свет падает под углом меньше критического, то свет выйдет. Если  $\varphi > \varphi_3$ , тогда  $\varphi_2 > \varphi_{kr}$ , то от нижней границы должно пройти обратно в сердечник. Но  $\varphi_2 = \arcsin \frac{n_3}{n_2}$ ,  $\Rightarrow \frac{\sin \varphi_3}{\sin \varphi_2} = \frac{n_3}{n_2}$ .



$$\sin \varphi_3 = \frac{n_2}{n_1} \sin \varphi_2 - \text{можем так написать, потому что } \varphi_2 >$$

$$\varphi_{kr} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$$

$\sin \varphi_3 \geq \frac{n_2 n_3}{n_3 n_2} \geq 1$ , но не может быть больше 1, так как нельзя найти угла больше(или меньше)  $\varphi_3$ , чтобы не возникало противоречие. то есть излучение либо выйдет, либо один раз отразится и опять выйдет.

Свет можно ввести только с торца, но тоже под определенным углом! Ввести излучение с поверхности нельзя.

Если это  $\varphi_{kr}$ , то луч “- -” выйдет за пределы световода, так как у него угол будет больше  $\varphi_{kr}$ .

Запишем:

$$1. \frac{\sin 90 - \varphi_{kr}}{\sin \varphi_0} = \frac{n_0}{n_c}$$

$$2. \sin \varphi_0 = \cos \varphi_{kr} \frac{n_c}{n_p} - \text{Закон Снелля}$$

$$3. \sin \varphi_{kr} = \frac{n_p}{n_c}$$

$$4. \cos^2 \varphi_{kr} = 1 - \frac{n_p^2}{n_c^2} = 1 - \left(\frac{n_p}{n_c}\right)^2$$

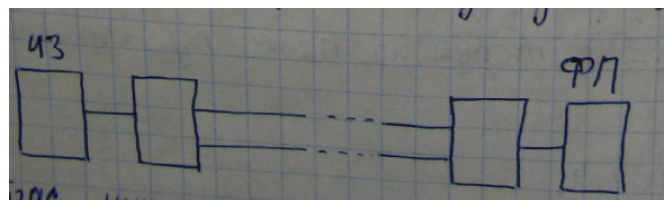
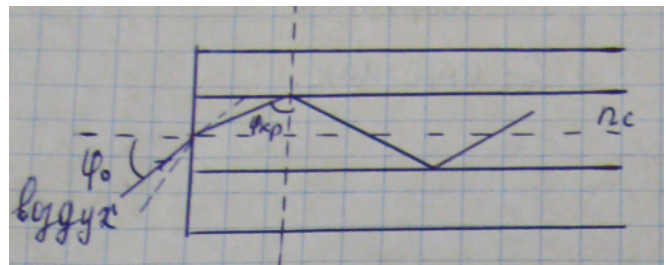
$$5. \sin \varphi_0 = \sqrt{\frac{(n_c^2 - n_p^2)n_c^2}{n_c^2 n_0^2}} \Rightarrow$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{n_c^2 - n_p^2}$$

Этот синус называется апертура высокой линии.

При любых углах более, излучение выйдет за границы ВОЛС.

на высоких частотах сигнал затухает. В электрических кабелях, но это физика, а в ВОЛС также есть затухания, но это в основном технология, и мы можем с помощью технологии управлять затуханием.(либо увеличивать его, либо уменьшать) Сейчас линии есть уже очень длинные.



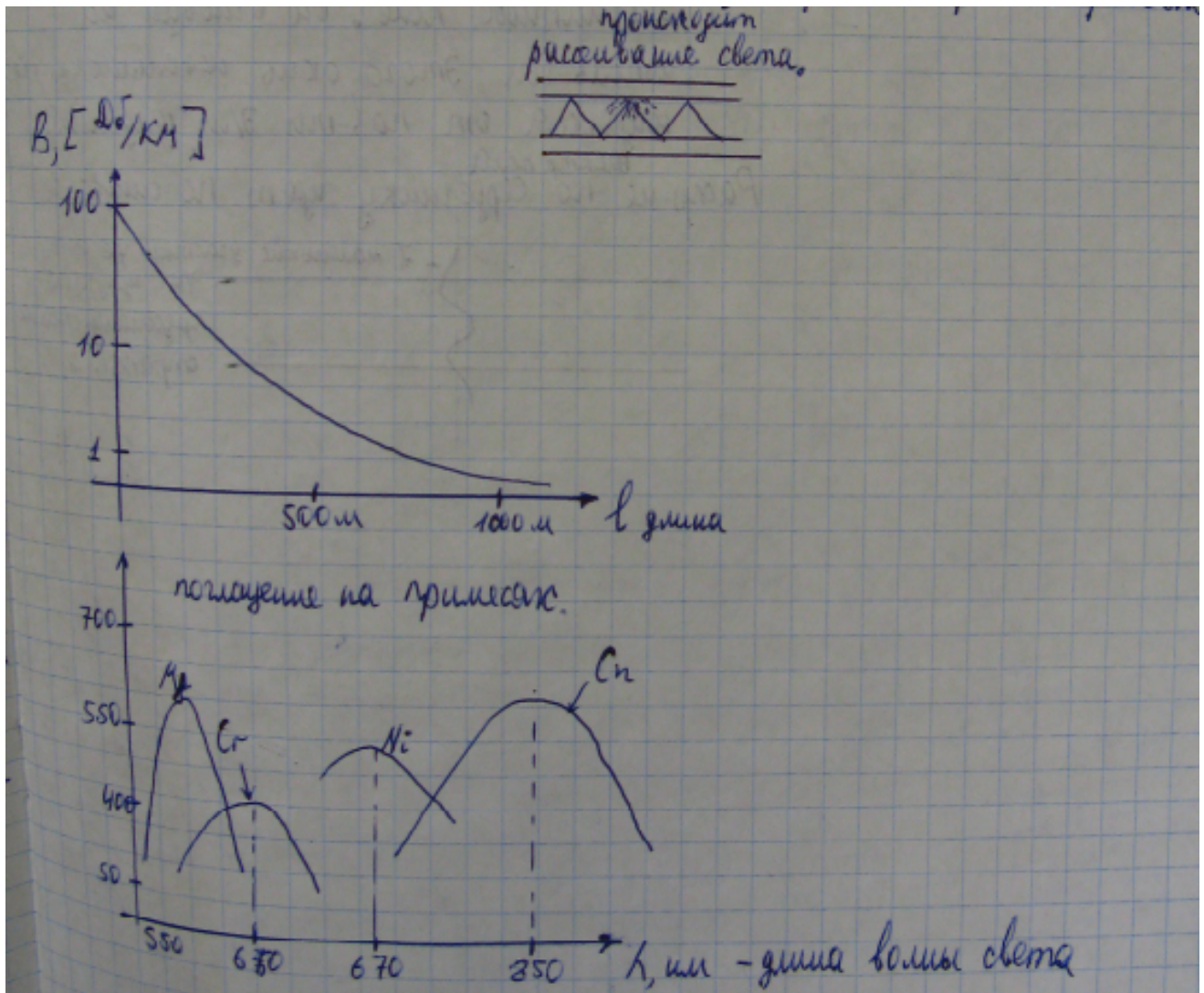
## 19.1. Факторы, которые приводят к потерям в линии

$$B = \frac{1}{l} 10 \lg \frac{U_{in}}{U_{out}} \text{ Дб/км.}$$

$$B = B_{ап} + B_{уп} + B_{фр} + B_{пог} + B_{р} + B_{от} + B_{рас}$$

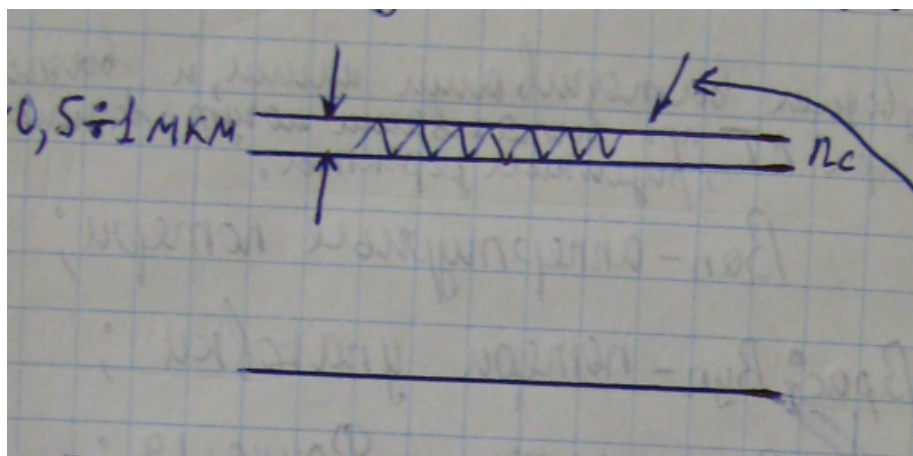
Они соответственно относятся к: неправильный угол падения, , потери на отражении от любой поверхности, излучение не должно поглощаться на этой линии(оно должно быть прозрачно), отклонения от состава стекол(которые используются), произведение вытягивания линии и вытягивание приводит к повышению температуры и могут возникать дефекты, рассеивание света.

- ап - апертурные потери
- уп - потери упаковки
- фр - потери Френеля
- пог - потери на поглощении
- р - потери Релея
- от - потери на отражении(дефектах)
- рас - потери на рассеивание



## 20. Пленочные световоды

Проблема при излучении пленочного световода: Излучение отсюда ввести





нельзя, только сбоку, а там субмикронные размеры и как ввести?

1. Призмный ввод излучения в пленочный световод.

Ввод основан на том, что при наличии полного внутреннего отражения, за пределами границы существует реальное электромагнитное поле. Он основан на использовании этого очень небольшого распределяющегося от поверхности эм излучения. Распределение по сердечнику идет по синусоиде.

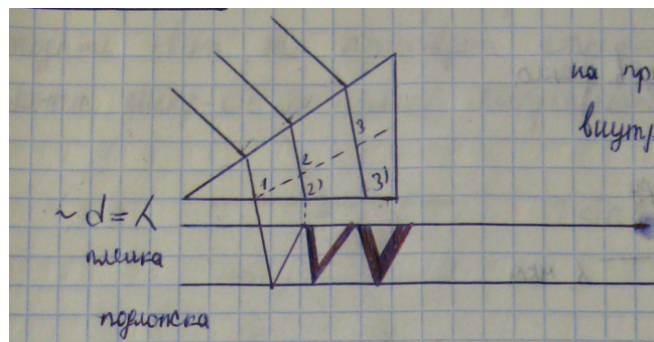
2. Решетчатый ввод излучения.

На призме внутри происходит полное внутренне отражение. Но образующееся ЭМ излучение, способное проникать в пленку, отражается от нижней границы, так как это возможно и возвращается в точку.

В таком случае в данной (-) возможно отражение, причем с увеличением интенсивность, это произойдет в том случае, если пока в пленке произойдет один зигзаг р-ия света в пленке и в (-)2 придет волна с той же фазой, то они сложатся.

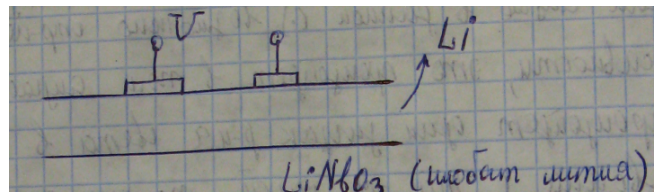
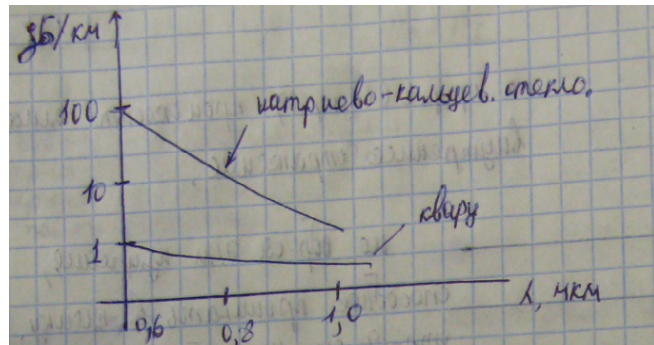
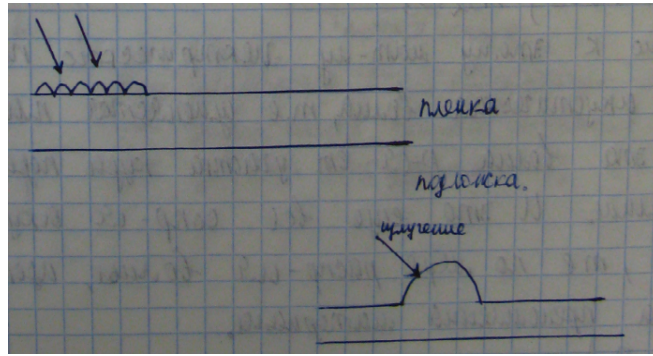
Ввести излучение здесь можно, как говорят, до 80% от падающего света на призму.

Но призма должна быть разумно подобрана и рассчитана, как соблюсти расстояние при постановке призмы на поверхности.



Для пленочных волноводов эта модуляция может осуществляться другим образом:

Все очень хорошо, идет свет, но мы хотим его модулировать.



## 21. Твердотельные дефлекторы света

Вся радиолокация основана на анализе приходящего сигнала.

### 21.1. Дефлекторы Брэгга

$\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{As}_2\text{S}_3$

При приложении к этому материалу электрического поля, в нем возникает акустическая волна, то есть изменяется плотность материала и эта волна расходится от участка куда подано напряжение по всей длине. И это еще все сопровождается акустическим эффектом, то есть по мере распространения волны, идет изменение коэф-та преломления материала.

Если не такой материал, по которой распространяется волна, подать свет, то произойдет отклонение этого света и он может распространяться под разным направлениям.

Для поляризации света используются полиэлектрические материалы или кальциты.

