



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P15-94-47

Ю.П.Гангрский, Ч.Градечны*, С.Г.Земляной,
П.Зузаан, И.М.Ермолаев*, Б.Н.Марков,
Г.В.Мышинский, Я.Словак*, Т.Тетгал*, И.Штекл

СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ДРЕЙФ АТОМОВ
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ^{22}Na и ^{24}Na
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики"

*Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия

1994

Светоиндуцированный дрейф атомов радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na под действием лазерного излучения

Исследован светоиндуцированный дрейф атомов радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na в буферном газе Kr под действием лазерного излучения. Определена резонансная частота для D2-линии, при которой атомы ^{22}Na и ^{24}Na дрейфуют в противоположных направлениях. Измерено распределение по длине дрейфовой трубки концентраций обоих изотопов при температурах 300 и 1000 К. Для этого использовалась методика регистрации γ -излучения, испускаемого при распаде изотопов. Достигнут фактор разделения изотопов до 20 при эффективности 50% и скорости дрейфа 1,1 м/с.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Gangrsky Yu.P. et al.

P15-94-47

Laser Light Induced Drift for Atoms of Radioactive Isotopes ^{22}Na and ^{24}Na

The laser light induced drift for atoms of radioactive isotopes ^{22}Na and ^{24}Na in the buffer gas Kr was studied. D2-line resonance frequency for drift of ^{22}Na and ^{24}Na in the opposite directions was determined. The distribution of concentration for both isotopes along the drift tube was measured at the temperature 300 and 1000 K. The detection of γ -radiation of radioactive isotopes was used for these measurements. The isotope separation factor up to 20 at the efficiency 50% and drift velocity 1.1 m/s was reached.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1994

Светоиндуцированный дрейф (СИД) атомов в буферном газе является одним из эффектов, наблюдаемых при взаимодействии лазерного излучения с веществом [1,3]. Этот эффект возникает, когда атомы выбранного изотопа селективно по скорости возбуждаются лазерным излучением. При этом частота линии возбуждения, более узкой, чем ширина доплеровского контура, выбирается такой, что возбуждение испытывают только те атомы, которые движутся с определенной скоростью и в заданном направлении относительно лазерного луча. Атомы в возбужденном состоянии имеют, как правило, большие размеры, чем в основном состоянии, поэтому сечение их столкновения с буферным газом больше, а коэффициент диффузии меньше. В результате этого возникают противоположно направленные потоки возбужденных и невозбужденных атомов, что приводит к изменению их концентрации. Это изменение при достаточном удалении от источника атомов может быть значительным (в десятки и сотни раз), что может найти целый ряд применений в различных областях физики и техники.

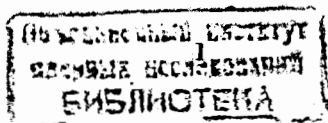
К настоящему времени СИД наблюдался для атомов сравнительно малого числа элементов (например, Na [2,3], Rb [4], Ne [5]), а также для ряда молекул [6,7]. В случае атомов Na выполнен достаточно широкий круг исследований этого явления [8,9]. Однако, большая часть этих исследований проводилась при температурах, близких к комнатной, в узком капилляре либо из специального стекла, либо с покрытием внутренних стенок пленкой парафина или диффузионного масла для устранения адсорбции паров Na. В то же время очевидно, что возможные разнообразные применения СИД могут потребовать других условий, например значительно более высоких температур, капилляров из других материалов и т.д. Все это определяет интерес к дальнейшим исследованиям СИД, атомов Na, а также к расширению круга изучаемых элементов и изотопов.

Исследования СИД окажутся более эффективными, если вместо стабильных изотопов, применяемых во всех предыдущих экспериментах, использовать радиоактивные. Регистрация испускаемого при их распаде γ -излучения, а не резонансно-рассеянного оптического, существенно повышает чувствительность измерений, позволяет определять концентрацию каждого из исследуемых изотопов как в процессе дрейфа, так и проинтегрированную за все время эксперимента. Все эти измерения с различными изотопами можно проводить в одном эксперименте, что существенно расширяет возможности исследования СИД.

Целью данной работы является исследование СИД атомов радиоактивных изотопов натрия ^{22}Na и ^{24}Na в новых условиях — более высокие температуры, использование дрейфовых трубок из более теплостойких материалов (нержавеющая сталь, кварц). Эти исследования включают измерения как динамических характеристик (изменения концентрации атомов Na во времени при сканируемой и фиксированной частоте лазерного излучения), так и стационарных (распределение концентрации по длине трубки во время дрейфа и проинтегрированные за все время эксперимента).

Теоретические представления

Наряду с экспериментальными исследованиями эффекта СИД достаточно подробно проведено и его теоретическое рассмотрение [8, 9]. Если источник атомов находится в центре дрейфовой трубки ($x=0$), то изменение во времени концентрации атомов на различных участках трубки $N(x,t)$ при наличии дрейфа со скоростью u можно описать одномерным уравнением диффузии:



$$dN/dt - \text{div}(uN - \nabla DN) + \gamma N = 0, \quad (1)$$

где D – эффективный коэффициент диффузии, γ – постоянная, характеризующая убыль исследуемых атомов при их движении по трубке (она является обратной среднему времени их жизни в буферном газе и существенно зависит от количества и состава примесей, реагирующих со свободными атомами Na).

Решение уравнения (1) позволяет судить о том, как в результате СИД происходит изменение концентрации исследуемых атомов на различных участках дрейфовой трубки при различных условиях эксперимента. Например, стационарное распределение концентрации (обычно оно определяется на опыте) описывается выражениями:

по направлению дрейфа ($x < 0$):

$$N(x) = N_0 \exp(x/\ell_1) \quad \ell_1 = \left[\left(\frac{u^2}{4D^2} + \frac{\gamma}{D} \right)^{1/2} + \frac{u}{2D} \right]^{-1}, \quad (2)$$

против дрейфа ($x > 0$):

$$N(x) = N_0 \exp(x/\ell_2) \quad \ell_2 = \left[\left(\frac{u^2}{4D^2} + \frac{\gamma}{D} \right)^{1/2} - \frac{u}{2D} \right]^{-1}, \quad (3)$$

в отсутствие дрейфа ($u=0$), когда имеет место лишь диффузия атомов:

$$N(x) = N_0 \exp(x/\ell_0) \quad \ell_0 = (D/\gamma)^{1/2}. \quad (4)$$

Из выражений (2–3) видно, что СИД приводит к асимметричному распределению концентраций атомов относительно их источника. Отношение концентраций при одинаковом расстоянии от источника по направлению дрейфа и против него (коэффициент асимметрии СИД) экспоненциально растет с ростом x :

$$\beta(x) = \exp \frac{u}{D} x. \quad (5)$$

Скорость роста $\beta(x)$ определяется отношением скорости СИД к коэффициенту диффузии исследуемых атомов в буферном газе. Выражение для скорости СИД включает произведение трех величин:

$$u = \frac{D_g - D_e}{D_g} \eta V_L. \quad (6)$$

Первый сомножитель определяет относительное изменение коэффициента диффузии при переходе от основного состояния (D_g) к возбужденному (D_e). При диффузии атомов Na в инертном газе это изменение лежит в пределах от 0,14 для He до 0,49 для Xe [9]. Второй (η) и третий (V_L) сомножители представляют соответственно долю атомов в доплеровском контуре, возбуждаемых лазерным излучением заданной частоты, и их среднюю проекцию скорости теплового движения на направление дрейфа. Произведение этих сомножителей в пределах доплеровского контура обнаруживает сложную

зависимость от частоты лазерного излучения. Оно обращается в нуль при частоте, соответствующей центру контура (возбуждаются атомы, движущиеся перпендикулярно лазерному лучу), и достигает максимума при сдвиге частоты относительно центра на величину $\Delta\nu$, когда возбуждаются атомы, имеющие наиболее вероятную скорость v теплового движения в направлении (или против) лазерного луча:

$$\Delta\nu = \frac{v}{c} \nu, \quad (7)$$

где ν – резонансная частота, c – скорость света.

В соответствии с этим скорость СИД имеет максимальные значения (и противоположные направления) при двух значениях частот, сдвинутых относительно центра контура влево или вправо на величину $\Delta\nu$. Величина максимальной скорости СИД определяется свойствами буферного газа, характеристиками оптических переходов и параметрами лазерного излучения. При оптимальных условиях достигнуть скорости дрейфа $u > 10$ м/с. В этом случае $u/D > 10$ см⁻¹, и заметные значения коэффициента асимметрии оказываются уже на расстоянии в нескольких миллиметрах от источника.

Однако такая картина будет иметь место лишь в простой схеме из двух уровней (основного и возбужденного). В атомах Na наблюдается сверхтонкое расщепление как основного состояния $s_{1/2}$, так и возбужденных $p_{1/2}$ и $p_{3/2}$, при этом расстояние между компонентами основного состояния много больше, чем для обоих возбужденных. При такой схеме уровней возбуждение их различных компонент может приводить к дрейфу в противоположных направлениях. При этом в процессе СИД будут происходить переходы между компонентами возбужденных состояний при столкновениях с атомами буферного газа, оптическая накачка на одну из компонент основного состояния, переход на другую компоненту при взаимодействии со стенками дрейфовой трубки. Все это может существенно изменить скорость дрейфа, определяемую выражением (6). Это изменение скорости СИД определяется оптическими характеристиками уровней атомов исследуемых изотопов (изотопический сдвиг $\Delta\nu_{is}$, сверхтонкое расщепление основного состояния $\Delta\nu^{F_i F'}$) и уширением спектральных линий (доплеровским $\Delta\nu_d$ и ударным $\Delta\nu_{int}$). Все эти величины для атомов изотопов ^{22}Na , ^{23}Na и ^{24}Na при условиях, в которых проводились эксперименты (они приведены ниже) представлены в табл.1, а $\Delta\nu_{int} \sim 200$ МГц. Видно, что ряд этих величин несколько отличается для различных изотопов Na [10]. Поэтому эксперименты по исследованию СИД с разными изотопами Na позволяют установить влияние этих параметров на скорость дрейфа и другие его характеристики.

Таблица 1

Параметры оптических спектров изотопов Na

Изотоп	$\Delta\nu_{is}^{23,A}$	$\Delta\nu^{F_i F'}$	$\Delta\nu_d$, МГц	
	МГц	МГц	300К	1000К
^{22}Na	-750	1240	1345	2470
^{23}Na	0	1777	1315	2410
^{24}Na	+706	1140	1290	2360

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, используемая для исследования СИД изотопов Na, включает лазерный спектрометр, набор дрейфовых трубок из нержавеющей стали различной длины и диаметра и системы для откачки и наполнения инертным газом (рис.1).

Лазерный спектрометр состоит из лазера на красителе (модель SP 280D), накачиваемого аргоново-ионным лазером непрерывного действия (SP 2030). Частоту лазерного излучения можно было сканировать в выбранном диапазоне шириной до 30 ГГц. Система стабилизации позволяла поддерживать выбранную частоту в пределах 10-20 МГц. Настройка лазера на заданный диапазон частот проводилась с помощью измерителя длины волны (Burleigh WA-10) и лампы с парами Na. Для контроля за интенсивностью лазерного излучения, прошедшего через дрейфовую трубку, использовался измеритель мощности (OPHIR 20A).

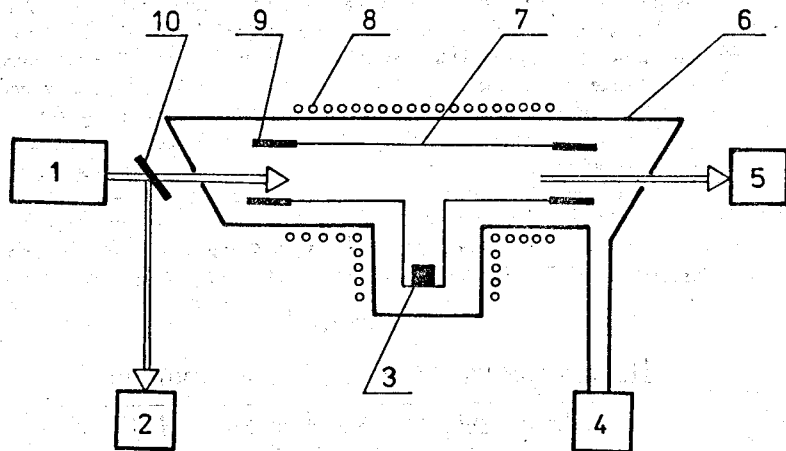


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 - лазерный спектрометр, 2 - измеритель длины волны, 3 - образец с ^{22}Na и ^{24}Na , 4 - система откачки, 5 - измеритель мощности излучения, 6 - вакуумная камера, 7 - дрейфовая трубка, 8 - нагреватель, 9 - сборник атомов, 10 - зеркало

Светоиндуцированный дрейф атомов Na проходит в трубке из нержавеющей стали. Использовались трубки различного диаметра (от 1,2 до 4,0 мм) и длиной до 60 мм. К центру трубки был присоединен отросток, в который помещался испаряемый образец, содержащий исследуемые атомы. Трубка с отростком находилась в ячейке из кварца, которая с помощью нихромовой спирали могла нагреваться до заданной температуры. При этом был предусмотрен автономный нагрев отростка с образцом. Температура ячейки и дрейфовой трубки контролировалась с помощью термпары хромель-алюмель и пирометра.

С помощью форвакуумного и диффузионного насосов ячейки откачивались до вакуума 10^{-4} торр. При этом особое внимание уделялось устранению примесей, которые в результате химических реакций связывали бы атомы Na (пары воды и масла, кислород, водород). Образующиеся соединения Na участвуют лишь в диффузии, а не в дрейфе, и таким образом снижают его эффективность. Поэтому при откачке кварцевая ячейка в течение нескольких часов прогревалась при температуре 850K. Для поглощения выделяющихся при нагревании кварцевой оболочки и дрейфовой трубки примесей использовались K и Zr, нагретые до этой температуры. Наполняемый ячейку инертный газ пропусклся через ловушку с жидким азотом.

При работе при комнатной температуре сборником атомов ^{22}Na и ^{24}Na служила фольга из Al, помещаемая внутри дрейфовой трубки. В опытах при высокой температуре использовались сборники из кварца, помещаемые на обоих концах трубки (кварц хорошо связывает атомы Na при высокой температуре).

Более детальное описание отдельных узлов экспериментальной установки, процедуры проведения экспериментов, некоторые результаты и их обработка приведены в наших предыдущих работах [11-13].

Используемые в экспериментах изотопы ^{22}Na и ^{24}Na имели существенно разные характеристики радиоактивного ядра распада. ^{22}Na - период полураспада 2,6 года, энергия γ -излучения 511 кэВ и 1274 кэВ, ^{24}Na - соответственно 15,0 ч, 1368 кэВ и 2,754 кэВ^{1/4}. Это позволяло, используя спектрометры γ -излучения (сцинтилляционный с кристаллом NaI(Tl) или полупроводниковый Ge(Li)), четко выделять излучение каждого из изотопов, измерять их концентрацию в дрейфовой трубке и проводить эксперименты по использованию СИД одновременно с обеими изотопами.

Получение изотопов ^{22}Na и ^{24}Na проводилось при облучении фольги из сверхчистого Al протонами с энергией 660 МэВ в реакции глубокого отщепления, а изотопа ^{24}Na - также в реакции $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ с нейтронами спектра деления урана.

Результаты эксперимента

На описанной установке были проведены 2 вида экспериментов по светоиндуцированному дрейфу атомов радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na .

1. Измерение зависимости концентрации атомов изотопа ^{24}Na на конце дрейфовой трубки от частоты лазерного излучения и от времени при включении и выключении излучения. Целью этих измерений было изучение взаимодействия атомов Na с горячей стенкой трубки и определение частоты лазерного излучения, при которой скорость СИД имеет максимальное значение.

Эксперименты проводились в дрейфовой трубке из нержавеющей стали диаметром 2,5 мм и длиной 150 мм, наполненной Kr до давления 10 торр. Один из концов трубки был запаян, и у этого конца проводилось измерение концентрации ^{24}Na по интенс-

вности его γ -излучения. Для этого использовался сцинтилляционный спектрометр с кристаллом NaI(Tl), защищенный свинцовым экраном толщиной 50 мм от находящегося в отростке источника ^{24}Na интенсивностью $1,2 \cdot 10^5$ Бк. Источником являлась фольга из сверхчистого Al, облученного протонами.

При нагревании дрейфовой трубки и отростка с источником ^{24}Na до температуры 1000K и заполнении трубки парами Na в результате диффузии происходил рост интенсивности его γ -излучения. Когда интенсивность γ -излучения приближалась к насыщению (это означало практически полное испарение содержащегося в образце ^{24}Na), начиналось сканирование частоты лазерного излучения в окрестности D2 - линии Na ($\lambda=589,0$ нм) со скоростью 1 ГГц/мин. Лазерное излучение, направляемое с левого конца, заполняло всю площадь дрейфовой трубки, и его средняя плотность мощности составляла $0,6\text{Вт/см}^2$. В измеренной зависимости интенсивности γ -излучения ^{24}Na от частоты лазерного излучения (рис.2) четко виден максимум при частоте, близкой к резонансной для изотопа ^{23}Na . Этот максимум, очевидно, соответствует наибольшей скорости СИД в направлении лазерного луча. Минимум, связанный с дрейфом в противоположном направлении, выражен значительно слабее из-за фона от атомов ^{24}Na , адсорбированных стенками трубки.

При этой частоте проводились измерения зависимости от времени интенсивности γ -излучения (или концентрации атомов ^{24}Na) при выключении и включении лазерного излучения. При выключении излучения концентрация атомов ^{24}Na на конце дрейфовой трубки снижалась в 2 раза за время 20 с. С такой же скоростью происходило и восстановление концентрации ^{24}Na до прежнего уровня при включении лазерного излучения. Эти изменения концентрации атомов ^{24}Na значительно медленнее тех, которые связаны со временем диффузии атомов Na в Кг при данных давлении и температуре (в этом случае изменение концентрации вдвое происходило бы, согласно расчетам, за время ~ 1 с). Такая большая разница объясняется абсорбцией и последующей десорбцией атомов ^{24}Na на стенках при их движении по дрейфовой трубке. При этом атомы ^{24}Na проводят на стенках $\sim 95\%$ их времени нахождения в трубке. Это время зависит, очевидно, от материала и температуры трубки. Например, при замене трубки из стали на медную изменение концентрации атомов ^{24}Na происходило значительно медленнее (концентрация падала в 2 раза за время ~ 4 мин.).

На рис.3 представлено расположение на шкале частот доплеровских контуров компонент сверхтонкой структуры D2 оптической линии атомов изучаемых изотопов Na (при этом пренебрегалось сверхтонким расщеплением возбужденного $p_{3/2}$ уровня, которое значительно меньше, чем для основного состояния). Как уже отмечалось выше, максимальная скорость СИД наблюдается при частоте лазерного излучения, соответствующей центру доплеровского контура атомов изотопа ^{23}Na . Из рис.3 видно, что вблизи этой частоты (в пределах однородной ширины линии возбуждения) расположена компонента СТС атомов ^{24}Na и ^{22}Na с полным спином F соответственно $9/2$ и $5/2$, а другие компоненты сдвинуты на частоту, близкую к той, которая необходима для достижения максимальной скорости СИД. При такой частоте существенно ослабляется влияние оптической накачки компоненты, неблагоприятной для СИД.

Ширина наблюдаемого резонанса (~ 2 ГГц) близка к ширине доплеровского контура для одной компоненты (табл.1) при $T=1000\text{K}$.

2. Измерение распределения концентрации изотопов ^{22}Na и ^{24}Na по длине дрейфовой трубки при частоте лазерного излучения, соответствующей центру доплеровского

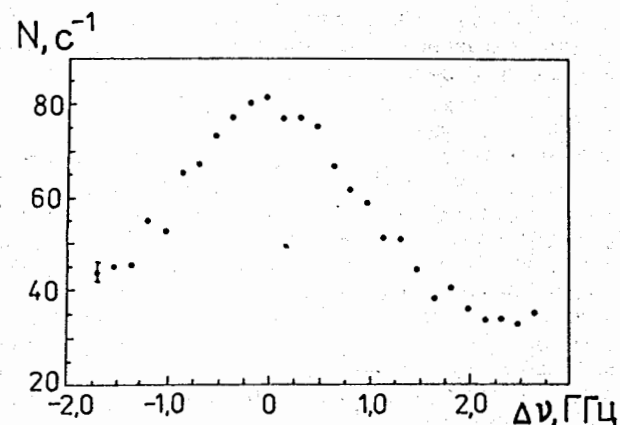


Рис.2. Зависимость скорости счета γ -излучения от длины волны лазерного излучения. $\Delta\nu=0$ соответствует центру D2-линии атомов ^{23}Na

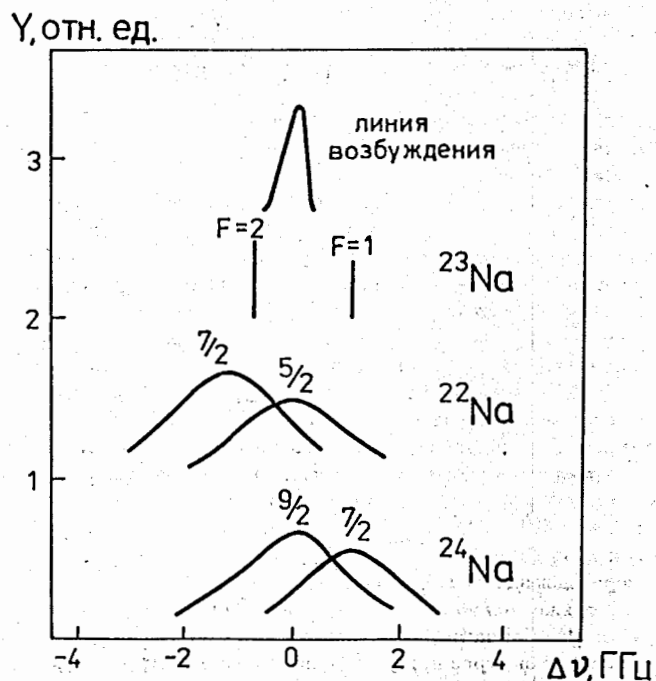


Рис.3. Линия возбуждения и доплеровские контуры компонент сверхтонкой структуры оптической D2-линии атомов изотопов ^{22}Na и ^{24}Na

контура ^{23}Na . Как видно из рис.3, при этой частоте атомы изотопов ^{24}Na и ^{22}Na дрейфуют в разные стороны: первый по направлению лазерного луча, а второй – против него. Измерения пространственного распределения каждого из этих изотопов в одном эксперименте позволяют более определенно судить о величине скорости СИД и ее зависимости от различных факторов.

Эксперименты проводились при комнатной температуре ($T=300\text{K}$) в широкой, диаметром 10 мм, дрейфовой трубке и при $T=1000\text{K}$ в трубке диаметром 3 мм. Это соответствовало совершенно разным условиям, в которых проходил СИД. В первом случае атомы Na абсорбировались холодными стенками, и их концентрация экспоненциально падала по длине трубки. Во втором случае происходила их десорбция горячими стенками, и дрейф проходил практически без потерь.

В экспериментах использовалось два вида источников радиоактивных изотопов Na: один в виде алюминиевой фольги, другой — в виде графитового стержня, который при нагревании до 1000K поглощал в вакууме ^{24}Na и ^{24}Na . Первый источник нагревался до температуры выше точки плавления Al (933K), а второй — до температуры 2100K . Несмотря на то, что для источников использовались материалы высокой чистоты, при их нагревании происходило выделение натрия (это было заметно по ослаблению интенсивности лазерного излучения, проходящего через дрейфовую трубку). По-видимому, имело место поверхностное загрязнение источников натрием. Поэтому использовался предварительный прогрев в течение 10–15 с для удаления загрязнений, за это время практически не происходило убывания радиоактивных изотопов Na из объема источников. Их полное испарение заканчивалось за 15–30 мин, и все это время через трубку с ее левого конца пропускалось лазерное излучение с частотой, соответствующей резонансу D2-линии ^{23}Na (она контролировалась измерителем длины волны и лампой с парами натрия).

После окончания испарения с помощью Ge(Li)-спектрометра проводились измерения интенсивности γ -излучения изотопов ^{22}Na и ^{24}Na на различных участках дрейфовой трубки слева и справа от источника. Обычно ~50% от числа атомов радиоактивных изотопов оставалось на стенках от роста, где находились источники, а остальные атомы попадали в трубку и участвовали в дрейфе. Из сравнения выходов γ -линий с энергиями 1368 кэВ (^{24}Na) и 1274 кэВ (^{22}Na) в исходных источниках и на сборниках в дрейфовой трубке можно было однозначно определить концентрации атомов изотопов ^{22}Na и ^{24}Na .

В табл.2 представлены результаты этих измерений — доля атомов, достигших сборника (ϵ) и отношения концентраций изотопов ^{22}Na и ^{24}Na на различных расстояниях слева и справа от источника $\alpha(\ell)$ (нормированные к их отношению в источнике). Приведены также условия эксперимента — давление p , температура T и плотность мощности лазерного излучения W . Видно, что при любых условиях эксперимента четко наблюдается проявление СИД — обогащение изотопом ^{24}Na по ходу лазерного луча (справа от источника) и изотопом ^{22}Na — против хода (слева). При этом имеет место рост обогащения по мере удаления от источника.

Из табл.2 также можно видеть, что рост обогащения различен в левой и правой частях трубки. При одинаковых расстояниях от источника $\alpha(\text{слева}) > \alpha(\text{справа})$, т.е. обогащение растет быстрее при дрейфе изотопов против хода лазерного луча, чем по его ходу. Эта разница может объясняться двумя причинами:

1. Как видно из рис.3 при выбранной частоте лазерного излучения возбуждение атомов изотопов ^{22}Na и ^{24}Na происходит из разных компонент сверхтонкой структуры:

для первого с меньшим значением полного момента ($F=5/2$), а для второго — с большим ($F=9/2$). Это может привести к разным значениям скорости дрейфа.

2. Из-за присутствия в трубке паров стабильного изотопа ^{23}Na происходит ослабление интенсивности лазерного излучения при его движении вдоль трубки. Поэтому скорость дрейфа в правой части трубки меньше, чем в левой, что приводит к разнице в обогащении.

Поскольку атомы изотопов ^{22}Na и ^{24}Na дрейфуют в противоположные стороны, то представленные в табл.2 отношения их концентраций $\alpha(\ell)$ можно приближенно рассматривать как определяемые выражением (5) коэффициенты асимметрии СИД:

$$\alpha(\ell) \approx \exp \frac{\bar{v}}{D} \ell, \quad (8)$$

где \bar{v} — средняя скорость дрейфа для обоих изотопов.

Пользуясь выражением (8), измеренными значениями $\alpha(\ell)$ и известными коэффициентами диффузии атомов Na в Kr [8], можно оценить средние скорости дрейфа \bar{v} . Они оказались близкими по величине при разных значениях ℓ и составляют в левой части, где скорость дрейфа наибольшая, в холодной трубке ~0,2 м/с и в горячей ~1,1 м/с. В правой части трубки скорости дрейфа вдвое ниже. Эти значения скорости дрейфа интересно сравнить с аналогичными величинами для стабильного изотопа ^{23}Na , полученными в работах [8,9] другими способами (по измерению коэффициента асимметрии или по непосредственному наблюдению за движением флуоресцирующего обмена атомов Na). Оказалось, что если привести значения скорости дрейфа, полученные в наших экспериментах и в работах [8,9] к одинаковым условиям (температура, давление, плотность мощности лазерного излучения, сдвиг его частоты), то они оказываются близкими по величине. Очевидно, различия в значениях сверхтонкого расщепления изотопов Na (табл.1) мало отражаются на величине скорости СИД.

Таблица 2

Отношение концентраций атомов изотопов ^{22}Na и ^{24}Na

ℓ мм	W Вт/см ²	T К	p торр	ϵ %	$\alpha(\ell)$	
					слева	справа
6	0,25	300	10	3	2,8(1)	0,60(2)
6	0,20	300	3	2	3,0(1)	0,50(2)
14	0,25	300	10	0,04	9(3)	0,4(1)
20	0,20	1000	10	50	18(2)	0,20(2)
50	0,30	1000	10	50	>20	0,04(1)

Заключение

Проведенные эксперименты позволили определить характеристики СИД атомов радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na — частоты лазерного излучения, при которых скорость дрейфа максимальна, значения этих скоростей при различных условиях. Из этих величин следует, что эффект СИД соответствует теоретическим представлениям о нем вплоть до высоких температур — 1000К. Показано также, что при сравнительно низких мощностях лазерного излучения ($\sim 0,2$ Вт/см²) можно достигнуть достаточно больших скоростей СИД — до 1 м/с. Такие скорости дрейфа позволяют эффективно воздействовать на движение атомов, возбуждаемых лазерным излучением, в буферном газе, например, достаточно быстро транспортировать атомы выделенного изотопа в заданном направлении. Это может найти многочисленные и разнообразные применения — в лазерной спектроскопии, в разделении изотопов и т.д.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.Ц.Оганесяну, Ю.Э.Пенионжкевичу и Р.Маху за поддержку работы, А.М.Шалагину и Е.П.Мариновой за полезные обсуждения, Л.М.Мельниковой за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. Ф.Х.Гельмуханов, А.М.Шалагин.—Письма в ЖЭТФ, 29, 773 (1979).
2. В.Д.Анцигин, С.Н.Агутов, Ф.Х.Гельмуханов и др.—Письма в ЖЭТФ, 30, 262 (1979).
3. H.G.C.Werij, J.E.M.Haverkort, J.P.Woerdman.—Phys. Rev. A33, 3271 (1986).
4. A.D.Streater, J.Mocibrock, J.P.Woerdman.—Opt. Comm., 64, 137 (1987).
5. S.N.Atutov, P.L.Chapovsky, A.M.Shalagin.—Opt. Comm., 43, 881 (1983).
6. В.Н.Панфилов, В.П.Струнин, П.Л.Чаповский.—ЖЭТФ, 85, 482 (1983).
7. А.К.Фомин, П.Л.Чаповский.—Письма в ЖЭТФ, 38, 1213 (1987).
8. С.Н.Агутов, И.М.Ермолаев, А.М.Шалагин.—ЖЭТФ, 92, 146 (1988).
9. H.C.G.Werij, J.P.Woerdman.—Phys. Rep., 169, 146 (1988).
10. F.Touchard, J.M.Serre, S.Buttgenbach e.a.—Phys. Rev. C25, 2756 (1982).
11. Yu.P.Gangrsky, C.Hradecny, J.Slovak e.a.—Phys. Lett. A168, 230 (1992).
12. C.Hradecny, T.Tethal, I.M.Ermolaev e.a.—Preprint JINR, E13-93-17 (1993).
13. Yu.P.Gangrsky, C.Hradecny, G.V.Mishinsky e.a.—Phys. Lett. A180, 353 (1993).
14. Tables of Isotopes, edited by C.M.Lederer and V.S.Shirley.—N.Y., 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 февраля 1994 года.