

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 ≈ 100 В). Камера содержала металлический натрий и газ ^4He при давлении 1 Тор. Камера помещалась в стеклянный термостат, обеспечивающий ее нагрев до 150°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 (D₁- и D₂-спектральные линии атомов Na), распространявшимся вдоль направления поля H_0 . Для

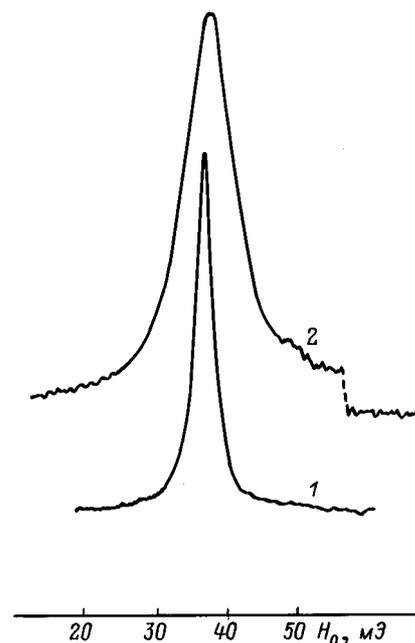


Рис. 1. Сигналы магнитного резонанса, возбуждаемого в $3^2S_{1/2}$ -состоянии атомов Na (1) и в 2^3S_1 -состоянии атомов He (2): $\omega/2\pi = 25$ (1), 100 кГц (2)

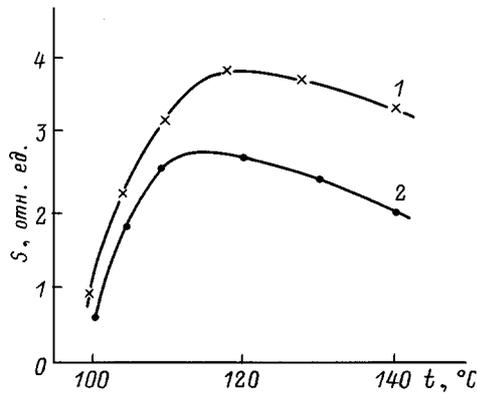
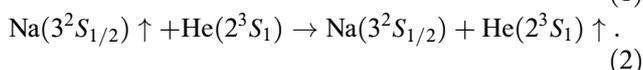
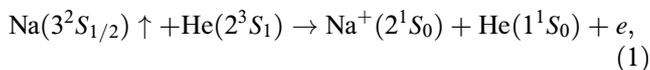


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов S_{Na} (1) и S_{He} (2), наблюдаемых при оптической ориентации атомов Na в Na–He газоразрядной плазме ($f_{след} = 2$ кГц, $\tau_{имп.} = 3$ мкс), от температуры камеры.

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 γ_A — гиромагнитное отношение, соответственно $\gamma_{Na} \approx 0.7$ МГц/Э и $\gamma_{He} \approx 2.8$ 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_{Na}) и в 2^3S_1 -состоянии атомов He (S_{He}). Ширина сигналов обусловлена главным образом неоднородностью поля H_0 и составляет ≈ 1 (Na) и ≈ 4 кГц (He), что соответствует отношению величин γ_{Na} и γ_{He} . Максимальная величина сигнала S_{He} , определенная как амплитуда первой гармоники (частота Ω) на нагрузке фотодиода 50 кОм, составляла ≈ 1 мВ при отношении сигнал/шум ≈ 50 (в полосе 1 Гц). Величина сигналов S_{Na} была примерно в 30 раз больше величины S_{He} .

В работе исследовалась зависимость величин наблюдаемых сигналов S_{Na} и S_{He} от температуры и параметров импульсного разряда (рис. 2). Для данной камеры оптимальные условия наблюдения S_{Na} и S_{He} примерно совпадают и находятся в области 110–130°C. Рост величин S_{Na} и S_{He} с температурой обусловлен увеличением концентрации оптически ориентируемых атомов Na. Уменьшение величин S_{Na} и S_{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

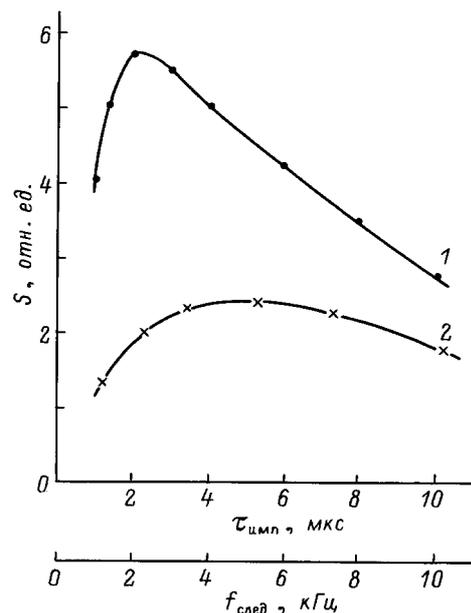


Рис. 3. Зависимость амплитуды гелиевого сигнала от параметров импульсного разряда: 1 — зависимость S_{He} от частоты следования ВЧ импульсов ($\tau_{имп.} = 3$ мкс), 2 — зависимость S_{Na} от длительности импульсов ($f_{след} = 2$ кГц). Температура камеры $\approx 120^\circ\text{C}$.

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_{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_{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_{He} необходимы дополнительные исследования. Кроме того, существенного увеличения амплитуды сигналов S_{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.