Приложения пучков ускоренных тяжелых ионов

Серпионов Г.В., Нечаев А.Н., Скуратов В.А., Апель П.Ю.

Центр прикладной физики ЛЯР им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ

Докладчик к.б.н. Серпионов Г. В.

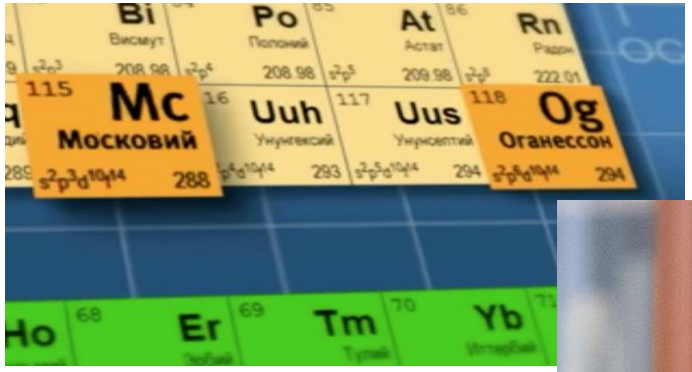
Миссия и Технические возможности Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова

- **U400M, 4m heavy ion cyclotron, E = 6 - 55 MeV/n**
- **U400, 4m heavy ion cyclotron, E = 0.5 - 20 MeV/n**
- **IC100, 1m heavy ion cyclotron, E = 1.2; 0.5 MeV/n**
- **Microtron MT25, electron accelerator, E = 25 MeV**

Основана в мае 1957

Научная программа ЛЯР включает эксперименты по синтезу и исследованию ядерно-физических и химических свойств новых сверхтяжелых элементов, исследование реакций термоядерного синтеза и многоядерной передачи при столкновении тяжелых ионов; изучение свойств ядер на границе стабильности нуклонов и механизмов ядерных реакций с ускоренными радиоактивными ядрами; взаимодействие тяжелых ионов с различными материалами (полимерами, полупроводниками, электронными компонентами космической техники и др.).

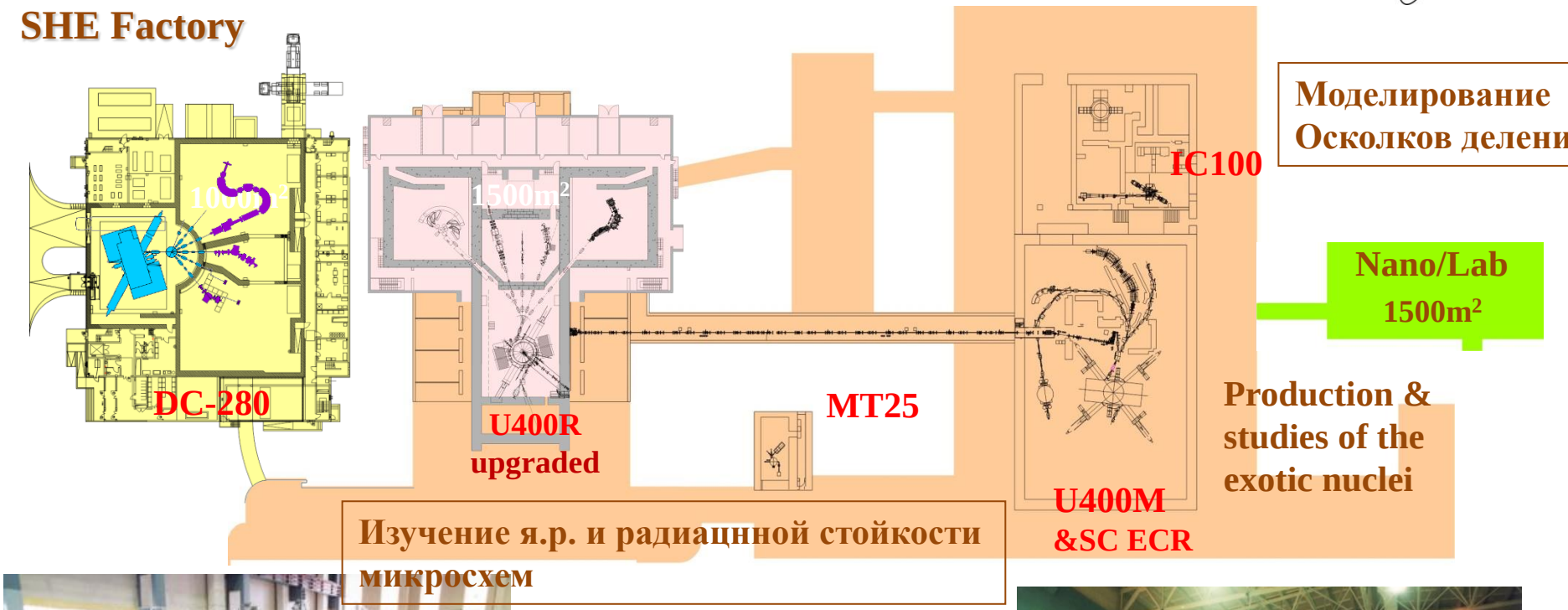
Получение новых элементов



Element list:

104 – Rutherfordium (Rf)
105 – Dubnium (Db)
106 – Seaborgium (Sg)
108 – Hassium (Hs)
112 – Copernicium (Cn)
113 – Nihonium (Nh)
114 – Flerovium (Fl)
115 – Moscovium (Mc)
116 – Livermorium (Lv)
117 – Tennessine (Ts)
118 – Oganesson (Og)

FLNR (JINR) cyclotron complex



U400R - U400M
Accelerator Complex

FLNR cyclotron complex

U400M, E = 4 ÷50 MeV/n
Li ÷ Bi

U400 , E = 0.5 ÷ 20 MeV/n
Li ÷ Bi

IC100 , E = 1.2 MeV/n
B ÷ W

DC-280

Microtron MT25

Основная цель прикладных задач ЛЯР: поиск приложений пучков ускоренных тяжелых ионов для решения производственных и инновационных задач!

ЦЕНТР ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ,

ЛЯР им. Г.Н. Флерова

Направление 1
Быстрые тяжелые ионы в радиационном материаловедении

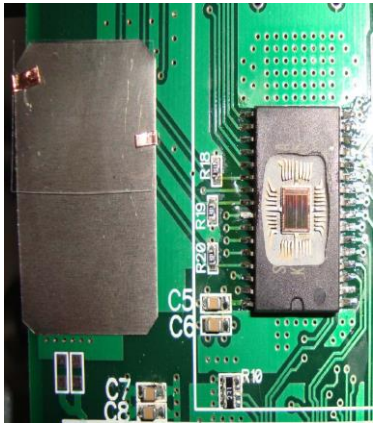
Направление 2
Гамма-активационный и рентгеновский анализы для геологии, изучения материалов и окружающей среды: изучение урана, тория и продуктов их распада

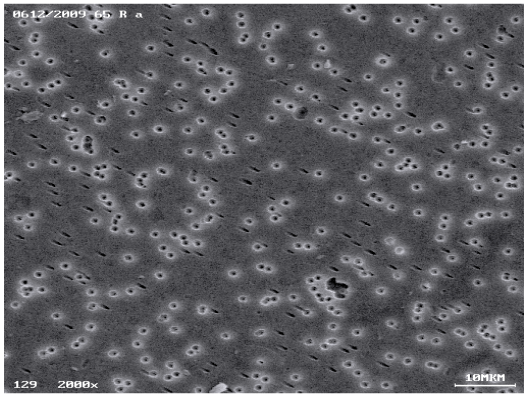
Направление 3
Производство трековых мембран и ионно-трековые технологии

Быстрые тяжелые ионы в радиационном материаловедении:

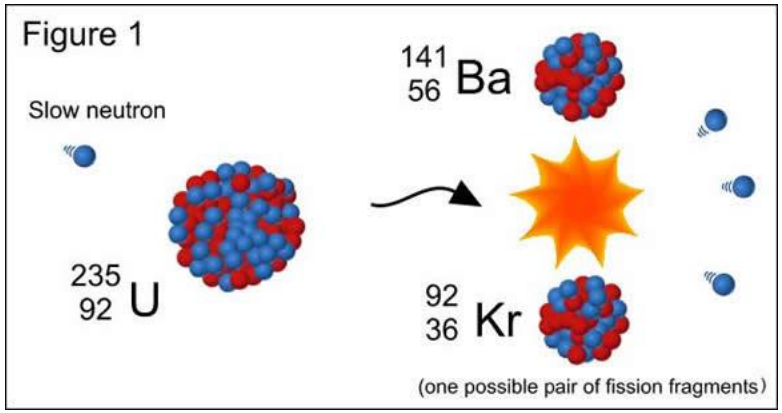
Тестирование микроэлектроники с помощью быстрых ионов и моделирование галактических космических лучей

Моделирование осколков деления урана для разработки, определения характеристик и испытаний новых материалов для атомной промышленности





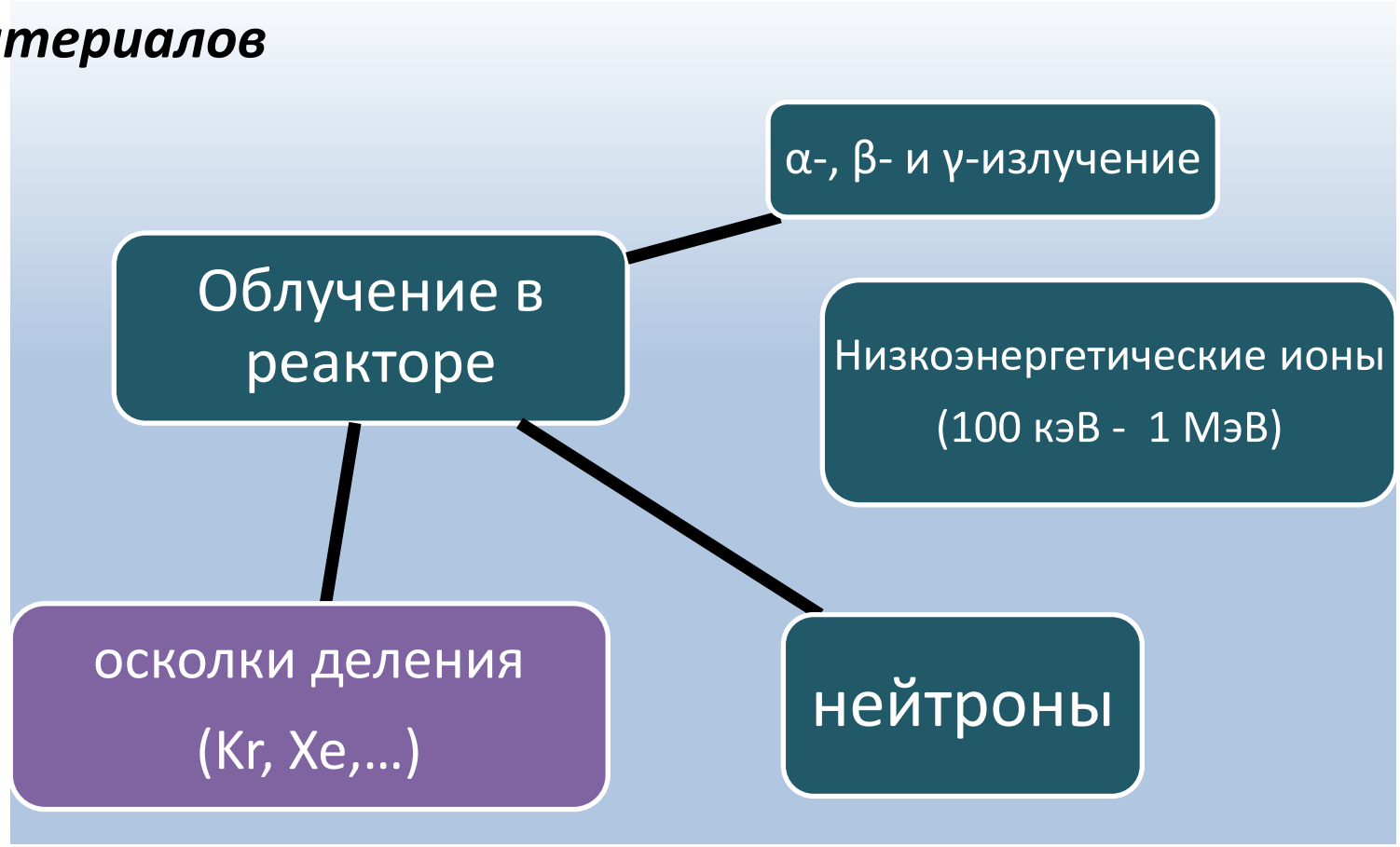
РЭМ полимерного трекового детектора-свидетеля



Состав галактических космических лучей :83% протонов13% альфа-частиц3% электронов1% тяжелых ионов (Z>4)

Наиболее распространенные осколки деления в атомных реакторах это Kr и Xe

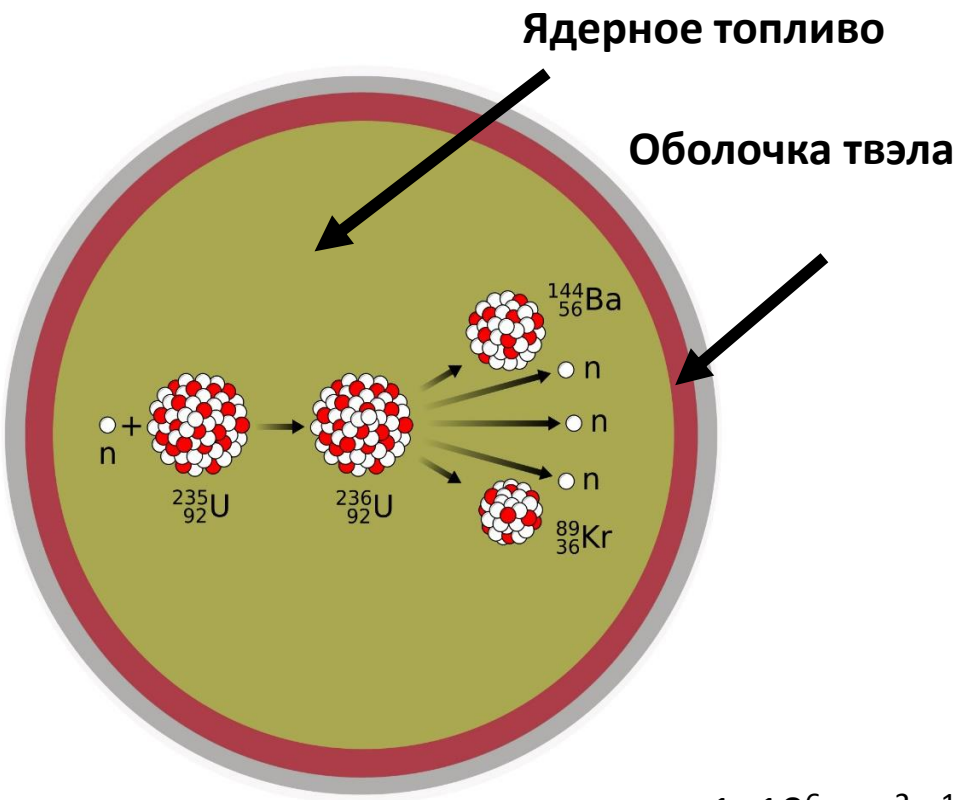
Исследование радиационной стойкости реакторных материалов

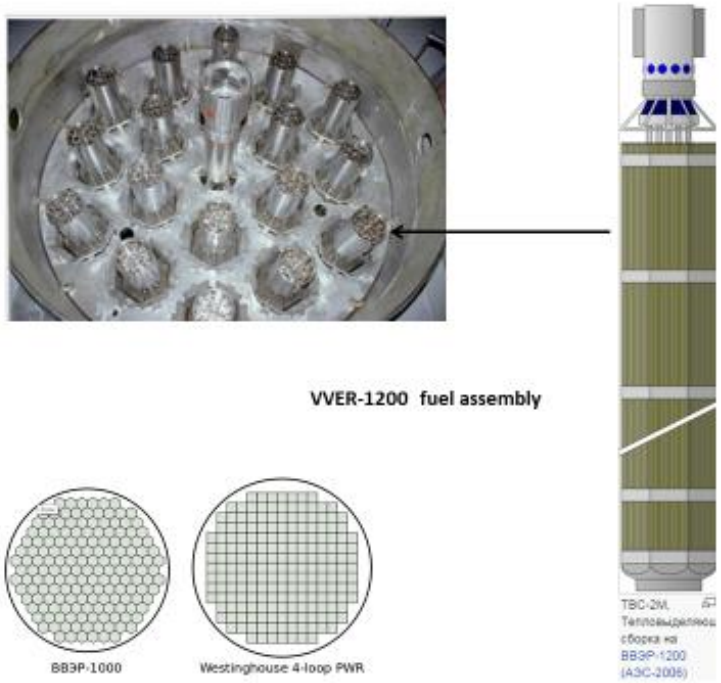


Требования к конструкционным материалам

- ✓ ***высокая радиационная стойкость к нейтронному облучению***
- ✓ ***высокие эксплуатационные характеристики при температурах работы реактора (350-700°C)***
- ✓ ***высокие показатели ползучести, коррозионной стойкости, жаропрочности, пластичности***

Воздействие осколков деления на материал оболочки твэла





Плотность потока осколков деления 1×10^{6} см$^{-2}$с$^{-1}$.

Дисперсно-упроченные оксидами стали: хорошие результаты по стойкости к облучению нейтронами и низкоэнергетическими ионами, однако ввиду наличия оксидных частиц, восприимчивых к высоким уровням ионизации, происходящем при облучении быстрыми тяжелыми ионоами, в них возникают деформации [Rymzhanov et al., Proceedings of the 12th International Conference Interaction of Radiation with Solids, Minsk, Belarus, 19–22 September 2017]

Исследование влияния тяжелых ионов на материал инертных матриц

Основной частью тепловыделяющего элемента (твэла) является ядерное топливо, которое может быть гомогенным в виде соединений делящегося изотопа или гетерогенным, в котором частицы вещества делящегося изотопа равномерно распределены в матрице из неделящегося материала. Характерной особенностью дисперсионного ядерного топлива является его повышенная радиационная стойкость при длительной эксплуатации в реакторе. Для этого разрабатывается IMF-топливо (Inert Matrix Fuel), являющееся дисперсионной композицией, в которой плутоний равномерно распределен в безурановой матрице. **IMF-топливо позволяет основательно снизить запасы плутония, значительно увеличить выгорание делящегося изотопа. Использование этого вида топлива обеспечивает прямое захоронение отработанного ядерного топлива.**

Требование к материалу матрицы незначительное поглощение нейтронов, высокие t пл., теплопроводность, механические свойства, устойчивость к реакторному облучению и др.

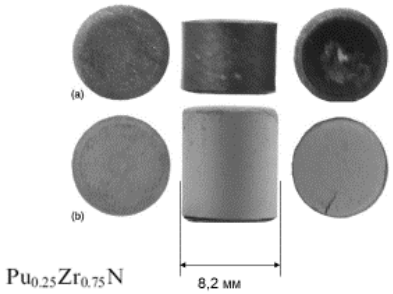
Инертные матрицы - керамика с высокой температурой плавления и низким сечением поглощения нейтронов для использования в качестве носителей для трансмутации актинидов посредством ядерных реакций

Примеры топливных композиций для LWR:

(Pu)O2 - MgO-ZrO2

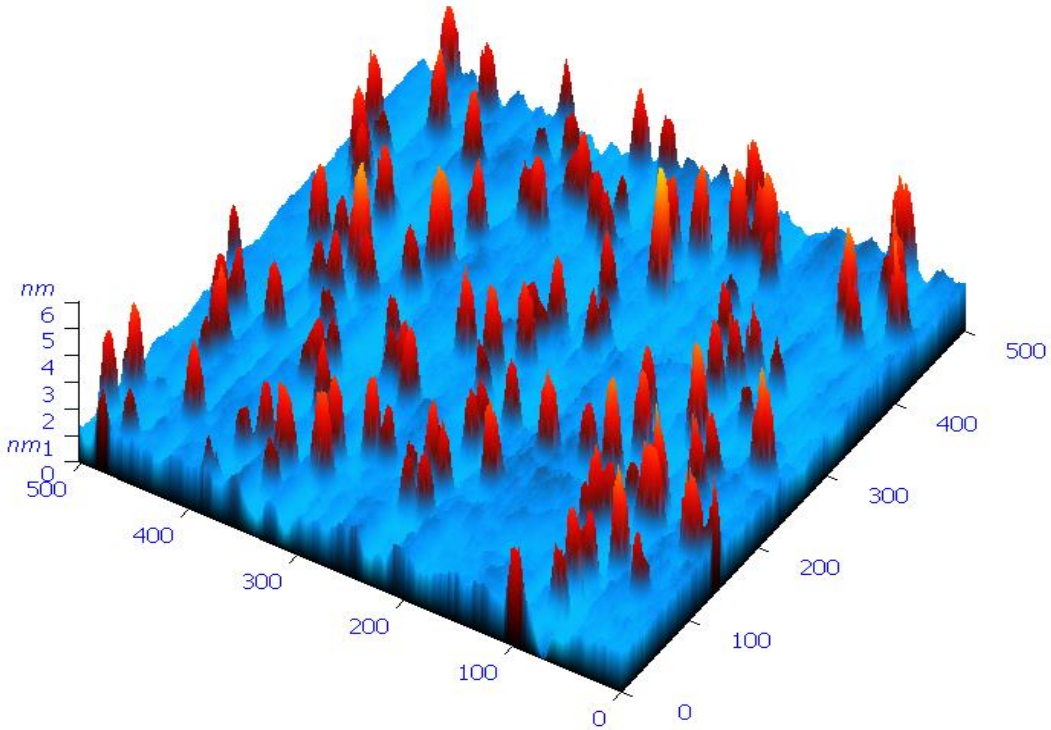
(Pu,Np,Am)O2, MgO-ZrO2

(Am, Np, Pu,Zr)N



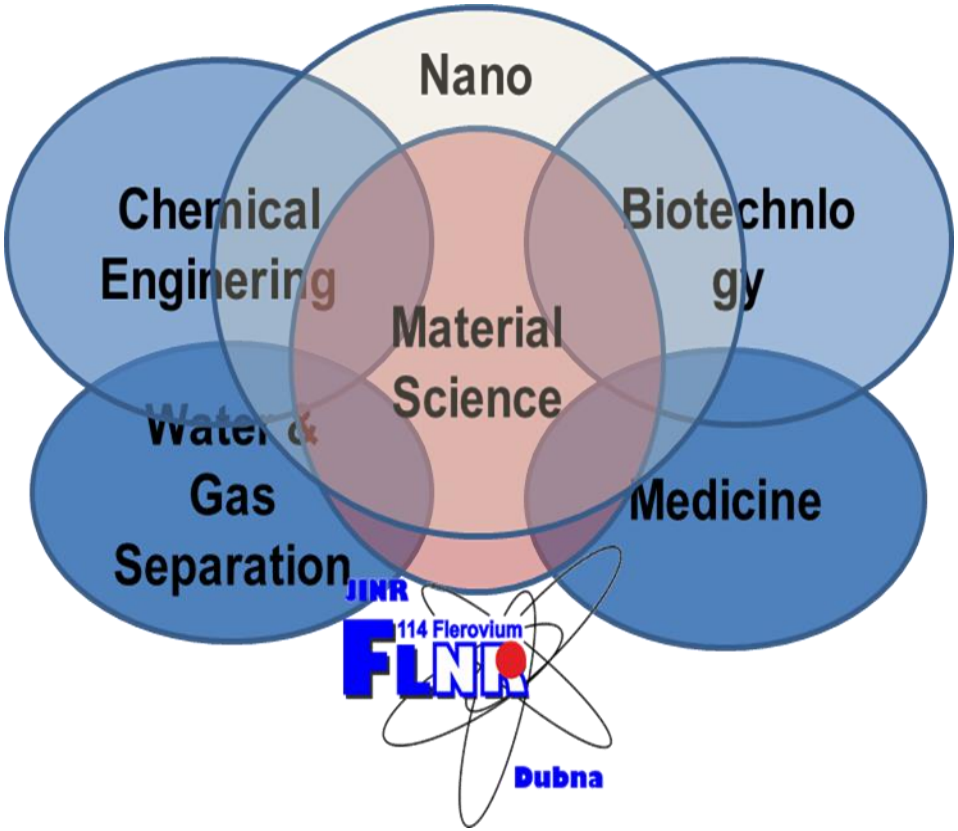
M. Streit et al. Journal of Nuclear Materials 319 (2003) 51

Исследование эффекта плотной ионизации в керамике и оксидах тяжелыми ионами энергии осколков деления. Поверхностные эффекты плотной ионизации в керамике и оксидах

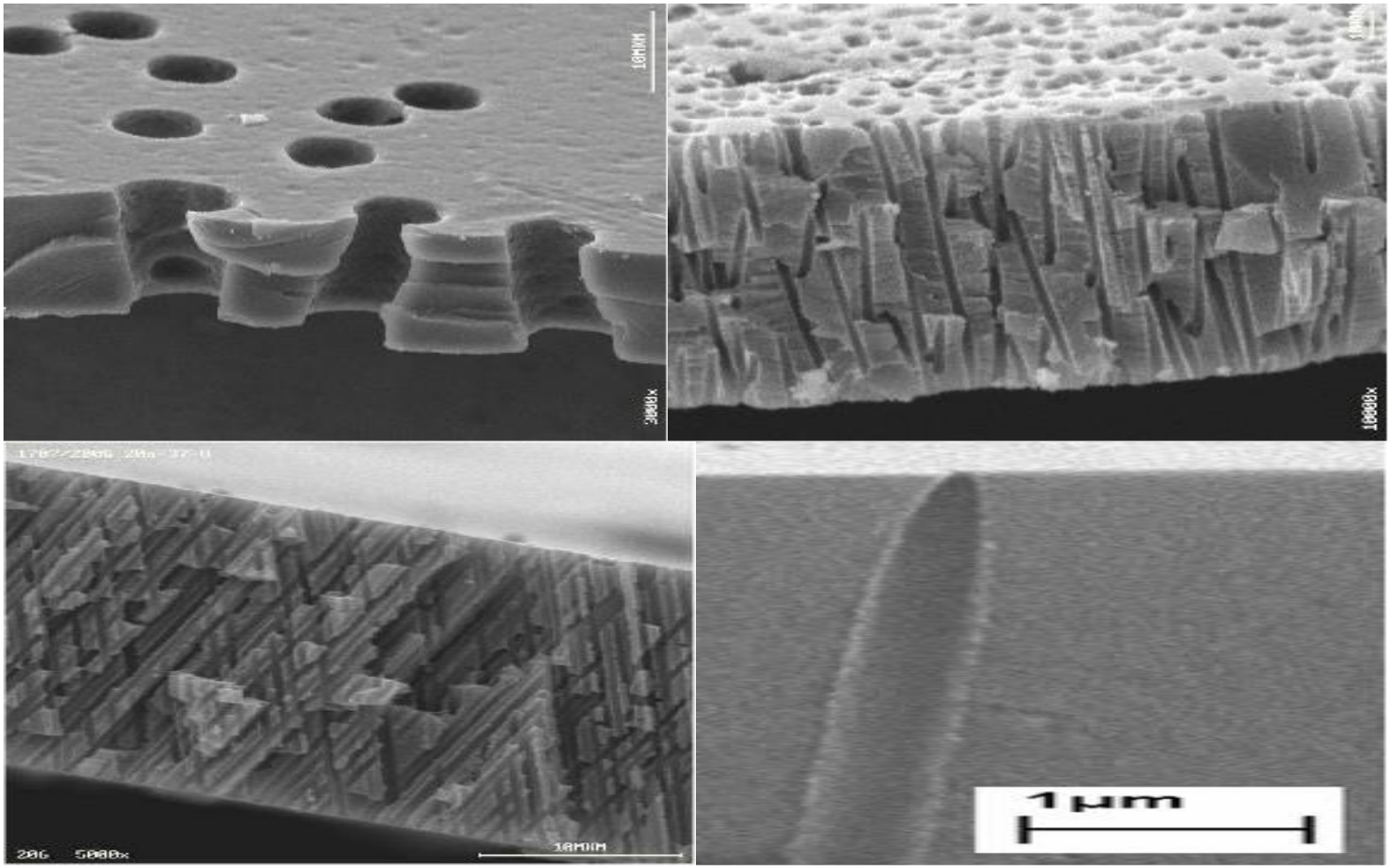


3D AFM image of $MgAl_2O_4$ (Шпинель) surface irradiated with 710 MeV Bi ions (Ion fluence $5x10^{10}$ cm^{-2}).

Трековые мембраны: история, современное состояние, научные и промышленные приложения, перспективные направления развития



Трековая мембрана - это первая коммерческая “Искусственная” мембрана, созданная с использованием физических методов



Кто изобрел трековые мембраны?

Figure 2. "PIE"-oneers P.B. Price (left), R. L. Fleischer (center) and R. M. Walker (right) at their laboratory at GERL circa 1963. Walker is holding a Lexan® strip that had been irradiated by ^{252}Cf fission fragments in the bell jar on the center of the table. From Fleischer (1998), courtesy of the author.

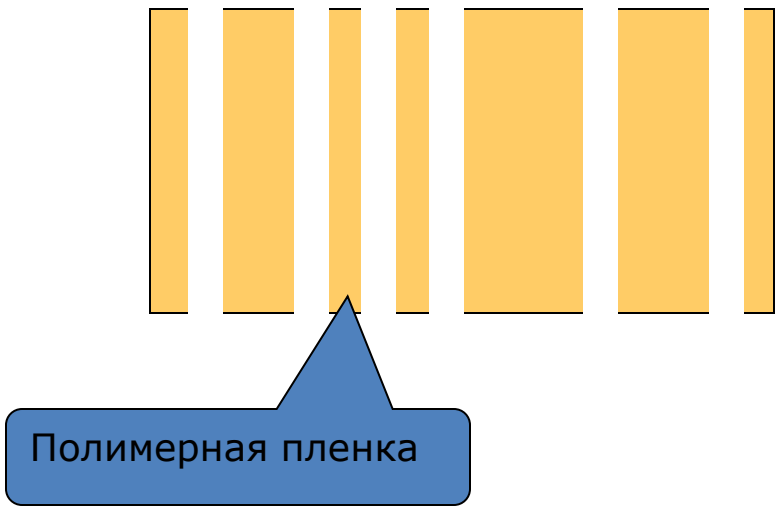
P.B.Price & R.M.Walker, 1962

US Patent #3303085

Академик Г.Н. Флеров с сотрудниками (Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ, 1985 год)

Предложил и организовал производство трековых мембран на пучках тяжелых ионов, получаемых на ускорителях

Травление треков тяжелых ионов в полимерной пленке



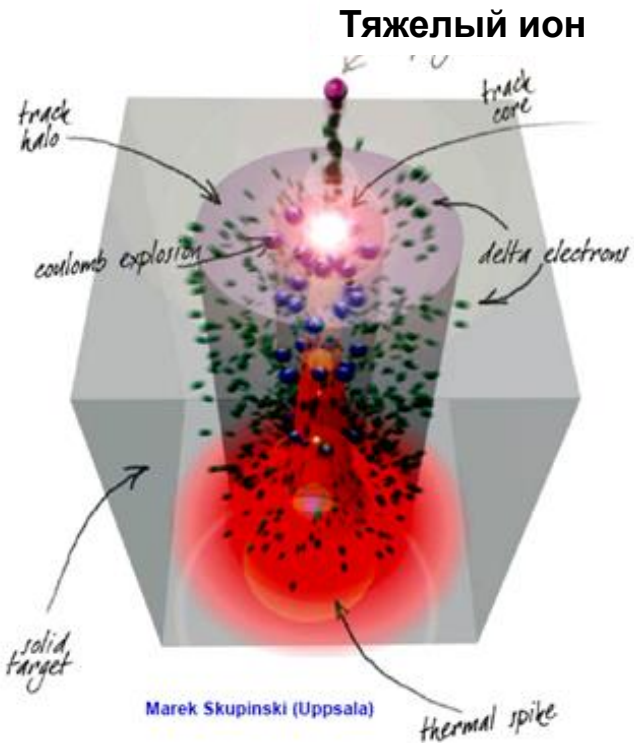
Облучение тяжелыми ионами (e.g. Kr, Xe, Au, 1-10 MeV/u) – формирование *латентных треков*

Химическое травление – образование сквозных каналов

Диапазон диаметров пор : ~ 10 нм÷несколько мкм

Плотность пор: $1 \div 10^{10}$ cm^{-2}

Что происходит в треке тяжелого иона при прохождении тяжелого иона через полимер?

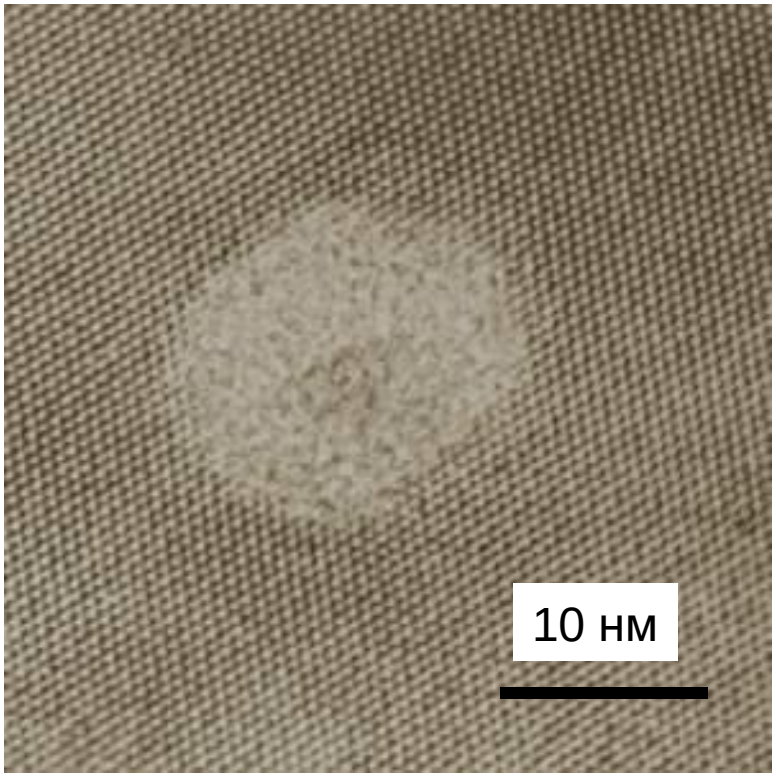


Сложная последовательность физических и химических процессов:

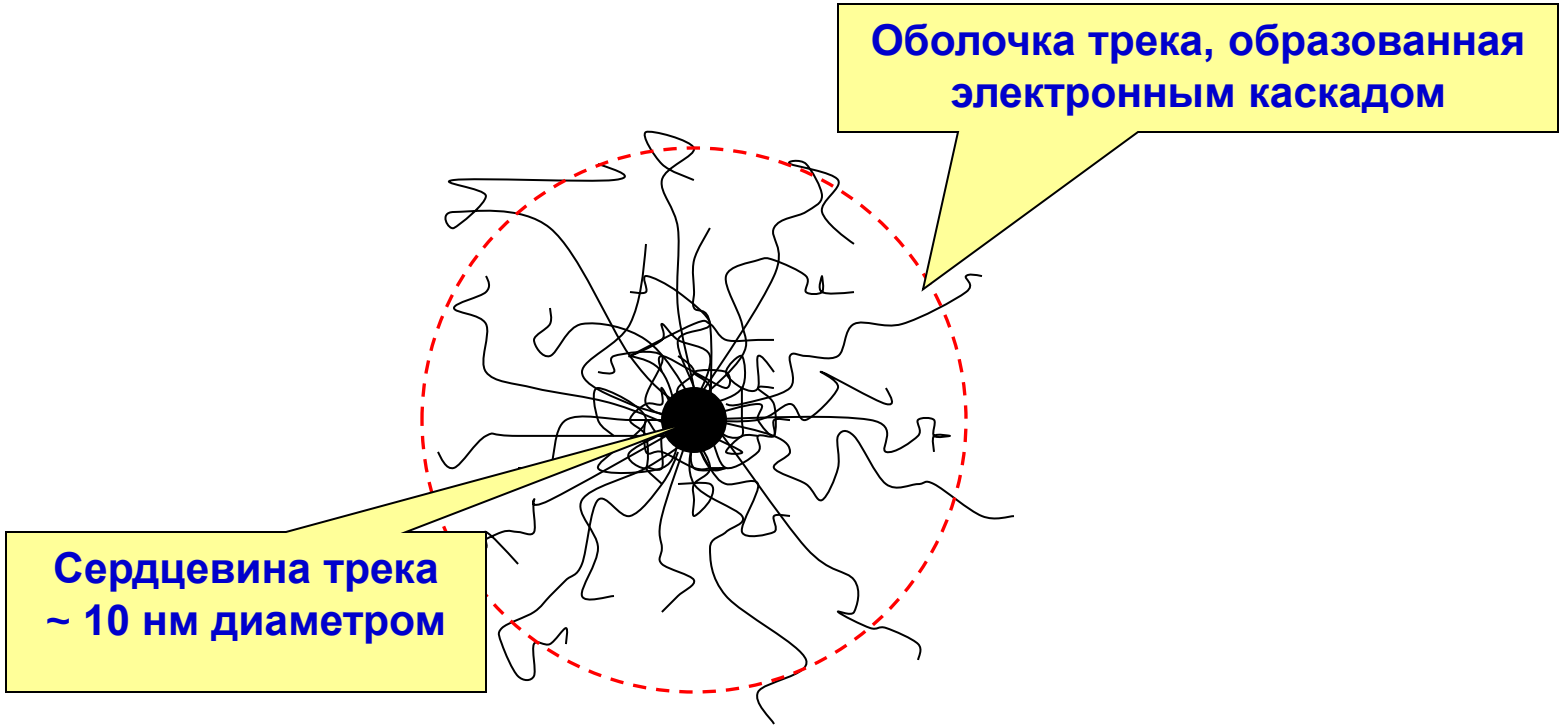
1. **Ионизация атомов вдоль траектории иона (вырывание электронов из атомов)**
2. **Разрывы химических связей.**
3. **Локальный разогрев (термопик)**
4. **Смещение атомов и нарушение кристаллической решетки (аморфизация)**
5. **Образование газообразных продуктов, которые постепенно диффундируют из трека (CO, CO_2, и др.)**
6. **Увеличение свободного объема в узкой (около 10 нм) области вдоль траектории иона.**

Все вышеперечисленное и приводит к химической «травимости» трека

Трек тяжелого иона в тонком кристалле (электронная микроскопия высокого разрешения)



Радиальная структура трека тяжелого иона



Образование сердцевины трека связывают с физическими механизмами (термопик, ионный взрыв). До 90% энергии иона передаются в-ву в сердцевине

Процессы, происходящие в гало (оболочке) трека в значительной мере сходны с процессами, происходящими при воздействии излучений с низкой ЛПЭ, и являются предметом радиационной химии

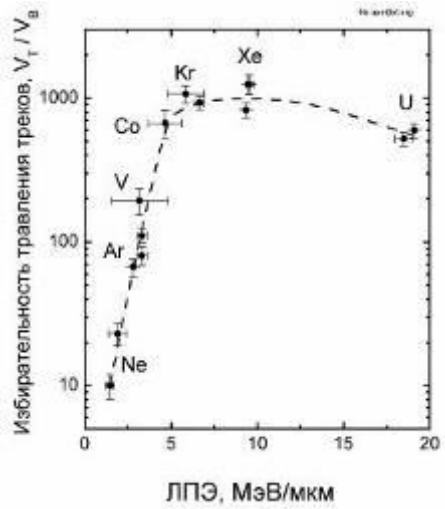
Химическое травление трека тяжелого иона в однородном изотропном материале

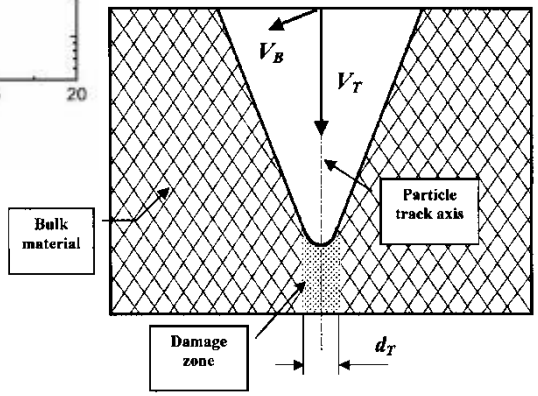
Скорость травления вдоль трека V_T зависит от

- **бомбардирующего иона (удельных потерь энергии)**
- **Чувствительности полимера**
- **Избирательности травителя**
- **Сенсибилизации трека перед травлением (УФ-обработка и др.)**
- **Тех же факторов, что и скорость травления полимера V_B (см. ниже)**

Скорость травления полимера V_B зависит от

- **вида полимера,**
- **состава травителя**
- **температуры**

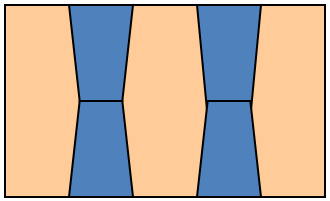




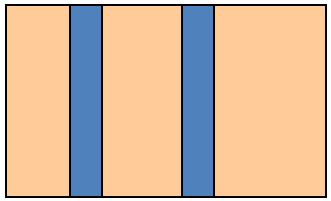
Соотношение между скоростью травления вдоль трека V_T и скоростью травления полимера V_B определяет две возможные геометрии пор в трековых мембранах – «песочные часы» или цилиндр

Это соотношение - V_T/V_B – называют избирательностью травления треков

$V_T > V_B$



$V_T >> V_B$

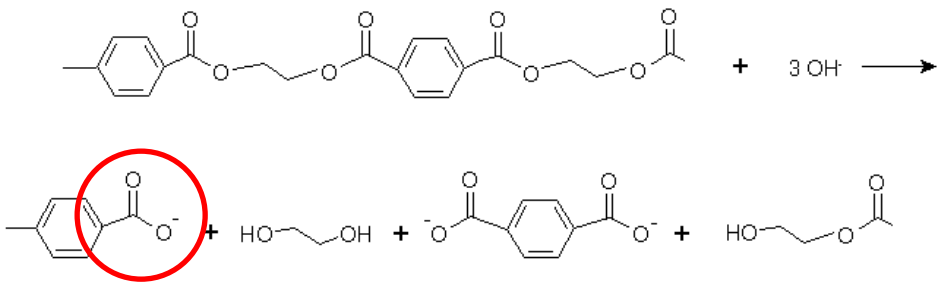


Полимеры для производства трековых мембран

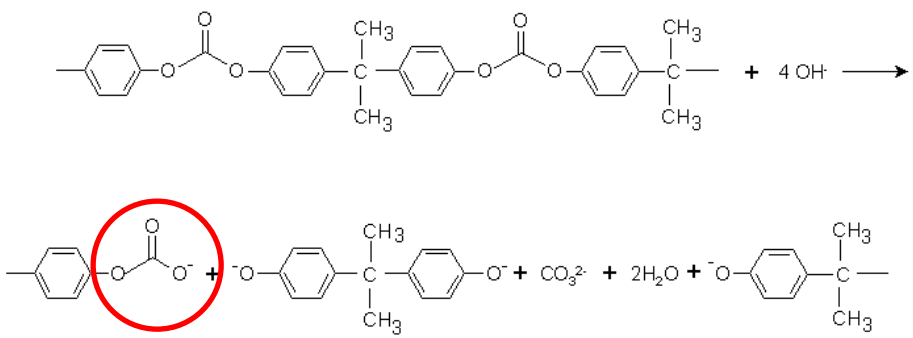
Полимер	Ион для облучения	Травление	Масштаб пр-ва
Полиэтилетерефталат (ПЭТФ)	Kr, Xe	NaOH aq. NaoH aq + ПАВ	Коммерческий
Поликарбонат (ПК)	Ar, Co, Kr	NaOH aq +ПАВ	Коммерческий
Поливинилиден фторид (ПВДФ)	Kr, Xe	NaOH + $KMnO_4$	Лаборат. (коммерч.)
Полипропилен (ПП)	Kr, Xe	H_2SO_4 + CrO_3	Лаборат.
Полиимид (ПИ)	Xe, Au, Pb, U	NaClO	Лаборат. (коммерч)

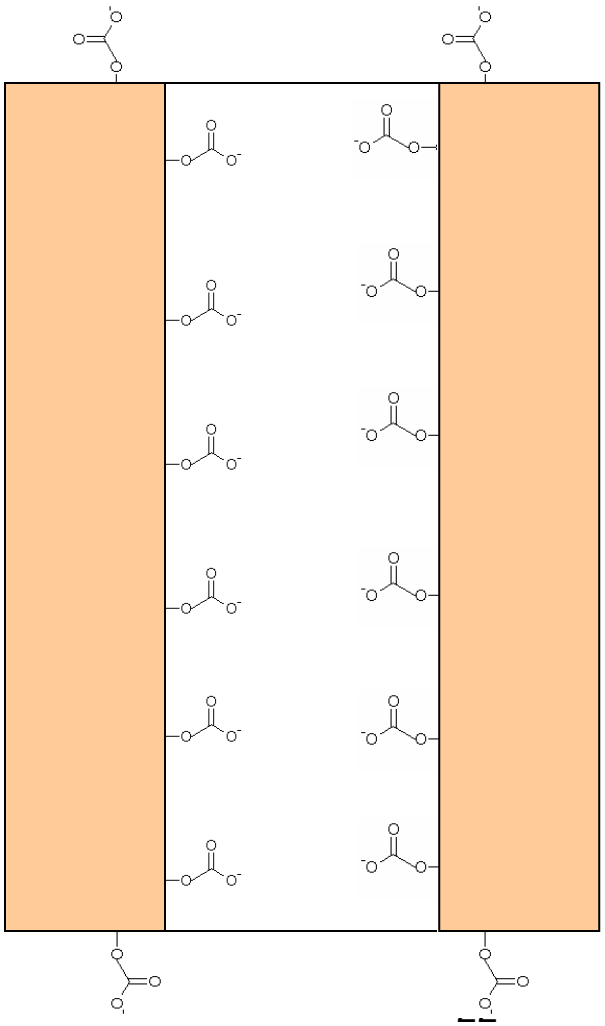
Травление пор и свойства образующейся поверхности

Polyethylene terephthalate



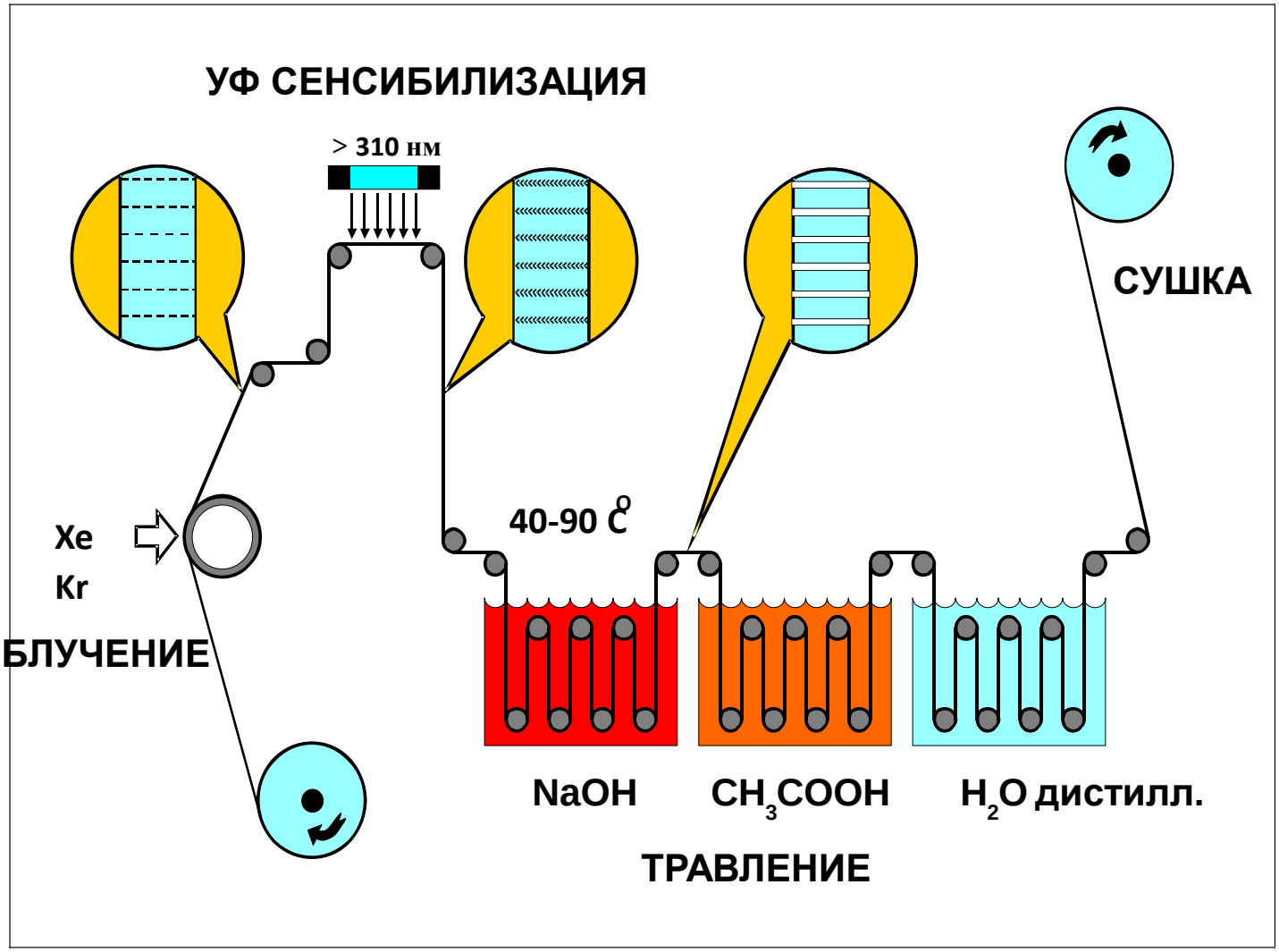
Polycarbonate





Surface charge density ~ 0,5 e/nm^2 in aqueous solutions at pH > 4

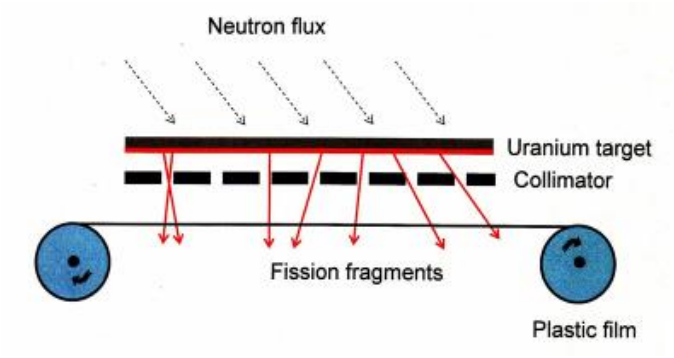
Общая схема технологического процесса



Два способа производства - с облучением осколками деления в атомном реакторе и ускоренными ионами на ускорителе

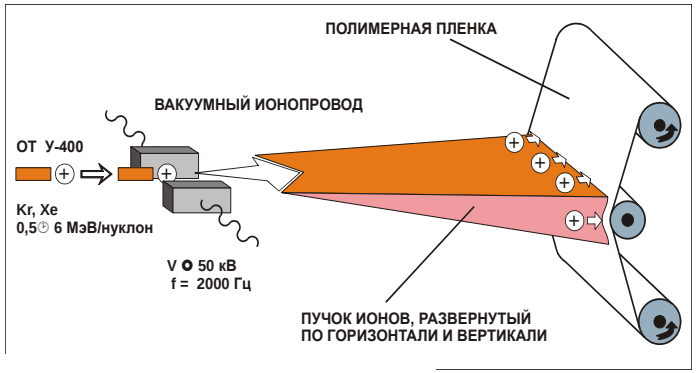
«Реакторная» технология

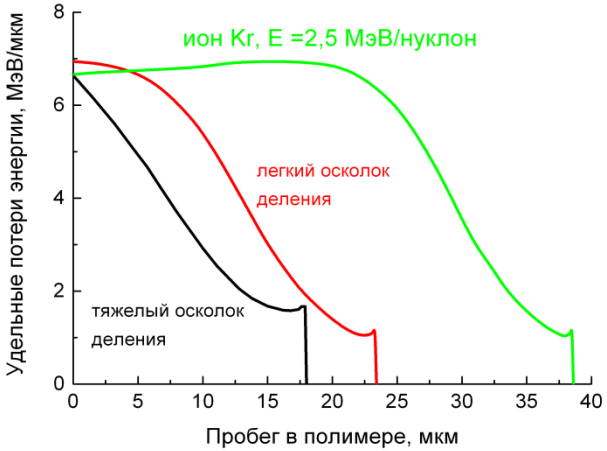
- Подразделение в General Electric – 1964 год (trademark Nuclepore®)
- Самостоятельная фирма Nuclepore Corporation of Pleasanton, California – 1973 год



«Ускорительная» технология

- Первые эксперименты – Дубна, ОИЯИ, 1972 год
- Серийное производство в ОИЯИ – 1980 год





Специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных исследований и производства ТМ

Диаметр полюсов: 1 метр

Масса: 150 тонн

Потребление электроэнергии: ~ 150 кВт

Служит для производства трековых мембран с 2005 года

Криогенный (охлаждаемый жидким гелием) источник высокозарядных ионов

Ион	Энергия (МэВ/аем)	Макс. интенсивность, c^{-1}
Ar^{7+}	1.2	$7 \cdot 10^{12}$
Kr^{15+}	1.2	$3 \cdot 10^{12}$
Xe^{23+}	1.2	$2 \cdot 10^{12}$

Пробеги этих ионов в полимере: 15-22 мкм. Величина линейной передачи энергии (ЛПЭ): 3 – 10 кэВ/нм

Участок облучения полимерных пленок на циклотроне ИЦ-100 (Дубна)

Циклотрон

Канал транспортировки пучка

Вакуумная камера для облучения полимерной пленки

Ширина облучаемой пленки – до 60 см

Скорость транспорта пленки 40 – 1500 м/ч

Плотность треков – от 10^4 до 10^{10} $см^{-2}$

Пульт управления

Участок УФ сенсибилизации и химического травления (Дубна)

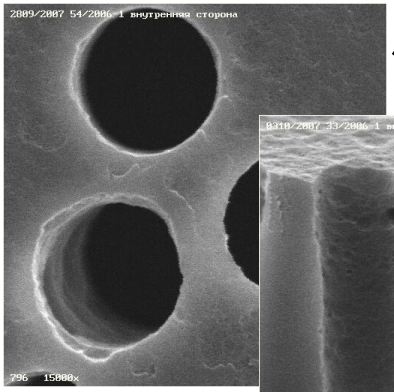
6 установок производительностью 30 погонных метров в час (16 м пленки обрабатывается одновременно в каждой установке)

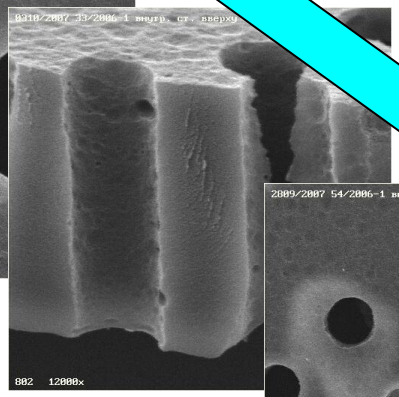
4 установки производительностью 60-70 погонных метров в час (Объем травильной ванны 80 л)

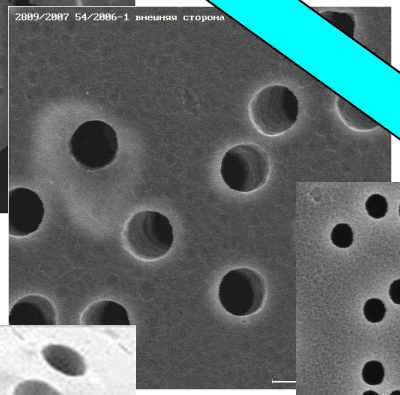
Производительность участка более 100 тыс м^2 трековых мембран в год

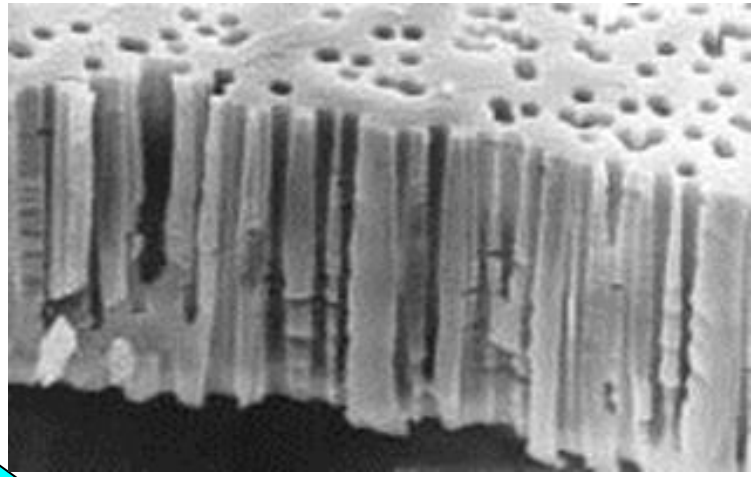
Трековые мембраны

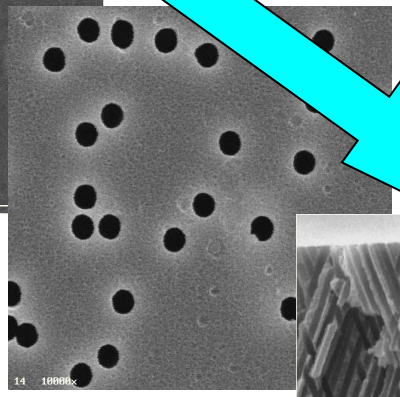
МИКРОМЕТРЫ

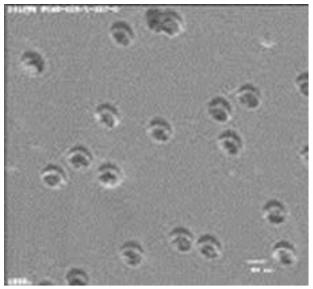


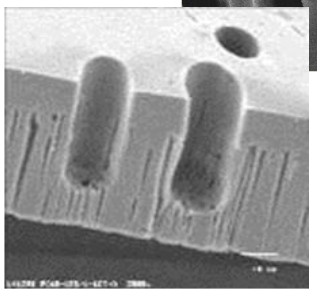


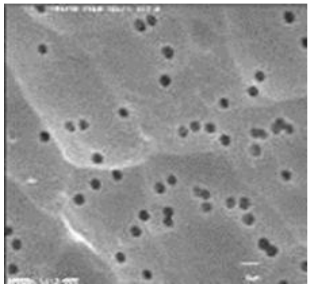


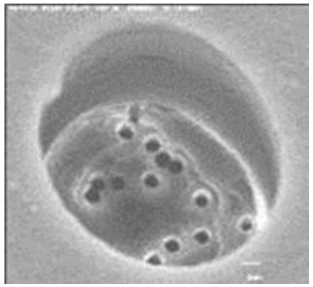


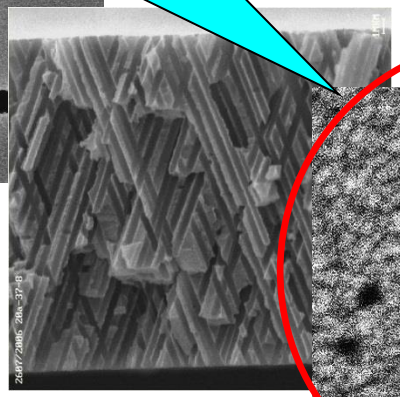




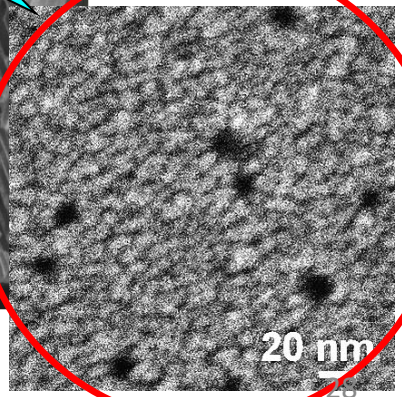








НАНОМЕТРЫ



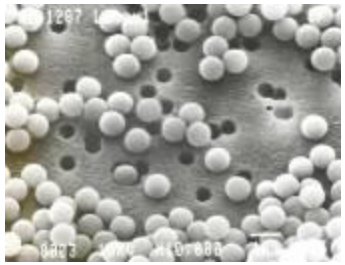
ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

КОММЕРЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

Process filtration (промышленная фильтрация)
(water, pharmaceuticals, beverages, etc)

Laboratory filtration (лабораторная фильтрация)
(analytical works)

Medicine and pharmaceuticals
(медицинские и фармацевтические пр-я)



Преимущества трековых мембран над другими типами мембран

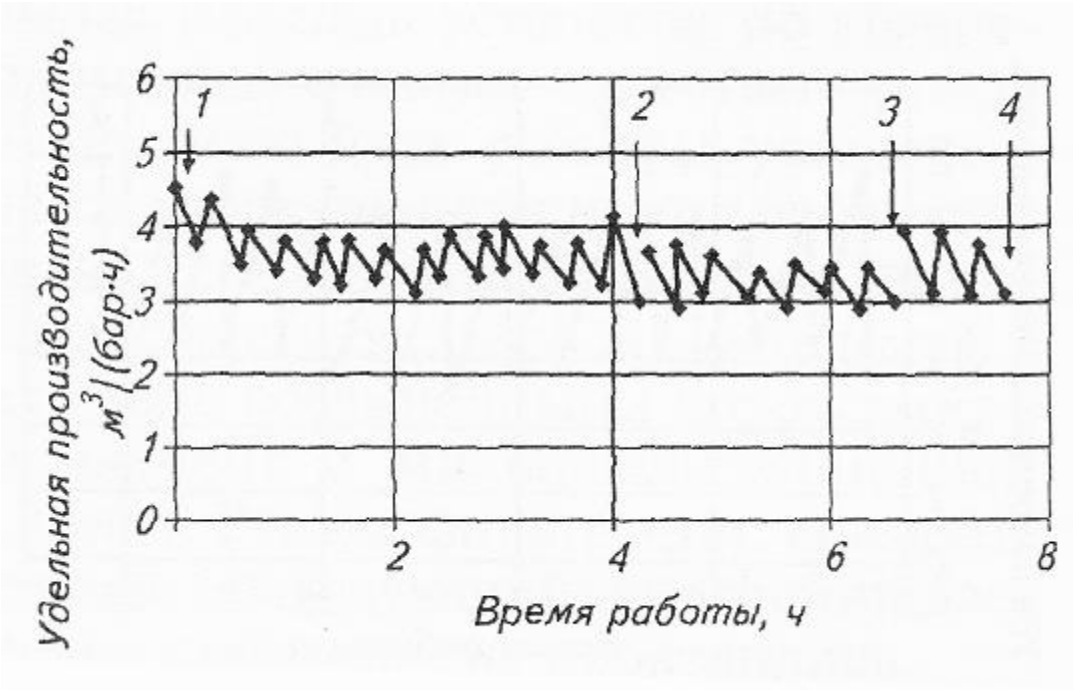
- Высокая однородность пор по размерам
- Правильная геометрия пор
- Относительно малая толщина и малая удельная поверхность
- Высокая селективность
- Возможность регенерации

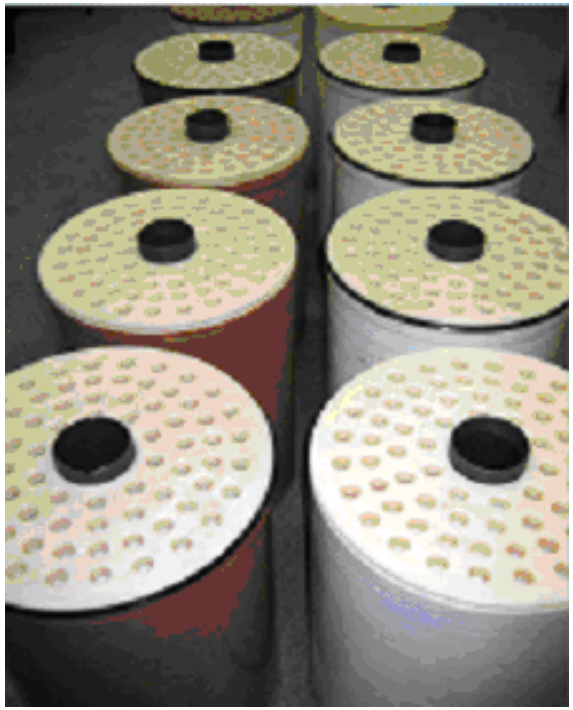
Промышленная фильтрация

Пример: спиральные фильтрационные модули, разработанные в «Центре Келдыша» (Москва) с трековыми ПЭТФ и ПВДФ мембранами с диаметрами пор от 0,2 до 1,5 мкм

До 50 квадратных метров мембраны в одном модуле

Большой ресурс благодаря периодической регенерации. Трековая мембрана выдерживает 700-800 циклов регенерации - в отличие от мембран других типов



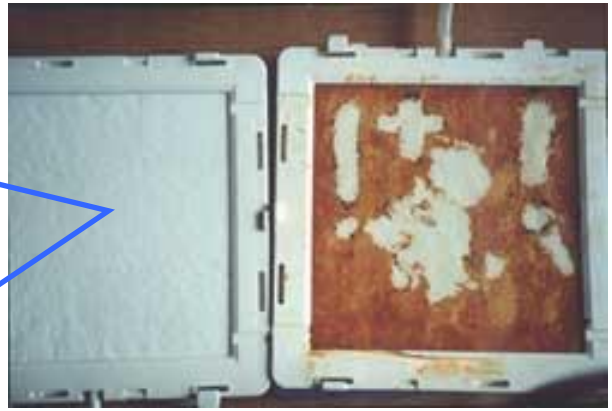


Рулонные микрофильтрационные элементы на трековых мембранах (завод бутилированной воды в г. Астана)

Фильтрация питьевой воды в быту и походных условиях

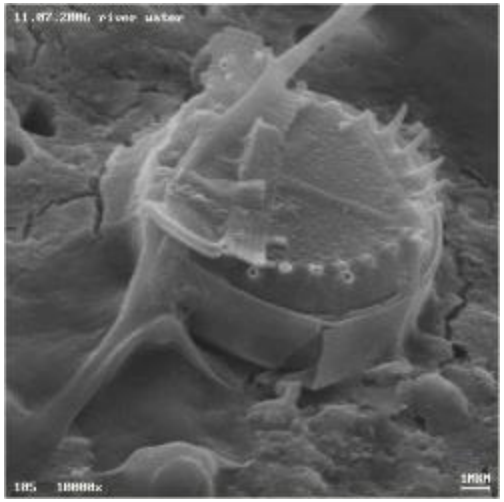
Портативный фильтр для очистки питьевой воды (Симпекс, Симферополь)

Мембрана производства ОИЯИ, диаметр пор 0,3 мкм

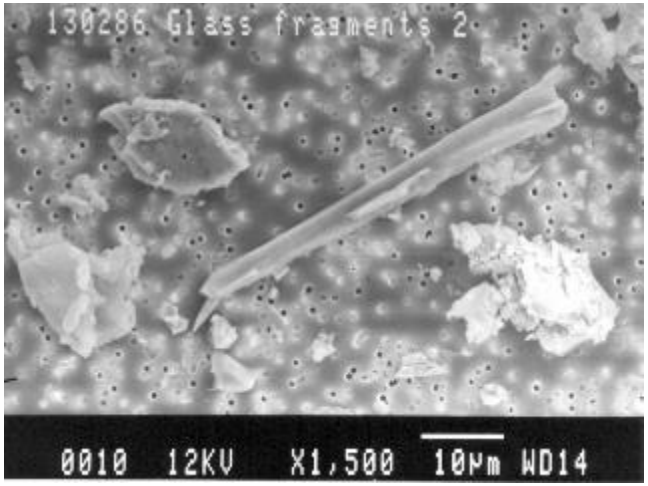


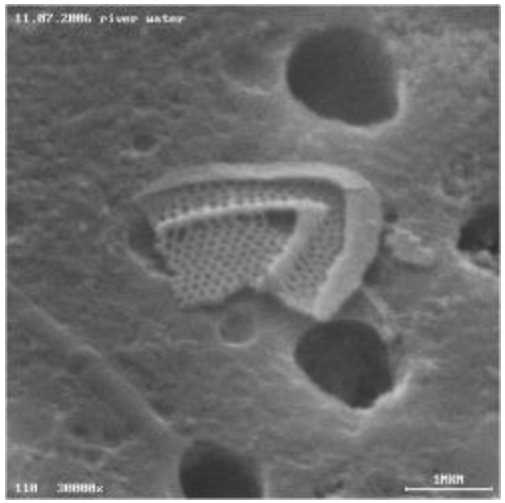
Аналогичное устройство выпускает предприятие НАКВА (Обнинск)

Применение трековых мембран для аналитических целей

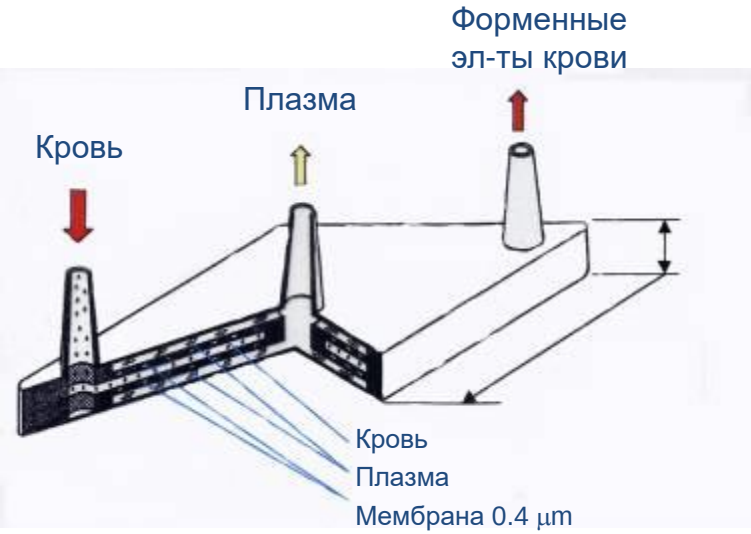


- Сбор осадка на поверхности (с возможностью фракционирования частиц осадка по размерам)
- Анализ дисперсности осадка с применением ОМ или ЭМ
- Определение массы осадка (гравиметрически)
- Элементный анализ осадка при помощи рентгено-флуоресцентного, нейтроноактивационного анализа, ЭСХА
- Растворение осадка и последующий химический анализ в жидкой фазе





Трековые мембраны для плазмафереза



0.1-0.2 м^2 трековой мембраны в сепараторе «Роса»

Плазмаферезатор Гемофеникс (Компания «Трекпор Технолоджи»)

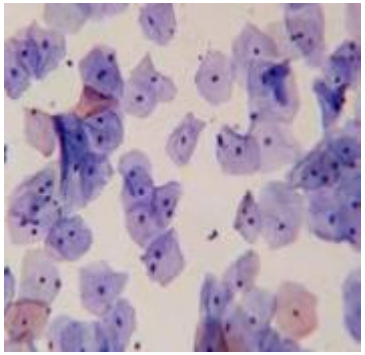
Компания «Плазмофильтр», Санкт-Петербург

Деформируемость эритроцитов

Пора ~4 µm
Эритроцит ~8 µm
Здоровые эритроциты способны деформироваться и проникать сквозь пору.
Отсутствие данного эффекта указывает на патологический процесс.

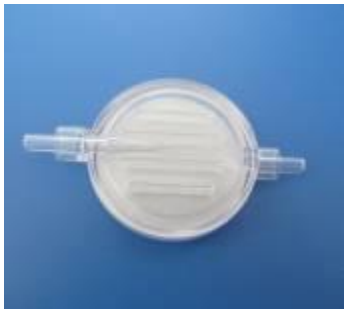
Папаниколау тест

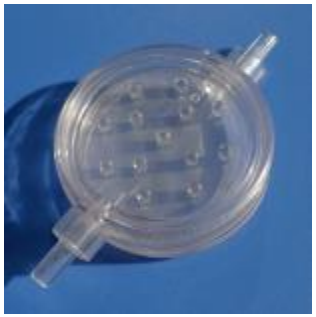
«Ядром» метода является трековая мембрана с порами
7,2 мкм, на которой идет сбор монослоя клеточного материала для автоматического анализа (производительность 25 анализов в час)
Разработано в США, скопировано в Китае



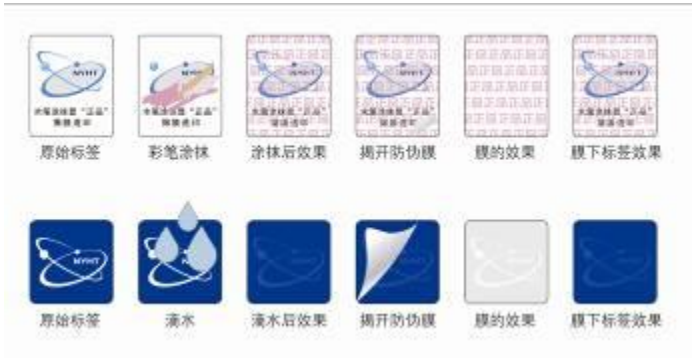
Продукты, выпускаемые в Китае из ТМ, произведенной в ОИЯИ (Дубна)

Партнеры :
Beijing Fert Technology Co., Ltd
Zhejiang Nayanghuitong Co., Ltd





Инфузионные фильтры



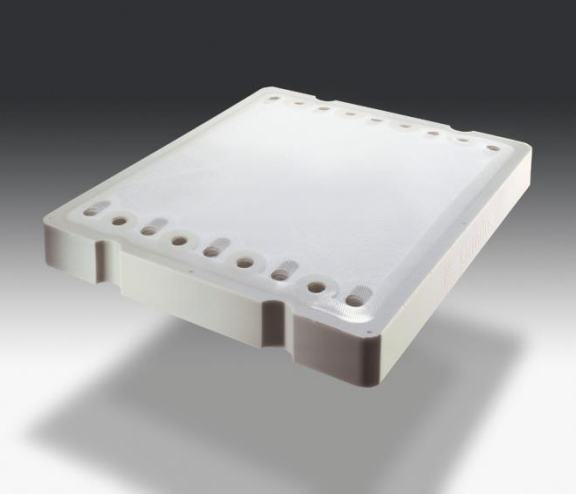
Идентификационные (защитные) знаки

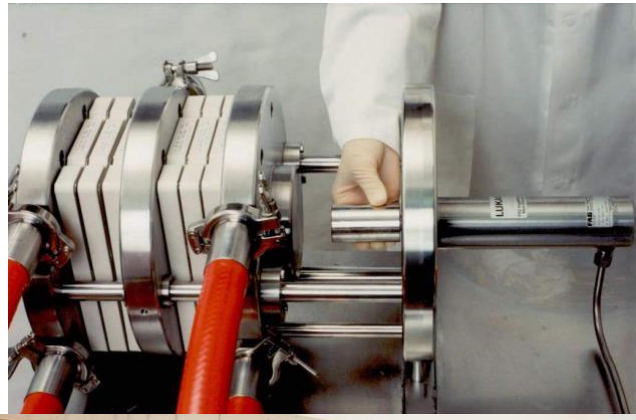
Патронные фильтры

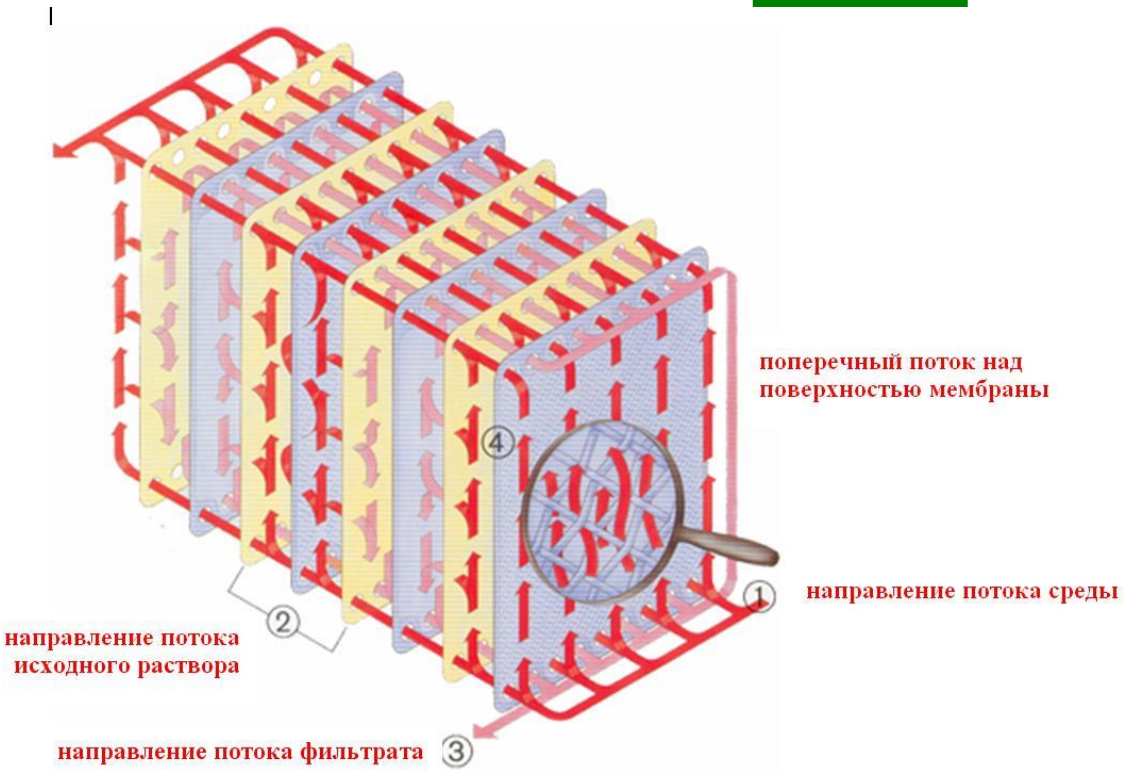
ПРОИЗВОДСТВО ВАКЦИН:концентрирование и диафильтрация

Вакцины против гриппа, клещевого энцефалита, бешенства, ящура производства “МИКРОГЕН”, Россия

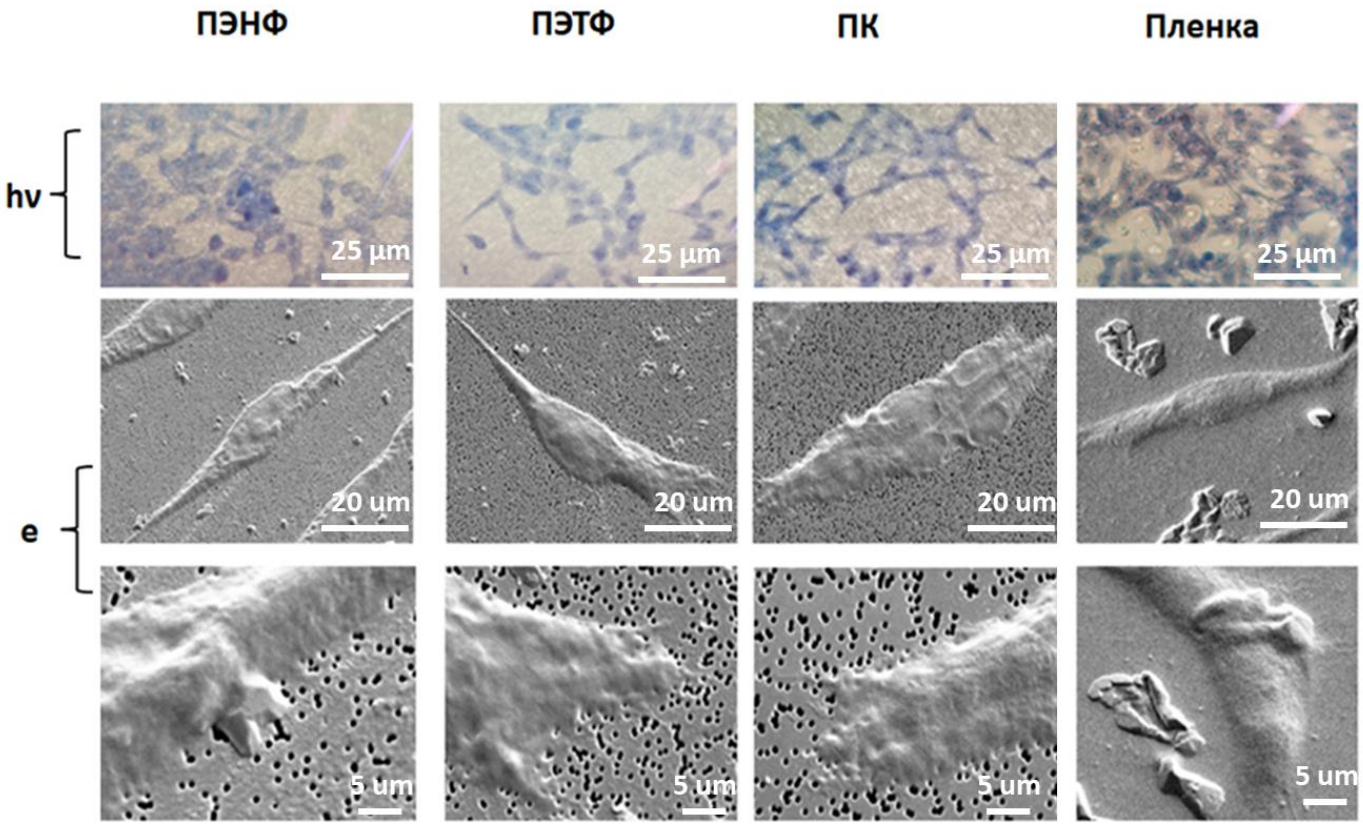
«CROSS-FLOW» фильтрация биопрепаратов на трековых мембранах на предприятиях РФ





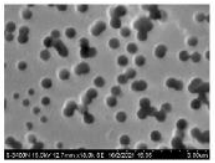


Адгезия фибробластов животного происхождения на ионно-трековых мембранах и пленке



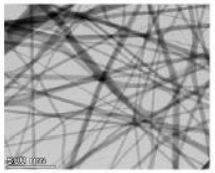
Гибридная мембран на основе трековой мембраны и нановолоконного матрикса

Циклотрон ИЦ-100
ЛЯР ОИЯИ



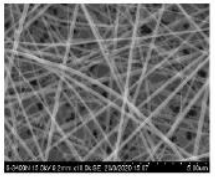
Трековая мембрана D пор = 0.1 – 5 мкм Пористость = 15%

Установка электроформования Nanon – 01A



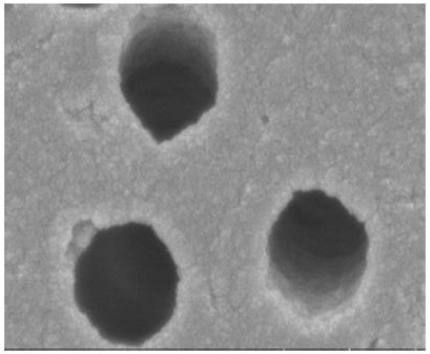
Нановолокна: хитозан, коллаген, гиалоурановая кислота d = 70 – 150 нм

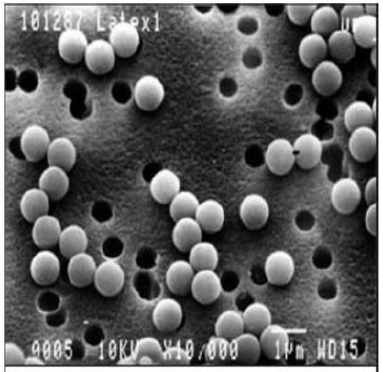
Биоактивное ионно-трековое пленочное раневое покрытие или гибридные мембраны для сорбции тяжелых ионов



Размер = 30 х 20 см
Потенциально рулонная технология получения

Трековая мембрана выступает в роли мембранного сепаратора коллоидных частиц и/или бактерий, а нановолоконный матрикс может использоваться для адсорбции ионов токсичных металлов или выступать в роли внеклеточного матрикса.

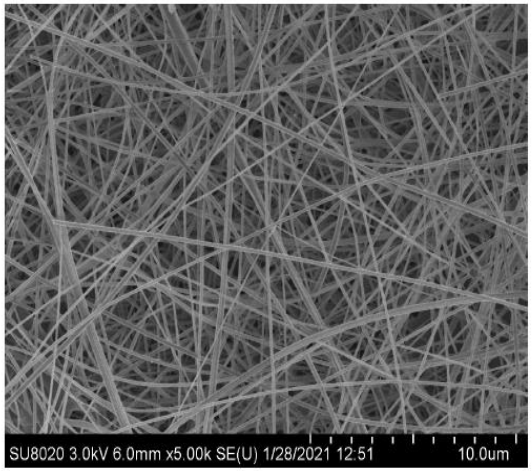




Контрольные шарики диаметром 0,4 мкм на поверхности трековой мембраны. Снято на электронный микроскоп

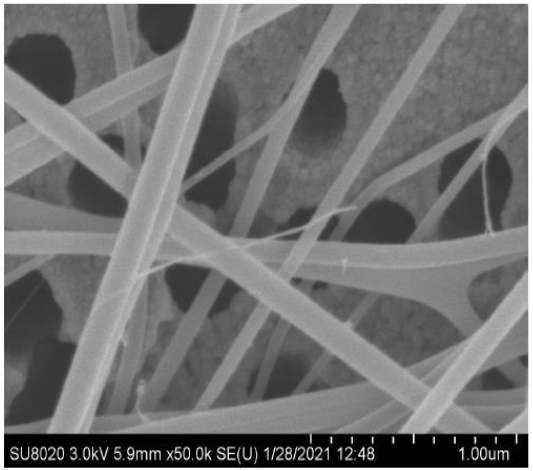
ТМ

+



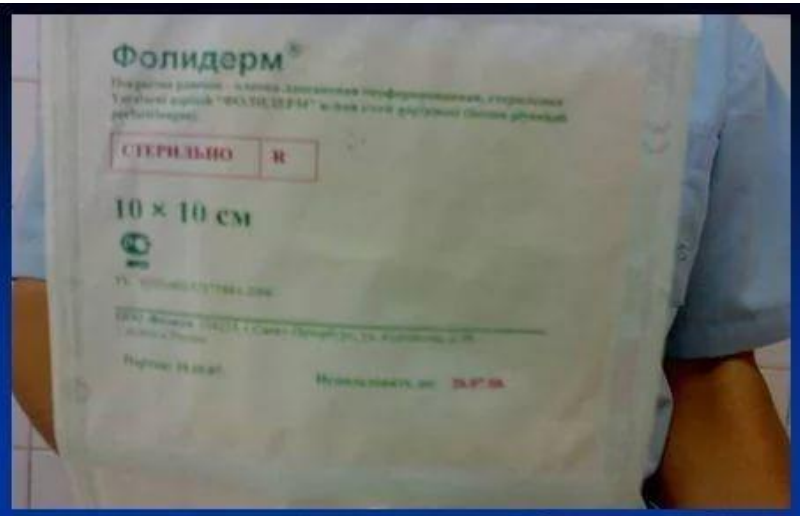
Нановолоконный матрикс

=



Гибридная мембрана

РАНЕВЫЕ АПЛИКАТОРЫ



Закрытие обширных раневых поверхностей временным раневым покрытием Фолидерм (2 сутки после травмы)

MyShared

ИНКУБАТОРЫ для культивации индивидуальных клеток на ТМ

Applications (Clear and BD FluoroBlok™ Membranes)

Angiogenesis Endothelial Cell Migration/Invasion

Tumor Cell Biology Tumor Cell Migration/Invasion

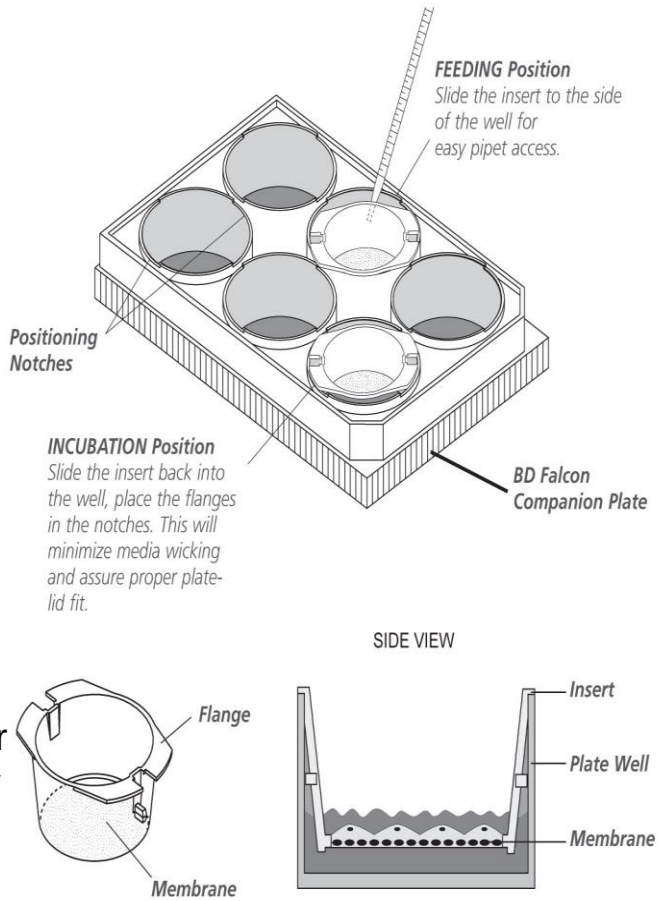
Inflammation Monocyte, Leukocyte Chemotaxis Transendothelial Cell Migration

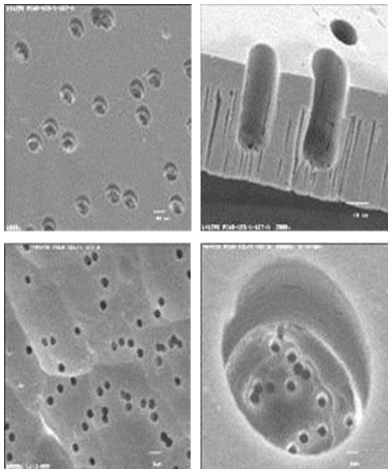
ADME/Tox Transport and Permeability Toxicity Assays

Cell Differentiation Blood Brain Barrier Models Co-culture studies (primary cells, stem cells)

Drug Discovery (single parameter or multiplexing)

Cell Imaging



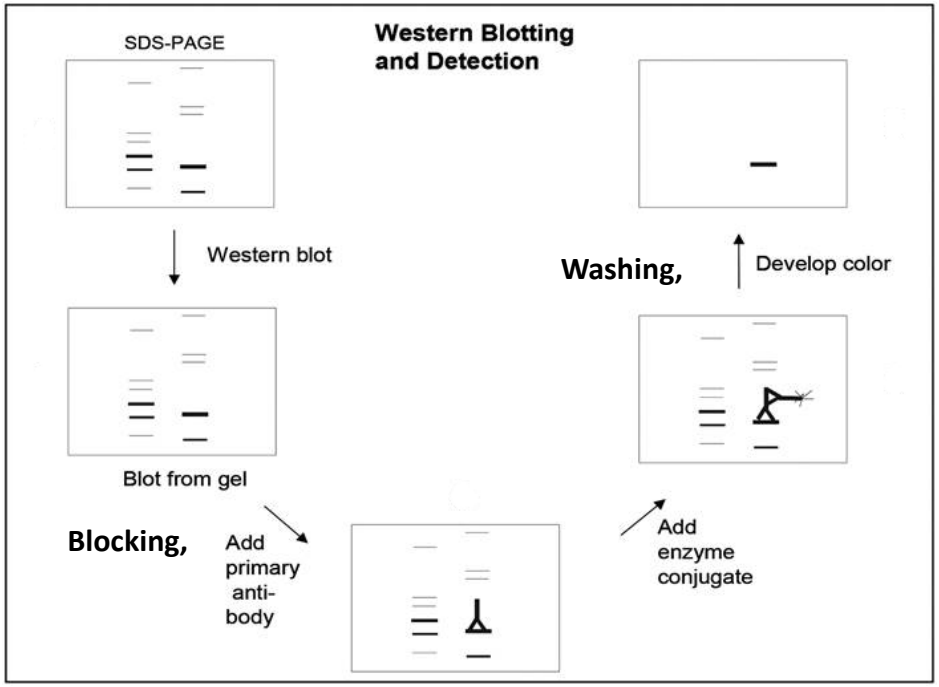


Вестерн-блоттинг

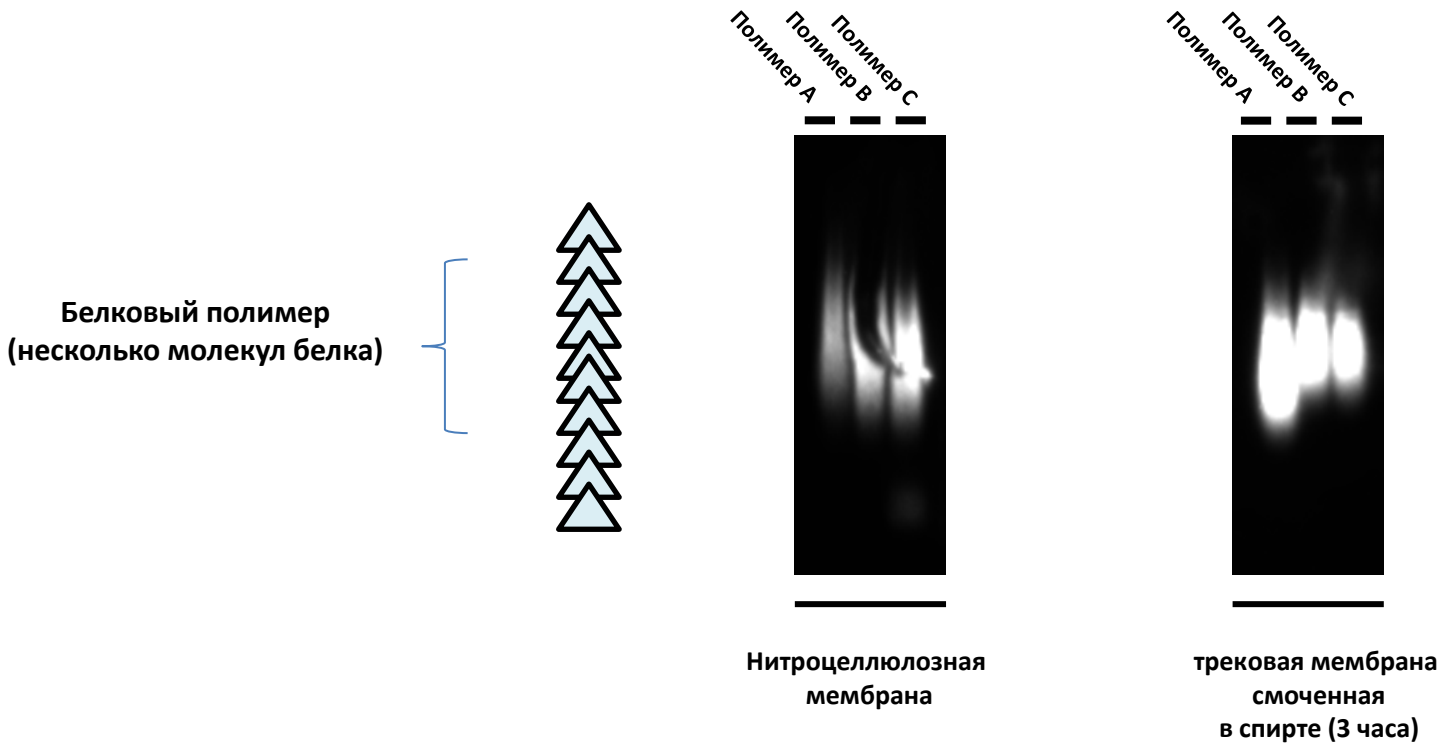
- Перенос белков или нуклеиновых кислот на микропористые мембраны называется «блоттингом».
- Белки, которые разделяются в гелях при электрофорезе (в агарозном или полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия (SDS-PAGE)) переносят на подложки адсорбирующей мембраны. Данный процесс носит название **вестерн-блоттинг** (WB), или белковый блоттинг.

Стадии вестерн-блоттинга

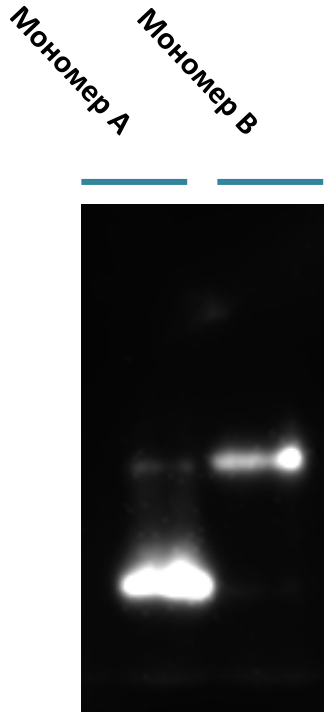
1. **Разделение белков методом SDS-PAGE гель-электрофореза**
2. **Перенос белков на мембрану**
3. **Блокирование мембраны**
4. **Последовательная обработка мембраны первичными и вторичными антителами**
5. **Отмывка**
6. **Детекция белков**



Определение амилоидов искусственных полиглутаминовых белков методом Western blotting’а на полиэтилентерефталатных трековых мембранах



Перенос мономерных белков из полиакриламидных гелей на трековую полиэтилентерефталатную трековую мембрану



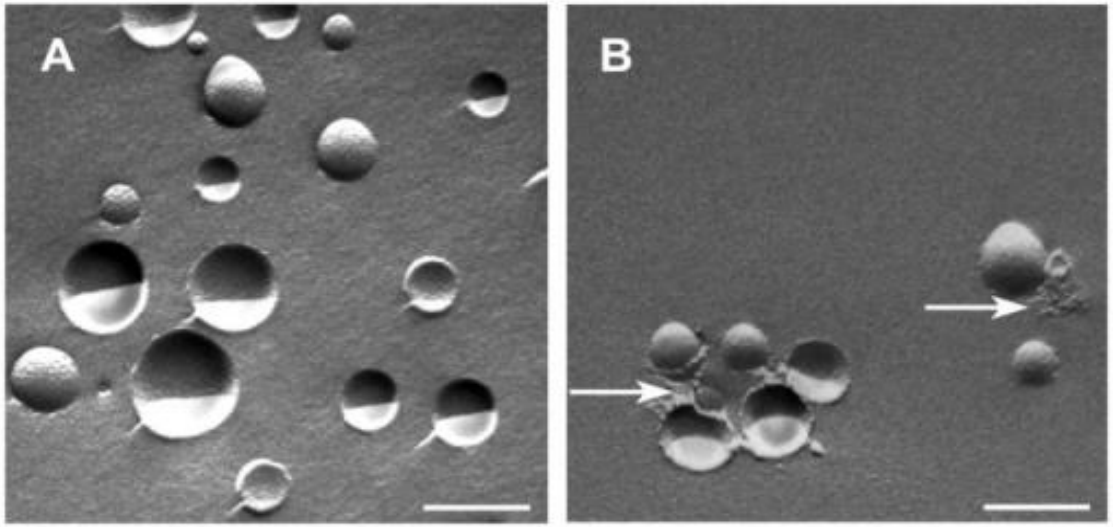
Нитроцеллюлозная мембрана, перенос мономерных химерных GFP белков

Трековая мембрана, перенос мономерных химерных GFP белков

Полоса мономера В отсутствует

Требуется модификация трековой мембраны для переноса мономерных белков из полиакриламидных гелей под действием разности потенциалов

ЛИПОСОМЫ и контролируемое производство наноэмульсий



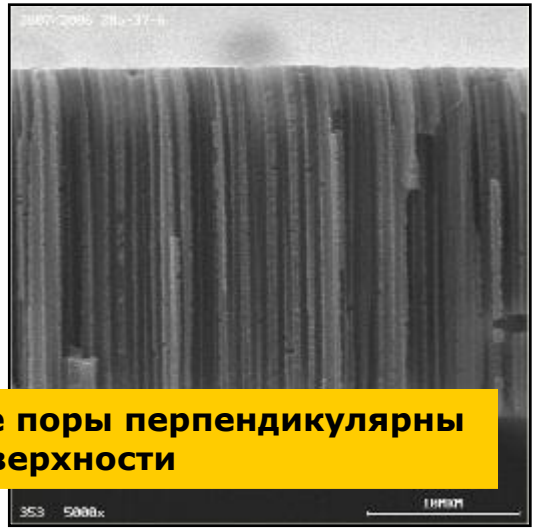
Многие из наиболее важных свойств продуктов на основе эмульсий, таких как срок годности, внешний вид, текстура, вкус, степень инкапсуляции и скорость высвобождения, определяются размером содержащихся в них мицелл. Размер и распределение мицелл по размерам являются ключом к стабильности эмульсии, поскольку они определяют скорость коалесценции(слияния) и ее пригодность для использования по назначению

Научные применения ТМ

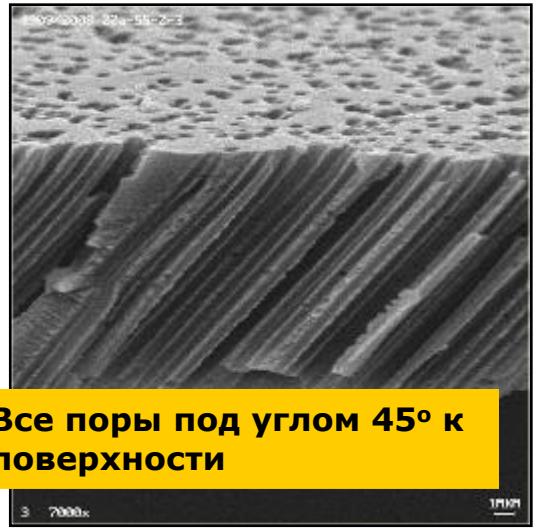
Многочисленные научные применения трековых мембран обусловлены тем, что

- **Можно заданным образом варьировать ориентацию пор относительно плоскости поверхности мембраны**
- **Можно заданным образом варьировать форму пор**
- **Можно заданным образом варьировать число пор в мембране**

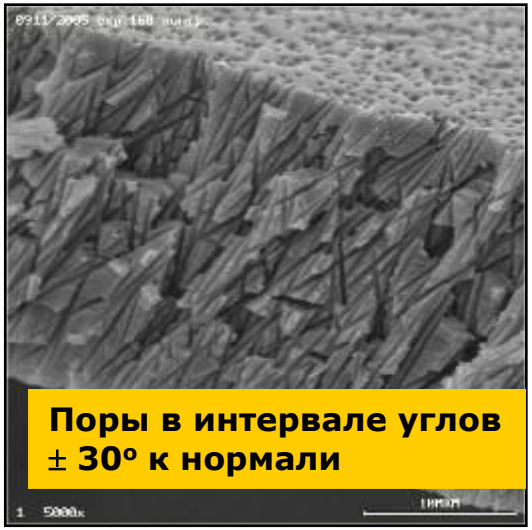
Пространственное распределение каналов пор в трековых мембранах



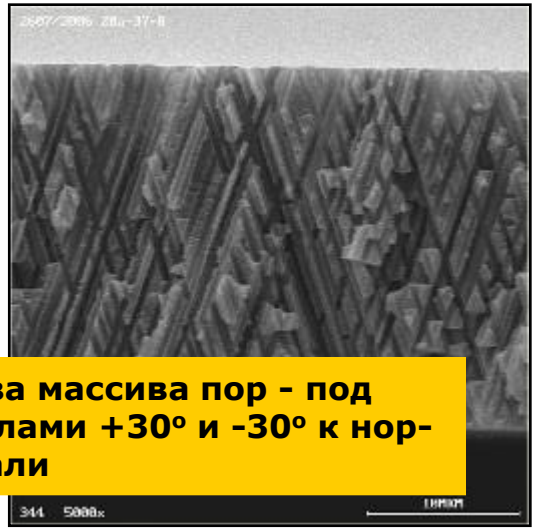
Все поры перпендикулярны поверхности



Все поры под углом 45° к поверхности

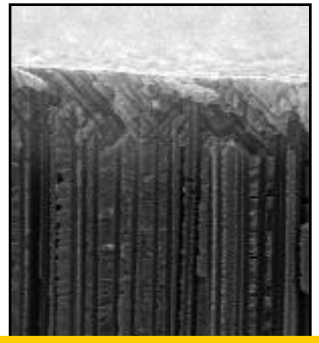


Поры в интервале углов ± 30° к нормали



Два массива пор - под углами +30° и -30° к нор-мали

Два массива пор - под углами +45° и -45° к нор-мали



В селективном слое два массива пор - под углами +45° и -45° к нор-мали. Массив параллельных пор – в слое-подложке

«Вторичные» нано- и микроструктуры на трековых мембранах

Было показано применений наночастиц с высоким аспектным соотношением, и многие другие приложения консолидированных наноструктур продолжают разрабатываться таких процессов и технологий как:

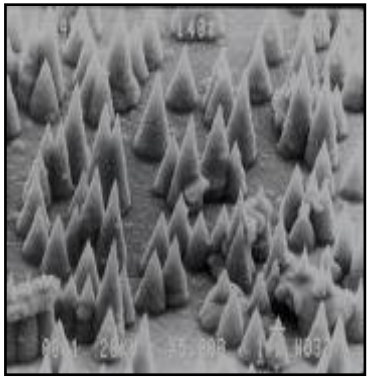
Биосепарация

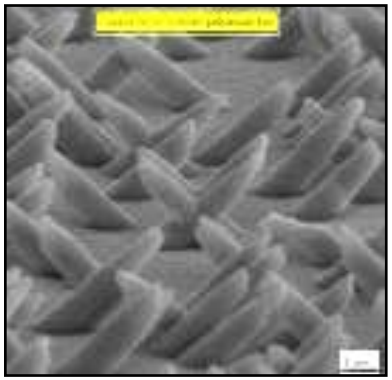
Сенсорика

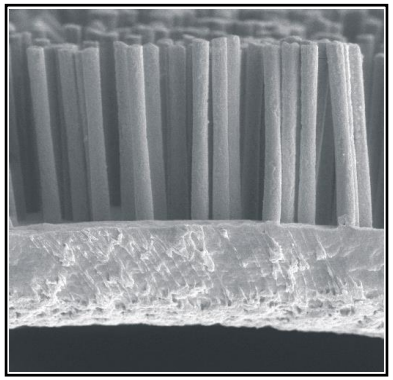
Электроника

Оптические приложения

Получение подложек для поверхностно-усиленного рамановского рассеяние света (SERS). Детекция отдельных молекулы при очень низких концентрациях (порядка нМ)







Мы ждем новых идей в области применения материалов , облученных тяжелыми ионами!

Спасибо за внимание !