

02;04;07;12

## Наблюдение циркулярного дихроизма ансамбля триплетных метастабильных атомов гелия в Na–He газоразрядной плазме при лазерной оптической ориентации атомов натрия

© С.П. Дмитриев, Н.А. Доватор, Р.А. Житников, В.А. Картошкин, В.Д. Мельников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 31 июля 1998 г.)

Описывается эксперимент по наблюдению циркулярного дихроизма ансамбля триплетных метастабильных атомов гелия в натрий-гелиевой газоразрядной плазме при оптической ориентации в ней атомов Na циркулярно поляризованным излучением лазера, перестраиваемого в области резонансного дублета натрия (длины волн 589.0 и 589.6 nm, соответствующие переходам  $3^2S_{1/2} \leftrightarrow 3^2P_{1/2}$  и  $3^2S_{1/2} \leftrightarrow 3^2P_{3/2}$ ). Определены условия наблюдения и величина степени поляризации  $2^3S_1$ -атомов.

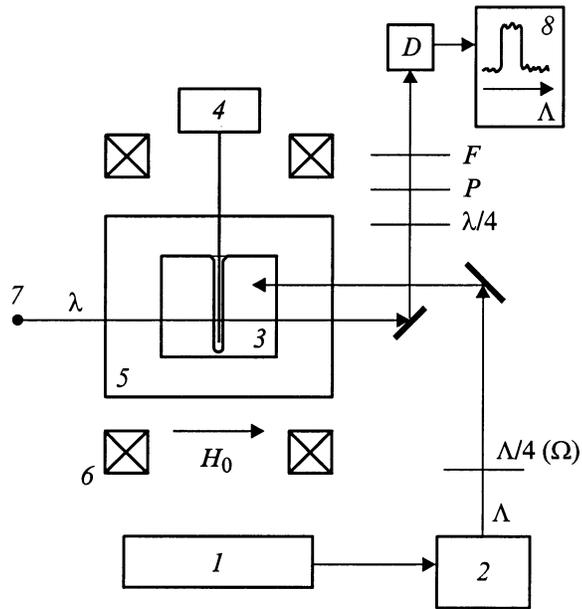
Ансамбли спин-поляризованных атомов в газах и газоразрядной плазме могут быть созданы не только путем прямой оптической ориентации, т. е. путем воздействия на них резонансного циркулярно поляризованного излучения, но также с помощью других методов, в основе которых лежит перенос спиновой поляризации от ансамбля оптически ориентированных атомов одного элемента к ансамблю атомов другого элемента. Такой перенос поляризации в газах и газоразрядной плазме может быть обусловлен рядом спин-зависимых процессов, протекающих при столкновениях различных парамагнитных атомных частиц [1]. Одним из таких непрямых методов поляризации является спиновая поляризация ансамбля триплетных метастабильных атомов гелия в щелочно-гелиевой плазме при оптической ориентации в ней атомов щелочного металла. Передача спиновой поляризации от оптически ориентированных  $n^2S_{1/2}$ -атомов щелочного металла к  $2^3S_1$ -метастабильным атомам He происходит в результате нескольких идущих одновременно спин-зависимых процессов межатомных и электронно-атомных столкновений. К этим процессам относятся спин-зависимая пеннинговская ионизация атомов щелочного металла при их взаимодействии с метастабильными атомами гелия и межатомный спиновый обмен, протекающий при упругих столкновениях этих атомов [2–6]. Существенный вклад в поляризацию ансамбля метастабильных атомов гелия могут дать столкновения этих атомов с электронами, поляризованными в процессе спинового обмена между свободными электронами плазмы и ансамблем оптически ориентированных атомов щелочного металла [2,3,5,6].

Таким способом были созданы и использованы в различных физических экспериментах и приборах квантовой электроники ансамбли спин-поляризованных метастабильных атомов He, возбуждаемых в Cs–He [3], Rb–He [2,6] и K–He [5] плазме в условиях импульсного высокочастотного разряда. Оптическая ориентация атомов щелочного металла в этих работах осуществлялась циркулярно поляризованным излучением спектральных

ламп, содержащих соответствующий щелочной металл. Поляризация атомов гелия в этих работах регистрировалась по изменению поглощения света накачки атомами щелочного металла при разрушении этой поляризации с помощью магнитного резонанса, возбуждаемого в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He.

В настоящей работе осуществлена спиновая поляризация триплетных метастабильных атомов гелия в натрий-гелиевой плазме, возбуждаемой непрерывным высокочастотным разрядом, при оптической ориентации  $3^2S_{1/2}$ -атомов Na циркулярно поляризованным излучением перестраиваемого лазера. Предложен метод прямой оптической регистрации созданной таким образом поляризации метастабильных атомов He, в основе которого лежит наблюдение циркулярного дихроизма ансамбля  $2^3S_1$ -атомов гелия, возникающего при поляризации магнитных моментов этих атомов.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Оптическая ориентация атомов натрия осуществлялась светом перестраиваемого непрерывного лазера на красителе родамин-6G. Применение перестраиваемого лазера позволило производить поляризацию атомов Na светом одной из D-линий резонансного дублета (по выбору D<sub>1</sub>- или D<sub>2</sub>-линии, длины волн 589.0 и 589.6 nm соответственно). В качестве лазера накачки использовался аргоновый лазер ЛГН-404а. Резонатор перестраиваемого лазера включал в себя фильтр Лию и тонкий эталон. Мощность лазера накачки  $\approx 4$  W. Мощность излучения перестраиваемого лазера при настройке на одну из линий резонансного дублета натрия ( $\lambda_1 = 589.6$  nm и  $\lambda_2 = 589.0$  nm) составляла  $\approx 70$  mW. Спектральная ширина лазерного излучения  $\leq 0.01$  nm. Луч лазера пропускался через четвертьволновую пластинку ( $\lambda/4$ ), ориентация которой определяла знак циркулярной поляризации ( $\sigma^+$  или  $\sigma^-$ ) лазерного излучения. Механическое вращение четвертьволновой пластинки ( $\lambda/4$ ) в плоскости перпендикулярной лучу света накачки позволяло периодически изменять знак ( $\sigma^+ \leftrightarrow \sigma^-$ ) циркулярной поляризации света (часто-

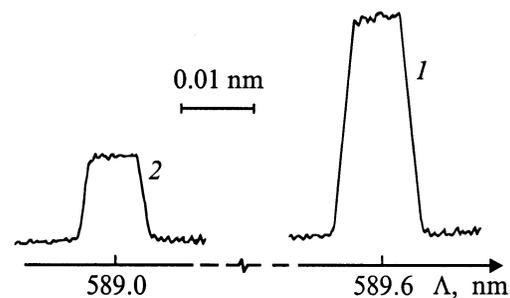


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — аргонный лазер накачки; 2 — перестраиваемый лазер ( $\Lambda$ ); 3 — камера поглощения; 4 — ВЧ генератор; 5 — термостат; 6 — кольца Гельмгольца; 7 — детектирующая гелиевая лампа; 8 — схема регистрации;  $D$  — фотоприемник;  $F$  — интерференционный фильтр ( $\lambda = 1083$  нм);  $\Lambda/4$  — вращающаяся четвертьволновая пластинка ( $\Lambda = 589$  нм);  $(\lambda/4, P)$  — циркулярный анализатор ( $\lambda = 1083$  нм).

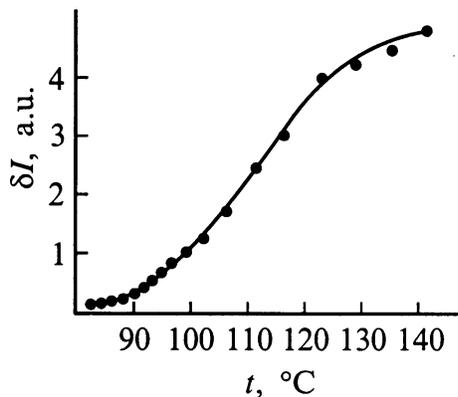
та вращения  $\Omega \approx 100$  Hz, частота изменения знака ( $\sigma^+ \leftrightarrow \sigma^-$ )-света  $2 \cdot \Omega$ . Сформированный таким образом циркулярно поляризованный луч света накачки поступал в камеру поглощения. Камера поглощения — стеклянный цилиндр (длина 5 см, диаметр 5 см) содержала металлический натрий и газ He (давление 1 Torr). В камере с помощью внутреннего остекленного электрода возбуждался непрерывный высокочастотный (45 MHz) разряд. Концентрация метастабильных атомов гелия могла быть изменена путем изменения ВЧ тока разряда. Камера поглощения помещалась в стеклянный термостат, обеспечивающий ее нагрев до температуры  $\approx 150^\circ\text{C}$ , что позволяло достичь плотности Na пара, соответствующей концентрации атомов натрия  $\approx 10^{11}$  см $^{-3}$ . Термостат с камерой устанавливался в центре многослойного цилиндрического ферромагнитного экрана. Внутри экрана с помощью системы колец Гельмгольца создавалось магнитное поле  $H_0 \approx 40$  mOe, направленное вдоль оси экрана. Луч света накачки, осуществлявший оптическую ориентацию атомов натрия, был направлен вдоль  $H_0$ . Создаваемая таким образом спиновая поляризация атомов натрия передается в столкновительных процессах метастабильным атомам гелия, что определяет возникновение циркулярного дихроизма ансамбля  $2^3S_1$ -атомов He на гелиевой линии  $\lambda = 1083$  нм (переход  $2^3S_1 - 2^3P_{0,1,2}$ ), причем направление намагниченности ансамбля атомов гелия зависит от направления спиновой ориентации ато-

мов Na, т.е. от знака  $\sigma^\pm$ -поляризации света накачки атомов натрия. Регистрация возникшей в столкновительных процессах спиновой поляризации  $2^3S_1$ -атомов He производилась с помощью детектирующего луча света гелиевой лампы, направленного вдоль поля  $H_0$  навстречу лучу света накачки (линия  $\lambda = 1083$  нм выделялась интерференционным фильтром, установленным перед фотоприемником). Неполаризованный свет гелиевой лампы после прохождения камеры поглощения поступал на циркулярный анализатор ( $\lambda/4, P$ ), настроенный на  $\sigma^+$ -поляризацию гелиевого света. Для регистрации изменения интенсивности детектирующего света при изменении направления ориентации спиновых моментов ансамбля атомов He (при изменении знака ( $\sigma^+ \leftrightarrow \sigma^-$ )-поляризации лазерного излучения, осуществляющего ориентацию атомов Na) использовались фотоприемник, узкополосный усилитель и синхронный детектор, настроенные на удвоенную частоту модуляции  $2 \cdot \Omega$ . Данная схема регистрации в сравнении с использовавшейся ранее регистрацией поляризации атомов гелия по изменению поглощения света накачки атомами щелочного металла позволила исключить в регистрирующем тракте влияние шумов лазерного излучения, а также избежать вклада в исследуемый сигнал, прямой оптической ориентации или выстраивания атомов гелия детектирующим светом. Запись сигналов изменения интенсивности детектирующего света (линия  $\lambda = 1083$  нм), возникающего при оптической ориентации атомов натрия  $\sigma^\pm$ -поляризованным лазерным излучением, осуществлялась посредством перестройки с помощью тонкого эталона длины волны ( $\Lambda$ ) лазерного излучения в области одной из резонансных линий дублета натрия ( $\Lambda_{1,2}$ ).

На рис. 2 представлена зависимость изменения интенсивности детектирующего света при фиксированном положении анализатора ( $\lambda/4, P$ ), соответствующем настройке на  $\sigma^+$ -поляризацию гелиевого света, при изменении с частотой  $2 \cdot \Omega$  знака циркулярной поляризации ( $\sigma^+ \leftrightarrow \sigma^-$ )-света накачки от  $\Lambda$ . Из рис. 2 видно, что при совпадении длины волны лазерного излучения ( $\Lambda$ ) с одной из линий резонансного дублета атомов натрия наблюдается сигнал изменения погло-



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности детектирующего света ( $\lambda = 1083$  нм) от длины волны лазерного излучения в области спектральных линий резонансного дублета натрия: 1 — вблизи  $D_1$ -линии дублета, 2 — вблизи  $D_2$ -линии дублета.



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды сигнала  $\delta I$  от температуры при накачке светом  $D_1$ -линии натрия.

щения детектирующего света гелиевой лампы ансамблем спин-поляризованных  $2^3S_1$ -метастабильных атомов гелия. Величина сигналов при накачке атомов натрия светом  $D_1$ -линии (589.6 nm) была в три раза больше, чем при накачке светом  $D_2$ -линии (589.0 nm), что соответствует большей поляризации спиновых моментов в  $3^2S_{1/2}$ -состоянии атомов Na, создаваемой светом  $D_1$ -линии, по сравнению с поляризацией, создаваемой светом  $D_2$ -линии той же интенсивности. Отношение амплитуды наблюдаемого сигнала  $\delta I$  к изменению интенсивности  $\Delta I_0$  гелиевого света при включении и выключении разряда, характеризующему стационарное поглощение гелиевого света ансамблем метастабильных атомов, составляло  $\delta I/\Delta I_0 = 0.002$  (или 0.2%). При этом относительное поглощение линии  $\lambda = 1083$  nm, характеризующее концентрацию  $2^2S_1$ -атомов гелия, равно величине  $\Delta I_0/I_0 = 0.35$  (где  $I_0$  — интенсивность детектирующего света в отсутствие метастабильных атомов гелия). Величина отношения  $(1/2) \cdot (\delta I/\Delta I_0)$  может служить оценкой степени спиновой поляризации ансамбля  $2^3S_1$ -атомов He, обусловленной столкновительными процессами в Na–He плазме при оптической ориентации в ней атомов натрия. Следует отметить, что возможность определения величины  $\delta I/\Delta I_0$  в данном эксперименте является одним из достоинств использованной схемы регистрации в сравнении ранее применявшейся в работах [2–6].

Сигналы изменения поглощения  $\delta I$  наблюдались в диапазоне температур  $t$  от 80 до 140°C. Зависимость  $\delta I$  от температуры приведена на рис. 3. Увеличение амплитуды сигналов с ростом температуры обусловлено ростом концентрации атомов натрия, являющихся источником спиновой поляризации метастабильных атомов He. Замедление скорости роста амплитуды  $\delta I$  при температуре выше 120°C можно объяснить уменьшением степени поляризации атомов натрия вследствие увеличения оптической плотности паров металла, приводящего к уменьшению эффективной скорости накачки атомов натрия в объеме камеры поглощения.

Следует отметить, что данная схема эксперимента позволяет определить спектральную ширину лазерного излучения на линиях резонансного дублета натрия с аппаратной шириной, равной спектральной ширине атомарной линии поглощения атомов Na. Действительно, учитывая, что спектральная ширина линии поглощения атомов натрия в условиях эксперимента много меньше ширины линии излучения лазера, по ширине наблюдаемых сигналов (рис. 2) можно определить спектральную ширину лазерного излучения. В данном случае она составляет  $\approx 0.007$  nm. Такая методика представляет интерес, поскольку наблюдаемый сигнал инициируется поглощением атомами натрия лазерного излучения, что определяет аппаратную ширину при измерении спектральной ширины лазерной линии и в то же время регистрация осуществляется светом "малозумящей" гелиевой лампы на линии  $\lambda = 1083$  nm, расположенной далеко от дублета натрия. Это особенно важно, когда лазерный луч характеризуется достаточно большими "шумами" интенсивности, обусловленными и как самим лазером, так и используемыми в экспериментальной установке оптическими элементами. В данной схеме исследуемое лазерное излучение не влияет непосредственно на фототок приемника.

Таким образом, в настоящей работе наблюдалось возникновение циркулярного дихроизма ансамбля триплетных метастабильных атомов гелия, возбуждаемых в Na–He газоразрядной плазме, при оптической ориентации атомов натрия циркулярно поляризованным лазерным излучением; определены условия наблюдения и величина циркулярного дихроизма, индуцированного атомными столкновениями в плазме; предложена методика определения спектральной ширины лазерного излучения, используемого в качестве света накачки при оптической ориентации атомов натрия.

## Список литературы

- [1] Happer W. // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44. P. 169–249.
- [2] Keiser G.M., Robinson H.G., Jonson C.E. // Phys. Lett. 1975. Vol. 51A. P. 5.
- [3] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // Письма ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 7. С. 305–309.
- [4] Дмитриев С.П., Житников Р.А., Окуневич А.И. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. Вып. 1. С. 69–75.
- [5] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 287–292.
- [6] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 12. С. 2315–2322.