



Компактная автоматизированная CO₂-лазерная установка для разделения изотопов средних масс

В. М. Баев, Л. В. Бодакин, А. А. Воронкова, А. В. Васильев, С. М. Котов, В. А. Кубасов, А. В. Павленко, Ф. П. Подтыкан, П. В. Томашевич, В. В. Хухарев
АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» ГК Росатом, Санкт-Петербург, Россия

Создана малогабаритная установка с автоматизированным управлением на базе компактного импульсно-периодического CO₂-лазера, применяемая для выделения изотопа углерода ¹⁴C при отработке процесса очистки реакторного графита. В основе принципа работы установки лежит метод селективной многофотонной лазерной диссоциации. Показано, что функциональные возможности установки значительно шире, и она может быть использована для разделения изотопов средних масс и других химических элементов. Прецизионная настройка по длинам волн обеспечивается конструкцией специального узла дифракционной решетки с автоматическим управлением.

Ключевые слова: разделения изотопов, лазерная многофотонная селективная химическая фотодиссоциация газа, CO₂-лазер

Статья получена: 01.05.2023
Статья принята: 09.07.2023

ВВЕДЕНИЕ

Главная проблема вывода из эксплуатации ядерных установок с уран-графитовым реактором связана с необходимостью выбора оптимальных методов обращения с большими объемами отработавшего графита, который занимает особое место при работе с накопленными радиоактивными отходами (РАО). Основные радиоактивные

Compact Automated CO₂-Laser Installation for Separation of Average Mass Isotopes

V. M. Baev, L. V. Bodakin, A. A. Voronkova, A. V. Vasiliev, S. M. Kotov, V. A. Kubasov, A. V. Pavlenko, F. P. Podtykan, P. V. Tomashevich, V. V. Khukharev
JSC "D. V. Efremov NIEF", St. Petersburg, Russia

A small-scale installation with automated control based on a compact repetitively pulsed CO₂ laser has been developed. It is used to isolate the ¹⁴C carbon isotope during development of the reactor graphite purification process. The operating principle of the facility is based on the selective multiphoton laser dissociation method. The precise wavelength tuning is ensured by the design of a special diffraction grating assembly with automatic control. It is shown that the setup functions are much broader, and it can be used to separate the average-mass isotopes and other chemical elements.

Keywords: isotope separation, laser multiphoton selective chemical gas photodissociation, CO₂ laser

Article received: 01.05.2023
Article accepted: 09.07.2023

INTRODUCTION

The main decommissioning issue of nuclear facilities with carbon-uranium reactor is related to the need to select the best handling methods for large volumes of spent graphite that occupies a special place when dealing with the accumulated radioactive waste (RW). The main radioactive components of graphite rods of nuclear reactors are the long-lived radionuclides. These are ¹⁴C isotopes and ³⁶Cl chlorine. Due to a low percentage of ¹⁴C and its half-life for many centuries, there is a problem of its extraction, conditioning, decontamination, followed by the disposal of spent graphite. First of all, this is due to a large amount of radioactive material, estimated at the tens of thousands of tons. In terms of radioactive safety and environmental protection, the burial of such



компоненты графитовых стержней атомных реакторов – долгоживущие радионуклеиды. Это изотопы ^{14}C и хлора ^{36}Cl . При невысоком процентном содержании и периодом полураспада во много столетий ^{14}C существует проблема его извлечения, кондиционирования, дезактивации с последующим захоронением самого отработанного графита. Это связано прежде всего с большим количеством радиоактивного материала, исчисляемого десятками тысяч тонн. С точки зрения радиоактивной безопасности и экологии захоронение такой массы облученного графита возможно только после снижения концентрации радионуклеида ^{14}C в десятки раз. Получение ^{14}C в чистом виде из смеси изотопов осуществляется их разделением. Существует целый ряд методов такого разделения [1], из них два при работе с облученным графитом (ОГ) используются чаще, исходя из свойств РАО:

- упаковка некондиционированного ОГ в контейнеры с последующим захоронением;
- кондиционирование ОГ (сжигание, включение в инертную матрицу и т. п.) с отдельным удалением и последующей утилизацией/захоронением всех полученных фракций РАО.

Проблема обращения с ОГ связана прежде всего с решением задачи его очистки от ^{14}C .

ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

Ранее экспериментально было доказано [2, 3], что в условиях получения изотопов углерода из-за их малого различия в величине масс и, соответственно, изотопического сдвига в спектре, наиболее эффективен спектрально-селективный метод многофотонной диссоциации молекул, обладающий высокой избирательностью. Позже для очистки от изотопа ^{14}C были разработаны лазерные установки для разделения изотопов углерода и выделения изотопа ^{13}C [4, 5]: «Дятел» (г. Троицк), «Спектр» (г. Санкт-Петербург) и «Углерод» (г. Калининград). Конструкции этих установок стали прототипами для новой разработки модуля для очистки ОГ от ^{14}C и получения ^{14}C в обогащенном виде. В основе используемой технологии – метод лазерной многофотонной селективной химической фотодиссоциации газа, получаемого при химической конверсии ОГ с одновременной очисткой от других радионуклидов. Только при лазерном методе возможно выделение конкретного изотопа из смеси изотопов с практически одинаковой массой – в данном случае ^{14}C . Прототип лабораторной лазерной установки (ЛЛУ) уже прошел испытания.

a huge amount of irradiated graphite is possible only after a decrease in the concentration of ^{14}C radionuclides by dozens of times. Obtaining pure ^{14}C from a mixture of isotopes is performed by their separation. There are a number of methods for such separation [1], two of which are used more often when working with the irradiated graphite (IG), based on the RW properties:

- placement of non-conditioned IG in the containers with subsequent disposal;
- IG conditioning (burning, inclusion in an inert matrix, etc.) with separate removal and subsequent disposal/burial of all obtained RW fractions.

First of all, the IG handling issue is related to the solution of its cleaning of ^{14}C .

LASER INSTALLATION FOR ISOTOPE SEPARATION

Previously, it was experimentally proved [2, 3] that in the conditions of obtaining carbon isotopes, due to their small difference in masses and, accordingly, the isotopic shift in the range, the spectrally selective method of multiphoton dissociation of molecules with high selectivity, is the most efficient one. Later, to remove the ^{14}C isotope, the laser installations were developed for the separation of carbon isotopes and isolation of ^{13}C isotope [4, 5]: Dyatel (Troitsk), Spekt (Saint-Petersburg) and Uglorod (Kaliningrad). The designs of these installations became the prototypes for new development of a IG ^{14}C treatment module and obtaining ^{14}C in an enriched form. The technology used is based on the method of laser multiphoton selective chemical photodissociation of gas obtained by the IG chemical conversion with simultaneous purification from other radionuclides. The laser method only makes it possible to isolate a specific isotope from a mixture of isotopes with almost the same mass – in this case, ^{14}C . The prototype of the laboratory laser installation (LLI) has already been tested.

The basis of the new compact automated installation is also a repetitively pulsed CO_2 laser with the generation spectrum tuning in the wavelength range of 9–11 μm . A general view of the installation (in section) is shown in Fig. 1. In the chemical conversion unit, IG is processed into the working gas (Freon-22). The laser unit of the module provides for the ^{14}C separation from the working gas with a controlled flow rate and stabilization of the working substance parameters, power density control with the automated wavelength tuning and alignment. The isolated ^{14}C can be buried or used for other technical purposes.

Основу новой компактной автоматизированной установки составляет также импульсно-периодический CO₂-лазер с перестройкой спектра генерации в диапазоне длин волн 9–11 мкм. Общий вид установки (в разрезе) приведен на рис. 1. В блоке химической конверсии модуля осуществляется переработка ОГ в рабочий газ (Фреон-22). Лазерный блок модуля обеспечивает выделение ¹⁴C из рабочего газа с регулируемым расходом и стабилизацией параметров рабочего вещества, регулированием плотности мощности с автоматизированной настройкой длины волны и юстировкой. Выделенный ¹⁴C может быть захоронен или использован в иных технических задачах.

Излучение лазера (1), резонатор которого образован дифракционной решеткой (2) и сферическим зеркалом (7), фокусируется линзой (5) из соли KCl или селенида цинка в центральную часть специальной кюветы (реактора) (6), в которую подается газ фреон-22. Фокусное расстояние линзы выбирается таким образом, чтобы область эффективного взаимодействия излучения лазера с фреоном была не менее 150 мм. Под взаимодействием понимается ступенчатая фотодиссоциация молекул фреона.

Реактор расположен между лазером (1) и глухим зеркалом (7), таким образом осуществляется внутрирезонаторное преобразование. Все объемы расположены соосно друг с другом, имеют вакуумные уплотнения в местах соединения и образуют единый замкнутый объем лазерной установки с реактором. Зона взаимодействия (10) в фокусе линзы (5) имеет поперечный размер (диаметр каустики) порядка 2 мм, протяженность 150–200 мм.

The laser radiation (1), the resonator of which is made by a diffraction grating (2) and a spherical mirror (7), is focused by a lens (5) made of KCl salt or zinc selenide into the central part of a special cell (reactor) (6), into which the gaseous freon-22 is supplied. The lens focal length is selected in such a way that the efficient interaction area between the laser radiation and freon is at least 150 mm. Interaction is a stepwise photodissociation of freon molecules.

The reactor is located between the laser (1) and a 100% mirror (7), thus the intracavity conversion is performed. All cavities are located coaxially with each other, have vacuum seals at the junctions and make a single closed volume of the laser installation with the reactor. The interaction area (10) at the lens focus (5) has a transverse dimension (caustic diameter) of about 2 mm and a length of 150–200 mm.

An important feature of the installation is integration of the separation reactor and the CO₂ laser cavity into a whole, when the reactor is located inside the laser cavity. This makes it possible to implement a high density of laser radiation in a large scope, to use it most efficiently, and thereby increase the separation process productivity. The installation basis is a gas-discharge module (1). In LLI, the mode using two such modules is possible that expands the system functional capabilities.

The parameters of laser radiation are as follows: pulse energy 0.2–0.5 J; duration 100–200 ns (initial section of a microsecond pulse); the pulse repetition frequency is changed within 0–600 Hz; main operating frequency 100 Hz; pulse power is several megawatts.

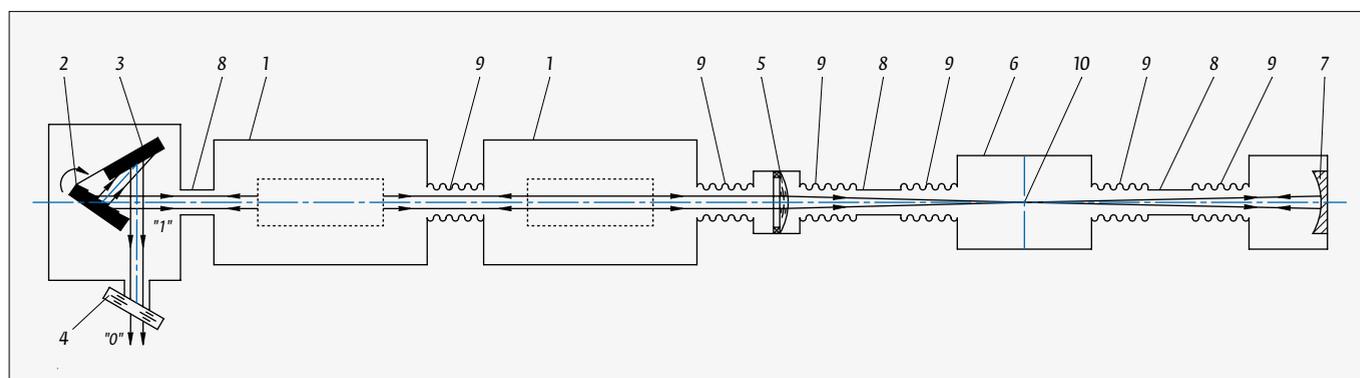


Рис. 1. Оптическая схема лазерной установки: 1 – газоразрядный модуль; 2 – дифракционная решетка; 3 – плоское зеркало; 4 – выходное окно; 5 – положительная линза; 6 – реактор; 7 – сферическое зеркало; 8 – патрубки; 9 – сильфоны; 10 – зона взаимодействия

Fig. 1. Optical circuit of the laser installation: 1 – gas discharge module; 2 – diffraction grating; 3 – flat mirror; 4 – exit gate; 5 – convergent lens; 6 – reactor; 7 – spherical mirror; 8 – branch pipes; 9 – bellows; 10 – interaction area



Важная особенность установки – объединение в одно целое разделительного реактора и резонатора CO₂-лазера, когда реактор располагается внутри лазерного резонатора. Это позволяет реализовать высокую плотность лазерного излучения в большом объеме, наиболее эффективно его использовать и тем самым повысить производительность процесса разделения. Основу установки составляет газоразрядный модуль (1). В ЛЛУ возможен режим с использованием двух таких модулей, что расширяет функциональные возможности системы.

Параметры лазерного излучения: энергия в импульсе 0,2–0,5 Дж.; длительность 100–200 нс (начальный участок микросекундного импульса); частота следования импульсов изменяется в пределах 0–600 Гц; основная рабочая частота 100 Гц; мощность в импульсе – несколько мегаватт.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛЛУ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ СРЕДНИХ МАСС

В ходе модельных расчетов оказалось, что использование разработанной CO₂-ЛЛУ проявляет высокую эффективность при разделении изотопов химических элементов средних масс (бор, углерод, сера и др.). Изотопы этих химических элементов и их молекулярных соединений обладают линиями поглощения в ИК-области и широко используются в биологии, химии, медицине, например, в качестве меток. Но используемые для разделения изотопов распространенные методы центрифугирования в случае получения изотопов средних масс затруднены из-за малого различия в величине масс изотопов одного элемента и, соответственно, трудно идентифицируемого изотопического сдвига в спектре.

Для многих изотопов средних масс линии поглощения, находящиеся в ИК-области, совпадают с линиями генерации излучения CO₂-лазера [6]. Кроме того, в системе гармонического осциллятора частота колебаний ω связана с массой m зависимостью $\omega \sim m^{-1/2}$. Рассматривается приведенная масса $m_{пр.}$, от которой зависит колебательная энергия. Разность частот двух осцилляторов $\Delta\omega$ пропорциональна отношению

LLI CAPABILITIES FOR THE SEPARATION OF AVERAGE MASS ISOTOPES

During the model calculations, it has turned out that application of the developed CO₂-LLI demonstrates high efficiency for the isotope separation of chemical elements with average masses (boron, carbon, sulfur, etc.). Isotopes of these chemical elements and their molecular compounds have the absorption lines in the IR region and are widely used in biology, chemistry, and medicine, for example, as the labels. However, the common centrifugation methods used for isotope separation in the case of obtaining isotopes of average masses are difficult due to the small difference in the isotope masses of one element and, accordingly, the isotopic shift in the spectrum that is difficult to be identified.

For many average-mass isotopes, the absorption lines located in the IR region coincide with the generation lines of CO₂ laser radiation [6]. In addition, in the harmonic oscillator system, the oscillation frequency ω is related to the mass m by the dependence $\omega \sim m^{-1/2}$. The reduced mass m_{red} , on which the vibrational energy depends, is considered. The frequency difference of two oscillators $\Delta\omega$ is proportional to the following ratio:

$$\frac{(m_{red.2})^{1/2} - (m_{red.1})^{1/2}}{(m_{red.2} \cdot m_{red.1})^{1/2}}$$

Therefore, for heavy elements at large values of m_{red} , this expression tends to zero. Accordingly, mea-

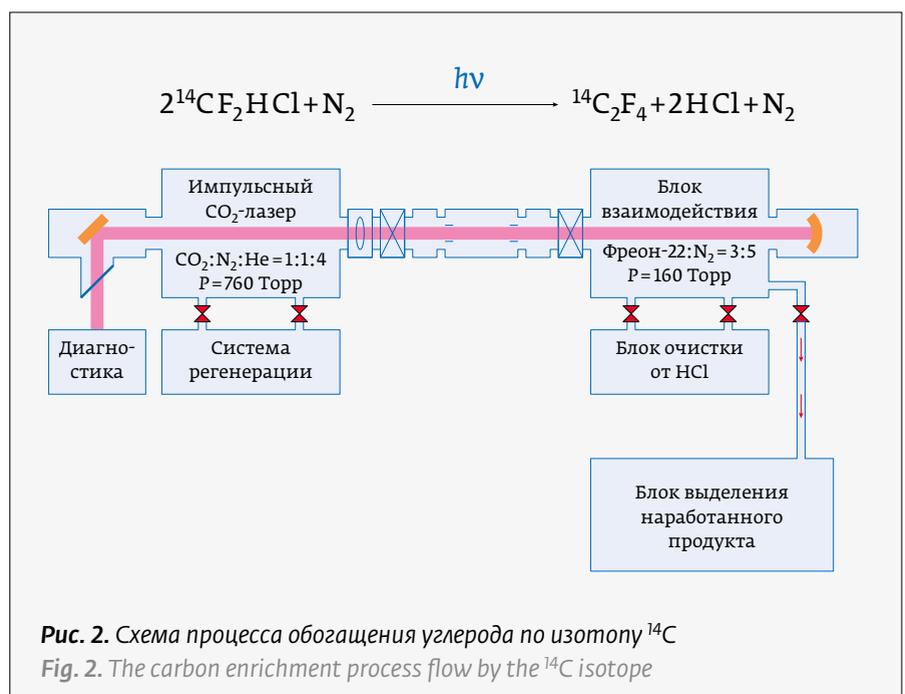


Рис. 2. Схема процесса обогащения углерода по изотопу ¹⁴C
 Fig. 2. The carbon enrichment process flow by the ¹⁴C isotope

$$\frac{(m_{\text{пр.2}})^{1/2} - (m_{\text{пр.1}})^{1/2}}{(m_{\text{пр.2}} \cdot m_{\text{пр.1}})^{1/2}}$$

Поэтому для тяжелых элементов при больших значениях $m_{\text{пр}}$ данное выражение стремится к нулю, и, соответственно, измерение частотного сдвига $\Delta\omega$ в излучении двух изотопов известными спектральными методами представляет большие трудности. Влияет также ангармонизм колебаний, вызывающий перекрытие спектров. Для легких химических элементов это отношение велико, например, для изотопов водорода дейтерия и трития значение массы одного порядка с ее изменением. Значит, достаточно большой и сдвиг частоты излучения, однако для разделения таких изотопов давно и успешно применяются более простые методы разделения по массе – по отклонению в магнитном поле. Разделение же изотопов элементов средних масс благодаря многочастотному спектру CO_2 лазера, высокому спектральному разрешению дифракционной решетки с прецизионным автоматизированным управлением и методом селективной многофотонной диссоциации представляется перспективным.

Измерение сдвига частоты $\Delta\omega$ в излучении двух изотопов известными спектральными методами является сложной задачей. Кроме того, ангармоничность колебаний имеет влияние, вызывая перекрытие спектров. Для легких химических элементов, это отношение велико, например, для изотопов водорода дейтерия и трития значение массы одного порядка с ее изменением. Это означает, что сдвиг частоты излучения также достаточно велик. Однако, для разделения таких изотопов, более простые методы разделения по массе (по отклонению в магнитном поле) давно и успешно применяются. Разделение изотопов элементов средней массы благодаря многочастотному спектру CO_2 лазера, высокому спектральному разрешению дифракционной решетки с прецизионным автоматизированным управлением и методом селективной многофотонной диссоциации представляется перспективным.

Возможна регулировка в ЛЛИ в широком диапазоне частоты повторения лазерных импульсов (0–600 Гц) и энергии от долей до нескольких джоулей (в случае переключения на второй газоразрядный модуль № 1, см. рис. 1) делает лазерный метод разделения изотопов многоцелевым [3].

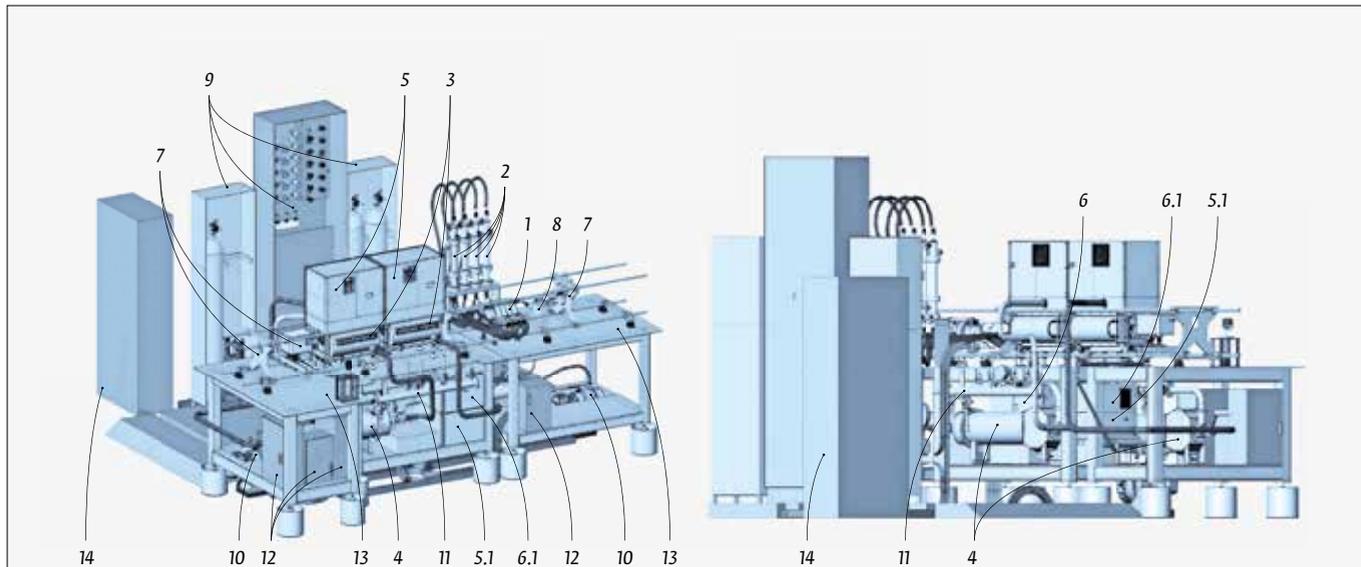


Рис. 3. Лабораторная лазерная установка: 1 – реактор; 2 – блок отчистки от HCl ; 3 – газоразрядный модуль, 2 шт.; 4 – блок регенерации; 5 – тиратронный блок питания разряда, 2 шт.; 6 – тиратронный блок питания подсветки; 7 – резонатор оптический; 8 – блок отбора продукта; 9 – система газообеспечения; 10 – система вакуумной откачки; 11 – внешняя система охлаждения; 12 – система автоматизированного управления; 13 – опорная конструкция; 14 – панель релейного и силового оборудования

Fig. 3. Laboratory laser installation: 1 – reactor; 2 – HCl purification unit; 3 – gas discharge module, 2 pcs.; 4 – regeneration unit; 5 – thyatron discharge power supply unit, 2 pcs.; 6 – thyatron backlight power supply; 7 – optical cavity; 8 – product selection unit; 9 – gas supply system; 10 – vacuum pumping system; 11 – external cooling system; 12 – automated control system; 13 – support frame; 14 – panel of relay and power equipment

Возможность регулирования в ЛЛУ в широких пределах частоты следования лазерных импульсов (0–600 Гц) и энергии от долей до нескольких джоулей (в режиме включения второго газоразрядного модуля 1 см. рис. 1) превращают метод лазерного разделения изотопов в универсальный [3].

Процесс лазерного обогащения осуществляется путем перевода фреона-22 в тетрафторэтилен с повышенным содержанием изотопа ^{14}C . Схема процесса, осуществляемого в ЛЛУ, иллюстрирует рис. 2. Она во многом схожа со схемой процесса обогащения углерода по изотопу ^{13}C . Общий вид ЛЛУ представлен на рис. 3.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗОТОПА ^{14}C

Для селективного возбуждения изотопа ^{14}C используется коротковолновая часть спектра генерации CO_2 лазера. Оптимальными рабочими линиями возбуждения спектра служат линии 9P(20) – 9P(36) из уже низкой области интенсивности генерации CO_2 -лазера [3]. Методическая особенность измерений ^{14}C – малый изотопический сдвиг ^{14}C относительно ^{13}C и весьма низкая концентрация целевого изотопа ^{14}C в смеси различных химических соединений.

Для селективного возбуждения изотопа ^{14}C и оптимизации процесса его наработки требуется гибкая перестройка длины волны в диапазоне 9–11 мкм, которая осуществляется при помощи автоматизированного управления дифракционной решеткой.

Прецизионная настройка по длинам волн обеспечивается конструкцией специального узла дифракционной решетки с автоматическим регулированием и программируемым управлением (рис. 4).

Дифракционная решетка и поворотное зеркало под заданным углом друг к другу жестко крепятся на пластине, которая установлена на моторизованной платформе, имеющей две оси поворота. С помощью двух приводов производится юстировка (поворот и фиксация) платформы по двум осям с разрешением менее 1 угловой секунды. Дистанционно юстировка осуществляется с помощью контрол-

The laser enrichment process is performed by converting freon-22 into tetrafluoroethylene with a high content of the ^{14}C isotope. The process flow performed in the LLI is shown in Fig. 2. It is in many respects similar to the carbon enrichment process flow by the ^{13}C isotope. The general view of the LLI is shown in Fig. 3.

FEATURES OF ^{14}C ISOTOPE MEASUREMENTS

For selective ^{14}C isotope excitation, the short-wavelength part of the CO_2 laser generation spectrum is applied. The optimal working excitation lines of the spectrum are 9P(20) – 9P(36) from the already low generation intensity region of the CO_2 laser [3]. A methodological feature of ^{14}C measurements is a small ^{14}C isotopic shift in relation to ^{13}C and a very low concentration of the target ^{14}C isotope in a mixture of various chemical compounds.

The selective excitation of ^{14}C isotope and optimization of its production process require the flexible tuning of wavelength in the range of 9–11 μm performed using the diffraction grating automated control.

The precise wavelength tuning is ensured by the design of a special diffraction grating unit with automatic adjustment and programmable control.

The diffraction grating and deviating mirror at a given angle to each other are rigidly mounted on

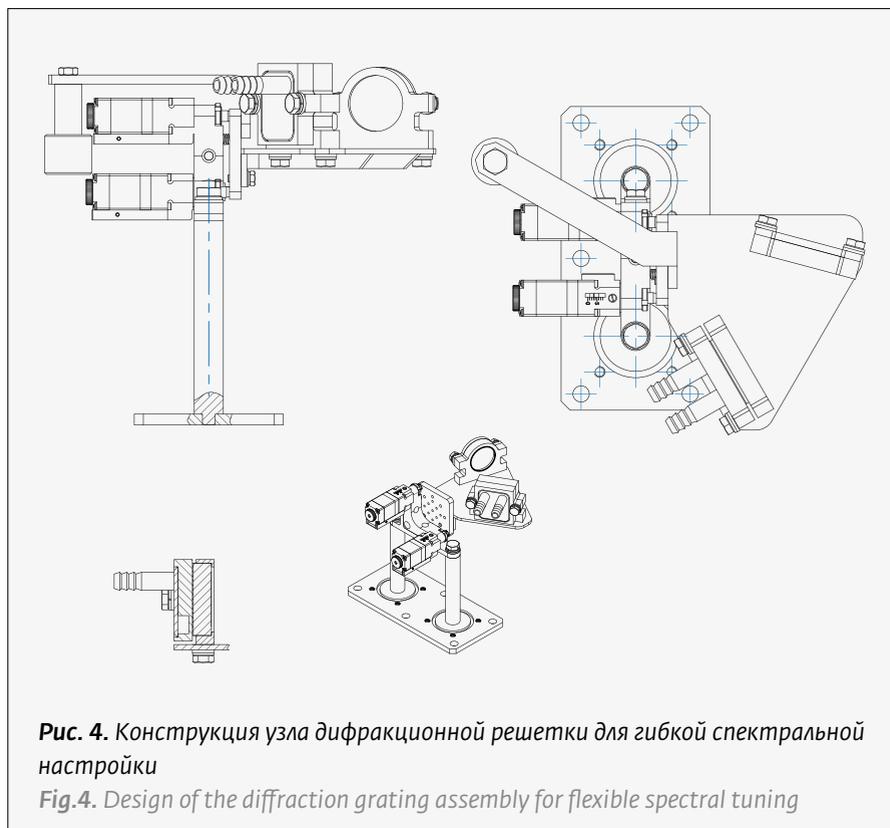


Рис. 4. Конструкция узла дифракционной решетки для гибкой спектральной настройки

Fig. 4. Design of the diffraction grating assembly for flexible spectral tuning



лера. Установочная юстировка дифракционного узла выполняется в диапазоне линейных перемещений ± 3 мм с точностью $\pm 0,5$ мм, угловых $\pm 1,5^\circ$ с точностью $\pm 1,5'$. Изменение угла между оптической осью резонатора и нормалью к поверхности дифракционной решетки осуществляется в пределах $26,7^\circ$ – $33,4^\circ$, что соответствует перестройке длины волны излучения 9–11 мкм. Оперативная дистанционная юстировка дифракционного узла вокруг вертикальной оси обеспечивает изменение угла в пределах $\pm 30'$ относительно предварительно установленного положения с точностью $\pm 10''$.

Вместо дифракционной решетки с коэффициентом отражения $\leq 70\%$ в первый порядок дифракции, который обычно применяется в селективном резонаторе для вывода излучения, в реализованной нами схеме использована дифракционная решетка, отражающая основное излучение (до 95%) в первый дифракционный порядок. Малая часть излучения (5–7%), неизбежно выходящая в нулевой порядок, выводится из резонатора для диагностики параметров лазерного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана автоматизированная ЛЛУ для обработки процесса очистки реакторного графита от изотопа ^{14}C методом селективной многофотонной лазерной диссоциации молекулы $^{14}\text{CHClF}_2$. Результаты, полученные при физическом пуске ЛЛУ и природном содержании ^{14}C в CHClF_2 , подтвердили результаты численного моделирования. Расчеты показали, что масштабируемость процесса способна обеспечить возможность обработки до 3 кг/час графита (переработанного во фреон-22) с уменьшением концентрации ^{14}C на 2–3 порядка. Прецизионная настройка по длинам волн обеспечивается конструкцией специального узла дифракционной решетки с автоматическим регулированием и программируемым управлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодров О. В., Кузнецов В. Н., Муратов О. Э., Талевлин А. А. Обращение с графитом при выводе из эксплуатации реакторов РБМК. *Атомная стратегия XXI*. 2020;159:4–9.
2. Велихов Е. П., Баранов В. Ю., Летохов В. С., Рыбов Е. А., Старостин А. Н. Импульсные CO_2 – лазеры и их применение для разделения изотопов. – М.: Наука. 1983. 304 с.
3. Бохан П. А., Бучанов В. В., Закревский Д. Э., Казарян М. А., Калугин А. М., Прохоров А. М., Фатеев Н. В. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208 с. ISSN 5-9221-0497-7.
4. Баранов Г. А., Кучинский А. А. Мощные импульсные CO_2 – лазеры высокого давления и их применения. *Квантовая электроника*. 2005; 35(3):219–229.
5. Баранов Г. А., Астахов А. В., Зинченко А. К., Кучинский А. А., Шевченко Ю. И., Соколов Е. Н., Калигиевский А. К., Годисов О. Н., Федичев С. В., Баранов В. Ю., Дядкин А. П., Рыбов Е. А. Технологический комплекс для лазерного разделения изотопов углерода. *Рос. хим. ж.* 2001; 5–6:89–95.
6. Петухов В. О., Горобец В. А. Автоматизированная настройка CO_2 – лазера на

a plate to be installed on a motorized platform with two rotation axes. By using two drives, the platform is adjusted (rotated and fixed) along two axes with a resolution of less than 1 arc second. The remote adjustment is performed using the controller. The installation adjustment of the diffraction unit is performed in the range of linear displacements of ± 3 mm with accuracy of ± 0.5 mm, angular displacements of $\pm 1.5^\circ$ with an accuracy of $\pm 1.5'$. The angle correction between the cavity optical axis and the normal to the diffraction grating surface is carried out within 26.7° – 33.4° that corresponds to the radiation wavelength tuning of 9–11 μm . The operational remote adjustment of the diffraction unit around the vertical axis provides the angle correction within $\pm 30'$ relative to the pre-set position with an accuracy of $\pm 10''$.

Instead of a diffraction grating with a reflection coefficient of $\leq 70\%$ to the first diffraction order that is usually used in a selective cavity for the radiation output, our circuit uses a diffraction grating that reflects the main radiation (up to 95%) to the first diffraction order. A small part of the radiation (5–7%) that inevitably goes into the zeroth order, is extracted from the cavity to diagnose the laser radiation parameters.

CONCLUSION

An automated LLI has been developed for testing the reactor graphite clarification process from ^{14}C isotope by the selective multiphoton laser dissociation of $^{14}\text{CHClF}_2$ molecule. The results obtained during the physical LLI lunch and natural content of ^{14}C in CHClF_2 have confirmed the numerical simulation results. The calculations have shown that the process scalability is capable of processing up to 3 kg/h of graphite (converted into freon-22) with a decrease in the ^{14}C concentration by 2–3 orders of magnitude. The precise wavelength tuning is ensured by the design of a special diffraction grating unit with automatic adjustment and programmable control.

REFERENCES

1. Bodrov O. V., Kuznetsov V. N., Muratov O. E., Talevlin A. A. Handling graphite during decommissioning of RBMK reactors. *Atomic Strategy XXI*. 2020;159:4–9.
2. Velikhov E. P., Baranov V. Yu., Letokhov V. S., Ryabov E. A., Starostin A. N. Pulsed CO_2 lasers and their application for isotope separation. – М.: Nauka. 1983. 304 p.
3. Bokhan P. A., Buchanov V. V., Zakrevskii D. E., Kazaryan M. A., Kalugin A. M., Prokhorov A. M., Fateev N. V. Laser separation of isotopes in atomic vapors. – М.: FIZMATLIT, 2004. 208 p. ISSN 5-9221-0497-7.
4. Baranov G. A., Kuchinsky A. A. Powerful pulsed CO_2 – high pressure lasers and their applications. *Quantum electronics*. 2005; 35(3):219–229.
5. Baranov G. A., Astakhov A. V., Zinchenko A. K., Kuchinsky A. A., Shevchenko Yu. I., Sokolov E. N., Kalitievskii A. K., Godisov O. N., Fedichev S. V., Baranov V. Yu., Dyadkin A. P., Ryabov E. A. Technological complex for laser separation of carbon isotopes. *Ros. chem. well*. 2001; 5–6:89–95.



заданную линию генерации без спектрального прибора. *Квантовая электроника*. 2005; 35(2):149–152.

7. **Г. Н. Макаров, А. Н. Петин.** Взаимное сильное увеличение эффективности изотопно-селективной лазерной ИК диссоциации молекул в неравновесных термодинамических условиях скачка уплотнения при облучении в бимолекулярной смеси, *Квантовая электроника*, 50:11 (2020), 1036–1042.

ВКЛАД АВТОРОВ

Работа выполнена в АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» ГК Росатом, Санкт-Петербург, Россия

Баев В. М. Нач. лаборатории – разработка принципиальных схем автоматического управления системами лазера

Бодакин Л. В. Главный специалист – сборка газовой системы установки ЛЛУ, юстировка оптического резонатора и диагностического тракта

Воронкова А. А. Инженер-программист – разработка концепции автоматизации и создание алгоритма управления системами ЛЛУ

Васильев А. В. Вед. исследователь – оптимизация параметров рабочей газовой смеси ЛЛУ, выведение на частотный режим

Котов С. М. Вед. исследователь – проектирование и изготовление высоковольтной части электропитания лазера

Кубасов В. А. Вед. научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук – разработка оптической схемы лазера, проектирование и выбор элементов резонатора (линзы, зеркала)

Павленко А. В. нач. отдела, канд. физ.-мат. наук – общее руководство работой по созданию ЛЛУ

Подтыкан Ф. П. Нач. лаборатории – теоретическое обоснование возможности выделения изотопа ^{14}C с использованием опыта работы с изотопом ^{13}C

Томашевич П. В. Научный руководитель проекта, нач. лаборатории – расчетные работы по оптимизации выходных характеристик ЛЛУ, определение энергии излучения, необходимой для многофотонной диссоциации

Хухарев В. В. вед. научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук – теоретическое обоснование параметров газовой смеси, процессов взаимодействия лазерного излучения с фреоном-22

6. **Petukhov V. O., Gorobets V. A.** Automated adjustment of CO_2 – laser to a given generation line without a spectral instrument. *Quantum electronics*. 2005; 35(2):149–152.
7. **Makarov G. N., Petin A. N.** Mutual strong increase in the efficiency of isotopically selective laser IR dissociation of molecules under nonequilibrium thermodynamic conditions of a shock wave during irradiation in a bimolecular mixture. *Quantum Electron.* 50:11 (2020): 1036–1042.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Baev V. M. Head of the laboratory – Development of circuit diagrams for automatic control of the laser systems.

Bodakin L. V. Chief specialist – Assembly of the LLI installation gas system, adjustment of the optical cavity and diagnostic path.

Voronkova A. A. Software engineer – Development of the automation concept and the LLI system control algorithm.

Vasiliev A. V. Principal researcher – Optimization of the LLI working gas mixture parameters, bringing to the frequency mode.

Kotov S. M. Principal researcher – Design and manufacture of the high-voltage part of the laser power supply.

Kubasov V. A. Leading researcher, Ph.D. in physics and mathematics – Development of the laser optical circuit, design and selection of the cavity elements (lens, mirrors).

Pavlenko A. V. Head of the department, Ph.D. in physics and mathematics – General management of the LLI developmental works.

Podtykan F. P. Head of the laboratory – Theoretical substantiation of the possible ^{14}C isotope isolation using the experience of work with the ^{13}C isotope.

Tomashevich P. V. Project academic supervisor, head of the laboratory – Calculation works for optimization of the LLI output specifications, determination of the radiation energy required for the multiphoton dissociation.

Khukharev V. V. Leading researcher, Ph.D. in physics and mathematics – Theoretical substantiation of the gas mixture parameters, interaction processes between the laser radiation and freon-22.



<https://www.laseroptics.org/>

conference@laseroptics.org

Тел.: +7 (812) 323 6348

Факс: +7 (812) 334 0824

XXI Международная конференция «ОПТИКА ЛАЗЕРОВ» ICLO 2024

г. Санкт-Петербург, Россия, 01-05 июля 2024 г.

Твердотельные лазеры
Высокомощные лазеры
Полупроводниковые лазеры, материалы и устройства
Управление лазерным излучением
Сверхсильные поля и сверхбыстрые процессы
Лазеры и системы для визуализации,
зеленой фотоники и устойчивого развития
Лазеры для космических систем связи,
локации, геодезии и навигации
Нелинейная фотоника
Оптические наноматериалы
Лазеры на свободных электронах
Нелинейная квантовая фотоника
Биофотоника

Выставка

Официальный язык конференции – английский