

## Экспериментальное исследование спектра флуоресценции атомов цезия в присутствии буферного газа

© В.Г. Давыдов, В.Н. Кулясов

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,  
199053 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: val@davydov.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 11.08.2017 г.

Выполнен прямой эксперимент по определению квантовой эффективности флуоресцентного цезиевого фильтра. Произведена запись спектров флуоресценции атомов цезия при возбуждении верхних состояний второго резонансного дублета излучением цезиевой лампы Бела–Блюма. Наблюдалось появление дополнительных фотонов флуоресценции при добавлении в кюветы с цезием различных инертных газов. Установлено, что флуоресцентный фильтр на парах атомов цезия с добавлением в рабочую ячейку гелия является рекордсменом по квантовой эффективности и быстрдействию среди всех известных флуоресцентных фильтров на парах атомов щелочных металлов.

DOI: 10.21883/OS.2018.01.45352.179-17

### Введение

Принцип работы флуоресцентных фильтров состоит в том, что сигнальное излучение на частоте резонансного атомного перехода, пройдя через входной широкополосный светофильтр, поглощается атомами рабочего вещества. Далее происходят спонтанные переходы через промежуточные уровни на более низкий возбужденный атомный уровень, флуоресценция с которого несет информацию исходного сигнального излучения. Излучение флуоресценции регистрируется через выходной широкополосный фильтр, полоса пропускания которого смещена в длинноволновую область по отношению к полосе входного фильтра. Если полосы пропускания входного и выходного фильтров не перекрываются, то широкополосное фоновое излучение практически не создает помех в канале регистрации.

В работе [1] впервые было проведено исследование основных параметров флуоресцентных фильтров на парах атомов щелочных металлов без буферного газа. В дальнейшем были выполнены работы [2,3] по исследованию флуоресцентных фильтров на парах атомов цезия в присутствии благородных буферных газов. В этом случае наряду с фотонами главного дублета ( $\lambda = 852.1$  и  $894.4$  nm) наблюдаются дополнительные фотоны флуоресценции с  $\lambda = 876.1$ ,  $917.2$  и  $920.9$  nm (рис. 1). Они обусловлены переходом возбужденных атомов из состояний  $7^2P_{1/2,3/2}^0$  в состояния  $6^2D_{3/2,5/2}$  при столкновениях с атомами буферного газа и последующим их спонтанным распадом в состояния  $6^2P_{1/2,3/2}^0$ , из которых происходит спонтанный переход в основное состояние  $6^2S_{1/2}$  с испусканием фотонов главного дублета. В результате этого каскадного процесса один поглощенный фотон сигнального излучения порождает два фотона регистрируемой фотоприемником флуоресценции. Дополнительные фотоны испускаются при спонтанном распаде на малозаселенные уровни и

не подвержены пленению излучения, приводящему к значительному уменьшению быстрдействия фильтров при регистрации флуоресценции главного резонансного дублета [4]. Целью настоящей работы было определение в прямом эксперименте зависимости количества фотонов основной и дополнительной флуоресценции от сорта буферного газа, его давления и от концентрации атомов цезия.

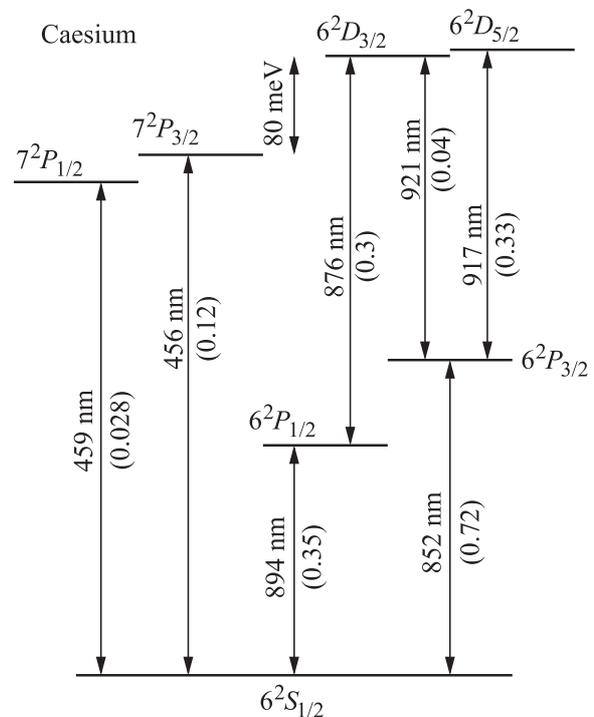


Рис. 1. Схема уровней атома цезия, играющих роль в работе флуоресцентного фильтра. Указаны длины волн соответствующих оптических переходов и их силы осциллятора (в скобках).

## Эксперимент

Флуоресценция возбуждалась в кюветах из молибденового стекла диаметром 35–38 мм и толщиной 7–9 мм с отростком с металлическим цезием как в вакууме, так и с буферными газами. Каждая кювета имела отросток диаметром 6 мм и длиной 35–50 мм, температура которого, будучи ниже температуры кюветы, определяла концентрацию атомов цезия. Возбуждение флуоресценции осуществлялось шаровой стеклянной безэлектродной лампой диаметром 12 мм с металлическим цезием, наполненной инертным газом (ксенон при давлении 0.4 кПа), помещенной в колебательный контур высокочастотного генератора с частотой около 80 МГц. Излучение лампы пропусклось через синий стеклянный фильтр СЗС-22 толщиной 5 мм и направлялось в кювету с парами атомов цезия. Излучение лампы ( $\lambda = 455.5$  и 459.3 нм) возбуждало флуоресценцию атомов цезия в кювете. Излучение флуоресценции через красный стеклянный фильтр КС-19 толщиной 5 мм направлялось на вход монохроматора МДР-3, на выходе которого регистрировалось ПЗС-линейкой, подключенной к компьютеру, что превращало монохроматор в спектрограф. Использовалась решетка 600 штрихов/мм, работающая в первом порядке дифракции. Интенсивность флуоресценции определялась отдельно для каждой спектральной линии  $\lambda = 852.1$ , 894.4 нм (главный дублет) и  $\lambda = 876.1$ , 917.1, 920.9 нм (дополнительные фотоны) путем суммирования нормированной интенсивности по всем засвеченным пикселям из соответствующего спектрального отрезка. Спектральная чувствительность монохроматора с ПЗС-линейкой калибровалась при помощи эталонного источника (лампа накаливания с известной цветовой температурой) с использованием той же самой оптической схемы (линзы, светофильтр), что и для регистрации флуоресценции. Измерения проводились для всех исследуемых кювет в рабочем диапазоне температур.

Кроме наблюдения интенсивности флуоресценции были выполнены измерения поглощения возбуждающего излучения исследуемыми кюветами в диапазоне рабочих температур раздельно для  $\lambda = 455.5$  и 459.3 нм. Чтобы не менять условия освещения кюветы для этих измерений, при регистрации проходящего света убирался красный фильтр КС-19 перед спектрографом, а решетка использовалась во втором порядке дифракции.

## Результаты

Выполнена запись спектров флуоресценции паров цезия при их концентрации  $2 \cdot 10^{12} - 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  без буферного газа и в присутствии гелия, криптона и ксенона. В кювете без буферного газа наблюдалась только флуоресценция на длинах волн главного дублета (рис. 2). Как известно, квантовая эффективность преобразования поглощенных синих квантов в инфракрасные (ИК) фотоны флуоресценции для цезиевых кювет без

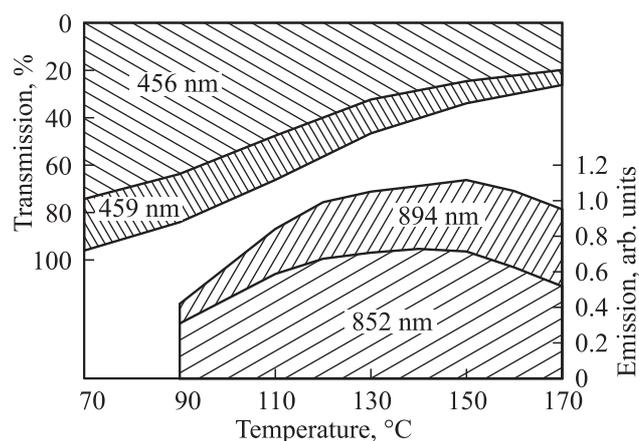


Рис. 2. Интенсивность флуоресценции (нижние кривые, правая шкала) и поглощения (верхние кривые, левая шкала) спектральных линий паров цезия в зависимости от температуры.

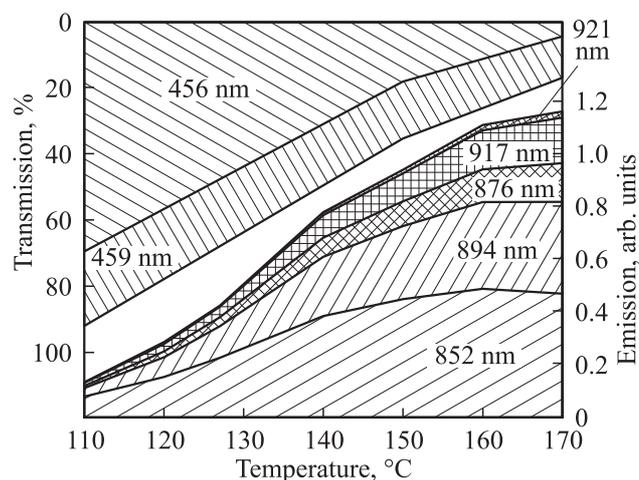


Рис. 3. Интенсивность флуоресценции (нижние кривые, правая шкала) и поглощения (верхние кривые, левая шкала) спектральных линий паров цезия при давлении гелия 33 кПа в зависимости от температуры.

буферного газа при достаточно высоких концентрациях атомов цезия ( $> 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) достигает 95% [1]. При добавлении в рабочие кюветы буферного газа в спектре флуоресценции появляются дополнительные фотоны других длин волны, и квантовая эффективность может существенно (на десятки процентов) превышать 100%. Количество дополнительных фотонов зависит от сорта и давления буферного газа и концентрации атомов цезия. Были выполнены измерения интенсивности флуоресценции для трех кювет с цезием при добавлении 33 кПа гелия, 27 кПа криптона и 27 кПа ксенона. Зависимость интенсивности линий флуоресценции и возбуждения, прошедшего через рабочую кювету с гелием, от температуры отростка с цезием представлены на рис. 3. Количество дополнительных фотонов при концентрации

**Таблица 1.** Поперечные сечения  $\sigma$  ( $10^{-16}$  см<sup>2</sup>) заселения состояния  $6^2D_{3/2}$  с возбужденных уровней  $7^2P_{1/2,3/2}^0$  атомов цезия при столкновении с атомами инертных газов при 450 К [5]

Переход	Гелий	Криптон	Ксенон
$7^2P_{1/2}^0 - 6^2D_{3/2}$	$(2.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-1}$	$\leq 3 \cdot 10^{-3}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$
$7^2P_{3/2}^0 - 6^2D_{3/2}$	$(2.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-1}$	$(2.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-2}$	$(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-1}$

**Таблица 2.** Вероятности спонтанного распада ( $A_{ki}$ ) для дополнительных фотонов флуоресценции атомов рубидия и цезия [7]

Атом	Длина волны, nm	$A_{ki}$ ( $10^{-6}$ с <sup>-1</sup> )
Рубидий	761.9	2.4
Рубидий	775.8	2.7
Рубидий	775.9	0.48
Цезий	876.1	13
Цезий	917.2	17
Цезий	920.9	3.1

атомов цезия, соответствующей максимуму суммарной интенсивности флуоресценции, составило 70, 17 и 32% соответственно от числа квантов первичной главной флуоресценции. Квантовая эффективность достигла 165, 112 и 127%. Наибольшее количество дополнительных фотонов наблюдается в цезиевых кюветах с гелием. Это согласуется с данными [5] о максимальном заселении состояния  $6^2D_{3/2}$  цезия с возбужденных состояний  $6^2P_{1/2}^0$  и  $6^2P_{3/2}^0$  при столкновении с атомами гелия по сравнению с другими исследованными инертными газами (табл. 1).

Рубидиевые флуоресцентные фильтры на разрешенных переходах (сигнальное излучение 420.2 и 421.6 nm) без буферного газа имеют характеристики, весьма близкие к характеристикам аналогичных цезиевых фильтров [6]. Однако добавление инертного газа в рабочие ячейки рубидиевых фильтров не приводит к существенному улучшению их характеристик. Известно [7], что в рубидии интервал между возбужденным состоянием  $6^2P_{3/2}^0$  и уровнем  $5^2D_{3/2}$ , спонтанное излучение с которого на уровне  $5^2P_{1/2,3/2}^0$  приводит к появлению дополнительных фотонов флуоресценции, составляет 0.24 eV. Это в три раза больше, чем интервал  $7^2P_{3/2}^0 - 6^2D_{3/2}$  в атоме цезия, которое составляет 0.08 eV. Вероятность спонтанного распада ( $A_{ki}$ ) для дополнительных фотонов в рубидии намного меньше  $A_{ki}$  дополнительных фотонов в цезии [7] (табл. 2). Эти два обстоятельства в совокупности приводят к тому, что дополнительных фотонов в рубидии с длинами волн 761.9, 775.8 и 775.9 nm образуется при добавлении в рабочую ячейку буферного газа существенно меньше, чем дополнительных фотонов в цезии ( $\lambda = 876.1, 917.2$  и  $920.9$  nm), и расчетное быстродействие рубидиевых флуоресцентных фильтров на дополнительных фотонах оказывается в пять раз меньше, чем соответствующих цезиевых.

В результате проведенных экспериментальных исследований и изучения аналитических и экспериментальных данных [2–4,6] установлено, что флуоресцентные фильтры на парах атомов цезия ( $\lambda = 455.5$  и  $459.3$  nm) с добавлением в рабочую ячейку гелия являются рекордсменами по квантовой эффективности и быстродействию среди всех известных флуоресцентных фильтров на парах атомов щелочных металлов.

Спектральное исследование было выполнено на оборудовании Ресурсного центра Нанофотоника СПбГУ.

Авторы благодарны Е.Б. Александрову, В.С. Запаскому, С.Г. Пржибельскому и В.Б. Шилову за полезные обсуждения в ходе работы.

### Список литературы

- [1] Marling J.B., Nilsen J., West L.C., Wood L.L. // J. Appl.Phys. 1979. V. 50. P. 610.
- [2] Кулясов В.Н., Шилов В.Б., Ермолаева Г.М. // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 9. С. 103.
- [3] Кулясов В.Н., Шилов В.Б., Ермолаева Г.М., Краснов В.Г. // Опт. и спектр. 2013. Т. 114. № 4. С. 569.
- [4] Кулясов В.Н., Шилов В.Б., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 11. С. 31.
- [5] Cuvellier J., Fournier P.R., Gounand F., Pascale J., Berlande J. // Phys. Rev. A. 1975. V. 11. N 3. P. 846.
- [6] Кулясов В.Н., Шилов В.Б., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 44.
- [7] Радециг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 344 с.