

УДК 533.9.082.5+681.785.585

ТЕРМОМЕТРИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКИ КАЛИБРАТОРА ОПТИЧЕСКИХ ДЛИН ВОЛН

А. К. Чернышов^{1,2}, П. А. Михеев^{1,2}

С помощью диодно-лазерной спектроскопии измерены температура и давление в отпаянной Ar ячейке калибратора оптических длин волн. Значения термодинамических параметров позволили оценить флуктуации сдвига линии аргона 811.5 нм. Ожидаемая амплитуда флуктуаций оказалась меньше чем ± 15 МГц. Полученный результат свидетельствует о применимости исследованного калибратора в качестве оптического репера и корректности ранее проведенных измерений коэффициента столкновительного сдвига 811.5 нм линии аргона.

Ключевые слова: аргон, ВЧ-разряды низкого давления, калибраторы спектра, столкновительный сдвиг спектральной линии, термометрия, диодно-лазерная спектроскопия.

Излучение инертных газов, содержащее интенсивные хорошо разрешаемые спектральные линии в видимом и ближнем ИК участках спектра, традиционно используется для калибровки спектральных приборов и при исследовании сдвигов спектральных линий. Источник подобного калибровочного излучения может быть изготовлен в лаборатории на основе отпаянной ячейки с инертным газом и возбуждающего ВЧ генератора на одном транзисторе [1, 2]. Однако простые возбуждающие генераторы не обеспечивают стабильности выходной ВЧ мощности, что приводит к неконтролируемым изменениям термодинамических параметров газа в ячейке. В связи с этим подобные самодельные калибраторы нуждаются в оценке влияния флуктуаций ВЧ мощности на положение реперных линий в излучаемом оптическом спектре.

Следует также отметить, что исследования, направленные на создание мощных лазеров на атомах инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ), актуализировали необходимость уточнения значений коэффициентов уширения и сдвига давлением спектральных линий Ar, Kr и Xe [3–5]. В частности, важной является линия аргона 811.5 нм,

¹ Самарский филиал ФИАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221.

² Самарский национальный исследовательский университет, 443086 Россия, Самара, Московское шоссе, 34; e-mail: chak@fian.smr.ru.

соответствующая $1s_5-2p_9$ переходу (обозначения Пашена), поскольку она используется для оптической накачки ЛОНИГ.

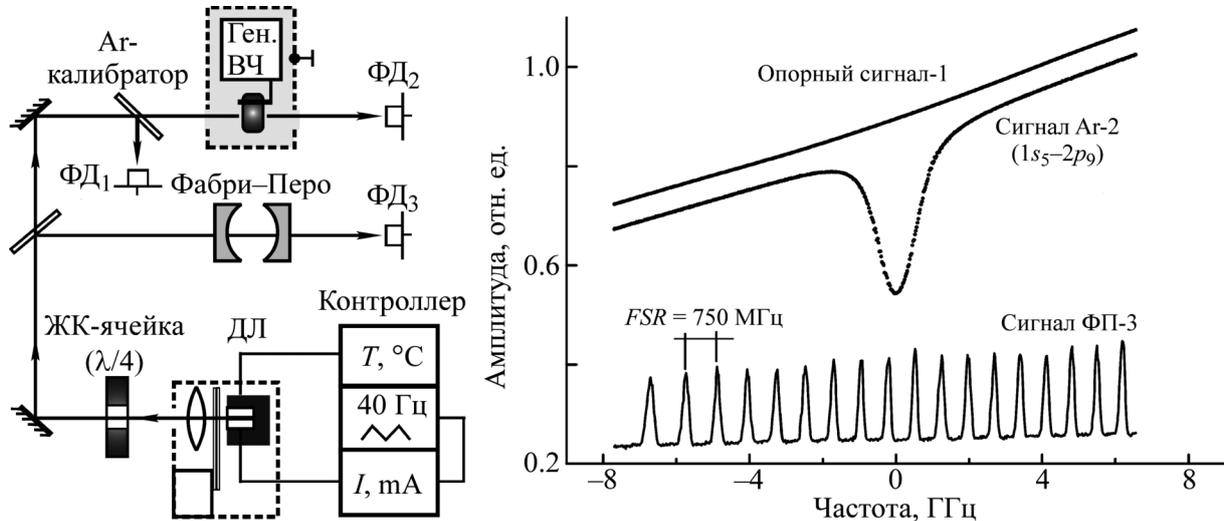


Рис. 1: Слева – схема экспериментальной установки: ДЛ – диодный лазер с дополнительным отражателем из двух тонких покровных стёкол; ЖК – жидкокристаллическая ячейка, работающая в режиме пластинки $\lambda/4$; ЖК – жидкокристаллическая ячейка, работающая в режиме пластинки $\lambda/4$; ФД – фотодиоды. Оптический калибратор (на верху схемы) использовался как поглощающая аргоновая ячейка. Справа – примеры сигналов, регистрируемых фотодиодами ФД₁–ФД₃, соответственно.

В работе определены величина и стабильность сдвига линии 811.5 нм Ag в спектре оптического калибратора, изготовленного в лаборатории на основе стартера люминесцентной лампы [2]. Сдвиг спектральной линии и амплитуда его флуктуаций оценивалась косвенно по температуре и давлению газа. Для термометрии в отпаянной ячейке оптического калибратора использовалась диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия. Воспроизводимые вариации ВЧ мощности, поступающей в разряд, были смоделированы через контролируемые изменения мощности питания возбуждающего генератора.

Схема использованной экспериментальной установки показана на рис. 1 (слева). Источник зондирующего излучения представляет собой диодный лазер (ДЛ) типа L808P030 (Thorlabs), снабженный коротким внешним резонатором оригинальной конфигурации [6]. Сдвоенный контроллер ИТС4001 (Thorlabs) использован для питания лазера и стабилизации его температуры. Управляющий сигнал треугольной формы от внешнего генератора АКПП-3408/2 частотой 40 Гц поступал на вход контроллера тока для получения непрерывной перестройки лазерной частоты в пределах 36 ГГц.

Жидкокристаллическая ячейка (ЖК) работала в режиме четвертьволновой пластинки и использовалась в качестве простейшего поляризационного изолятора [7]. Система контроля спектра лазерного излучения состояла из волоконного спектрометра AvaSpec-3648 (Avantes) (не показан на рис. 1) и конфокального интерферометра ($F \approx 200$, $FSR = 750$ ГГц). Настройка ДЛ на необходимую длину волны в диапазоне 3 нм около 810 нм выполнялась за счет изменения температуры от 20 до 40 °С. Средняя мощность оптического излучения диодного лазера в выходном коллимированном пучке составляла 5 мВт.

Исследуемый оптический калибратор показан в верхней части схемы на рис. 1 (слева). В калибраторе был использован пусковой стартер (S2 220/240V, 4-22W, Philips) от бытовой люминесцентной лампы в качестве отпаянной газоразрядной ячейки [2]. Стеклоячейка стартера фиксировалась на стойке с помощью внешнего кольцевого электрода шириной ~ 10 мм. Этот электрод был подключен к “горячему” концу контурной катушки возбуждающего 50 МГц генератора. Вторым возбуждающим электродом был заземленный металлический корпус калибратора. Лазерный пучок проходил через боковую стенку стеклянной ячейки перпендикулярно к ее оси и попадал на фотодиод ФД₂ рис. 1 (слева).

На рис. 1 (справа) представлены формы сигналов, наблюдаемых в эксперименте. Опорный сигнал 1, который регистрируется ФД₁, отражает изменения лазерной мощности на входе аргоновой ячейки. В частности, наклон опорного сигнала (базовой линии) вызван линейным изменением тока ДЛ при сканировании оптической частоты излучения. Сигнал 2, записанный с помощью ФД₂ на выходе из газоразрядной ячейки калибратора, содержит информацию о величине поглощения в аргоне. Поступающий от фотодиода ФД₃ сигнал 3 представляет резонансы пропускания контрольного интерферометра Фабри–Перо. По интервалу между резонансными пиками сигнала 3 был определен частотный масштаб вдоль горизонтальной оси.

С помощью 16 битовой платы сбора данных (National Instruments) выполнена оцифровка и запись сигналов 1–3 в память компьютера. Дальнейшая обработка предполагала деление сигнала 1 на сигнал 2 с последующим взятием логарифма от частного и нормировкой результата логарифмирования на максимальное значение. В результате был получен нормализованный контур линии поглощения аргона с горизонтальной базовой линией, рис. 2 (слева). Нормализованный контур поглощения имел фойгтовский профиль, поэтому метод “опорных точек” был использован для выделения доплеровского и лоренцевского вкладов в уширение линии [8]. В этом методе у исследуемого

контура произвольно задаются два уровня (уровни 0.8 и 0.1 на рис. 2 слева), на которых измеряются соответствующие полные ширины ($\Delta\nu_{0.8}$; $\Delta\nu_{0.1}$), а затем вычисляется их отношение a_1 . Подробно описанные в [8] несложные вычисления позволяют по трем параметрам исследуемого контура ($\Delta\nu_{0.8}$; $\Delta\nu_{0.1}$; a_1) определить доплеровский (WD) и лоренцевский (WL) вклады в уширение исследуемого контура линии.

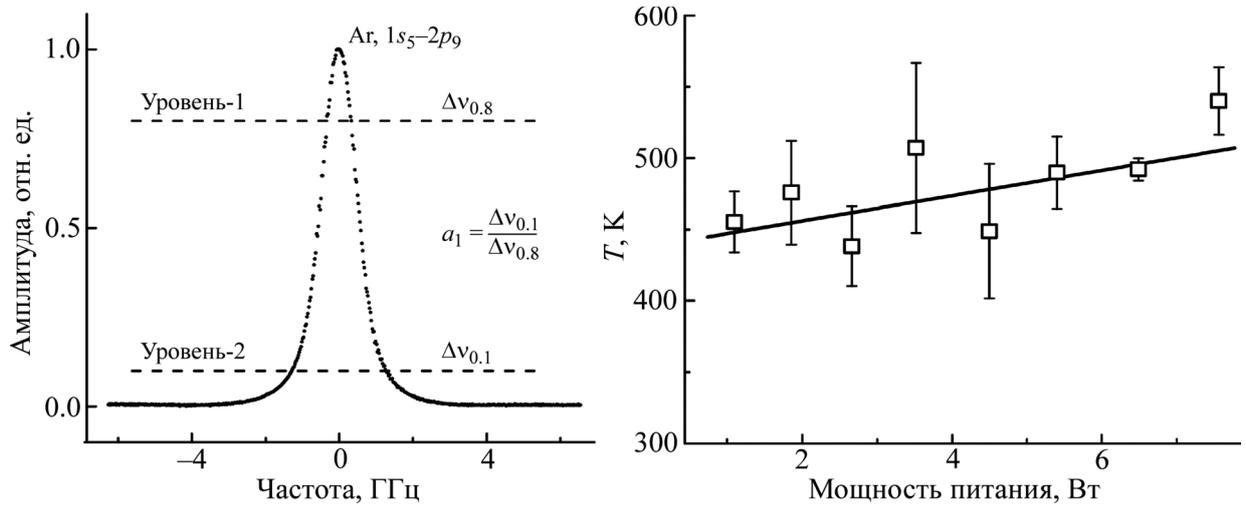


Рис. 2: Слева – нормализованный контур линии поглощения аргона. Пунктиром показаны уровни, на которых измерялись полные ширины $\Delta\nu_{0.8}$ и $\Delta\nu_{0.1}$ для определения доплеровского и лоренцевского вкладов в уширение. Справа – температура газа $T(K)$ в ячейке калибратора как функция постоянной мощности питания ВЧ генератора.

Температура газа T в ячейке калибратора была определена по величине доплеровского уширения WD с помощью формулы

$$T(K) = \left(\frac{\lambda_0(\text{nm})}{214.7} \times WD(\text{GHz}) \right)^2 \cdot M_r, \tag{1}$$

где M_r – масса атома Ag в а.е.м., λ_0 – центральная длина волны спектральной линии. Рассчитанная зависимость температуры газа от мощности питания ВЧ генератора показана на рис. 2 (справа). Видно, что температура в разряде больше комнатной температуры (300 K) и линейно возрастает от 450 до 500 °С, что согласуется с нашими предыдущими результатами [5]. Давление аргона P в ячейке калибратора рассчитано по температуре T и величине лоренцевского уширения WL, используя выражение

$$P(\text{Torr}) = \frac{10^{16}}{2\xi(T_0) \times 3.22} \left(\frac{T(K)}{300} \right)^{0.7} WL(\text{GHz}), \tag{2}$$

где $\xi(T_0) = (2.4 \pm 0.5) \times 10^{-10}$ Гц·см³ – коэффициент столкновительного уширения для 811.5 нм линии в аргоне [4, 5]. Полученные значения для давления газа P в отпаянной ячейке построены на рис. 3 (слева) в зависимости от постоянной мощности питания генератора возбуждения. Видно, что среднее значение давления в пределах ошибки измерений равно 25 Торр, а его флуктуации при увеличении мощности питания генератора находятся в пределах $\Delta P = \pm 2$ Торр. Оценка изменения давления при нагревании газа от 450 до 500 °С в отпаянной ячейке с начальным давлением 23 Торр дает похожую величину $\Delta P = 2.5$ Торр. Наоборот, при охлаждении газа до 300 К (при выключении разряда) давление в ячейке с 25 Торр должно уменьшиться до 15 Торр, что согласуется со смещением на 10 Торр точки пересечения графика с горизонтальной осью на рис. 4 в работе [5] и типовыми значениями давлений в индикаторных газоразрядных лампах.

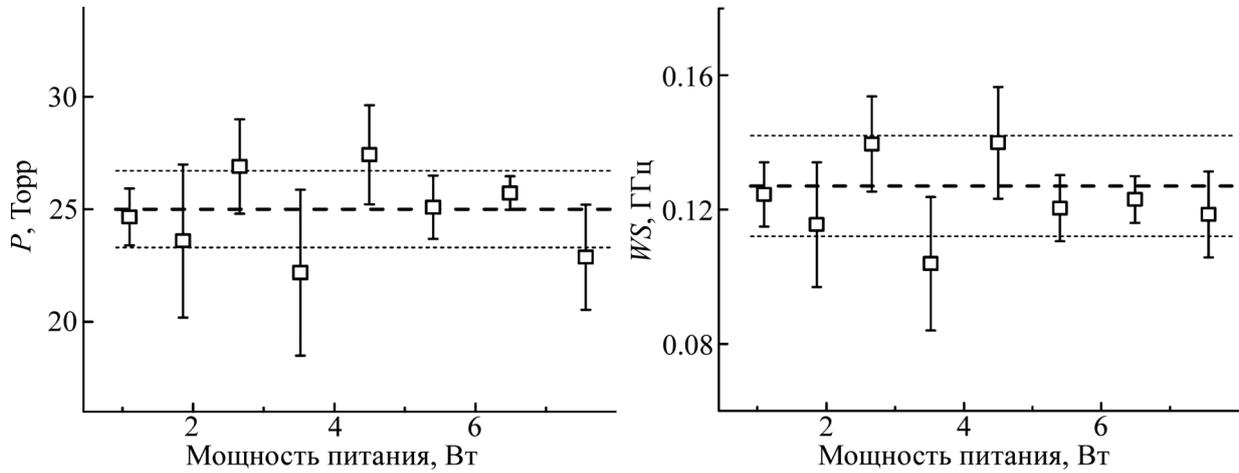


Рис. 3: Слева – давление газа P в ячейке калибратора в зависимости от мощности питания ВЧ генератора. В пределах полосы ± 2 Торр давление постоянно и равно 25 Торр. Справа – сдвиг $WS(T_0)$ линии аргона 811.5 нм при различных мощностях питания возбуждающего генератора. Флуктуации величины $WS(T_0)$ находятся в пределах полосы ± 15 МГц, центрированной на 0.127 ГГц.

После определения значений термодинамических параметров газа в отпаянной ячейке соответствующий сдвиг $WS(T_0)$ исследуемой линии был вычислен по формуле

$$WS(T_0) = 3.22 \times 10^{16} \cdot \gamma(T_0) \cdot \left(\frac{300}{T(K)} \right)^{0.7} \cdot P, \quad (3)$$

где $\gamma(T_0) = (2.1 \pm 0.1) \times 10^{-10}$ Гц·см³ – приведенный к 300 К коэффициент столкновительного сдвига линии 811.5 нм в аргоне [5]. Зависимость рассчитанных значений

сдвига $WS(T_0)$ от величины мощности питания генератора возбуждения показана на рис. 3 (справа). Видно, что при увеличении мощности питания генератора примерно в 8 раз флуктуации ΔWS находятся в пределах полосы ± 15 МГц, центрированной на 0.127 ГГц. По сравнению с доплеровской шириной исследованной линии аргона (~ 900 МГц при 500 К) амплитуда паразитных флуктуаций сдвига примерно в 60 раз меньше. Кроме того, в реальности мощность питания возбуждающего генератора изменяется только на 10–20%, и амплитуда флуктуаций, вероятно, будет еще меньше. Эти оценки подтверждают правомочность пренебрежения флуктуациями частоты оптического репера в [5] при измерении коэффициента столкновительного сдвига линии 811.5 нм в чистом аргоне.

Таким образом, в работе спектроскопическим способом были измерены температура и давление газа в отпаянной разрядной ячейке. Значения термодинамических параметров позволили определить величину и стабильность сдвига линии Ag и тем самым оценить применимость калибратора [2] в качестве репера оптических частот.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания по проекту 3.1715.2017/4.6.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] F. Moron, A. L. Hoendervanger, M. Bonneau, et al., *Review of Scientific Instruments* **83**(4), 044705 (2012).
- [2] А. К. Чернышов, *Приборы и техника эксперимента* **61**(1), 141 (2018).
- [3] B. Eshel, Ch. A. Rice, and G. P. Perram, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **179**, 40 (2016).
- [4] P. A. Mikheyev, A. K. Chernyshov, N. I. Ufimtsev, et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **164**, 1 (2015).
- [5] A. K. Chernyshov, P. A. Mikheyev, N. N. Lunev, and V. N. Azyazov, *Journal of Physics: Conf. Series* **999**, 012010 (2018).
- [6] А. К. Чернышов, П. А. Михеев, Н. Н. Лунев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **45**(3), 28 (2018).
- [7] А. К. Чернышов, С. П. Котова, *Приборы и техника эксперимента* **49**(1), 100 (2006).
- [8] Н. Н. Наумова, В. Н. Хохлов, *Оптический журнал* **73**(8), 23 (2006).

По материалам международной конференции “Физика и химия горения” (International Conference Combustion Physics and Chemistry), Самара, 2018.

Поступила в редакцию 19 сентября 2018 г.