

02;04;07

## Спиновая поляризация $2^3S_1$ -атомов гелия в Na–He газоразрядной плазме при оптической ориентации атомов натрия

© С.П. Дмитриев, Д.Э. Денисов

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

(Поступило в Редакцию 3 июня 1996 г.)

Осуществлена поляризация  $2^3S_1$ -атомов гелия посредством столкновительных процессов с участием оптически ориентированных атомов натрия в Na–He газоразрядной плазме и исследованы условия наблюдения сигнала магнитного резонанса, возбуждаемого в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He.

Исследования атомных столкновений с участием спин-поляризованных частиц в условиях щелочно-гелиевой газоразрядной плазмы представляют интерес как для физики спин-зависимых процессов, протекающих при атомных столкновениях, так и для прикладных задач квантовой магнитометрии. В работах [1,2] экспериментально продемонстрирована и исследована зависимость вероятности пеннинговской ионизации при столкновении атомов щелочного металла и метастабильных атомов гелия от взаимной ориентации электронных спиновых моментов партнеров; обнаружено влияние спиновой ориентации атомов в условиях щелочно-гелиевой плазмы на ее электропроводность. Особый интерес представляют исследования процессов передачи спиновой ориентации от оптически ориентированных атомов щелочного металла к продуктам щелочно-гелиевой плазмы:  $2^3S_1$ -метастабильным атомам гелия и свободным электронам [3,4]. Возможность ориентации спиновых моментов  $2^3S_1$ -атомов гелия в отсутствие прямой оптической накачки резонансным гелиевым светом позволяет устранить большие световые сдвиги частоты магнитного резонанса, возбуждаемого в системе зеемановских подуровней  $2^3S_1$ -состояния атомов He, что является существенным при решении задач квантовой магнитометрии. В работах [5,6] был предложен новый тип квантовых приборов — гелиевый магнитометр с оптической ориентацией атомов щелочного металла — щелочно-гелиевый магнитометр. В настоящее время поляризация  $2^3S_1$ -атомов гелия посредством передачи спиновой ориентации от оптически ориентированных атомов щелочного металла и реализация приборов осуществлены в условиях Cs–He, Rb–He, K–He газоразрядной плазмы [5,7,8]. Высокая точность и малая ориентационная зависимость показаний делают их одним из наиболее перспективных приборов для измерения геомагнитного поля и его вариаций.

В настоящей работе осуществлена поляризация  $2^3S_1$ -атомов гелия посредством столкновительных процессов с участием оптически ориентированных атомов натрия в Na–He газоразрядной плазме и исследованы условия наблюдения сигнала магнитного резонанса, возбуждаемого в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Метастабильные атомы гелия возбуждались в Na–He

плазме высокочастотного импульсного разряда. Частота следования импульсов 1–10 кГц, длительность импульсов 1–10 мкс, частота заполнения 45 МГц. Разряд возбуждался в стеклянной цилиндрической камере (длина 50 мм, диаметр 50 мм) с внутренним остеклованным электродом. (ВЧ напряжение на электроде  $\approx 100$  В). Камера содержала металлический натрий и газ  $^4\text{He}$  при давлении 1 Тор. Камера помещалась в стеклянный термостат, обеспечивающий ее нагрев до  $150^\circ\text{C}$ , что позволяло достичь плотности Na пара, соответствующей концентрации атомов  $\approx 10^{11}\text{см}^{-3}$ . Термостат с камерой помещался в многослойный магнитный экран, внутри которого с помощью колец Гельмгольца создавалось поле  $H_0 = 20\text{--}50$  мЭ, направленное вдоль оси экрана. Оптическая ориентация атомов Na осуществлялась циркулярно поляризованным светом резонансной натриевой лампы ( $D_1$ - и  $D_2$ -спектральные линии атомов Na), распространявшимся вдоль направления поля  $H_0$ . Для

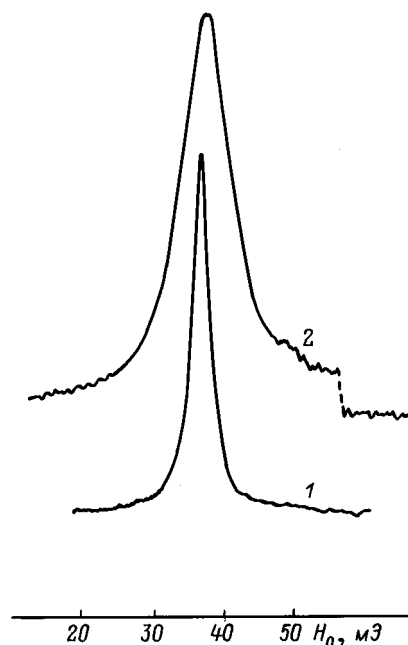
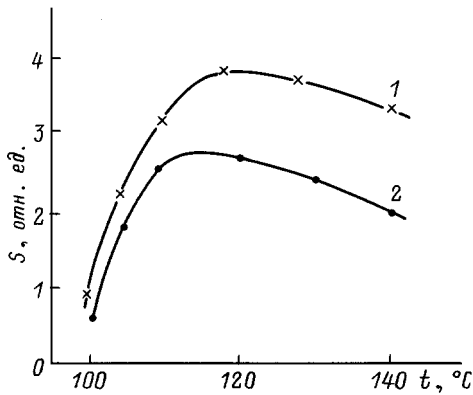


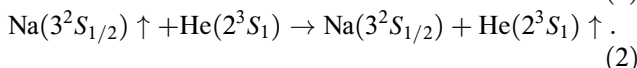
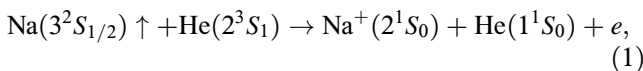
Рис. 1. Сигналы магнитного резонанса, возбуждаемого в  $3^2S_{1/2}$ -состоянии атомов Na (1) и в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He (2):  $\omega/2\pi = 25$  (1), 100 кГц (2)



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды сигналов  $S_{\text{Na}}$  (1) и  $S_{\text{He}}$  (2), наблюдаемых при оптической ориентации атомов Na в Na–He газоразрядной плазме ( $f_{\text{след}} = 2$  кГц,  $\tau_{\text{имп}} = 3$  мкс), от температуры камеры.

возбуждения магнитного резонанса в системах зеемановских подуровней  $3^2S_{1/2}$ -основного состояния атомов Na и  $2^3S_1$ -метастабильного состояния атомов He перпендикулярно полю  $H_0$  прикладывалось радиочастотное магнитное поле  $H_1 = A \sin \Omega t \sin \omega t$ , модулированное по амплитуде (частота модуляции  $\Omega = 70$  Гц, частота радиополя  $\omega = \gamma_A H_0$ , где  $\gamma_A$  — гиромагнитное отношение, соответственно  $\gamma_{\text{Na}} \approx 0.7$  МГц/Э и  $\gamma_{\text{He}} \approx 2.8$  МГц/Э). Магнитный резонанс (как для  $3^2S_{1/2}$ -атомов Na, так и для  $2^3S_1$ -атомов He) регистрировался по изменению интенсивности циркулярно поляризованного света натриевой лампы накачки, пришедшего через камеру. Для регистрации использовались кремниевый фотоприемник, узкополосный усилитель, синхронный детектор и двухкоординатный самописец. Для уменьшения шумов в оптическом тракте перед фотоприемником помещался широкополосный стеклянный фильтр, отсекающий спектральные линии, лежащие далеко от области натриевого дублета.

В результате оптической ориентации атомов Na и столкновений их с  $2^3S_1$ -метастабильными атомами He последние оказываются спин-поляризованными. Важнейшими механизмами передачи ориентации являются спин-зависимая пеннинговская ионизация атомов Na (1) и спин-обменные столкновения (2)

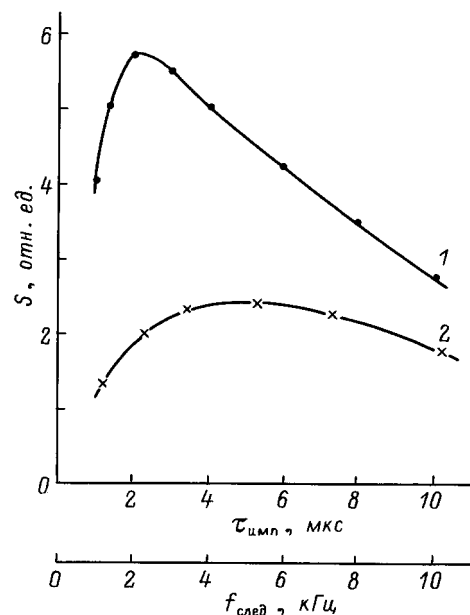


В реакции (1) спиновая поляризация  $2^3S_1$ -атомов He возникает вследствие удаления из ансамбля  $2^3S_1$ -атомов тех из них, для которых пеннинговская ионизация разрешена законом сохранения полного спинового момента [1,5]. Существенный вклад в поляризацию  $2^3S_1$ -атомов гелия могут дать столкновения этих атомов с электронами, поляризованными в процессе спинового обмена с оптически ориентированными атомами натрия [3,8].

Дезориентация  $2^3S_1$ -атомов He с помощью магнитного резонанса, возбуждаемого в системе зеемановских подуровней метастабильных атомов He приводит к изменению равновесной поляризации ансамбля спин-поляризованных частиц плазмы, в том числе атомов натрия, что может быть зарегистрировано по изменению поглощения циркулярно поляризованного света накачки резонансной Na лампы.

На рис. 1 представлены сигналы магнитного резонанса, возбуждаемого в  $3^2S_{1/2}$ -состоянии атомов Na ( $S_{\text{Na}}$ ) и в  $2^3S_1$ -состоянии атомов He ( $S_{\text{He}}$ ). Ширина сигналов обусловлена главным образом неоднородностью поля  $H_0$  и составляет  $\approx 1$  (Na) и  $\approx 4$  кГц (He), что соответствует отношению величин  $\gamma_{\text{Na}}$  и  $\gamma_{\text{He}}$ . Максимальная величина сигнала  $S_{\text{He}}$ , определенная как амплитуда первой гармоники (частота  $\Omega$ ) на нагрузке фотодиода 50 кОм, составляла  $\approx 1$  мВ при отношении сигнал/шум  $\approx 50$  (в полосе 1 Гц). Величина сигналов  $S_{\text{Na}}$  была примерно в 30 раз больше величины  $S_{\text{He}}$ .

В работе исследовалась зависимость величин наблюдаемых сигналов  $S_{\text{Na}}$  и  $S_{\text{He}}$  от температуры и параметров импульсного разряда (рис. 2). Для данной камеры оптимальные условия наблюдения  $S_{\text{Na}}$  и  $S_{\text{He}}$  примерно совпадают и находятся в области 110–130°C. Рост величин  $S_{\text{Na}}$  и  $S_{\text{He}}$  с температурой обусловлен увеличением концентрации оптически ориентируемых атомов Na. Уменьшение величин  $S_{\text{Na}}$  и  $S_{\text{He}}$  при температурах выше  $\approx 120^\circ\text{C}$  обусловлено уменьшением степени поляризации атомов Na и уменьшением интенсивности детектирующего света вследствие увеличения оптической плотности Na пара в камере. При температуре  $\approx 120^\circ\text{C}$  исследовалась зависимость амплитуды гелиевого



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды гелиевого сигнала от параметров импульсного разряда: 1 — зависимость  $S_{\text{He}}$  от частоты следования ВЧ импульсов ( $\tau_{\text{имп}} = 3$  мкс), 2 — зависимость  $S_{\text{He}}$  от длительности импульсов ( $f_{\text{след}} = 2$  кГц). Температура камеры  $\approx 120^\circ\text{C}$ .

евого сигнала от параметров импульсного разряда (от частоты следования импульсов  $f_{\text{след}}$  в диапазоне 1–10 кГц и длительности импульсов  $\tau_{\text{имп}}$  в диапазоне 1–10 мкс). Типичные кривые приведены на рис. 3. Максимальные по величине сигналы  $S_{\text{He}}$  наблюдались при длительности импульсов 3–7 мкс и частоте следования 2–3 кГц. Существенного влияния температуры и параметров импульсного разряда на ширину сигналов  $S_{\text{He}}$  в наших условиях не наблюдалось, что обусловлено большой неоднородной шириной сигналов и недостаточным для точных измерений отношением сигнал/шум.

Для определения влияния температуры, параметров импульсного разряда, давления гелия в камере на ширину сигналов  $S_{\text{He}}$  необходимы дополнительные исследования. Кроме того, существенного увеличения амплитуды сигналов  $S_{\text{He}}$  следует ожидать при заполнении камер гелием до давления 5–10 Тор (см., например, [8]). Однако в этом случае влияние столкновительного перемешивания в возбужденных состояниях атомов щелочного металла приводит к необходимости фильтрации  $D_1$ - и  $D_2$ -линий в спектре накачки [9]. При работе с K, Rb, Cs это легко осуществить, используя интерференционные фильтры.  $D_1$ - и  $D_2$ -линии дублета натрия расположены близко ( $\lambda(D_1) = 589.0$  нм,  $\lambda(D_2) = 589.6$  нм), разделить их обычными фильтрами без существенной потери интенсивности света нельзя. Представляется перспективным использование для оптической ориентации атомов натрия перестраиваемого лазера на красителе, позволяющего проводить эксперименты с отдельными  $D_1$ - и  $D_2$ -линиями большой интенсивности.

Таким образом, в работе осуществлена спиновая поляризация метастабильных  $2^3S_1$ -атомов гелия в Na–He газоразрядной плазме при оптической ориентации атомов натрия, определены оптимальные для амплитуды сигналов температура и параметры импульсного разряда.

## Список литературы

- [1] Дмитриев С.П., Житников Р.А., Окуневич А.И. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. С. 69–75.
- [2] Dmitriev S.P., Zhitnikov R.A., Okunevich A.I. // Abstr. XX Congress AMPERE. Tallin, 1978. P. 418.
- [3] Keiser G.M., Robinson H.G., Jonson C.E. // Phys. Lett. 1975. Vol. 51A. P. 5.
- [4] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 305–309.
- [5] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 3. С. 588–596.
- [6] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // А.С. № 578630. БИ. 1977. № 40.
- [7] Блинов Е.В., Гинзбург Б.И., Житников Р.А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 287–292.
- [8] Блинов Е.В., Гинзбург Б.И., Житников Р.А., Кулешов П.П. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 12. С. 2315–2322.
- [9] Elbel M., Naumann F. // Z. Phys. 1967. Vol. 204. P. 501–513.