

# Модернизированные плазмооптические приборы для генерации и управления сильноточными пучками тяжёлых ионов (фундаментальные результаты и приложения)

А.А. Гончаров, А.Н. Добровольский, А.Н. Евсюков, И.М. Проценко

Институт Физики НАН Украины,  
03028, Киев, Украина  
e-mail: gonchar@iop.kiev.ua

Дан краткий обзор некоторых новых видов плазмодинамических приборов, основанных на плазмооптических принципах магнитной изоляции электронов и эквипотенциализации магнитных силовых линий. Разработанные приборы используют постоянные магниты и обладают значительной гибкостью по отношению к пространственной конфигурации (планарные, цилиндрические, эллиптические). Исследовалась возможность использования таких приборов для ионной очистки и нанесением функциональных покрытий.

## Введение

Фундаментальной основой новых разработанных приборов служит идея магнитной изоляции электронов и эквипотенциализации силовых линий магнитного поля для введения управляющих электростатических полей в объем плазменной среды. Эта плазмооптическая идея была впервые изложена в [1,2]. Этот тип приборов является частью большого класса таких плазменных приборов как плазменные ускорители, магнетроны, электростатические ракетные движки, магнитоизолированные диоды, в которых используется разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях с замкнутым дрейфом электронов. Изменяя конфигурацию силовых линий магнитного поля и распределение электрического потенциала на них, можно управлять сильноточными ионными пучками генерируемыми в таких системах без нарушения квазинейтральности этих пучков. Интенсивные пучки тяжелых ионов используются в устройствах высокодозной имплантации для поверхностной модификации материалов, а также для ионной очистки, активации поверхно-

стей и напыления функциональных покрытий. Такие пучки используются в исследованиях по инерционному тяжелоионному синтезу, в ускорителях заряженных частиц, для управления космическими аппаратами на орбитах и др. Сравнительно недавно была высказана идея об использовании плазмооптических систем для сепарации по массам квазинейтральных ионных пучков [3].

Аксиально-симметричная электростатическая плазмооптическая линза – это хорошо исследованный прибор для фокусировки и управления интенсивными, широкоапертурными пучками тяжелых ионов средних энергий. Именно для таких ионных пучков проблемы компенсации пространственного заряда являются особенно критическими. В рамках совместных исследований Института Физики НАНУ (Киев, Украина) совместно с ЛБНЛ (Бёркли, США) были проведены экспериментальные работы по выяснению возможности использования электростатической плазменной линзы для фокусировки и управления широкоапертурными (диаметр порядка 10 см) пучками тяжелых ионов средних энергий (до 50 кэВ) в устройствах высокодозной ионной имплантации [4-6]. Эти эксперимен-

ты продемонстрировали высокую эффективность использования таких фокусирующих систем для управления пучками тяжелых ионов (Bi, Pb, Ta, Cu, Zn, Co). Так, плотность тока сфокусированных ионных пучков Bi, Pb, Ta на мишени увеличилась в 40 раз. В линзах, используемых в этих экспериментах, для создания требуемой конфигурации и величины магнитного поля использовались традиционные электромагнитные катушки с током. В процессе экспериментов было замечено существенное возрастание плотности сфокусированного ионного пучка в очень узкой области малых магнитных полей. Одновременно с этим в этой области наблюдается резкое уменьшение шумов. Как показали недавние измерения эмиттанса сфокусированного линзой широкоапертурного ионного пучка [7] линза с минимизированными градиентами магнитного поля в оптимальных режимах фокусировки (малые магнитные поля, отсутствие шумов) не оказывает заметного влияния на величину эмиттанса проходящего ионного пучка. Это открывает привлекательные перспективы для использования таких фокусирующих устройств в пучковых линиях ускорителей тяжелых ионов. Обнаруженный эффект существенного улучшения фокусирующих свойств линзы в области малых магнитных полей делает возможным использование постоянных магнитов для создания необходимой магнитной конфигурации линзы. Экспериментальные исследования плазменной линзы, основанной на постоянных магнитах, были выполнены в ИФ НАНУ и ЛБНЛ [8]. Экспериментальный образец подобной плазменной линзы представлен на Рис. 1.

В результате этих исследований было установлено, что в скрещенной геометрии ЕН полей плазмооптической линзы зажигается стабильный газовый разряд при низких давлениях. Использование пространственной кон-

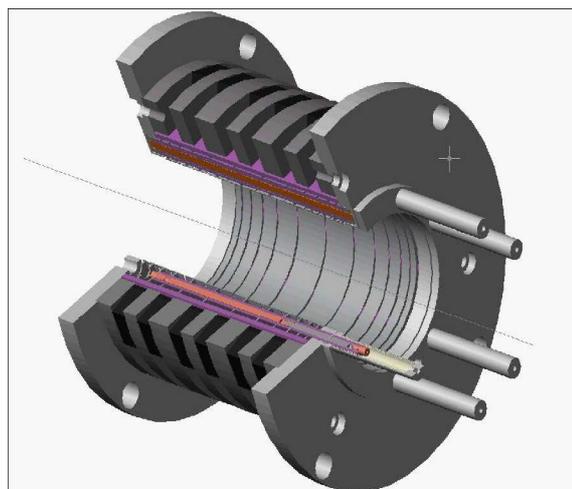


Рис. 1. Электростатическая плазмооптическая линза на постоянных магнитах. Входная апертура 10 см, длина 15 см, число цилиндрических электродов 11, величина магнитной индукции, формируемой Fe-Nd-B магнитами в центре линзы 300Гс.

фигурации плазменных линз и физических принципов плазмооптики при создании газовых разрядов в скрещенных электрических и магнитных полях позволило разработать эффективные, надежные, недорогие плазмодинамические приборы, обладающие значительной гибкостью по отношению к геометрической форме (планарные, цилиндрические, эллиптические). Эти приборы могут быть применены для прецизионной ионной очистки и активации мишени непосредственно перед напылением. Они могут функционировать отдельно и в едином технологическом цикле с магнетронной распылительной системой.

### **Цилиндрический плазмооптический магнетрон**

Цилиндрические магнетроны являются более экономичными в использовании материала катода и более подходящими для покрытия маленьких деталей, проволочек, волокон, анилоксовых валов нежели планарные системы. Однако практически с момента их появления известны и основ-

ные их недостатки. Это малая эффективность использования рабочего объема разряда и низкий коэффициент использования материала катода.

Основные усилия исследователей направлены преимущественно на устранение именно второго недостатка. При этом фактически упускается из виду, что он скорее следствие первого. Расширение зоны существования разряда в рабочем объеме над поверхностью катода-мишени позволяет значительно увеличить плотность ионного потока на мишень и, часто, одновременно площадь зоны распыления на ней. Создание условий для однородной генерации ионов во всем объеме магнетрона над катодом может автоматически обеспечить равномерный расход материала катода и высокую скорость его распыления.

В ИФ НАНУ был разработан, изготовлен и испытан цилиндрический магнетрон, действие которого базируется на основных принципах плазмооптики, а именно, магнитной изоляции электронов и эквипотенциализации силовых линий изолирующего магнитного поля. Принципиальная схема прибора показана на Рис. 2. Цилиндрический магнетрон размещен в вакуумной камере. В камере предусмотрена возможность устанавливать образцы (4) во внутреннем объеме магнетрона: либо строго по оси один цилиндрический образец, либо несколько на держателе (5) типа револьверного барабана. Сам магнетрон имеет магнитную систему (1) собранную на постоянных магнитах и охлаждаемый катод (2). Катод охлаждается за счет теплового контакта с резервуаром, через который прокачивается холодная вода. В этих экспериментах использовался цилиндрический катод из меди внутренним диаметром около 60 мм и высотой 63 мм. Цилиндрическая магнитная система имеет внутренний диаметр 109 мм, внешний 150 мм и общую высоту 153 мм. Анодная систе-

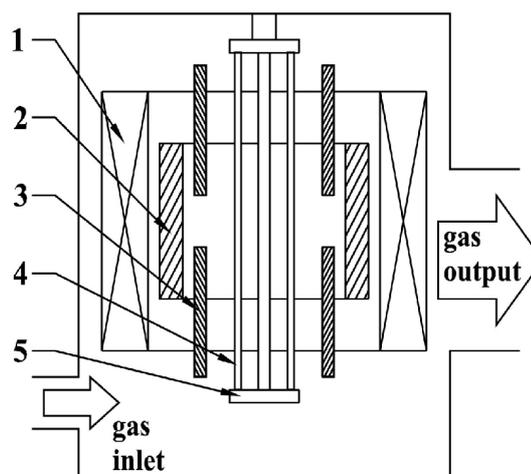


Рис. 2. Принципиальная схема магнетронной установки. 1 – магнитная система магнетрона; 2 – катод; 3 – анод; 4 – образцы; 5 – держатель образцов.

ма (3) состоит из двух подвижных частей и позволяет устанавливать различные электроды на разную глубину от внешних срезов магнитной системы по оси магнетрона. Соединяя две половины электродов можно получить либо сплошной анод, либо анод с разрывом в области расположения катода (виртуальный анод). Анодные электроды изготовлены из немагнитной стали и не участвуют в формировании магнитного поля в магнетроне. Обычно в качестве анодов использовалась система из 6 равномерно размещенных по окружности стержней параллельных рабочей поверхности катода. Расстояние аноды-катод можно было регулировать. Кроме того, можно было разместить одиночный анодный стержень строго по оси магнетрона. Плазмообразующий газ аргон напускался прямо в камеру. Рабочее давление в экспериментах было от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  Тор

Магнитная система магнетрона формирует осесимметричное магнитное поле близкое по форме к полю формируемому в электростатической плазменной линзе. (см. рис. 3). На рисунке сплошными линиями ограничена область магнитной систе-

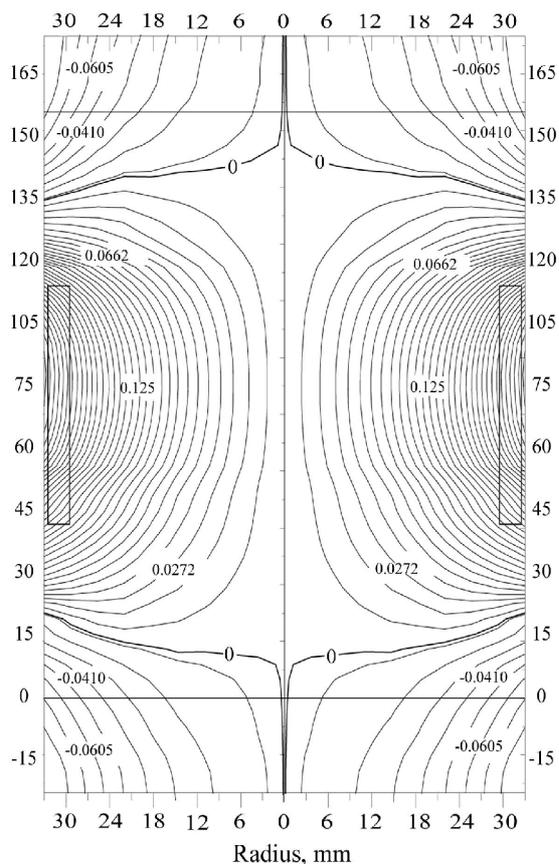


Рис. 3. Магнитные силовые линии магнетрона (мТл)

мы и прямоугольниками указано расположение катода.

В экспериментах с плазмооптическим магнетроном было обнаружено две формы существования разряда. Одна характеризуется слабым свечением рабочего газа в объеме магнетрона и малыми токами разряда. Пробой разрядного промежутка происходит при достаточно высоких напряжениях  $U_b$  и давлениях порядка  $10^{-3}$  Тор. Падения напряжения на разряде не происходит и вольт-амперная характеристика разряда близка к линейной. Распыления материала катода практически не заметно. Вторая форма разряда характеризуется большими токами разряда и сильным падением потенциала на разрядном промежутке по сравнению с напряжением пробоя

$U_b$ . Переход между слаботочной и сильноточной формами разряда происходит скачком при некотором критическом токе слаботочного разряда, обычно порядка 30 мА, и слабо зависит от давления. После перехода разряда в сильноточную форму напряжение на нем падает до значений  $\sim 400$  В, которое практически не зависит от давления в системе. В экспериментальных условиях сильноточный разряд характеризуется интенсивным свечением с характерным цветом распыляемого катодного материала (Cu), токами до 3А и плотностью тока до  $30 \text{ мА/см}^2$ .

Горение разряда возможно при разных расстояниях между анодами и катодом, но оптимизация этого параметра позволяет существенно понизить по давлению область существования сильноточного разряда. При этом соотношение тока и напряжения на разряде остается практически постоянным. Как можно видеть из рис. 3 в центральной части магнетрона, вблизи плоскости симметрии перпендикулярной основной оси, силовые линии достаточно параллельны поверхности катода. В случае образования виртуального анода, когда анодом служит эквипотенциальная магнитная силовая линия опирающаяся на анодные стержни плазменной обработке должна подвергаться вся поверхность катода и процесс образования покрытия будет идти в условиях отсутствия затенения поверхности образца электродами анода. Эксперименты показывают, что магнетронный разряд горит как при сплошном, так и при виртуальном аноде с разрывом длиной вплоть до 55 мм. После распыления поверхность катода-мишени сохраняется в целом однородной с более интенсивной полосой в центральной плоскости шириной около 60 % от общей высоты катода.

Существование двух форм разряда позволяет использовать один и тот же прибор как для предварительной ионной

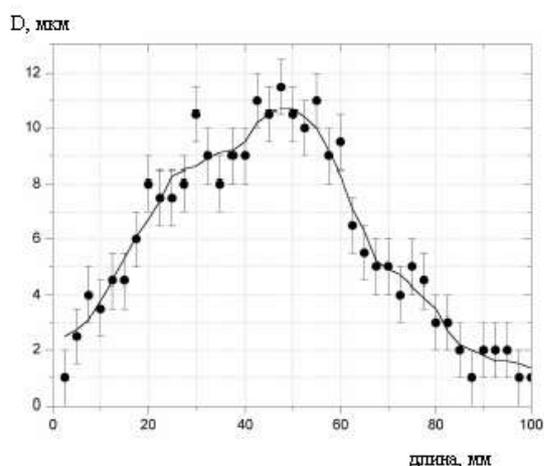
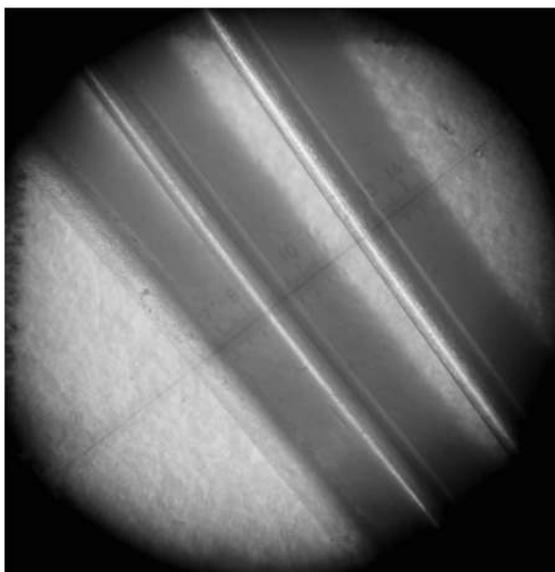


Рис. 4. Фотография образцов металлических проволок (нержавеющая сталь, диаметр 300 мкм) после обработки в магнетроне и аксиальный профиль напыления меди на первом образце. Слева направо (время обработки): 1ый – 20 мин., 2ой – 5 мин., 3 – без обработки.

очистки и активации образца, так и для самого процесса нанесения функционального покрытия. Эксперименты показывают, что использование двух таких функций прибора действительно улучшает адгезию нанесенного покрытия. Скорость напыления покрытий из меди в экспериментах достигала значения 0,5 мкм/мин.

На рис. 4 представлены изображения образцов проволок из нержавеющей стали покрытые в магнетроне пленкой меди и профиль этого напыления на первом образце. Видно, что при длительной обработке (20 мин.) толщина проволоки заметно возрастает. Изображение увеличено примерно в 30 раз.

### Цилиндрический ионно-плазменный ускоритель

Еще одним примером плазмооптического прибора, основанного на использовании пространственной геометрии плазменной линзы, разработанного и испытанного в ИФ НАНУ, является цилиндрический ионно-плазменный ускоритель. Этот прибор предназначен для ионной обработки мишеней сложной цилиндрической формы и может использоваться как отдельно, так и совместно с цилиндрическим магнетроном в едином технологическом процессе получения функциональных покрытий с наперед заданными свойствами. Принципиальная схема и сечение прибора показаны на рис. 5.

Электрофизические характеристики этого прибора были исследованы экспериментально. Эти характеристики были оптимизированы по величине и конфигурации магнитного поля, ширине и длине ускорительного канала, давлению газа, способу подачи газа в ускоритель, анодному потенциалу. Были изучены вольт-амперные характеристики для различных давлений плазмообразующего газа аргона. При оптимальных параметрах этот прибор может обеспечивать остро сфокусированный ионно-плазменный поток на цилиндрическую подложку диаметром 10-40 мм с общим током вплоть до 10-20 мА энергией ионов в диапазоне от 300 до 2000 эВ. Прибор надежно функционирует в диапазоне давлений  $8-16 \cdot 10^{-4}$  Тор. При этих условиях максимальная скорость ионной очистки (травления) составляет 0,5-3,4 нм/сек в зависимости от материала

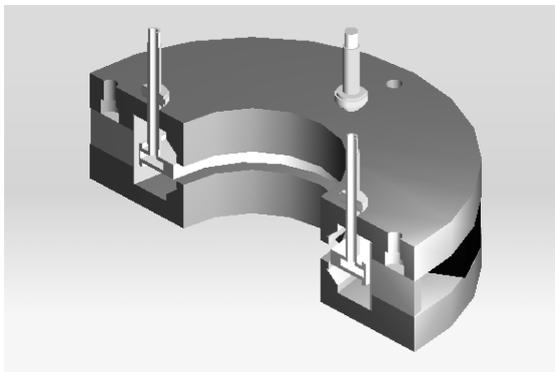
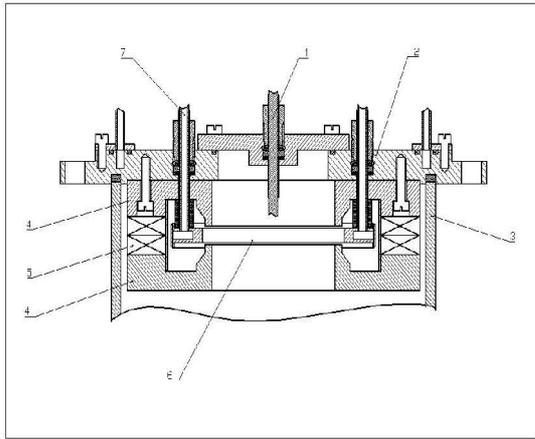


Рис. 5. Цилиндрический ионно-плазменный ускоритель. 1 – держатель образца, 2 – фланец, 3 – стенка вакуумной камеры, 4 – полюса магнитной системы, 5 – Fe-Nd-B магниты, 6 – анод, 7 – держатель анода.

подложки. Профиль травления поверхности цилиндрического титанового образца диаметром 40мм показан на рис. 6. Эти эксперименты проводились при давлении аргона  $9 \cdot 10^{-4}$  Тор, напряжении на разряде 900В, токе разряда 20мА и времени ионной обработки в течении 60 минут.

Как видно ширина эрозионного трека на образце достаточно узкая (4-5 мм). Наиболее интенсивное травление имеет место в кольце шириной 2 мм. Скорость травления титана в средней области равна 1,2 нм/сек. Были измерены скорости травления также для других металлических и неметаллических подложек. Наибольшая скорость травления была

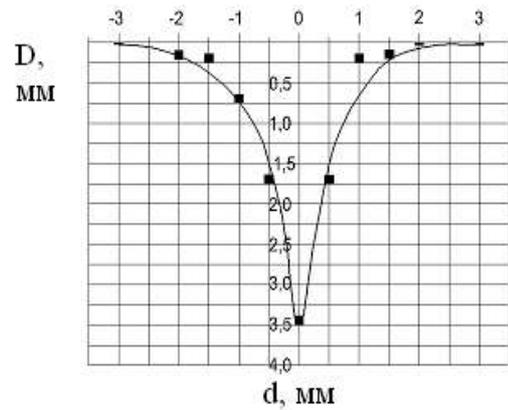


Рис. 6. Профиль ионного травления цилиндрического титанового образца. D – глубина травления, d – расстояние от места максимального травления.

получена на медной подложке при давлении аргона  $9 \cdot 10^{-4}$  Тор скорость травления меди достигала 2,8-3,3 нм/сек. Существенно медленнее травятся изделия из

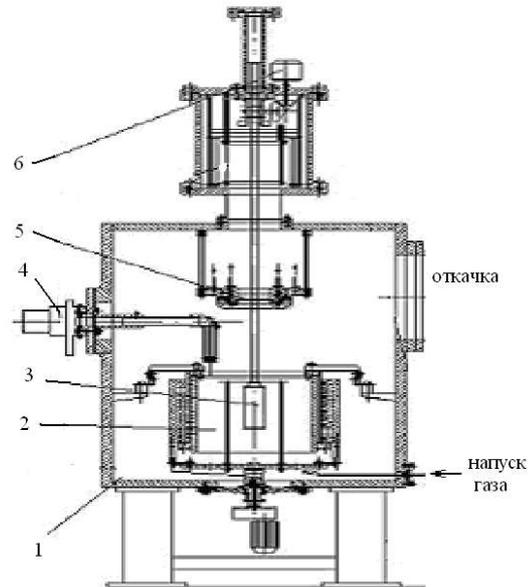


Рис. 7. Экспериментальный многофункциональный стенд. 1 – вакуумная камера, 2 – цилиндрический магнетрон, 3 – обрабатываемый образец, 4 – оптический прибор для контроля параметров плазмы, 5 – цилиндрический ионно-плазменный ускоритель, 6 – система вертикального перемещения образца.

керамических диэлектрических подложек. Скорость травления зависит также от энергии падающего ионного потока. Поскольку плотность ионного тока и коэффициент изменяются вместе с энергией ионов, то зависимости скорости травления от энергии являются близкими к линейной. Экспериментально измеренные рабочие параметры этого ионно-плазменного ускорителя позволяют использовать его с цилиндрической магнетронной распылительной системой в едином технологическом цикле.

Для проверки возможности совместного функционирования аксиально-симметричных цилиндрических систем ионной очистки и напыления был создан экспериментальный технологический стенд, упрощенная схема которого представлена на рис. 7, где указаны основные элементы установки. Более подробное описание этого стенда дано в работе [9].

## Заключение

Разработанные и исследованные цилиндрические плазмооптические приборы, основанные на физических принципах и геометрии электростатических плазменных линз представляют собой достаточно эффективные, надежные и недорогие устройства для современных плазменных технологий получения новых материалов и покрытий. Описанные ионно-плазменные приборы могут использоваться отдельно для ионной обработки мишеней, а также как показали технологические испытания могут применяться в комбинации друг с другом для предварительной ионной очистки и напыления функциональных металлических и неметаллических покрытий в едином производственном цикле, например, для обработки анилоксовых валов, широко используемых в текстильной и полиграфической промышленности.

## Благодарности

Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность проф. Я. Брауну из ЛБНЛ (Беркли, США) за существенную и постоянную помощь в выполнении этих работ и плодотворные дискуссии.

## Список Литературы

- [1] Морозов А.И. // Доклады Академии Наук СССР, 1965, 163(6), с.1363.
- [2] Morozov A. and Lebedev S.// "Plasma-Optics", Reviews of Plasma Physics, M. Leontovich, Ed., New York: Consultants Bureau, 1975, p.247.
- [3] Морозов А.И., Семашко Н.Н //Письма в ЖТФ, 2002, т.28, вып.24, с.63.
- [4] Goncharov A., Protsenko I., Yushkov G. and Brown I // Appl.Phys. Lett., 1999, 75(7), p.911.
- [5] Goncharov A., Protsenko I., Yushkov G. and Brown I. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2000, 28(6), p. 2238.
- [6] Goncharov A.// Rev. Sci. Instr., 2002, 73(2), p.1004.
- [7] Chekh Yu., Goncharov A., Protsenko I., Brown I.// Appl. Phys. Lett., 2005, 86, 041502.
- [8] Goncharov A., Gorshkov V., Gubarev S., Dobrovosky A., Protsenko I. and Brown I.// Rev. Sci. Instrum., 2002, 73 (2), p.1001.
- [9] Goncharov A., Demchishin A., Dobrovolskiy A., Kostin E., Panchenko O., Pavlov S., Protsenko I., Stetsenko B., Ternovoy E. and Brown I. // Problems of Atomic Science and Technology, 2005, № 1, p.169.