

Обнаружение изменения электропроводности натрий-гелиевой плазмы при ее взаимодействии с поляризационно-модулированным лазерным излучением, настроенным на D_1 -линию натрия

С. П. Дмитриев, Н. А. Доватор¹⁾, Р. А. Житников, В. А. Картошкин

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

Поступила в редакцию 13 апреля 2001 г.

Описывается эксперимент по наблюдению изменения электропроводности натрий-гелиевой плазмы при ее взаимодействии с лазерным излучением со знакопеременной поляризацией, настроенным на $3^2S_{1/2} - 3^2P_{1/2}$ переход атомов натрия. Показано, что обнаруженный эффект является результатом протекающих в плазме газов разряда процессов пеннинговской ионизации, спинового обмена и оптической ориентации атомов.

PACS: 52.20.Nv

Исследование влияния оптической ориентации атомов на электропроводность газоразрядной плазмы относится к одному из важных направлений оптогальванической (ОГ) спектроскопии [1]. Одним из наиболее интересных объектов для исследований в этом направлении является щелочно-гелиевая плазма. Так в работах [2, 3] было обнаружено, что одновременная оптическая ориентация атомов щелочного металла (Rb, Na) и триплетных метастабильных атомов гелия светом двух (гелиевой и щелочной) резонансных ламп приводит к изменению электропроводности щелочно-гелиевой плазмы. Было показано, что наблюдаемый поляризационный оптогальванический (ПОГ) эффект обусловлен зависимостью вероятности процесса пеннинговской ионизации от взаимной ориентации спиновых моментов взаимодействующих атомов щелочного металла и гелия. При проведении контрольных экспериментов в этих работах особо отмечалось исчезновение ПОГ эффекта при выключении гелиевой лампы, осуществлявшей оптическую ориентацию 2^3S_1 атомов He.

В настоящей работе обнаружен ПОГ эффект, возникающий в щелочно-гелиевой (Na-He) плазме при лазерной оптической ориентации в ней только атомов щелочного металла. ПОГ эффект объясняется многоступенчатым механизмом воздействия оптической ориентации атомов натрия на электропроводность щелочно-гелиевой плазмы, включающим в себя ряд одновременно протекающих упругих и неупругих спин-зависимых процессов.

Экспериментальная установка схематично изображена на рис.1. Рабочая камера, содержащая пары

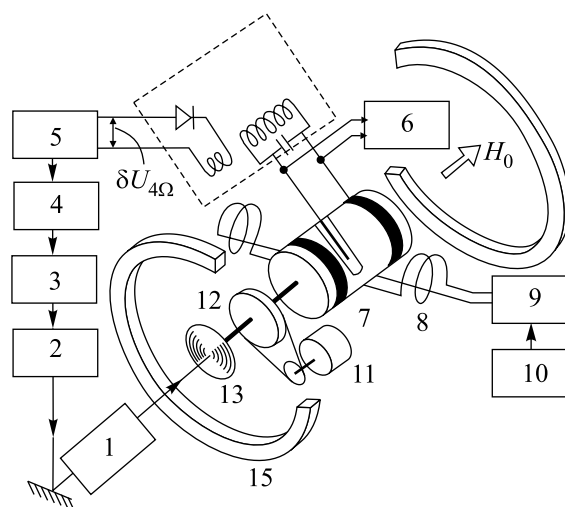


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – перестраиваемый лазер на красителе, 2 – аргоновый лазер накачки, 3 – самописец, 4 – амплитудный детектор, 5 – узкополосный усилитель, 6 – ВЧ генератор разряда, 7 – рабочая камера, 8 – РЧ катушка, 9 – РЧ генератор, 10 – частотомер, 11 – электромотор, 12 – четверть-волновая пластинка, 13 – расширитель светового пучка до диаметра 6 мм, 14 – блок регистрации вариаций напряжения ВЧ разряда, обусловленных изменением электропроводности плазмы, 15 – кольца Гельмгольца

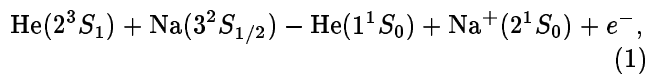
натрия (при $T = 418$ К) и газ гелий при давлении 0.5–1 торр, помещалась в центре колец Гельмгольца, с помощью которых создавалось постоянное магнитное поле $H_0 = 5$ Э. В камере возбуждался высокочастотный (ВЧ) разряд с помощью ВЧ генератора, работающего на частоте 45 МГц. Газоразрядная камера облучалась светом перестраиваемого лазера на кра-

¹⁾e-mail: nicolai.dovator.@pop.ioffe.rssi.ru

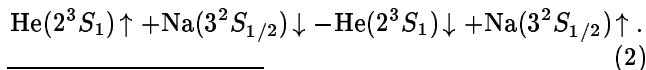
сителе родамин-6G ($P_{\max} \sim 50$ мВт) с применением в качестве источника накачки аргонового лазера с выходной мощностью 4 Вт. Луч света перестраиваемого лазера распространялся вдоль направления постоянного магнитного поля H_0 . Линейно поляризованное излучение лазера прежде, чем попасть в рабочую камеру, пропускалось через четверть-волновую пластинку, вращающуюся с помощью механического привода с частотой $\Omega/2\pi = 10$ Гц. Такое вращение определяло четырехкратное за один оборот пластинки появление циркулярной ($\sigma^+ \rightarrow \sigma^- \rightarrow \sigma^+ \rightarrow \sigma^-$) поляризации лазерного излучения. Экспериментально было установлено, что при настройке лазера на длину волны $\lambda = 589.6$ нм (D_1 -линия натрия) возникает периодическое с частотой 4Ω изменение электропроводности щелочно-гелиевой плазмы ($\delta U_{4\Omega} \sim 10$ мкВ на выходе блока 14). Сигнал $\delta U_{4\Omega}$ усиливался узкополосным усилителем и после амплитудного детектирования регистрировался двухкоординатным самописцем. На рис.2а представлен пример записи сигнала ПОГ эффекта, полученного при сканировании длины волны лазерного излучения в районе D_1 -линии резонансного дублета натрия. При аналогичном сканировании длины волны лазерного излучения вблизи D_2 -линии натрия ($\lambda = 589$ нм) сигнал ПОГ эффекта обнаружить не удалось.

Возникновение сигнала изменения электропроводности щелочно-гелиевой плазмы ($\delta U_{4\Omega}$) при воздействии на нее поляризационно-модулированным лазерным излучением можно объяснить следующим образом. Циркулярно-поляризованное лазерное излучение (четыре раза за период вращения четверть-волновой пластинки) создает знакопеременную ориентацию атомов натрия, которые, сталкиваясь с метастабильными атомами гелия, существующими в разряде, производят их поляризацию. Основными процессами, ответственными за передачу ориентации от атомов натрия к атомам гелия, являются следующие реакции²⁾:

пеннинговские столкновения



и спиновый обмен (см. [2–5],



²⁾ Следует отметить, что электроны газоразрядной плазмы в результате спин-обменных столкновений с атомами натрия, а также в результате реакции (1) оказываются спин-ориентированными и, сталкиваясь, в свою очередь, с метастабильными атомами гелия, осуществляют их ориентацию, то есть являются дополнительным механизмом переноса поляризации от атомов Na к атомам He.

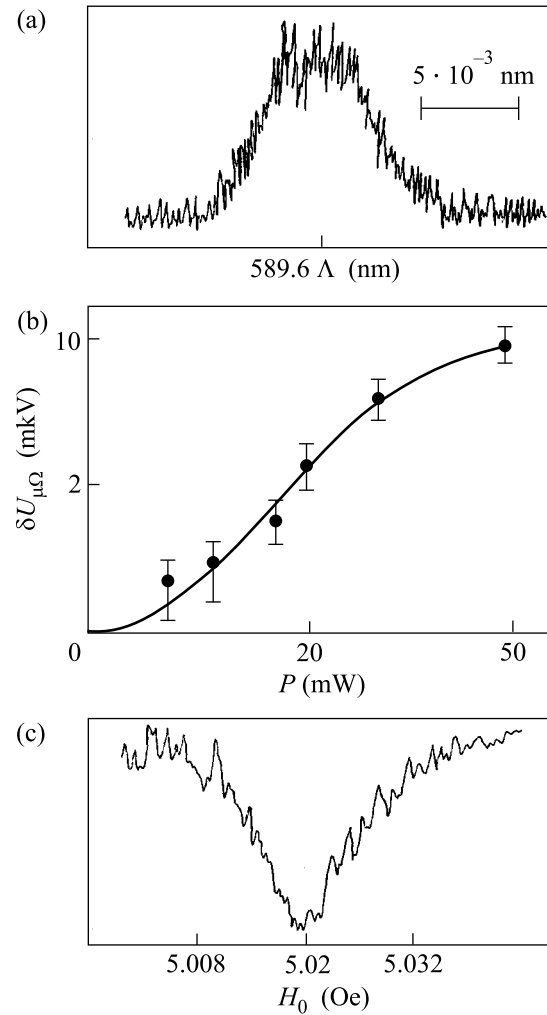
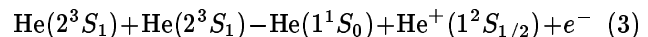


Рис.2. Результаты экспериментов: (а) зависимость амплитуды сигнала ПОГ эффекта от длины волны лазерного излучения; (б) зависимость амплитуды сигнала ПОГ эффекта (при настройке на D_1 -линию натрия) от интенсивности лазерного излучения; (с) зависимость амплитуды сигнала ПОГ эффекта (при настройке на D_1 -линию натрия) от напряженности постоянного магнитного поля при фиксированной частоте РЧ магнитного поля

В результате таких процессов создается знакопеременная ориентация 2^3S_1 -атомов гелия, изменяющаяся синхронно с ориентацией атомов натрия. Далее, при следующих за этапом поляризации 2^3S_1 -атомов He пеннинговских столкновениях метастабильных атомов He друг с другом следует реакция



и с атомами Na (вновь реакция (1)) происходит периодическое изменение констант скорости реакций (1), (3). Это связано с тем, что в соответствии с законом сохранения полного спина для начальных и

конечных продуктов реакций (3) и (1) при столкновениях атомов, спины которых ориентированы в одном направлении (причем, все равно в каком – вдоль или против направления поля H_0 , что в нашем эксперименте связано с положением слюдяной пластинки, определяющей знак циркулярной поляризации), выход электронов запрещен и наоборот, когда атомы не ориентированы (это соответствует положению четверть-волновой пластинки, которое не изменяет линейную поляризацию лазерного излучения, попадающего в камеру), реакции (3) и (1) разрешены и выход электронов в плазме увеличивается. Макроскопически это проявляется в увеличении электропроводности плазмы. В результате всех упомянутых выше процессов электропроводность плазмы должна изменяться с частотой 4Ω , что и было зарегистрировано экспериментально.

Для подтверждения такой гипотезы происхождения сигнала ПОГ эффекта достаточно разрушить каким-либо образом поляризацию 2^3S_1 -атомов гелия, при этом сигнал должен исчезнуть. В качестве такого разрушающего механизма мы использовали резонансное разночастотное (РЧ) магнитное поле, насыщающее переходы между подуровнями 2^3S_1 -состояния атомов гелия. На рис.2с представлена экспериментальная зависимость амплитуды сигнала ПОГ эффекта (лазер был настроен на D_1 -линию натрия) при сканировании постоянного магнитного поля H_0 в районе 5 Э при фиксированной частоте (14.6 МГц) РЧ магнитного поля, создаваемого РЧ генератором, подключенным к катушке, ось которой была перпендикулярна оси колец Гельмгольца. Как видно из рисунка, при точном резонансе наблюдается уменьшение (практически до уровня шумов регистрирующего тракта) сигнала ПОГ эффекта, что является прямым подтверждением наших предположений о происхождении наблюдаемого сигнала. Дополнительным подтверждением такого происхождения сигнала ПОГ эффекта является нелинейная зависимость его амплитуды от интенсивности лазера на красителе при малых значениях его выходной мощности P (см. рис.2b). Дело в том, что в нашем случае сигнал ПОГ эффекта формируется в два этапа: сначала ориентация гелия за счет столкновений с атомами натрия, а затем столкновения ориентированных гелиевых атомов друг с другом и с атомами натрия. В результате должна наблюдаться квадратичная зависимость ам-

плитуды сигнала изменения электронной плотности от интенсивности лазера в области малых значений P (далеко до насыщающих значений [7]). Этим же можно объяснить и отсутствие сигнала ПОГ эффекта при настройке лазера на D_2 -линию натрия. Как показано в работе [8], сигнал ориентации гелия за счет столкновений с атомами натрия приблизительно в три раза меньше при настройке на D_2 -линию, чем при настройке на D_1 -линию. С учетом упомянутой выше квадратичной зависимости сигнал $\delta U_{4\Omega}(D_2)$ должен, практически на порядок, быть меньше, чем сигнал $\delta U_{4\Omega}(D_1)$, то есть меньше уровня шума ~ 1.5 мкВ, что и имело место в нашем эксперименте.

Таким образом, в настоящей работе обнаружен сигнал изменения электропроводности щелочно-гелиевой плазмы при воздействии на нее поляризованного лазерного излучения, создающего спиновую ориентацию $3^2S_{1/2}$ -атомов натрия. Показано, что данный эффект обусловлен многоступенчатым механизмом, включающим в себя оптическую ориентацию атомов натрия лазерным излучением, поляризацию метастабильных атомов гелия в результате столкновений с оптически ориентированными атомами натрия и спин-зависимый процесс пеннинговской ионизации, протекающий при взаимодействии атомов натрия и триплетных метастабильных атомов гелия. Последний, в конечном счете, и приводит к наблюдаемому в работе ПОГ эффекту.

-
1. В. Н. Очкин, Н. Г. Преображенский, Н. Я. Шаров, *Оптогальванический эффект в ионизованном газе*, М.: Наука, 1991.
 2. С. П. Дмитриев, Р. А. Житников, А. И. Окуневич, *ЖЭТФ* **70**, 69 (1976).
 3. С. П. Дмитриев, *Оптика и спектроскопия* **88**, 664 (2000).
 4. G. M. Keiser, H. G. Robinson, and C. E. Jonson, *Phys. Lett.* **51**, 5 (1975).
 5. Е. В. Блинов, Б. И. Гинзбург, В. А. Житников и др., *ЖТФ* **54**, 2315 (1984).
 6. С. П. Дмитриев, Д. Э. Денисов, *ЖТФ* **67**, 131 (1997).
 7. R. J. Knize, Z. Wu, and W. Happer, *Adv. in At. and Mol. Physics* **24**, 223 (1988).
 8. С. П. Дмитриев, Н. А. Доватор, Р. А. Житников и др., *ЖТФ* **70**, 16 (2000).