

УДК 621.38.029

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ AVLIS-ТЕХНОЛОГИИ, ЕЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. А. Мишин

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Рассматриваются принципиальные возможности AVLIS-технологии, основанной на изотопически селективной фотоионизации атомов выделяемого изотопа лазерным излучением. Для трех основных блоков технологии: испарения, фотоионизации и экстракции ионов выделяемого изотопа обсуждается перечень научно-технических исследований, необходимых для его внедрения в практику. Приведены результаты развития этой технологии в промышленно развитых странах мира, где в основном ведутся работы по применению этой технологии для промышленного разделения изотопов урана.

AVLIS-технология использует различие в электронных спектрах поглощения атомов различного изотопического состава. Различное число нейтронов в ядрах изотопов изменяет их массу и форму, что вызывает сдвиг электронных уровней атомов. Это позволяет узкополосным лазерным излучением резонансно возбуждать атомы только определенного изотопического состава и затем селективно ионизовать возбужденные атомы, что позволяет в свою очередь экстрагировать их с применением электрических и магнитных полей. Схема процесса резонансной ступенчатой ионизации показана на рис. 1. Селективность этого метода весьма высока — фактор разделения может достигать 100 и более единиц. Особенность лазерной технологии состоит в том, что лазерное излучение поглощается только атомами выделяемого изотопа, что и приводит к высокой экономичности лазерных методов разделения.

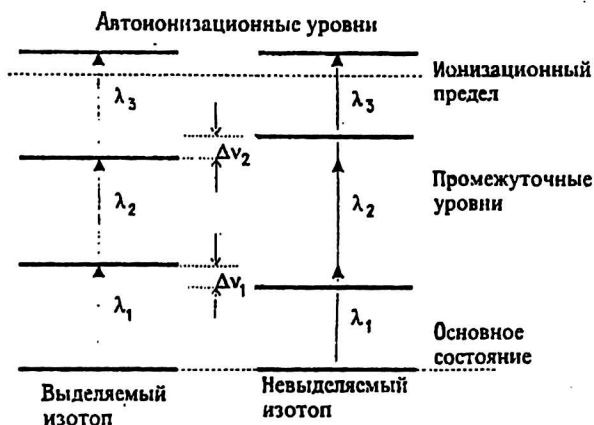


Рис. 1. Принципиальная схема резонансной ступенчатой фотоионизации атомов:
 $\Delta\nu_1$ и $\Delta\nu_2$ — изотопические сдвиги уровней; λ_1 , λ_2 — излучения возбуждающие атомы;
 λ_3 — фотоионизирующее излучение

Технологический процесс состоит из трех основных частей: испарения разделяемого материала, воздействия лазерного излучения на атомный пар с целью ионизации выделяемого изотопа и, наконец, экстракции ионов из образовавшейся плазмы.

Принципиальная геометрия реализации процесса показана на рис. 2. Свободно-молекулярный поток атомов облучается лазерным излучением. Образованные в области пересечения атомного и лазерного пучков ионы экстрагируются электрическим полем на коллекторы.

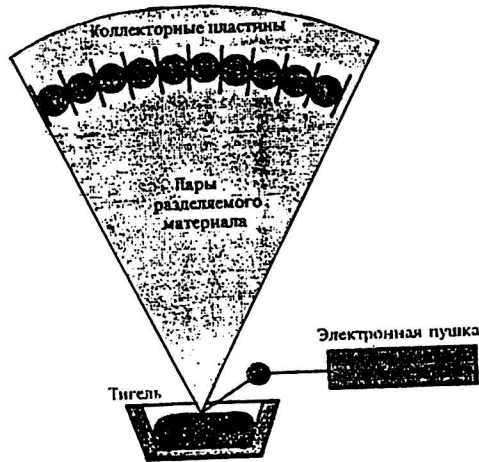


Рис.2. Принципиальная геометрия реализации процесса AVLIS

Предельная производительность AVLIS-метода определяется величиной массопереноса через зону облучения. Поскольку характерная величина плотности атомов в зоне разделения составляет 10^{19} м^{-3} , а средняя тепловая скорость атомов примерно равна 10^2 м/с , то величина переноса массы через квадратный метр зоны разделения составляет $10 \text{ кг} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ для тяжелых атомов. Если предположить, что содержание выделяемого изотопа равно 1%, то удельная производительность достигает $100 \text{ г} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ по выделяемому изотопу. Площадь зоны фотоионизации в единичном модуле может достигать величины 10 м^2 , т. е. предельная производительность метода будет равна 1 кг/ч по выделяемому изотопу. При этом следует помнить, что на каждый грамм выделяемого изотопа необходимо затратить не менее $3,7 \text{ кДж}$ энергии излучения (6 эВ/атом). Поэтому для модуля с производительностью 1 кг/ч необходимы лазеры не менее нескольких киловатт средней мощности.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Хотя этот метод принципиально прост, но для его практической реализации приходится решать большое количество научно-технических задач: вакуум, высокотемпературная техника, электронные пучки, оптика, в том числе волоконная, мощные узкополосные перестраиваемые по частоте лазерные системы, плазма. Поэтому коротко перечислим и обсудим основные научно-технические проблемы, возникающие при практической реализации AVLIS-технологии.

Испарение. Цель — испарить рабочий материал и сформировать его в виде пространственно ограниченного атомного пучка. Существуют три основных метода испа-

рения материала, пригодных для применения в разделительных системах: электронно-лучевой метод испарения; тигельное испарение; газоразрядные методы (магнетронный разряд, полый катод).

Важнейшие для лазерного разделения изотопов (ЛРИ) характеристики испаренного вещества можно подразделить на газодинамические и спектроскопические.

Газодинамические характеристики — средняя тепловая скорость, распределение скоростей (продольное, поперечное), определяющие рассеяние атомного пучка, и пространственные характеристики атомного пучка.

Спектроскопические характеристики — распределение населенностей по низколежащим метастабильным уровням, доплеровское уширение линий переходов.

Важна доля димеров и ионизованных атомов. Димеры могут вызвать значительное поглощение лазерного излучения, а ионизованная часть атомов может понизить величину коэффициента разделения.

Электронно-лучевой испаритель (ЭЛИ) в наибольшей степени удовлетворяет требованиям крупномасштабного производства (см. рис. 2).

Принцип действия ЭЛИ — электронный луч высокой интенсивности бомбардирует поверхность испаряемого вещества. Пробег электронов в веществе мал, вещество локально нагревается до температуры, достаточной для требуемой скорости испарения. Локальное нагревание приводит к высокой экономичности, упрощает требования к материалу тигля и приводит к газодинамическому режиму испарения вещества. Над испаряемой поверхностью образуется кнудсеновский слой, переходной слой пара, а затем свободномолекулярное расширение в вакуум. Результирующий поток пара охлаждается и приобретает сверхзвуковую скорость, что позволяет создать хорошо пространственно сформированный поток атомов. Кроме того, высокая плотность пара в сочетании с высокой плотностью электронов вблизи поверхности металла обеспечивает низкотемпературное распределение низколежащих метастабильных уровней атомов — энергия метастабильных атомов переходит в кинетическую энергию атомов. Конвекция расплавленного металла и отражение электронного луча — главные причины потери энергии. Сканирование электронного пучка позволяет сорвать конвекцию.

Преимущества ЭЛИ: большие удельный энергозатрат и мощность (сотни киловатт средней мощности), реализует автотигельный режим испарения, универсален (применяется при разделении изотопов U, Gd, Zr), конструктивно прост, возможность работы в вакууме, имеет большой ресурс. Недостатки: требуется высокое напряжение питания, большая доля зеркально отраженных электронов (30—50 %), заметная вторичная ионизация (1 % для U и 0,4 % — для Gd).

Тигельные источники атомного пара применяются при испарении например Pu, Yb. Могут использоваться как эффузионные, так и сверхзвуковые источники атомных пучков. Преимущества: конструктивная простота, низкие напряжения питания, высокая эффективность использования разделяемого материала. Недостаток: сравнительно низкий КПД, сложная система тепловой экранировки, невысокий срок службы.

Газоразрядные источники — полый катод и магнетронные испарители (замагниченные электроны дрейфуют вдоль поверхности катода, ионизуя газ, ионы бомбардируют катод, распыляя его.) Их преимущества: большие производительность, срок службы ($> 10^3$ ч), может применяться для испарения тугоплавких материалов (Os, Mo), экономичность. Недостатки: эффузионный режим испарения, большой разброс населенностей низколежащих метастабильных уровней, большая доля ионов, наличие балластного газа.

Фотоионизация. Цель — селективно ионизовать атомы выделяемого изотопа лазерным излучением.

Требованиями к этой части процесса являются получение наивысшей степени селективности и наиболее полное использование как энергии лазерного излучения, так и разделяемого вещества.

Задача подразделяется на две условно независимые части: выбор наиболее эффективной схемы фотоионизации атома и обеспечение оптимального воздействия лазерного излучения на вещество. Эти задачи условно связаны между собой, т. к. при

решении первой задачи должна приниматься во внимание и вторая.

Рассмотрим первую задачу. На этом этапе необходимо, опираясь на определенные критерии среди множества возможных переходов, выбрать наиболее эффективную схему фотоионизации, для чего необходимо:

- определить положение и провести идентификацию энергетических состояний атома;
- исследовать изотопическую и сверхтонкую структуру переходов;
- провести поиск автоионизационных состояний;
- провести измерение времен жизни уровней;
- измерить радиационные характеристики переходов: величины дипольных моментов переходов, сечений автоионизации.

Критерии эффективности следующие:

- большие величины изотопических сдвигов;
- большие времена жизни промежуточных состояний;
- большие сечения автоионизационных переходов (переходы должны лежать в области генерации высокоэффективных, долгоживущих красителей и отвечать требованиям утилизации как зеленой, так и желтой линии лазеров на парах меди).

Кроме того, должны приниматься во внимание ширина сверхтонкой структуры переходов и величины дипольных моментов переходов. Ширина сверхтонкой структуры определяет как селективность, так и коэффициент использования разделяемого материала. Величина дипольных моментов переходов определяет интенсивность взаимодействия излучения со средой и, в частности, определяет пространственно-временную дисторсию лазерного излучения при его распространении в среде.

Практически возможны 2-, 3- и 4-ступенчатые схемы фотоионизации. Однако 2-ступенчатые схемы требуют использования дорогого ультрафиолетового излучения. Поэтому чаще применяют 3-ступенчатые схемы фотоионизации (см. рис. 1), имеющие два селективных перехода, что, во-первых, позволяет ионизовать атомы с потенциалом ионизации порядка 6 эВ наиболее доступным лазерным излучением видимого диапазона (энергия фотона примерно 2 эВ) и, во-вторых, получать высокие коэффициенты разделения. В принципе допустимы и 4-ступенчатые схемы, но с ростом числа ступеней возникают трудности с ионизацией в больших объемах (проблемы синхронизации импульсов и их пространственно-временного перекрытия).

В настоящий момент имеются хорошо отработанные схемы фотоионизации для U, Gd, Pb. Рассмотрим вторую часть фотоионизационной задачи.

На этом этапе необходимо обеспечить оптимальное взаимодействие лазерного излучения со средой. Критерии оптимальности упоминались выше. Сложность этой задачи заключается в ее многопараметричности.

Обычно зона фотоионизации имеет характерный размер в поперечнике единицы сантиметров и длину — порядка десятка метров. Рассматривая процесс чисто умозрительно, предполагается, что лазерные импульсы на всех ступенях процесса распространяются в среде синхронно, переводя атомы из основного состояния в возбужденные, а затем ионизуя их. Кроме того, для эффективной объемной ионизации требуется пространственное совмещение пучков на всей длине зоны фотоионизации. В реальности же при распространении лазерных импульсов в резонансно поглощающей достаточно плотной среде происходит пространственно-временное рассогласование лазерных импульсов. Это рассогласование выражается в поглощении, задержке и искажении временной формы лазерного импульса, а также деформации распределения мощности (например, в самофокусировке) лазерного пучка, действующего на первой ступени процесса. Все это приводит к нарушению пространственно-временного перекрытия импульсов излучения и, следовательно, — к уменьшению эффективности ионизации. Обычно эти эффекты обусловлены влиянием невыделяемых изотопов на лазерное излучение т.к. концентрация их велика, и их линии поглощения лежат рядом с линией выделяемого изотопа. Поэтому особую важность приобретает как правильный выбор схемы фотоионизации, так и правильная организация взаимодействия лазерного излучения с резонансно поглощающей, оптически плотной средой.

Экстракция. Экстракция ионов выделяемого изотопа является заключительным этапом технологической цепи, на котором происходит пространственное отделение продукта от исходного материала.

Требованиями являются: высокая эффективность экстракции и незначительное понижение селективности процесса. Основные процессы, влияющие на величину коэффициента разделения: перезарядка и вторичная ионизация электронами, прямое загрязнение коллектора рассеянными атомами и испарителем.

Задача состоит в следующем: экстрагировать все ионы в заданном направлении; не допустить перезарядки и рекомбинации; не допустить вторичной ионизации в объеме; не допустить образования вторичных заряженных частиц и распыления материала с поверхности коллектора.

В реальной системе невозможно удовлетворить одновременно всем требованиям, и должен соблюдаться определенный компромисс между этими требованиями в зависимости от требований на чистоту продукта и производительность.

Наиболее важным процессом, ухудшающим селективность, является резонансная перезарядка. Сечения ее велики, например, при плотности атомов 10^{14} см² длина пробега иона равна 3 мм, что на порядок меньше характерного диаметра лазерной плазмы. В этих условиях требуется уменьшить плотность пара, уменьшая тем самым производительные характеристики процесса, либо ускорять ионы коротким импульсом (на длине перезарядки). В этом случае, после того как закончилось время ускорения ионов выделяемого изотопа, перезарядка не ухудшает фактор разделения, потому что при обмене электроном не происходит обмена импульсом между налетающим ионом и нейтральным атомом. Перезаряженный ион выделяемого изотопа в виде нейтрального атома будет продолжать движение на коллектор, а вновь образованный ион невыделяемого изотопа будет продолжать движение в направлении распространения атомного пучка.

Известны три основных способа экстракции: электростатический метод, когда ионы ускоряются электрическим полем; метод, основанный на ускорении ионов электрическим полем при замагниченном движении электронов (холловские ускорители плазмы); метод, основанный на ускорении плазмы в скрещенных электрических и магнитных, когда плазма ускоряется Амперовой силой. Коротко рассмотрим эти методы.

Электростатический метод очень прост в реализации, однако он подходит лишь для сильно разреженной плазмы и невысоких требований к коэффициенту разделения. Его использование ограничено тем, что в плотной плазме, вследствие ее поляризации, проникновение электрического поля внутрь плазменного объема будет мало, а ток ионов определяется ионным пространственным зарядом и амбиполярной диффузией. При величинах электрического поля порядка 1000 В/см и электронной температуре плазмы порядка 1 эВ это приводит к большим (50 мкс) временам транспортировки ионов на коллектор, что значительно больше характерных времен перезарядки (10^{-5} с). Тем не менее, вследствие простоты реализации метод широко исследуется.

Удачным можно считать *метод экстракции ионов, основанный на ускорении ионов электрическим полем* при замагниченном движении электронов в магнитном поле, направленном перпендикулярно электрическому (т. н. холловский ускоритель ионов). Принцип работы такого типа экстракторов основан на резком уменьшении подвижности электронной компоненты плазмы в направлении электрического поля. В этих условиях сравнительно небольшой ток электронной эмиссии со стороны катода позволяет в значительной мере компенсировать влияние ионного объемного заряда, что обеспечивает ускорение ионов в течение нескольких микросекунд до скоростей, на порядок превышающих среднюю тепловую скорость. В настоящее время известен экстрактор, использующий этот принцип ускорения плазмы, предложенный в 1976 г. Джейнсом. Недостатками его являются требование обеспечить замкнутость Холловского тока и относительная сложность.

Магнитогидродинамический (МГД) метод, использующий дрейф плазмы как целого, прост и эффективен. Он позволяет выводить ионы за время, меньшее чем

время резонансной перезарядки, и не связан с разделением зарядов. Представляется, что экстракторы этого типа могут оказаться перспективными, в частности, экстрактор индукционного типа, в котором ток в плазменном шнуре возбуждается при модуляции внешнего магнитного поля синхронно с появлением лазерных импульсов. Недостатками метода являются требование обеспечить замкнутость индукционного тока и относительно большое энергопотребление.

Лазерные системы. Поскольку лазерное излучение исключительно дорого, то лазерные системы определяют в конечном итоге и экономику AVLIS-процесса. Современная AVLIS-технология базируется на использовании лазеров на парах меди (ЛПМ) и перестраиваемых по частоте лазеров на красителях (ЛК).

ЛПМ состоит из активного элемента, модулятора и блока высоковольтного питания. Активный элемент ЛПМ представляет собой керамическую трубу, нагретую до высокой температуры (1700 °С), в которой создается достаточно высокое давление паров меди и через которую пропускаются мощные импульсы тока длительностью десятых долей микросекунды. КПД лазера от розетки составляет 1%. Все страны, внедряющие AVLIS-технология, сообщают о достижениях в области разработки ЛПМ. В настоящее время единичные элементы до 400 Вт мощности являются стандартными, сообщается о создании 600-ваттных ЛПМ.

Технические характеристики ЛПМ

Генерирующее излучение, нм	510,5 и 578,5
Средняя мощность, Вт	400—500
КПД, %	1
Длительность импульса, нс	20—30
Частота повторения, кГц	5—10
Диаметр активной зоны, см	8
Длина активной зоны, см	300
Длительность импульсного питания, нс	200—300
Ток в импульсе, кА	2—3
Напряжение в импульсе, кВ	80

Обобщенная схема создания технологического канала ЛПМ приведена на рис. 3. Системы ЛПМ строятся из набора идентичных каналов. Недостатки ЛПМ: низкий КПД; технологически напряженный режим работы активных элементов из-за высокой температуры, необходимой для получения паров меди требуемой плотности; необходимость прокачки балластного газа из-за большого газоотделения; генерация излучения с двумя длинами волн; требование коротких сильноточных высоковольтных импульсов.

Большие проблемы возникают и с созданием надежного и экономичного модулятора. Поэтому главной причиной высокой стоимости энергии излучения ЛПМ является не столько стоимость потребляемой им энергии, сколько его амортизационная стоимость. Тем не менее, этот лазер остается пока единственным источником излучения для накачки ЛК в промышленных AVLIS-системах.

Дальнейший прогресс ЛПМ может быть связан с увеличением срока службы. В настоящее время принята европейская программа (CLAMP) создания дешевого технологического ЛПМ. Пути совершенствования ЛПМ связывались с использованием галогенидов меди. Эти соединения имеют высокое давление паров при весьма низких температурах порядка 400 °С, что позволяет создать дешевый активный элемент

ЛПМ с относительно высоким КПД, достигающим 2%, однако срок службы активных элементов пока невелик (200—300 ч).

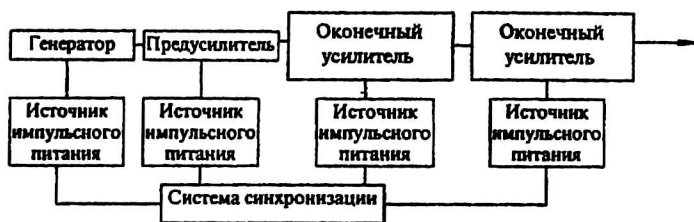


Рис. 3. Обобщенная блок-схема технологического канала ЛПМ

В настоящий момент активно рассматривается замена ЛПМ NdYAG и YbYAG-лазерами (1,06 и 1,1 мкм соответственно) с диодной накачкой и переводом излучения во вторую гармонику. КПД такого лазера может достигать 10%. КПД преобразования во вторую гармонику может достигать величины 50—70%. Сообщается о получении 100 Вт средней мощности во второй гармонике с 200 Вт от NdYAG-лазера, достигнута средняя мощность YbYAG-лазера 400 Вт при КПД "от розетки" 7,3%. Главная проблема — небольшой (порядка сотен часов) срок службы диодных линеек накачки и их высокая стоимость. Можно ожидать, что в ближайшие 5 лет ЛПМ будут вытеснены из AVLIS-технологии твердотельными лазерами.

Лазеры на красителях представляют собой кювету, через которую протекает раствор красителя, облучаемого лазерами на парах меди и соответствующей оптики. Вследствие возбуждения молекулы красителя возникает излучение, которое может перестраиваться по частоте. АК строятся по схеме: задающий генератор, предусилитель, оконечные усилители. Обобщенная схема технологического канала АК приведена на рис. 4. Системы АК строятся из набора идентичных каналов. АК обладают достаточно большим коэффициентом конверсии излучения накачки — 35—60%. Диапазон мощности каскада АК — единицы киловатт, существуют публикации по расчету АК до 10 кВт средней мощности. Главным образом используются красители из семейства Родаминов. Основное направление совершенствования АК — это достижение большого срока службы растворов красителей, поэтому большие ресурсы выделяются для решения проблемы фотохимической стойкости красителя. Поскольку большой КПД генерации достигается только в максимуме кривой преобразования красителя, то необходима работа по синтезу новых красителей.



Рис. 4. Обобщенная блок-схема технологического канала АК

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ БЛОК-СХЕМА УСТАНОВКИ

Любая AVLIS-установка состоит из двух основных частей: лазерного модуля и сепараторного модуля. Назначение лазерного модуля — генерация излучения с требуемыми геометрическими, частотными и мощностными характеристиками; сепараторного модуля — испарение разделяемого материала, облучение его лазерным излучением и экстракция ионов. Блок-схема приведена на рис. 5. Спецификация основных узлов установки приведена ниже.



Рис. 5. Принципиальная блок-схема AVLIS-установки

Назначение входящих подсистем. Лазерный модуль состоит из блока лазеров на парах меди, перестраиваемых по частоте лазеров на растворах органических красителей, системы контроля частот перестраиваемых по частоте лазеров.

Лазеры на парах меди (ЛПМ) служат для преобразования электрической энергии в излучение, пригодное для накачки лазеров на красителях (ЛК). Лазеры на парах меди состоят из активных элементов, оптики, блоков питания, системы управления. Система лазеров на парах меди строится по принципу: генератор, предусилитель, оконечные усилители. Оптика используется для построения оптического резонатора генератора и коммутации излучения. Источники питания вырабатывают мощные высоковольтные импульсы для питания активных элементов. Система управления обеспечивает согласованную работу всех элементов.

Передача мощности ЛПМ к ЛК осуществляется с помощью многомодового оптического волокна, что обеспечивает необходимую коммутацию, временную задержку и механическую развязку лазеров на парах меди и лазеров на красителях.

Блок перестраиваемых по частоте лазеров на красителях состоит из трех стандартных каналов, каждый из которых включает задающий генератор, предусилители, оконечный усилитель; системы прокачки красителя; блока управления задающими генераторами; системы контроля. Задающий генератор используется для преобразования излучения ЛПМ в излучение с требуемыми частотными характеристиками. Предусилители и оконечный усилитель служат для усиления излучения задающего генератора и обеспечивают необходимые мощностные характеристики излучения. Система

прокачки раствора красителя служит для кондиционирования активной среды лазеров на красителях.

Система измерения частот ЛК состоит из прецизионного измерителя частот (λ -мер), коммутатора и ЭВМ и служит для обеспечения требуемой настройки частоты ЛК. Каждый ЛК-канал имеет систему кондиционирования пучка, включающую в себя телескопы, корректоры волновых фронтов излучения и служащую для обеспечения необходимых геометрических параметров пучка.

Излучение трех ЛК-каналов объединяется системой сведения лучей. Последняя служит для их геометрического совмещения перед транспортировкой в разделительный модуль.

Сепараторный модуль состоит из вакуумной камеры, системы высоковакуумной откачки, системы измерения вакуума, системы испарения разделяемого материала, системы измерения потока паров разделяемого материала, оптики и системы экстракции ионов выделяемого изотопа.

Вакуумная камера и система высоковакуумной откачки обеспечивают технические условия, необходимые для испарения материала и экстракции.

Система испарения служит для создания паров разделяемого материала требуемых геометрических размеров и плотности.

Система измерения потока паров совместно с системой управления применяется для измерения и стабилизации плотности атомного пара в зоне облучения.

Оптика служит для коммутации излучения ЛК внутри разделительного модуля.

Система экстракции состоит из собственно экстрактора и системы питания экстрактора и служит для отбора ионов выделяемого изотопа из области, занятой парами разделяемого элемента.

Система управления сепараторным модулем управляет системой откачки, системой испарения и экстрактором.

Система контроля и управления работой установки состоит из ЭВМ, необходимых интерфейсов и программного обеспечения и служит для автоматического пуска установки, мониторинга процесса разделения, управления и останова.

МАТЕРИАЛЫ, ОСВАИВАЕМЫЕ AVLIS-ТЕХНОЛОГИЕЙ

Уран

Получение топливного урана, обогащенного по 235 изотопу до 3—5 %.

Плутоний

Конвертация Pu топливного класса в оружейный класс. Материал, содержащий 239Pu, очищается от 238, 240, 241 изотопов.

Гадолиний

Gd, обогащенный по 157-му изотопу. Применяется в легководяных реакторах в качестве выгорающей присадки для улучшения эксплуатационных характеристик реакторов.

Цирконий

Обедненный по 91-му изотопу, имеющему большое сечение поглощения тепловых нейтронов. Улучшение свойств конструкционного материала ТВЭЛов.

Иттербий

Обогащенный по 168-му изотопу. Используется в медицинских и научных целях.

СТРАНЫ, РАЗВИВАЮЩИЕ AVLIS-ТЕХНОЛОГИЮ, ИХ НАПРАВЛЕНИЕ И УСПЕХИ

AVLIS-технология настолько наукоемка, что доступна только высокоразвитым в техническом отношении странам [1, 2]. Тем не менее, многие страны мира развивают эту технологию т. к. связывают с ней возможность удешевления производства слабо-

обогащенного урана почти вдвое (с 84 до 35—45 дол. за 1 кг ЕРР). Кроме того, AVLIS-технология использует металлический уран, поэтому отпадает необходимость перевозки и хранения больших количеств опасного гексафторида урана. Исследования на уровне правительственных программ проводятся в США, Франции, Японии, Великобритании, Индии, Китае, Израиле.

США

США являются бесспорным лидером в развитии AVLIS-технологии. Работы по разделению изотопов урана методом фотоионизации паров металла были начаты в Национальной лаборатории Лоуренса в Ливерморе (LLNL) по заданию Министерства энергетики (DE) в 1972 г. В 1975 г. произведено весовое количество обогащенного продукта. За один цикл работы установки REGALIS было произведено 4 мг урана с концентрацией U-235 около 3% при производительности ~ 50 мкг/ч.

В 1975 г. началось проектирование принципиально новой лазерной системы для исследования процесса трехфотонной ионизации. Первый этап этой системы — оптический генератор SPP-11, основанный на АПМ, был введен в действие в конце 70-х гг. Дальнейшее увеличение производительности установок связано с вводом в действие в 1982 г. усилителя мощности лазерного излучения VENUS (АПМ 400 Вт суммарной средней мощности).

К 1982 г. была построена разделительная установка, состоящая из разделительного модуля MARS (большой производительности) и интегрированный лазерной системы SPP-II-VENUS. Установка MARS представляла собой качественно новый шаг по сравнению с REGALIS. Его характеристики: производительность 1000 кг ЕРР/год; диаметр — 2,5 м; 4 ЭЛИ; непрерывный цикл производства; жидкометаллические коллекторы продукта и отвала; впервые коллектор продукта помещен непосредственно в область протекания паров; применен графит, покрытый окисью иттрия; имелся оптический контроль плотности пара. На установке было получено 5 кг слабообогащенного урана.

В 1983 г. началось строительство нового комплекса UDF (Uranium Demonstration Facilities), включающего в себя промышленную лазерную систему LDF и промышленный разделительный модуль SDF. Занимаемая площадь — 9300 м² (LDF со всеми вспомогательными помещениями занимает 50% площади, из них 650 м² — АК).

LDF состоит из 48 каналов АПМ (четыре блока по 12 каналов) для накачки 16 каналов АК. Каждый канал АПМ включает три последовательно включенных усилителя, предусилитель и задающий генератор, работает с частотой повторения 4,3 кГц и имеет выходную мощность 1500 Вт. Каналы включаются со сдвигом во времени так, что суммарная частота повторения импульсов излучения модуля равна 26 кГц. Суммарная мощность АПМ — 72 кВт. Излучение АПМ передается в АК с помощью оптического волокна. Коэффициент передачи 80%. Каждый канал АК состоит из задающего генератора и четырехступенчатой системы усилителей, имеет выходную мощность 1,4—1,6 кВт при частоте повторения 26 кГц. Ширина полосы излучения АК — 50 МГц, длительность импульса 32 нс. Общая мощность АК — 24 кВт.

В начале 1987 г. был проведен успешный эксперимент по производству обогащенного урана на разделительном аппарате MARS и лазерной системе LDF.

Модуль SDF был изготовлен и смонтирован в конце 1985 г. Длина аппарата 29,6 м, диаметр 4,9 м, масса при полной загрузке 333,4 т. Модуль содержит 600 кг жидкого урана и 5 т в системе снабжения. Непрерывная работа SDF в 1993 г. равнялась 250 ч, в настоящее время модифицируется с целью увеличения его до 600 ч.

Установка UDF испытана в 1993 г. и является "First Plant prototype". На ней проведены следующие работы:

- проведен обогатительный тест по урану;
- модифицирован и испытан сепаратор под гадолиний, проведены испытания по получению 157 изотопа гадолиния;

получению 157 изотопа гадолиния; проведены два неназванных испытания.

Конструкция полношкального завода (1700 метрических т/год, 3—5 % обогащения) будет рассмотрена после 2-летней эксплуатации UDF. Испытания закончились в 1997 г. Права на внедрение переданы компании USEC (United State Enrichment Company), и в настоящий момент USEC ищет частные фирмы для строительства промышленной установки.

Дальнейшее совершенствование установки связывается с заменой дорогих в эксплуатации ЛПМ на значительно более надежные и обладающие на порядок большим КПД твердотельными лазерами с диодной накачкой и с последующей конвертацией их излучения во вторую гармонику.

Кроме того, AVLIS-технология в США применяется для получения оружейных материалов. Работы проводятся в рамках Special Isotope Separation Project в Los Alamos National Laboratory. Цель — ^{239}Pu и ^{233}U . Для того чтобы конвертировать топливный Pu в оружейный, ^{239}Pu очищается от 238 , 240 , 241 изотопов. В настоящий момент LLNL подключена к работе совместно с Los Alamos National Laboratory по плутонию.

Франция

Исследования по технологии AVLIS (проект SILVA) проводятся под эгидой CEA (Commissariat a l'Energie Atomique) и компании COGEMA с 1984 г. Работы ведутся в Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay. Предварительные эксперименты, проведенные в 1985 г., продемонстрировали возможность разделения изотопов урана и большую селективность процесса для разделения изотопов U-235 и U-238. В 1985 г. технология AVLIS выбрана в качестве доминирующей. Общий план проекта SILVA приведен в таблице.

План проекта SILVA (Франция)

Начало цикла, год	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Основные исследования	xxxx	xxxx	xx			
Демонстрация процесса	xxxx	xxxx	xxxx			
Технологические исследования	xx	xxxx	xxxx	x		
Общая оценка			x			
Демонстрация производства			xx	xxxx		
Развертывание промышленности					xxxx	xxxx

Примечание. X — означает год работы.

Разработано пилотное оборудование ASTER для разделения изотопов урана. Экспериментальная отработка сепараторного модуля проводится на установке Cordy Pilot Plant в Пьерлате. Достигнута непрерывная работа модуля в течение 100 ч. Демонстрация технической возможности была проведена в 1997 г. Испытания показали конкурентоспособность цены продукта с рыночной. Ввод в действие опытного модуля мощностью 10 тыс. кг ЕРР/г предполагается в Центре ядерных исследований в Сакле, а модуля большей мощности — в Пьерлате. ЛПМ для SILVA разрабатываются компанией CILAS (Marcoussis, France). В настоящее время проведены испытания опытно-промышленного образца ЛПМ с твердотельным модулятором. Средняя мощность лазера 400 Вт в течение несколько сотен часов непрерывной работы при высокой стабильности.

Япония

Для реализации AVLIS-технологии в 1984 г. образована Laser Separation Engineering Research Association of Japan (LASER-J), куда вошли многие научно-исследовательские и промышленные организации Японии, в сотрудничестве с JАERI и была принята шестилетняя программа исследований по технологии селективной фотоионизации атомов урана. Экспериментально-опытная установка Tokai Test Facility создана в 1987 г. в Научном центре в Токай. На ней намечалось провести эксперименты по обогащению урана при производительности от 100 мг/сут до 1 г/сут. На установке предполагается получать данные для проектирования систем с повышенной производительностью, более надежных и с большим ресурсом. В 1992 г. закончена первая часть НИОКР и LASER-J дала разрешение на проведение следующего этапа.

На этом этапе предполагалось разработать и испытать технологическое оборудование, опыт эксплуатации которого может быть положен в основу проекта коммерческого завода на 1,5 тыс. т ЕРР/г. По намеченному плану работ предполагалось: в 1993—1998 гг. — тестирование экспериментального оборудования и разработка узлов опытного завода; в 1997—1998 гг. — конструирование опытного завода; в 2000—2001 гг. — создание опытного завода; в 2001—2002 гг. — запуск производства.

В настоящий момент достигнута мощность единичного элемента АПМ 200 Вт (при непрерывной работе более 1000 ч), созданы полупроводниковые модуляторы для питания АПМ, мощность АК достигает 80 Вт. Большое внимание уделяется внедрению твердотельных лазеров.

Заключение

Опыт разных стран в AVLIS-технологии доказал ее перспективность. Применение ее к урану доказало возможность массового производства. Цена на топливный уран уже сейчас сравнима с ценой урана, полученного на газовых центрифугах. Однако AVLIS-технология имеет резервы для удешевления производства. Применение AVLIS-технологии к Pu и Gd продемонстрировало ее универсальность. Таким образом, AVLIS-технология занимает свободную производственную нишу, позволяя производить многие изотопы, не имеющие газообразных соединений и в тоже время обладая массовой производительностью.

Основные преимущества AVLIS-технологии:

- высокий коэффициент разделения в одном цикле (фактор разделения — десятки-сотни единиц);
- универсальность;
- возможность работы с радиоактивными материалами;
- возможность масштабирования;
- короткий период пуска-останова;
- компактность и, соответственно, малые капитальные затраты;
- высокая чистота производства и экологическая безопасность.

К сожалению, в России эта технология отсутствует. Однако в стране имеется большой научно-технический задел по этой технологии. Хорошо развиты спектроскопические исследования, развиты системы испарения материалов, исследования по селективной фотоионизации атомов и экстракции ионов. Существует промышленное производство АПМ мощностью до 100 Вт средней мощности. Представляется, что целесообразно организовать плановые систематизированные научно-технические исследования по изучению всех аспектов AVLIS-технологии. При высоком научно-техническом потенциале, имеющемся в России, это позволит подготовиться к внедрению этой технологии и в тоже время не потребует больших расходов. Целесообразно также организовать строительство установок малой производительности (до 10 г/сут) для

производства прецизионно чистых изотопов для медицины, науки, что потребует небольших средств и даст быстрый коммерческий результат. Развитие научных исследований и строительство малых установок позволит держать AVLIS-технологию в "теплом" состоянии, позволяющем обеспечить быстрый старт при необходимости расширения работ [1, 2].

Л и т е р а т у р а

1. Материалы конф. по лазерному разделению изотопов. 19—20 January 1993. — Los Angeles, California, USA. SPIE #1859.

2. Bliss L. L., Bonanno R. E., Hackie R. P., Hammond P. R. High-average-power dye laser at Lawrence Livermore National Laboratory. Applied Optics, 1992. V. 31, № 33. P. 6993.

SCIENTIFIC-TECHNICAL PROBLEMS OF THE AVLIS-TECHNOLOGY ITS PROGRESS AND PROSPECTS

V. A. Mishin

General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A principle possibilities of the AVLIS-technology, based on isotopically selective photoionization of atoms of target isotope by laser radiation at free molecular motion of atoms through illuminated zone and the subsequent extraction of ions of the formed plasma, are considered. For three head stones of the technology: evaporation, photoionization and extraction of ions some of the scientific-technological problems is discussed. The situation with lasers for the AVLIS technology is briefly reviewed. A short estimation of developments of the technology in the industrial countries of the world is given and some ways of the development of the technology in Russia is discussed.