

Измерение импульсного излучения. Приборная часть, применение и ограничения.

Каракаш А.И.

История развития приборов для регистрации И.И.

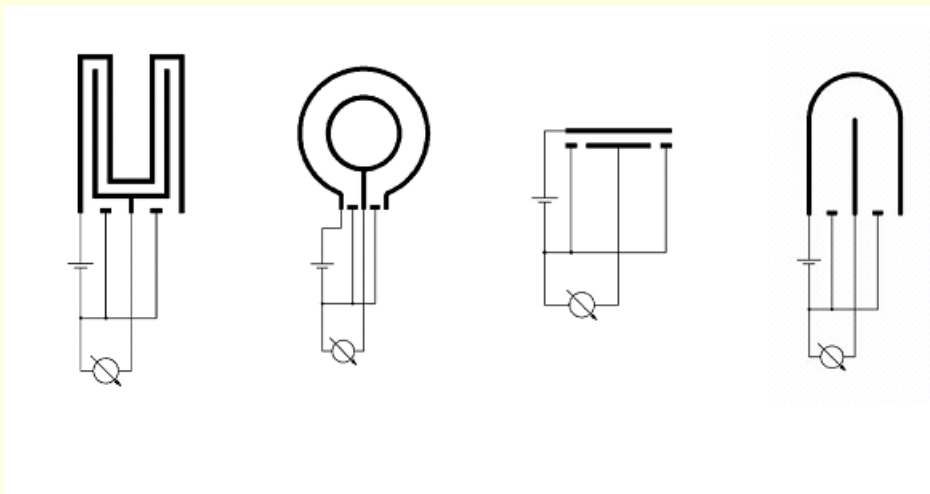
- Электроскоп - Уильям Гилберт (1600 г.)... Столетов А.Г. (1889 г.) → Ионизационные детекторы
- CaF - В.К. Рентген (1895 г.) → Сцинтилляционные детекторы.
- Фотопластинка - Анри Беккерель (1896 г) → Твердотельные и химические детекторы.

Н.В.

- Публикация 34 (1982 г) МКРЕ рассматривает четыре детекторных системы
 - Ионизационные камеры
 - Химические дозиметры
 - Калориметры
 - Твердотельные детекторы

Ионизационные камеры

- Чувствительность $\sim 2 \cdot 10^8$ е⁻ на 1 мГу для 1 см³
- Время жизни свободного е⁻ в воздухе ~ 180 нс \rightarrow отсутствует электронный ток.
- Время сбора зарядов ~ 1 мс \rightarrow импульсы короче воспринимаются как мгновенные. Требуется дополнительных калибровок при частотах ~ 1 кГц
- Диапазон измерения сверху ~ 1 мГу – 100 мГу в импульсе (в зависимости от конструкции камеры).
- Потенциал ионизации от е⁻ и альфа равны с точностью до 5 % \rightarrow важны эффекты экранировки.
- Рекомендации для расчета камер можно найти в работах Воаг 1966г.



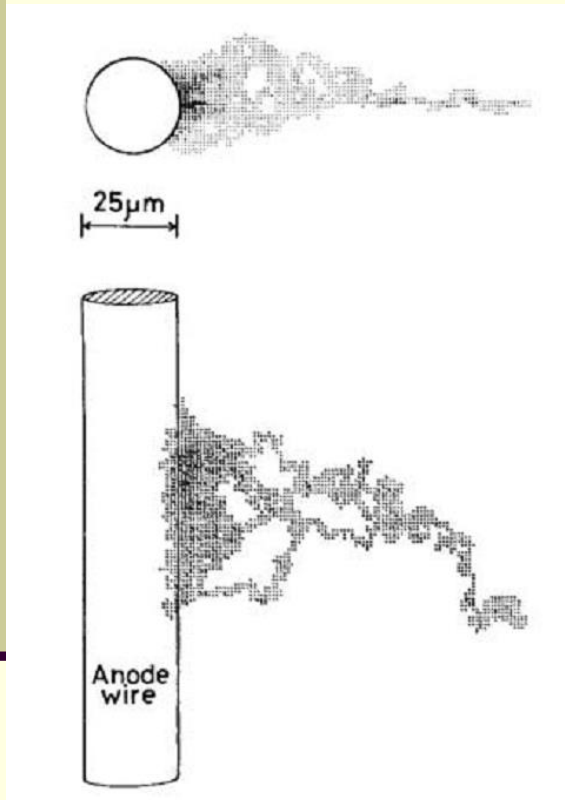
Использования ИК для измерения фона

- Камера 1 см^3 : $t_{\text{изм}}=15\text{ мин} \rightarrow D = 20\text{ нГр} \rightarrow 8 \cdot 10^3\text{ e}^-$
- Электрометр: $\sigma_{\text{noise}}=2 \cdot 10^4\text{ e}^-/\text{s} \rightarrow t_{\text{изм}}=15\text{ мин} \rightarrow \sigma_{\text{noise}}=6 \cdot 10^5\text{ e}^-/\text{изм.}$
- Для 1 % стат. погрешности
 $V = 7.5 \cdot 10^3\text{ см}^3 = 7,5\text{ литров}$
- При этом:
 - макс значение дозы импульсного излучения составит ~ 10% от плоскопараллельной геометрии (1 мГр/имп) и при напряжении на камере ~ 21 kV для эффективности сбора 0.9
 - Измеряемый ток от 100 нГр/ч \rightarrow 10 фА

Пути компактизации.

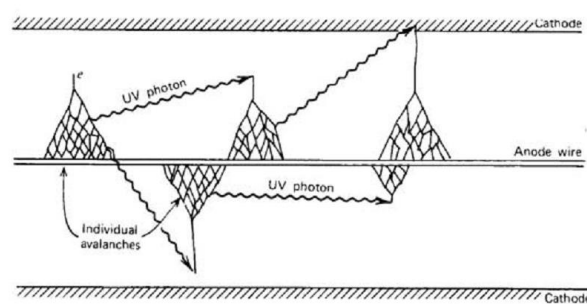
- Увеличить давление, т.е. увеличить чувствительность →
 - Необходим прочный корпус, что ограничит энергетику с низу (1 мм Fe достаточно для 10 Атм, но при этом 60 keV ~ 0,8).
 - Максимально измеряемая доза снизится ~ 10^3

Пути компактизации.



- Увеличить чувствительность за счёт усиления в газе ($M \sim 10^2$ и выше) →
 - Необходим прочный корпус, что ограничит энергетику ...
 - Используемый газ имеет другой ход энергетической зависимости.
 - Уменьшится время сбора e^- ~ 1 мкс, можно использовать импульсную электронику (1000 e^-) и работать с индивидуальным фотоном.
 - Эффекты экранировки зарядов начнут играть важную роль. Появится мертвое время порядка 1 мс. Максимально измеряемая доза снизится \sim более чем 10^6 и будет зависеть от энергии излучения
 - Старение газовой смеси.

ИК завершение

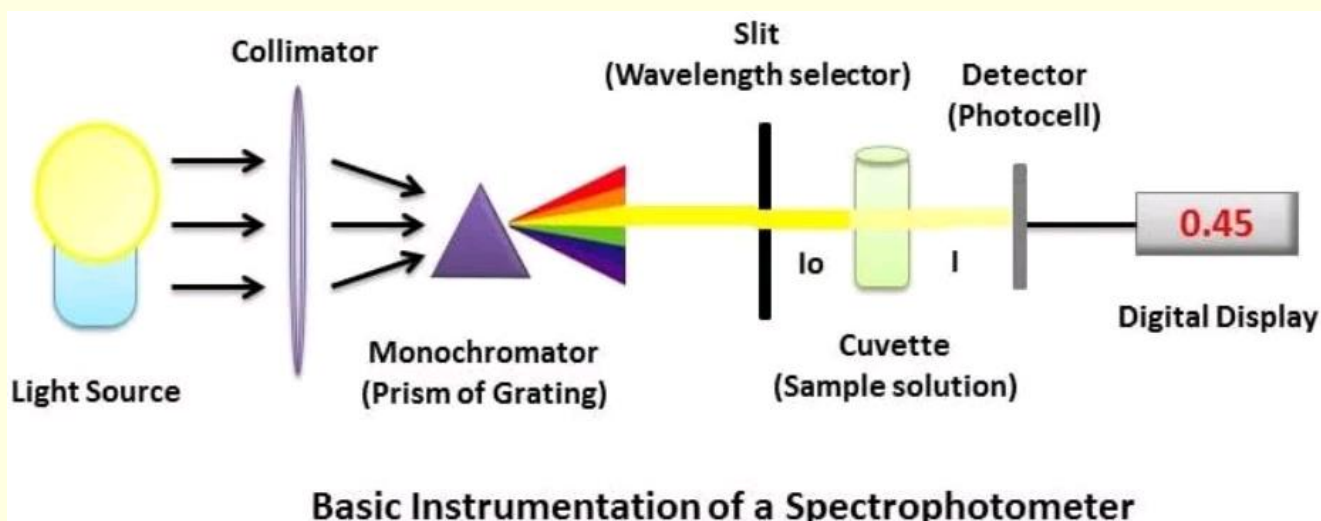


- Счетчик ГМ – газовый прибор работающий в режиме разряда
 - Время развития разряда ~ 1 мкс.
 - Мертвое время ~ 10 мкс
 - Заряд импульса с ГМ не зависит от начальной ионизации.
 - Прост в использовании (электроника).
 - Чувствительность легко измеряется.
 - ➔ Приборы на основе ГМ не способны измерят дозу в импульсном излучении, но могут служить индикаторами наличия периодических импульсных полей.

- При этом если создать условия (использовать ослабление) когда счетчик будет работать в глубоко малофотонном режиме (импульс со счетчика появляется на каждый 20 импульс или реже), то в этом случае мы можем измерять дозу в импульсе. Можно использовать в метрологии (систематика).

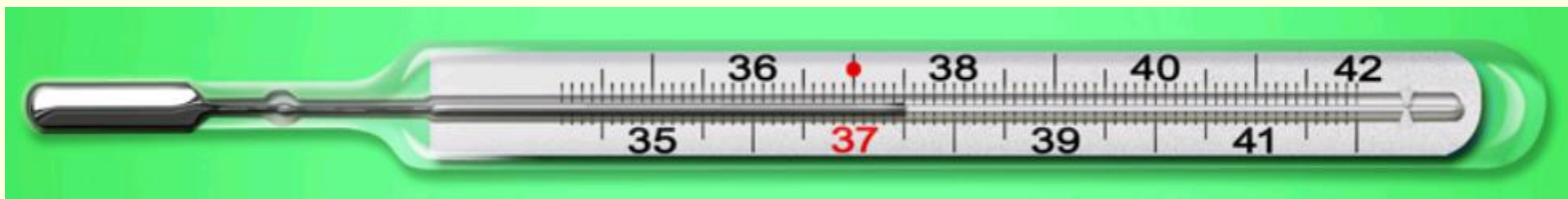
Химическая дозиметрия

- Дозиметр Фрикке (1927 г). Способен измерять до 10 – 100 Gy в импульсе. Общая поглощенная доза не превышает 350/1750 Gy
 - Использует спектрофотометр.



Калориметрическая дозиметрия

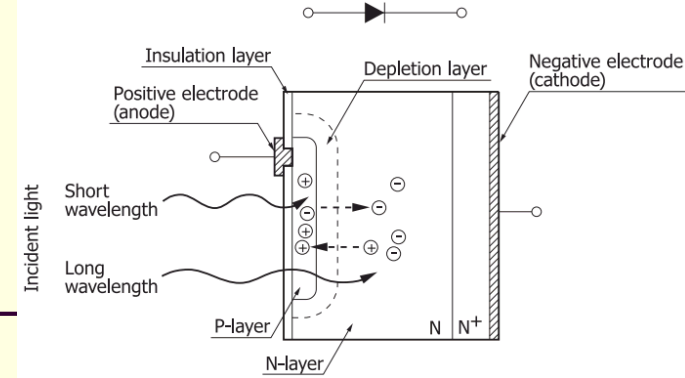
- Измеряется нагрев системы вызванный поглощением энергии (для воды $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ KGy}^{-1}$).
- Является абсолютным методом измерения поглощенной дозы.
- Не имеет зависимости от мощности дозы, этот метод подходит для измерения больших значений доз в импульсе.
- Сложна, требовательна к квалификации персонала, абсолютна не пригодна для измерения фоновых доз.



Твердотельные системы

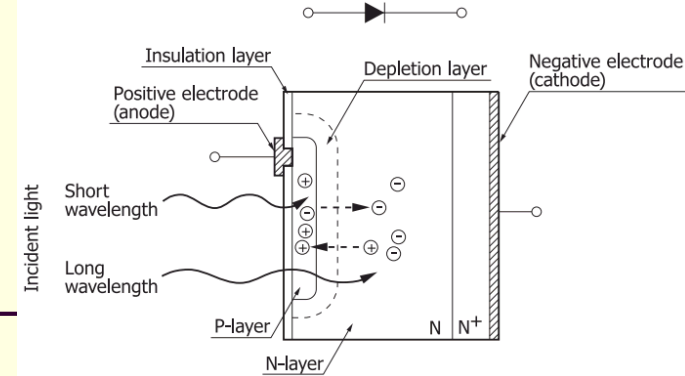
- Полупроводниковые детекторы
- Сцинтилляторы.
- Термо / радиолюминесцентные системы.

Полупроводниковые детекторы (ПЛЮСЫ)



- По своему принципу п/п детектор представляет собой ИК с твердой средой.
- Хорошо известен потенциал ионизации.
- Подвижность неосновных носителей заряда составляет $\sim 1350/480 \text{ см}^2/\text{в сек}$ \rightarrow позволяет получить быстрый отклик порядка $\sim 10 \text{ нс}$ при $U_{\text{см}} = 100 \text{ В}$
- Отсутствие мертвого времени
- Измеряет дозы до 10 Гр .
- Малая емкость $\sim 1 \text{ пФ/мм}^2$

Полупроводниковые детекторы (минусы)



- Высокие обратные токи $1 \text{ мм}^2 \rightarrow 10^{-12} \text{ А}$
- Высокая зависимость обратных токов от температуры.
- Энергетическая зависимость.
- Трудно определить размер области сбора заряда \rightarrow подходит для низких энергий, или требует калибровки эффективности от энергии.
- Радиационные дефекты (от 100 Gy для чистых п/п, от 1000 Gy для p-n структур)

Сцинтилляционные детекторы.

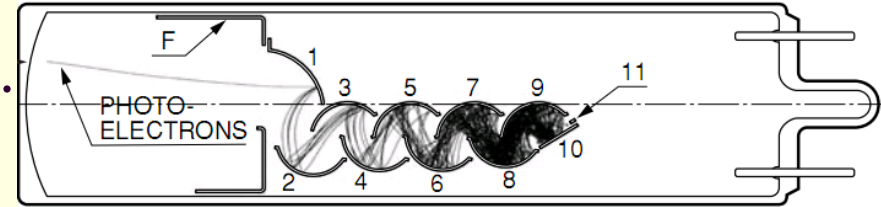
Сцинтилляторы



- Сцинтилляторы – вещества которые поглощенную энергию испускают в виде света.
- Коммерчески доступны:
 - Органические (BC-408)
 - Неорганические NaI(Tl), CsI(Tl/Na), CsI

среда	Плот-ть	Z	ϵ eV
H ₂	8.99 10 ⁻⁵	1	37
Si	2.33	14	3.6
Ge	5.33	32	2.9
BC-408	1.08	~7	125 (hv)
NaI(Tl)	3.67	50	28 (hv)
LaBr ₃	5.3	43	18(hv)

Сцинтилляционные детекторы. Детекторы света.



- В качестве детекторов возможно использовать:
 - p/n детекторы (p-i-n, APD, SiPM)
 - ФЭУ
 - Q.E ~ 20%
 - $M \sim 10^6$
 - Времена импульса ~ 10 нс
 - $I_{bgd} > 1$ нА
 - $f_{bgd} > 1000$ Гц
 - Зависимость темнового тока от температуры ~ 2 на 10°C
 - Шумы не пуассоновские ENF = 2.
 - Ограничение импульсного анодного тока < 100 мА
 - Ограничение постоянного анодного тока < 20 мкА
 - Ограничение среднего катодного тока < 10 нА (Sb-K-Cs)
 - Гистерезис
 - После импульсы

Оценки для ВС408(1 см³)+ФЭУ (ограничения ФЭУ)



■ Измерение фона:

- $100 \text{ nSv/h} = 28 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/s} \sim 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ Gy/s} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}/(\text{кг с})$

$$= 2,5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}/(\text{г с}) / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/еВ}) = 1,5 \cdot 10^5 \text{ еВ/с} \quad (125 \text{ еВ/фотон}) \rightarrow$$

$$\rightarrow 1200 \text{ фотон/с} \quad \text{светосбор}=1/3 \rightarrow 400 \text{ фотон на катоде/с} \quad \text{QE}=0,2 \rightarrow 80 \text{ ph.e/c} \quad M=10^6 \rightarrow 8 \cdot 10^7 \text{ e/c} = 12,8 \cdot 10^{-12} \text{ А}$$

■ Какую максимальную дозу можем измерить в импульсном режиме ($M \sim 10^6$)?

- $100 \cdot 10^{-3} \text{ А} (10 \text{ нс}) \rightarrow 50 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 10^{-8} \text{ с} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,1 \cdot 10^9 \text{ е} \quad M=10^6 \rightarrow 3,1 \cdot 10^3 \text{ е} \quad \text{QE}=0,2 \rightarrow 1,5 \cdot 10^4 \text{ ph на ФК}$

$$\text{светосбор} = 1/3 \rightarrow 4,5 \cdot 10^4 \text{ фотонов/см}^3 \quad (125 \text{ еВ/ph}) \rightarrow 5,6 \cdot 10^6 \text{ еВ} = 9 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/г} = 9 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/кг} = 9 \cdot 10^{-10} \text{ Gy}$$

за импульс . Из ограничения среднего тока в 20 мкА, максимально допустимая частота ~ 20

$$10^3 \text{ Гц} \rightarrow 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Гр/с} = 64 \text{ мГр/ч}$$

■ Какую максимальную дозу можем измерить в импульсном режиме ($M = 1$)?

- $I_{\text{mean phC}} < 10 \cdot 10^{-9} \text{ А} \rightarrow 6,3 \cdot 10^{10} \text{ e/c} \quad \text{QE}=0,2 \rightarrow 31,5 \cdot 10^{10} \text{ ph на ФК} \quad \text{светосбор} = 1/3 \rightarrow \mathbf{94,5 \cdot 10^{10} \text{ фотонов/см}^3}$

$$(125 \text{ еВ/ph}) \rightarrow 1180 \cdot 10^{11} \text{ еВ} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/г} = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 19 \text{ мГр/с} = 64 \text{ Гр/ч}$$

Оценки для ВС408(1 см³)+ФЭУ (ограничения сцинтиллятора)



- $\alpha/\beta = 0.1$
- Радстойкость - 100 кГр приводит к потере в световыходе на 30 %. Радстойкость зависит от мощности дозы.
- $n_{\text{атом}} = 10^{23}$ атомов/г , $n_{\text{смest}} \sim 10^{20}$ мол/г
в предыдущем примере получили **$94.5 \cdot 10^{10}$ фотонов/см³** ~
19 mGy

ТЛД



- Не обнаружена зависимость световыхода от мощности дозы
- Для $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ методами электронного парамагнитного резонанса можно контролировать радиационную деградацию материала

	Z	D_{\min}	D_{\min_posib}	D_{\max}
LiF:Ti,Mg	8.2	10 мкЗв	1 мкЗв	1 Гр
LiF:Cu,P	8.2	1 мкЗв	100 нЗв	20 Гр
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	7.4	1 мЗв	-	$10^3 - 10^4$ Гр

Выводы

- ИК
 - Прямое преобразование энергии в измеряемый сигнал.
 - Жесткие требования к электронной части.
 - Большой объём ($V > 1$ л).
 - Простой интерфейс пользователя.

- Сцинтилляционный детектор.
 - Преобразование энергии в измеряемый сигнал многоступенчатое, что требует учет характеристик на каждом шаге.
 - Удобный объём ($V < 1$ л).
 - Сложный интерфейс пользователя либо много детекторная / интеллектуальная система

- ТЛД детектор
 - Прямое преобразование энергии в измеряемый сигнал.
 - Отдельный считыватель.
 - Малый объём ($V \sim 1$ см³).
 - Простой интерфейс пользователя.