

# Лазерные и телевизионные системы траекторных измерений

Лекция 8

## *Лазерные приемники*

2016 г.

9 семестр, кафедра РТПиАС, лектор:  
доцент, к.т.н. Бугаев Юрий Николаевич

# Лазерные приемники

- \* С появлением хороших лазерных передатчиков у разработчиков лазерных систем уже все остальное было, как мы дальше увидим, были приемники лазерного излучения (ФЭУ), была хорошо разработанная в ядерной физике наносекундная электроника и разработанные в рамках классической радиолокации схемы и алгоритмы. На этой лекции мы рассмотрим лазерные приемники.
- \* В лазерной импульсной локации в основном применяются приемники прямого фотодетектирования, т.н. энергетические приемники, т.е. приемники которые реагируют на кванты энергии отраженного сигнала.

# Фотоэлектрические умножители (ФЭУ).

- \* В многом быстрое развитие лазерной локации обусловлено тем , что к моменту разработки лазеров, которые могли работать не только в лабораторных условиях, уже были разработаны и широко применялись в ядерной физики такие замечательные приборы как фотоэлектрические умножители (ФЭУ).
- \* Фотоприемники – это вакуумные или полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе фотодетектора.
- \*

# Фотоэлектронный умножитель

- \* Фотоэлектронный умножитель — один из основных приемников оптического излучения, применяемых в астрономии, ядерной физики и оптической локации. Фотоэлектронный умножитель, также как и фотоэлемент, фотодиод, фотосопротивление, прибор с зарядовой связью (ПЗС) относится к фотоэлектрическим приемникам оптического излучения, в которых энергия поглощенного фотона переходит в энергию (фото)электронов. Появление фотоэлектронов меняет электрические свойства вещества (возникновение фототока, заряда, изменение проводимости и т.д.) что и регистрируется привычными техническими средствами

# Болометр

- \* Другой класс приемников основан на преобразовании энергии оптического излучения в энергию кристаллической решетки вещества, т.е. к повышению температуры поглотившего излучение прибора. Такие приемники, в отличие от фотоэлектрических, как правило, неселективны, т.е. обладают возможностью регистрировать излучение в очень широком диапазоне длин волн. Основной представитель этого класса приемников — болометр (или радиометр), широко применяющийся в астрономических исследованиях в инфракрасной области спектра и задачах ДЗЗ.

# Фотоэлектронный умножитель

- \* Фотоэлектронный умножитель работают на основе внешнего фотоэффекта, когда образовавшиеся фотоэлектроны выходят из вещества фотокатода (историческое название, связанное со способом включения устройства в электрическую цепь) в вакуум. Именно фотокатод является основным элементом преобразования оптической радиации (света) в электрический ток. Физические основы этого процесса и важные условия и подробности мы здесь рассматривать не будем. Здесь отметим, что основной характеристикой такого преобразования является красная граница фотоэффекта для данного вещества фотокатода, лежащая обычно в диапазоне от 700 нм до 1300 нм.

- \* Несмотря на то, что в последние 10–15 лет основным оптическим приемником в локациях стала ПЗС матрица или лавинные фотодиоды, обладающие более высокой квантовой эффективностью (отношением числа рожденных фотоэлектронов к числу упавших фотонов) и свойством координатной чувствительности, ФЭУ находят широкое применение в исследованиях, где главным является измерение общего потока от астрономического объекта в очень широком диапазоне блеска (динамический диапазон качественного современного ФЭУ на 2 порядка превышает динамический диапазон ПЗС матрицы) либо с высоким временным разрешением (временное разрешение ФЭУ лежит в области наносекунд и долей наносекунд, тогда как для ПЗС это в лучшем случае десятки наносекунд либо в ультрафиолетовом диапазоне спектра (эффективность ФЭУ для диапазона короче 350 нм обычно выше чем у ПЗС матрицы)).

# Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

- \* **Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)** — электровакuumный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в  $10^5$  раз и выше). Впервые был предложен и разработан Л. А. Кубецким в 1930-34.

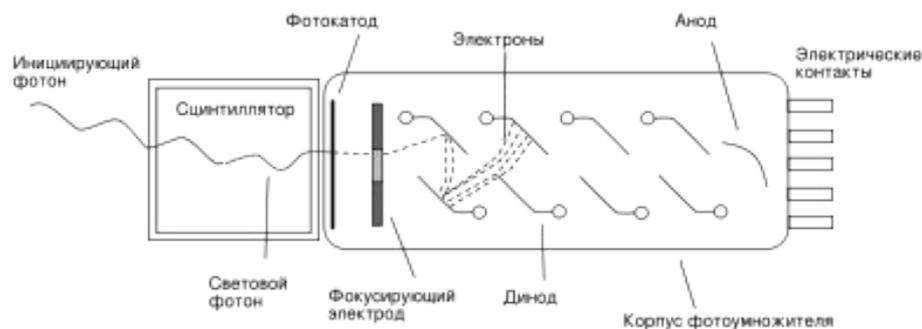
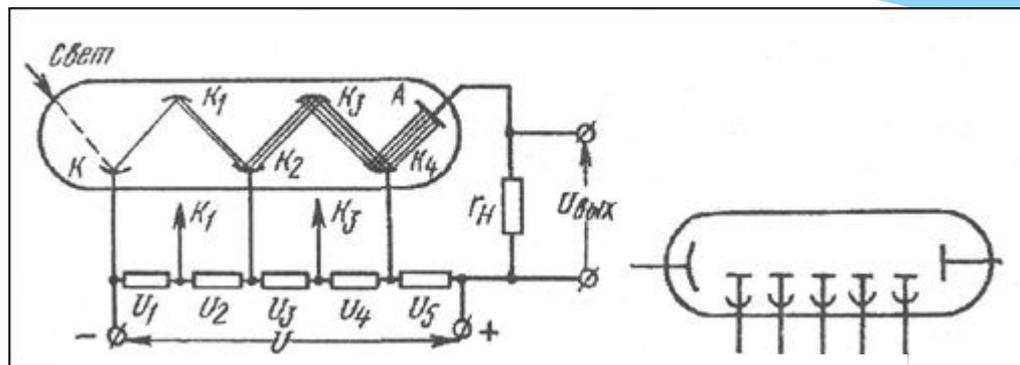


Схема ФЭУ

- \* Наиболее распространены ФЭУ, в которых усиление потока электронов осуществляется при помощи нескольких специальных электродов изогнутой формы — «динодов», обладающих коэффициентом вторичной эмиссии больше 1. Для фокусировки и ускорения электронов на анод и диноды подаётся высокое напряжение (600—3000 В). Иногда также применяется магнитная фокусировка, либо фокусировка в скрещенных электрическом и магнитном полях.
- \* Световая анодная чувствительность (отношение анодного фототока к вызывающему его световому потоку при номинальных потенциалах электродов), составляет 1-104 а/лм
- \* Спектральная чувствительность (равная спектральной чувствительности фотокатода, умноженной на коэффициент усиления умножительной системы, лежащий обычно в пределах 103—108);
- \* Темновой ток (ток в анодной цепи в отсутствие светового потока), как правило, не превышает  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  А.

# ФЭУ-83



Схематичное изображение ФЭУ



Внешний вид ФЭУ-83

Долгое время ФЭУ были основным приемником в лазерных дальномерах и в лазерных угломерах.

# Основные преимущества ФЭУ

- \* - высокая квантовая эффективность особенно до длин волн видимого и ближнего ИК диапазона;
- \* - большой динамический диапазон принимаемого сигнала;
- \* - высокое быстродействие до единиц нсек;
- \* - очень большое внутреннее усиление  $10^6 - 10^7$ , поэтому даже при малых входных сигналах на выходе ФЭУ умееется высокий уровень сигнала –десятки милливольт. Число каскадов диодного усиления 9-13;
- \* - возможность легко регулировать коэффициент усиления, простое АРУ по сигналу и шуму, просто регулировкой напряжения  $U$  на диодной системе, при этом соотношение напряжений между диодами, которое подбирается специально, не меняется;
- \* - низкий уровень собственного шума. Темновой ток (ток в анодной цепи в отсутствие светового потока), как правило, не превышает  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  А;
- \* - высокий уровень помехоустойчивости и электромагнитной совместимости;
- \* - и еще я бы сказал низкое моральное старение.

# Недостатки ФЭУ

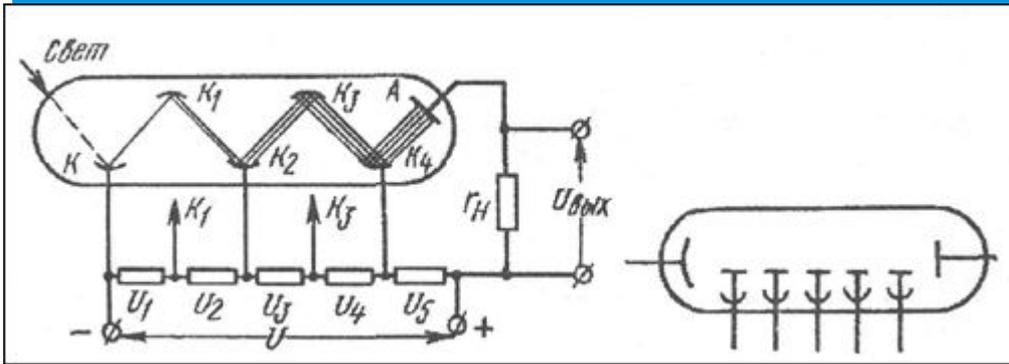
- \* необходимость высокого напряжения 1500- 3000 В;
- \* сравнительно большие габариты и вес. Если для дальномерного приемника не страшно, то для угломерного как правило многоканального большой недостаток;
- \* необходимость внешнего э/магнитного экрана;
- \* уход характеристик и старение со временем, как у любого электровакуумного прибора.

# ФЭУ фирмы HAMAMATSU

- \* Недавно мы начали разрабатывать лазерный высокоточный дальномер «Мустанг» для работы по ИСЗ и в дальномерном канале используем ФЭУ фирмы HAMAMATSU (Япония) с разрешением 0,7 нсек и задержкой сигнала в диодной системе 0,6 нсек. Это законченный приборный модуль с встроенным блоком высоковольтного питания и предварительным усилителем и управлением непосредственно от ЭВМ.

# Динодная система

- \* Сколько в среднем появляется вторичных электронов, зависит и от энергии первичного электрона и от материала динода. Эта величина называется коэффициентом вторичной эмиссии  $d$  и обычно для современных ФЭУ лежит в пределах от 3 до 10.
- \* Чтобы вылетевший из фотокатода фотоэлектрон пришел на 1-ый динод, имея достаточную энергию, потенциал динода должен быть на несколько десятков или сотен вольт более положительным. Аналогично, чтобы появившиеся с 1-ого динода примерно  $d$  вторичных электронов достигли следующего 2-ого динода, обладая достаточной энергией, потенциал 2-ого динода также должен превышать потенциал 1-ого на 100–200 В. Очень важно при этом, чтобы все вторичные электроны попали именно на динод, а не на стойки электродов и стекло колбы. Реальные конструкции динодных систем весьма разнообразны, каждый тип имеет свои особенности.



Для того чтобы на каждый электрод ФЭУ подать соответствующий потенциал, обеспечивающий оптимальную работу прибора, используется делитель напряжения, также изображенный на Рис. Простейший вариант состоит из нескольких одинаковых сопротивлений, включенных последовательно друг с другом. Общее сопротивление делителя обычно составляет 2 – 10 МОм. На один конец делителя, соединенный с фотокатодом, подается питающее напряжение  $U$  обычно около  $-2000$  В, а другой конец заземлен, т.е. находится при нулевом потенциале. В таком делителе междинодное напряжение равно  $U/5$ , т.е. примерно 150 В. Диафрагма и диноды последовательно подключаются к точкам соединения резисторов. Анод соединяется с землей через нагрузочное сопротивление  $R_L$ . Существенным является то, что параллельно с этим сопротивлением обязательно включена некая емкость  $C$  — это либо реальный конденсатор, либо просто паразитная емкость, образованная элементами реальной конструкции и входной емкостью дальнейшей электронной схемы. Эти три элемента образуют выходную (анодную) цепь ФЭУ, сигнал с которой и подается на вход электронной схемы (усилителя) для дальнейшего усиления и регистрации.

- \* Два основных метода регистрации сигнала ФЭУ. Исторически первый называется методом измерения постоянного тока и заключается в измерении среднего значения протекающего через нагрузку  $R_L$  тока. Поскольку время усреднения (от долей до десятков секунд) определяется постоянной времени  $t_e = R_L C$ , в этом случае значение сопротивления  $R_L$  должно быть велико (десятки и сотни МОм).
- \* Второй способ может быть реализован при малых значениях постоянной времени  $t_e$  выходной цепи. В этом случае сигнал на сопротивлении  $R_L$  представляет собой последовательность отрицательных импульсов напряжения длительностью  $t$  со средней амплитудой

$$h = \frac{qGR_L}{\tau}$$

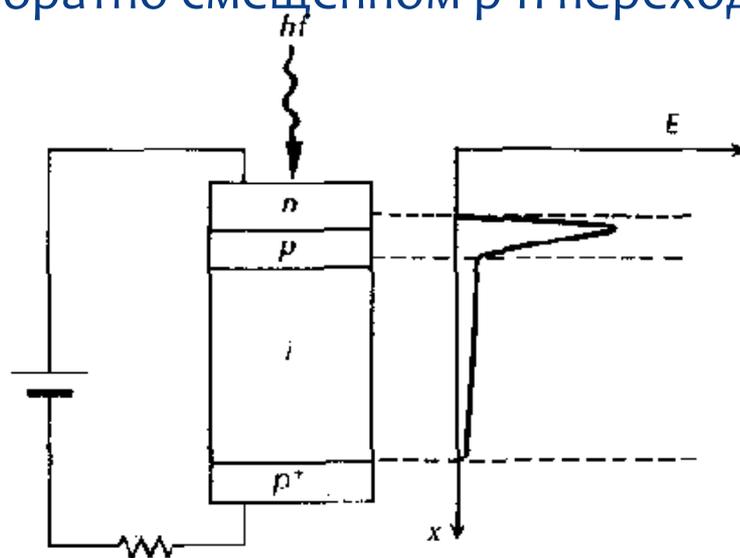
- \* Длительность импульса  $t \gg t_p$  если  $t_e < t_p$  и  $t \gg t_e$  в противоположном случае. Каждый такой импульс может быть отдельно обнаружен и подсчитано их общее число за единицу времени. Этот способ регистрации называется методом счета фотонов. Важной особенностью этого метода является неизбежное наличие критерия обнаружения импульса. Обычно, это так называемая дискриминация, т.е. сравнение электрического сигнала с неким пороговым уровнем  $T$ , превышение которого интерпретируется как наличие пригодного для дальнейшей регистрации импульса.

# ФЭУ с микроканальной пластиной

- \* В 80 годы появились ФЭУ у которых вместо диодной системы усилителем являлась т.н. микроканальная пластина. Это п/проводниковая структура в которой под действием приложенного напряжения величиной 150 – 200 вольт при появлении фотоэлектронов с катода образовывалась лавина вторичных электронов и за счет этого проявлялся эффект усиления.
- \* Хотя в целом характеристики таких ФЭУ были хуже:
- \* - меньше усиление и больше темновой ток.
- \* Но они имели меньшие вес и габариты и самое главное на их основе начали изготавливаться многоканальные и координатно - чувствительные ФЭУ. К сожалению они так и не прижились в лазерной локации. В высокоточных каналах дальности ставили «классические» ФЭУ с хорошими характеристиками. А в угломерных каналах они не выдержали конкуренцию с ЛФД и фотоматрицами.
- \* В электронике п\проводниковые структуры как в лазерной локации так и телевидении в конце концов выжили электровакуумные приборы. Если в телевидении это ПЗС матрицы, то в лазерной локации это ЛФД или Рин-диоды и матрицы. Хотя для особо точных дорогих структур, прежде всего дальнего действия в дальномерном канале продолжают применяться уникальные ФЭУ.

# Лавинные фотодиоды

- \* Лавинный фотодиод – это фотоприемник, в котором повышение квантовой эффективности реализуется за счет внутреннего усиления благодаря лавинному умножению в обратном смещенном р-п переходе.



*Принцип действия лавинного фотодиода.*

$$q \cdot \lambda > \frac{3}{2} E_g$$

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега электрон набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны:

$$q \cdot \lambda > \frac{3}{2} E_g$$

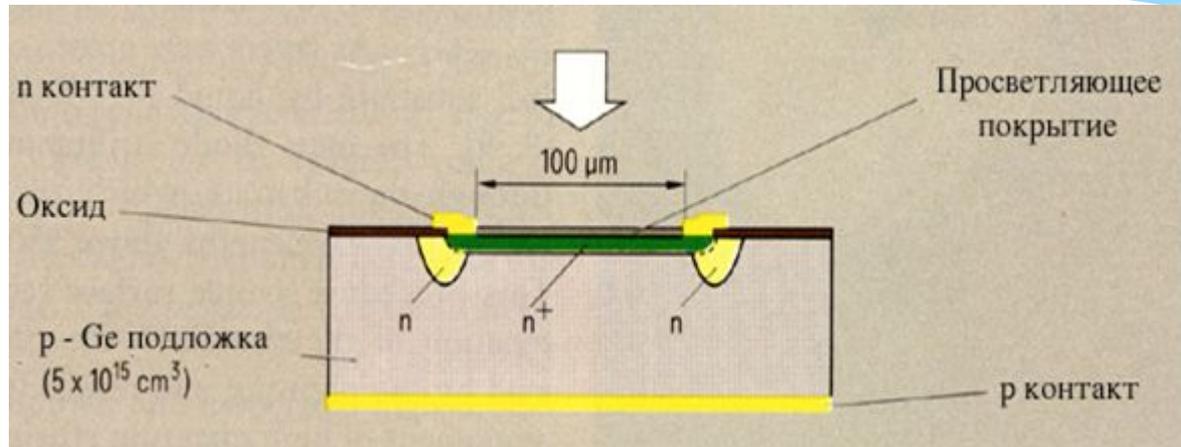
Ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега

$$W \gg \lambda$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет  $M=10-100$  в зависимости от типа фотодиодов.

# Лавинный фотодиод на германиевой подложке

- \* На рисунке представлен лавинный фотодиод на германиевой подложке для длин волн 1300nm. Данный вид лавинного фотодиода является одним из самых распространенных, ввиду своей простоты в изготовлении и высоких характеристик.

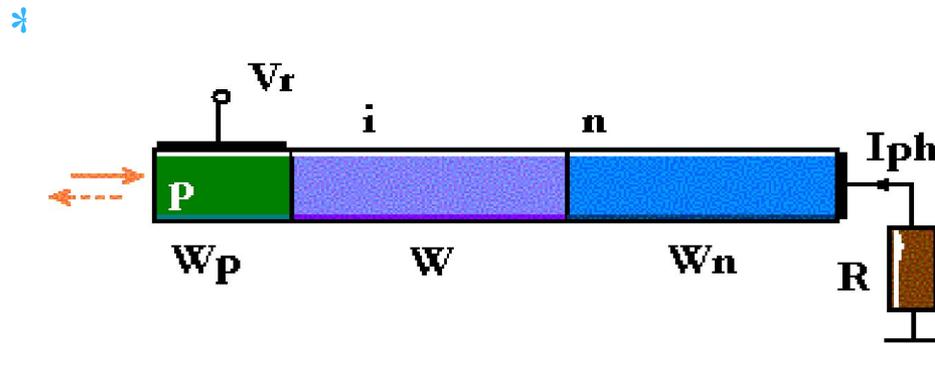


## Конструкция лавинного фотодиода

Диод состоит из высоко легированной германиевой подложки  $p$ -типа ( $p \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) со связанными зарядами  $n^+$  на поверхности полученными при помощи диффузии или ионной имплантации. Чтобы избежать поверхностного пробоя  $n^+$  слой окружен слабо легированным  $n$  носителями охранным кольцом. Область регистрации инфракрасного света имеет диаметр 100 мкм, и из-за присутствия охрannого кольца, она меньше чем площадь поверхности связанных зарядов. Просветляющее покрытие увеличивает квантовую эффективность этого диода.

# InGaAs PIN фотодиоды

- \* **P-I-N Фотодиод** построен на обычном p-n диоде. Эти приборы являются наиболее распространенными, так как толщину обедненной области можно сделать такой, что обеспечивается оптимальная квантовая эффективность и быстродействие.



## Особенности

Высокая чувствительность на 1.3 мкм и 1.55 мкм

Спектральный диапазон 0.95-1.7 мкм

Низкий темновой ток

Активный диаметр 1000 мкм

Конструкция с вводом излучения через мезаструктуру

Корпус типа TO-18

# Модель ДФД1000

- \* Технические характеристики ( $V_r = -5V, 25^\circ C$ )
- \* Модель Фоточувств.
- \* площ.,
- \* мкм      Спектральная
- \* чувствительность,
- \* А/Вт      Темновой
- \* ток,
- \* нА      Ёмкость,
- \* пФ      Корпусное
- \* исполнение
- \*            1300 нм      1550 нм      тип      макс тип      макс
- \*            мин тип      мин тип
- \* ДФД1000ТО    1000    0.75    0.85    0.80    0.90    20      40      35.0    40      С

Предельно допустимые значения

Параметр      Значение

Напряжение обратного смещения    10 В

Обратный фототок      3 мА

Прямой ток    5 мА

Рабочая температура     $-60...+55^\circ C$

Температура хранения       $-60...+70^\circ C$

# Характеристики оптических приемников

- \* Характеристики оптических приемников

* Параметры p-i-n	Лавинный фотодиод	Фототранзистор
* Чувствительность	0,5 мка/мкВт	15 мка/мкВт 35 мка/мкВт
* Время нарастания	1 нс 2 нс	2 мкс
* Напряжение смещения	10 В	100 В 10 В

# Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) или усилители яркости.

- \* ЭОП и тепловизоры - электронные устройства для улучшения видения в темноте. Однако, каждое из них базируется на разных физических явлениях: ЭОП усиливает световую энергию, а тепловизоры обнаруживают тепловую энергию, излучаемую всеми объектами. Поэтому каждое устройство воспринимает энергию различных диапазонов электромагнитного спектра. Это приводит к различиям в способности каждого устройства обнаружить и/или идентифицировать объекты.
- \* ЭОП классифицируются по их спектральной характеристике и чувствительности, используя номенклатуру поколений: ЭОП I, ЭОП II и ЭОП III. Поскольку ЭОП первого поколения громоздки и обладают невысокими параметрами, то в этом отчете рассматриваются приборы только ЭОП II и ЭОП III поколений

- \* Глаз чувствителен к длинам волн электромагнитных колебаний в диапазоне приблизительно от 0,38 мкм до 0,76 мкм, который называется видимым диапазоном на рисунке 3. Палочки и колбочки не одинаково чувствительны к разным длинам волн видимого диапазона. В отличие от колбочек, палочки более чувствительны к синему свету и не чувствительны к длинам волны более 0,64 мкм - красной части видимого диапазона. Колбочки более чувствительны к желтому и красному свету. Самая чувствительная длина волны для колбочек – 0,555 мкм (желто-зеленая область). Самая чувствительная длина волны для палочек – 0,505 мкм (сине-зеленая область). Таким образом, сине-зеленые огни будут выглядеть ночью более яркими, чем красные огни. Это - одна из причин того, почему люминесцентные экраны ЭОП работают в зеленой части видимого спектра.

# Цвета видимой части спектра электромагнитных излучений

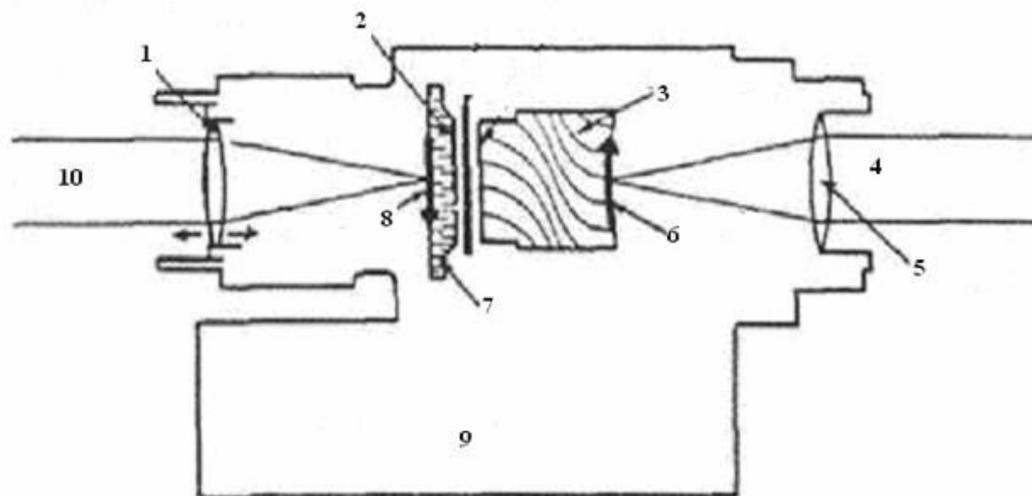


- 1 - Космические лучи
  - 2 - Лучи Гаммы
  - 3 - Рентгеновы лучи
  - 4 - УФ лучи
  - 5 - Видимая часть спектра
  - 6 - ИК лучи
  - 7 - Радар
  - 8 - Радиоволны
  - 9 - Телевидение
- а. короткие волны  
б. схемы переменного тока

- Неспособность человека видеть при низком уровне освещения всегда ограничивала его способность работать в темное время суток или в темном помещении . Соединенные Штаты начали экспериментировать с приборами ночного видения (ПНВ) в ходе Второй мировой войны. Они начали, вводя устройство, которое позволит им освещать объект или область, не будучи обнаруженными невооруженным глазом. Они достигали этого, используя инфракрасную подсветку ближнего ИК-диапазона.
- \* Этот спектр невидим для невооруженного глаза, но может быть замечен при рассмотрении через инфракрасный прибор наблюдения, называвшийся мегаскоп и являвшийся предшественником ЭОП. Армия обеспечивала в больших количествах инфракрасные источники и мегаскопы для использования в ночных операциях и использовала их с некоторым успехом в ходе корейского конфликта. Но годы шли, инфракрасные источники и мегаскопы начали использоваться многими странами до тех пор, пока использование инфракрасной подсветки для освещения поля боя не стало таким же опасным, как и подсветка, видимым светом.

# ЭОП второго поколения (ЭОП II)

- \* ЭОП II характеризовались использованием микроканальной пластины (МКП). Типичная схема ЭОП II показана на рисунке

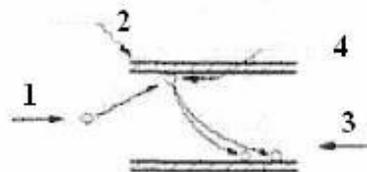
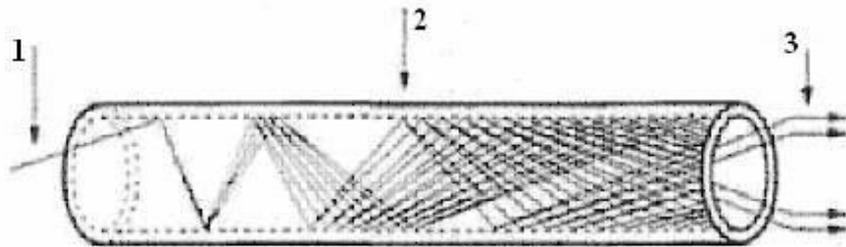


- 1 – Фокусирующий объектив
- 2 – Фотокатод
- 3 – Оптоволоконная оборачивающая система
- 4 – Усиленное выходное изображение
- 5 – Окуляр
- 6 – Прямое усиленное изображение
- 7 – Оптоволоконная лицевая панель
- 8 – Перевернутое изображение
- 9 – Батарея и электропитание

Схемное решение ЭОП II

# Множительная трубка

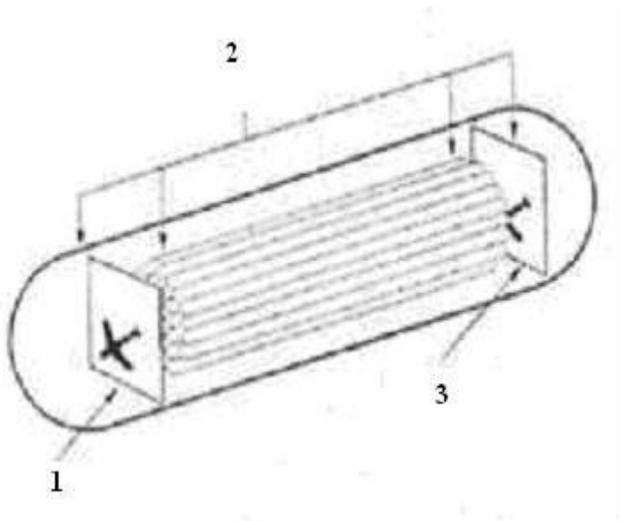
МКП представляет собой электронный умножитель. Одиночные электроны, попадающие на вход МКП, умножаются тысячекратно в процессе каскадной вторичной эмиссии как показано на рисунке 8.7. МКП состоит из миллионов микроскопических каналов или трубок, которые объединены в диск. Эти трубки намного мельче человеческого волоса.



- 1 – Вход электронов
- 2 – Волоконный фотоумножитель электронов
- 3 – Выходные электроны
- 4 – Образование вторичных фотоэлектронов

# Микроскопический канал

- Поскольку каждый микроскопический канал представляет собой электронный умножитель с высоким коэффициентом умножения, то МКП является превосходным электронным умножителем изображений. Поскольку трубчатые каналы жестко уложены в пучок, то существует точное соответствие между торцами каналов МКП как показано на рисунке 8.9. Один такой диск диаметром в четверть содержит приблизительно 1 600 000 каналов.



## ТрубкаЭОП

- 1 – Фотокатод
- 2 - Электропитание
- 3 – Люминесцентный экран

# Главное отличие от ФЭУ:

- \* ФЭУ – усилитель энергии;
- \* ЭОП – световой усилитель изображения, т.е. в том числе и координатно-чувствительный.
- \* Сравнение ЭОП второго и третьего поколений

Параметры	ЭОП II	ЭОП III
Усиление системы	400	2000
Разрешение лн/мм	24	36
Диафрагменное число	f/1,4	f/1,2
Входной сигнал (длина волны 0.53 мкм)	0,5	1,0
Долговечность батареи, час	10	20
Вес, г	861,84	453,6