

Кафедра водородной энергетики и плазменных
технологий

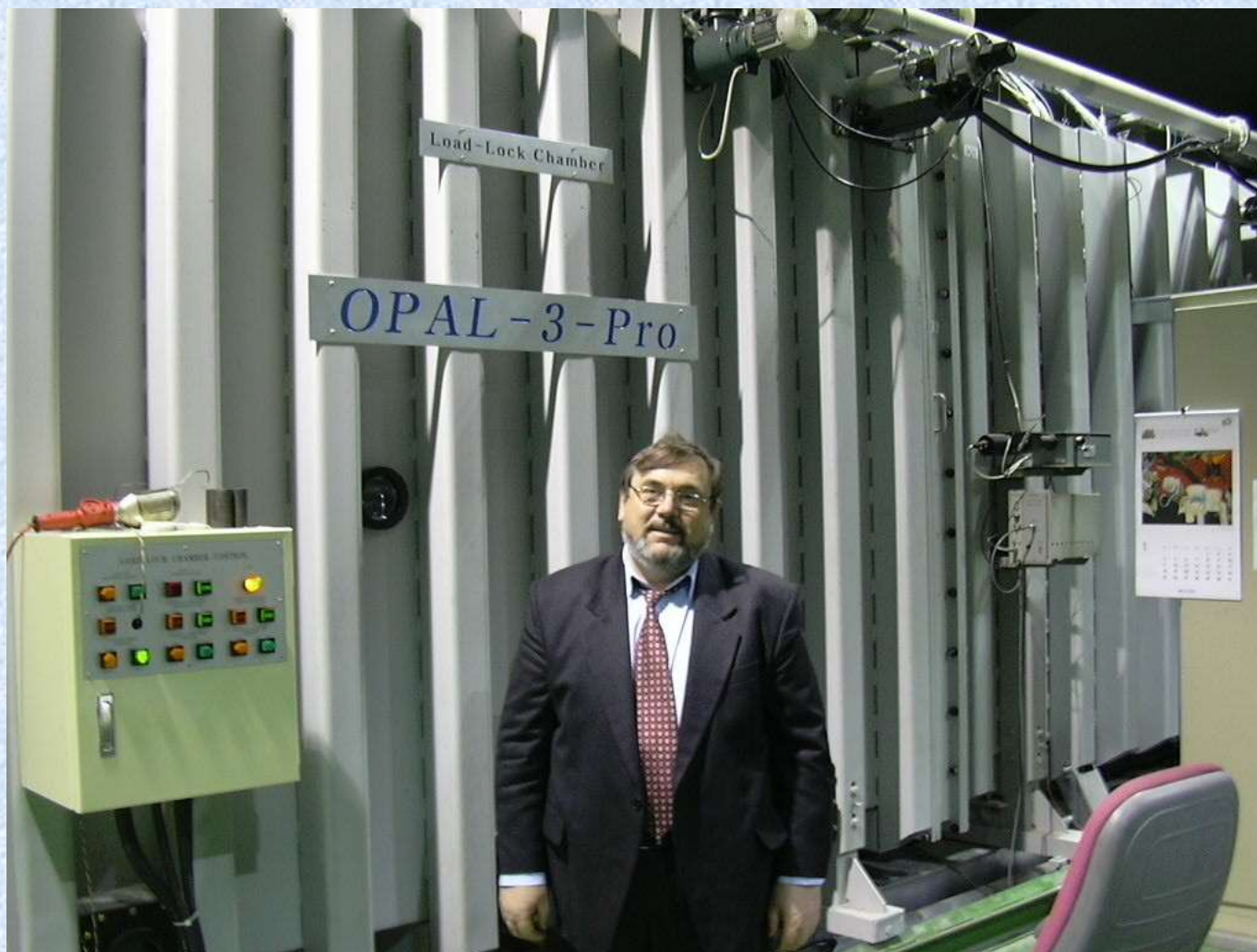
Радиационные и плазменные технологии обработки материалов

Кривобоков В.П.



Томский политехнический университет

Кривобоков Валерий Павлович, д.ф.-м.н., профессор, проректор-директор Физико-технического института, заведующий кафедрой водородной энергетики и плазменных технологий ТПУ.





План лекции

- 1. Введение. Определения. История.**
- 2. Принципы радиационной и плазменной обработки материалов.**
- 3. Физические основы и методы реализации радиационных технологий.**
- 4. Плазменные методы обработки материалов.**
- 5. Примеры реализации радиационных и плазменных технологий (РПТ).**
- 6. Заключение.**



Исходные положения

1. Критерий развития общества — это уровень его технологической культуры, уровень умения создавать и обрабатывать материалы.
2. Радиационные и плазменные технологии (РТП) — новая парадигма технологической культуры (High Tech). Реально появилась во второй половине 20 века. Мы живем в эпоху её распространения.
3. Томск — один из самых продвинутых городов России в области РПТ.



Основные категории РТП

Ионизирующие излучения - потоки частиц, взаимодействие которых со средой приводит к ионизации ее атомов (молекул). Различают фотонное (электромагнитное) и корпускулярные ионизирующие излучения.

Радиационные технологии - совокупность методов получения и обработки материалов с использованием ионизирующих излучений.

Плазменные технологии - совокупность методов получения и обработки материалов с использованием нагрева исходных продуктов в плазменной струе или их перевода в плазменное состояние.



Плазма - частично или полностью ионизированный газ, который обычно является квазинейтральным (суммарный электрический заряд её равен нулю).

Плазма считается четвёртым (после твёрдого, жидкого и газообразного) агрегатным состоянием вещества.

Присутствие свободных электрических зарядов делает плазму проводящей средой, что обуславливает её заметно большее (по сравнению с другими агрегатными состояниями вещества) взаимодействие с магнитным и электрическими полями.

Термин «плазма» используется для систем заряженных частиц, достаточно больших для возникновения коллективных эффектов.



• История РПТ

1. Первые опыты с применением рентгеновского излучения (начало 20 века).
2. Появление первых ускорителей заряженных частиц (~ 1940-е годы – Европа, США, СССР).
3. Первые ядерные реакторы (1942 г. – США, 1946г. – СССР).
4. Первые промышленные источники ионов (1954 г. – США, ~1957 г. – СССР).
5. Систематические исследования физических основ РПТ – ~ с 1965 г.
6. Активное внедрение в промышленность - ~ с 1970 г.



Что мы хотим получить в результате радиационной или плазменной обработки?

- 1. Улучшить свойства материалов.
- 2. Создать материалы и изделия с рекордными параметрами
- 3. Повысить функциональные параметры и надёжность техники, в которой они используются.
- 4. Снизить материалоемкость изделий.
- 5. Снизить затраты на производство и т.д.



Некоторые механизмы реализации РПТ при обработке материалов

1. Ионизация и возбуждение атомов и молекул. Результат – изменение механизмов межатомных (межмолекулярных) взаимодействий.
2. Создание радиационных дефектов в твёрдом теле. Радиационно-стимулированные процессы (в том числе процессы переноса).
3. Распыление поверхности ускоренными частицами. Следствие – изменение структуры поверхности, удаление поверхностных дефектов.
4. Изменение химического состава обрабатываемого материала. Осуществляется путём трансмутационных процессов, ионной имплантации, радиационно-стимулированной диффузии и т.д.
5. Нанесение модифицирующих покрытий.
6. Радиационный отжиг.
7. Фазовые превращения в твёрдых телах и т. д.



Частицы, используемые в РПТ

- электроны;
- ионы (отрицательные, положительные, однозарядные, многозарядные, атомные, молекулярные, газовые, металлические и т.д.);
- протоны;
- альфа-частицы;
- позитроны;
- нейтроны;
- фотоны (от инфракрасного излучения до гамма-квантов с энергией $\sim 10E10$ эВ);
- плазма (в основном низкотемпературная, много видов);
- излучение лазера;
- потоки нейтральных атомов;
- потоки ускоренных кластеров.

Каждому виду частиц соответствуют свои источники и сопутствующее технологическое оборудование.



Нейтроны

- 1. Получение радионуклидов. Пример Pu-239.
- 2. Ядерное легирование кремния.
- 3. Нейтронное «сжигание» радиоактивных отходов.
- 4. Производство радиофармпрепаратов.
- 5. Радиационные испытания реакторных материалов и т.д.



Томский политехнический университет



НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
при ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

УНИКАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

НИИ ядерной физики
Исследовательский ядерный реактор
ИРТ-Т

Запущен в 1967 г.

Включен в перечень уникальных научно-исследовательских установок национальной значимости.



Реактор бассейного типа. Тепловая мощность 6 МВт.
Имеет 10 горизонтальных экспериментальных каналов и 14 вертикальных каналов.
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов
в экспериментальных каналах – $1,1 \cdot 10^{14}$ н/см²с,
быстрых нейтронов – $2 \cdot 10^{13}$ н/см²с.

634050, г. Томск, 50, пр. Ленина, 2а
НИИ ядерной физики при ТПУ
Тел. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru

Nuclear Physics Institute at TPU
Lenin Street 2a, Tomsk, 634050
Tel. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru



НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
при ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

БЕЗОТХОДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ГЕНЕРАТОРОВ ^{99m}Tc ДЛЯ МЕДУЧРЕЖДЕНИЙ СИБИРИ

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОФАРМАЦЕВТИКИ НА ОСНОВЕ ^{99m}Tc

РАДИОФАРМАЦЕВТИКА НА ОСНОВЕ ^{99m}Tc ИСПОЛЬЗУЕТСЯ БОЛЕЕ ЧЕМ В 90% ОБСЛЕДОВАНИЙ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ.

ЕЖЕГОДНО В МИРЕ ПРОВОДИТСЯ 17 МЛН. ОБСЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ^{99m}Tc.

В РОССИИ ИМЕЕТСЯ ОКОЛО 240 ГАММА КАМЕР (ИЗ НИХ 25 В СИБИРИ) ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОБСЛЕДОВАНИЙ.

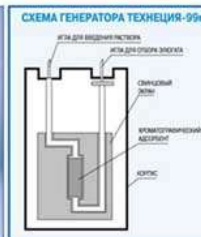
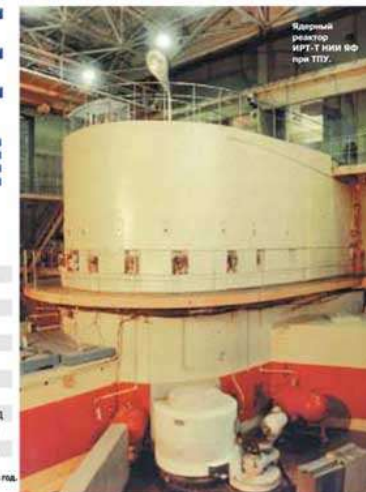
ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ^{99m}Tc:

- КАРДИОЛОГИЯ
- ОНКОЛОГИЯ
- ПУЛЬМОЛОГИЯ
- ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ: ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ, ПЕЧЕНИ, ПОЧЕК И ДРУГИХ ОРГАНОВ И СИСТЕМ

ПОТРЕБИТЕЛИ ГЕНЕРАТОРОВ ^{99m}Tc В СИБИРИ.

ТОМСК	5 гамма камер	150 ген./год
КЕМЕРОВО	2 гамма камеры	72 ген./год
ПРОКОПЬЕВСК	1 гамма камера	24 ген./год
КРАСНОЯРСК	1 гамма камера	24 ген./год
БАРНАУЛ	3 гамма камеры	96 ген./год
ОМСК	1 гамма камера	12 ген./год
ТЮМЕНЬ	1 гамма камера	24 ген./год
ЧИТА	2 гамма камеры	34 ген./год
НОВОСИБИРСК	5 гамма камер	(150) ген./год
ИРКУТСК	2 гамма камеры	(72) ген./год
УЛАН-УДЭ	1 гамма камера	(24) ген./год

ВСЕГО В СИБИРИ 25 гамма камер. ПОТРЕБНОСТЬ ДО 682 генераторов в год. В ПЕРСПЕКТИВЕ ВОЗМОЖНЫ ПОСТАВКИ В КИТАЙ, МОНГОЛИЮ.



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЕКТА

ОБЪЕМ ПРОИЗВОДСТВА	1000 - 1500 ген./год
СЕБЕСТОИМОСТЬ	2200 рублей
СТОИМОСТЬ 1 ГЕНЕРАТОРА	3200 рублей
СТОИМОСТЬ АНАЛОГОВ	4500 - 6000 рублей

На ИРТ-Т НИИ ЯФ с потоком $1,4 \cdot 10^{14}$ нейтр./см²·с можно получать до 57 Кюри в неделю ^{99m}Mo и обеспечивать зарядку от 25 до 75 генераторов в неделю.

- ⁹⁹Mo → ^{99m}Tc, (T_{1/2} = 66 ч.)
- ^{99m}Tc → ⁹⁹Tc + γ (T_{1/2} = 6,02 ч., E_γ = 140 кэВ, 98%)
- АКТИВНОСТЬ ⁹⁹Mo В ГЕНЕРАТОРЕ ПРИ ЗАРЯДКЕ 0,7 Кюри

634050, г. Томск, 50, пр. Ленина, 2а
НИИ ядерной физики при ТПУ
Тел. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru

Nuclear Physics Institute at TPU
Lenin Street 2a, Tomsk, 634050
Tel. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru



Протоны, альфа-частицы

- 1. Производство трековых мембран.
- 2. Диагностика структуры и состава твёрдых тел.
- 3. Производство фармпрепаратов.
- 4. Радиационная терапия
- 5. Исследования радиационных дефектов и т.д.

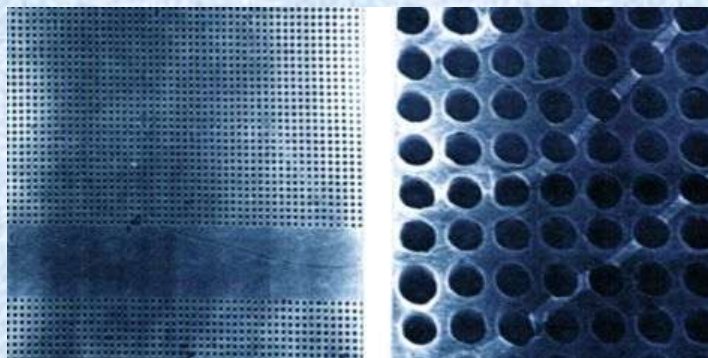
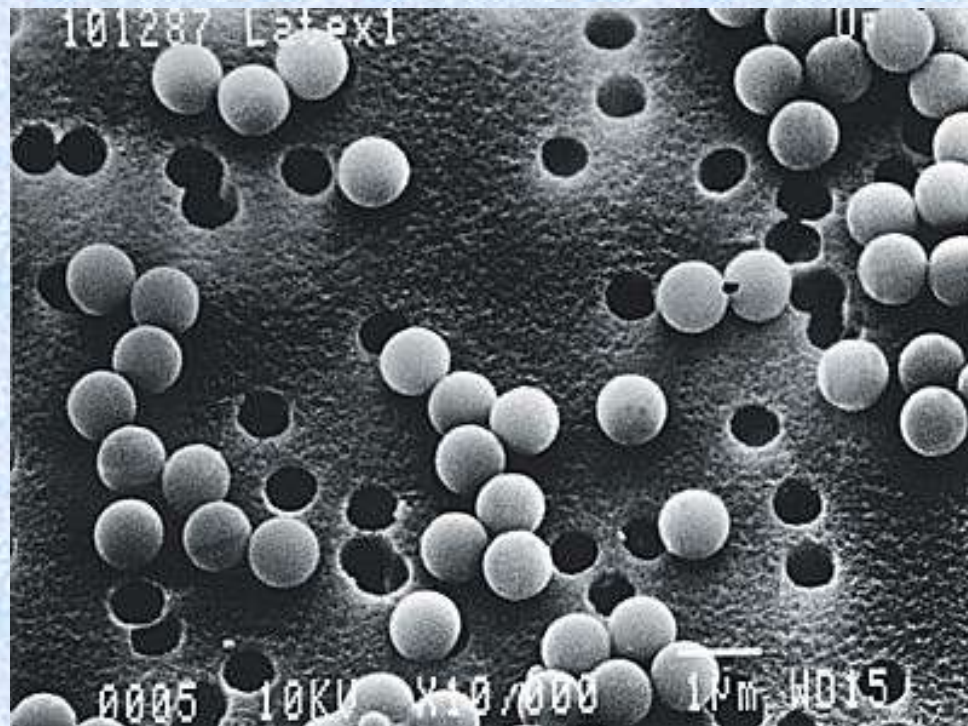
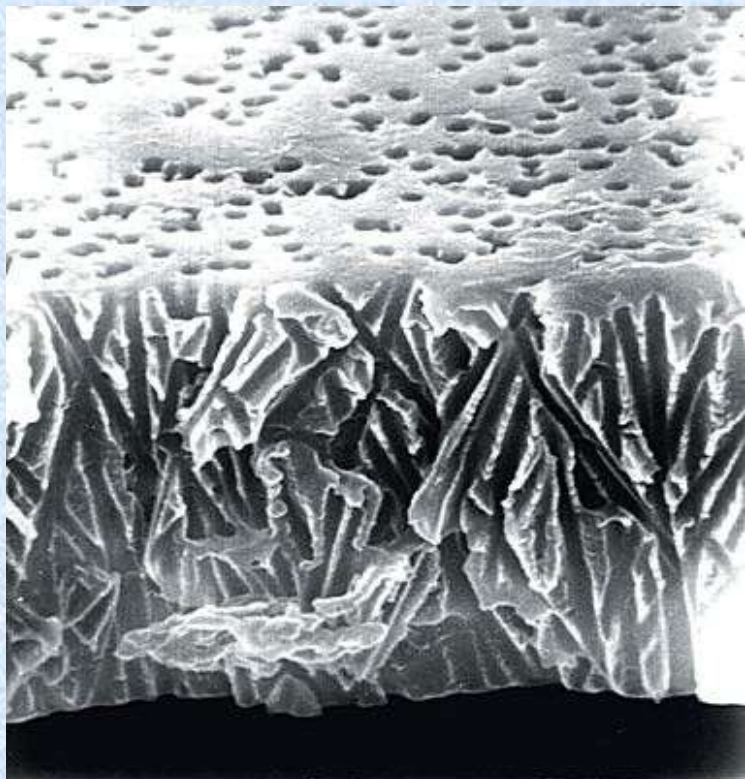


Томский политехнический университет





Трековые мембраны





ТЕХНОЛОГИЯ
ТРЕКОВЫХ
МЕМБРАН

Вакуумная камера для облучения polyester пленки ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ НА ЦИКЛОТРОНЕ



Рентгеновские фотоны, гамма-излучение

- 1. Полимеризация пластмасс.
- 2. Дезинфекция медицинского оборудования и материалов.
- 3. Радиационный отжиг полупроводников.
- 4. Модифицирование оптических систем.
- 5. Радиационные испытания материалов и изделий.



Источники фотонов

- 1. Радиационные камеры (Co-60).
- 2. Тормозное излучение электронных ускорителей.
- 3. Излучатели ядерных реакторов.
- 4. Рентгеновские трубки и т.д.



Синхротрон "СИРИУС".



Пучки ускоренных электронов: механизмы модифицирования материалов

- 1. Электронно-лучевой нагрев вещества.
- 2. Нетермические радиационно-стимулированные процессы.
- 3. Плавление плёнок и покрытий.
- 4. Размерная электронная обработка.
- 5. Твёрдофазное спекание.
- 6. Фазовые превращения и др.



Пучки ускоренных ионов

- 1. Ионная имплантация.
- 2. Ионное перемешивание.
- 3. Ионное травление поверхности твёрдого тела.
- 4. Модифицирование трибологических свойств.
- 5. Ионно-лучевая эпитаксия и т.д.



Лазерное излучение

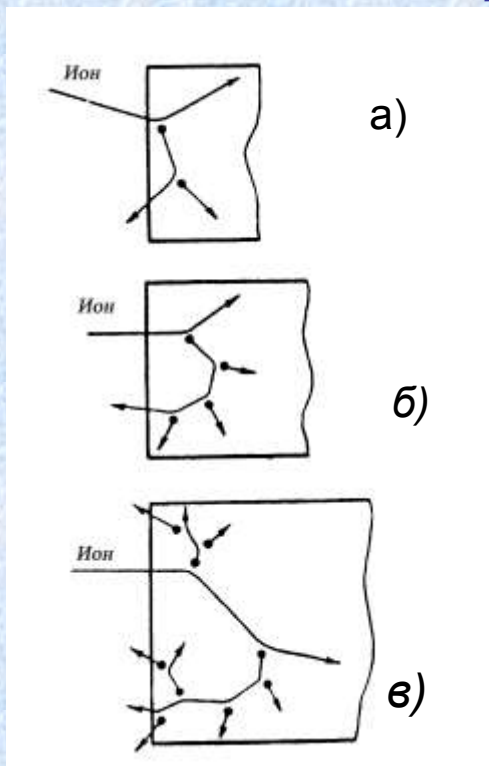
- 1. Лазерная термообработка.
- 2. Лазерное напыление покрытий.
- 3. Размерная обработка.
- 4. Лазерная сварка.
- 5. Высокоскоростной нагрев мишени и т.д.



Мощные импульсные пучки заряженных частиц

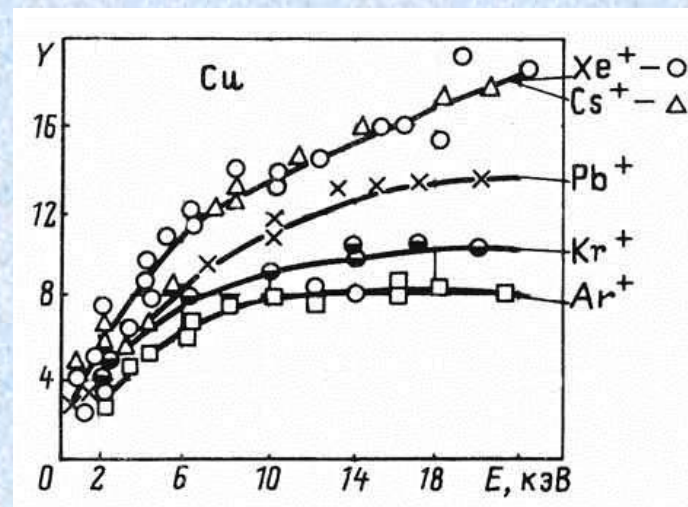
- 1. Огромные плотности мощности.
- 2. Большие скорости изменения температуры радиационного разогрева.
- 3. Значительная акустическая эмиссия.
- 4. Почти нет ограничений по поводу фазовых превращений.
- 5. Огромные скорости перемещения границы раздела фаз и т.д.

Распыление поверхности ускоренными ионами



Схемы столкновений, приводящих к распылению:

- а – распыление рикошетом,
- б – распыление ПВА отдачи,
- в – распыление атомов в результате каскада столкновений



Зависимость коэффициента распыления меди от энергии ионов

[Рыжов Ю.А., Шкарбан И.И., Обобщение экспериментальных данных по массообмену между атомарными потоками и поликристаллическими поверхностями.- Сб. трудов МАИ. 1975 г.



Параметры мощных импульсных ионных пучков:

- e^- , C^+ , $(H^+ + C^+)$, Ar ;
- длительность импульса $\tau = 10^{-8} \dots 10^{-5}$ сек;
- начальная энергия частиц $E = 10 \dots 1000$ кэВ;
- плотность мощности $P = 10^7 \dots 10^{10}$ Вт/см²;
- временная развёртка напряжения и плотности тока – по данным эксперимента.

Материалы мишеней:

преимущественно металлы (Cu, Al, Fe, Pb, W и т.д.).



Гидродинамическая модель испарения

- Уравнения сплошной среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial (u \rho)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} P \frac{\partial u}{\partial x} + W$$

- Уравнения состояния вещества :

$$E = E_x(V) + E_T(V, T) + E_e(V, T), \quad P = P_x(V) + P_T(V, T) + P_e(V, T).$$

- Положение границы между паровой и конденсированной фазами Z:

$$E_T(\rho, T) = L(\rho) = L_0 - E_x(\rho) \quad (\text{для } \rho < \rho_0)$$

- Коэффициент эрозии:

$$D = Q = \frac{Z \cdot e \cdot N}{\int_0^{\tau} j(t) dt}$$



Тепловая модель для расчета испарения [$P < (1..5) \cdot 10^9$ Вт/см²]

Уравнение теплопроводности в системе координат, связанной с испаряемой поверхностью:

$$\frac{\partial E_T(x,t)}{\partial t} - v_f \frac{\partial E_T(x,t)}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + W(x,t)$$

$$T = \begin{cases} E_T / c\rho, & E_T < E_m \\ T_m, & E_m < E_T < E_m + q_m\rho \\ T_m + (E_T - (E_m + q_m\rho)) / c\rho, & E_T > E_m + q_m\rho \end{cases}$$

Граничное условие на облучаемой поверхности:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = v_f \rho \Delta H$$

Коэффициент эрозии:

$$D = Q = \frac{\left[\int_0^{\tau_{uch}} v_f(t) dt \right] \cdot e \cdot N}{\int_0^{\tau} j(t) dt}$$

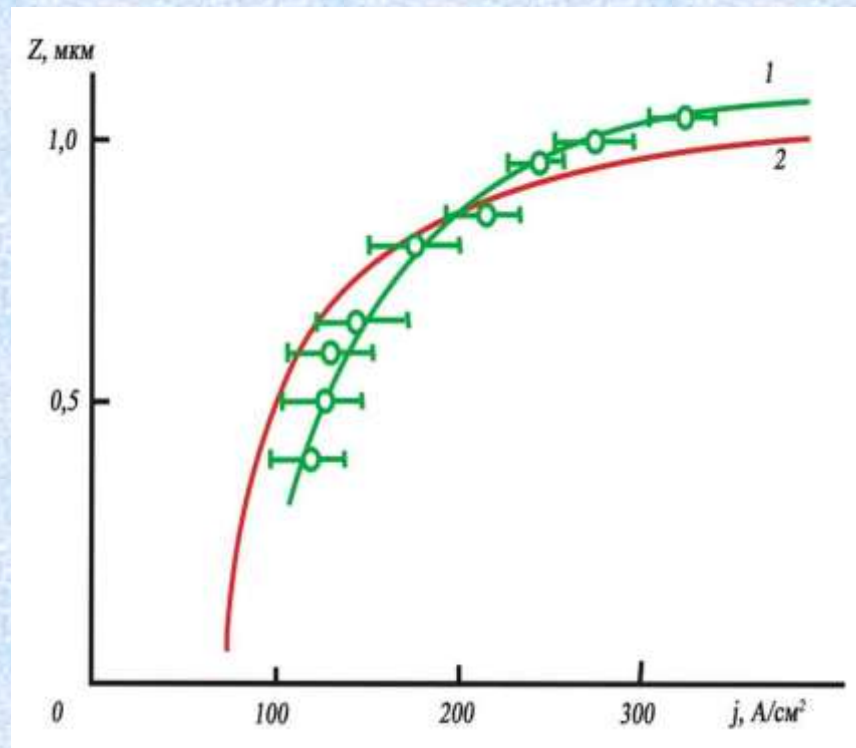


Тепловая модель поверхностного испарения: сравнение расчетов с экспериментальными данными

Зависимость толщины испарившегося слоя кварца Z , облученного смешанным пучком 50%Н⁺ + 50%С⁺ с $E=500$ кэВ, $\tau=150$ нс: от плотности тока j :

1 – эксперимент (измерение профилометром “Tallysurf 5-20” с разрешением 0,05 мкм);

2 - расчет





Томский политехнический университет



НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
при ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ THE MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

ОСАЖДЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.
МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА. ПРОИЗВОДСТВО СТЕКЛА С ТЕПЛОСБЕРЕГАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ.
НАНЕСЕНИЕ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.
ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНИЧЕСКИХ И БЫТОВЫХ ЗЕРКАЛ.

APPLICATION AREAS

- DEPOSITION OF PLASMA-MODIFYING COATINGS ONTO THE SOLID SURFACES.
- MODIFICATION OF SHEET GLASS OPTICAL PROPERTIES. THE HEAT-SAVING GLASS MANUFACTURING.
- DRAWING CONDUCTING COVERING ONTO THE SURFACE OF DIELECTRIC MATERIALS.
- INDUSTRY PURPOSED AND HOUSEHOLD MIRRORS MANUFACTURING.



Катодный узел магнетрона
Cathode block of magnetron

ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА «ОПАЛ» «OPAL» INDUSTRIAL SCALE SYSTEM

МАКСИМАЛЬНЫЕ ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ЛИСТОВ, мм
THE MAXIMUM OVERALL DIMENSIONS OF SHEETS, mm

ЧИСЛО ЗАГРУЖАЕМЫХ ПОЗИЦИЙ, шт
NUMBER OF LOADED POSITIONS, pcs

СРЕДНЯЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, м²/час
AVERAGE PERFORMANCE, m²/hour

УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКОЙ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ.
THE SYSTEM IS CONTROLLED AUTOMATICALLY.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА «ЯШМА» «JASHMA» LABORATORY SCALE SYSTEM

МАКСИМАЛЬНЫЕ ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ, мм
THE MAXIMUM OVERALL DIMENSIONS OF PLANE OBJECTS, mm

МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ, мм
THE MAXIMUM HEIGHT OF SPATIAL OBJECTS, mm

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗА ОДИН ЦИКЛ ОБРАБОТКИ.
IT IS POSSIBLE TO DRAW MULTILAYER COATINGS WITHIN A SINGLE OPERATION.

НАЛИЧИЕ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ И УСИЛЕНИЯ АДГЕЗИИ НАНЕСЕННОЙ ПЛЕНКИ С ПОДЛОЖКОМ.
THE ION SOURCES TO CLEAR THE SUBSTRATE SURFACE, AND FURTHER IMPROVING THE ADHESION BETWEEN SUBSTRATE AND COATINGS BEING DEPOSITED ARE FORESEEN.



Установка «Яшма»
«Yashma» System

634050, г. Томск, 50, пр. Ленина, 2а
НИИ ядерной физики при ТПУ
Тел. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru

Nuclear Physics Institute at TPU
Lenin Street 2a, Tomsk, 634050
Tel. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru



НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
при ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ИСТОЧНИКИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ MICROWAVE RADIATION SOURCES WITH VIRTUAL CATHODE

ВИРКАТОРЫ С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

VIRCATORS WITH CAPACITIVE ENERGY STORAGE



Виркатор с емкостными накопителями энергии
Viricator with capacitive energy storage
(Dimensioned photo: 20x30cm)

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Создание мобильных источников СВЧ-излучения, работающих в частотно-спектральном режиме.
Making mobile sources of microwave radiation which operate in frequency-band regime.
Воздействие излучения на материалы и объекты.
Radiation influence on materials and objects.
Иллюстрация.
Illustration.



Виркатор с емкостными накопителями энергии
Viricator with capacitive energy storage
(Dimensioned photo: 20x30cm)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TECHNICAL CHARACTERISTICS

Напряжение, кВ	600	Видеоизл, кВт	100
Тип и диапазон, мВ	15	Мощность излучения, мВ	10
Длина волны, м	100	Длина волны, м	100
Мощность излучения, кВт	500	Мощность излучения, кВт	100
Длина волны, м	100	Длина волны, м	100
Частота излучения, ГГц	3.2	Частота излучения, ГГц	3.2
Ширина спектра излучения, %	~8	Ширина спектра излучения, %	~8
Габаритные размеры: длина, м	3.5	Габаритные размеры: ширина, м	1.7
высота, м	1.7	высота, м	1.7
Вес, т	1.5	Вес, т	1.5

Напряжение, кВ	400	Видеоизл, кВт	100
Тип и диапазон, мВ	15	Мощность излучения, мВ	10
Длина волны, м	1.5	Длина волны, м	1.5
Мощность излучения, кВт	400	Мощность излучения, кВт	100
Длина волны, м	1.5	Длина волны, м	1.5
Частота излучения, ГГц	3	Частота излучения, ГГц	3
Ширина спектра излучения, %	~10	Ширина спектра излучения, %	~10
Габаритные размеры: длина, м	2	Габаритные размеры: ширина, м	1.5
высота, м	1.5	высота, м	1.5
Вес, т	2	Вес, т	1.5

ВИРКАТОРЫ С ИНДУКТИВНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

VIRCATORS WITH INDUCTIVE ENERGY STORAGE



Виркатор с индуктивными накопителями энергии
Viricator with inductive energy storage



Виркатор с индуктивными накопителями энергии
Viricator with inductive energy storage



Виркатор с индуктивными накопителями энергии
Viricator with inductive energy storage

Создание автономных источников СВЧ-излучения с взрывомангнетными генераторами.
Making self-contained sources of microwave radiation with explosion-magnetron generators.
Воздействие излучения на материалы и объекты.
Radiation influence on materials and objects.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TECHNICAL CHARACTERISTICS

Напряжение, кВ	400	Видеоизл, кВт	100
Тип и диапазон, мВ	12	Мощность излучения, мВ	10
Длина волны, м	300	Длина волны, м	300
Мощность излучения, кВт	300	Мощность излучения, кВт	100
Длина волны, м	300	Длина волны, м	300
Частота излучения, ГГц	3.1	Частота излучения, ГГц	3.1
Ширина спектра излучения, %	~8	Ширина спектра излучения, %	~8
Габаритные размеры: длина, м	2	Габаритные размеры: ширина, м	1.7
высота, м	1.7	высота, м	1.7
Вес, т	1.5	Вес, т	1.5

Напряжение, кВ	300	Видеоизл, кВт	100
Тип и диапазон, мВ	14	Мощность излучения, мВ	10
Длина волны, м	100	Длина волны, м	100
Мощность излучения, кВт	300	Мощность излучения, кВт	100
Длина волны, м	100	Длина волны, м	100
Частота излучения, ГГц	3.1	Частота излучения, ГГц	3.1
Ширина спектра излучения, %	~8	Ширина спектра излучения, %	~8
Габаритные размеры: длина, м	2	Габаритные размеры: ширина, м	1.7
высота, м	1.7	высота, м	1.7
Вес, т	1.5	Вес, т	1.5

634050, г. Томск, 50, пр. Ленина, 2а
НИИ ядерной физики при ТПУ
Тел. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru

Nuclear Physics Institute at TPU
Lenin Street 2a, Tomsk, 634050
Tel. +7(382-2) 42-39-80
E-mail: alex@npi.tpu.ru
http://www.npi.tpu.ru



Ионная имплантация

- 1954, Shockley –патент (ионные пучки для создания скрытых слоев в транзисторе).
- 1961, Rourke –имплантация ионов III и V групп в Si при энергии 10 кэВ.
- 1973 - первый коммерческий имплантер.
- Сегодня: - до 50 000 пластин/месяц (20-30 имплантеров, 150, 200, 300 мм пластины).

Разновидности

- Имплантация в полупроводники.
- Имплантация в металлы (высокие дозы: $10E16-10E18 \text{ см}^{-2}$).
- Имплантация в диэлектрики.

Современные требования (в планарной технологии)

- однородность имплантируемой дозы $< 1.5 \%$ (для 300 мм пластин)
- энергетический разброс $< 3.0 \%$
- угол наклона (пучка к пластине) $< 1.0^\circ$



Высокодозная имплантация

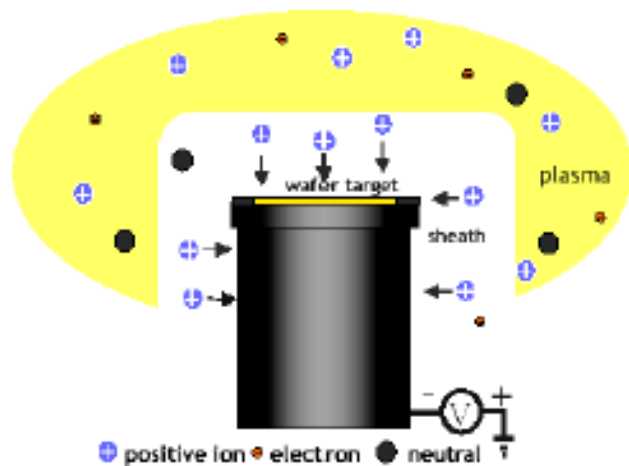
Модификация поверхностного слоя

- **улучшение свойств** (твердость, стойкость, трение ...) при малом расходе вещества;
- **не меняет габариты изделия и степень шероховатости** (упрочнение сверточных инструментов, внедрение элементов смазки);
- **отсутствует резкая граница между слоем и объемом** (адгезия);
- **формирование новых структур и соединений.**

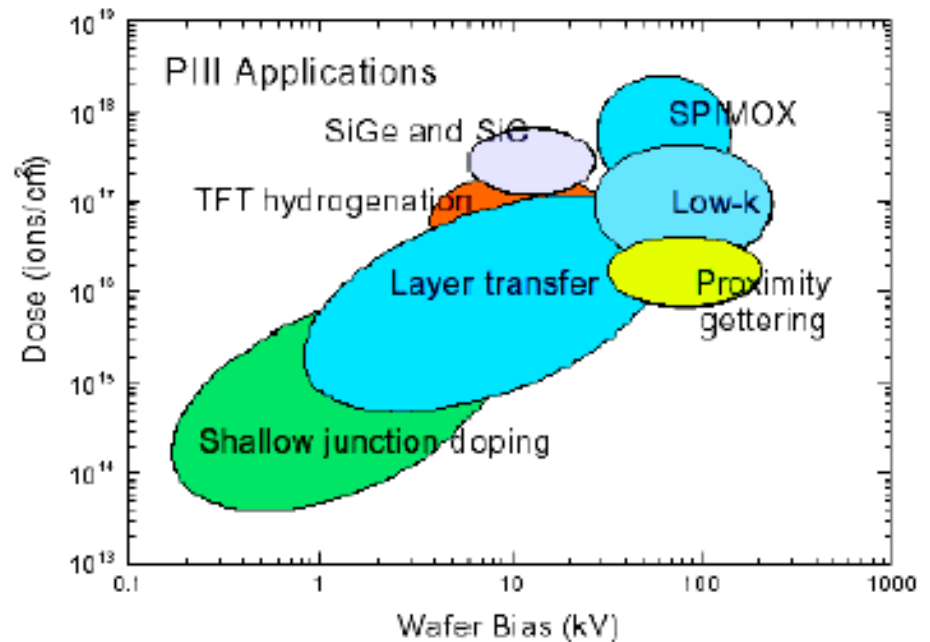
Исследование процессов в твердом теле (диффузия, сегрегация, растворимость ит.д.)

Высокодозные имплантационные системы

Plasma Immersion Ion Implantation (PIII)



Время PIII не зависит от размеров



Применения PIII



Травление в микроэлектронике

1. Ионное (ion etching) – физическое распыление

Ионно-Лучевое – отдельный источник ионов

Ионно-Плазменное – распыление, усиленное плазмой

2. Плазмохимическое (plasma chemical etching) –

Реактивное плазменное – хим. реакции, усиленные плазмой

Радикальное – плазма отделена от подложки

3. Реактивное ионное (reactive ion etching)

Реактивное Ионно-Лучевое

Ионы + реактивный газ

Реактивные ионы

Реактивное Ионно-Плазменное

Ионы + реактивный газ + плазма

Реактивные ионы + плазма

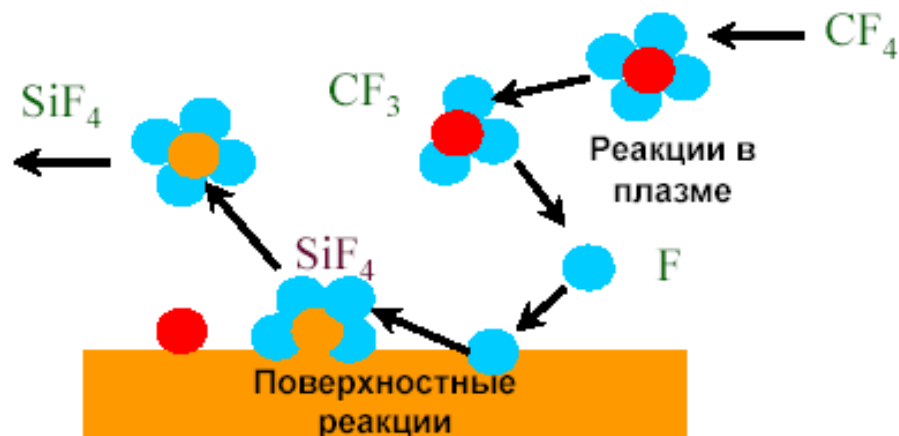
4. Радиационно-Стимулированное



III. Плазмохимическое травление

Реактивное Плазменное:

контакт с плазмой



Радикальное:

плазма – источник радикалов



1. Образование в плазме химически активных ионов и радикалов
2. На поверхности образуется летучий продукт, десорбирующий с поверхности



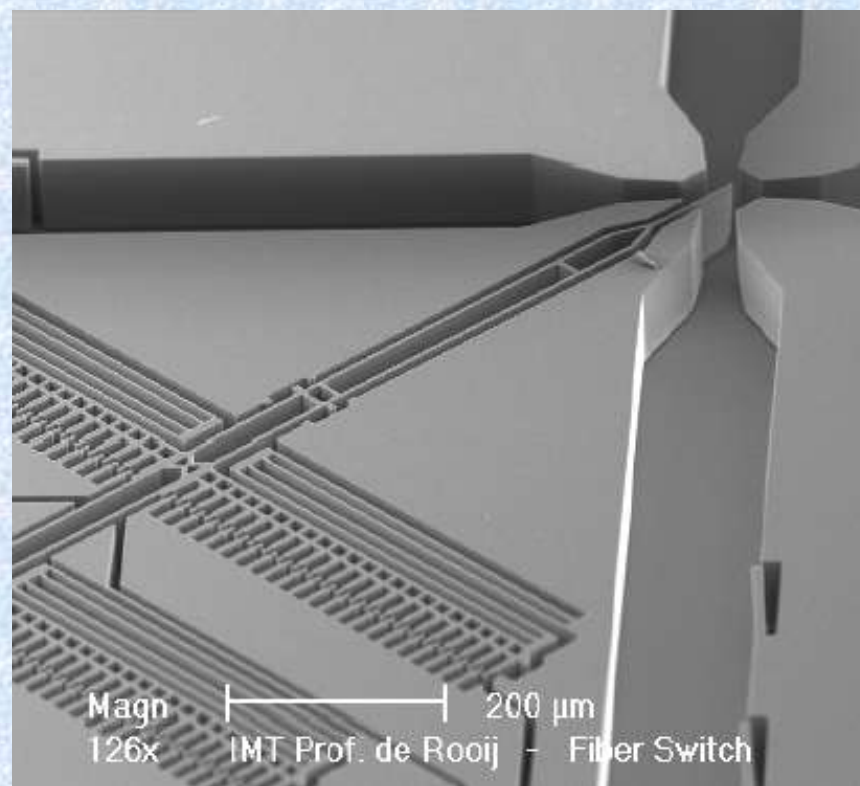
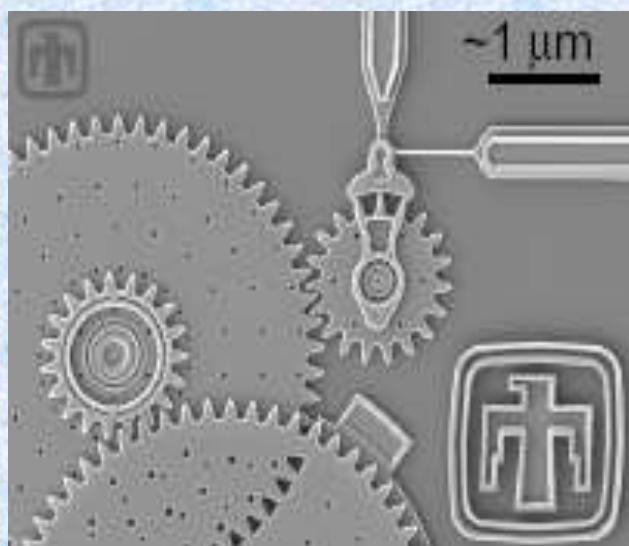
Ионное фрезерование и травление

В микроэлектронике:

планарные многослойные пластины (глубокие канавки)

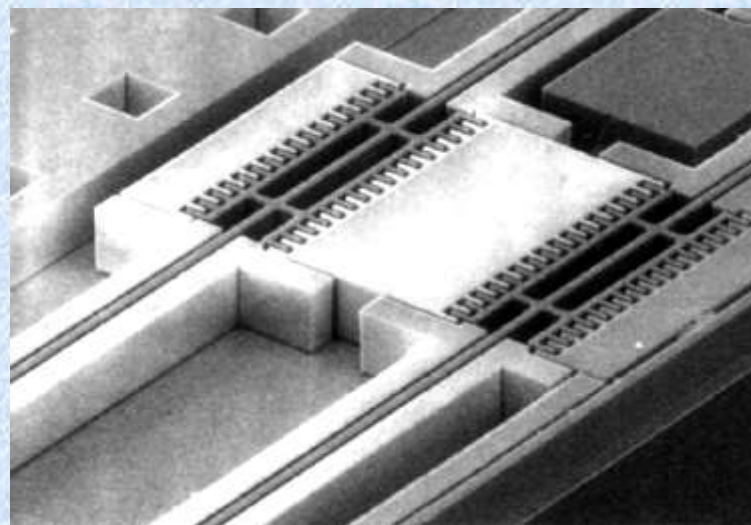
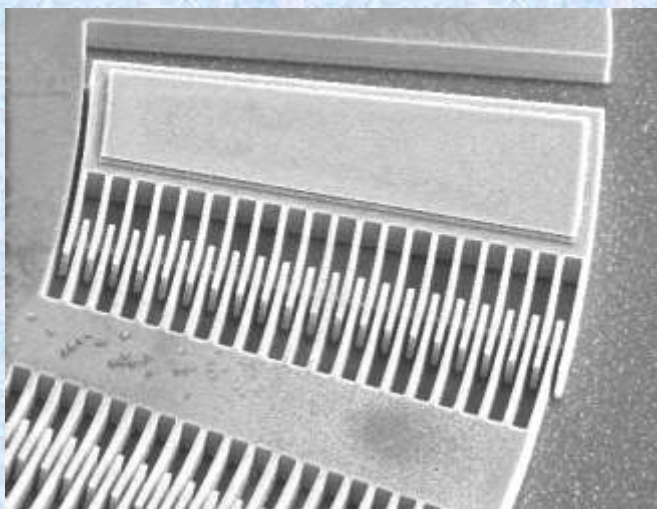
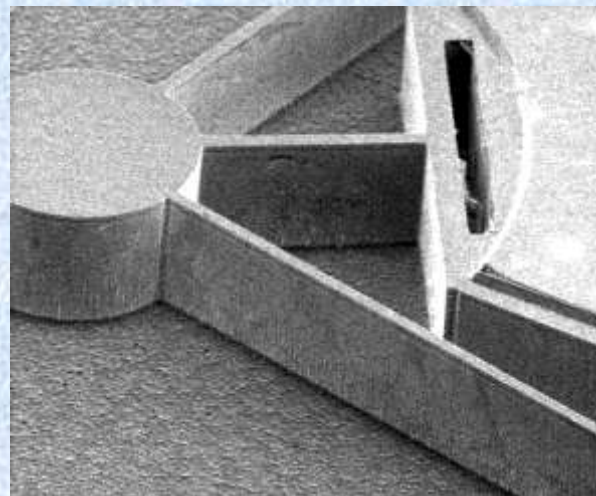
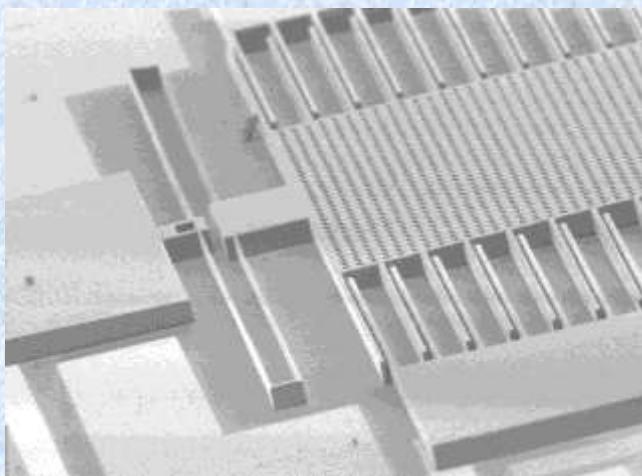
В машиностроении:

канавки и сложные профили





Some Real Pictures





Осаждение пленок

тонкие пленки - < 1 мкм

толстые пленки или покрытия - > 10 мкм

Применяются для изменения:

Электрических свойств: изоляция, проводимость, сверхпроводимость

Оптических свойств: отражение, прохождение.

Зеркала, стекла, антиблик, поглотители

Механических свойств: изнашиваемость и износостойкость, твердые покрытия (TiC , TiN , Al_2O_3 , DLC) низкое трение (MoS_2 , WSe_2),

Химических свойств: коррозионная стойкость, каталит. св-ва

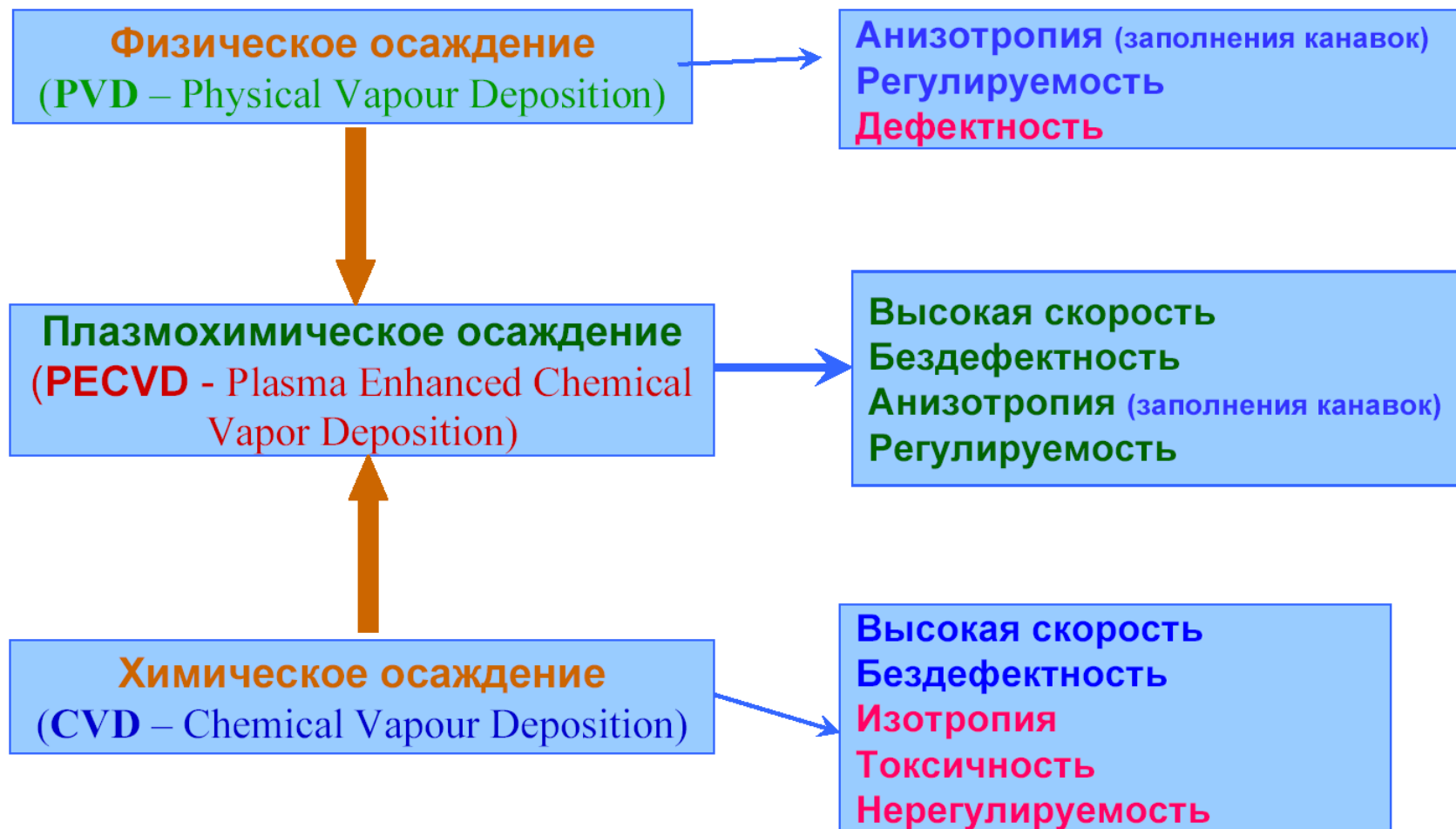
Декоративные покрытия: очки, бижутерия, часы. TiN

В планарной технологии — создание микроэлектрических и микромеханических структур



Методы получения пленок

(Аналогично методам травления)





Применение покрытий в медицине



Антиинфекционные
покрытия (серебро)



Co-Cr и Ti ортопедические приборы
(имплантанты, протезы, соединения)



Металлические покрытия
(при низкой T, на полимеры, металлы, керамику; катетеры, трахеотрубки)



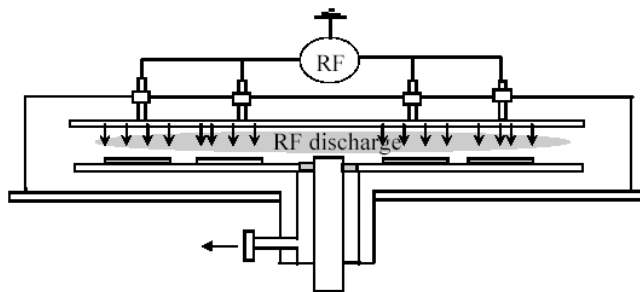
золото, серебро, платина



III. Плазмохимическое осаждение (PECVD)

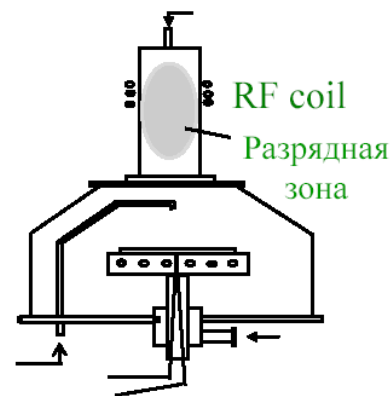
Плазма + реактивный газ

Непосредственное
соприкосновение с плазмой

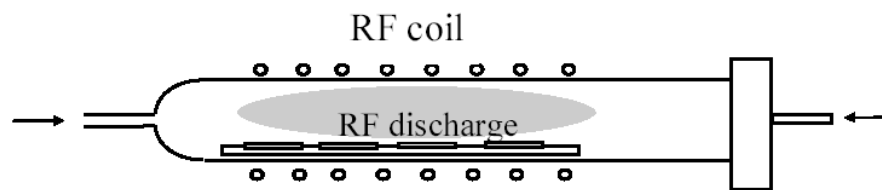


Емкостной реактор

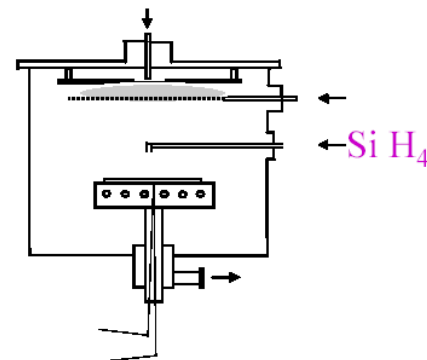
Плазма далеко (Remote)



Индукционный реактор



Индукционный реактор

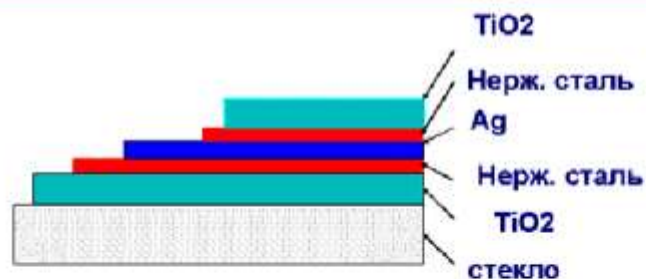


ЭЦР



Линия нанесения покрытий на архитектурные стекла (Leybold)

Структура теплосберегающего покрытия





Электродуговые плазмотроны

"Мультиплаз-2500" –
плазменная горелка и
электронный блок питания
общим весом 6 кг



Электродуговой нагреватель газа
(разработка ИТПМ СО РАН)





Установка «Булат»

для вакуумно-плазменного осаждения покрытий

Максимальная потребляемая мощность, кВт	30
Источники плазмы, шт	3-4
Длительность цикла, мин	70
Скорость осаждения покрытия, мкм/ч	15-50
Максимальные размеры обрабатываемых изделий, мм:	
диаметр	400
высота	600
Масса полезной загрузки, кг	80
Необходимая площадь для размещения установки, м ²	200*176*210
Масса установки, кг	2400

Предназначена для повышения износостойкости режущих инструментов и производительности механической обработки; для защиты изделий от коррозии и увеличения срока службы деталей при воздействии агрессивных сред и высоких температур; для повышения качества и расширения номенклатуры выпускаемых потребительских товаров; для нанесения износостойких покрытий на режущие и штамповые инструменты. Конструкция установки позволяет наносить широкий спектр одно- и многослойных композиционных покрытий.



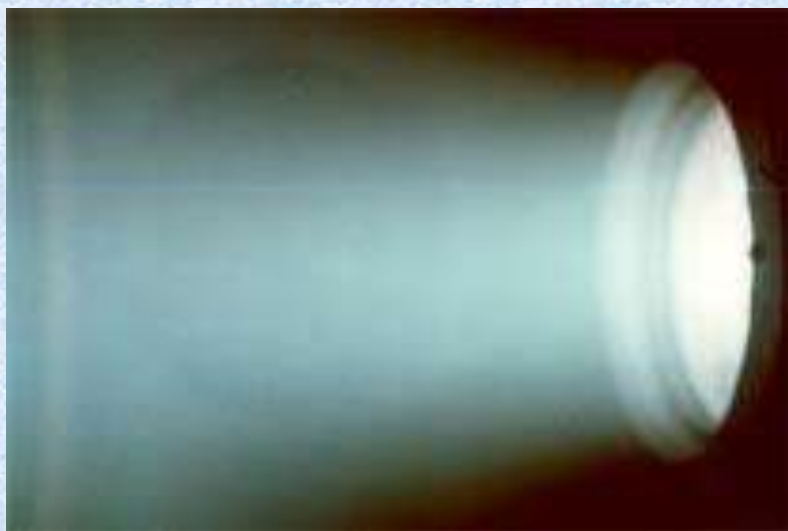
**метод конденсации покрытия
из потока плазмы в условиях
ионной бомбардировки
(метод КИБ)**



Плазменные двигатели

Решаемые задачи:

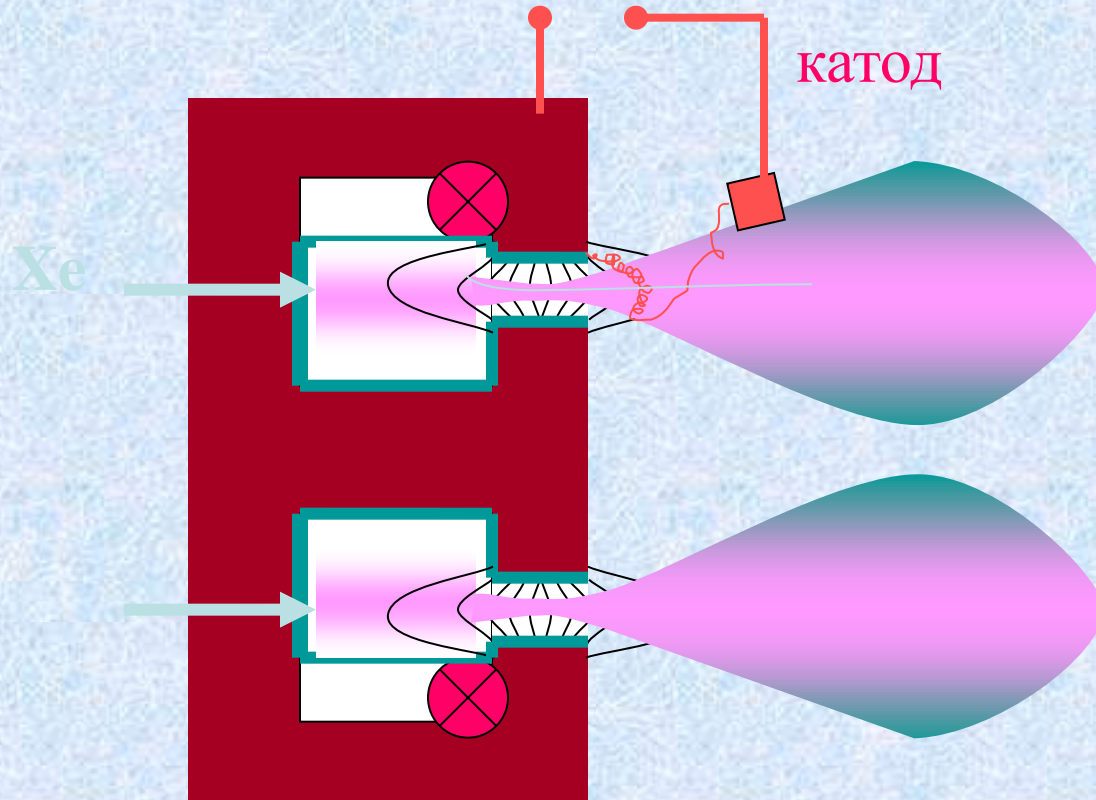
- компенсация аэродинамического сопротивления низкоорбитальных КА ($H = 300-500$ км);
- перевод с низкой опорной орбиты ($H = 300-500$ км);
- на высокую рабочую орбиту ($H = 700-1500$ км)
- коррекция орбиты легких геостационарных КА (до 1000 кг).



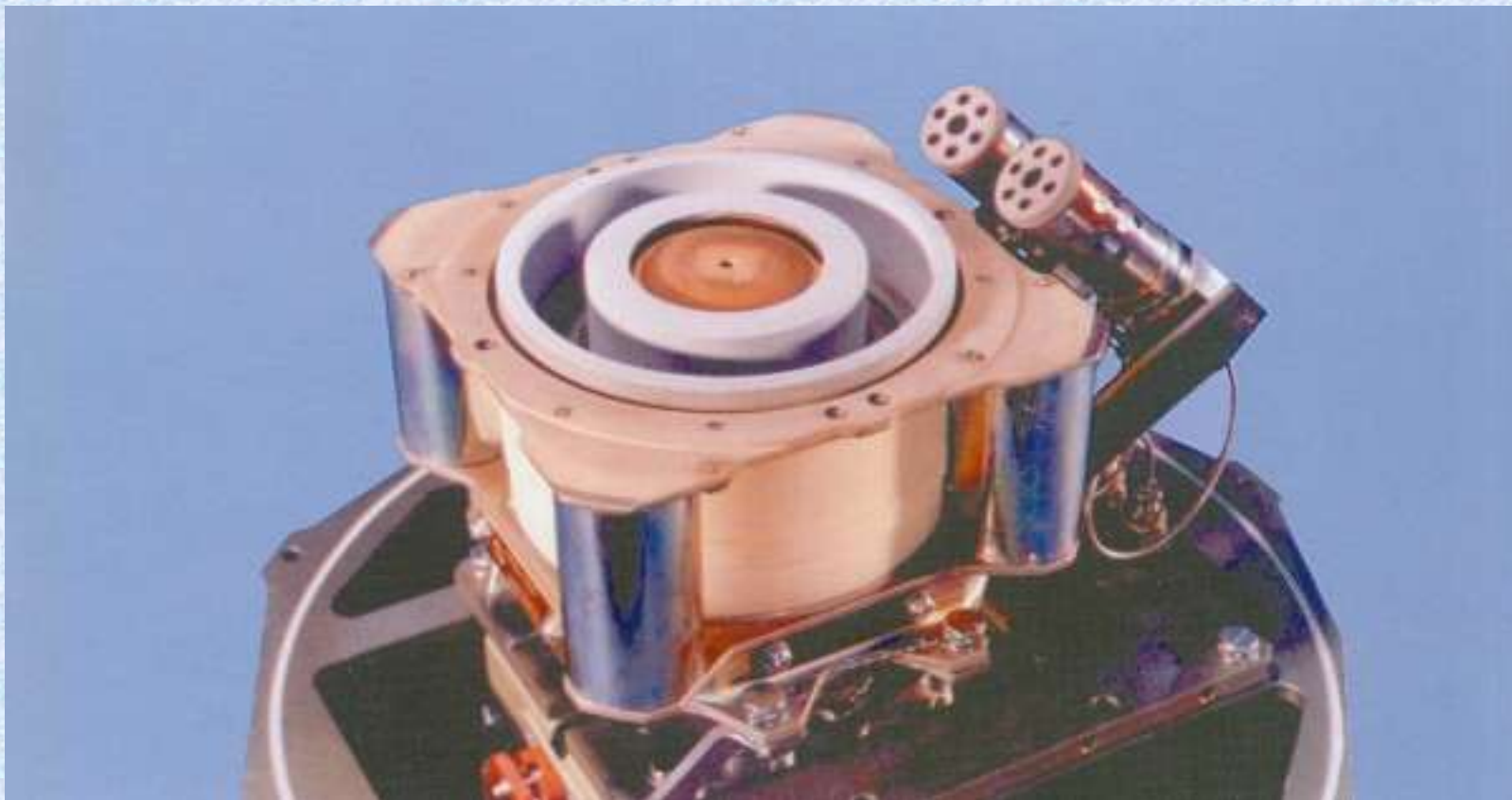
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША



Принцип работы плазменного двигателя



Электроны замагничены, а ионы - нет



Стационарный плазменный двигатель СПД-100, предназначен для корректировки орбиты космических аппаратов типа "Экспресс-АМ", "Галс" и др.



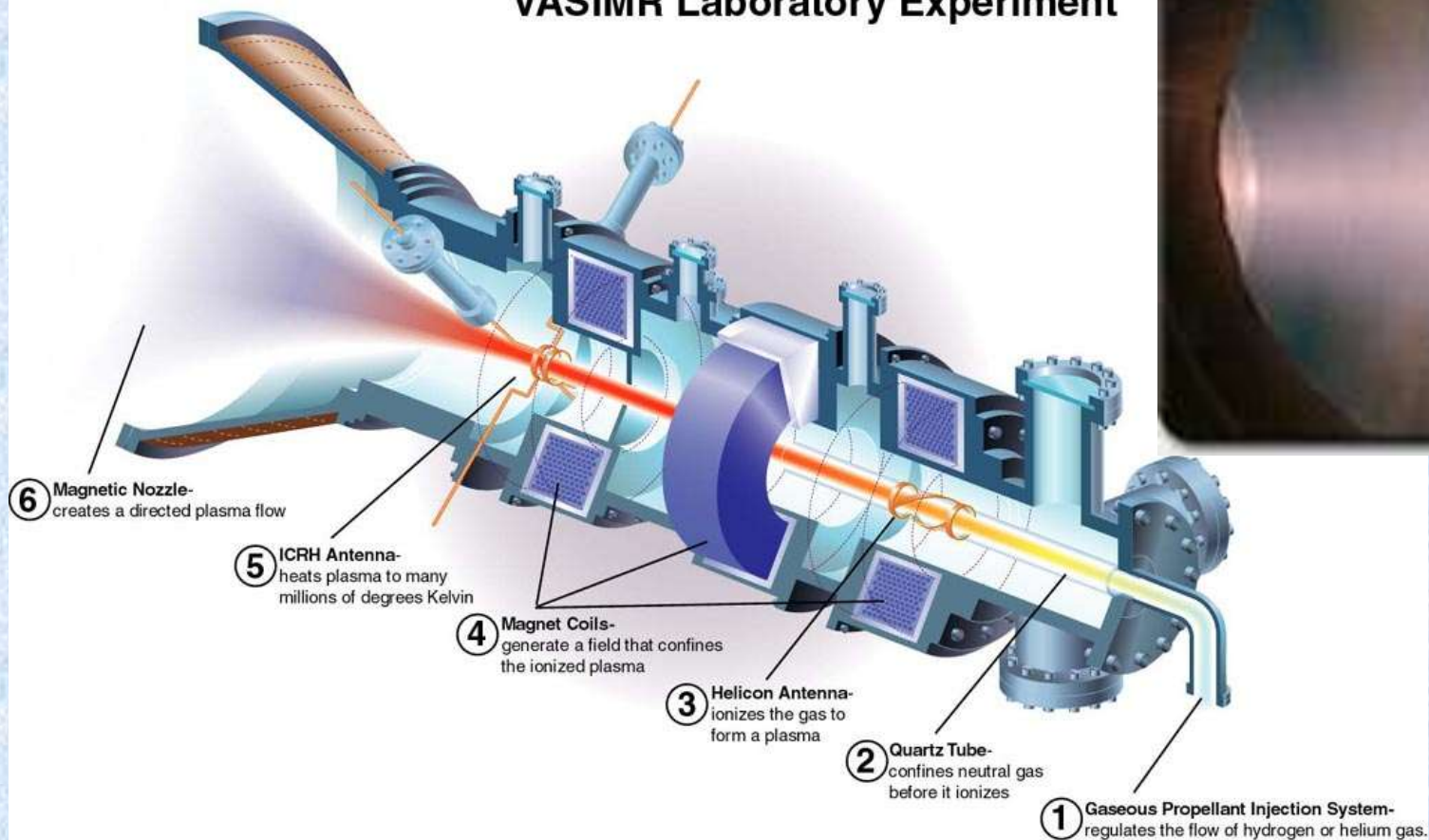
**Двигатель
системы
ориентации
космического
летательного
аппарата**



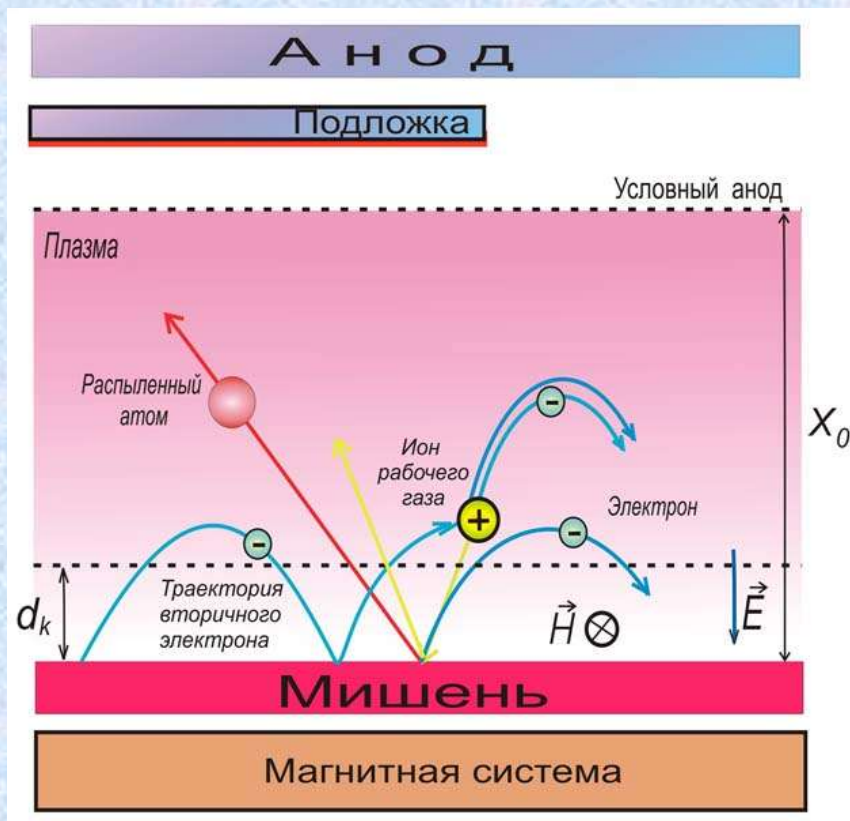
Разработка плазменного двигателя для полета на Марс

The lab director is NASA astronaut Dr. Franklin Chang-Diaz.

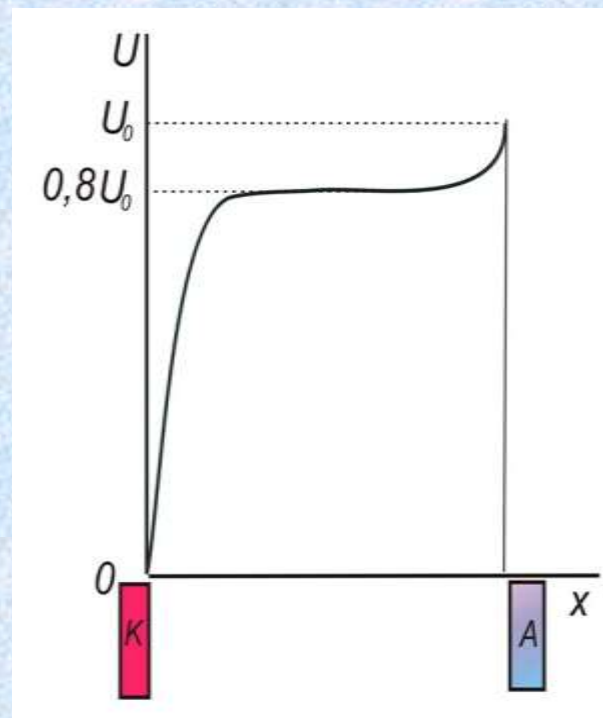
VASIMR Laboratory Experiment



Плазменное нанесение покрытий Принцип действия магнетрона



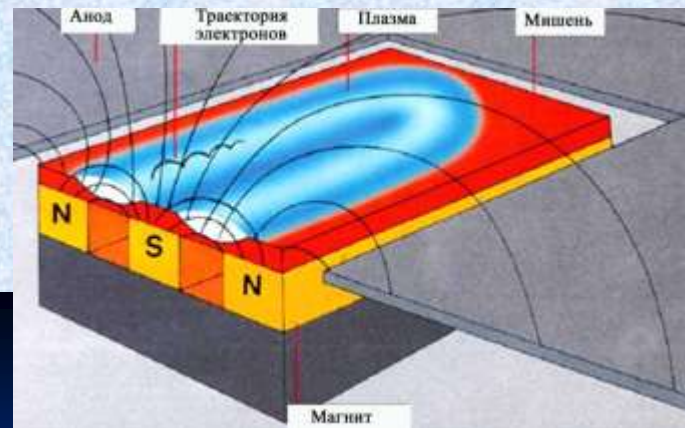
Процессы в диодном пространстве



Пространственное распределение потенциала в магнетронном диоде

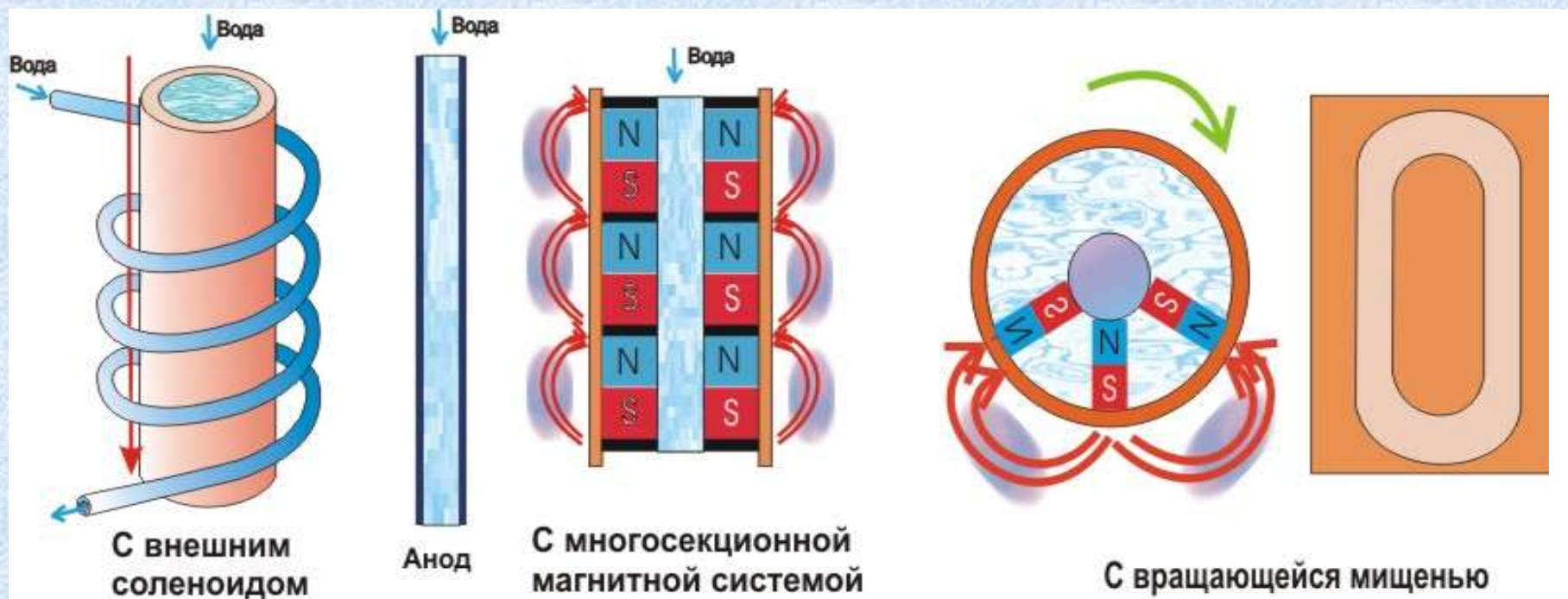


Планарный магнетрон



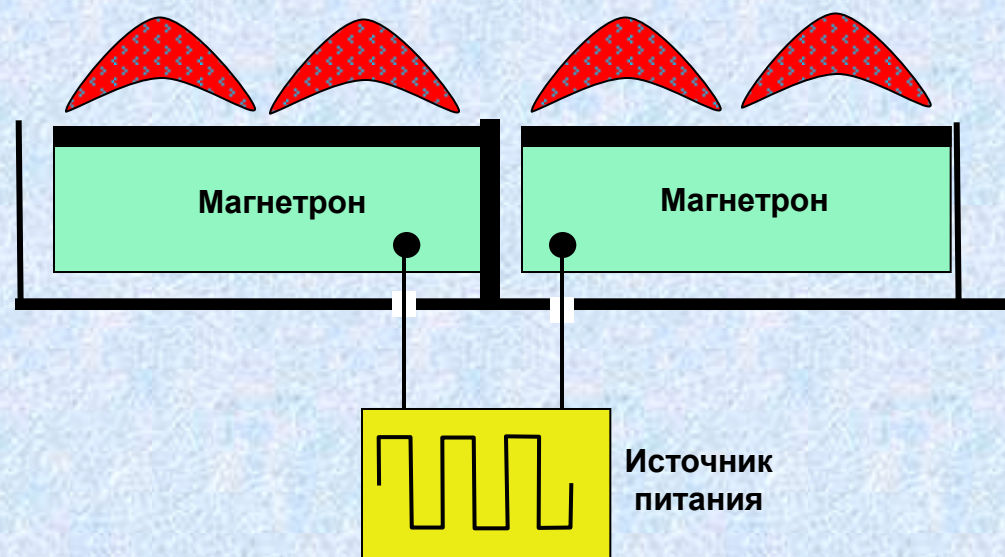


Цилиндрические магнетроны





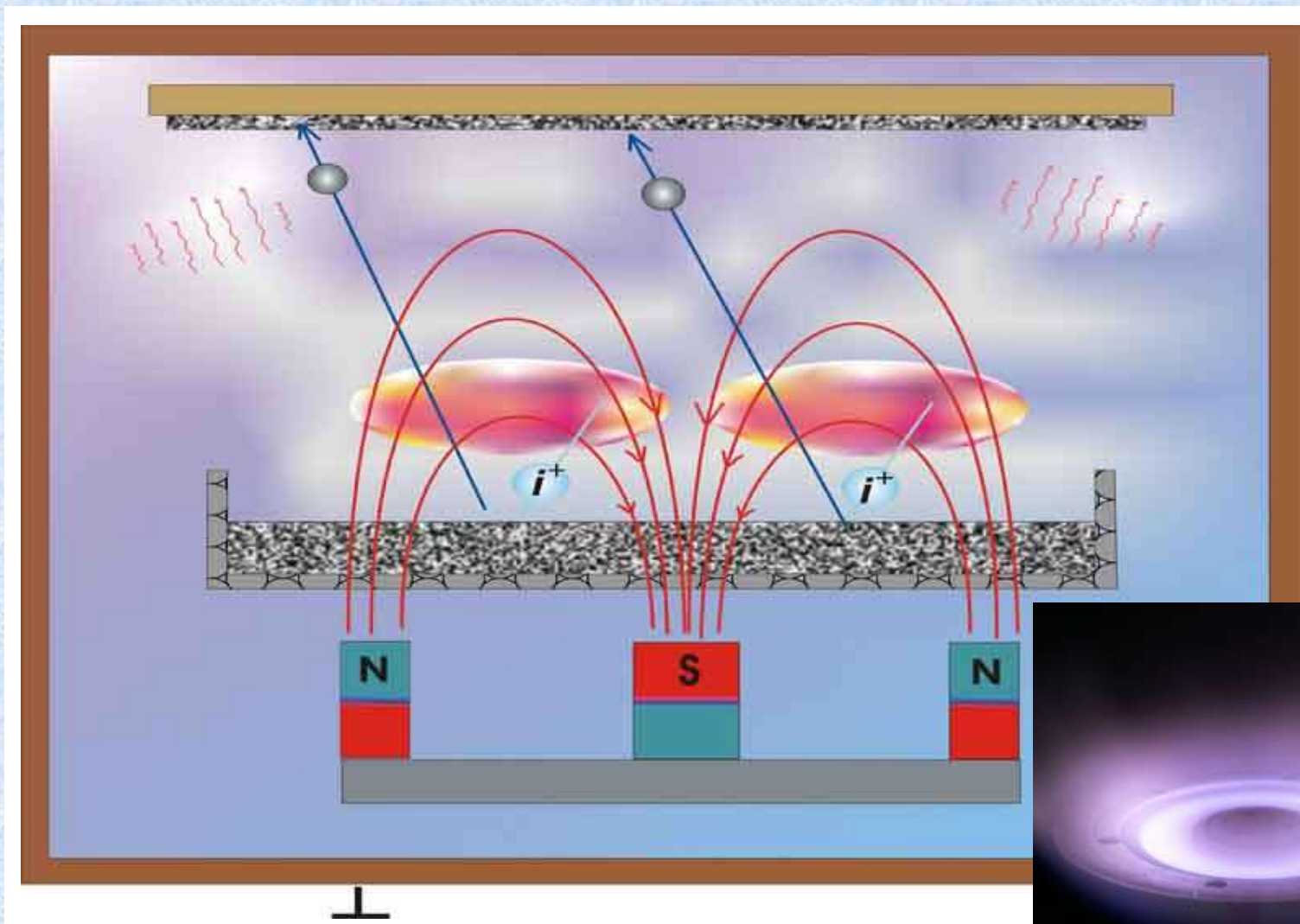
Конструкция дуального магнетрона



Назначение – нанесение диэлектрических покрытий в среде реактивного газа

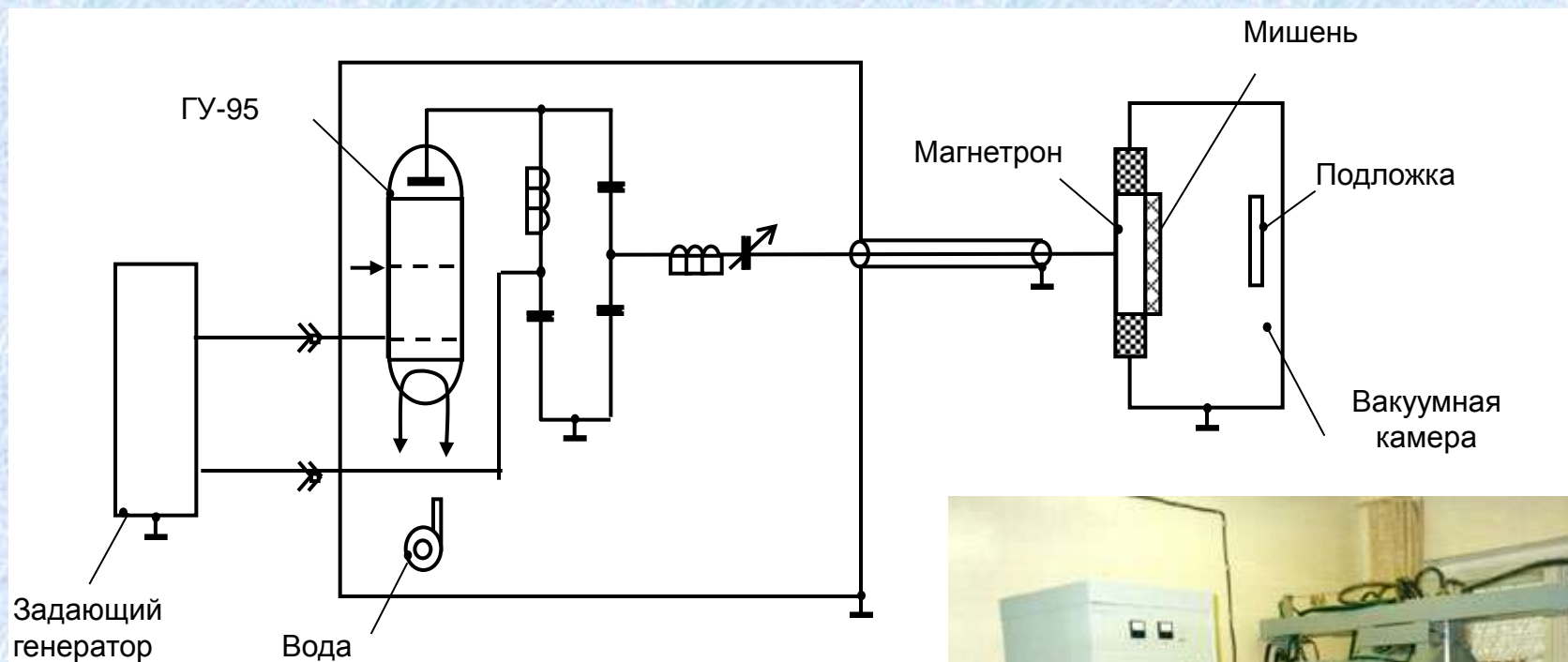


Магнетрон с жидкофазной мишенью





ВЧ-магнетрон



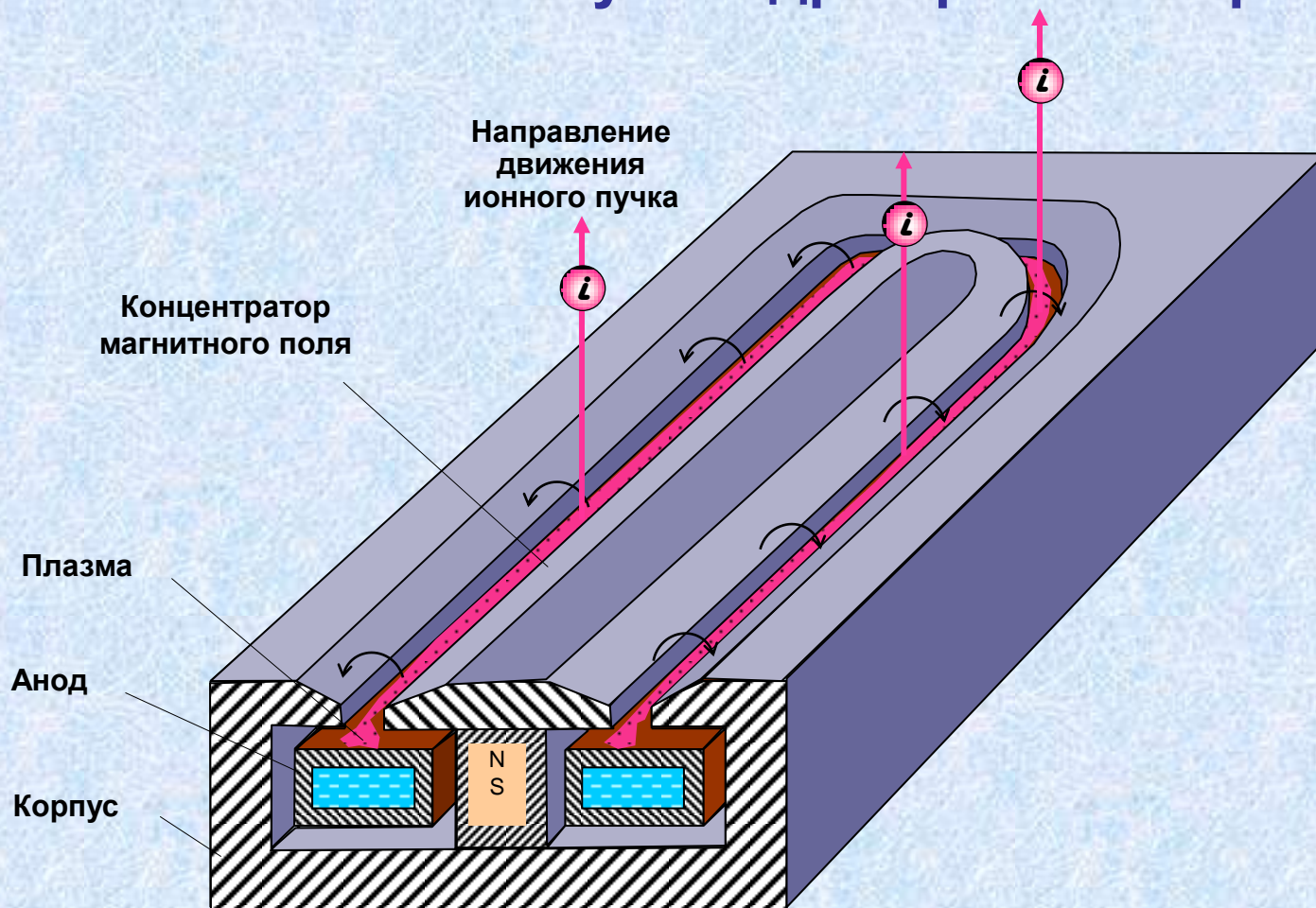
$$F = 13,56 \text{ МГц}, \quad P \sim 1-10 \text{ кВт}$$

Основное назначение – напыление покрытий из диэлектрических мишеней



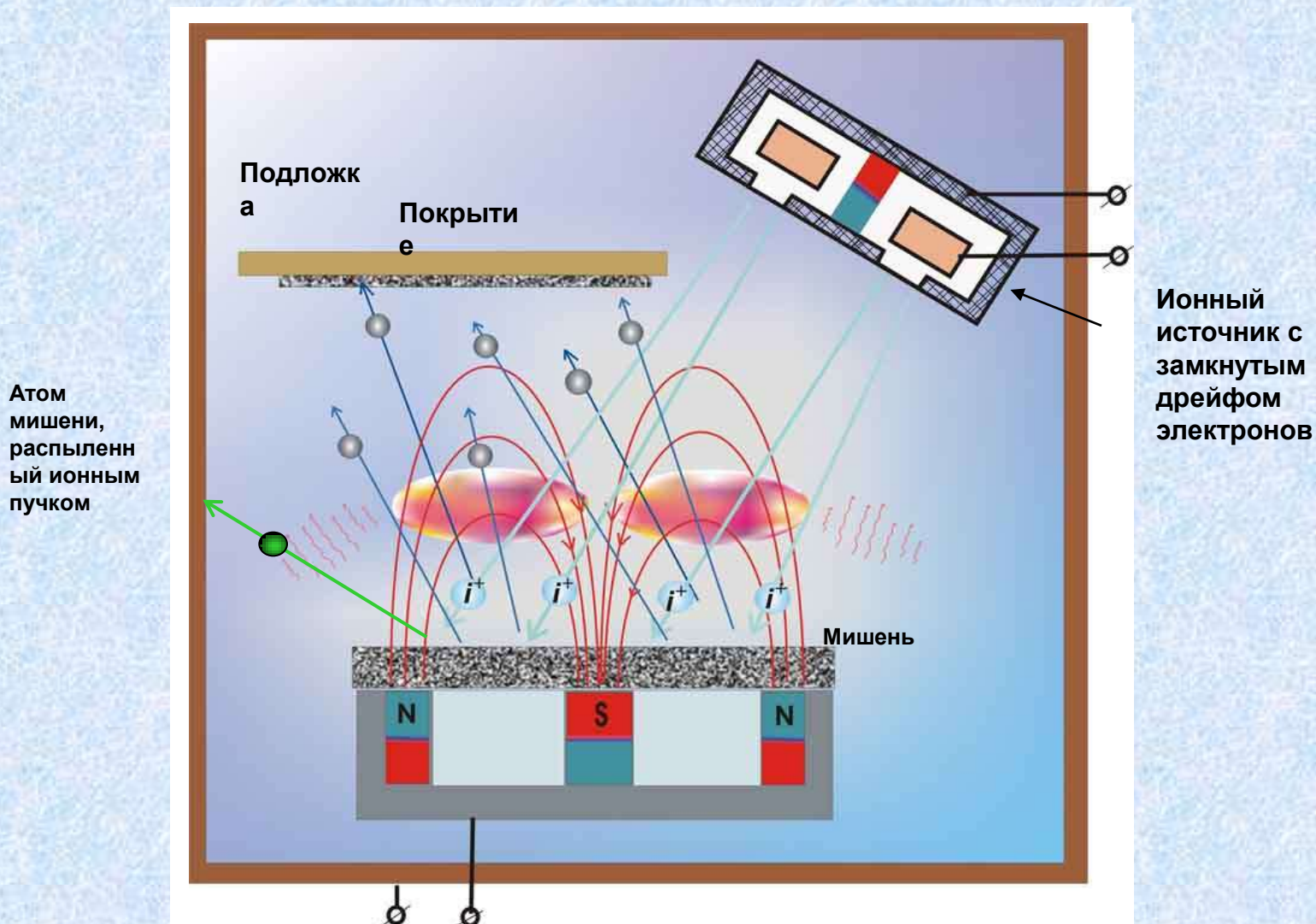


Источник ионов с замкнутым дрейфом электронов





Магнетрон с ионным ассистированием





Установка с магнетронными источниками плазмы «Яшма»





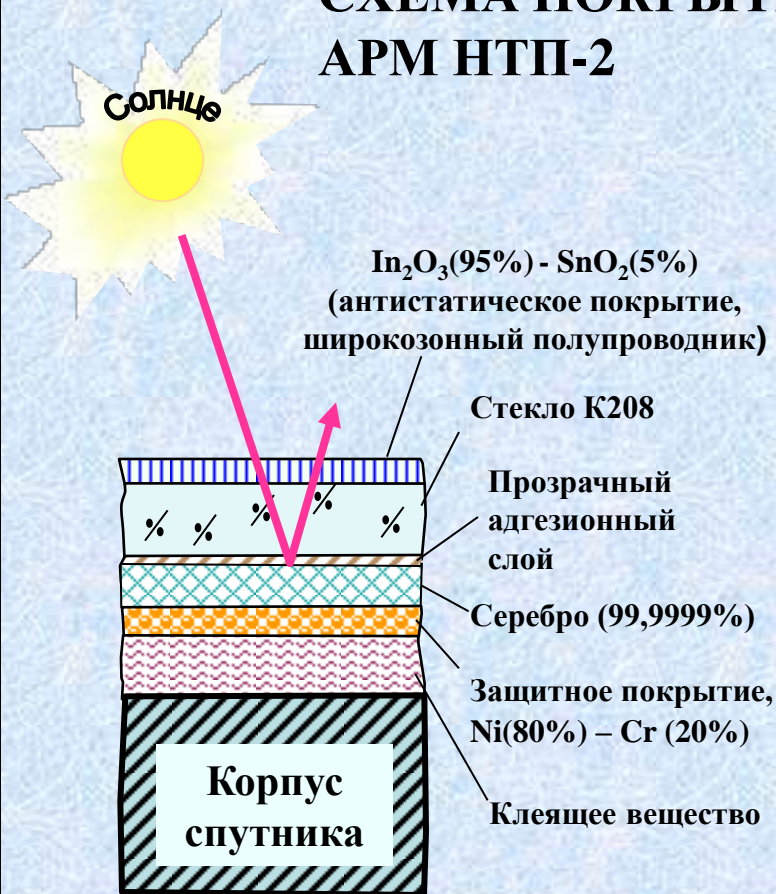


Лабораторная магнетронная установка «Яшма-2»





СХЕМА ПОКРЫТИЯ И ВНЕШНИЙ ВИД УСТАНОВКИ АРМ НТП-2



Исполнители: Научно-исследовательский институт ядерной физики,
Томский политехнический университет

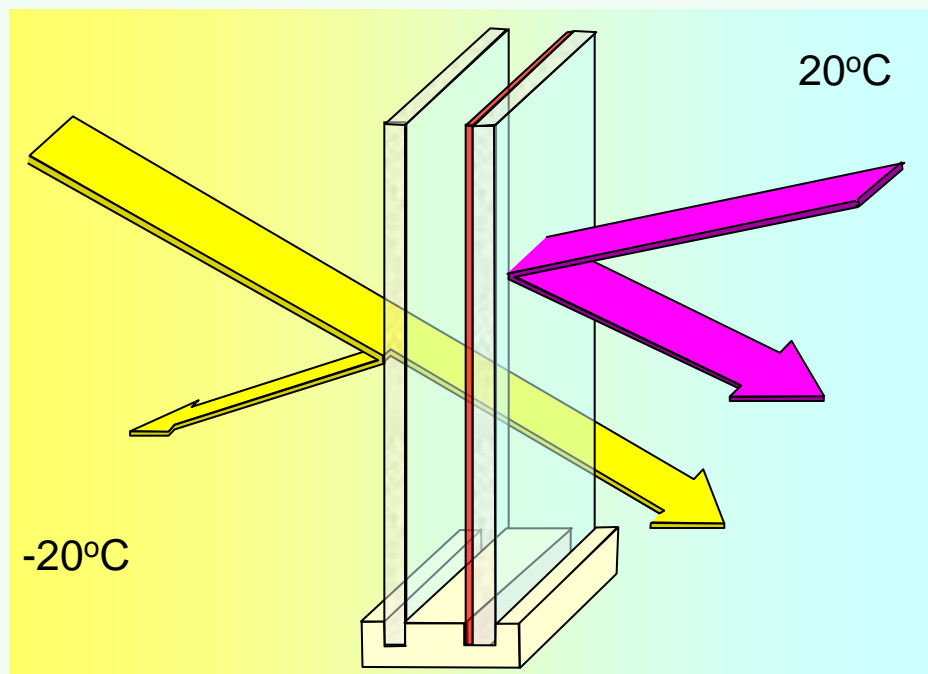


ПЛАЗМЕННЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

- 1. Разработаны технология и установка для производства защитных элементов искусственных спутников Земли на основе многослойных тонкопленочных плазменных покрытий.**
- 2. Подложка – стекло, число слоев – 4, их суммарная толщина – 1500 Å. Годовая производительность – около 100 тысяч элементов. На один спутник уходит примерно 8-9 тысяч элементов.**
- 3. Технология и установка внедрены в 2007 году в НПО прикладной механики (г. Железногорск Красноярского края). В результате выход годных изделий увеличился с 5-7 до 95%, а производительность – примерно в 5 раз.**
- 4. В октябре 2007 г. запущен первый спутник системы ГЛОНАСС, оборудованный этими защитными покрытиями**

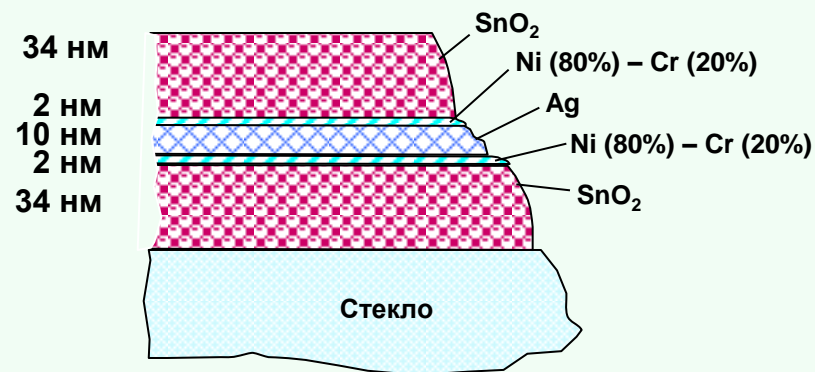


Низкоэмиссионные плазменные покрытия на стекле



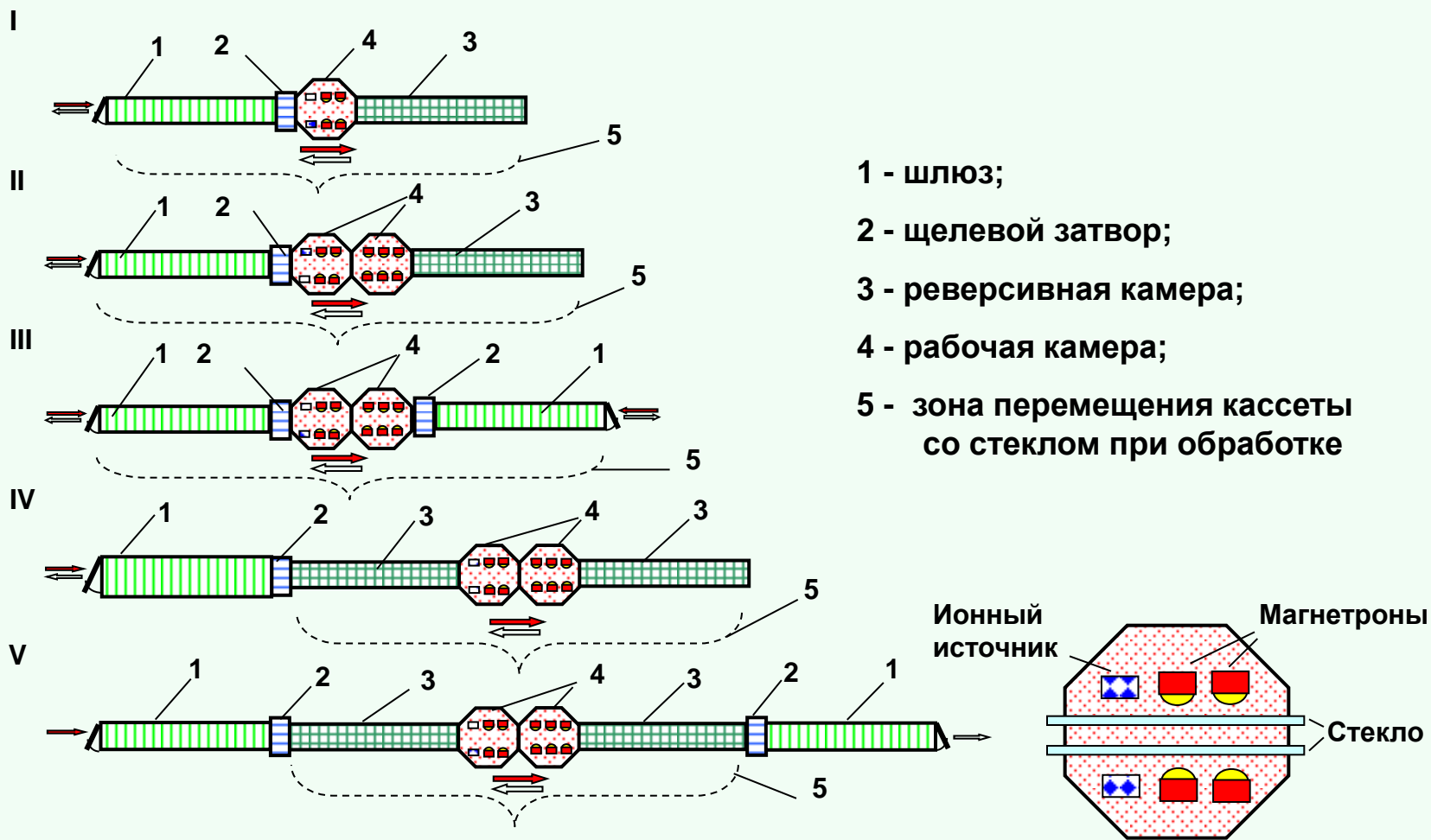
Стеклопакет

Структура покрытия



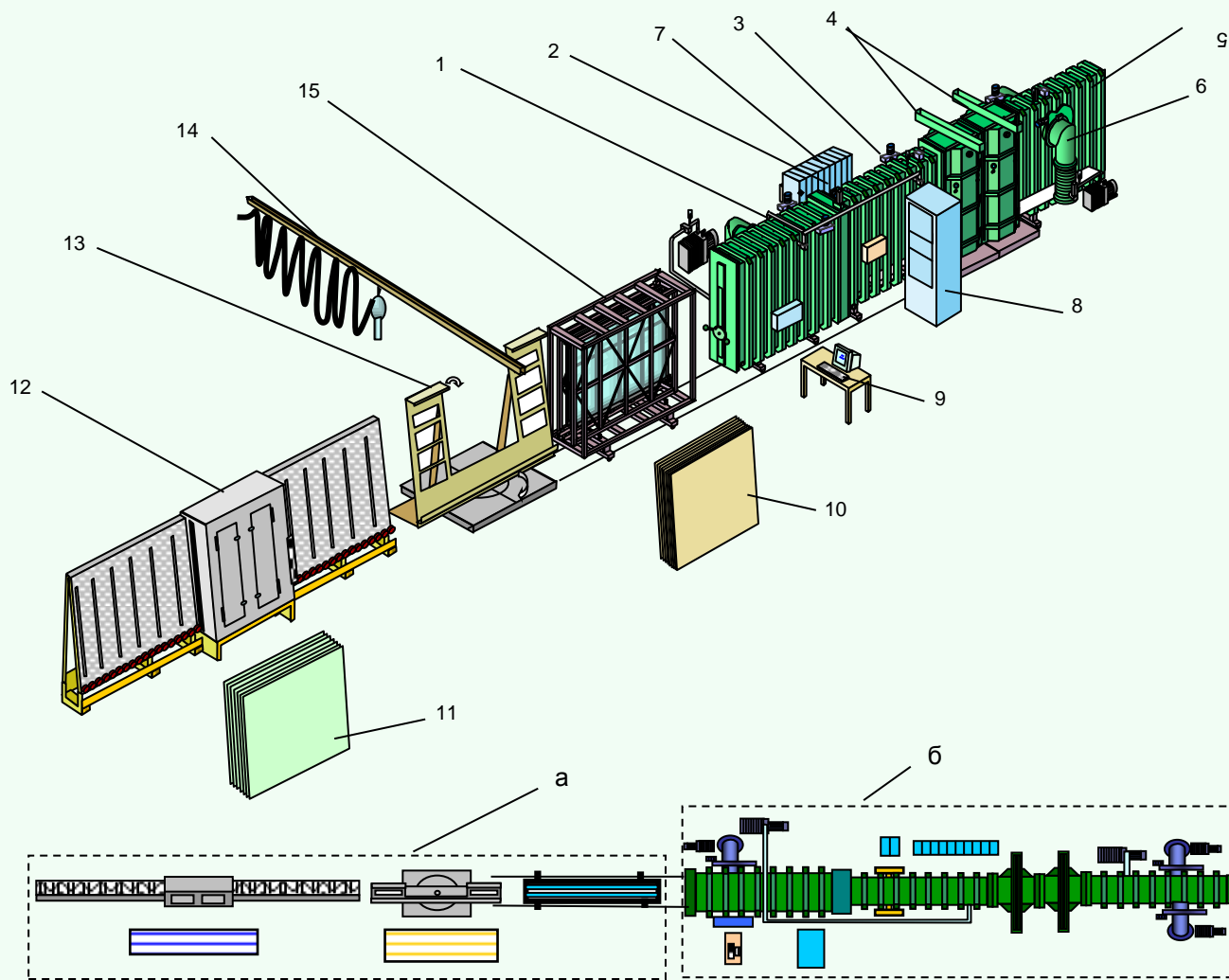


Архитектура двухрядных плазменных установок серии «Опал»



- 1 - шлюз;
- 2 - щелевой затвор;
- 3 - реверсивная камера;
- 4 - рабочая камера;
- 5 - зона перемещения кассеты со стеклом при обработке

Технологическая линия на базе установки «ОПАЛ-3Про»



- 1 - шлюз;
 - 2 - щелевой затвор;
 - 3 - реверсивная камера I;
 - 4 - рабочая камера;
 - 5 - реверсивная камера II;
 - 6 - диффузионный насос;
 - 7 - источники эл. питания;
 - 8 - пульт управления;
 - 9 - рабочее место оператора;
 - 10 - стекло, прошедшее обработку;
 - 11 - стекло необработанное;
 - 12 - моечная машина;
 - 13 - разворотное устройство;
 - 14 - грузоподъемное устройство;
 - 15 - каретка с кассетами;
- а) зона подготовки стекла;
- б) зона плазменной обработки



The Amethyst-3 Setup



Intended for
glass
treating.

Maximal size
of glass
sheets is
1600x2500
mm.

Productivity
is 15 sq.
meters per
hour.



The Opal-2 Plasma Setup

Intended for
Low
Emission
Coating on
glass.

Maximal size
of glass
sheets is
1600x2500
mm.

Productivity
is 25 sq.
meters per
hour.



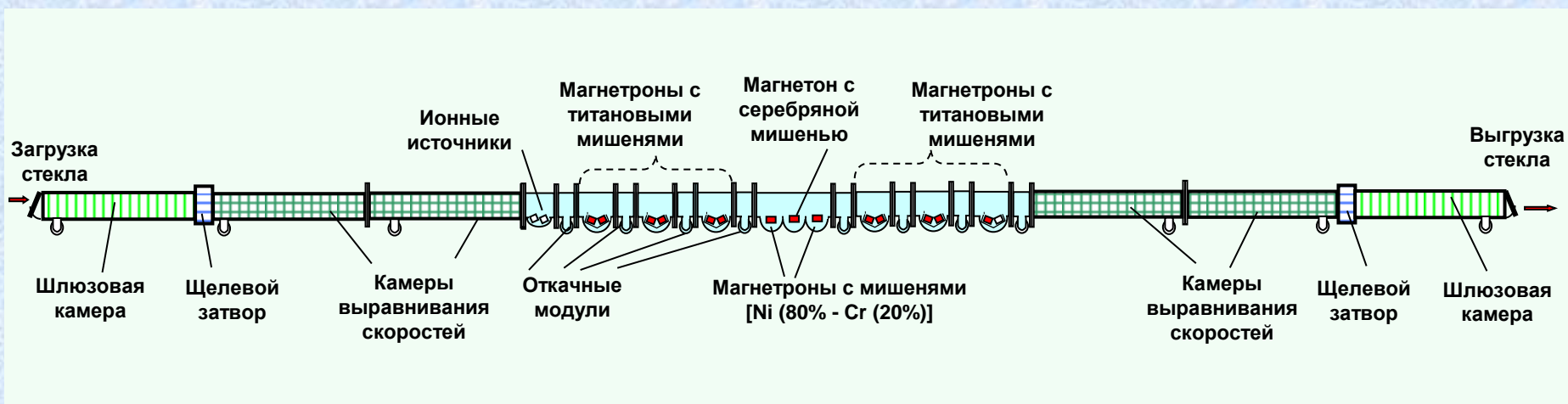


Установка «Опал-3 ПРО»





Архитектурная схема установки «Опал-5» (корпусные изделия)



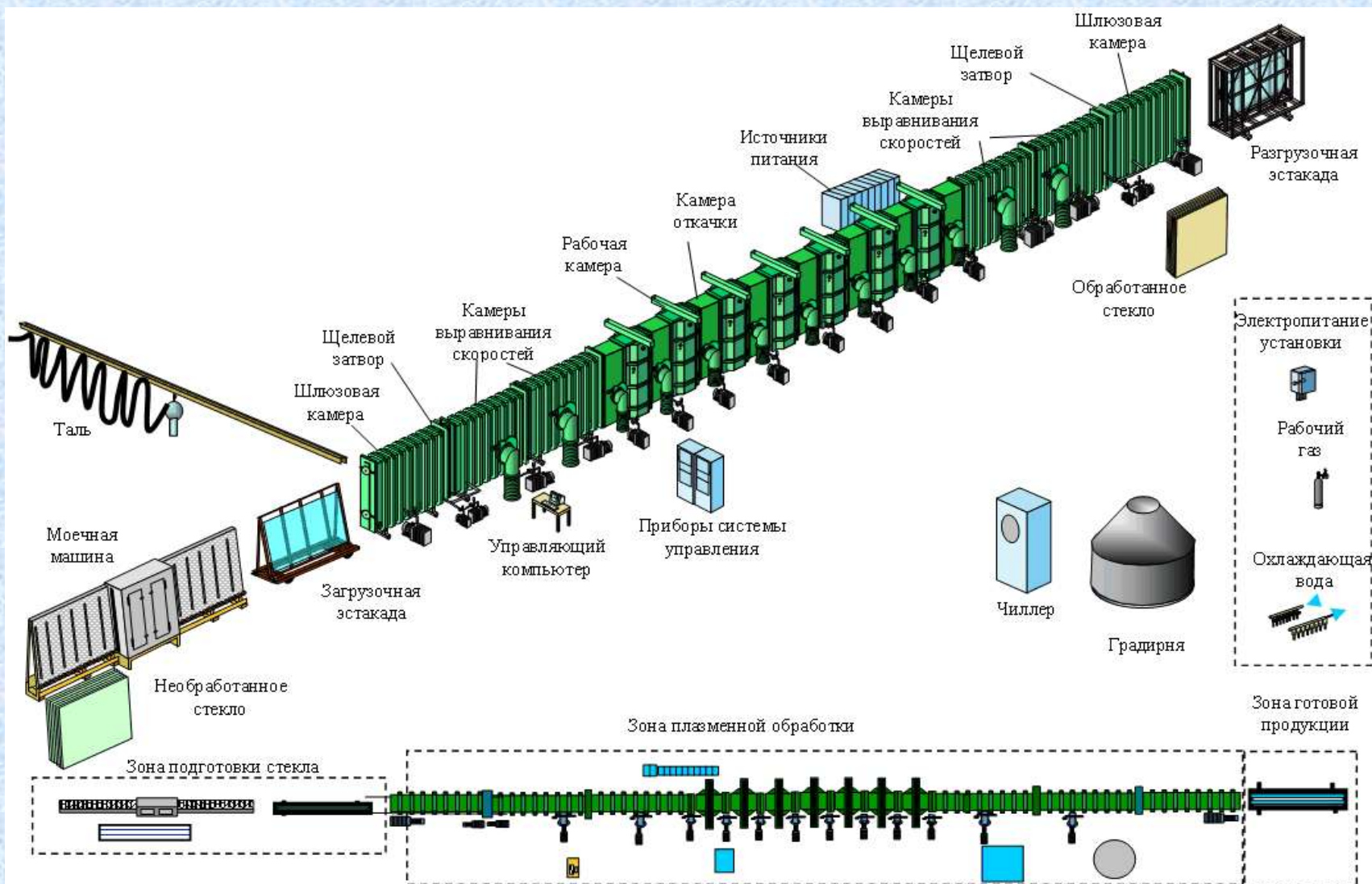
Данная конфигурация предназначена для нанесения пятислойных низкоэмиссионных покрытий типа

TiO_2 (32 нм) – [Ni (80%) – Cr (20%)](2 нм) – Ag (10 нм) – [Ni (80%) – Cr (20%)] (2 нм) – TiO_2 (32 нм).

В случае, если требуется наносить более простые пленочные структуры, у освободившихся магнетронов заменяются мишени.



Технологическая линия на базе установки «Опал-5»



Автоматизированная установка для нанесения плазменных покрытий на бортовые элементы космических летательных аппаратов

На установке реализованы шесть новых технологий нанесения плазменных покрытий

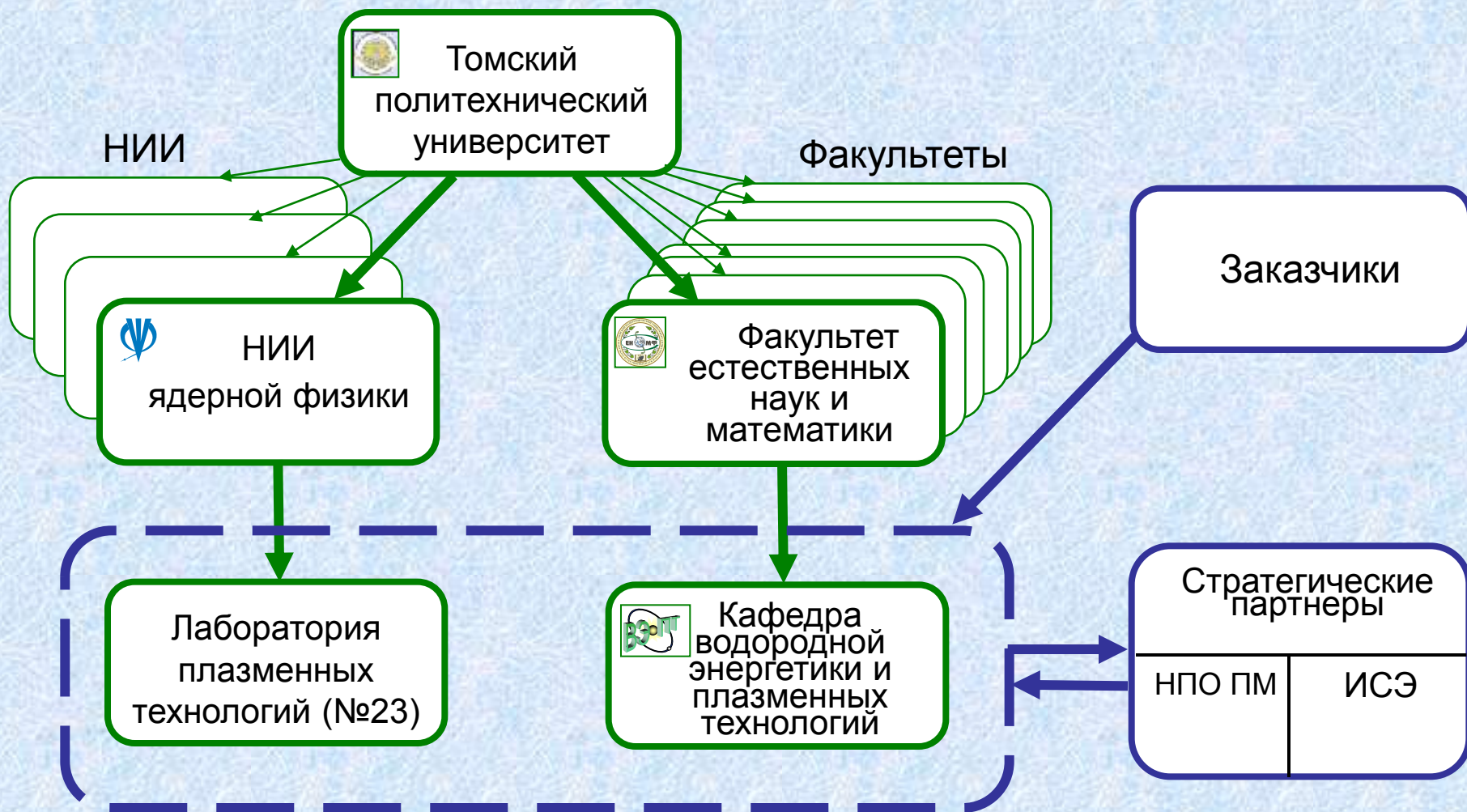






Томский политехнический университет

Место НИИ ЯФ и кафедры ВЭПТ в структуре ТПУ





Кафедра водородной энергетики и плазменных технологий ЕНМФ + лаборатория 23 НИИ ЯФ

Число сотрудников – 13 + 20. Число студентов - около 80.

Профессоров и докторов наук – 4, в т.ч. акад. РАН

Накоряков В.Е. Доцентов и кандидатов наук – 5.

Программа подготовки бакалавров

Магистерские программы:

1. Физика плазмы
2. Пучковые и плазменные технологии.
3. Водородная энергетика



Организации - партнёры:

- - ОАО «Катод» (Новосибирск, Россия);
- - Plasma Tech. Co , Ltd (Южная Корея);
- - Preciosa, Ltd (Чехия);
- - ITAC Ltd (Япония);
- - Sunic Syst. Ltd (Южная Корея);
- - Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия);
- - Информационные спутниковые системы (Красноярский край, Россия);
- - Argor- Aljiba, Ltd (Швейцария);
- - Сибирский химический комбинат (Томская обл., Россия) и др.



СПАСИБО !

