

# ПРОГРАММА КУРСА «ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

## I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

- **Процессы в газоразрядной плазме**  
Возбуждение, диссоциация, ионизация, рекомбинация
- **Процессы на поверхности**  
Эмиссионные процессы. Термо- и автоэмиссия.  
Вторичная эмиссия.  
Адсорбция и десорбция. Внедрение и отражение. Распыление.  
Поверхностная ионизация.
- **Газовые разряды**  
Тлеющий разряд.  
Разряды в магнитном поле.  
Дуга с горячим катодом. Вакуумные дуги.  
Дуга высокого давления  
ВЧ и СВЧ разряды  
**Формирование пучков заряженных частиц**

## II. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- **Газоразрядные устройства**  
Плазменные реакторы.  
Электродуговые, ВЧ и СВЧ плазмотроны.  
Плазменные пушки и плазменные ускорители.  
Ионные источники
- **Вакуумно-плазменные технологии**  
Модификация поверхности.  
Низкоэнергетичная имплантация  
Нанесение покрытий и пленок.  
Планарные технологии микроэлектроники.
- **Высокотемпературные технологии**  
Обработка материалов. Электрометаллургия  
Плазмохимия.
- **Диагностика поверхности.**  
Электронная микроскопия. Растровый микроскоп. Оже-спектроскопия.  
Ионная микроскопия, ВИМС

# Что такое плазменные технологии

Techne — искусство, мастерство

Наука о способах воздействия  
на стальные, металлы, полуфабрикаты  
соответствующими орудиями производства (плазмой)

1781 - 84 гг. Кавендиш, Пристли —  
опыты по получению окислов азота  
в искровом разряде

1852 — Grove — катодное расщепление в тлеющ. разряде

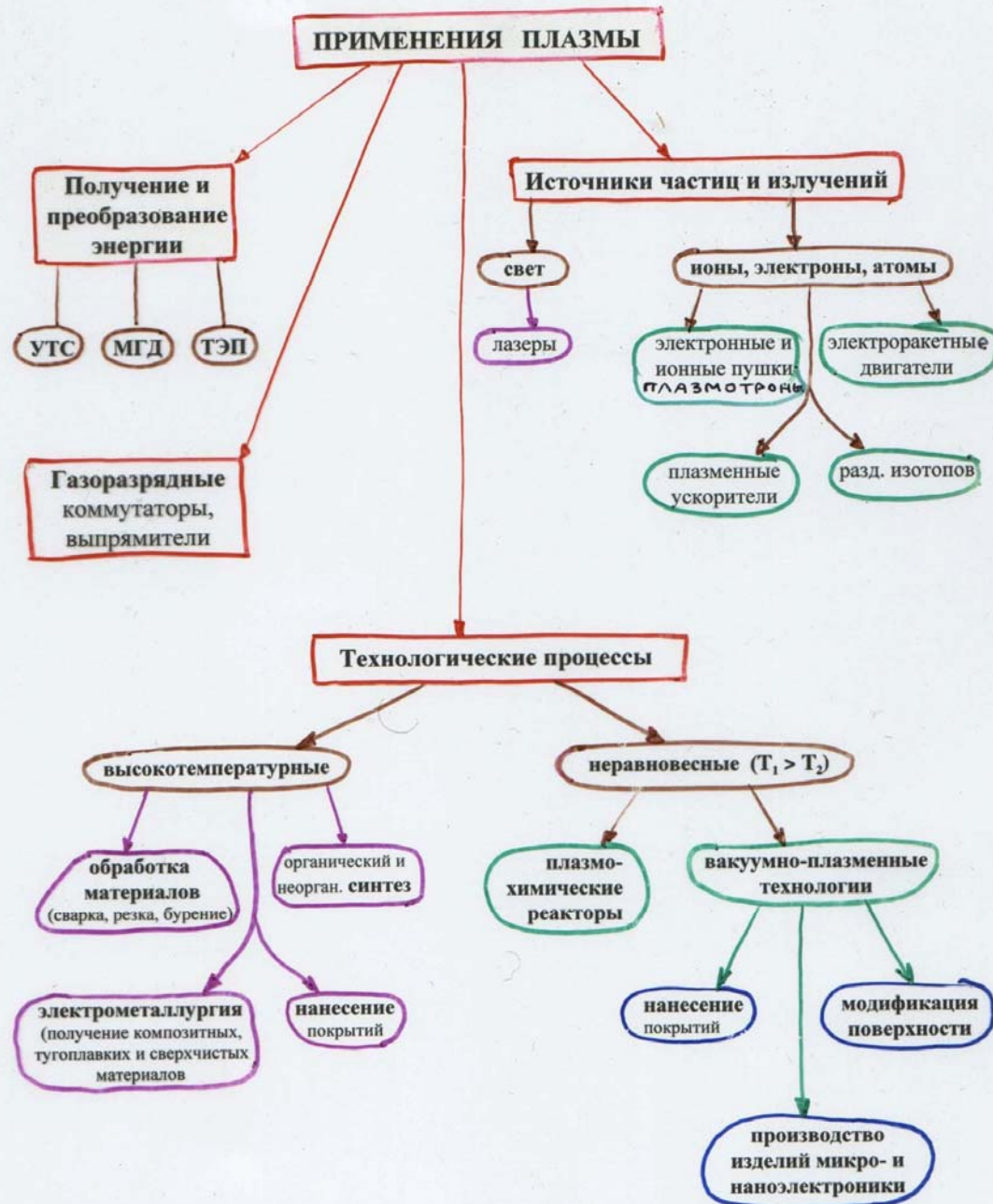
1803 — В. Петров — Дуга

Первые плазм. технологии

1875 - 1927 — Массовое производство зеркал  
катодным расщеплением

1885 — Бернадос (Россия) — патент на сварку  
(потом резка и оребрение)

# Применения плазмы



# Основные направления ПТ

## - Особо чистые слои и материалы

магнитные, оптические, эмиссионные  
сверхпроводящие плёнки  
материалы для микроэлектроники  
пленочные монокристаллы

## - Защита барьерными слоями (покрытиями) предохраняющими / обеспечивающими работу в агрессивных средах, при высоких температурах, при высоких нагрузках

## - Модификация поверхности

уплотнение поверхностного слоя  
ионное легирование

## - Композиционные материалы

многослойные структуры с улучшенными механич.,  
оптич. и др. свойствами

## - Микроэлектроника

Структуры с размерами  $< 0,18 \mu\text{м}$  ( $< 0,09$ )  
Толщины слоёв  $< 0,1 - 0,2 \mu\text{м}$  (2004)



# Преимущества ПТ

\* Высокая энергия, температура и химическая активность частиц

\* Высокая скорость процессов

(подвижность, электро- и теплопроводность, передача мощности)

\* Термодинамически - неравновесное воздействие

$T_e \gg T_i, T_a$ , холодные стенки ;

$T_{кол} \geq T_{вращ} > T_a$

\* Регулирование энергии, потоков и направления воздействия

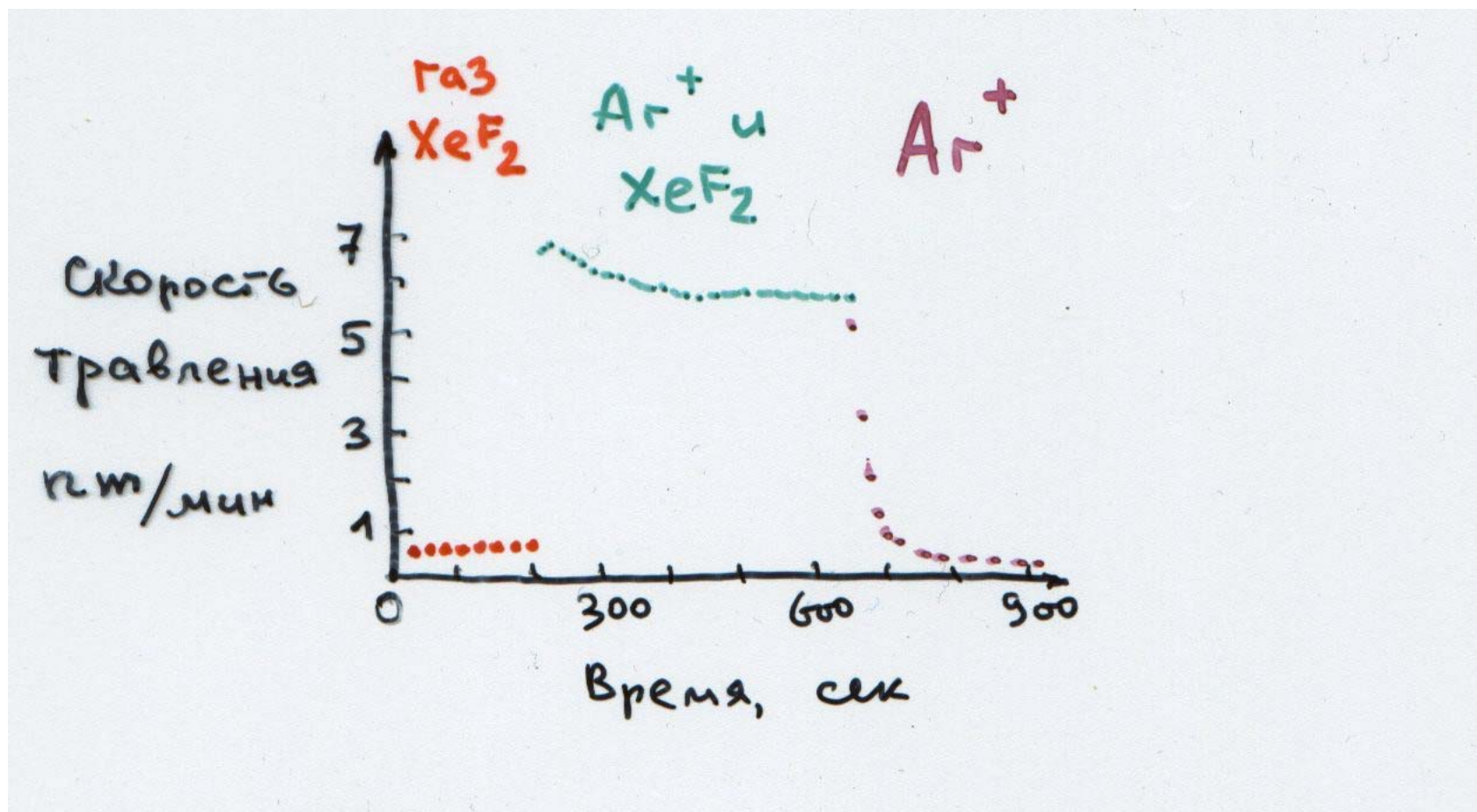
- ускорение в электромагнитных полях, концентрация мощности
- возможность автоматизации управления процессами
- *микрообработка*

\* Многокомпонентность (синергетика) воздействия

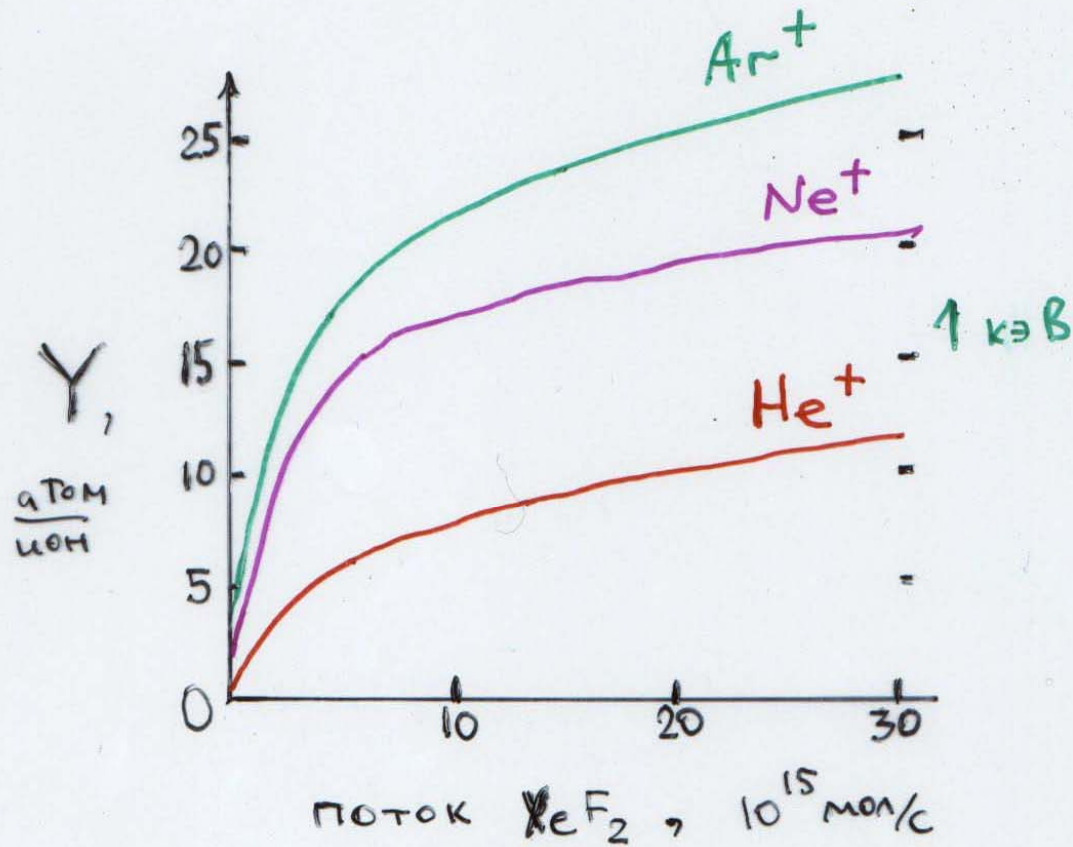
- электроны - *возбуждение, ионизация, диссоциация*
- атомы, молекулы, радикалы - *источник активного материала*
- быстрые ионы и атомы, радикалы - *распыление, имплантация*
- излучение - *перестройка и модификация материала*

# Каталитическое действие «плазмы» на скорость травления кремния

Coburn and Winters, 1979



# Ion-assisted etching



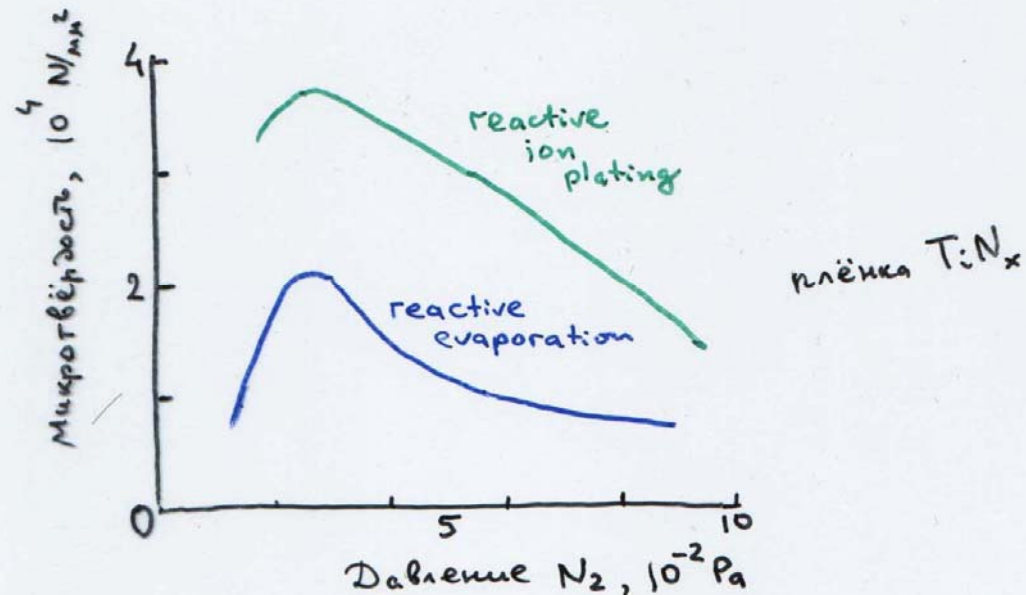
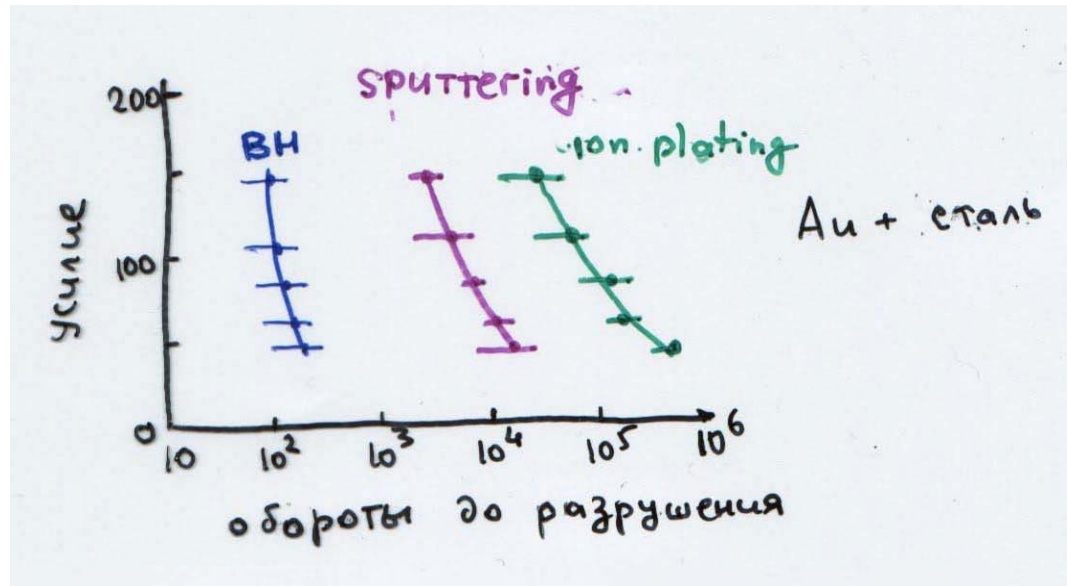
Коэффициент расширения кремния (Si)

Энергия ионов 1 кэВ, поток  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$



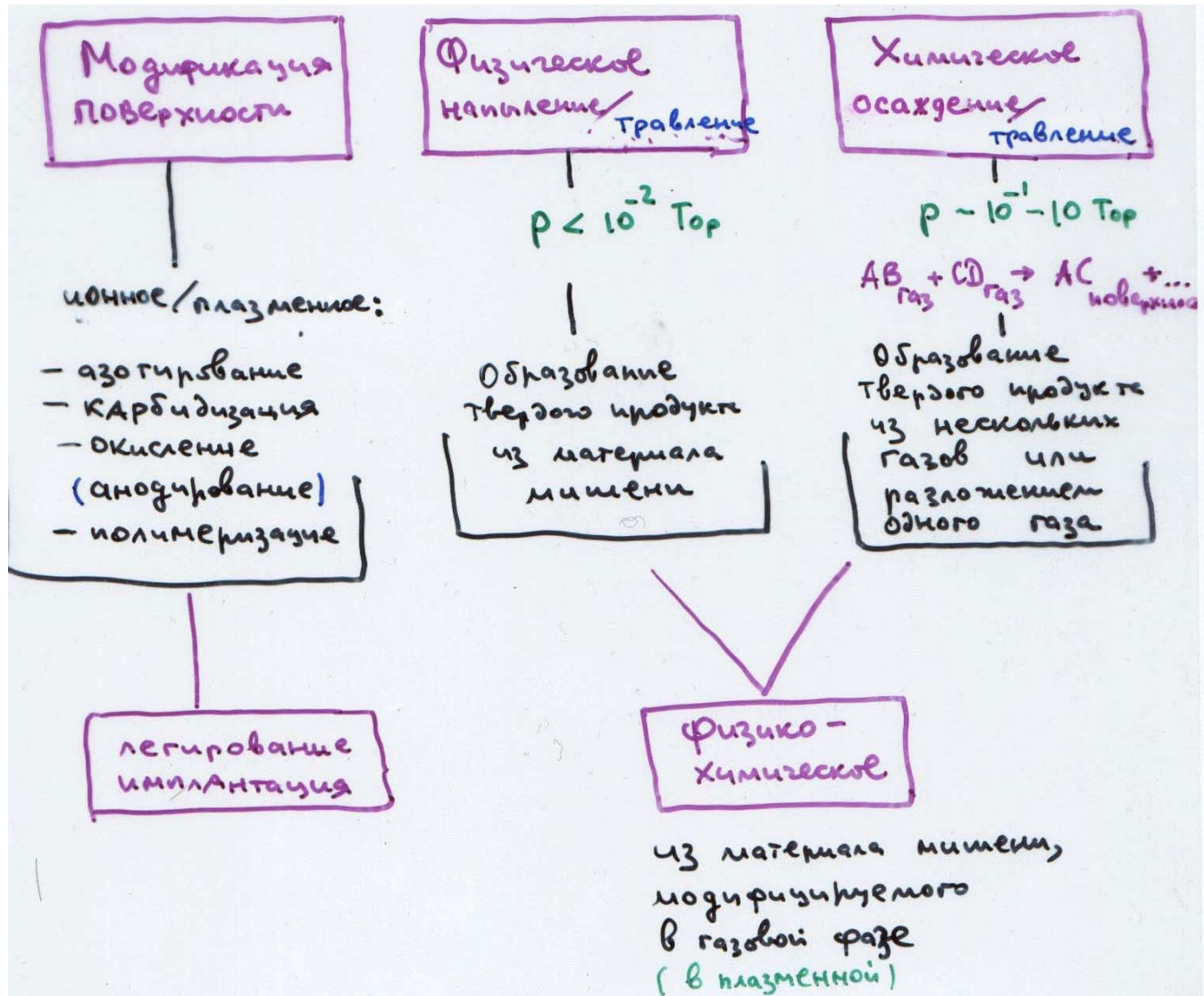
# Сравнительные характеристики пленок,

полученных вакуумным напылением, распылением и ion plating





# Основные типы ВП технологий



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ,  
РЕАЛИЗУЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ**

Комплексное воздействие (среда, источник частиц, стимулятор процесса)	Плазма - источник частиц	Плазма - стимулятор процесса
плазмо-химическое <b>осаждение</b>	<b>окисление</b> в потоке радикалов	плазменно-стимулированное <b>осаждение</b> из газовой фазы
плазменная <b>полимеризация</b>	✦ <b>травление</b> радикалами	плазменно-стимулированная <b>диффузия</b>
плазменное <b>окисление</b>	✦ <b>ионно-лучевое травление</b>	плазменно-стимулированное <b>окисление</b>
плазменное <b>анодирование</b>	✦ <b>реактивное ионно-лучевое травление</b>	плазменно-стимулированная <b>эпитаксия</b>
✦ <b>ионно-плазменное травление</b>	<b>ионно-лучевое окисление</b>	✦ <b>плазменно-стимулированное травление</b>
✦ <b>реактивное ионно-плазменное травление</b>	<b>ионно-лучевая модификация поверхности</b>	
<b>ионно-плазменное распыление</b>	<b>ионная имплантация</b>	
<b>реактивное ионно-плазменное распыление</b>		
<b>модификация поверхности</b>		

на мишени  
-10 ÷ 100 В  
относительно  
плазмы

плазма  
"далеко"

в плазме

# Пример использования ПТ при производстве полевого транзистора

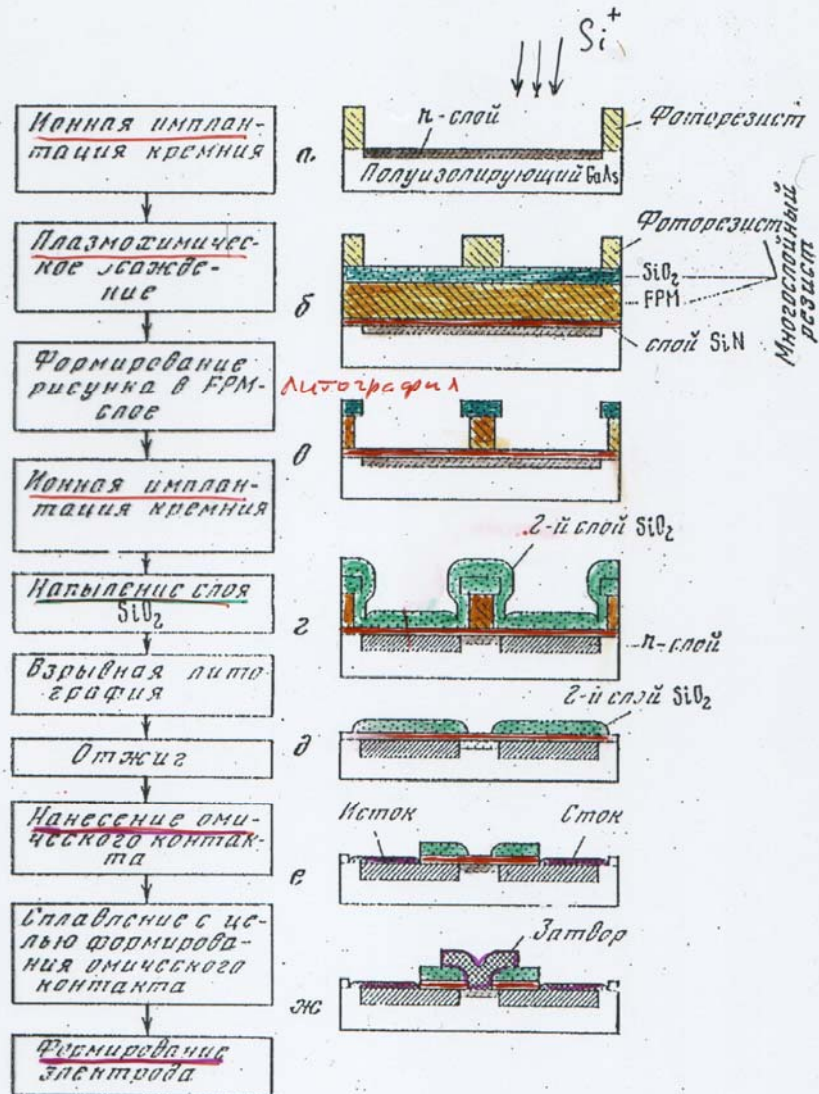
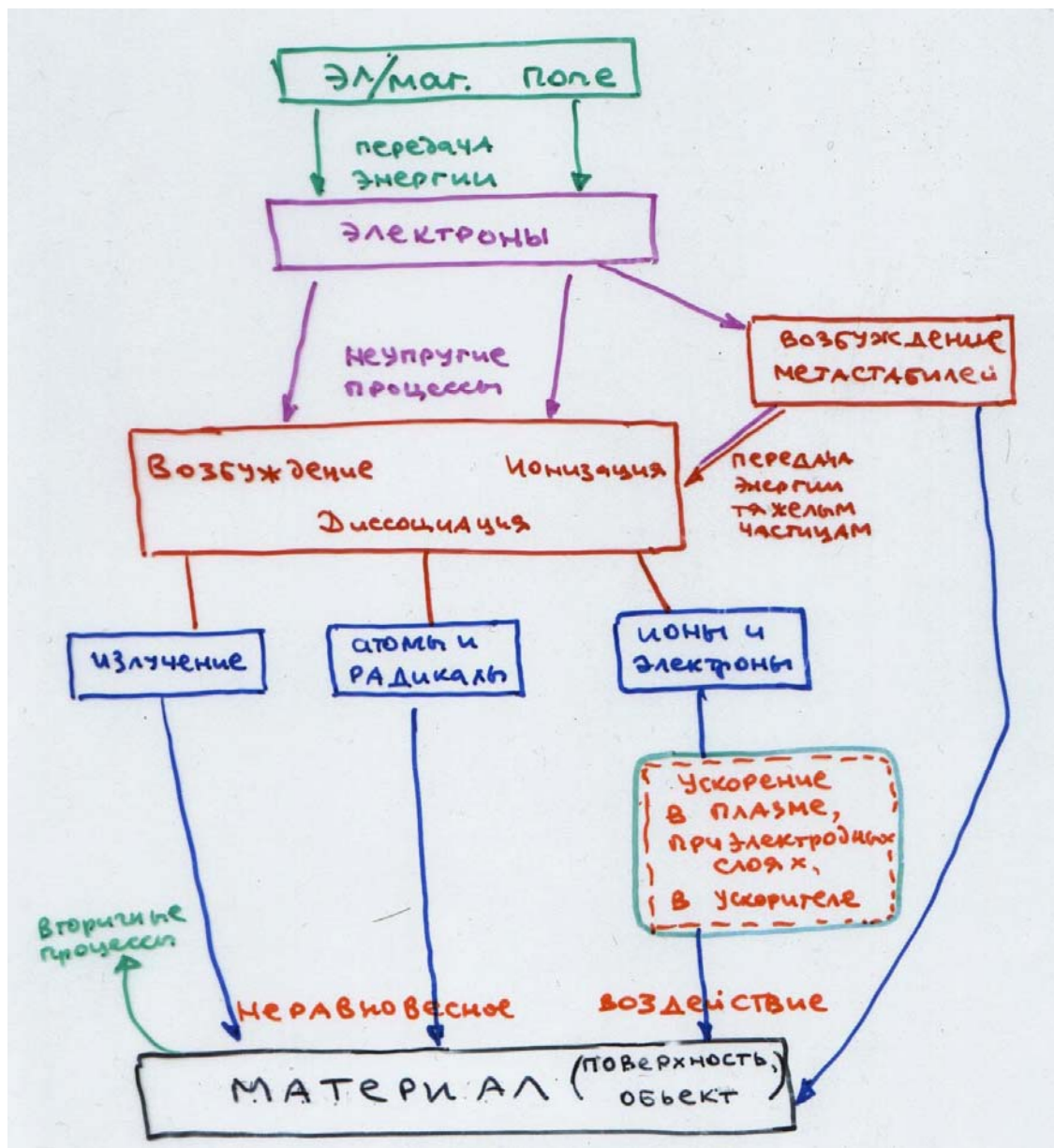


Рис. 6.6. SAINT-процесс. Пример процесса самосовмещения при изготовлении полевого транзистора на GaAs с затвором Шоттки.

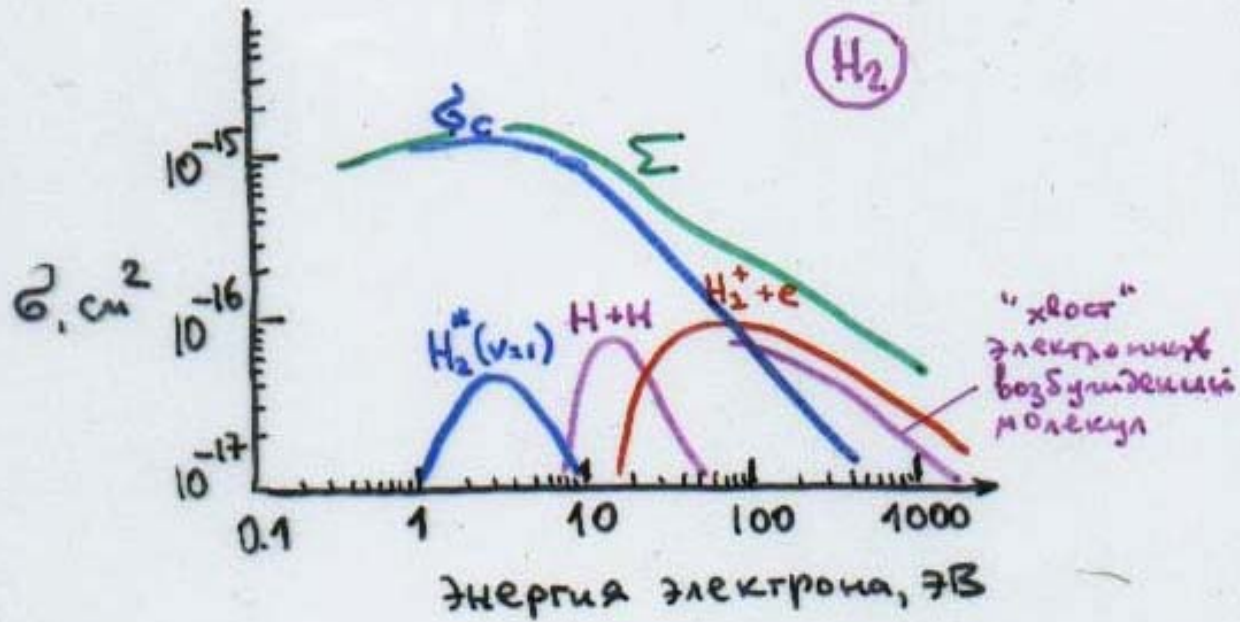


# Процессы в низкотемпературной плазме



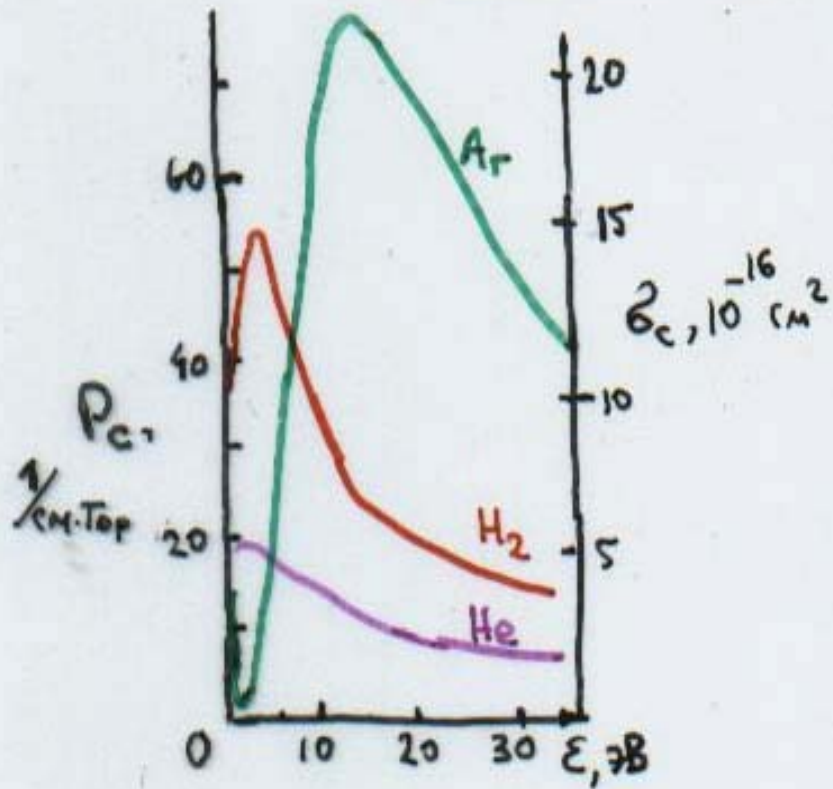


# Электронные процессы в $H_2$



сечение углового рассеяния  $\sigma_c$   
 колебательного возбуждения  $v=1$   
 электронного возбуждения —  
 диссоциации —  
 ионизации —  
 молекулы  $H_2$  электронным ударом

# Упругое рассеяние



Вероятность и сечение  
упругих столкновений  
электронов в газах

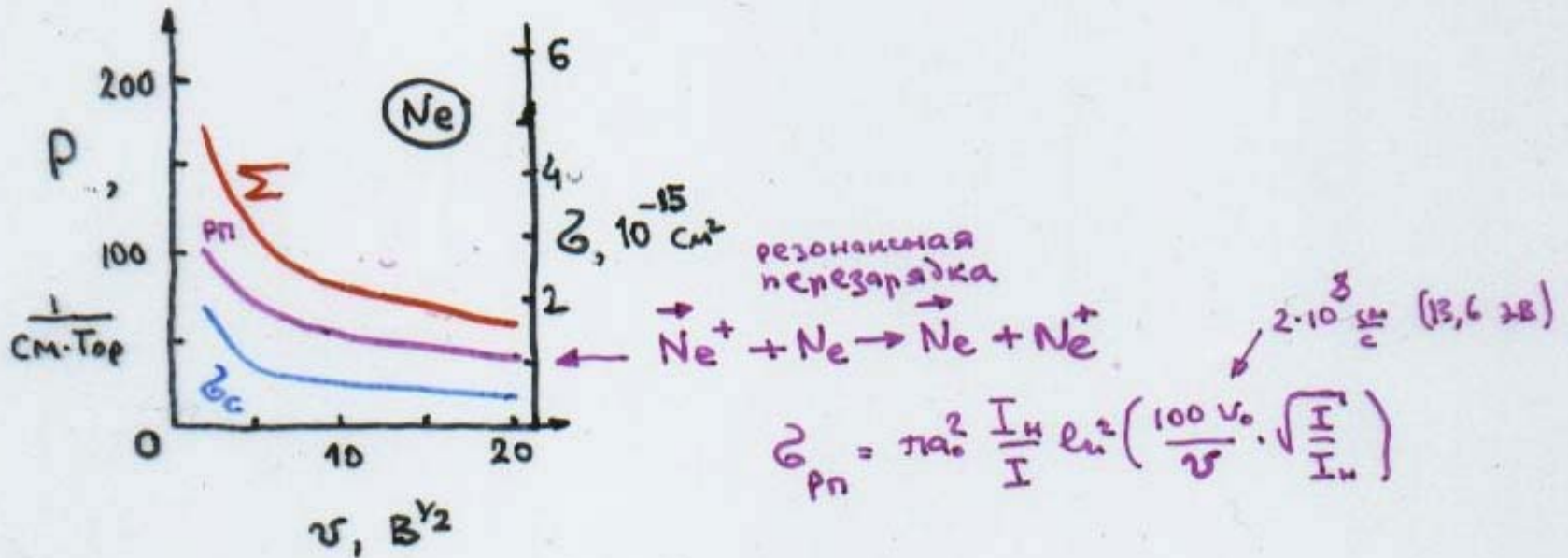
$$P_c = 3.5 \cdot 10^{16} \cdot \sigma_c ; P_c \cdot P \rightarrow \text{число столкновений на 1 см}$$

$$\lambda = \frac{1}{P_c \cdot P_{\text{top}}} \text{ [cm]}$$

$$\sigma_{tr} = \sigma_c (1 - \overline{\cos \theta})$$

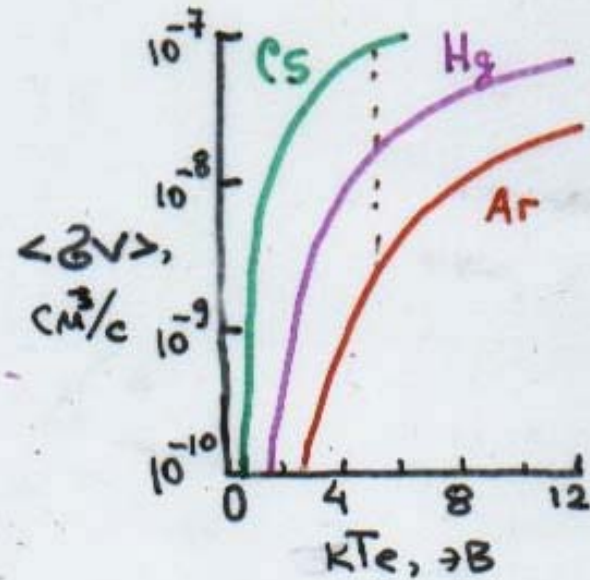
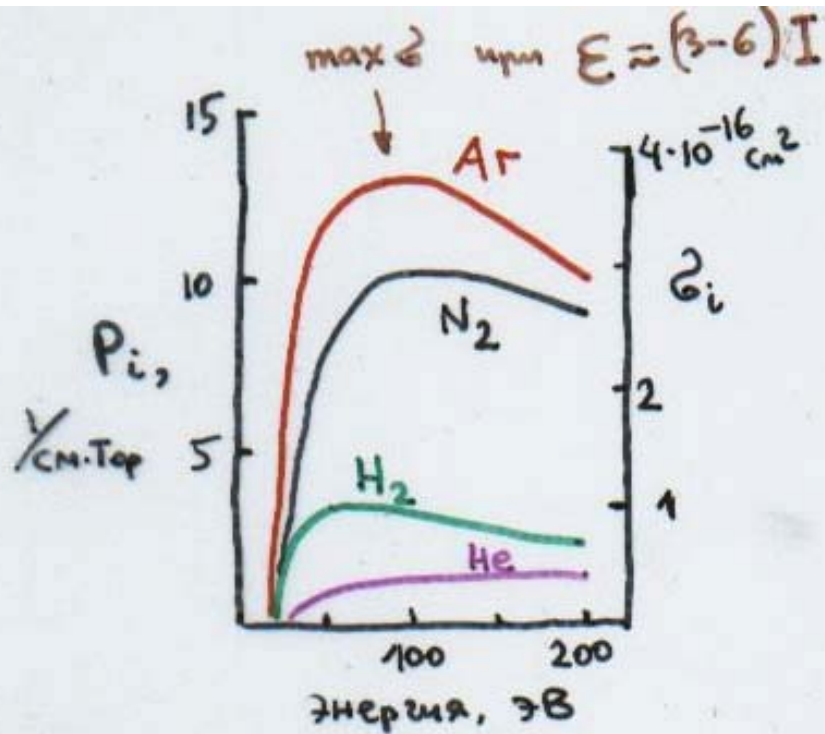
$$\nu_{gr} = \frac{eE}{m\nu} = \frac{eE}{m\nu_e} \cdot \lambda$$

# Рассеяние ионов



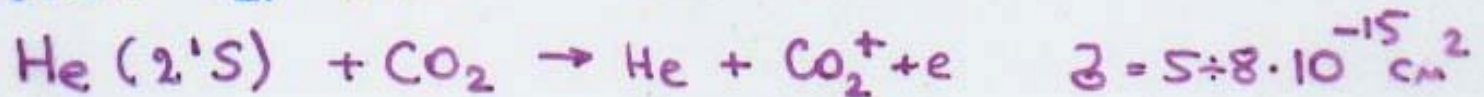
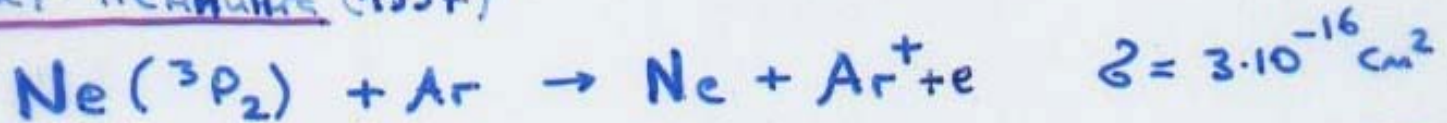
Вероятность и сечение  
 упругого рассеяния и перезарядки  
 ионов  $\text{Ne}^+$  в  $\text{Ne}$

# Ионизация



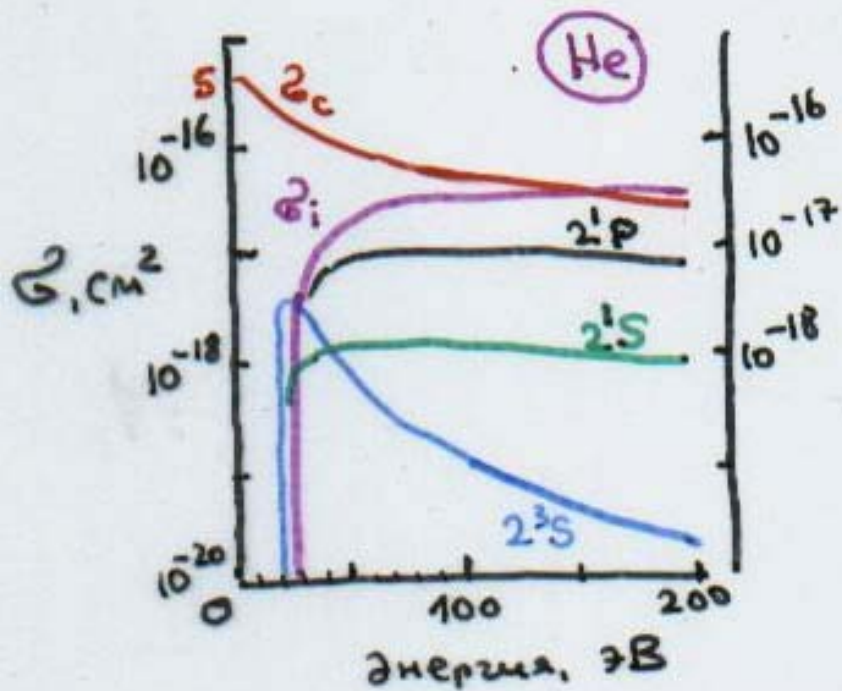
Томсон (1912 г.)  $\sigma_i = \frac{\pi e^4}{I} \frac{E-I}{E^2}$ ;  $\sigma_{\text{max}} = \pi \alpha_0^2 \left( \frac{I_H}{I} \right)^2$  при  $E = 2I$

Эффект Пеннинга (1937)

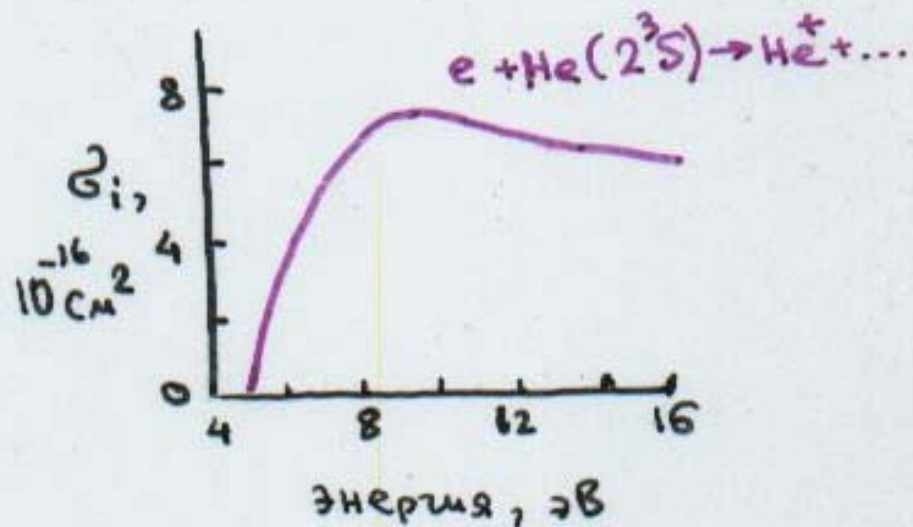




# Сечения возбуждения

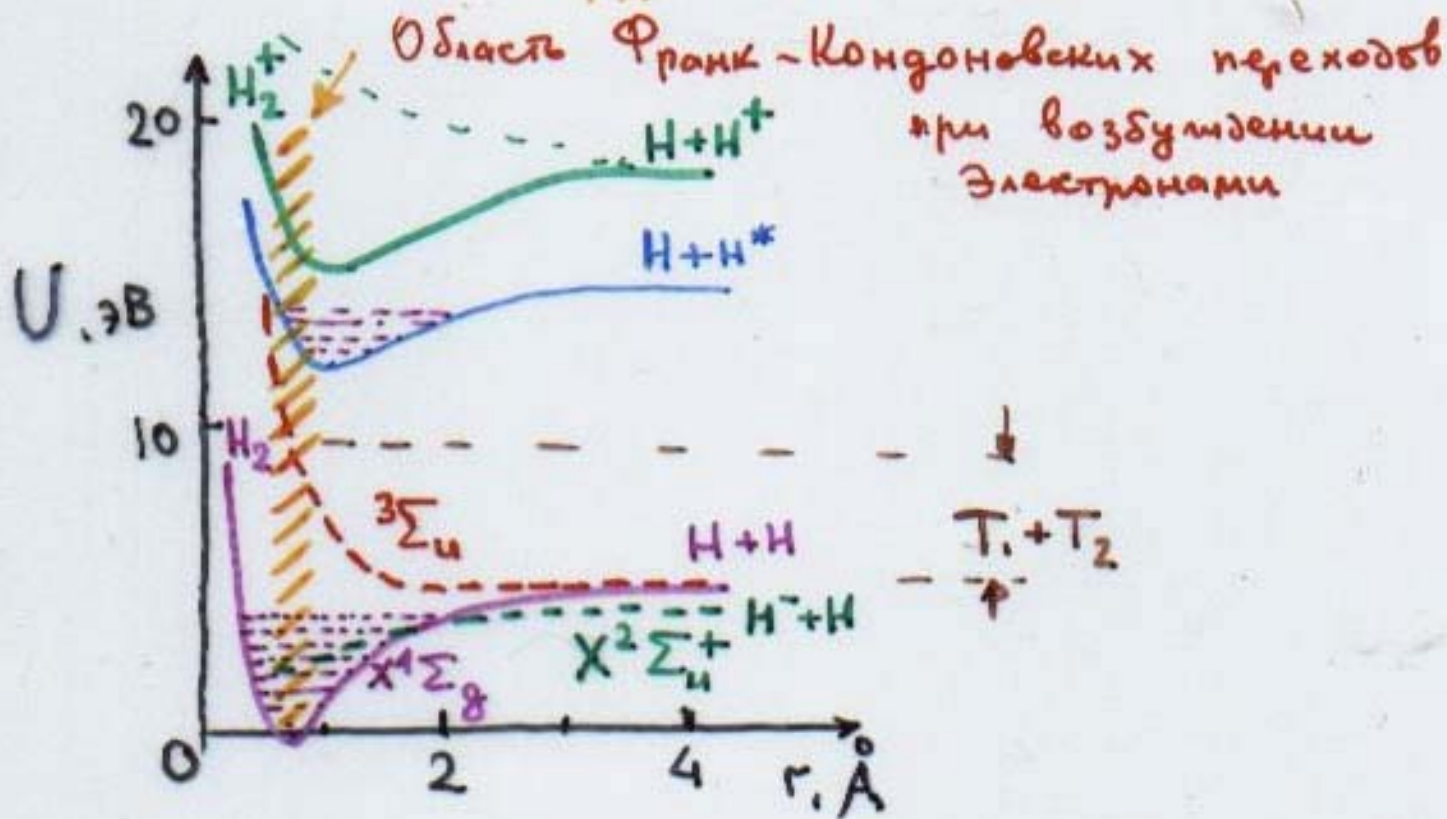


сечение возбуждения  
уровней He электронами



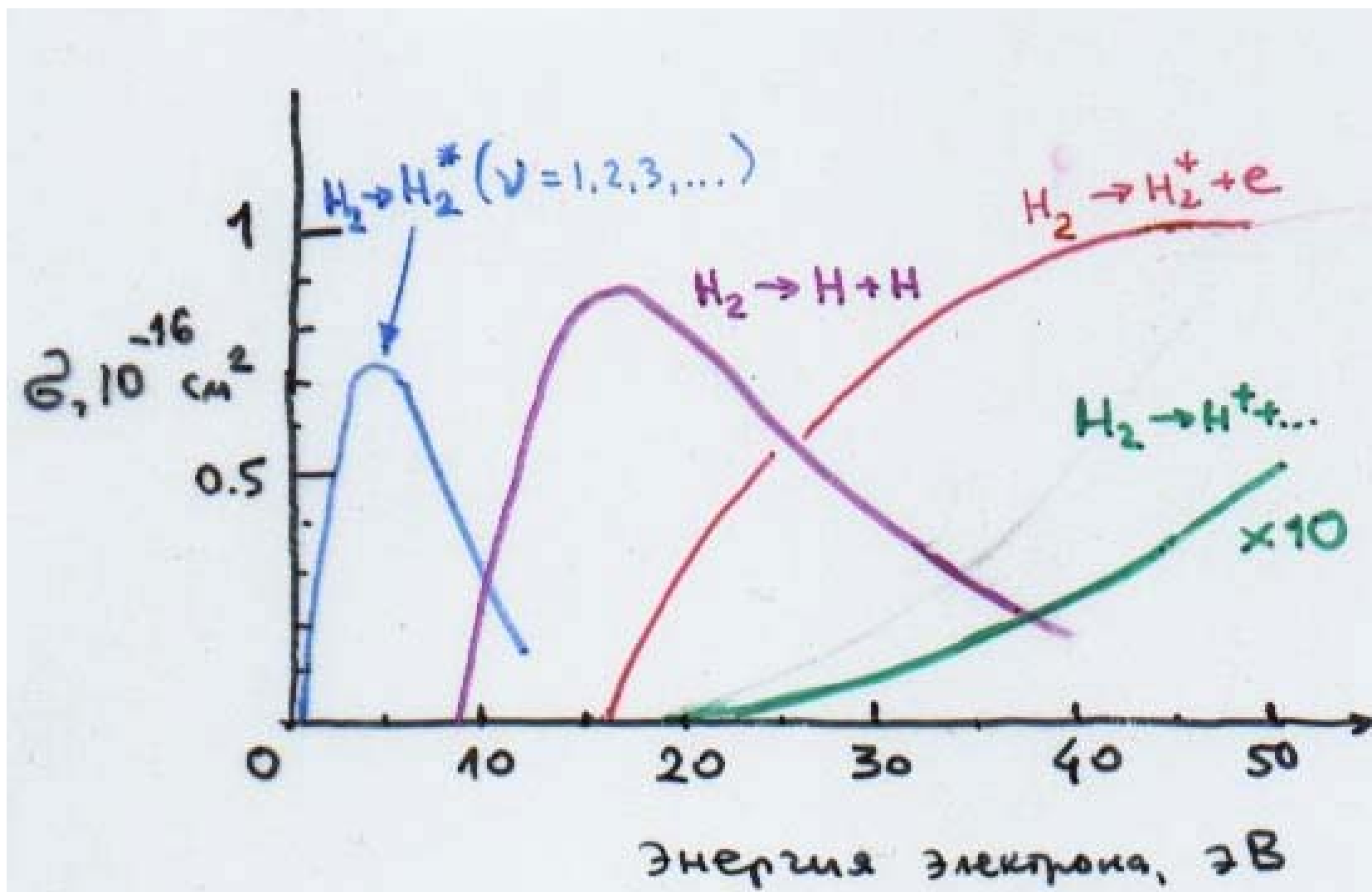
сечение ионизации  
метастабильного атома  $\text{He}(2^3s)$

# Столкновения с молекулами



Потенциальная энергия  $H_2, H_2^+, H_2^-$   
в зависимости от расстояния между ядрами

# Сечения столкновений электронов с $H_2$



# Рекомбинация

нейтрализация на поверхности или в объеме



$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_e}{dt} = -\beta n_+ n_e$$

$\beta$  [ $\frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$ ] — коэффициент рекомбинации

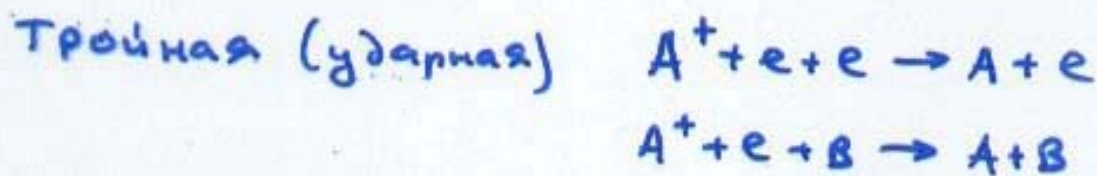
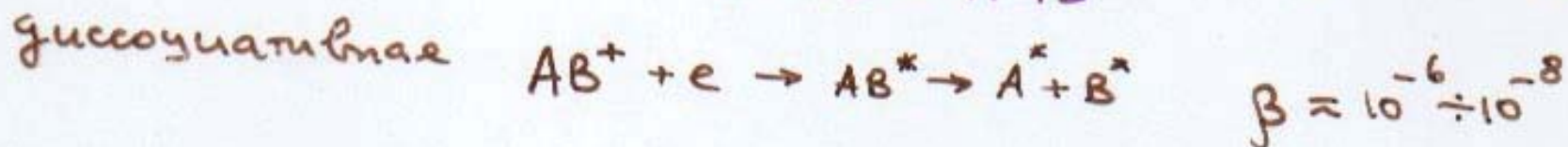
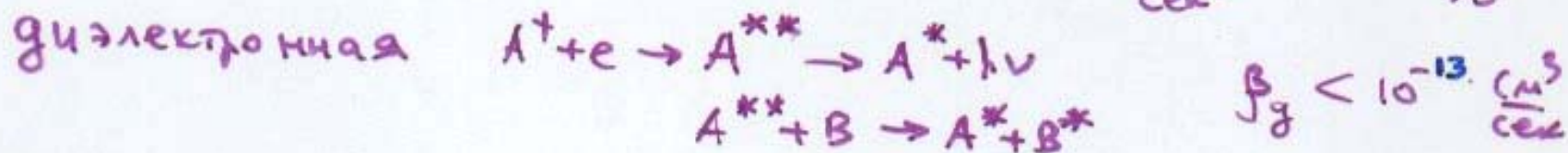
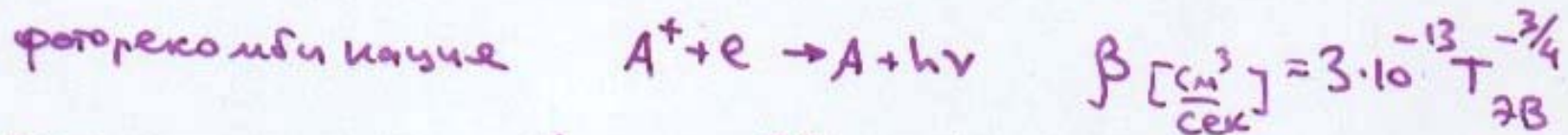
Если  $\beta$  не зависит от  $n_+, n_e$  (парные столкновения, нет отрицательных ионов, нет диффузии на стенках)

$$n_e = \frac{n_e^0}{1 + \beta n_e^0 t};$$

Характерное время рекомбинации  $\tau = \frac{1}{\beta n_e^0}$   
(диссоц. рекомбинация  $\beta = 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$ ;  $n_e^0 = 10^{10}$ ,  $\tau = 10^{-3} \text{ сек}$ )



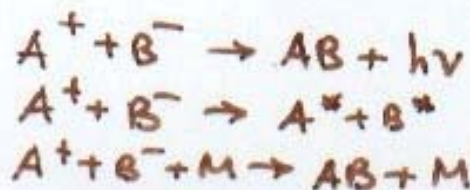
## Ион-электронная рекомбинация



$$\frac{dn_e}{dt} = -\beta' \cdot n_e^2 \cdot n_+$$
$$n_e = \frac{n_e^0}{(1 + \frac{\beta' n_e^0^2 \cdot t}{2})^{1/2}}$$

$$\beta' = \frac{c e^{10}}{m^{1/2}} T_e^{-9/2} \approx 5,4 \cdot 10^{-27} \cdot T_e^{-9/2} \quad \beta = \beta' \cdot n_e \approx 10^{-13}$$

## Ион-Ионная (afterglow, ...)



$$\beta \sim 10^{-14} \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$$
$$10^{-8} - 10^{-7} \quad (T \approx 0,12 \text{ эВ})$$