

Фотодетекторы

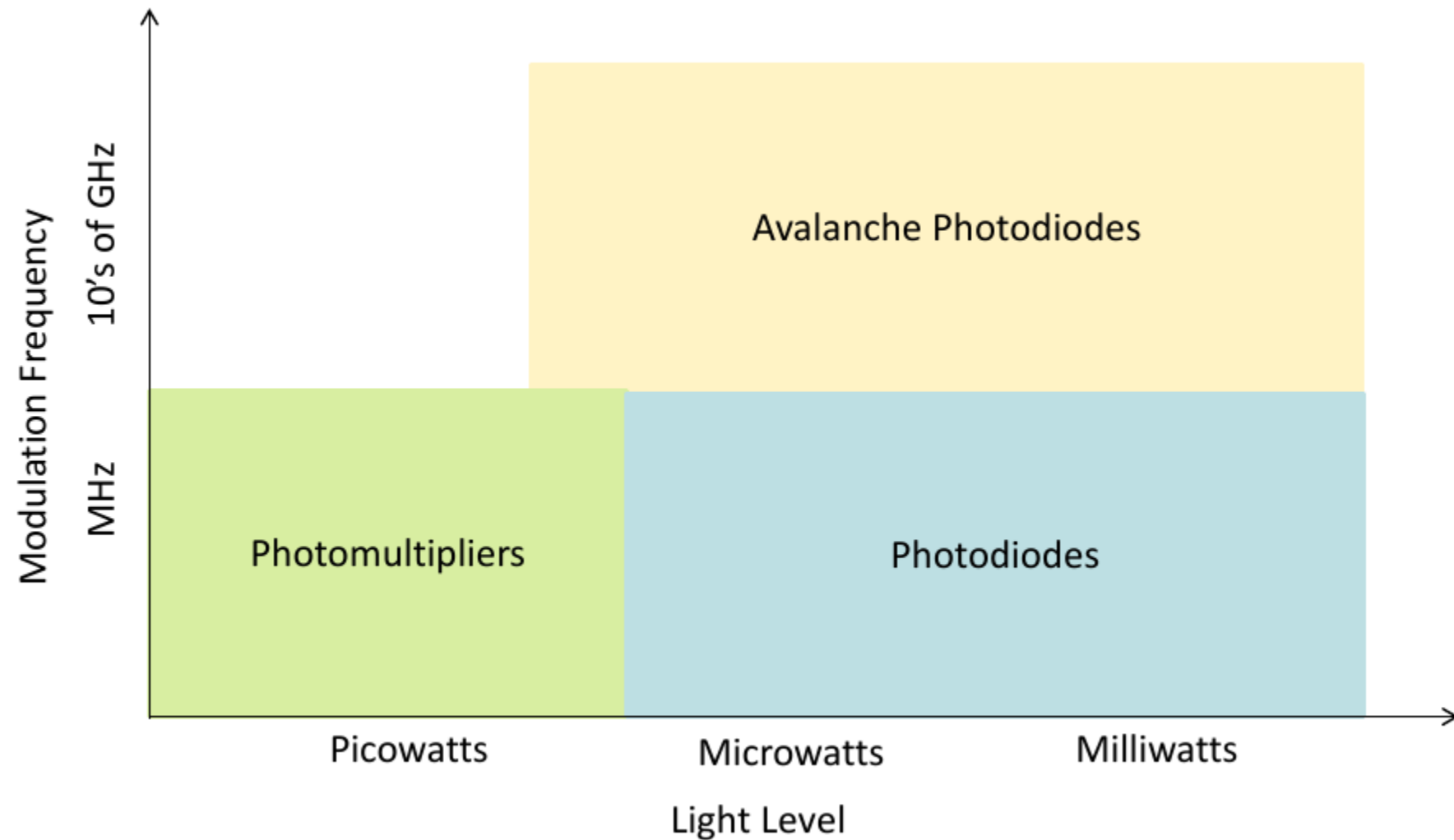
Лекция 2



План лекции

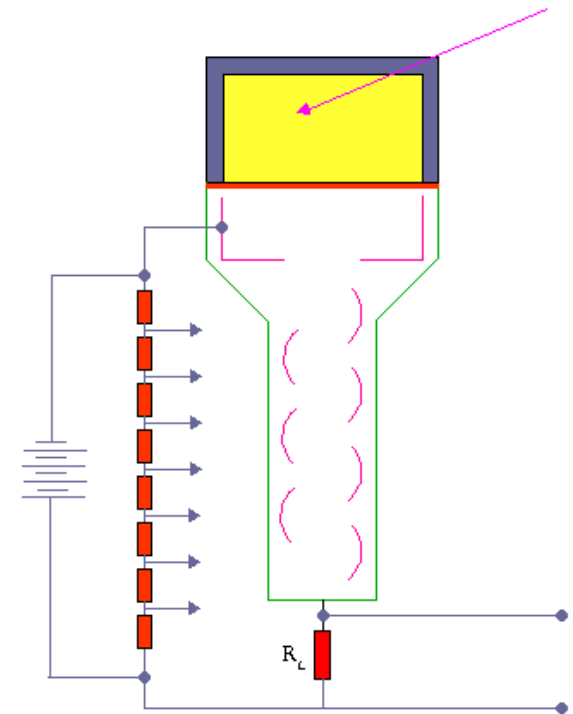
- Фотоэлектронный умножитель
- Полупроводниковые фотодетекторы
- Детекторы ионизирующих излучений
- Усилитель
- Матричные фотодетекторы

План лекции

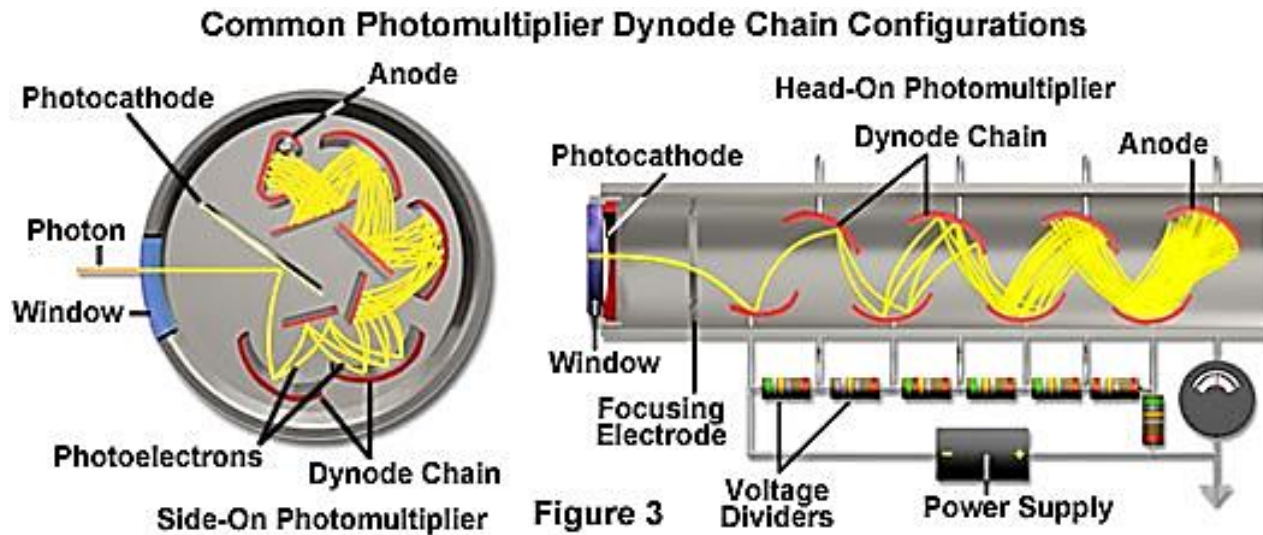


1. Фотоэлектронный умножитель

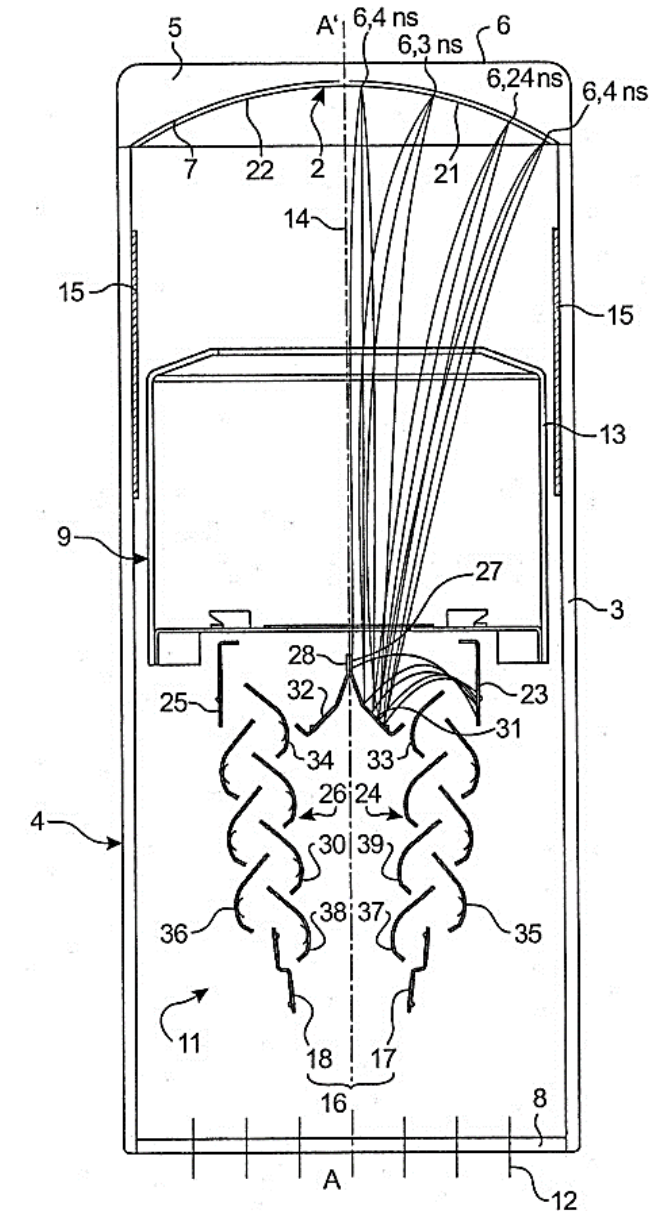
- **Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)** — электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 10^5 раз и выше).



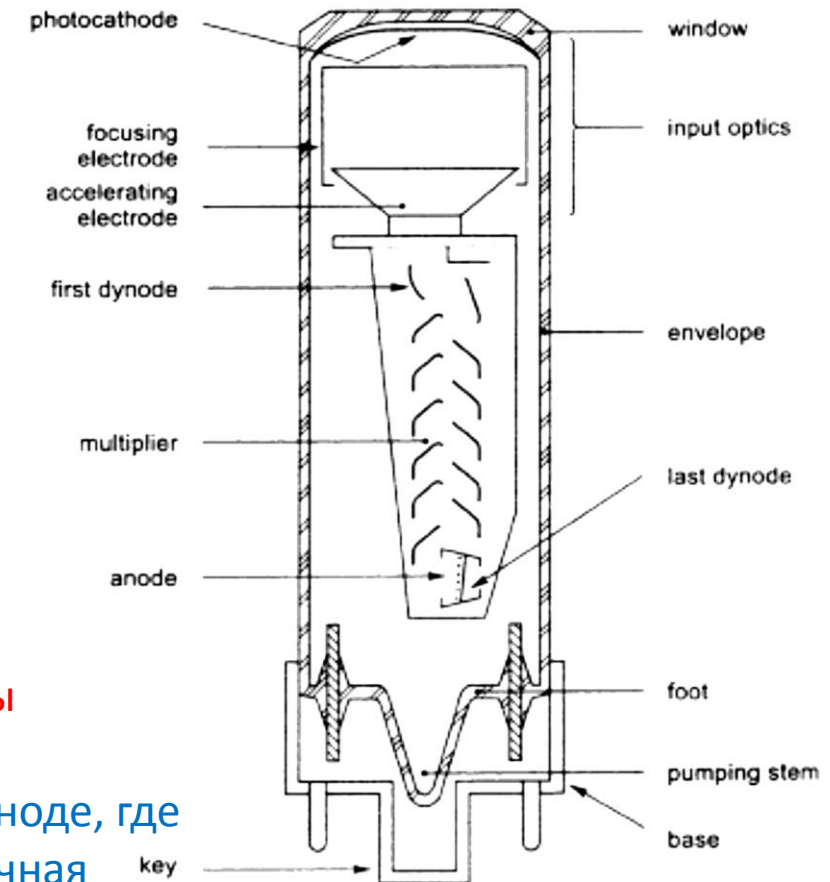
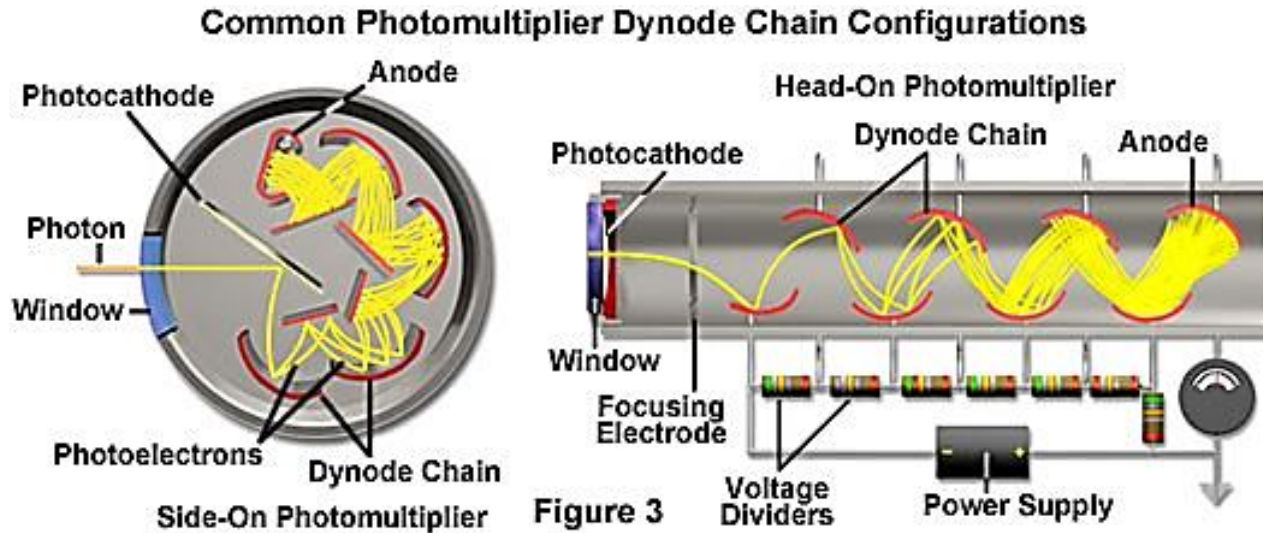
1. Фотоэлектронный умножитель



1. Свет проходит через входное окно
2. Происходит возбуждение электронов фотокатода так что фотоэлектроны выбрасываются в вакуум (внешний фотоэффект).
3. Фотоэлектроны ускоряются и фокусируются модулятором на первом диноде, где они умножаются посредством вторичной электронной эмиссии. Эта вторичная эмиссия повторяется на каждом из последующих динодах.
4. Умноженные вторичные электроны, испускаемые последним динодом, собираются на аноде.



1. Фотоэлектронный умножитель



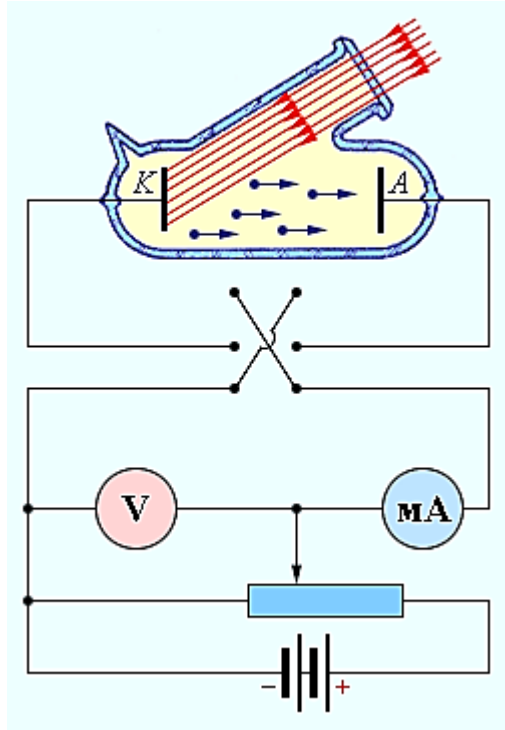
1. Свет проходит через входное окно
2. Происходит возбуждение электронов фотокатода так что фотоэлектроны выбрасываются в вакуум (внешний фотоэффект).
3. Фотоэлектроны ускоряются и фокусируются модулятором на первом диноде, где они умножаются посредством вторичной электронной эмиссии. Эта вторичная эмиссия повторяется на каждом из последующих динодах.
4. Умноженные вторичные электроны, испускаемые последним динодом, собираются на аноде.

1. Фотоэлектронный умножитель



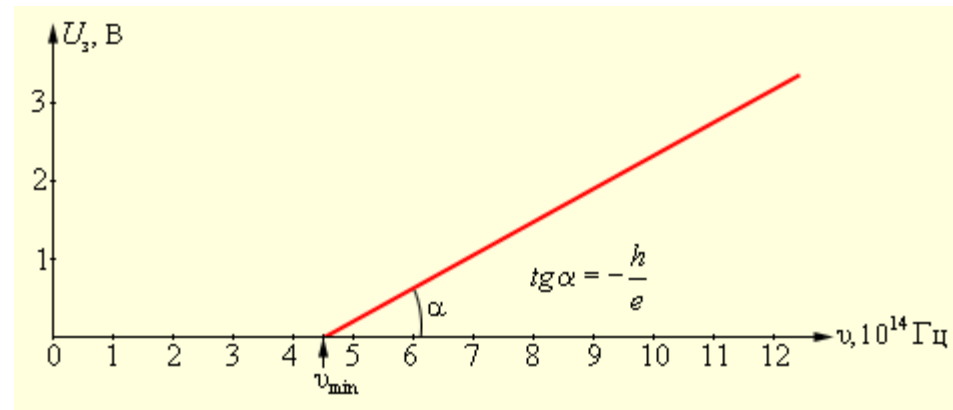
1. Фотоэлектронный умножитель.

Фотоэффект



«максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности»:

$$h\nu = W + \frac{mv^2}{2}, \quad (1.1)$$



Красная граница фотоэффекта определяется только работой выхода и не зависит от вещества

$$\vartheta = \frac{W}{h}$$

1. Фотоэлектронный умножитель. Фотокатод

1. Металлические фотокатоды (щелочные и мультищелочные)

Материалы: Rb, Cs, Na, K

Область регистрации: от 180 до 890 нм

2. Солнечно-слепые

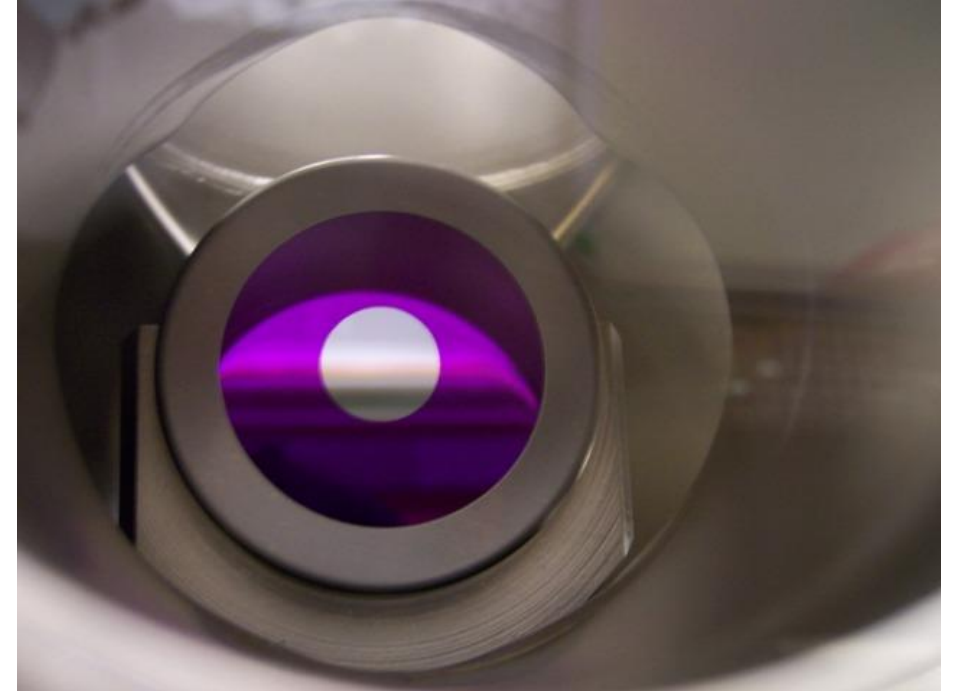
Материалы: Cs-I, Cs-Te

Область регистрации: от ВУФ до 300 нм

3. Полупроводниковые

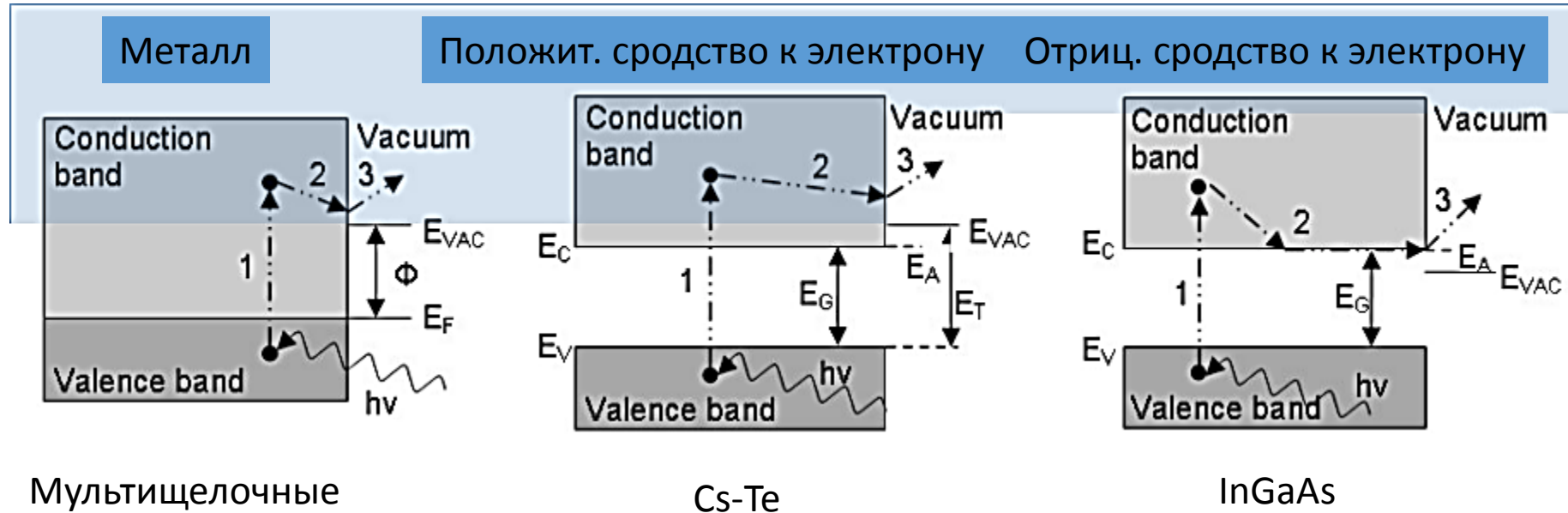
Материалы: In, Ga, Asб

Область регистрации: от 500 до 1700 нм



1. Фотоэлектронный умножитель.

Фотокатод

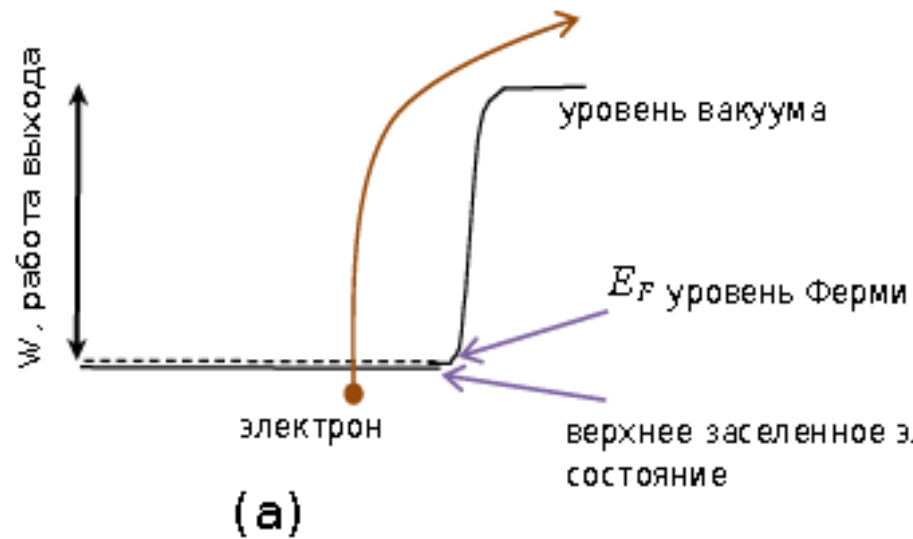


E_F – уровень Ферми,
 Φ – работа выхода
 E_{vac} – уровень вакуума

E_F – уровень Ферми,
 Φ – работа выхода
 E_{vac} – уровень вакуума
 E_G – ширина запрещенной зоны
 E_A – сродство к электрону

1. Фотоэлектронный умножитель.

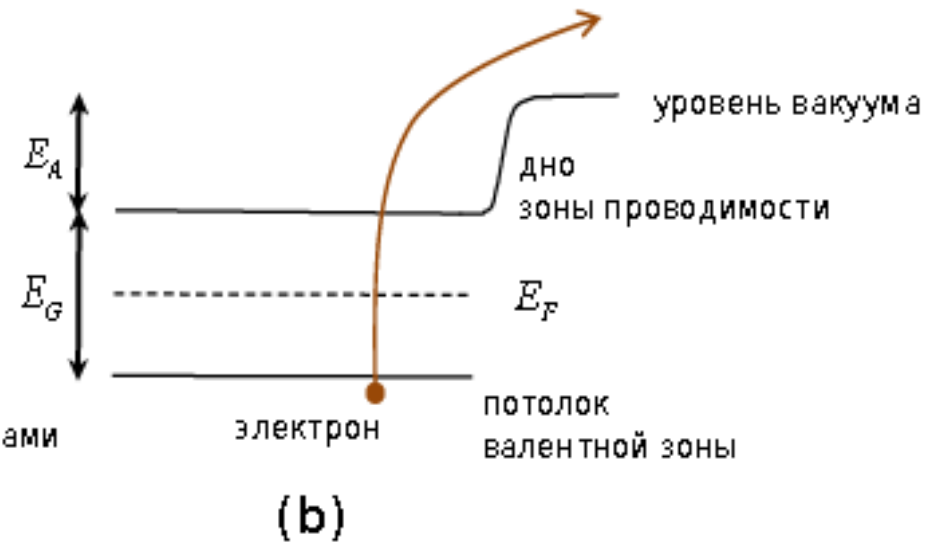
Фотокатод



Рассмотрим зонную схему металлического фотокатода (рис. 1.2, а). Избыточная энергия электрона, которая переходит в его кинетическую энергию, равна:

$$E_{\text{excess,met}} = h\nu - W, \quad (1.3)$$

где W – работа выхода. Наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы, поэтому они часто используются в качестве материалов для фотокатода.

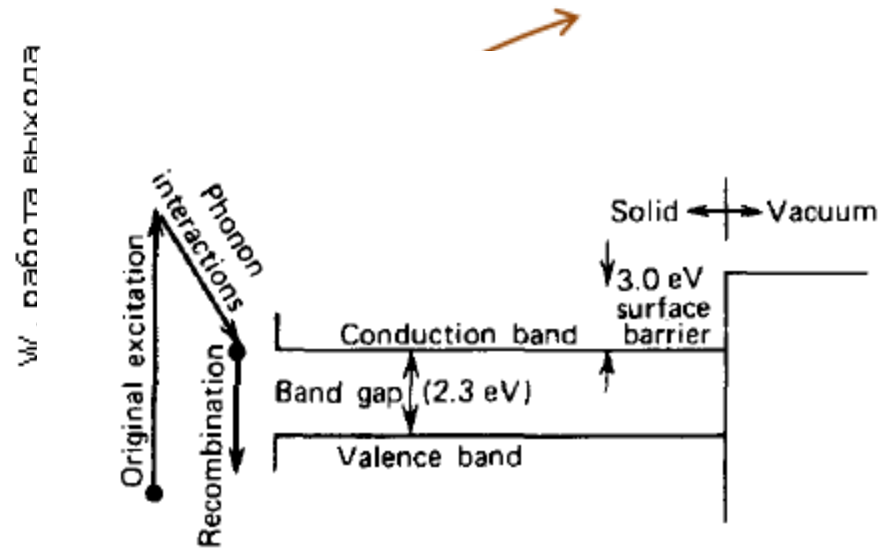


Для фотокатодов, изготовленных из полупроводниковых элементов, применима следующая зонная схема (рис. 1.2, b). В этом случае избыточная энергия электрона равна:

$$E_{\text{excess,sem}} = h\nu - E_G - E_A. \quad (1.4)$$

1. Фотоэлектронный умножитель.

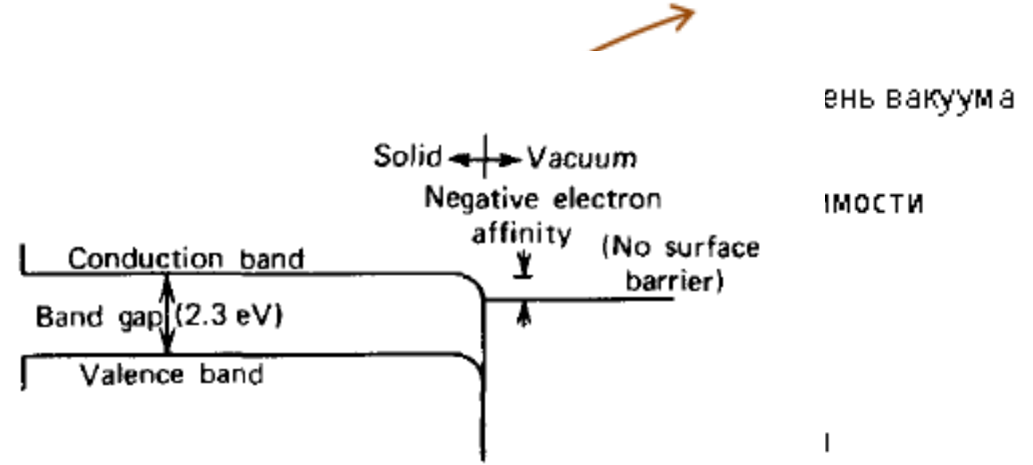
Фотокатод



Рассмотрим зонную схему металлического фотокатода (рис. 1.2, а). Избыточная энергия электрона, которая переходит в его кинетическую энергию, равна:

$$E_{\text{excess,met}} = h\nu - W, \quad (1.3)$$

где W – работа выхода. Наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы, поэтому они часто используются в качестве материалов для фотокатода.



Для фотокатодов, изготовленных из полупроводниковых элементов, применима следующая зонная схема (рис. 1.2, b). В этом случае избыточная энергия электрона равна:

$$E_{\text{excess,semi}} = h\nu - E_G - E_A. \quad (1.4)$$

1. Фотоэлектронный умножитель.

Фотокатод

Рассмотрим подробнее представленную модель. В полупроводниках в отличие от металлов существует зона запрещенных энергий (EG), которая не может быть занята электронами. Сродство к электрону (EA) определяется разницей между энергиями дна зоны проводимости и уровнем вакуума, а работа выхода W по сути является разницей между уровнем Ферми и уровнем вакуума. Когда фотон ударяется в фотокатод, электроны в валентной зоне поглощают фотон с энергией $h\nu$ и переходят в возбужденное состояние, распространяясь по поверхности фотокатода. Если такие электроны имеют энергию достаточную для преодоления барьера уровня вакуума, то они испускаются в вакуум в качестве фотоэлектронов. Квантовый выход такого процесса, т.е. отношение количества фотоэлектронов к количеству падающих на фотокатод, можно выразить следующим образом:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P\nu}{k} \cdot \frac{1}{1 + 1/kL} P_s, \quad (1.3)$$

в этом выражении R – коэффициент отражения, k – коэффициент полного поглощения фотонов, $P\nu$ – вероятность того, что свет с энергией $h\nu$ может возбудить электрон на уровень, лежащий выше уровня вакуума, L – средняя длина пробега возбужденных электронов, P_s – вероятность того, что электроны, достигая поверхности фотокатода, покинут его и перейдут в вакуум.

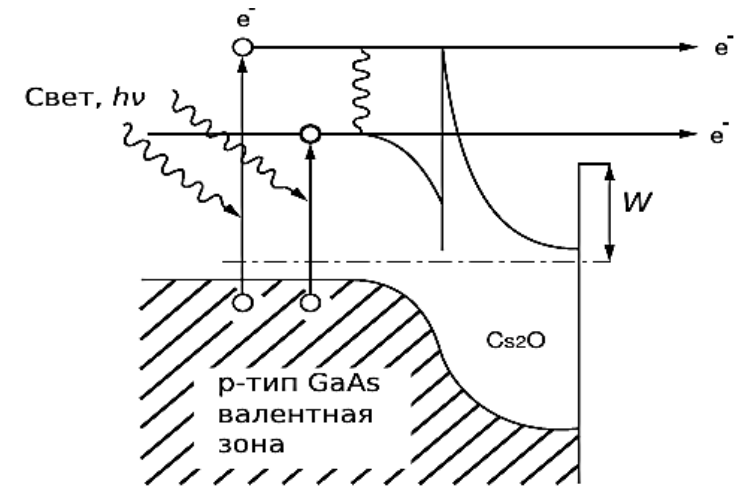
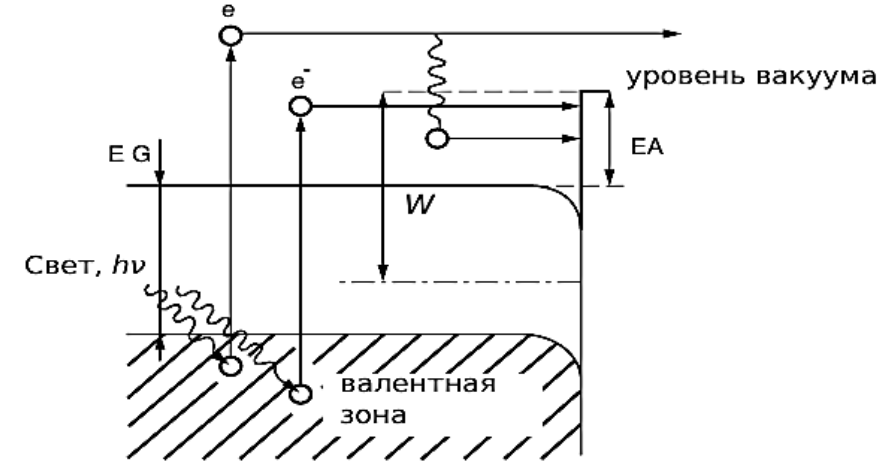


Рис. 1.2. Зонные модели фотокатода

1. Фотоэлектронный умножитель. Фотокатод. Гетероструктуры

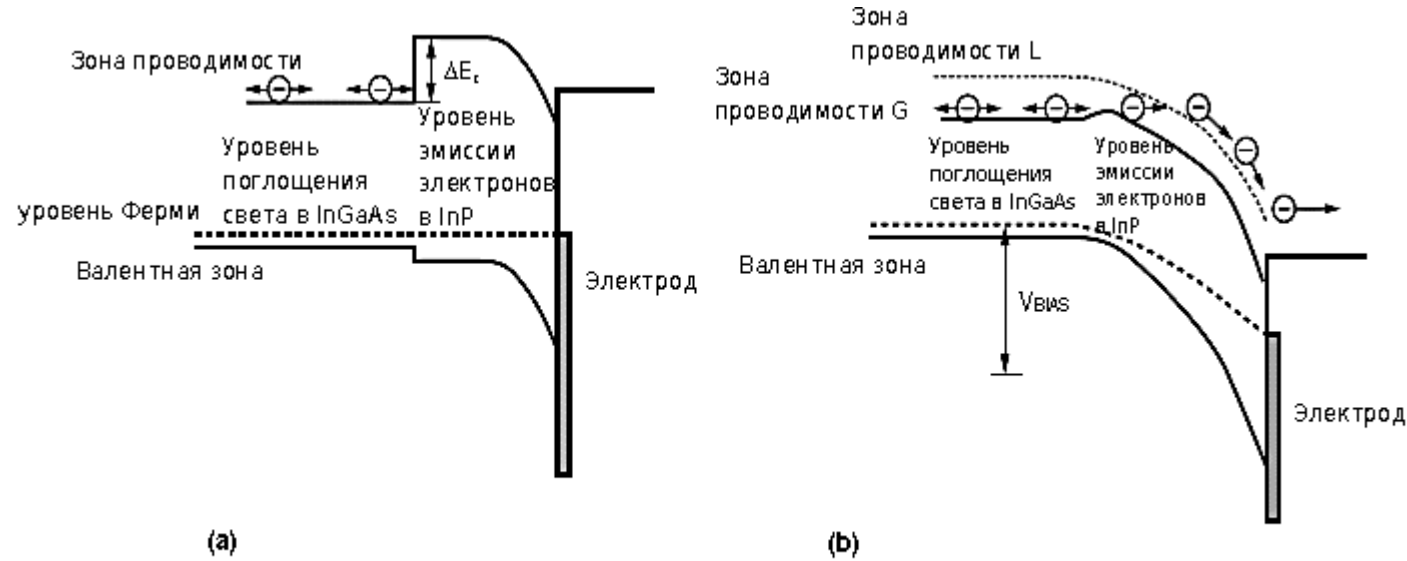


Рис. 1.4. Зонная модель фотокатода на гетеропереходе

Также не так давно появились ФЭУ, использующие гетеропереход в структурах типа InP/InGaAsP или InP/InGaAs на (p+InP)-подложке. Такие фотокатоды чувствительны в области ближнего ИК-света вплоть до 1700 нм – области, недостижимой для обычных ФЭУ. Их зонная схема приведена на рис. В фотокатодах данного типа происходит перенос электронов через гетеропереход. На поверхность полупроводник/полупроводник наносится тонкий металлический слой (толщиной 5 нм) из серебра для формирования барьера Шоттки – потенциальный барьер, возникающий в приконтактном слое полупроводник/полупроводник–металл, равный разности работ выхода металла и полупроводника.

1. Фотоэлектронный умножитель.

Фотокатод. Гетероструктуры

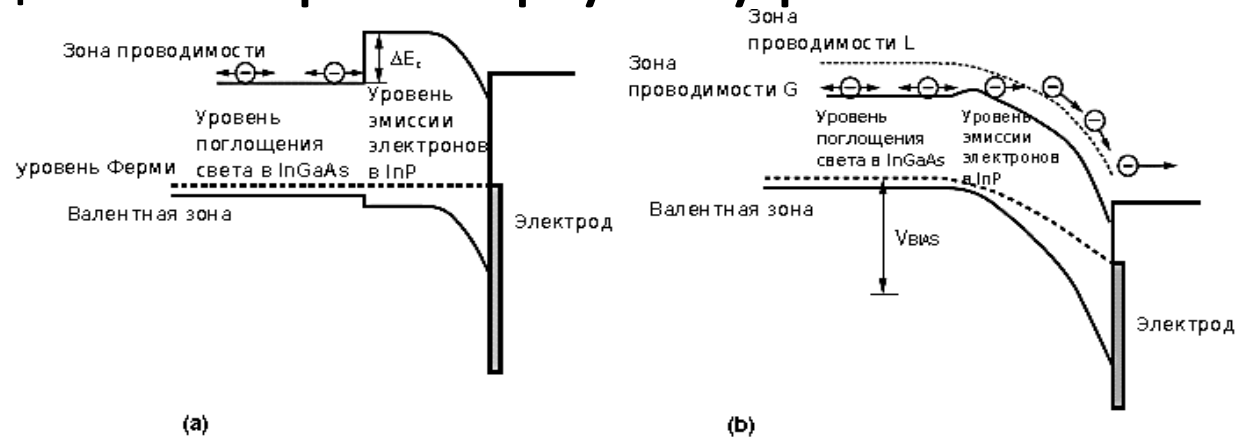
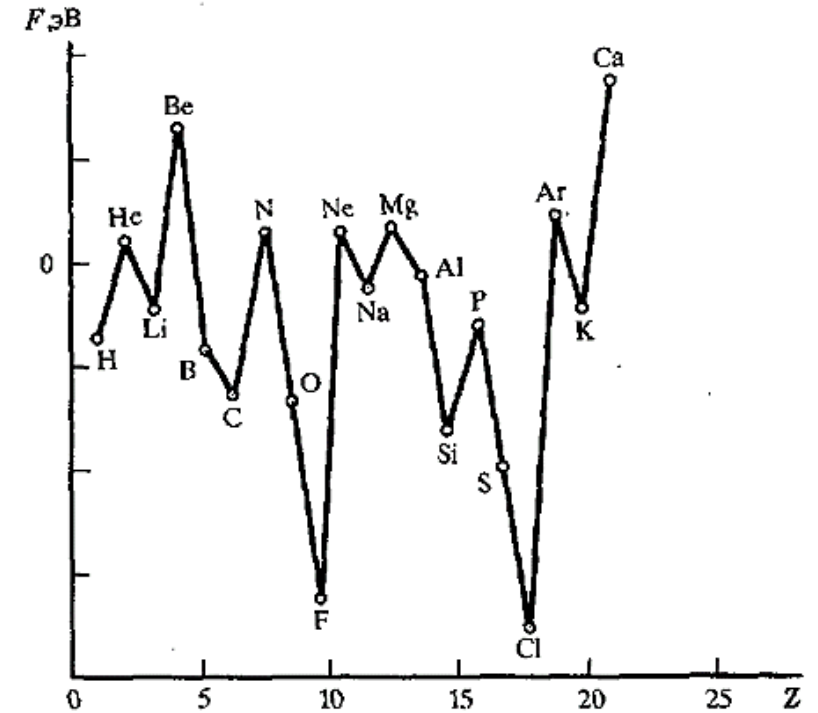


Рис. 1.4. Зонная модель фотокатода на гетеропереходе

Приложение напряжения между электродом Шоттки и обратной стороной кристалла InP/InGaAsP формирует электрическое поле внутри фотокатода. Это позволяет существенно снизить поверхностный потенциальный барьер и увеличить вероятность выхода электронов в вакуум. В случае когда напряжение смещения не приложено, фотоэлектроны из светопоглощающего слоя InGaAs не могут преодолеть барьер в области проводимости и достигнуть поверхности эмиссии в InP. После приложения напряжения формируется обедненная область на границе электрода Шоттки, которая распространяется вглубь системы полупроводник/полупроводник. Происходит перестройка и искажение зонной структуры, потенциальный барьер уменьшается и электроны достаточно легко покидают InP и выходят в вакуум. Более того, электроны ускоряются в слое InP и способны перейти со дна зоны проводимости в вышележащую область, это в свою очередь увеличивает энергию электронов, вылетающих в вакуум. Что увеличивает сбор и улучшает дальнейшую фокусировку электронов. К недостаткам такого типа фотокатодов относится высокий темновой ток, что требует охлаждения такого типа ФЭУ до $-60...-190$ С.

1. Фотоэлектронный умножитель. Фотокатод

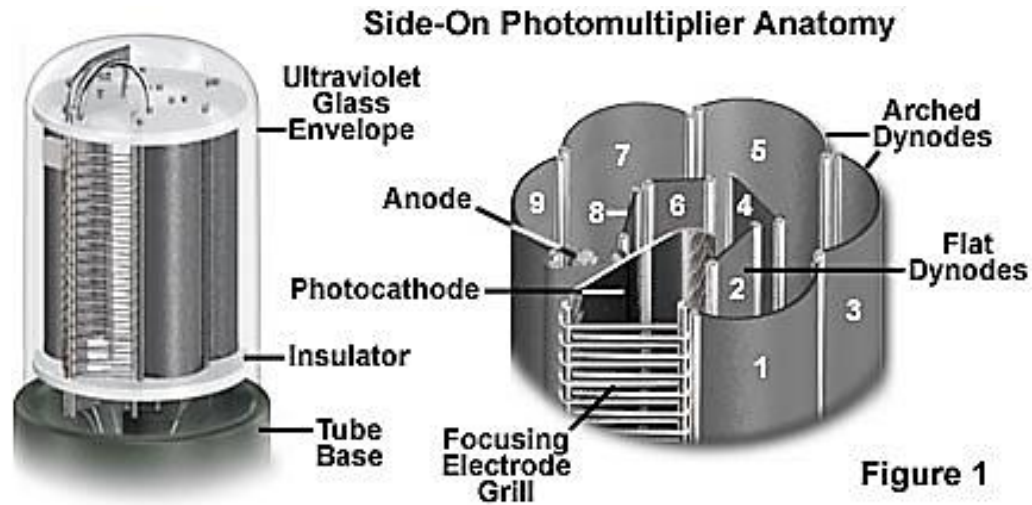
- 1) Щелочные металлы имеют низкую, порядка 1,4 эВ работу выхода
- 2) Материалы с положительным сродством к электрону эффективны для регистрации излучения в ВУФ области
- 3) Эффект отрицательного сродства к электрону увеличивает вероятность P_s того, что электроны, достигшие поверхности фотокатода, испустятся в вакуум. В частности, повышается квантовая эффективность регистрации в длинноволновой части спектра.



Энергией сродства атома к электрону, или просто его сродством к электрону (ϵ), называют энергию, выделяющуюся в процессе присоединения электрона к свободному атому Э в его основном состоянии с превращением его в отрицательный ион Э⁻

1. Фотоэлектронный умножитель.

Фотокатод



Отражающий фотокатод

Фотокатод, работающий в режиме отражения, как правило, представляет собой металлическую пластину, фотоэлектроны из которой испускаются в направлении противоположном падающему свету.



Прозрачный фотокатод

Фотокатод нанесен в виде полупрозрачной пленки на материал окна с внутренней стороны колбы. Распространен в торцевых ФЭУ

1. Фотоэлектронный умножитель. Прозрачный фотокатод



a) circular

Range of diameters available to suit diffuse and directly coupled light sources.

Application: General purpose; scintillation.



b) reduced

Electrostatically reduced diameter for minimum dark count..

Application: Photon counting; laser light detection.



c) domed window

The inherent strength of this construction allows us to use a very thin, and consequently low radioactivity window. The window is often supplied shot blasted to enhance quantum efficiency.

Application: astronomy, high energy physics



d) 2π

Side wall sensitivity allows wide angle detection.

Application: Probes for scintillation counting

1. Фотоэлектронный умножитель. Прозрачный фотокатод



e) hemispherical

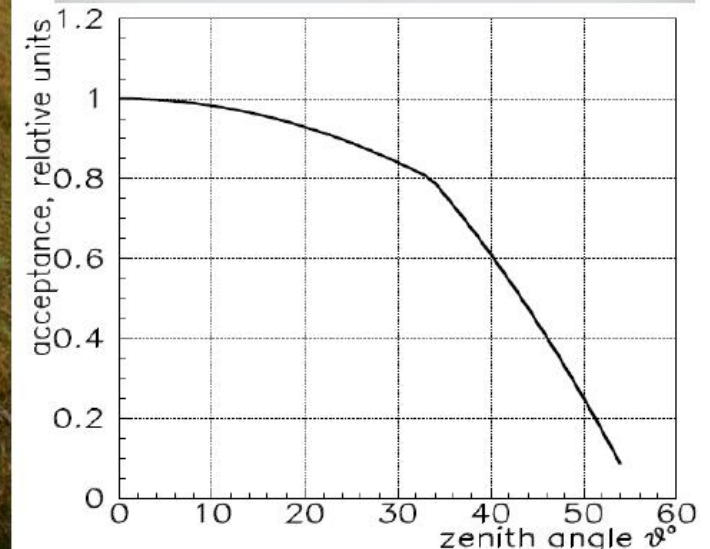
For diffuse light sources, e.g. arrays of photomultipliers
Application: Fundamental scientific research.



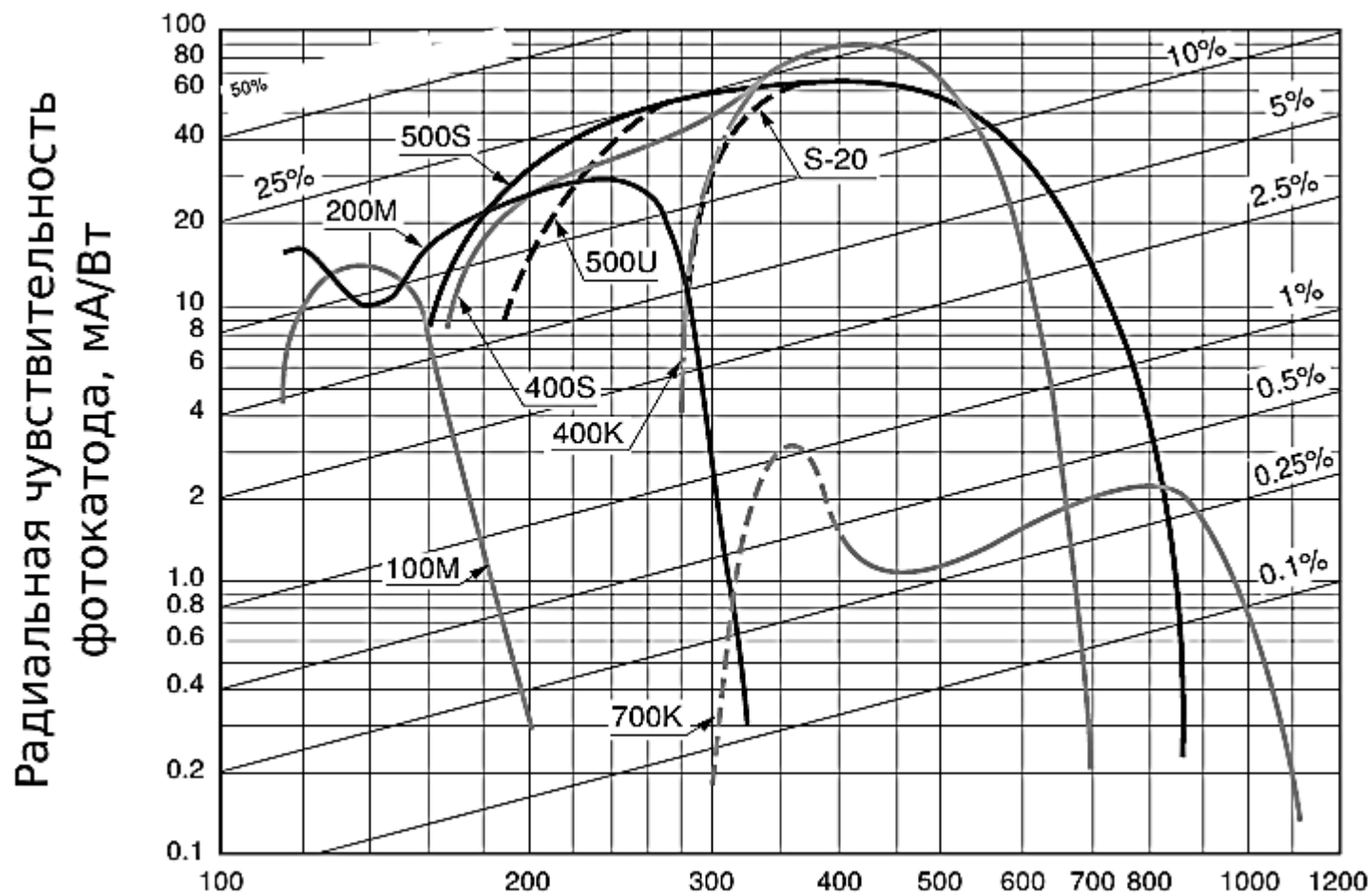
f) side window

Matches exit slit, for example, of prism/grating monochromator. The photocathode, is a reflective type located within the glass envelope.

Application: Spectrophotometers and photometers.



1. Фотоэлектронный умножитель.



1. Фотоэлектронный умножитель.

Материал окна

При использовании сцинтилляторов в подавляющем большинстве используются ФЭУ с торцевым окном. Рассмотрим подробнее часто применяемые материалы для окон ФЭУ. Их спектры пропускания приведены на рис. 1.6.

1. Монокристалл MgF_2 .

Фторид магния имеет большую ширину запрещенной зоны и пропускает свет в ВУФ области вплоть до 115 нм. В основном используется в установках с каналом измерений в области вакуумного ультрафиолета. На таких установках производится возбуждение первичных носителей заряда, и изучаются процессы передачи энергии в сцинтилляторах.

2. Синтетический кварц.

Кварцевые окна прозрачны до 160 нм. Это позволяет регистрировать свечение сцинтилляторов в УФ области. Например, кросс-люминесценция, свечение экситонов в щелочноземельных фторидах.

3. Боросиликатные стекла.

Прозрачные фотокатоды

Номер фотокатода	Материал фотокатода	Материал окна	Спектральная область, нм ^a
100M	Cs-I	MgF_2	115–200
200S	Cs-Te	синт. кварц	160–320
200M	Cs-Te	MgF_2	115–320
300K (S-11)	Sb-Cs	боросиликат	300–650
400K	bialkali	боросиликат	300–650
400U	bialkali	кварц	185–650
400S	bialkali	синт. кварц	160–650
500K (S-20)	multiakali	боросиликат	300–850
500U	multiakali	кварц	185–850
500S	multiakali	синт. кварц	160–850
700K	Ag-O-Cs	боросиликат	300–1200

1. Фотоэлектронный умножитель.

Материал окна

При использовании сцинтилляторов в подавляющем большинстве используются ФЭУ с торцевым окном. Рассмотрим подробнее часто применяемые материалы для окон ФЭУ. Их спектры пропускания приведены на рис. 1.6.

1. Монокристалл MgF_2 .

Фторид магния имеет большую ширину запрещенной зоны и пропускает свет в ВУФ области вплоть до 115 нм. В основном используется в установках с каналом измерений в области вакуумного ультрафиолета. На таких установках производится возбуждение первичных носителей заряда, и изучаются процессы передачи энергии в сцинтилляторах.

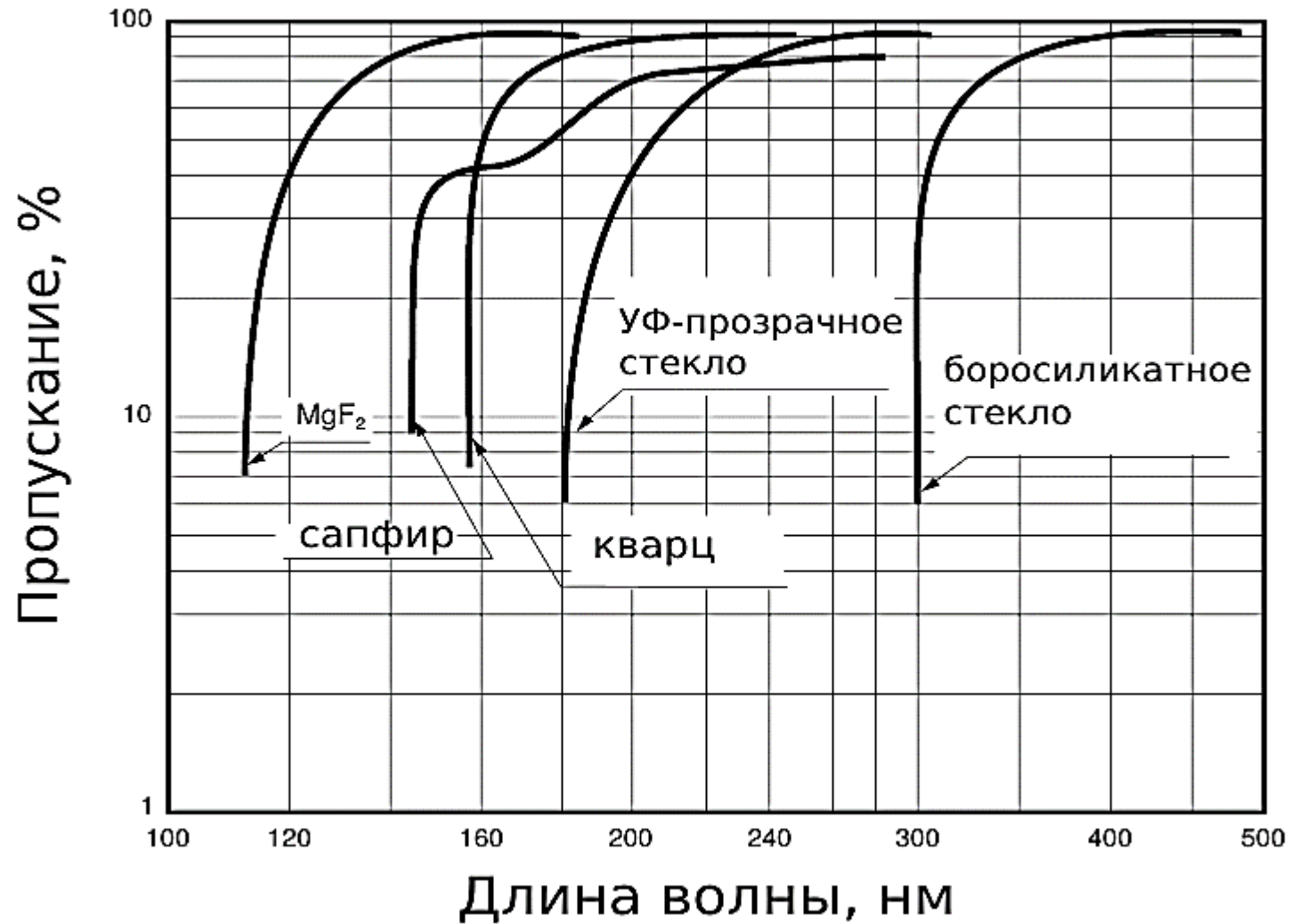
2. Синтетический кварц.

Кварцевые окна прозрачны до 160 нм. Это позволяет регистрировать свечение сцинтилляторов в УФ области. Например, кросс-люминесценция, свечение экситонов в щелочноземельных фторидах.

3. Боросиликатные стекла.



1. Фотоэлектронный умножитель.



1. Фотоэлектронный умножитель. Система ДИНОДОВ

Вылетевшие из фотокатода электроны фокусируются и попадают в первый динод. Далее происходит их умножение от первого динода к последнему. Между динодами поддерживается потенциал, который задается делителем напряжения. Количество электронов при этом умножается от 10 до более чем 10^8 раз. Схематически процесс умножения электронов показан на рисунке 1.7.

Коэффициент усиления на каждом из динодов варьируется. Его вариации имеют статистическую природу и обусловлены различными факторами. В частности вариациями начальных скоростей электронов и их траекторий. Поэтому немаловажную роль играет правильный выбор формы и материала динодов.

В качестве материалов для динодов используют соединения с высокой вторичной эмиссией. Основными материалами являются антимониды щелочных металлов, окись бериллия (BeO), оксид магния (MgO), фосфид галлия (GaP) и фосфиды арсенида галлия (GaAsP). Эти материалы наносят на подложку из никеля, нержавеющей стали, меди или медь-бериллиевого сплава. В зависимости от предназначения ФЭУ в используется различный материал для динодов. К примеру, диноды из SbCs дают высокий коэффициент усиления и стабильность сигнала, но имеют худшую линейность по сравнению с динодами из BeCu .

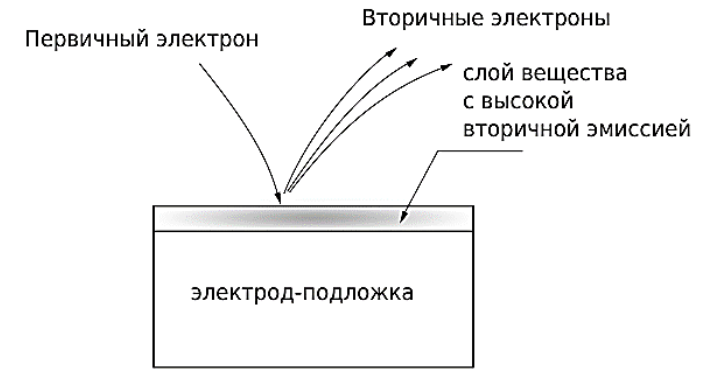
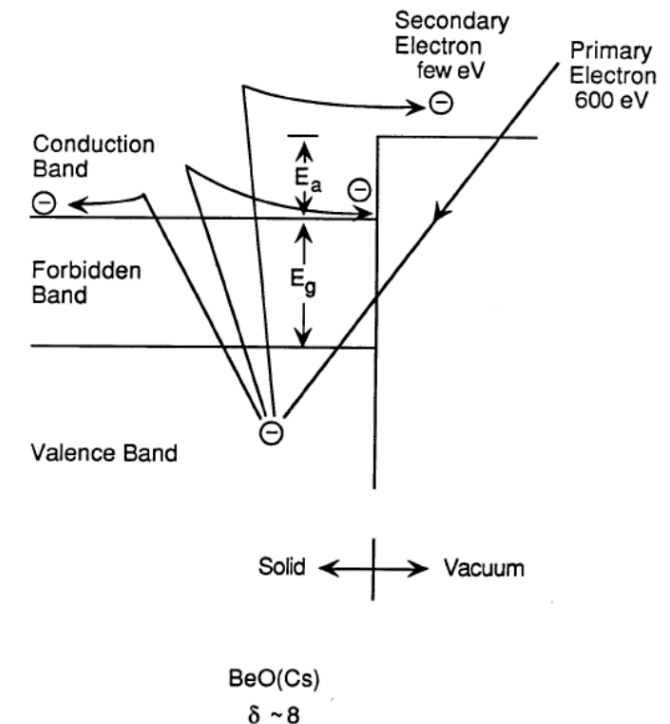


Рис. 1.7. Вторичная эмиссия на диноде

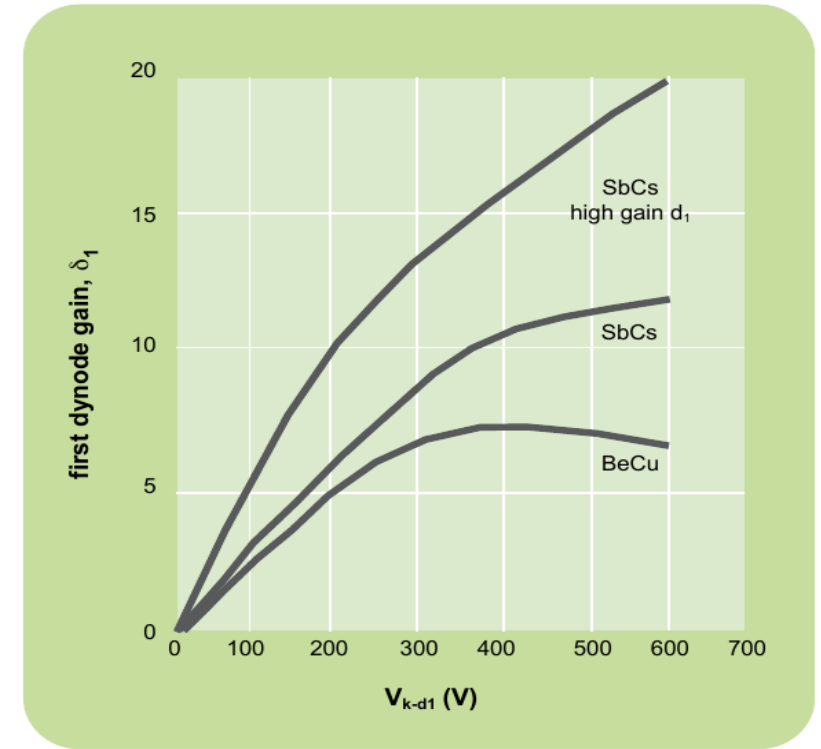


1. Фотоэлектронный умножитель. Система ДИНОДОВ

Вылетевшие из фотокатода электроны фокусируются и попадают в первый динод. Далее происходит их умножение от первого динода к последнему. Между динодами поддерживается потенциал, который задается делителем напряжения. Количество электронов при этом умножается от 10 до более чем 10^8 раз. Схематически процесс умножения электронов показан на рисунке 1.7.

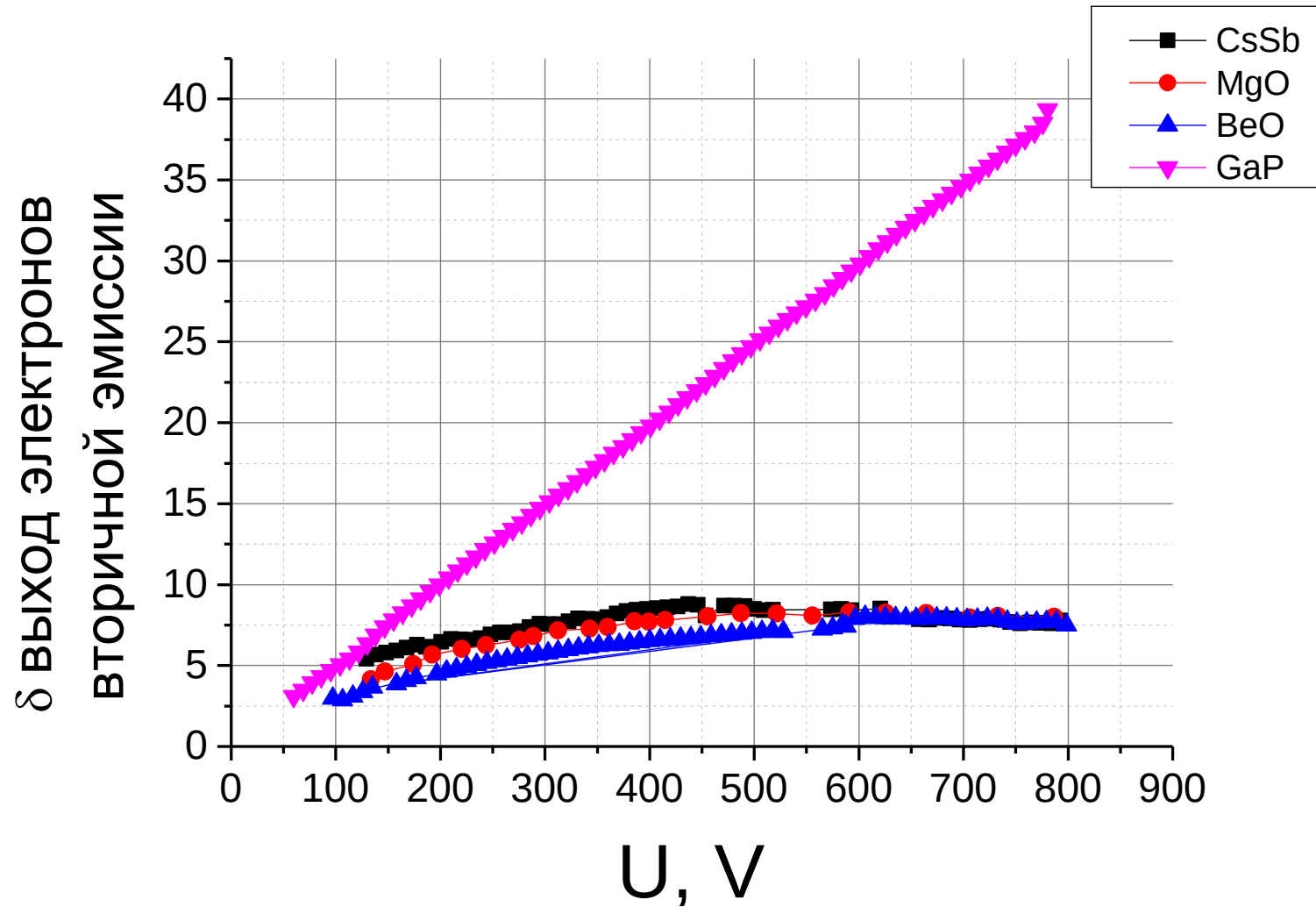
Коэффициент усиления на каждом из динодов варьируется. Его вариации имеют статистическую природу и обусловлены различными факторами. В частности вариациями начальных скоростей электронов и их траекторий. Поэтому немаловажную роль играет правильный выбор формы и материала динодов.

В качестве материалов для динодов используют соединения с высокой вторичной эмиссией. Основными материалами являются антимониды щелочных металлов, окись бериллия (BeO), оксид магния (MgO), фосфид галлия (GaP) и фосфиды арсенида галлия (GaAsP). Эти материалы наносят на подложку из никеля, нержавеющей стали, меди или медь-бериллиевого сплава. В зависимости от предназначения ФЭУ в используется различный материал для динодов. К примеру, диноды из SbCs дают высокий коэффициент усиления и стабильность сигнала, но имеют худшую линейность по сравнению с динодами из BeCu.



$$\delta = \frac{\text{число вылетающих с динода электронов}}{\text{первичный электрон}}$$

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.



3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды. Распределение Пуассона

Коэффициент усиления ФЭУ:

$$K_i = \sigma \alpha$$

$$K = \prod_{i=1}^n \sigma_i \alpha_i$$

Амплитуда импульса:

$$A \sim V^n$$

$$\text{Усиление} \sim \alpha \delta^n$$

α – доля фотоэлектронов, поглощаемых динодом, для хорошего динода близка к 1, пусть число динодов $n=10$, выход вторичной эмиссии $\delta=5$ (напряжение на ФЭУ порядка 1 кВ), тогда коэффициент усиления ФЭУ будет 5^{10} , то есть около 10^7

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона

На языке теории вероятностей процесс формирования пачки электронов в динодной системе описывается как дискретный марковский процесс (марковская цепь) или дискретная цепь случайных событий, в которой каждый последующий результат зависит только от предыдущего и является случайной величиной случайного аргумента.

Действительно, количество электронов, эмитированных n -м динодом, есть случайная величина (m), зависящая от коэффициента умножения динода (σ) и от количества m_{i-1} электронов, пришедших на него с предыдущего, $(n-1)$ -го. Совершенно не важно, какова предыстория возникновения этих электронов. Каждый из них, независимо от остальных, пошлет на $(n+1)$ -й динод некоторое случайное количество электронов m :

$$P(m) = \frac{\sigma^m e^{-\sigma}}{m!}$$

$$\text{Усиление} \sim \alpha \delta^n$$

Коэффициент усиления ФЭУ:

$$K_i = \sigma \alpha$$
$$K = \prod_{i=1}^n \sigma_i \alpha_i$$

Амплитуда импульса:

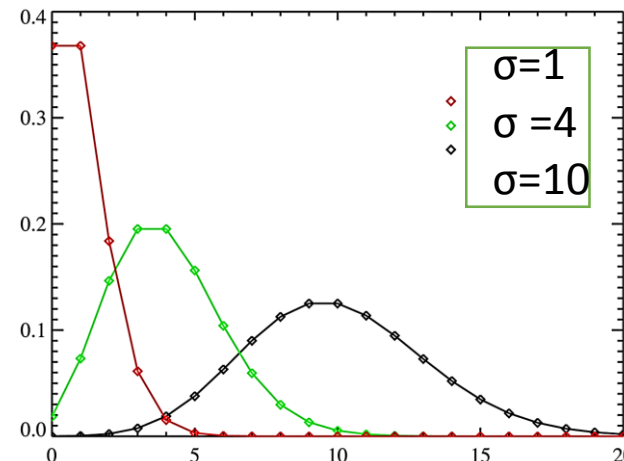
$$A \sim V^n$$

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды. Распределение Пуассона

На языке теории вероятностей процесс формирования пачки электронов в динодной системе описывается как дискретный марковский процесс (марковская цепь) σ дискретная цепь случайных событий, в которой каждый последующий результат зависит только от предыдущего и является случайной величиной случайного аргумента.

Действительно, количество электронов, эмитированных n-м динодом, есть случайная величина (m), зависящая от коэффициента умножения динода (σ) и от количества m_{i-1} электронов, пришедших на него с предыдущего, ($n-1$)-го. Совершенно не важно, какова предыстория возникновения этих электронов. Каждый из них, независимо от остальных, пошлет на ($n+1$)-й динод некоторое случайное количество электронов m :

$$P(m) = \frac{\sigma^m e^{-\sigma}}{m!}$$



Коэффициент усиления ФЭУ:

$$K_i = \sigma \alpha$$

$$K = \prod_{i=1}^n \sigma_i \alpha_i$$

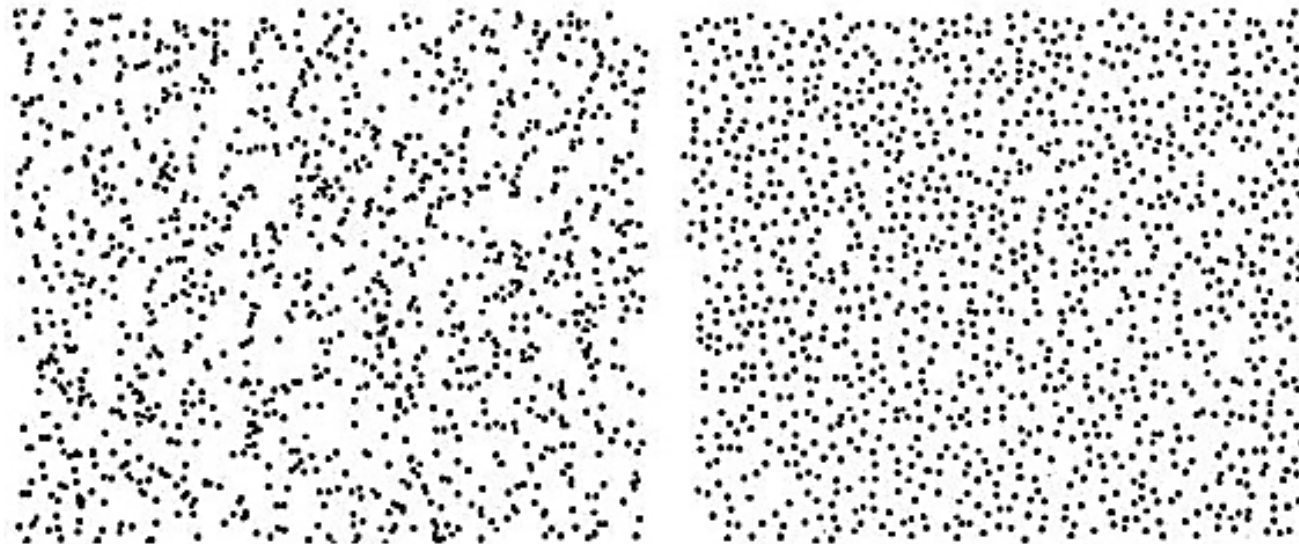
Амплитуда импульса:

$$A \sim V^n$$

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона

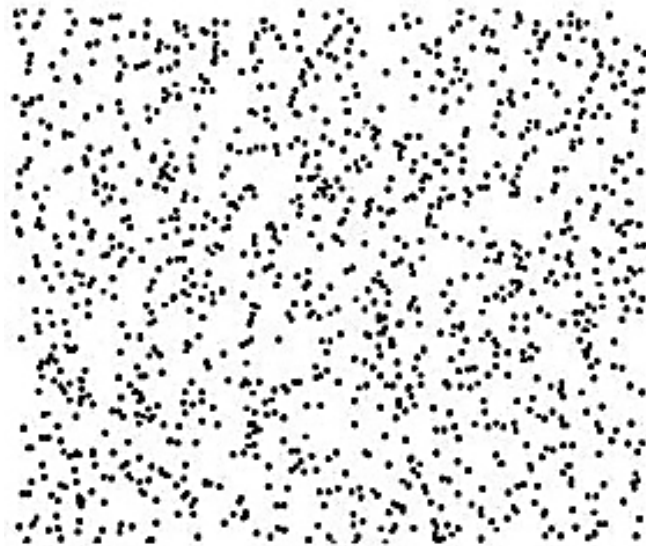
Распределение Пуассона — вероятностное распределение дискретного типа, моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга.



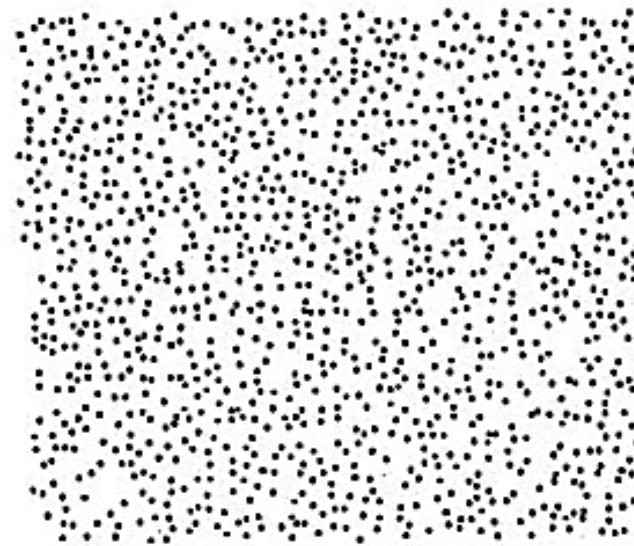
3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона

Распределение Пуассона — вероятностное распределение дискретного типа, моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга.



массив, который был построен случайно — это звезды



строй, чьи позиции были образованы толчками друг от друга — это светлячки

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона

Распределение Пуассона — вероятностное распределение дискретного типа, моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга.

Студент 1:

РООРОРРРРРОРРОРРРООРОРРОР
ОООРОРООРОРРООРРРРОРРРОРО
РРООРРРРРРРРОРОООООРОРОРО
РОРОРОООООРООРРРРРОРРООРО

Студент 2:

ОРРОРРОРОООРРОРОРОРРООРОРР
ОРРООООРРОРРОРОРОРОООРРОРРО
РОРОРОРООООРРОРОРОРОООРРОРРР
ОРООРОРОРОРОООРРОРОРОРОРРООР

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона. Бомбежка Лондона

Распределение Пуассона — вероятностное распределение дискретного типа, моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга.



Количество бомб на квадрат	Предполагаемое кол-во квадратов по Пуассону	Действительное кол-во квадратов
0	226.74	229
1	211.39	211
2	98.54	93
3	30.62	35
4	7.14	7
5 и больше	1.57	1
	576.00	576

3. Фотоэлектронный умножитель. Диноды.

Распределение Пуассона. Бомбежка Лондона

Распределение Пуассона — вероятностное распределение дискретного типа, моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга.



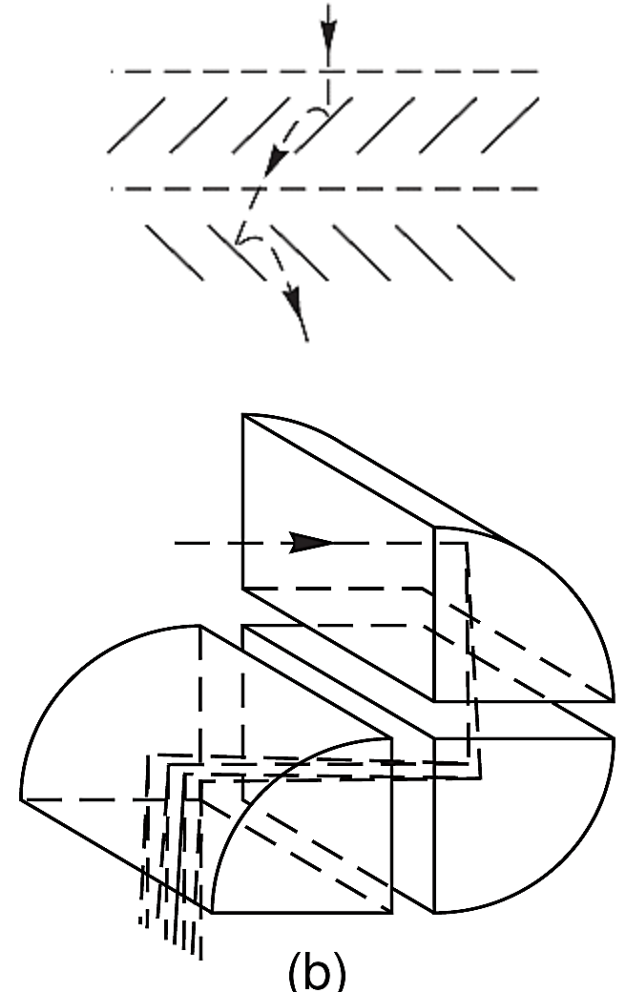
В столовой сварили компот из N и разлили его по n стаканам. Какова вероятность, что в стакане не окажется вишен?



1. Фотоэлектронный умножитель. Система ДИНОДОВ

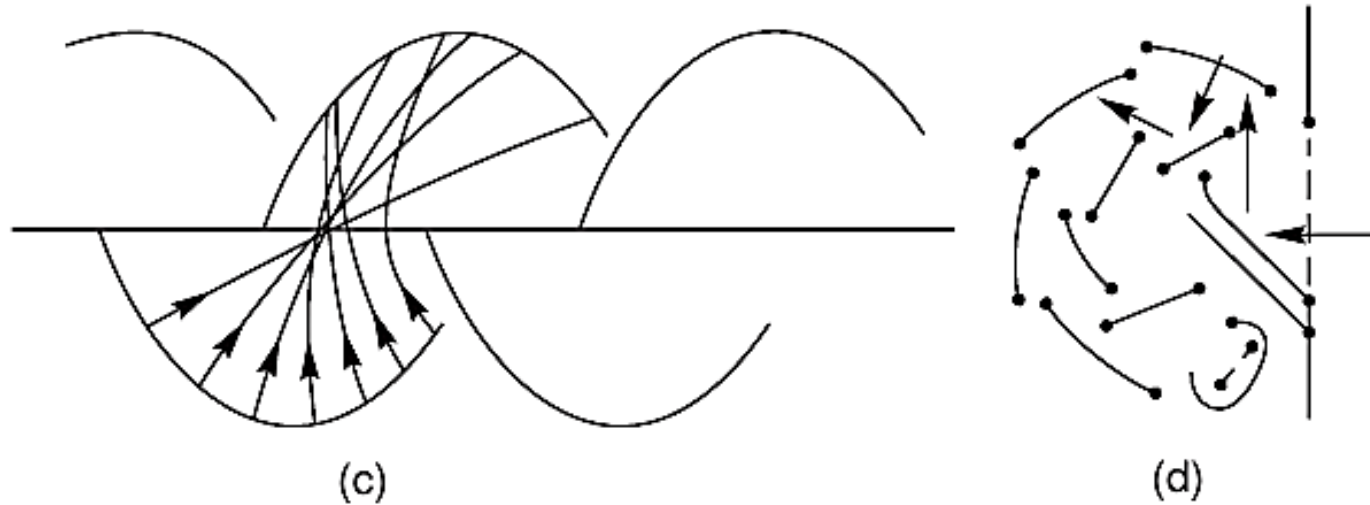
Структура типа «жалюзи» (venetian-blind) представляет собой параллельные полосы, наклоненные по отношению к оси ФЭУ вдоль которой движется электронный пучок. Большая площадь первого динода позволяет упростить электрон-оптическую схему ФЭУ. Данная конфигурация имеет высокую величину и хорошую стабильность коэффициента усиления, но посредственные характеристики

Первый динод в grid-and-box структурах (рис. 1.8(b)) имеет очень большую площадь сбора фотоэлектронов, соответственно, такие диноды обладают высокой эффективностью сбора фотоэлектронов и высоким коэффициентом усиления. Однако по тем же причинам, что и для динодов в структуре «жалюзи», временные характеристики таких динодов оставляют желать лучшего.

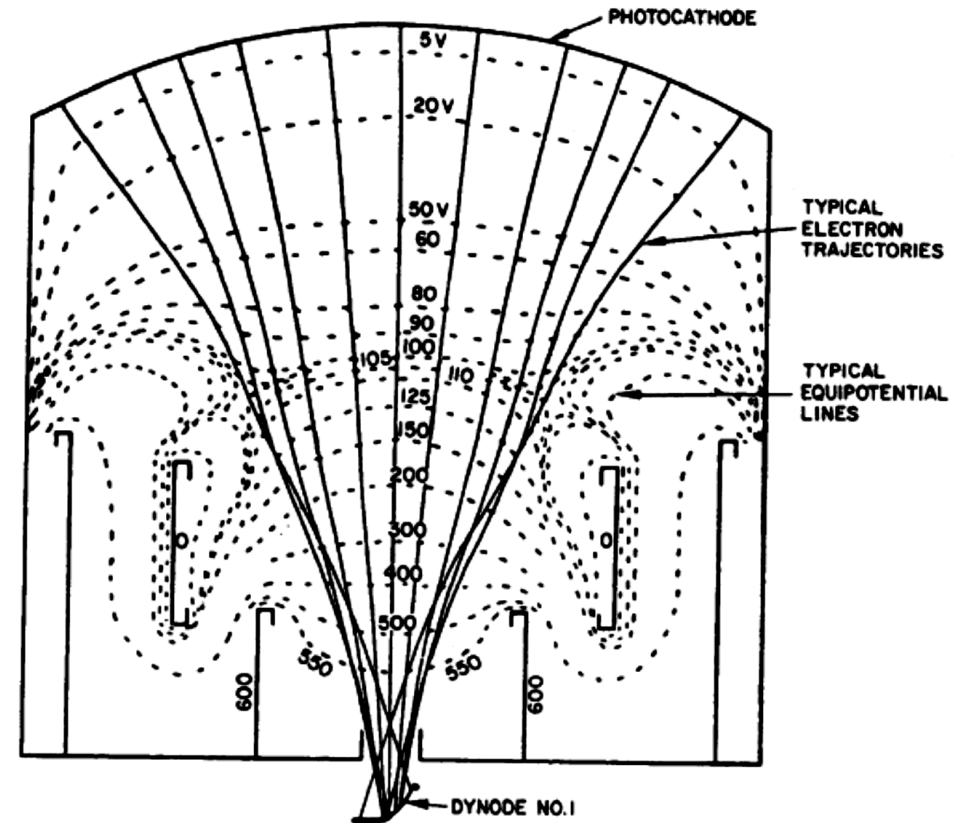
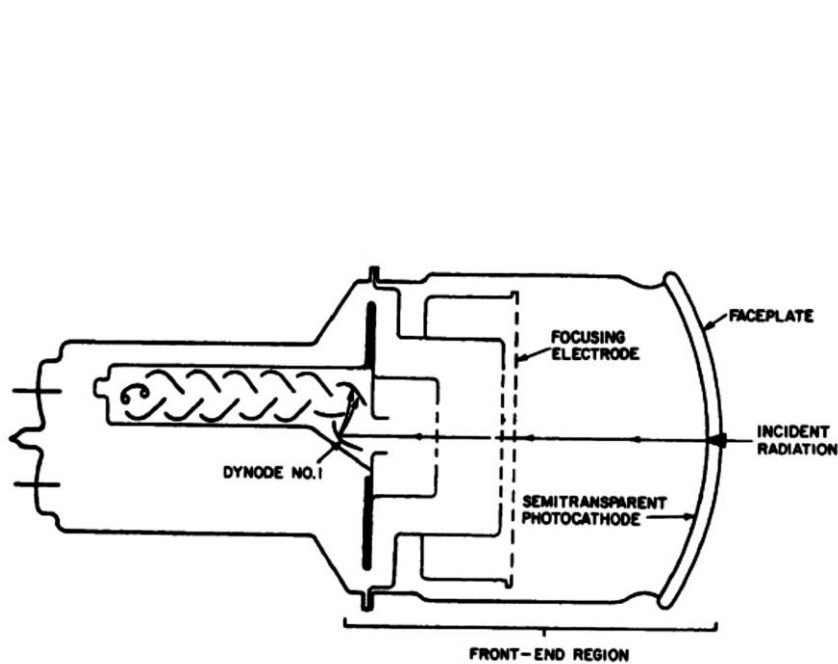


1. Фотоэлектронный умножитель. Система ДИНОДОВ

Системы динодов с линейно фокусировкой используются в системах, где требуется малое время отклика. Однако для лучшей фокусировки первые диноды по своей форме и местоположению отличаются от остальных. Также ФЭУ с такой фокусировкой имеют достаточно большой размер в отличие от систем со структурой типа circular cage .



1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов



1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов

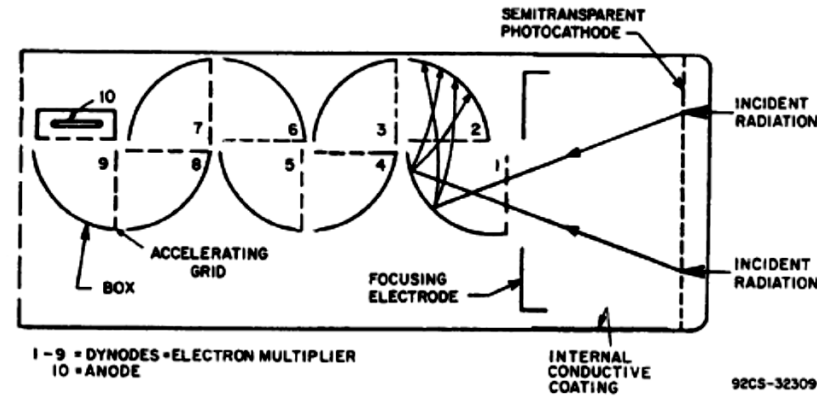


Fig. 23 - The box-and-grid multiplier structure.

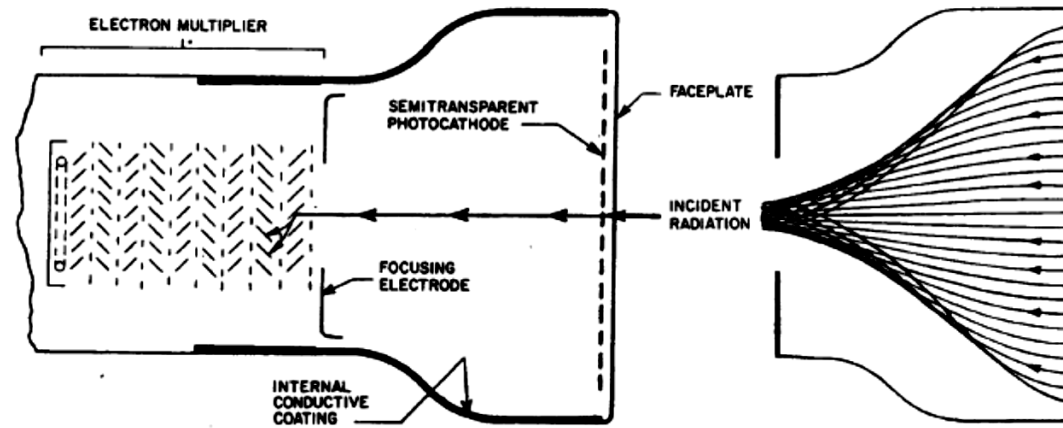
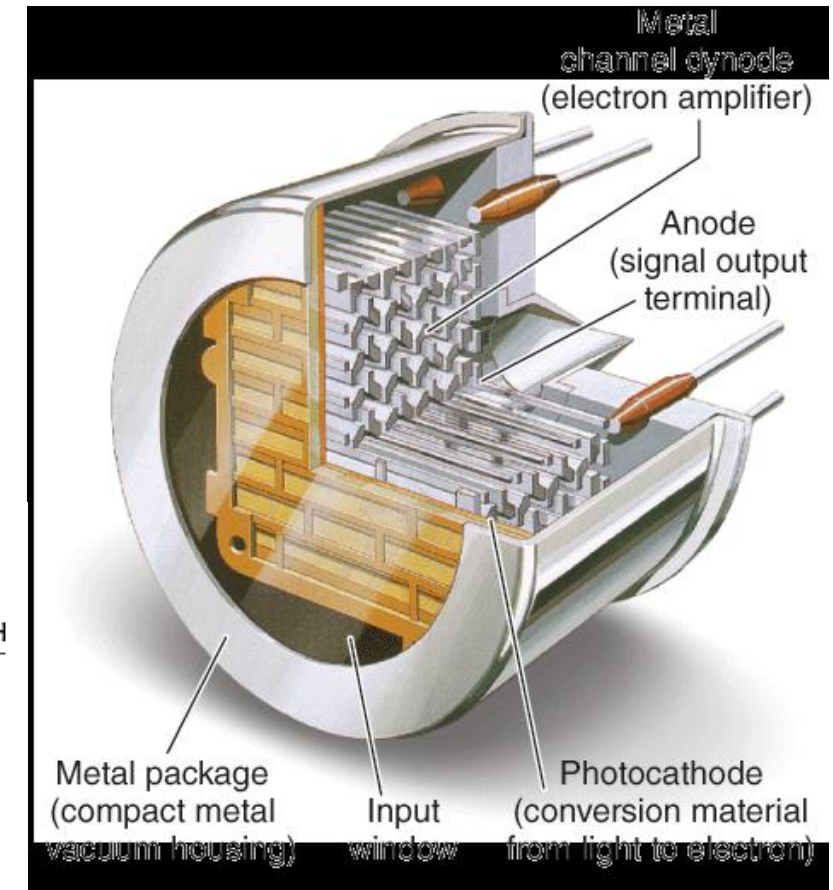
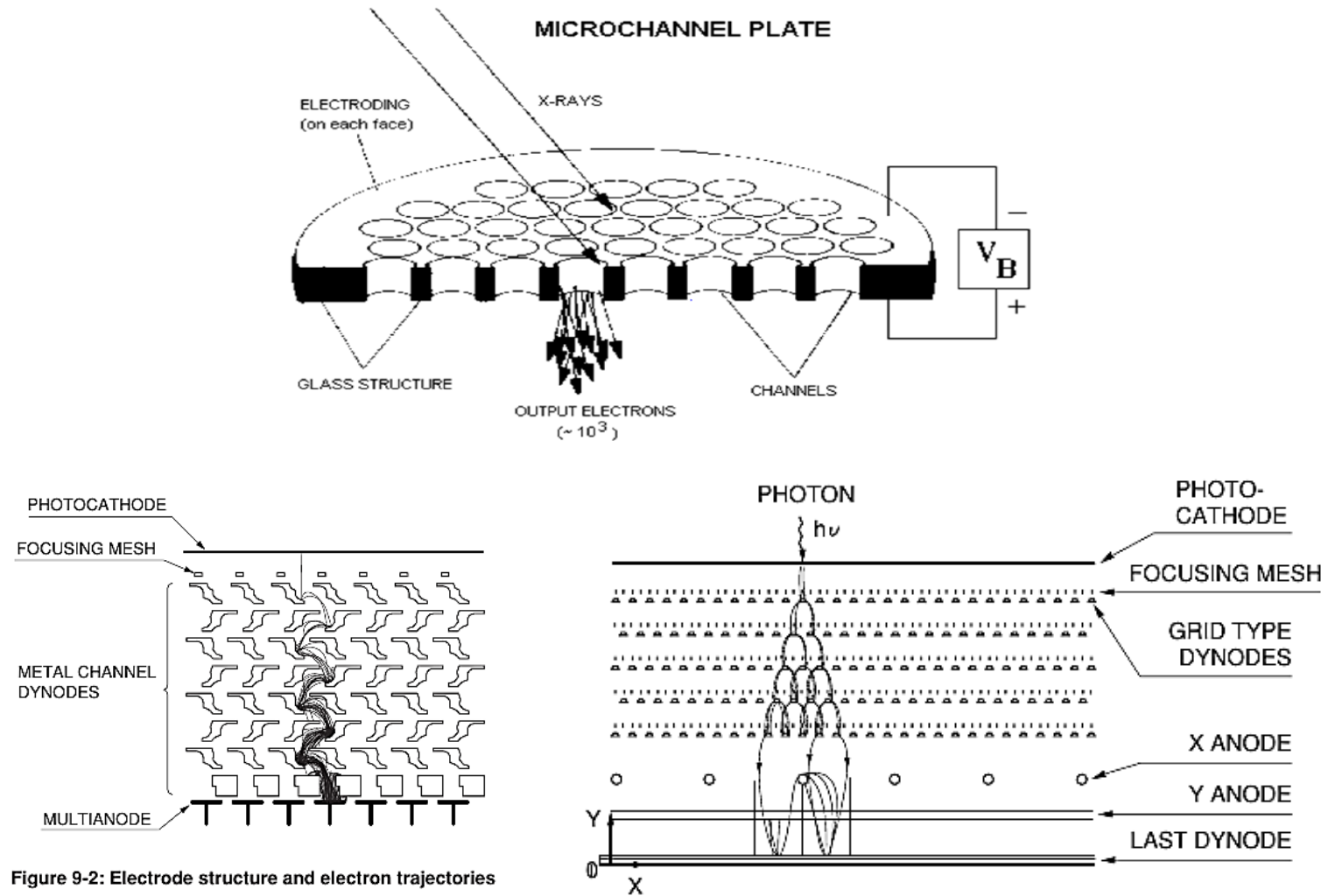
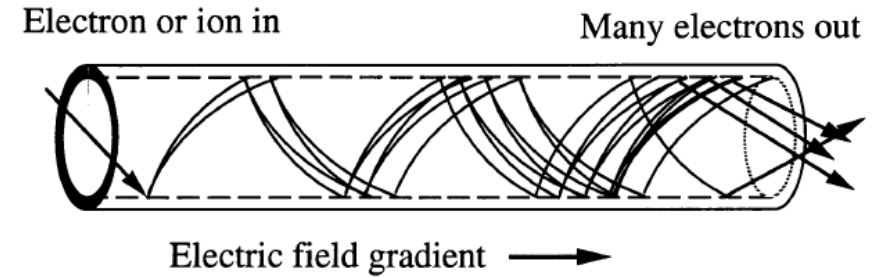
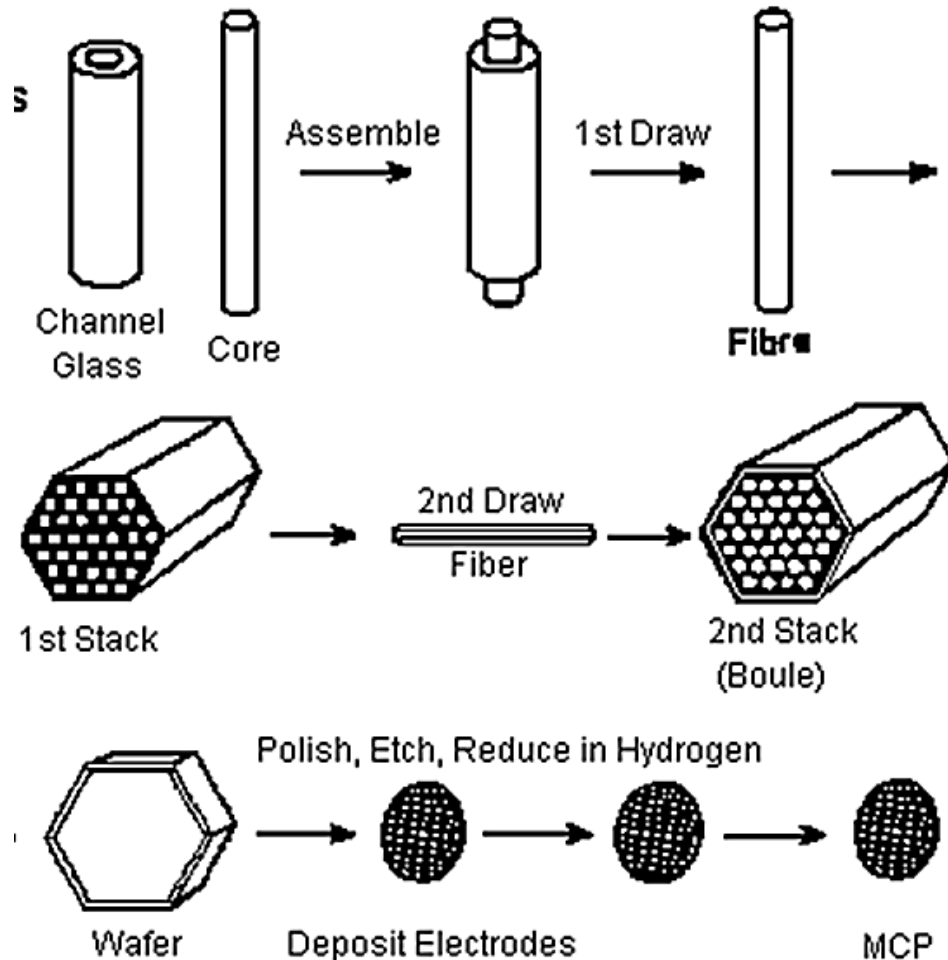


Fig. 24 - The venetian-blind multiplier structure.

1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов. Микроканальный ФЭУ

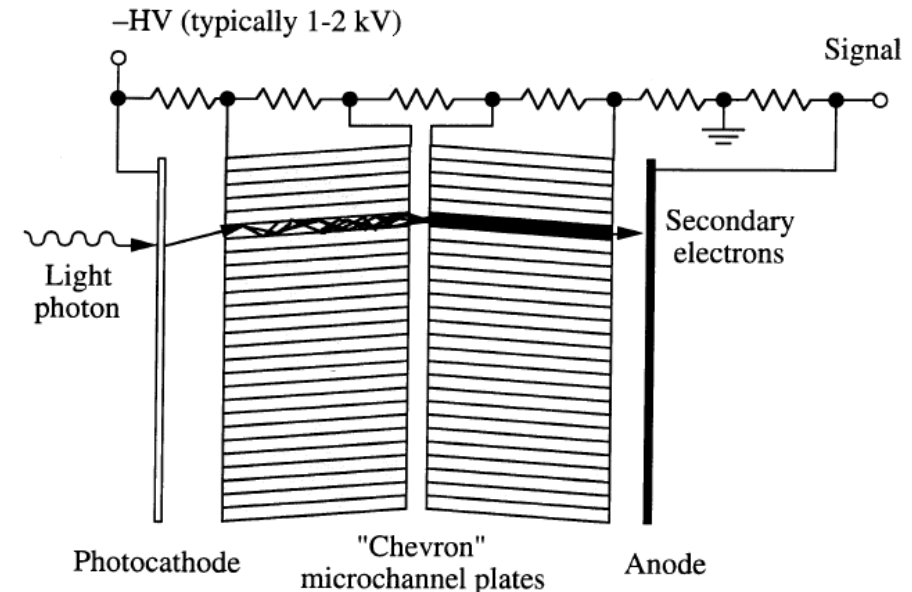


1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов. Микроканальный ФЭУ

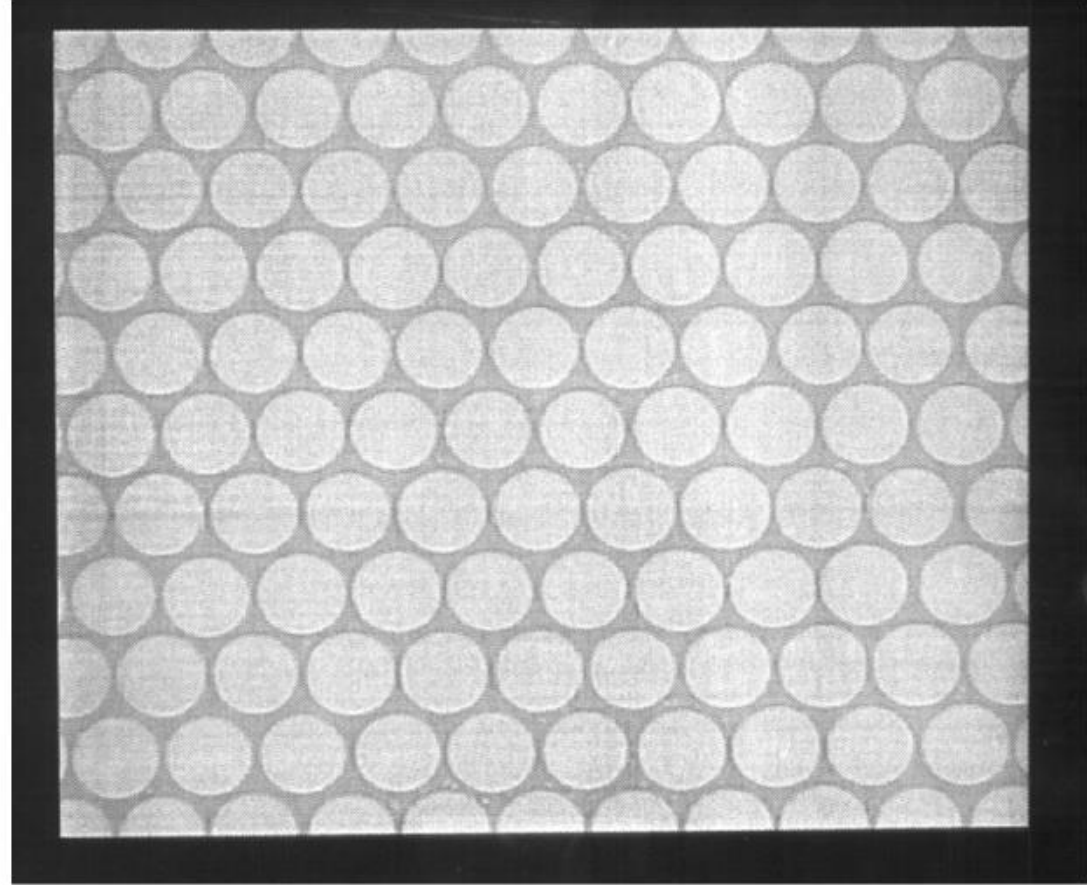
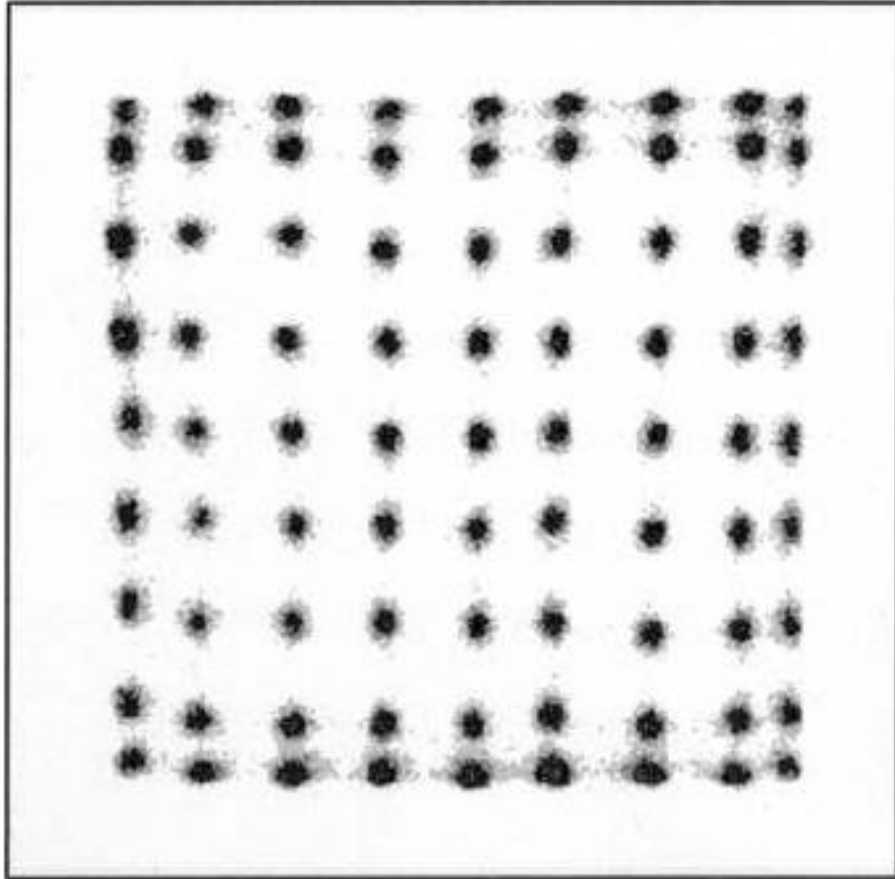


(from Derenzo)

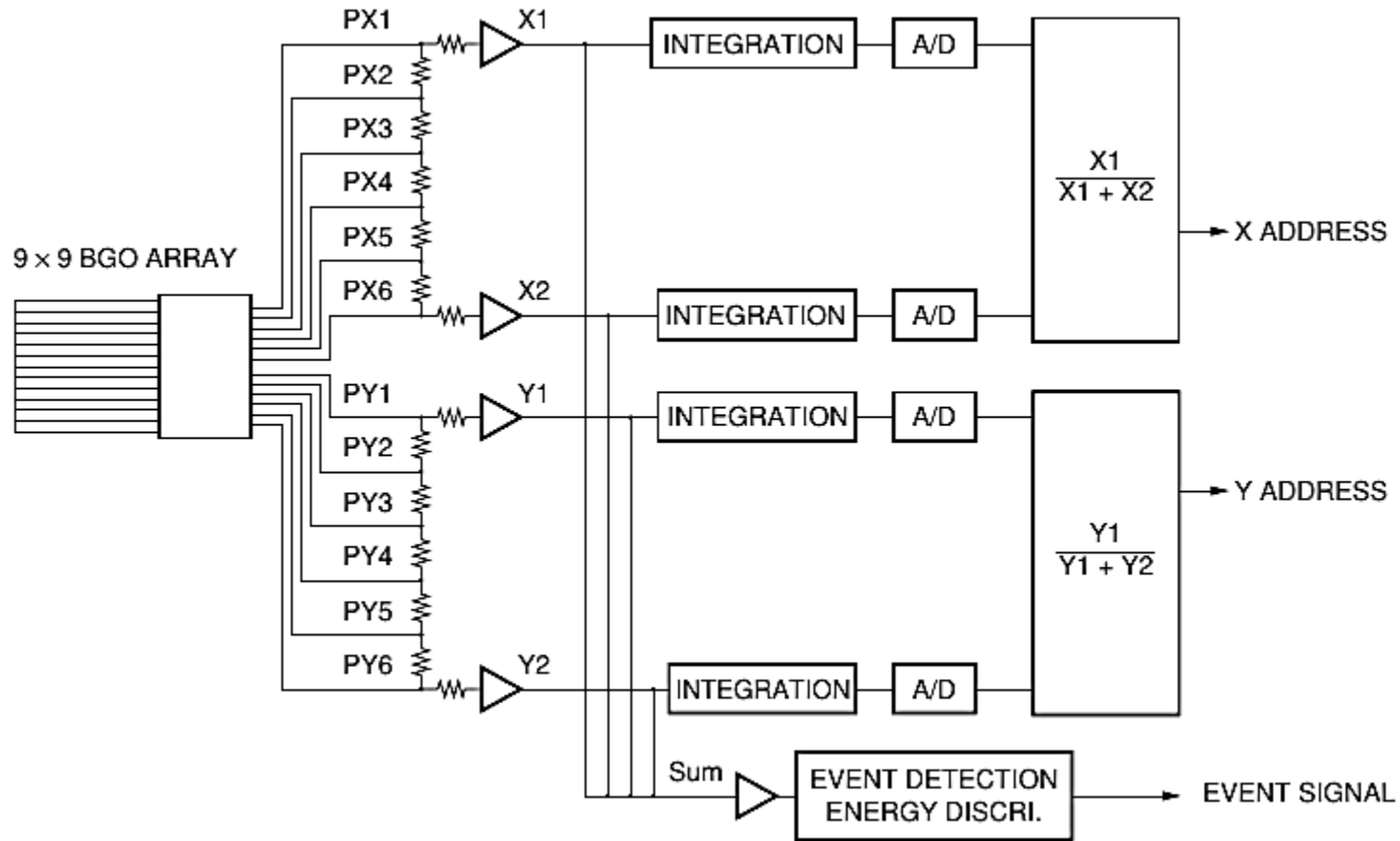
Can be combined in "microchannel plates"



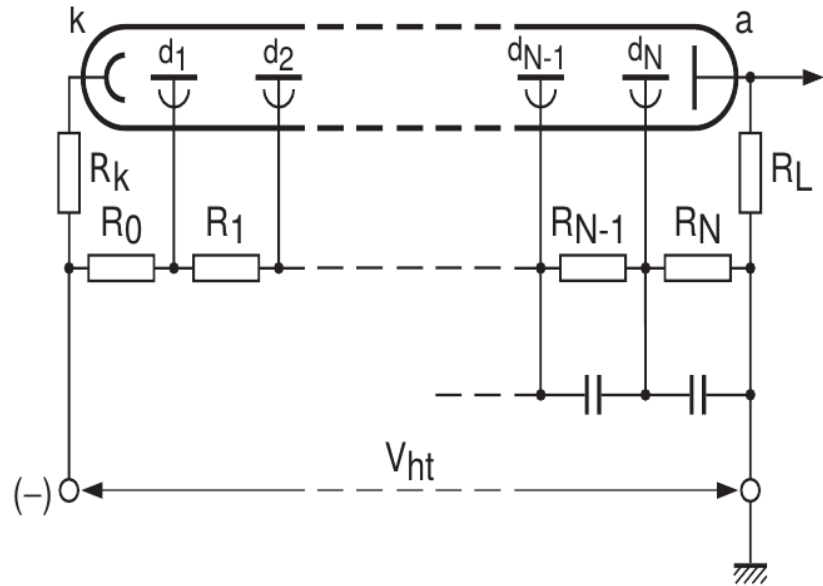
1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов. Микроканальный ФЭУ



1. Фотоэлектронный умножитель. Система динодов. Микроканальный ФЭУ



1. Фотоэлектронный умножитель. Режимы работы



В большинстве случаев используются делители с отрицательной полярностью. Однако стоит помнить, что на катод подается высокое напряжение. Соответственно следует избегать контакта окна ФЭУ с проводящими элементами, во избежание появления градиентов между фотокатодом и проводящим покрытием через окно ФЭУ. Это может привести к высокой нестабильности темнового тока. Есть два способа, чтобы избежать подобных проблем. Первый заключается в том, чтобы ФЭУ не контактировал с окружением, в роли изолятора здесь выступает воздушная прослойка. Второй способ заключается в подключении потенциала фотокатода к проводящему элементу (например, кожуху сцинтиллятора) через предохранительный резистор 10 МОм.

Рис. 1.9. Делитель с отрицательной полярностью

1. Фотоэлектронный умножитель. Режимы работы

В режиме счета фотонов предпочтительной является схема с положительной полярностью. В такой схеме конденсатор C изолирует высокое напряжение от измерительной цепи. В сцинтилляционных измерениях, в случае подключения делителя с положительной полярностью, необходимо учесть, что магнитный экран и покрытие сцинтиллятора должны иметь потенциал фотокатода (быть заземлены).

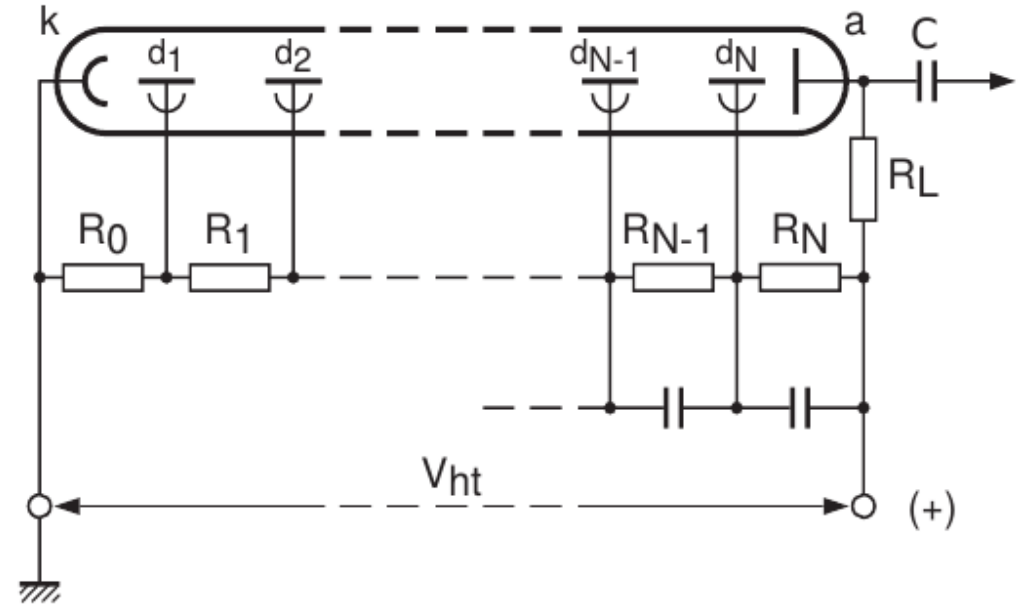


Рис. 1.10. Делитель с положительной полярностью

1. Фотоэлектронный умножитель. Режимы работы

Также делители напряжения разделяются по типу распределения напряжения между диодами. Первый тип делителя – равномерный (рис. 1.11a). Напряжения между соседними диодами в таком типе делителей равны между собой. Такое распределение позволяет получить максимальное усиление при данном напряжении питания. Такие делители широко используются как в фотометрии, так и в сцинтилляционных детекторах.

Следующий тип делителя – прогрессивный (рис. 1.11b). В таком типе делителей напряжение между диодами увеличивается по направлению к аноду. Таким образом, на последних диодах напряжение в 8–10 раз выше, чем на первых. Такое распределение напряжений позволяет регистрировать импульсы на аноде с амплитудой несколько сотен миллиампер с хорошей линейностью. Коэффициент усиления при использовании такого типа делителя существенно ниже, чем у первого типа при одинаковом приложенном к ФЭУ напряжении.

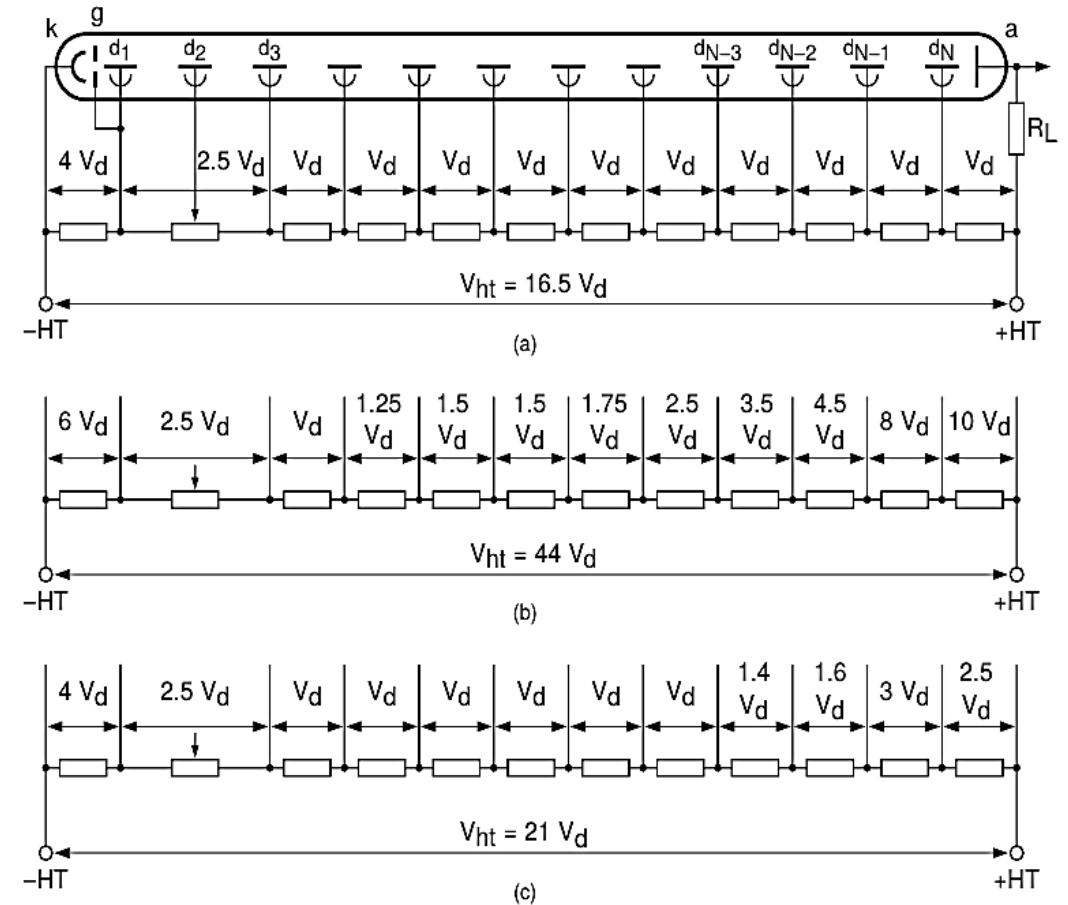


Рис. 1.11. Основные типы делителей: (a) – равномерный делитель, (b) – прогрессивный делитель, (c) – промежуточный.

1. Фотоэлектронный умножитель. Режим счета фотонов

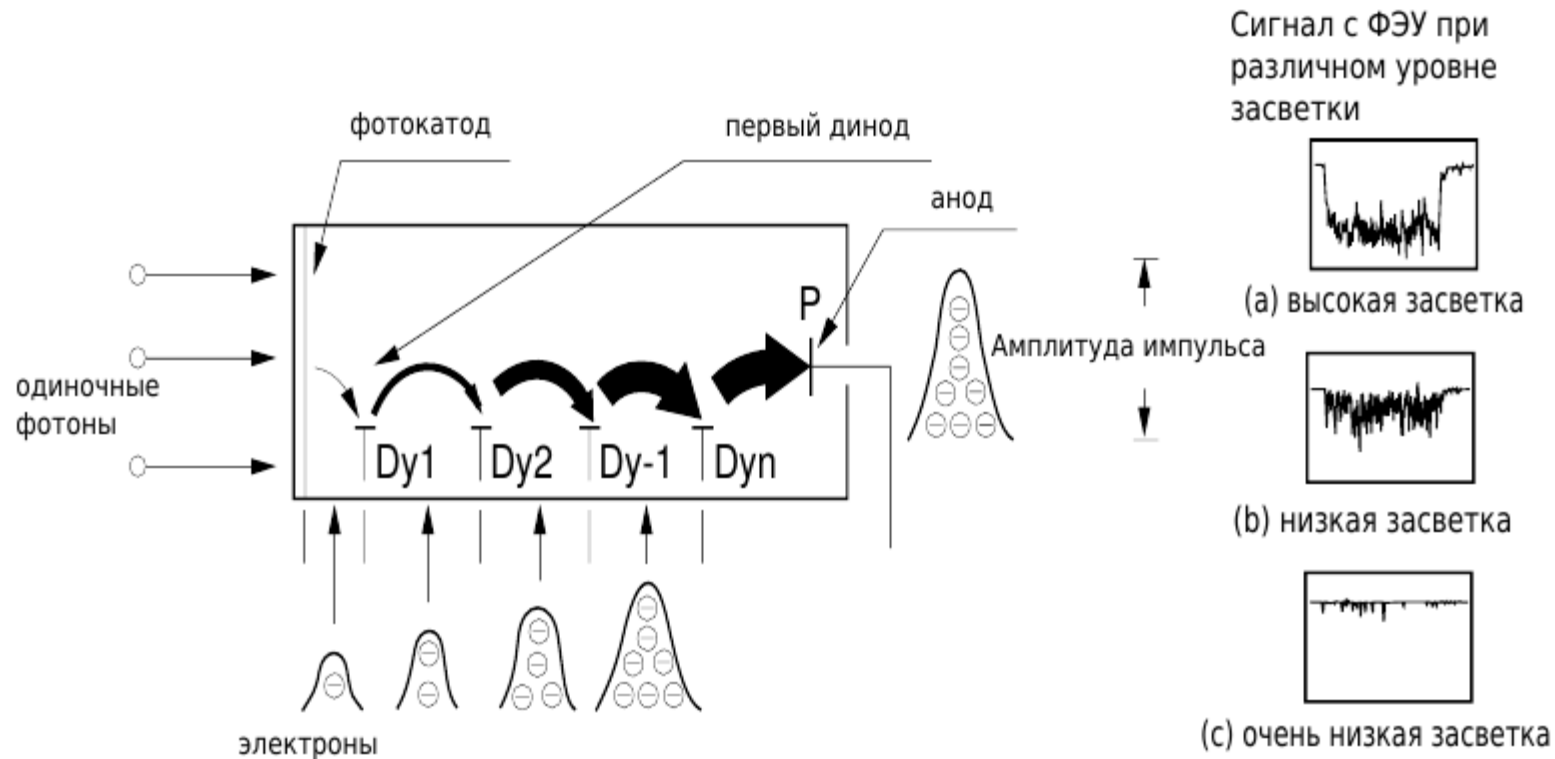


Рис. 1.12. Работа ФЭУ в режиме счета фотонов. Показан сигнал на выходе с ФЭУ при различной засветке фотокатода.

1. Фотоэлектронный умножитель. Режим счета фотонов

В одноэлектронной области при поглощении одного фотона испускается либо один фотоэлектрон, либо вообще не испускается фотоэлектронов. Тогда квантовая эффективность для фотона с заданной энергией имеет смысл отношения числа фотоэлектронов, испущенных фотокатодом к числу фотонов, попавших на фотокатод за единицу времени.

Вероятность того, что фотоэлектрон испущенный фотокатодом (первичный электрон) столкнется с первым динодом и умножится на нем определяется величиной эффективности сбора. Некоторые фотоэлектроны не умножаются, так как не попадают в систему динодов, так как имеют траектории отличные от нормальных для данного типа ФЭУ.

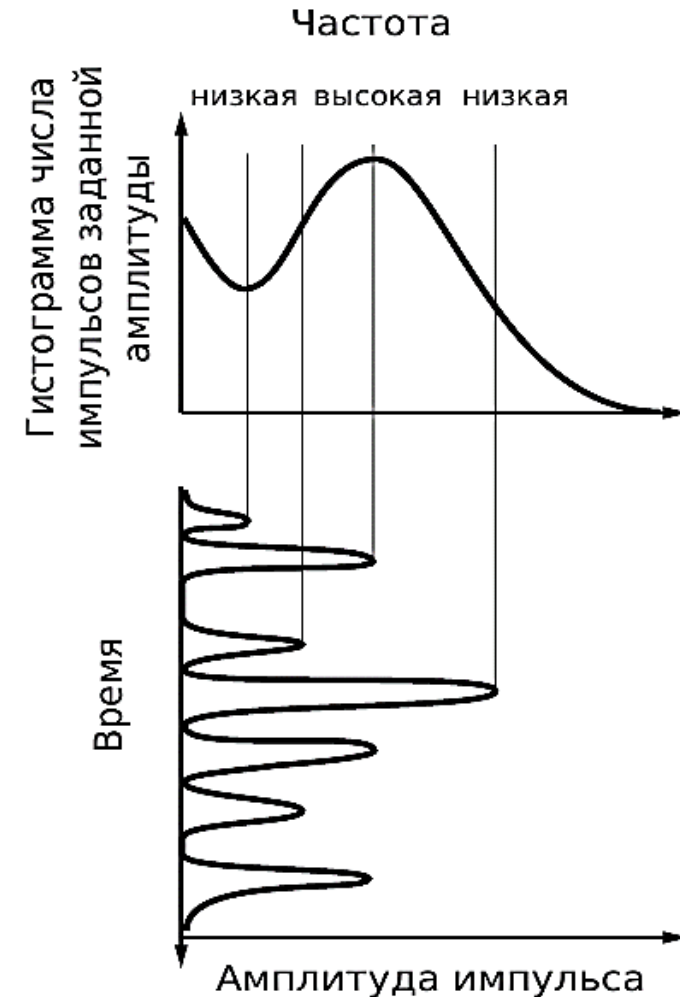


Рис. 1.13. Выходные импульсы с ФЭУ в одноэлектронной области и их амплитудный спектр.

1. Фотоэлектронный умножитель. Режим счета фотонов

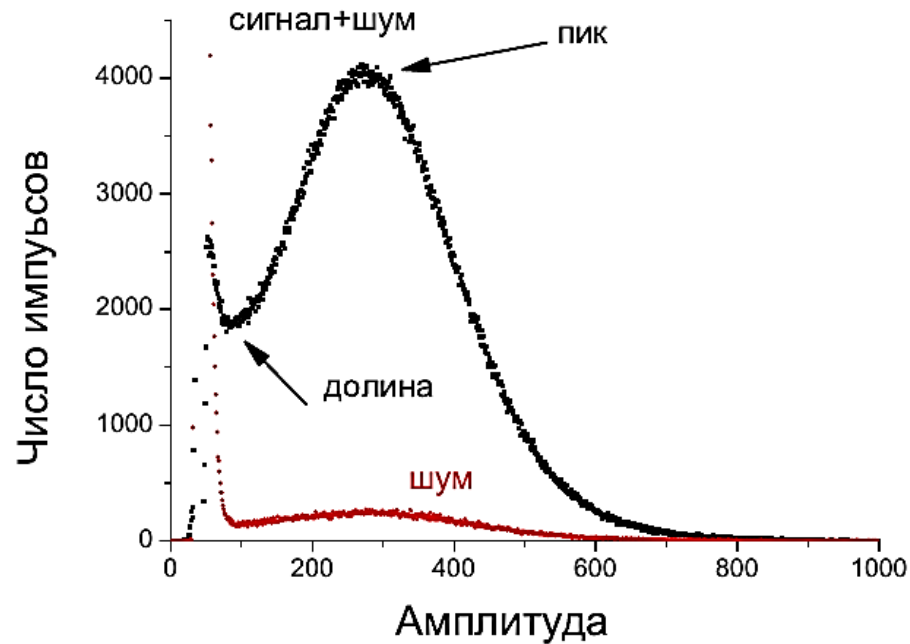


Рис. 1.14. Амплитудное распределение одноэлектронных импульсов для ФЭУ ET 9814QSB. Напряжение питания ФЭУ – 1,4 кВ.

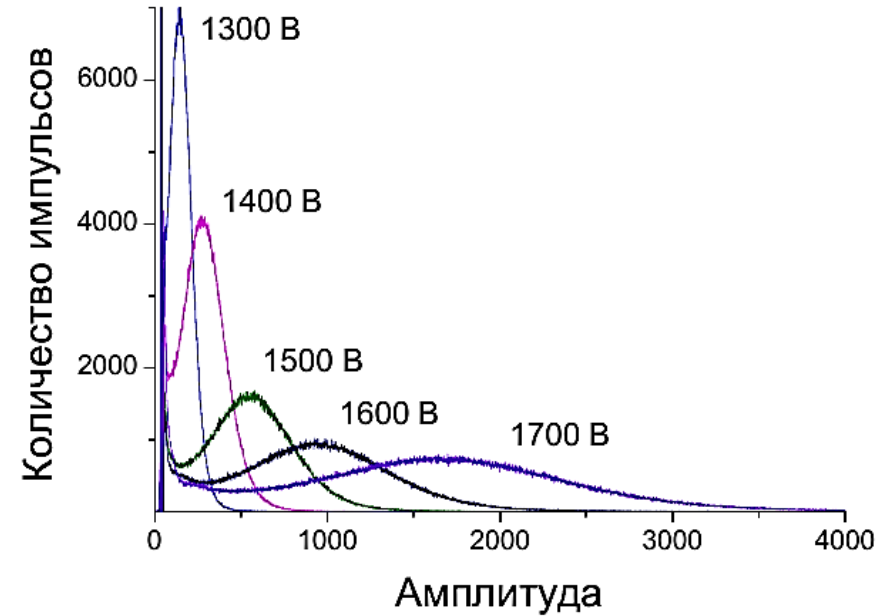


Рис. 1.15. Амплитудные распределения одноэлектронных импульсов для ФЭУ ET 9814QSB при различных напряжениях питания ФЭУ. С увеличением напряжения одноэлектронный пик смещается в область больших амплитуд. Площади под пиками одинаковы.

1. Фотоэлектронный умножитель. Режим счета фотонов

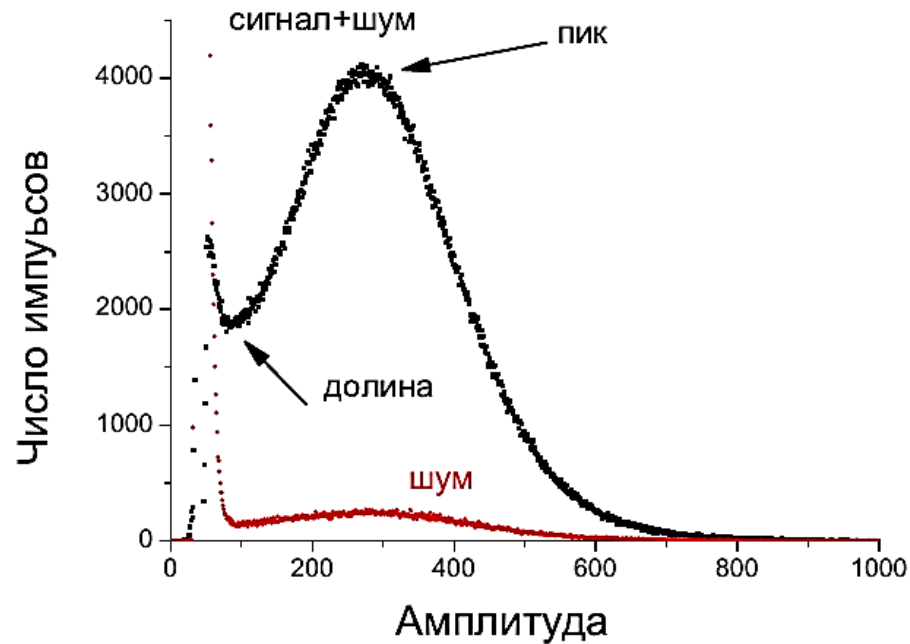


Рис. 1.14. Амплитудное распределение одноэлектронных импульсов для ФЭУ ET 9814QSB. Напряжение питания ФЭУ – 1,4 кВ.

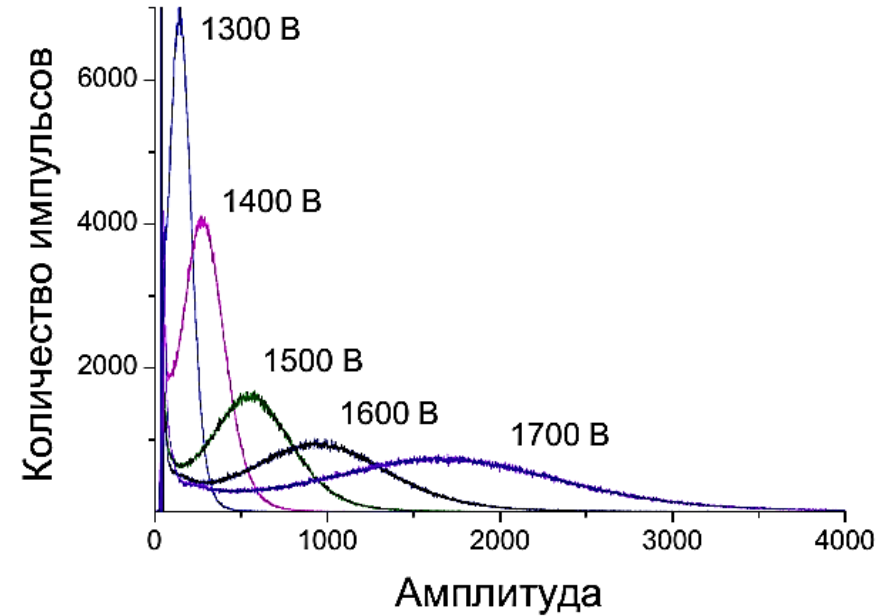


Рис. 1.15. Амплитудные распределения одноэлектронных импульсов для ФЭУ ET 9814QSB при различных напряжениях питания ФЭУ. С увеличением напряжения одноэлектронный пик смещается в область больших амплитуд. Площади под пиками одинаковы.

1. Фотоэлектронный умножитель. Расчеты



Предположим, что в результате регистрации одного события с фотокатода вылетает 1000 фотоэлектронов, коэффициент усиления ФЭУ составляет 10^6 , таким образом на последнем диноде будет 10^9 фотоэлектронов. С последнего динода электроны попадают на анод и регистрируется импульс. Необходимо рассчитать максимальный ток на аноде, если частота следования импульсов не превышает 100кГц.

Фотоэлектронный умножитель. Расчеты



Предположим, что в результате регистрации одного события с фотокатода вылетает 1000 фотоэлектронов, коэффициент усиления ФЭУ составляет 10^6 , таким образом на последнем диноде будет 10^9 фотоэлектронов. С последнего динода электроны попадают на анод и регистрируется импульс. Необходимо рассчитать максимальный ток в импульсе и средний ток на аноде, если частота следования импульсов не превышает 100кГц.

$$I_{avg} = \frac{dq}{dt} = N_{pe} * f * e = 10^9 \frac{\text{электрон}}{\text{импульс}} * 10^5 \frac{\text{импульс}}{\text{сек}} * 1,6 * 10^{-19} \frac{\text{Кулон}}{\text{электрон}} = 1,6 * 10^{-5} \text{ А}$$

$$I_{avg} = \frac{dq}{dt} = 10^9 \text{ электрон} / (20 * 10^{-9}) \text{ сек} * 1,6 * 10^{-19} \frac{\text{Кулон}}{\text{электрон}} = 0.08 \text{ А}$$

Задачи на дом

- 1) Рассчитайте длинноволновый предел чувствительности ФЭУ с фотокатодом, имеющим работу выхода равную 1,5 эВ; 1 эВ; 0,8 эВ?
- 2) Рассчитайте длинноволновый предел чувствительности ФЭУ с полупроводниковым фотокатодом, если ширина запрещенной зоны полупроводника равна 0,5; 0,8; 1 эВ, а сродство к электрону имеет отрицательную величину.
- 3) Рассчитайте время пролета электрона между двумя динодами в трубке ФЭУ, если зазор между динодами равен 12 мм, а потенциал между ними 150 В. Для простоты считать, что поле между динодами однородно.
- 4) Определите какое напряжение необходимо приложить к ФЭУ с шестью каскадами умножения, для динодов из GaP и SbO, чтобы достичь коэффициента усиления 10^6
- 5) Коэффициент усиления одного динода δ в ФЭУ с 10-ю каскадами зависит от напряжения V между динодами по закону $V^{0,6}$. К ФЭУ приложено напряжение 1 кВ, какая флуктуация напряжения допустима, если необходимо, чтобы флуктуация коэффициента усиления не превышала 1 %?