

Лекция 3. Газоразрядные детекторы

- Ионизация, дрейф и диффузия зарядов, газовое усиление, прилипание и рекомбинация электронов,
- Формирование сигнала в плоской и цилиндрической геометрии
- Многопроволочная пропорциональная камера: характеристики, методы съема информации, ограничения и недостатки
- Микроструктурные газоразрядные детекторы
- Проблема старения детекторов

Предлагаемые темы докладов по Лекции:

- 1) Вторичные процессы в газах – краткий обзор
 - упр/неупр. столкновения
 - образование/гибель заряженных частиц
 Лит-ра: Райзер Ю.П., Физика газового разряда. Учебное руководство. М. Наука. 1987г. 592с
- 2) Микроструктурные газовые детекторы (например GEM) – краткий обзор и применение в экспериментах (COMPASS, LHCb, TOTEM, PHENIX): фотоны, нейтроны, быстрые частицы

Лит-ра: интернет (литература в основном на англ. языке)
- 3) Механизмы старения газоразрядных детекторов

Лит-ра: подборка по email + интернет (литература на англ. языке)

Образование первичных электрон/ионных пар описывается распределением Пуассона

- Вероятность образования m э/и пар

$$P(m) = \frac{\bar{n}^m e^{-\bar{n}}}{m!} \quad \bar{n} = \frac{L}{\lambda} = LN\sigma_i \quad \text{Среднее число э/и пар}$$

L – Толщина слоя газа

$\lambda = 1 / (\sigma_i N)$ – Длина свободного пробега

σ_i – Сечение ионизации

N – Концентрация электронов

- Эффективность идеального детектора (без учета потерь зарядов)

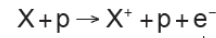
$$\epsilon_{\text{det}} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\bar{n}}$$

Для $\epsilon_{\text{det}}=99\%$ необходимо

- для He $L=9.2\text{мм}$
- для Ne $L=3.8\text{мм}$
- для Ar $L=1.8\text{мм}$

Ионизация в газе

- Первичная ионизация (primary)

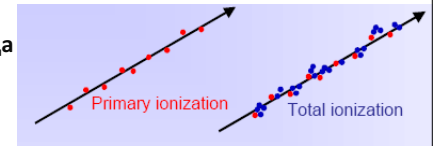
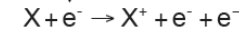


p – заряженная частица

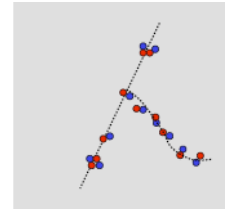
X – атом среды (газа)

e^- – дельта-электрон

- Вторичная ионизация (кластеры и δ -электроны)



Прямое выбивание электронов из атома - δ -электроны (~ 1 кэВ), которые дают «свой» трек, направленный в сторону от трека частицы



$$n_{\text{total}} = \frac{\Delta E}{W_i} = \frac{dE}{dx} \frac{L}{W_i}$$

$$\frac{n_{\text{total}}}{n_{\text{primary}}} \approx 2 \dots 6$$

ΔE – Потери энергии частицы

W_i – Энергия образования эл\ион пары

n_{primary} – Число пар первичной ионизации

n_{total} – Полное число пар

L – Длина пробега частицы

Обычно:

$W_i \sim 30-40$ эВ

Характеристики часто применяемых газов

Gas	Density (mg cm ⁻³)	E_i (eV)	E_f (eV)	W_i (eV)	$dE/dx _{\text{min}}$ (keV cm ⁻¹)	N_p (cm ⁻¹)	N_T (cm ⁻¹)
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH ₄	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C ₂ H ₆	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC ₄ H ₁₀	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO ₂	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF ₄	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

Пример 1) газовая смесь Ar/CO₂ (70:30) при н.у. (толщина 1 см, минимально ионизирующие частицы)

$$N_p = 25 \cdot 0.7 + 35 \cdot 0.3 = 28 \text{ пар/см} \quad N_T = \frac{2530}{26} \cdot 0.7 + \frac{3350}{35} \cdot 0.3 \approx 97 \text{ пар/см}$$

Пример 2) $\Delta E=3$ кэВ, $W_i \sim 30$ эВ, тогда $N_{\text{total}} \sim 100$ эл/ионных пар

↑
Диапазон энергий СИ

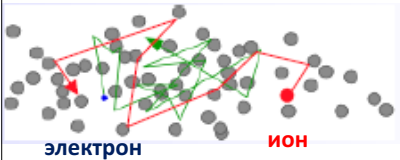
100 е трудно регистрировать, т.к. обычно уровень шума усилителей ~ 1000 е, поэтому применяют газовое усиление (см. далее)

Процессы в газовых детекторах, влияющие на характеристики детектора

- **Диффузия и подвижность электронов/ионов** – влияние на пространственное разрешение и временные характеристики детектора
- **Рекомбинация и прилипание электронов**
-Примеси электроотрицательных газы (O, F, Cl) влияют на эффективность детектора, энергетическое разрешение
- **Газовое усиление и первичная ионизация** – обуславливают амплитуду сигнала, режим работы детектора

Дрейф и диффузия электронов/ионов

Внешнее электрическое поле отсутствует



$E=0$ Без электрического поля заряды ионизации
 $\langle v \rangle = 0$ (ионы/электроны) теряют свою энергию при соударениях с атомами /молекулами газа – «термализуются»

Распределение по энергиям описывается уравнением Максвелла-Больцмана:

$$F(\varepsilon) = \text{const} \sqrt{\varepsilon} \exp(-\varepsilon / kT)$$

Средняя тепловая энергия молекул:

$$\varepsilon_T = \frac{3}{2} kT \approx 0.04 \text{ eV}$$

Уравнение диффузии (по оси x) – распределение плотности заряда:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp(-x^2 / 4Dt) dt$$

Линейная диффузия

$$\sigma_x = \sqrt{2Dt}$$

$$D \ll v_i * \lambda > / 3$$

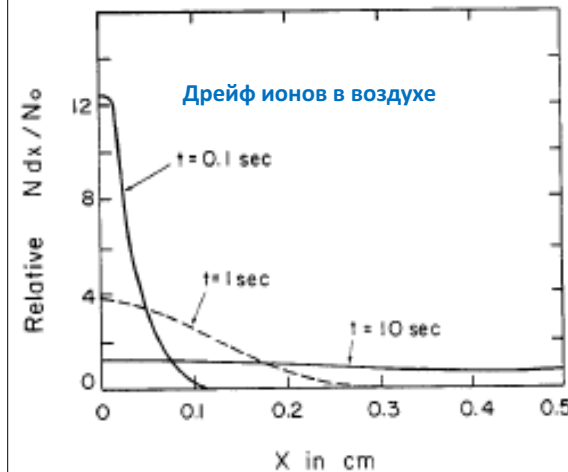
D – коэффициент диффузии

$$v_i = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

λ – длина своб. пробега
 v_t – средняя тепловая скорость

газ	Массовое число	V_i , см/с
H ₂	2,02	1,8 10 ⁵
He	4,00	1,3 10 ⁵
Ar	39,95	0,41 10 ⁵
O ₂	32,00	0,46 10 ⁵
H ₂ O	18,02	0,61 10 ⁵

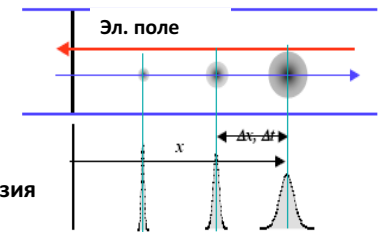
Заряд, который в момент времени t=0 локализован в точке, размывается из-за многократного рассеяния. Распределение становится не точечным а Гауссовым с временной зависимостью



$$v_d = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Скорость дрейфа

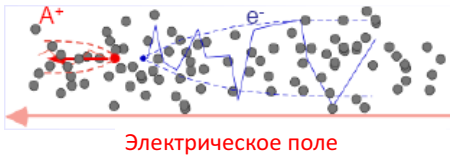
Дрейф облака зарядов



диффузия

Диффузия и дрейф электронов/ионов в эл. поле

$$E > 0, \langle v \rangle = v_D$$



В электрическом поле электроны/ионы приобретают дополнительную к тепловой скорости v_D и движутся по силовым линиям поля

• Скорость дрейфа

$$\vec{v}_{D\pm} = \mu_{\pm} \vec{E}$$

μ – подвижность ионов(+), электронов(-)

• Подвижность

$$\mu = \frac{e\tau}{m}$$

$\tau \sim \lambda/v_t$ – время м/у соударениями

• Длина свободного пробега

$$\lambda(\epsilon) = \frac{1}{N\sigma(\epsilon)}$$

N – концентрация молекул
 σ – сечение столкновения

$$\lambda_e \sim 5-10 \lambda_{ion}$$

Диффузия ионов

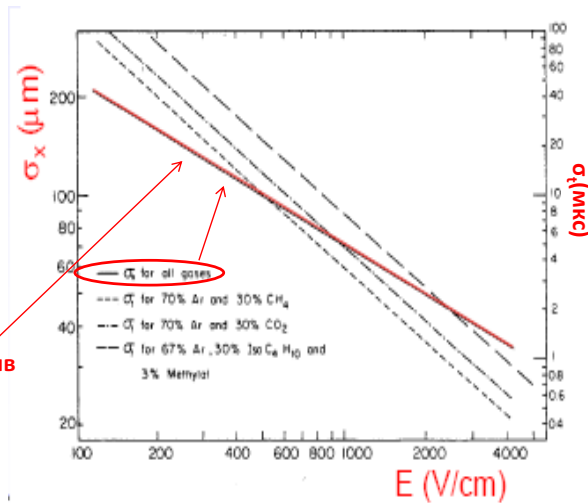
• Диффузия ионов

$$\sigma_x^+ = \sqrt{\frac{2kT P v_+ t}{eE}} = \sqrt{\frac{2kT P x}{eE}}$$

• Уравнение Эйнштейна для связи D и μ

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} = 0.026 \text{ eV}$$

Тепловой предел – справедлив для всех газов



- В газовых смесях эффективно «работает» механизм передачи заряда между молекулами.
- Очень быстро остаются только ионы с минимальным потенциалом ионизации – они и определяют итоговую диффузию

Скорость дрейфа ионов

Ионы: скорость дрейфа почти линейная зависимость от E : $v_{D+} \sim E/P$, P – давление газа, подвижность в широком диапазоне $E/P = \text{const}$. $v_+ \ll v_t$

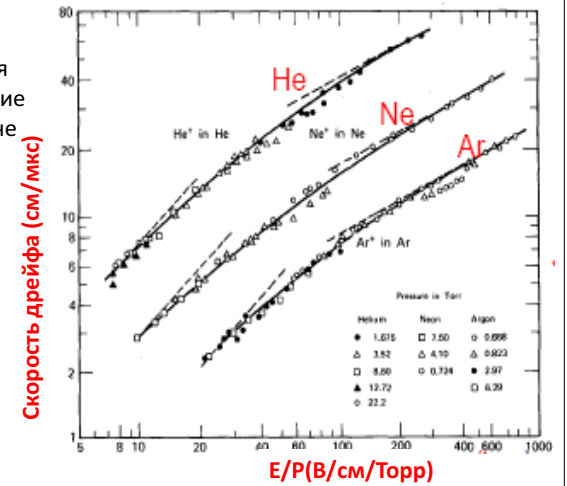
Средняя скорость ионов при дрейфе практически не меняется

• Подвижность ионов

$$\mu_+ = v_+ \left(\frac{E}{P} \right)^{-1}$$

GAS	ION	$\mu^+ (\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1})$
He	He ⁺	10.2
Ar	Ar ⁺	1.7
CH ₄	CH ₄ ⁺	2.26
CO ₂	CO ₂ ⁺	1.09

$$\mu(P, T) = \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P} \mu(P_0, T_0)$$



• 3-н Бланка для газовых смесей

$$\frac{1}{\mu(I^+, M_1 M_2 \dots M_i)} = \sum_j \frac{P(M_j)}{\mu(I^+, M_j)}$$

$\mu(I^+, M_j)$: Подвижность ионов I⁺ в газе M_j

Электронны:

- масса электронов в $\sim 10^3$ раз меньше
- Подвижность электронов в газах в 100-1000 раз выше чем у ионов
- скорость дрейфа $v_e \sim v_t$
- Более сложная зависимость диффузии от E , скорости дрейфа, наличия примесей

Электронны ускоряются полем, но теряют при соударениях часть энергии (вязкость среды) => Устанавливается средняя равновесная скорость дрейфа

• Скорость дрейфа электрона в эл. поле – средняя скорость м/у столкновениями

$$v_D = \mu E = \frac{eE}{2m} \tau$$

τ – время м/у столкновениями

$$\tau = \frac{1}{Nv\sigma(\epsilon)}$$

• Распределение электронов по энергиям

$$F(\epsilon) = C \sqrt{\epsilon} \exp \left(- \int \frac{3\Lambda(\epsilon) \epsilon d\epsilon}{[eE\lambda(\epsilon)]^2 + 3\epsilon kT \Lambda(\epsilon)} \right)$$

$\Lambda(\epsilon)$ – часть энергии, потерянная при соударении

• Скорость дрейфа электронов

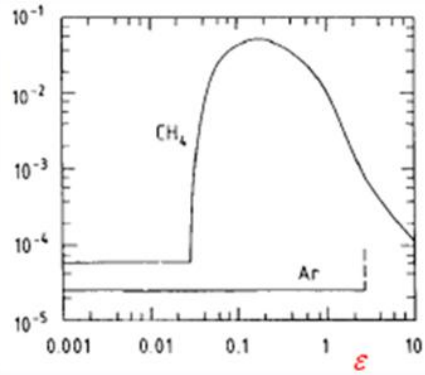
$$v(\epsilon) = - \frac{2}{3} \frac{eE}{m} \int \epsilon \lambda(\epsilon) \frac{\partial [F(\epsilon) u^{-1}]}{\partial \epsilon} d\epsilon$$

$$u = \sqrt{2\epsilon/m}$$

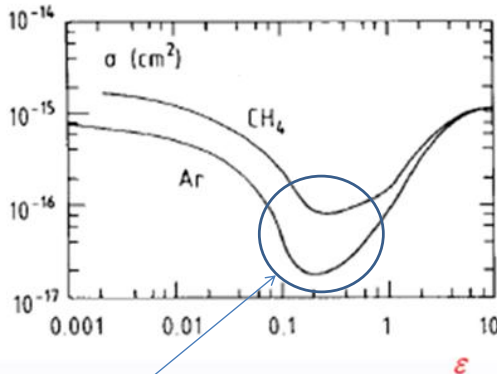
• Диффузия электронов

$$D(\epsilon) = \frac{1}{3} \int u \lambda(\epsilon) F(\epsilon) d\epsilon$$

Часть потерянной энергии электроном при соударении от его энергии (в метане)



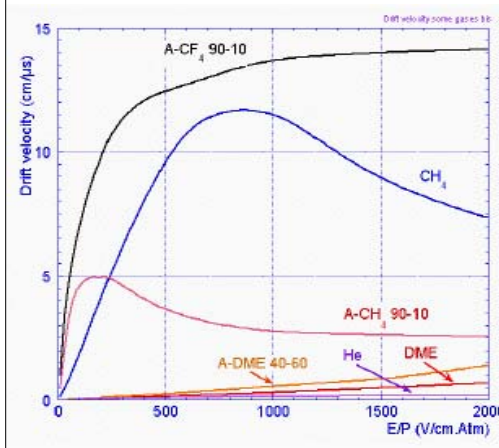
Сечение столкновения электрона в Ar и CH₄ от кинетической энергии электрона



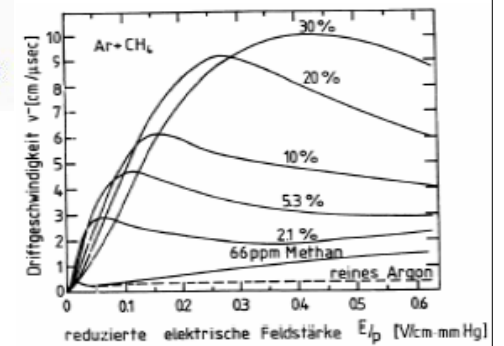
Эффект Рамзауэра – интерференционный кв-мех эффект:

- длина волны при $\epsilon \sim 1$ эВ соответствует двум диаметрам электронной орбиты в атоме.
- Атомы становятся практически «прозрачными» для электронов

Скорости дрейфа электронов для различных газов

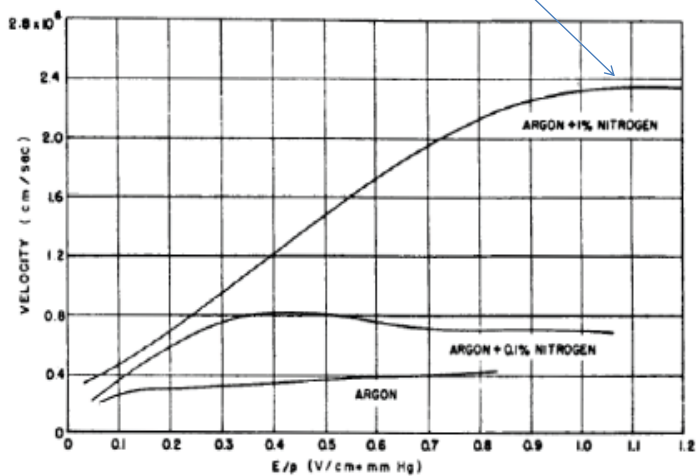


Малые количества примесей существенно меняют транспортные свойства электронов



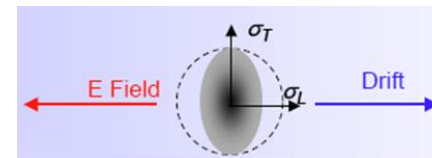
Скорость дрейфа v_D может быть постоянной.

Применение в детекторах, где пространственное разрешение определяется по времени дрейфа (*дрейфовые камеры*)



E-Field/pressure

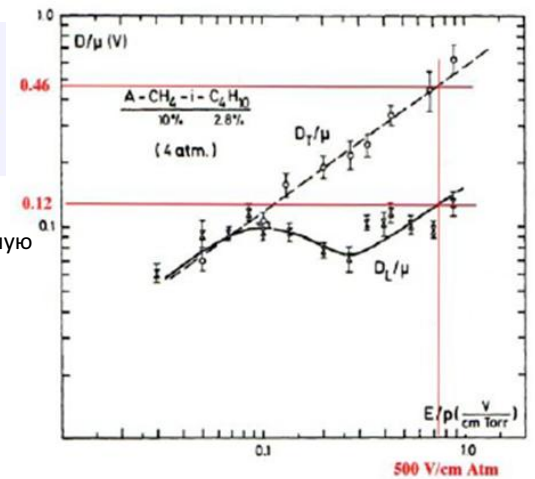
Анизотропия диффузии электронов в электрическом поле



• Над электроном, имеющим диффузионную составляющую скорости параллельную полю, совершается доп. работа.

• Меняется скорость дрейфа, появляется дополнительная скорость, пропорциональная градиенту плотности электронов.

$D_T = D_0$ - Поперечная диффузия
 $D_L < D_0$ - Продольная диффузия



$$\frac{D_T}{D_L} = 4 \quad @ 500 \text{ V/cm}$$

$$\sigma_L = \frac{1}{2} \sigma_T \quad \sigma_T = \sigma_0$$

Дрейф электронов в магнитном поле

Сила Лоренца меняет траектории электронов между соударениями, а также распределение их по энергиям.

1)

$$\vec{E} \neq \vec{B} \quad \vec{w} = \frac{e}{m} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \left[\vec{E} + \omega \tau \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B} + \omega^2 \tau^2 \frac{\vec{B}(\vec{E} \cdot \vec{B})}{B^2} \right]$$

$$\omega = eB/m \quad \text{Частота Лармюра (циклотронная)}$$

θ - Угол Лоренца

2)

$$\vec{E} \perp \vec{B} \quad \tan \theta_B = \omega \tau$$

$$w_B = \frac{E}{B} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

Скорость дрейфа уменьшается

Аргон(67.2%) Isobutan(30.3%) Methylal (2.5%)
E = 0.5 KV/cm
Напряжённость магнитного поля B, Т

3)

$$w_B = w_0$$

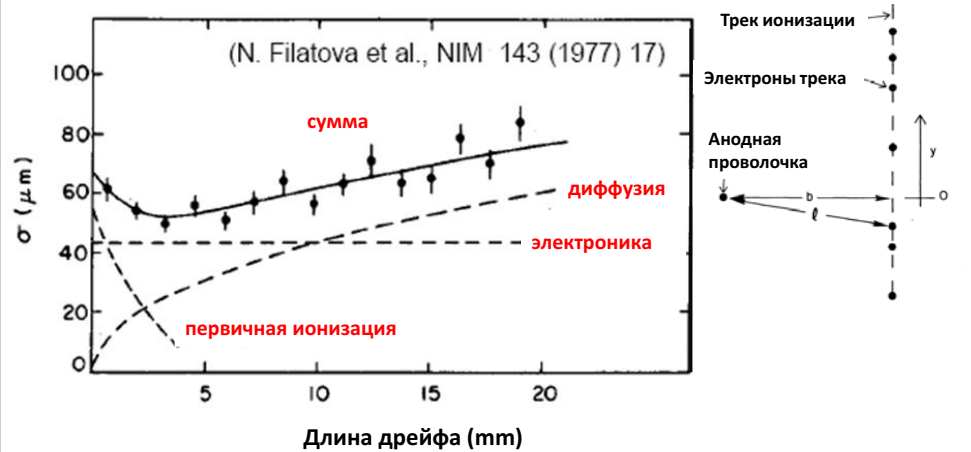
$$\sigma_L = \sigma_0$$

$$\sigma_T(B) = \frac{\sigma_T(0)}{\sqrt{1 + \omega_c^2 \tau^2}}, \quad (D_T(B) = \frac{D_T(0)}{1 + \omega_c^2 \tau^2})$$

- Скорость дрейфа не меняется
- Продольная дифф. не меняется
- Поперечная диффузия уменьшается

Аргон-метановая смесь
Дрейф электронов (1см) B=0, 2.5, 5 Тл

Диффузия/дрейф и пространственное разрешение детектора



Результирующее пространственное разрешение

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_{\text{Diff}}^2 + \sigma_{\text{El}}^2}$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{5}{16}} \cdot \frac{1}{N_c} \cdot \frac{1}{x}, \quad \text{где } x \gg \frac{1}{N_c}, \quad N_c - \text{число кластеров ионизации на ед. длины}$$

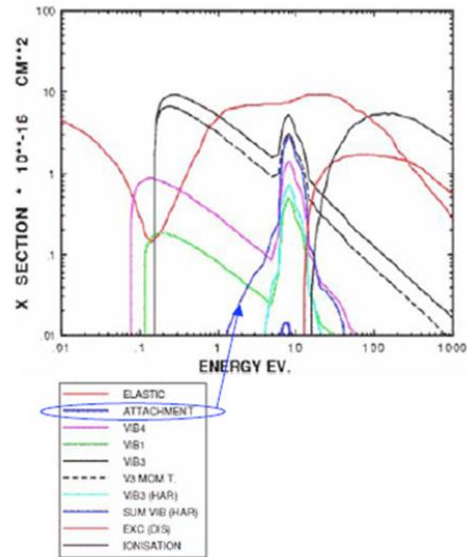
$$\sigma_s = \sigma_1 / \sqrt{n}, \quad \text{где } n \sim 3 \div 5 - \text{число первичных электронов для запуска ПУ}$$

$$\sigma_{\text{El}} = \sigma \cdot v_D, \quad \text{где } \sigma \leq 40 \mu\text{m} - \text{временное разрешение эл-ки}$$

Основные неупругие процессы в газах:

- | | | |
|--|----------------------|-----------------------------------|
| • Возбуждение электронным ударом | A+e | A*+e |
| • Ионизация электронным ударом | A+e | A ⁺ +e+e |
| • Снятие возбуждения через столкновение с эл. | A*+e | A+e |
| • Фото-возбуждение | A+hv | A* |
| • Снятие возб. через фото-эмиссию | A* | A+hv |
| • Фото-ионизация | A+hv | A ⁺ +e |
| • Рекомбинация с излучением | A ⁺ +e | A+hv |
| • Трех-частичная рекомбинация | A ⁺ +B+e | A+B |
| • Снятие возбуждения через соударения с ионами | A*+B | A+B* |
| • Пеннинг-эффект | A*+B | A+B ⁺ +e |
| • Обмен зарядом | A ⁺ +B | A+B ⁺ |
| • Ионизация ионным ударом | A ⁺ +B | A ⁺ +B ⁺ +e |
| • Возбуждение при соударении с атомами | A+B | A+B* |
| • Ионизация при соударении с атомами | A+B | A ⁺ +B+e |
| • Образование отриц. иона | A+e | A ⁻ |
| • Испускание электрона отриц. ионом | A ⁻ | A+e |
| • Образование эксимеров | A*+A+A | A ₂ *+A |
| • Диссоциация эксимеров с излучением | A ₂ * | A+A+hv |
| • Образование молекулярного иона | A ₂ *+2A | A ₂ *+A |
| • Диссоциация | (XY)* | X+Y* |
| • Рекомбинационная диссоциация | (XY) ⁺ +e | X+Y* |

Сечения различных процессов для электронов в газе CF4 (Magboltz)



<http://consult.cern.ch/writeup/magboltz/cross/>

Рекомбинация и прилипание электронов

Рекомбинация ионов и электронов в плазме - элементарный акт присоединения электрона к иону, приводящий к снижению заряда иона на единицу.

- **Электроны и положительные ионы могут рекомбинировать в плазме**
- **В зависимости от конкретных параметров плазмы преобладает тот или иной тип р.:**
- **Фоторекомбинация:** заметная роль в плазме малой плотности при не слишком низких темп-рах, когда несущественна трёхчастичная р., а с другой - отсутствуют молекулярные ионы, эффективно нейтрализующиеся в результате диссоциативной Р.

$$X^{Z+} + e \rightarrow X^{(Z-1)+} + h\nu$$

Баланс энергии и заряд. частиц плазмы диффузных и планетарных туманностей, а также короны Солнца и звёзд, остатков сверхновых и звёздного ветра.

- **Диэлектронная рекомбинация** протекает в более плотной плазме через образование автоионизационного состояния иона или атома: $e + X^{Z+} \rightarrow (X^{(Z-1)+})^*$ со стабилизацией через **соударения с электронами плазмы** $(X^{(Z-1)+})^* + e \rightarrow X^{(Z-1)+} + e$, либо через **спонтанное высвечивание** $(X^{(Z-1)+})^* \rightarrow X^{(Z-1)+} + h\nu$

Термоядерная плазма, активная среда рентг. лазеров, плазма планетарных туманностей, звёздных и галактич. корон и др.

- **При диссоциативной р.** распадается молекулярный ион. Этот процесс определяет объёмную нейтрализацию заряженных частиц в низкотемпературной плазме молекулярных газов, а также в плазме атомарных газов достаточно высокого давления (> 10 тор) при невысоких температурах тяж. частиц до 1000К.

$$e + (XY)^+ \rightarrow X^* + Y \quad XY - \text{молекулярный ион}$$

Ионосфера Земли, газоразрядная плазма, активные среды газовых лазеров.

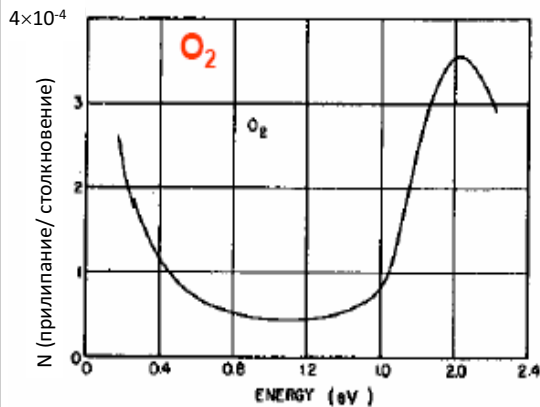
- **Тройная электрон-ионная р.** избыточная энергия уносится электроном плазмы. Именно таким процессом объясняется нейтрализация заряд. частиц в плазме атомарного газа с электронной темп-рой, много меньшей потенциала ионизации атомов, с достаточно высокой плотностью электронов ($>10^{13} \text{ см}^{-3}$), при преобладании атомарных ионов (давление газа < 10 тор)

$$X^+ + 2e \rightarrow X + e$$

Плазма дугового разряда, пучковая плазма высокого давления и фоторезонансная плазма.

• Прилипание электронов (~eV) происходит при их взаимодействии с электроотрицательными газами: O₂, H₂O, CO₂, CF₄, CCl₄, SF₆.

• Сечение взаимодействия существенно зависит от энергии электронов (напряженности поля).



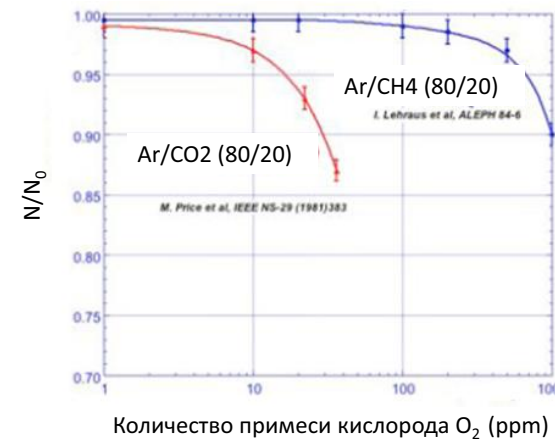
Добавка 0.1% CO₂ к смеси Ar/CO₂ (в полях < 1 кВ/см) увеличивает вероятность захвата электронов в 20 раз по сравнению к такой же добавкой к смеси Ar/CH₄

• Потеря электронов - уменьшение амплитуды сигнала, ухудшение амплитудного разрешения

• Из-за сильно прилипания электронов в кислороде используют системы очистки газовой смеси от этой примеси

Электроотрицательные газы: примеры

«Выживание» электронов после 20 см пути дрейфа в детекторе
Напряженность поля E=200 В/см



Ионизация и сечение ионизации

Ионизация :

- Электронным ударом
- Фотоионизация
- Электрическим полем
- и др.

Ионизация эл. ударом - важнейший механизм в газах и плазме.

Характеризуется **сечением ионизации** σ_i [см²]:

- зависит от сорта сталкивающихся частиц
- их квантовых состояний
- скорости движения

Кинетика ионизации описывается понятием **скорости ионизации** $\langle v\sigma_i(v) \rangle$. Характеризует число актов ионизаций, которое производит одна ионизирующая частица в 1 с:

$$\langle v\sigma_i(v) \rangle = \int vF(v)\sigma_i(v)dv$$

v - скорость относит. движения электронов
 $F(v)$ - ф-ция распределения по скоростям ионизирующих частиц.

Вероятность ионизации w_i данного атома (молекулы) в единицу времени при плотности n числа ионизирующих частиц

$$w_i = n \langle v\sigma_i(v) \rangle$$

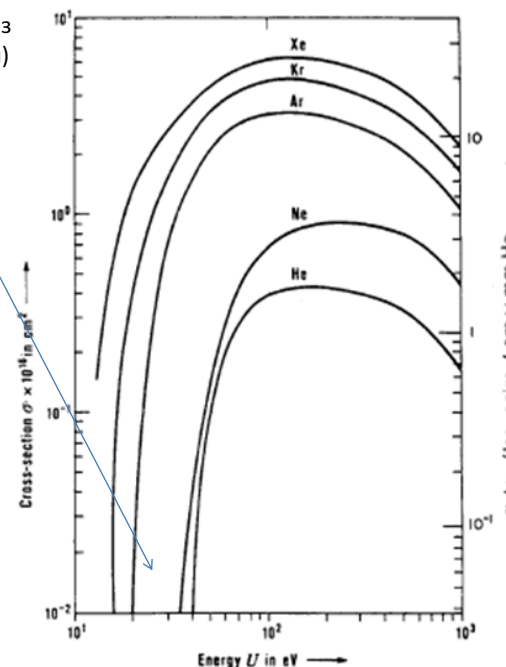
• Доминирующий процесс - **одноэлектронная ионизация** - удаление из атома одного электрона (обычно внешний)

• Минимальное значение энергии электрона для ионизации - **порогом ионизации E_i**

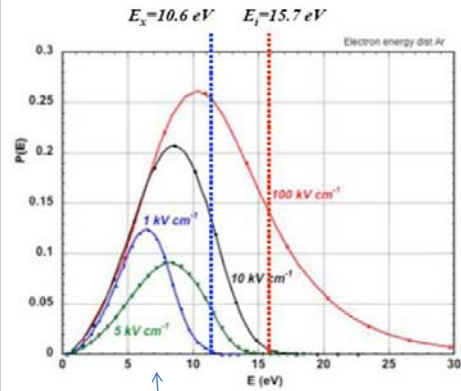
Сечение и. атомов, молекул и ионов электронным ударом

- нуль в пороге
- возрастает ($\sim E$) с ростом энергии
- достигает максимума при $E=(2\div 5) E_i$
- убывает с дальнейшим ростом энергии

Положение и величина макс, сечения зависят от рода атома.

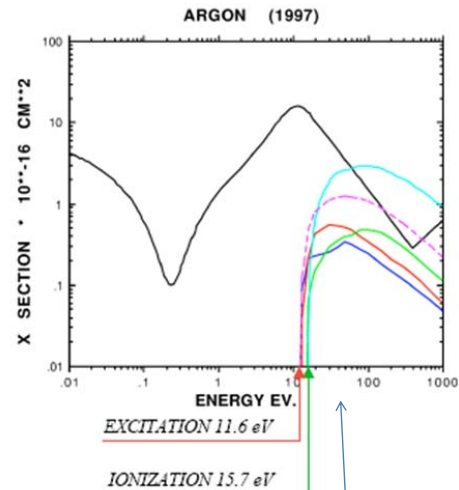


Распределение электронов по энергиям в аргоне



- С ростом эл. поля число высокоэнергетичных электронов растет
- Увеличивается вероятность (сечение) неупругих процессов

Сечения различных процессов в аргоне (Magboltz)

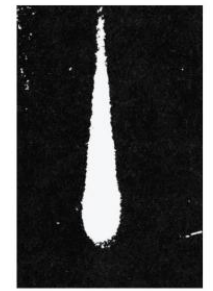
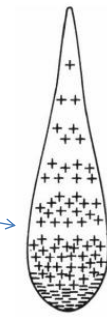


Газовое усиление

Изображение лавины в пузырьковой камере

Процесс газового усиления:

- В полях высокой напряженности первичные электроны могут приобрести энергию достаточную для ионизации атомов газа.
- Вторичные электроны также могут вызвать ионизацию и т.д.
- Развивается **электронная лавина** – многоступенный процесс



- **Длина свободного пробега электронов** (до вторичной ионизации)

$$\lambda_{ion} = 1/n_m \sigma_{ion}$$

- **Вероятность ионизации на единицу длины пробега:** $\alpha = 1/\lambda_{ion}$ – первый коэффициент Таунсенда

- **Коэффициент газового усиления (КГУ):** $G = n/n_0 = \exp(\alpha x)$

В общем случае: $\alpha = \alpha(x)$

$$G = \frac{n}{n_0} = \exp\left(\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx\right)$$

Из-за большей подвижности электронов лавина имеет форму капли, с высокой концентрацией электронов в «голове»

$$dn = n(x)\alpha dx$$

$$n = n_0 \exp(\alpha x)$$

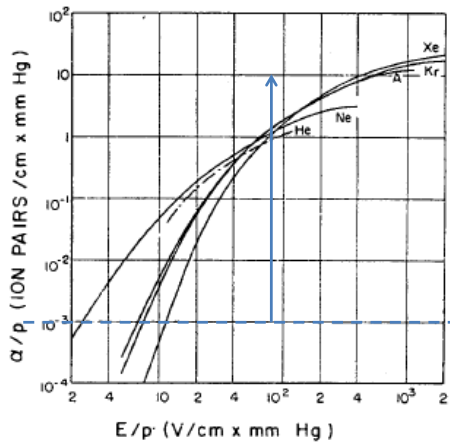
$n(x)$ – число электронов в точке x

- **Предел Ретера (ограничение экспоненциального роста усиления из-за эффекта объемного заряда):** $\alpha \lambda_{ion} < 20, G < 10^8$

Коэффициент Таунсенда для различных газов

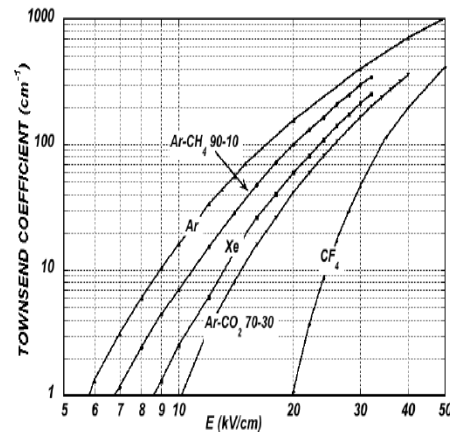
Начало усиления при $\alpha > 1$

Благородные газы



Атмосферное давление
P=760 mm Hg (Торр)

Благородные газы смеси, электроотриц. газы

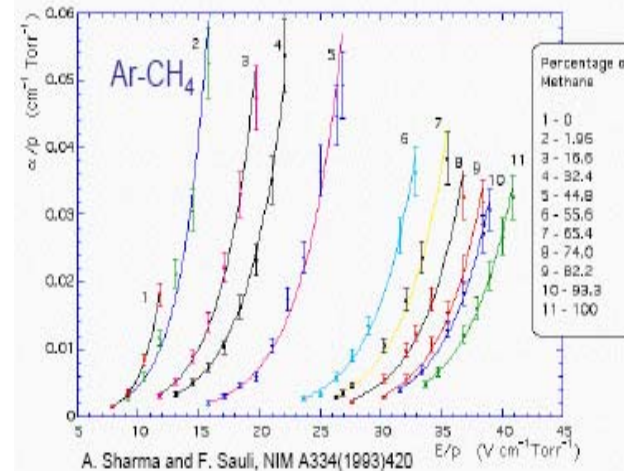


Образование вторичных электронов начинается в электрических полях $> E \sim 1-10$ кВ/см

- Коэффициент Таунсенда определяется сложными процессами передачи энергии между молекулами газа

- зависит от **состава смеси** через сечение ионизации компонент, условий среды: **давления и температуры.**

- Нет аналитического выражения для $\alpha(E)$ – но его можно измерить!



- **Большой процент газящей добавки в детекторе – более высокое напряжение**

Поправка к первому коэффициенту Таунсенда - коэффициент прилипания

Развитие электронной лавины сдерживается:

1. Из-за потери энергии электронами

Потери энергии замедляют приобретение в поле энергии, достаточной для ионизации

Электрон теряют энергию

- на возбуждение электронных состояний атомов и молекул
- на возбуждение молекулярных колебаний и вращений
- при упругих столкновениях

2. Из-за поглощения самих электронов

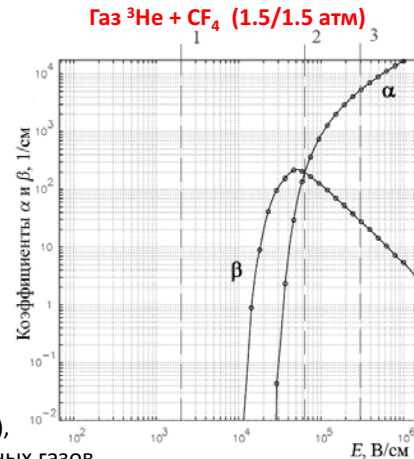
Потери электронов приводят к обрыву цепей в реакции образования лавинной цепи

Потери электронов вызваны:

- Диффузионным уходом электронов из области действия поля (в частности, на стенки),
- прилипания к молекулам электроотрицательных газов.

$$\alpha^* = \alpha - \beta,$$

где β – коэффициент прилипания



$$G = \frac{n}{n_0} = \exp \left(\int_{x_1}^{x_2} \{a(x) - \beta(x)\} dx \right)$$

Выбор газовой смеси

Основные критерии:

- обеспечение раб. характеристик при низком напряжении (поле)
- высокий КГУ
- хорошая пропорциональность энергии
- высокая эффективность регистрации
- низкая диффузия электронов
- стоимость газа и др.

Наилучшее сочетание свойств детектора удается получить в газовых смесях, а не в чистых газах.

В инертных газах для формирования лавины требуются невысокие электрические поля.

Аргон: дешевый газ с достаточно высоким потенциалом ионизации. **No!**

- В чистом аргоне КГУ ограничен 10^3-10^4 : при снятия возбуждения атомы аргона дают фотоны с энергией (11.6 эВ), достаточной для выбивания вторичных электронов из катода.
- Вторичные электроны могут образовывать лавины на некотором расстоянии от места формирования первичной лавины.
- Лавина не локализована, при критич. напряжении может произойти пробой.

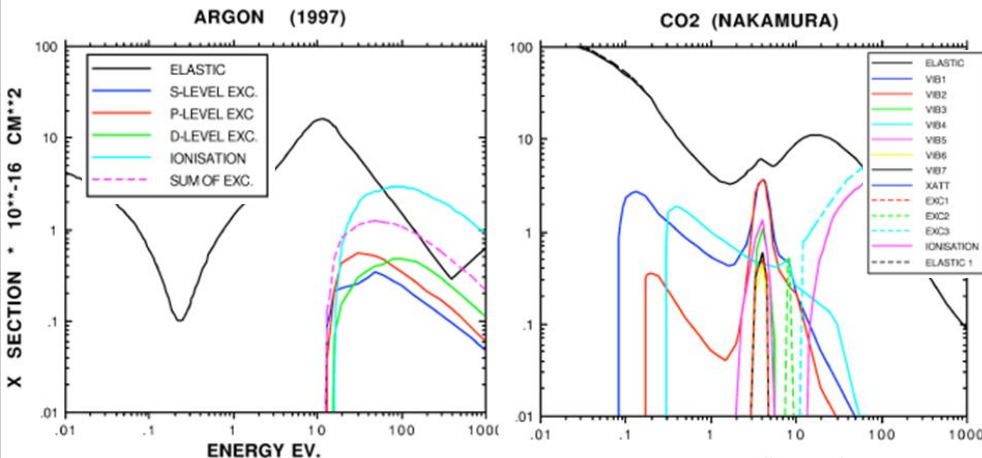
Поэтому используют добавку газа, которая поглощает вторичные фотоны

Многоатомные газы (CO_2 , CH_4 ...) поглощают энергию фотонов (диссоциация и упругие столкновения) и предотвращают образование вторичных лавин, что позволяет $\uparrow V$

Газовая смесь Ar/CO_2 : КГУ до $\sim 10^5$

Усиление первичной ионизации

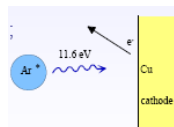
Гашение фотоэмиссии



В процессе лавинообразования молекулы газа переходят в возбужденные состояния

Снятие возбуждения в благородных газах приводит к излучению фотонов $E_\gamma = 11.6 \text{ eV (Ar)} \Rightarrow$ выше порога выбивания электронов из металлов $E_e = 7.7 \text{ eV (Cu)}$

\Rightarrow вторичная эмиссия электронов в детекторе может привести к пробое



Гаситель - многоатомный газ, с большим количеством колебательных и вращательных уровней CO_2 , CH_4 , $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$

Фотоны поглощаются в широком диапазоне энергий. Полученная энергия расходуется через столкновения с другими молекулами или диссоциацию.