

02;04;07;12

## Поляризационный оптогальванический эффект в натрий-гелиевой газоразрядной плазме

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sergei.dmitriev@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 8 августа 2000 г.)

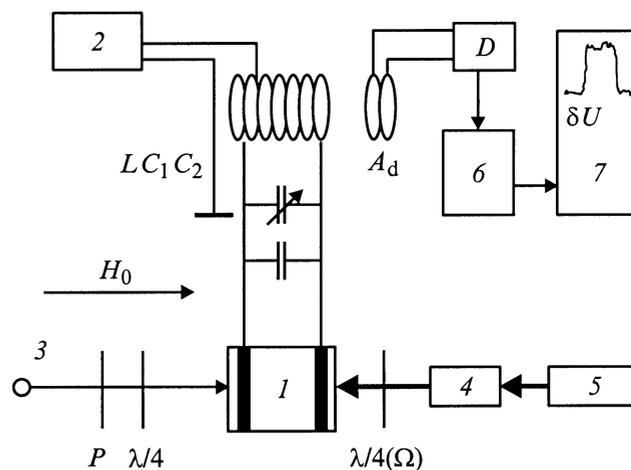
Описывается эксперимент по наблюдению эффекта изменения электропроводности Na–He газоразрядной плазмы, одновременно облучаемой поляризационно-модулированным лазерным излучением, возбуждающим резонансные переходы атомов Na, и циркулярно-поляризованным светом гелиевой лампы.

В недавних работах [1–3] сообщалось об экспериментах по лазерной оптической ориентации атомов натрия в газовом разряде, возбуждаемом в смеси пары натрия–гелий. Так, в работе [1] была осуществлена спиновая поляризация  $2^3S_1$ -метастабильных атомов гелия в Na–He газоразрядной плазме при оптической ориентации в ней  $3^2S_{1/2}$ -атомов натрия лазерным излучением. Регистрация этой поляризации осуществлялась по изменению поглощения света гелиевой лампы при магнитном резонансе в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He. В [2,3] была разработана и испытана методика, позволяющая осуществлять регистрацию спиновой ориентации атомов гелия по изменению поглощения резонансного гелиевого света без применения техники магнитного резонанса. Речь шла о наблюдении эффекта возникновения циркулярного дихроизма ансамбля триплетных метастабильных атомов гелия в Na–He плазме при накачке в ней атомов натрия поляризационно-модулированным лазерным излучением.

В настоящей работе продолжены исследования по изучению влияния лазерного излучения, возбуждающего резонансные переходы атомов натрия, на физические процессы в Na–He плазме. Целью настоящей работы является наблюдение и исследование оптогальванического эффекта [4] в Na–He плазме при одновременном воздействии на нее поляризационно-модулированного лазерного излучения, резонансно возбуждающего атомы натрия, и циркулярно-поляризованного света гелиевой лампы. Известно [5,6], что взаимная спиновая ориентация метастабильных атомов гелия и атомов щелочного металла влияет на вероятность процесса пеннинговской ионизации при столкновении этих атомов в плазме. Поэтому разрушение или изменение ориентации с помощью магнитного резонанса приводит к изменению электропроводности щелочно-гелиевой плазмы, что и было обнаружено экспериментально в работах [5,7]. В данной работе для наблюдения влияния спиновой ориентации на процессы ионизации в плазме используется методика, предложенная в [2] и основанная на модуляции поляризации лазерного излучения. Следует отметить, что, поскольку наблюдаемым сигналом в этой работе является изменение электропроводности плазмы, существенно меньшее влияние имеют амплитудные шу-

мы лазерного света, создававшие значительные помехи при оптическом детектировании спиновой поляризации атомов в предыдущих экспериментах.

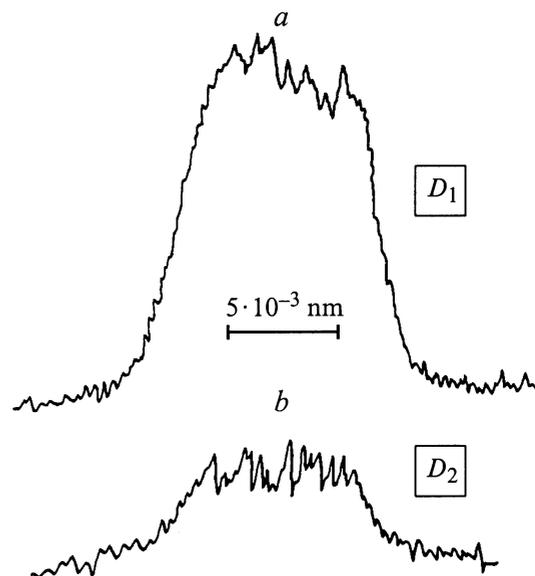
На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Газоразрядная камера (стеклянный цилиндр, диаметр 5 см, длина 6 см), содержащая гелий (0.5–1 Torr) и металлический натрий, помещалась в магнитное поле  $H_0 \sim 10$  Oe, создаваемое парой катушек Гельмгольца. Необходимое давление паров натрия обеспечивалось нагревом газоразрядной камеры в термостате ( $\sim 140^\circ\text{C}$ ). В газоразрядной камере с помощью внешних электродов возбуждался высокочастотный ( $\sim 45$  MHz, напряжение на электродах 20–100 V) разряда. Высокочастотный контур, обеспечивающий возбуждение разряда, включал в себя индуктивность  $L$ , переменную емкость  $C_1$  и емкость  $C_2$ , образованную электродами и находящейся между ними газоразрядной камерой. Рядом с катушкой  $L$  размещалась антенна  $A_D$  с диодным детектором  $D$ , с



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — газоразрядная камера, 2 — ВЧ генератор, 3 — гелиевая лампа, 4 — перестраиваемый лазер на красителе, 5 — аргоновый лазер, 6 — усилитель и синхронный детектор, 7 — самописец,  $P$  — поляризатор,  $\lambda/4$  — четвертьволновая пластинка,  $\lambda/4(\Omega)$  — вращающаяся слюда,  $A_d$  — антенна детектора,  $D$  — ВЧ детектор,  $LC_1C_2$  — ВЧ контур.

помощью которого регистрировалась амплитуда ВЧ напряжения на антенне  $A_D$ . Изменение электропроводности плазмы приводило к изменению напряжения на ВЧ контуре, включающем в себя газоразрядную камеру и соответственно амплитуды ВЧ поля, излучаемого контуром. Это изменение амплитуды излучаемого поля проявлялось в изменении напряжения на контуре антенны  $A_D$  и регистрировалось детектором  $D$ . При этом увеличение электропроводности разряда приводило к падению напряжения на электродах поджига разряда и соответственно к уменьшению ВЧ напряжения на антенне  $U$ . Вдоль поля  $H_0$  на газоразрядную камеру направлялся циркулярно-поляризованный луч от резонансной гелиевой лампы, осуществлявший оптическую ориентацию триплетных метастабильных атомов гелия. Навстречу лучу света гелиевой лампы газоразрядная камера облучалась светом перестраиваемого непрерывного лазера на красителе родамин-6G, изготовленного в лаборатории. В качестве лазера накачки использовался аргоновый лазер ЛПР-404а. Мощность аргонового лазера составляла  $\sim 4$  W. Максимальная мощность излучения перестраиваемого лазера была  $\sim 50$  mW при спектральной ширине  $\sim 0.01$  nm. Длина волны лазерного излучения изменялась в спектральной области, соответствующей резонансному дублету атомов натрия. Луч лазера проходил через четвертьволновую пластину, ориентация которой определяла знак циркулярной поляризации лазерного излучения ( $\sigma^\pm$ ). Механическое вращение четвертьволновой пластинки в плоскости, перпендикулярной лучу, с частотой  $\Omega/2\pi \sim 10$  Hz приводило к периодическому (с частотой  $2\Omega$ ) изменению знака циркулярной поляризации ( $\sigma^+ \leftrightarrow \sigma^-$ ) лазерного излучения. Сигнал оптогальванического детектирования  $\delta U$  регистрировался в виде изменения с частотой  $2\Omega$  амплитуды высокочастотного напряжения на антенне при настройке длины волны лазерного света на каждую из линий резонансного дублета атомов натрия ( $\lambda = 589.6$  nm ( $D_1$ ) и  $\lambda = 589.0$  nm ( $D_2$ )). Для увеличения отношения сигнал/шум в работе применялось узкополосное усиление и синхронное детектирование (на частоте  $2\Omega$ ) с последующей записью сигнала  $\delta U$  на двухкоординатном самописце.

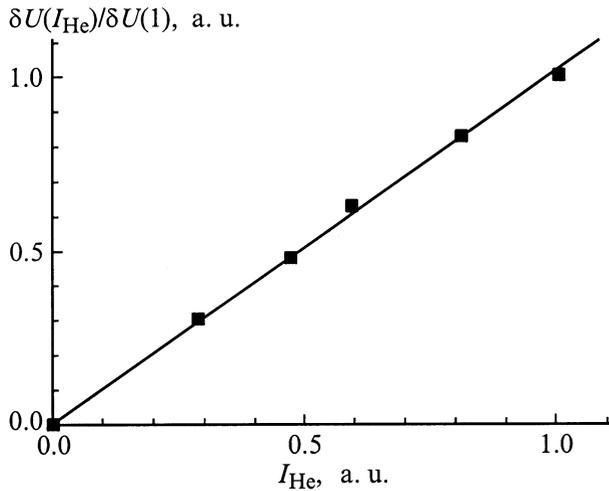
Суть эксперимента состояла в следующем. Циркулярно-поляризованным светом гелиевой лампы производилась оптическая ориентация метастабильных атомов гелия, возбужденных в разряде. Одновременно газоразрядная плазма облучалась лазерным светом со знакопеременной циркулярной поляризацией. Наблюдалось изменение электропроводности плазмы с частотой изменения знака поляризации лазерного излучения при сканировании его длины волны через область резонансного поглощения атомов натрия. Наблюдаемые сигналы  $\delta U$  приведены на рис. 2. Сигналы  $\delta U$  регистрировались при температуре порядка 120–140°C. Максимальная амплитуда сигнала  $\delta U \sim 100$   $\mu$ V ( $t^0 = 140^\circ$ C) наблюдалась при напряжении на электродах  $\sim 25$  V вблизи порога самостоятельного горения разряда, при этом ВЧ



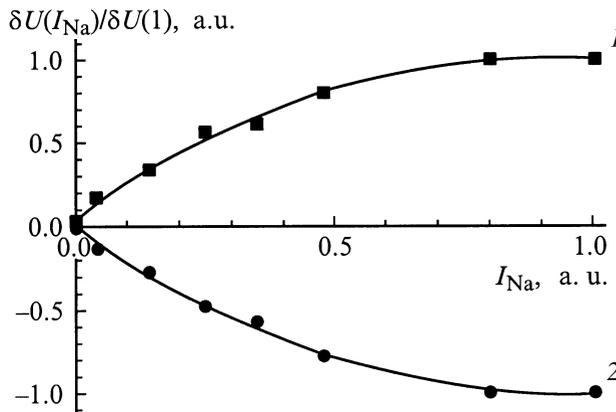
**Рис. 2.** Сигналы изменения электропроводности Na-He плазмы при сканировании длины волны перестраиваемого лазера ( $t^0 = 135^\circ$ C) в районе  $\lambda = 589.6$  nm ( $D_1$ ) (a) и 589 nm ( $D_2$ ) (b).

напряжение на антенне  $U \sim 4$  V, т.е. относительное изменение ВЧ напряжения  $\delta U/U \sim 2.5 \cdot 10^{-5}$ . Увеличение наблюдаемых сигналов  $\delta U$  с приближением к порогу горения разряда связано с уменьшением влияния процессов релаксации спиновой ориентации атомов натрия и метастабильных атомов гелия, обусловленными столкновениями с электронами разряда. Кроме того, в этих условиях, возможно, реализуется оптимальный механизм формирования оптогальванического сигнала  $\delta U$  [4]. Принудительное возбуждение (или тушение) разряда вблизи порога горения приводило к уменьшению (или увеличению) детектируемого напряжения на антенне ( $U$ ) на величину  $\Delta U \sim 0.5$  V, т.е. относительное изменение ВЧ напряжения  $\Delta U/U \sim 0.1$ . Считая величину  $\Delta U/U$  грубой оценкой относительного вклада проводимости плазмы в общий импеданс газоразрядного промежутка, можно оценить относительный вклад исследуемого в работе влияния взаимной спиновой ориентации атомов Na и He на электропроводность плазмы  $\delta U/\Delta U \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ . Точный расчет импеданса газоразрядного промежутка и его изменения при оптической ориентации атомов в газоразрядной плазме является сложной задачей и в настоящей работе не рассматривается.

Изменение знака циркулярной поляризации гелиевого света приводило к изменению полярности сигнала  $\delta U$ . Амплитуда сигналов линейно зависела от интенсивности гелиевого света, т.е. определялась степенью спиновой ориентации триплетных метастабильных атомов гелия. Зависимость  $\delta U$  от интенсивности и знака циркулярной поляризации гелиевого света представлена на рис. 3. Максимум амплитуды сигналов соответствовал максимальной интенсивности света гелиевой лампы.



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды оптогальванического сигнала  $\delta U$  от интенсивности света гелиевой лампы при лазерной накачке атомов натрия (с настройкой на  $D_1$ -линию атомов Na).  $\delta U(I) = 100 \mu\text{V}$  при максимальной интенсивности света гелиевой лампы.

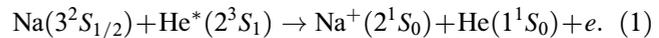


**Рис. 4.** Зависимость амплитуды оптогальванического сигнала  $\delta U$  от интенсивности лазерного излучения (настройка на  $D_1$ -линию атомов Na) при накачке атомов гелия светом  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -поляризации (соответственно 1 и 2).  $\delta U(I) = 100 \mu\text{V}$  при мощности лазерного излучения 50 mW.

Зависимость наблюдаемых в эксперименте сигналов от интенсивности лазерного излучения, осуществляющего накачку атомов натрия, была существенно иной. При малых интенсивностях наблюдался линейный рост амплитуды сигнала. С увеличением интенсивности света при мощности лазерного излучения  $\geq 10 \text{ mW}$  наблюдался явно выраженный эффект насыщения. Кривые 1 и 2 на рис. 4, соответствующие этой зависимости и записанные при противоположных знаках циркулярной поляризации гелиевого света, были симметричны относительно оси  $\delta U = 0$ . В отсутствие гелиевого света и амплитуде шума, соответствующей  $\delta U \sim 5 \mu\text{V}$ , изменения электропроводности под действием лазерного излучения, как

правило, не наблюдалось.<sup>1</sup> Сигналы  $\delta U$  при накачке  $D_1$ - или  $D_2$ -линиями атомов натрия имели одинаковую полярность. Изменение ВЧ напряжения ( $\delta U$ ) при настройке на  $D_1$ -линию были в 4–5 раз больше, чем при настройке на  $D_2$ -линию. Других существенных отличий в поведении сигналов  $\delta U (D_1)$  и  $\delta U (D_2)$  обнаружено не было.

Таким образом, результаты работы, представленные на рис. 2–4, свидетельствуют о том, что поляризационный оптогальванический эффект в Na–He газоразрядной плазме, содержащей оптически ориентированные  $2^3S_1$ -метастабильные атомы He, при облучении ее циркулярно-поляризованным лазерным излучением, соответствующим  $D_1$ - и  $D_2$ -переходам атомов Na, связан с величиной и взаимной ориентацией спиновых моментов ансамблей атомов гелия и щелочного металла. Такая связь может быть объяснена [5–7] зависимостью вероятности процесса пеннинговской ионизации от взаимной ориентации спиновых моментов сталкивающихся атомов



При одинаковой ориентации спиновых моментов сталкивающихся атомов реакции пеннинговской ионизации (1) запрещена законом сохранения полного спина и его проекции. Изменение ориентации одного из партнеров относительно ориентации другого (здесь изменение с частотой  $2\Omega$  ориентации атомов натрия либо изменение знака поляризации гелиевого света) на противоположную снимают этот запрет, что увеличивает выход свободных электронов в плазму газового разряда и проявляется в эксперименте как изменение на частоте  $2\Omega$  электропроводности газоразрядной плазмы.

Линейный ход зависимости амплитуды сигналов  $\delta U$  от интенсивности как гелиевого света  $I_{\text{He}}$  (рис. 3), так и лазерного излучения  $I_{\text{Na}}$  при малых мощностях лазера (рис. 4) объясняется линейной зависимостью степени ориентации атомов гелия и натрия от интенсивности соответствующего света накачки. При повышенной мощности лазерного излучения наблюдается нелинейный характер зависимости сигнала  $\delta U (I_{\text{Na}})$ . Это объясняется оптическим насыщением степени ориентации атомов щелочного металла [8], обусловленным конкуренцией процессов оптической ориентации и оптической релаксации. Что касается различия амплитуд сигналов  $\delta U (D_1)$  и  $\delta U (D_2)$  (см., например, рис. 2), то это обусловлено разной эффективностью процесса оптической

<sup>1</sup> В отдельных экспериментальных сериях при настройке на  $D_1$ -линию удавалось обнаружить слабые (с соотношением сигнал/шум 1.5–2) сигналы  $\delta U$  и в отсутствие света гелиевой лампы. Возможно, они связаны с дополнительной небольшой (в сравнении с оптической ориентацией светом гелиевой лампы) ориентацией атомов гелия в результате спин-зависимых процессов, протекающих при их столкновениях с ориентированными атомами натрия или поляризованными электронами либо обусловлены другими оптогальваническими эффектами, например фотовозбуждением атомов Na. Эти сигналы требуют отдельного исследования с обеспечением существенно лучшего отношения сигнал/шум и при анализе наблюдаемых в данной работе эффектов могут быть выведены за рамки обсуждения экспериментальных результатов.

ориентации атомов натрия для переходов  $3^2S_{1/2}-3^2P_{1/2}$  и  $3^2S_{1/2}-3^2P_{3/2}$  [8].

Итак, в работе обнаружен и исследован поляризационный оптогальванический эффект в натрий-гелиевой плазме, одновременно облучаемой резонансным для атомов Na лазерным излучением со знакопеременной циркулярной поляризацией и циркулярно-поляризованным светом гелиевой лампы. Показано, что этот эффект обусловлен зависимостью вероятности процесса пеннинговской ионизации при столкновениях оптически поляризованных атомов гелия и натрия от взаимной ориентации их спиновых моментов. Экспериментально эта зависимость проявлялась в виде изменения электропроводности газоразрядной плазмы с удвоенной частотой модуляции поляризации лазерного излучения при его настройке на линии резонансного дублета атомов натрия.

## Список литературы

- [1] *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Житников Р.А.* и др. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. Вып. 3. С. 385–388.
- [2] *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Житников Р.А.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 65. Вып. 5. С. 385–387.
- [3] *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Житников Р.А.* и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 16–18.
- [4] *Очкин В.Н., Преображенский Н.Г., Шапарев Н.Я.* Оптогальванический эффект в ионизованных газах. М.: Наука, 1991.
- [5] *Дмитриев С.П., Житников Р.А., Окуневич А.И.* // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. Вып. 1. С. 69–75.
- [6] *Окуневич А.И.* // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. Вып. 4. С. 899–907.
- [7] *Дмитриев С.П.* // Опт. и спектр. 2000. Т. 88. № 5. С. 664–666.
- [8] *Happer W.* // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44. P. 169–249.