

мой образцов, диапазон применения методики может простирается от десятков граммов слабообогащенного урана (десятки долей грамма ^{235}U) до нескольких килограммов урана любого обогащения;

для измерений могут быть использованы коаксиальные германиевые детекторы;

массу урана в образце находят с помощью калибровочного графика. Как показали опыты, погрешность определения массы урановых образцов может достигать 1—3% при длительности облучения 30—60 мин и такой же продолжительности измерения;

погрешность определения массы урана уменьшается с увеличением обогащения урана, так как возрастает число делений и интенсивность γ -излучения ^{138}Cs ;

измерения γ -излучения образца в области пика 1436 кэВ и в диапазоне ниже 1000 кэВ (область применения программы FRAM) могут дать информацию о массе и изотопном составе образца;

толщина стенок контейнеров, содержащих ядерные материалы, ограничивает возможность определения изотопного состава, но не массы, поскольку для измерения массы используется высокоэнергетическое γ -излучение;

активационная γ -спектрометрическая методика может быть применена для анализа металлических урановых образцов, образцов из порошков, микротвэлов и гексафторида урана. Возможность ее применения для анализа плутониевых образцов будет специально исследована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Кожин А.Ф. и др. γ -Спектрометрический контроль больших плутониевых образцов. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 6, с. 487—490.
2. Bushuev A.V., Bosko A.L., Zubarev V.N. et al. Development of the method for characterization of samples containing spontaneously fissioning nuclides using fission products gamma-spectrometry. — J. Nucl. Mat. Management, 2002, v. XXXI, № 1, p. 59—62.
3. Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Прошин И.М. Возможность активационных γ -спектрометрических измерений для определения массы ядерных материалов в образцах. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 4, с. 286—290.

Поступила в Редакцию 28.02.03

УДК 621.384.6

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ*

Аброян М.А., Косоголов С.Л., Шведюк В.Я.

(НТЦ «Энергия» ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»)

Широкоапертурные ускорители электронов— новый класс ускорителей, обзаванный своим появлением развитию техники мощных газовых лазеров с самостоятельным разрядом. В лазерах они выполняют функцию устройства ионизации, обеспечивая синхронное облучение быстрыми электронами объема активной среды

*Журнальный вариант доклада на 18-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2002 (октябрь 2002 г., Обнинск).

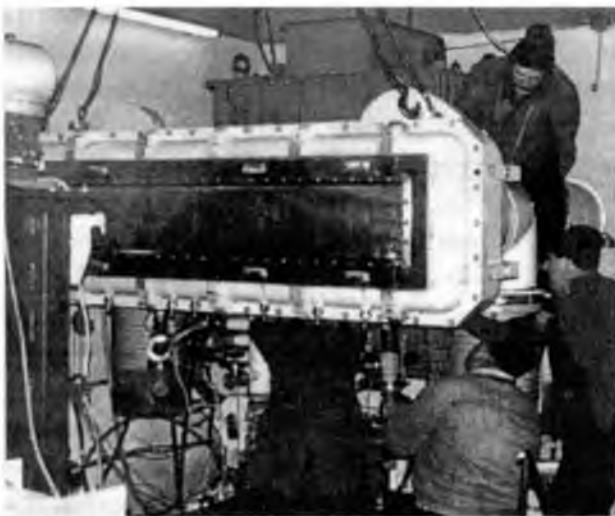
в разрядной камере. Отсюда главная особенность такого ускорителя — площадь сечения выведенного электронного пучка равна площади сечения рабочего объема разрядной камеры и составляет тысячи квадратных сантиметров.

Сканеры не дают возможности синхронного облучения рабочей поверхности или объема, т.е. имеются ограничения на скорость подачи обрабатываемого материала, связанные со скоростью развертки. Эти ограничения отсутствуют в таких ускорителях и делают привлекательным их использование в тонкопленочных и объемных электронно-химических и плазмохимических технологиях. В настоящей работе описаны созданные в последнее время в НТЦ «Энергия» широкоапертурные ускорители электронов — устройства ионизации CO - и CO_2 -лазеров для технологического применения и научных исследований, а также устройство ионизации генератора для озонирования питьевой воды на станциях водоочистки.

Электронный пучок большого сечения, формируемый в ускорителе, выводится через фольгу устройства вывода в рабочую камеру лазера или иного плазмохимического реактора и управляет объемным несамостоятельным разрядом, в котором происходят накачка лазерных уровней или необходимые плазмохимические реакции. В импульсно-периодическом режиме такой реактор с быстрой прокачкой газа работает при атмосферном давлении, в непрерывном режиме — при пониженном давлении.

Устройство ионизации для мощного мобильного CO_2 -лазера. Широкоапертурный ускоритель электронов — устройство ионизации обеспечивает несамостоятельный разряд в активной среде мощного мобильного импульсно-периодического CO_2 -лазера, предназначенного для дистанционной резки металлоконструкций [1]. Существенное отличие лазера, повышающее его автономность и мобильность, состоит в использовании в качестве рабочей смеси заборного воздуха с подмешиванием CO_2 . Отсюда вытекает требование высокой импульсной плотности тока электронного пучка, генерируемого ускорителем.

Ускоритель электронов представляет собой планарный тетрод с протяженными дискретными термокатодами и сетками в виде стержней, параллельных катодам. Проведены специальные расчеты по оптимизации электронно-оптической системы ускорителя, направленные на повышение коэффициента вывода пучка [2]. Устройство вывода — фольга и опорная решетка с системой щелей и каналов охлаждения согласовано с электронно-оптической системой. Общий вид ускорителя со стороны устройства вывода пучка показан на рис. 1.



Р и с. 1. Широкоапертурный ускоритель ионов — устройство ионизации мобильного технологического CO_2 -лазера на стадии монтажа

В газоразрядную камеру лазера вводится электронный пучок прямоугольного сечения площадью 6600 см^2 , распределение плотности тока по сечению пучка равномерное. Энергия электронов на входе в камеру определена ускоряющим напряжением 225 кВ и толщиной фольги из алюминиевого сплава 30 мкм, средняя мощность пучка в рабочем цикле до 4,5 мин составляет 50 кВт. Плотность тока в прямоугольном импульсе длительностью 200 мкс равна 4 мА/см^2 . Такие параметры пучка, генерируемые устройством ионизации лазера — широкоапертурным ускорителем, обеспечивают самостоятельный объемный разряд в активной среде лазера с коммутируемой средней мощностью разряда 500 кВт в рабочем цикле. При этом средняя мощность лазерного излучения составляла 35 кВт [3].

Технологический комплекс, содержащий разрядную камеру, ускоритель электронов, систему фокусировки излучения, автономные системы электропитания, водоснабжения и др., был смонтирован на транспортном средстве грузоподъемностью 22,2 т и доставлялся к месту производства работ самоходом. Конструкция широкоапертурного ускорителя электронов разработана с учетом транспортных нагрузок. Испытания подтвердили правильность выбранных технических решений.

Система охлаждения ускорителя позволяет увеличить длительность его рабочего цикла и расширяет возможности использования такого типа ускорителя с высокой мощностью пучка в других технологических применениях.

Устройство ионизации сверхзвукового СО-лазера. Известно, что высокий к.п.д. генерации, присущий СО-лазерам с самостоятельным разрядом, обеспечивается при значительной плотности тока электронного пучка, вводимого в разрядную камеру лазера. Долгое время именно плотность тока электронного пучка ограничивала к.п.д. и мощность излучения непрерывного сверхзвукового электроионизационного СО-лазера [4]. Для стендового макета такого лазера создано устройство ионизации с плотностью тока электронного пучка за фольгой до 75 мА/см^2 в непрерывном режиме и площадью сечения пучка 2400 см^2 [5].

Для генерации электронов в ускорителе используется эмиссия протяженных дискретных термокатодов. Электронно-оптическая система представляет собой планарный триод, в котором управление током пучка осуществляется в области отрицательных сеточных напряжений. Максимальные параметры, достигнутые в автономном режиме работы ускорителя, следующие: ускоряющее напряжение 210 кВ, ток электронов внутри ускорителя 365 мА, плотность тока пучка за фольгой 75 мА/см^2 при толщине фольги 30 мкм, неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка 20%, длительность режима 3 с. Длительность работы ограничивалась отсутствием охлаждения устройства вывода пучка.

Эксперименты и расчеты показали, что предельная для фольги плотность тока пучка зависит от давления в разрядной камере лазера. При рабочем давлении 30 мм рт. ст. возрастает термическое сопротивление в зоне контакта фольга — опорная решетка и охлаждение последней оказывается неэффективным. Если принять меры по уменьшению термического сопротивления, система охлаждения с водяными каналами, равномерно распределенными по апертуре устройства вывода, может обеспечить длительную работу ускорителя в составе технологического лазера непрерывного действия при пониженном давлении в разрядной камере.

Широкоапертурный ускоритель электронов — устройство ионизации сверхзвукового СО-лазера при работе в составе стендового макета лазера обеспечивал его работу в пусках длительностью 0,3—1 с при к.п.д. более 40% и энергии излучения более 58 кДж [6].

Устройство ионизации для СО-лазера с криогенным охлаждением среды. СО-лазеры с криогенным охлаждением рабочей среды стимулировали развитие широкоапертурных ускорителей электронов — устройств ионизации, в которых для генерации электронов использовалась электронная эмиссия «холодного» катода, температура которого не возмущала бы рабочей среды лазера. Принцип действия ускорителя [7] заключается в использовании вторичной ион-электронной эмиссии, возникающей при бомбардировке металлического катода быстрыми ионами и нейтральными частицами. Ионы извлекаются из области прианодной плазмы самостоятельного тлеющего разряда орбитронного типа ускоряющим полем катода ускорителя, провисающим через отверстия в аноде. При этом в промежутке анод—катод, если выполнены условия электрической прочности по Пашену, зажигается несамостоятельный высоковольтный тлеющий разряд. В его поле ионы ускоряются к катоду и вызывают эмиссию электронов, которые ускоряются этим же полем и выводятся через устройство вывода ускорителя в рабочую камеру лазера. Подробно особенности такого ускорителя и методы улучшения его параметров освещены в работе [8]. Использование этого принципа генерации и формирования электронного пучка позволило создать несколько модификаций ускорителей электронов — устройств ионизации, а также ускоритель электронов для технологического применения типа ТУР-М импульсно-периодического действия со средней мощностью пучка 6 кВт и полем облучения 1800×300 мм.

На рис. 2 показан малогабаритный широкоапертурный ускоритель электронов с использованием высоковольтного тлеющего разряда, предназначенный для исследований импульсно-периодического и непрерывного режимов работы СО-лазера с криогенным охлаждением рабочей среды. Площадь сечения пучка на входе в камеру 450×300 мм, энергия электронов 180 кэВ, импульсная плотность тока за фольгой 5 мА/см² при средней мощности выведенного пучка до 2 кВт. Непрерывный режим работы может быть реализован в этом же ускорителе, что является его привлекательной чертой. Достоинством является также простота системы вакуумной откачки ускорителя, для обеспечения его работы достаточно одного форвакуумного насоса. В некоторых случаях удастся использовать «откачивающие» свойства разряда и продолжительное время работать с отключенным насосом.

Устройство ионизации генератора озона. Повышение качества питьевой воды является в настоящее время важной экологической задачей. В НТЦ «Энергия» НИИЭФА



Р и с. 2. Малогабаритный широкоапертурный ускоритель ионов на основе высоковольтного тлеющего разряда — устройство ионизации СО-лазера

им. Д.В. Ефремова исследовались возможности решения этой задачи электрофизическими методами. В результате исследований создан опытный образец генератора, в котором для синтеза озона используется несамостоятельный объемный разряд, управляемый электронным пучком широкоапертурного ускорителя электронов. Для синтеза озона используется осушенный (точка росы -50°C) атмосферный воздух без другой предварительной подготовки, что является преимуществом генератора озона на основе несамостоятельного разряда по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами, использующими барьерный разряд.



Р и с. 3. Устройство ионизации генератора озона со стороны устройства вывода пучка

Поэтому опорная решетка устройства вывода со щелевой перфорацией разделена на секции и имеет каналы водяного охлаждения для каждой секции. Анод высоковольтного тлеющего разряда также охлаждается водой и для повышения эффективности ускорителя имеет перфорацию, согласованную с перфорацией опорной решетки. Испытания дали следующие результаты: в комплексном режиме длительная работа достигнута при частоте 20 Гц, в автономном — при частоте до 100 Гц. При этом плотность тока в импульсе длительностью 20 мкс составляла за фольгой $7,5\text{ мА/см}^2$, средняя мощность выведенного пучка с энергией электронов до 175 кэВ достигала 5 кВт.

В устройстве вывода использовалась алюминиевая фольга толщиной 25 мкм. За время испытаний, которые велись в течение года, отказов вследствие прорыва и перегрева фольги не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аброян М.А., Богданов В.В., Бодакин Л.В. и др. Широкоапертурный электронный ускоритель как устройство ионизации для мощного мобильного CO_2 -лазера. — Тезисы докл. 9-го сов. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, сентябрь 1998, с. 21.
2. Аброян М.А., Бодакин Л.В., Зуев Ю.В. и др. Влияние электронно-оптических факторов на коэффициент вывода пучка широкоапертурных технологических ускорителей электронов. — В кн.: Докл. 10-го Межд. сов. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, октябрь 2001 г.
3. Востриков В.Г., Гаврилюк В.Д., Красюков А.Г. и др. Мобильный лазерный комплекс МЛТК-50 для дистанционной резки металлоконструкций. — Хим. и нефтегазовое машиностроение, 2001, № 5, с. 52—53.

На рис. 3 показано устройство ионизации генератора озона. Диаметр устройства вывода пучка 500 мм, ускоритель и камера имеют цилиндрическую симметрию. Проток воздуха через камеру осуществляется при давлении, близком к атмосферному, режим работы — импульсно-периодический [9].

Главной задачей при разработке этого ускорителя было обеспечение длительной работы в составе генератора озона. Поэтому

4. Аверин А.П., Басов Н.Г., Глотов Е.П. и др. — Квантовая электроника, 1981, т. 8, с. 2558.
5. Аброян М.А., Акулов В.В., Богомазов П.М. и др. — Там же, 1996, т. 23, с. 751.
6. Dymshits B.M., Ivanov G.V., Meschersky A.N., Kovsh I.B. — In: Proc. SPIE, 1995, v. 2206, p. 109.
7. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. Ускоритель электронов непрерывного действия на основе вторичной ионно-электронной эмиссии. — ПТЭ, 1984, № 4, с. 24—27.
8. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косогоров С.Л. и др. Широкоапертурные ускорители электронов с высокой эффективностью вывода пучка. — Там же, 1998, № 2, с. 83—88.
9. Аброян М.А., Манукян Г.Ш., Сиротинкин В.В. и др. Устройство ионизации мощного генератора озона. — Тезисы докл. 8-го сов. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. 26—28 сентября 1995, Санкт-Петербург.

УДК 539.142

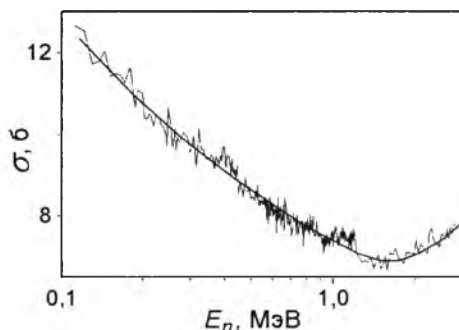
ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЯДЕРНЫХ СЕЧЕНИЯХ*Аникин Г.В., Аникин В.Г. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)*

Известно, что нейтронные сечения испытывают флуктуации даже в той области энергии возбуждения, где плотность уровней составного ядра достаточно высока и можно было бы ожидать плавного хода сечений в зависимости от энергии налетающего нейтрона. Флуктуации большинства тяжелых ядер простираются до 3—5 МэВ энергии налетающих частиц, при измерениях с высоким энергетическим разрешением отдельные выбросы в сечениях могут быть и при более высокой энергии.

В качестве одного из примеров здесь будет рассмотрено полное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами ^{238}U в энергетическом диапазоне 0,1—3 МэВ, взятое из работы [1]. Резкие изменения сечения достигают в этом случае 10—15%. На рис. 1 эти данные представлены ломаной линией, их аппроксимация в рамках оптической модели — гладкой кривой.

Другие примеры флуктуаций. Некоторые авторы (см., например, работу [2]) уделяют большое внимание нестатистическому характеру группировки ядерных резонансов, их корреляции у различных ядер. В настоящей работе, не вдаваясь в подробный анализ резонансов, будем говорить лишь о флуктуациях усредненных сечений с интервалом усреднения от единиц до десятков килоэлектронвольт в зависимости от диапазона рассматриваемой энергии. Кроме того, обращаем здесь внимание на то, что и другие характеристики реакций, например, кинетическая энергия осколков деления тяжелых ядер и их угловая анизотропия также испытывают флуктуации, коррелирующие (или антикоррелирующие) между собой и с флуктуациями сечений.

Будем характеризовать флуктуации относительным изменением интересующей нас величины (полного сечения взаимодействия, сечения деления, угловой



Р и с. 1. Полное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами ^{238}U [1]