

ОСОБЕННОСТИ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АТОМАРНОГО НАТРИЯ В ПРОЦЕССЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КОЛЛАПСА В КАВИТАЦИОННОМ ОБЛАКЕ МЕТОДОМ ВРЕМЯ-КОРРЕЛЯЦИОННОГО СЧЕТА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ

© 2024 г. М. В. Казачек^а, Т. В. Гордейчук^{а,*}

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: tanya@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 21.02.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

Корреляционным методом измерена длительность вспышек многопузырьковой сонолюминесценции водного раствора NaCl вдоль спектрального диапазона 300–800 нм. Длительность вспышки имела максимальное значение 21 нс в области спектра, непосредственно прилегающей к пику D-линии Na (589 нм), и уменьшалась до 2 нс по мере удаления от пика линии. Полученная зависимость длительности вспышки от длины волны согласуется с динамической моделью формы линии Na, предложенной нами ранее, где спектральные ширина и сдвиг линии определяются быстрым изменением плотности излучающей среды в процессе пузырькового коллапса. Корреляционным методом определена последовательность вспышек металла и континуума и измерена относительная задержка между ними. Результаты показали, что свечение Na более длительное, чем континуума, происходило почти симметрично во времени вокруг вспышки континуума с исчезающе малой задержкой 0.21 нс после континуума. Аналогичным методом для водного раствора CeCl₃ получено, что вспышка линии церия (350 нм) происходила после континуума с задержкой 31 нс, что близко к времени жизни люминесценции Ce 33 нс, и указывает на существенное различие механизмов высвечивания Na и Ce при многопузырьковой сонолюминесценции.

Ключевые слова: ультразвуковая кавитация, сонолюминесценция, оптические спектры, длительность вспышки, время-корреляционный метод, Na, Ce

DOI: 10.31857/S0320791924040052 EDN: XFPZVA

1. ВВЕДЕНИЕ

Сонолюминесценция (СЛ) — слабое свечение жидкостей в ультразвуковом поле — многофакторное явление, связанное со способностью кавитационного пузырька концентрировать энергию звука до 12 порядков величины. СЛ проявляется в виде серии ультракоротких вспышек возбужденных состояний разного рода частиц (атомов, молекул, ионов), возникающих при почти адиабатическом коллапсе пузырьков. Длительность, фаза и последовательность высвечивания отдельных компонент СЛ важны для изучения механизмов формирования этих возбужденных состояний, которые до сих пор во многом не ясны. Есть ряд работ по длительности вспышки в режиме стабильной СЛ

одиночного пузырька, перечисленные в [1]. Однако вследствие широкого распространения ультразвуковых технологий, прикладное значение имеют многопузырьковые системы, когда коллапс отдельных пузырьков не согласован во времени и в пространстве, что делает сложным получение перечисленных выше данных. Нам известна только одна работа, в которой метод время-коррелированного счета одиночных фотонов использован для определения длительности вспышки в режиме многопузырьковой СЛ воды [2]. Разработанный нами время-корреляционный метод позволяет оценивать длительность, последовательность и временной сдвиг между фотонными импульсами отдельных компонент спектра СЛ, выделяя из общего

фотонного потока импульсы от «среднестатистического» пузырька [1, 3, 4, 5].

В данной работе мы проследили эволюцию высвечивания *D*-линии Na, ее отдельных компонент и связь фазы высвечивания металла с фазой континуума при СЛ водного раствора NaCl. Для сравнения исследованы длительность высвечивания линии Ce и ее задержка после вспышки континуума при СЛ водного раствора CeCl₃.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схема и методика эксперимента приведены подробно в [1, 3, 4]. Растворы 2–4 М NaCl (хч) и 0.1 М CeCl₃ (ч) в дистиллированной воде насыщали аргоном в термостатируемой ячейке проточного типа 1.5 часа до и в течение эксперимента. Источником ультразвука служил генератор Sonics V750, частота 20 кГц, отдаваемая мощность 20 Вт. Температуру раствора поддерживали равной $10 \pm 1^\circ\text{C}$ с помощью термостата Julabo F12. Спектры СЛ регистрировали с помощью монохроматора МДР-23 с разрешением 3 нм без коррекции на спектральную чувствительность системы «фотоумножитель+решетка», максимум блеска дифракционной решетки 500 нм. Использовали фотоумножитель ФЭУ-79, область чувствительности 300–830 нм. Длительность вспышки и задержку между вспышками различного типа измеряли счетчиком корреляций, построенным на базе двух ФЭУ-79, работающих в режиме счета фотонов, цифрового осциллографа RIGOL DS1104 и компьютера [3, 5]. Корреляционный метод хорошо подходит для измерения вспышек пузырьков в облаке, поскольку они, благодаря разбросу местоположения и размеров, вспыхивают практически независимо. Корреляционный метод дает в этом случае среднюю длительность или среднюю задержку. Длительность вспышек *W* измеряли в режиме автокорреляции, когда на два ФЭУ поступало излучение, прошедшее через один и тот же светофильтр. Величину *W* вычисляли аппроксимацией корреляционного пика гауссовой кривой как ширину на полувысоте (FWHM). В некоторых случаях для разделения пиков применяли двухгауссовую аппроксимацию в виде суммы двух гауссовых кривых. Требуемый диапазон длин волн выделяли с помощью широкополосных светофильтров или монохроматора, применялся также узкополосный фильтр ВР589. «Истинную» длительность вспышки можно оценить из измеренной величины *W* с

учетом поправок, вносимых каждым ФЭУ и цепями оцифровки осциллографа [5]. Задержку импульсов измеряли в режиме корреляции, с установкой разных светофильтров перед двумя ФЭУ и последующей переменной их местами [1].

D-ЛИНИЯ NA

D-линия Na в спектрах СЛ имеет сложную структуру относительно спектра в пламени. Линия сильно уширена, смещена в красную область и имеет сателлиты (рис. 1). Голубым сателлитом называют широкий пик ~ 560 нм, отнесенный к излучению эксимерных молекул NaAg* в газовой фазе [6]. Красным сателлитом называют уширенную часть линии, простирающуюся в красную область. В спектрах СЛ высокого разрешения на фоне уширенной линии в определенных экспериментальных условиях наблюдаются узкие несмещенные пики дублета Na — линии 589 и 589.6 нм, которые возможны только из среды с низкой плотностью, и появление которых в спектрах СЛ неясно. Полная спектральная ширина линии Na вместе с сателлитами в области спектра, где яркость линии заметно отличается от яркости континуума, составляет 200 нм и охватывает диапазон 500–700 нм. На рис. 1 показаны измеренные значения *W* в разных спектральных диапазонах.

Более информативной нам представляется зависимость длительности вспышек СЛ от доли яркости линии Na, вырезаемой светофильтром, которая показана на рис. 2. Каждый светофильтр пропускал некоторые доли континуума и линии металла, сумма долей принималась за 1. При этом фильтр мог захватывать различные области излучения линии Na, ее красного и голубого сателлитов. Длительность вспышек *W* относилась ко всему диапазону, вырезаемому фильтром. Средневзвешенная доля *s* яркости Na, пропускаемая каждым светофильтром, вычислена из спектра его пропускания $T(\lambda)$, спектра СЛ раствора NaCl $N(\lambda)$, содержащего линию Na и континуум, и спектра СЛ водного раствора $K(\lambda)$, который имеет в диапазоне 500–700 нм только континуум, по формуле $s = \frac{\sum\{T(\lambda)(N(\lambda) - K(\lambda))\}}{\sum\{T(\lambda)N(\lambda)\}}$, где суммирование проводилось по длине волны λ с шагом 1 нм. Для светофильтров, вырезающих области спектра, не затрагивающие спектральный интервал широкой линии Na (фильтры 1–3 на рис. 1), полученная корреляционным методом *W* составила ~ 2 нс и относилась к длительности вспышки континуума, которая, как мы нашли ранее, постоянна во всем наблюдаемом

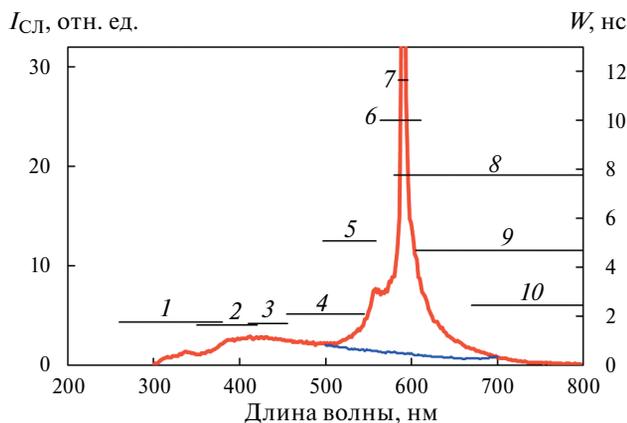


Рис. 1. Спектр СЛ водного раствора 3 М NaCl (жирная кривая) и длительность вспышек, измеренная с использованием 10 различных светофильтров. Диапазон длин волн, где пропускание светофильтра более 50% от максимального, соответствует положению отрезка (1–10) по оси длин волн, длительность вспышки в соответствующем диапазоне соответствует положению отрезка по оси W . Спектры пропускания фильтров не показаны, чтобы не загромождать рисунок. Спектр СЛ обрезан по шкале интенсивности для наглядности. Фрагмент спектра СЛ водного раствора 3 М KCl (тонкая кривая) использован в расчетах в качестве спектра континуума от 500 до 700 нм.

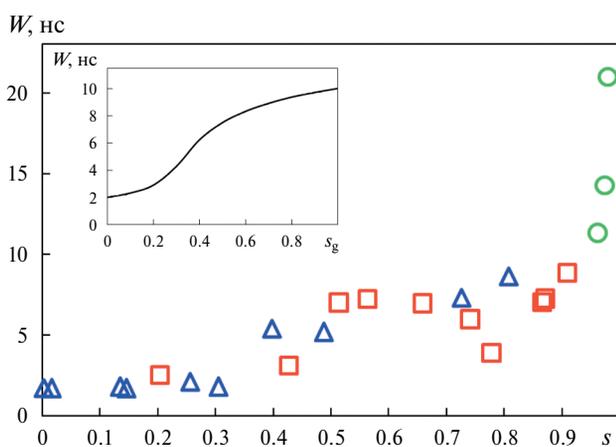


Рис. 2. Зависимость длительности вспышки W от средневзвешенной доли s яркости линии Na для светофильтров, вырезающих из спектрального диапазона СЛ как континуум, так и часть линии Na, в спектрах водных растворов 3 М и 4 М NaCl. Измерения с помощью узкополосного фильтра и монохроматора вблизи центра линии Na (кружки), с помощью фильтров с коротковолновой стороны от линии Na (треугольники), фильтров с длинноволновой стороны (квадраты). Врезка: модельный ход зависимости W от доли широкой компоненты s_g в сумме двух гауссовых кривых.

диапазоне СЛ [7]. Длительность вспышки Na, оцененная ранее, равнялась ~ 10 нс [1]. Таким образом, для светофильтров, пропускающих оба типа излучения (Na и континуум), следует ожидать определенной зависимости W от s . В предположении одновременного излучения линии и спутников, моделирование W с помощью одногауссовой аппроксимации кривой, состоящей из суммы двух гауссовых кривых с ширинами 2 и 10 нс, дает зависимость W от доли широкой гауссовой кривой s_g , показанную на врезке рис. 2.

Результаты же рис. 2 показывают, что W быстро увеличивается при стремлении s к 1. Это ставит под сомнение предположение о синхронной вспышке всех компонент линии Na. Три правые верхние точки на рис. 2 (отмечены кружками) соответствуют узкополосному фильтру BP589 (полоса пропускания 11 нм, $W = 11.7$ нс) и диапазонам 6 и 3 нм, вырезанным с помощью монохроматора вокруг длины волны 589 нм ($W = 14.3$ нс, $W = 21$ нс). Из такого стремительного роста W можно ожидать, что центральная часть линии Na, вблизи 589 нм, будет иметь значение $W > 21$ нс. Когда светофильтр пропускает периферийную часть линии Na (фильтры 4–5, 9–10 на рис. 1), значение W существенно меньше. Такой результат находится в замечательном согласии с предложенной нами моделью, согласно которой спектральная линия Na в ходе сжатия пузырька уширяется и смещается изменяющейся плотностью инертного газа (в нашем случае аргона) [8]. Пиковые значения давления, плотности и температуры среды в пузырьке достигаются на значительно более коротких временных интервалах, чем более низкие значения давления, плотности, температуры, которые все еще пригодны для высвечивания Na [1]. При самых низких плотностях среды, близких к нормальной (1 амг), может высвечиваться узкая несмещенная линия Na при 589 нм. Для удобства мы обсуждаем плотность в единицах Амагата: 1 амг = 2.6868×10^{-19} см $^{-3}$ при нормальных температуре и давлении.

В данных экспериментальных условиях не удастся разрешить компоненты дублета D-линии Na при 589 и 589.6 нм и измерить длительности их вспышек. Вклад излучения узких компонент в общую яркость уширенной линии Na, найденный из формы линии при СЛ, доходит до 5%, а плотность среды излучения свыше 10 амг уширяет их так, что дублет становится неразрешим [8]. Факт наблюдения узких несмещенных пиков дублета в спектрах СЛ может быть прояснен теперь

тем экспериментальным результатом, что время вспышки Na ~ 21 нс оказывается сравнимым и может превышать время нахождения пузырька в состоянии адиабатического сжатия ~ 20 нс [9].

Распределение точек, соответствующих «длинноволновым» и «коротковолновым» фильтрам (квадраты и треугольники, соответственно, на рис. 2), указывает на то, что вспышка голубого сателлита имеет те же временные закономерности, что и вспышка красного сателлита: линия уширяется в обе стороны синхронно.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫСВЕЧИВАНИЯ МЕТАЛЛА И КОНТИНУУМА

Интересно уточнить наличие и величину задержки между вспышками Na и континуума, предварительно оцененную в [1] как 0.5 нс. Для сравнения особенностей эмиссии различных металлов был исследован водный раствор 0.1 М CeCl_3 . Церий интересен тем, что в СЛ спектре водного раствора его хлорида, кроме характерного континуума, наблюдается люминесцентная полоса иона Ce^{3+} с максимумом около 350 нм и временем жизни люминесценции 33 нс, которая излучается из раствора [10]. Спектры СЛ воды, СЛ и люминесценции CeCl_3 показаны на рис. 3. Спектры фотонных корреляций (время дискретизации 2 нс) при СЛ растворов, содержащих Ce и Na, показаны на рис. 4. Спектры фотонных корреляций, полученные с применением процедуры улучшения временного разрешения [5] для случая Na, приведены на рис. 5, эффективное время дискретизации 0.5 нс.

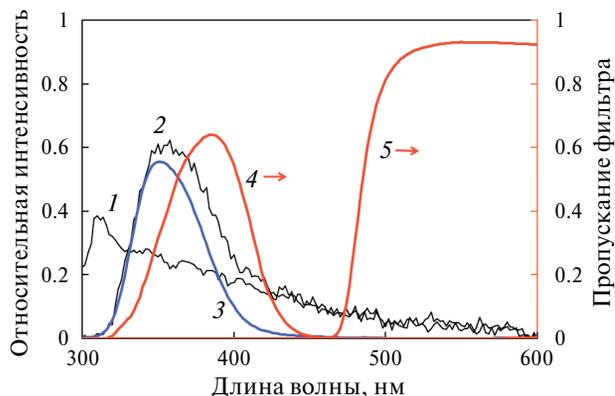


Рис. 3. Спектры СЛ воды (1), 0.1 М CeCl_3 (2), люминесценции 0.1 М CeCl_3 (3) и спектры пропускания фиолетового (4) и желтого (5) светофильтров.

Спектры фотонных корреляций «континуум-металл» и «металл-континуум» при СЛ водных растворов NaCl и CeCl_3 получены методом установки разных светофильтров в двух каналах регистрации импульсов с последующей переменной фильтров местами. Для раствора NaCl были использованы светофильтры: оранжевый (8, рис. 1), доли пропускания 0.87 Na и 0.13 континуум; синий (2, рис. 1), пропускал только континуум в области 350–460 нм. Для раствора CeCl_3 : фиолетовый (кривая 4, рис. 3), доли пропускания 0.52 Ce и 0.48 континуум; желтый (кривая 5, рис. 3), пропускал только континуум в области 500–800 нм. Доли пропускания получены расчетом по кривым пропускания фильтров и спектрам СЛ растворов. Таким образом, один из светофильтров пропускал только

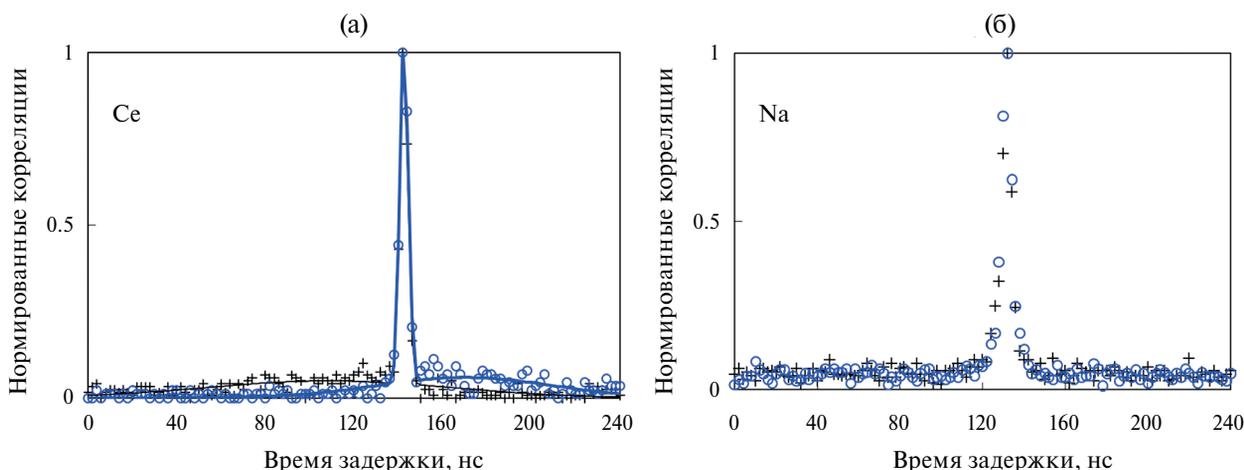


Рис. 4. (а) — Спектры фотонных корреляций (крестики, кружки) и их двухгауссовы аппроксимации (кривые) СЛ раствора 0.1 М CeCl_3 и (б) — спектры фотонных корреляций СЛ раствора 2 М NaCl. Корреляции «континуум-металл» — кружки, жирная кривая; корреляции «металл-континуум» — крестики, тонкая кривая.

континуум, другой — преимущественно линию металла. Когда в первом канале счетчика корреляций стоял фильтр, пропускающий континуум, мы называли получаемые корреляции «континуум-металл», когда такой фильтр стоял во втором канале — «металл-континуум». При изменении положения спектральных каналов «континуум-металл» и «металл-континуум» относительные сдвиги во времени имеют противоположные знаки, поэтому сдвиг между пиками спектров фотонных корреляций соответствует удвоенной задержке между фотонными импульсами разного типа [1].

В спектрах фотонных корреляций видно наличие компонент — узкой W_1 и широкой W_2 , которые можно разделить двухгауссовой аппроксимацией. Узкий пик относится к вспышкам континуума. Он присутствует в спектрах корреляций, поскольку континуум частично проходит через оба фильтра в оба канала, и должен иметь такую же длительность, что и длительность вспышки континуума, полученная из автокорреляционных спектров. Широкий корреляционный пик связан с вспышками металла. Его ширина обусловлена конволюцией вспышек металла и континуума. Двухгауссовые аппроксимации спектров фотонных корреляций показаны сплошными кривыми на рис. 4а и рис. 5, ширина на полувысоте вычислена для каждой компоненты гауссовой кривой — узкой W_1 и широкой W_2 . В случае Na (рис. 5) $W_1 = 1.8$ нс и $W_2 = 7.2$ нс фиксировались (использованы значения, полученные из автокорреляционных спектров), варьировались их амплитуды и смещения по осям корреляций и времени. Широкая компонента Na незаметна на рис. 4б

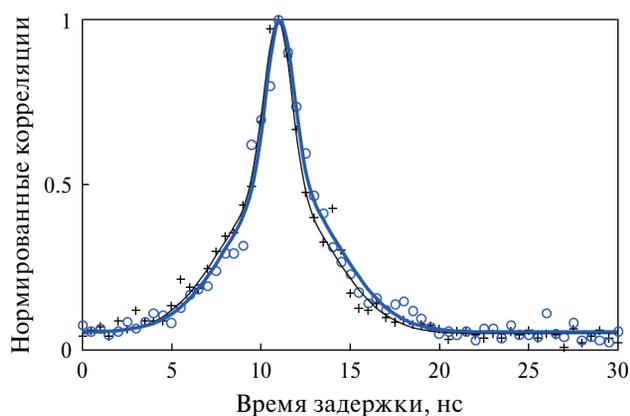


Рис. 5. Детализированные спектры фотонных корреляций и их двухгауссовые аппроксимации СЛ раствора 2 М NaCl. Корреляции «континуум-металл» (кружки, жирная кривая) и «металл-континуум» (крестики, тонкая кривая).

из-за масштаба оси времени. В случае Се (рис. 4а) смещение по оси корреляций не вводилось, получены значения $W_1 = 4.3$ нс, $W_2 = 110$ нс.

Задержка между вспышками континуума и металла, если она есть, равна половине временного сдвига между широкими пиками. В случае Се временной сдвиг 62 нс хорошо заметен, откуда получаем среднюю задержку вспышки Се и континуума 31 нс. В случае Na этот сдвиг мал, находится на пределе временного разрешения, оценка задержки ~ 0.21 нс. Порядок высвечивания металла и континуума определяется из порядка следования корреляционных пиков. В случае, представленном на рис. 4а, континуум вспыхивает намного раньше, чем Се, в случае рис. 5 континуум вспыхивает чуть раньше, чем Na.

Сравним случаи Се и Na. Пузырьки вспыхивают и дают в обоих случаях широкополосный континуум длительностью менее 1 нс [2, 7]. Се дает обычную люминесценцию [10], для Na — вопрос пока не ясен. Линия при 350 нм (переход $5d \rightarrow 4f$) относится к ионам Ce^{3+} , которые находятся в растворе, окружающем вспыхивающие пузырьки. Ионы возбуждаются вспышками коротковолновой части континуума СЛ и высвечиваются в соответствии с собственным временем жизни возбужденного состояния 33 нс [10, 11], что очень близко к измеренной здесь задержке 31 нс. Высвечивание происходит по убывающей экспоненте, поэтому применение гауссовой аппроксимации широкого пика здесь не вполне корректно, только оценочно. Из спектров корреляций можно получить кривую затухания люминесценции [11]. Взаимное расположение корреляций «континуум-церий» и «церий-континуум» (рис. 4а) показывает правильную последовательность вспышек — сначала вспыхивает пузырек, а затем высвечивается церий. Это случай классической люминесценции.

Линия при 589 нм — это линия нейтрального атома Na (переход $3p \rightarrow 3s$). В растворе металл находится в виде иона Na^+ и не может излучать линию при 589 нм. Полагают, что Na попадает в пузырек с наноклапями раствора, где происходит гомолитическая диссоциация молекул соли с последующим возбуждением нейтрального атома [12]. Время жизни возбужденного состояния Na (17.5 нс) имеет тот же порядок, что у Се, и если бы Na высвечивался по тому же механизму, что и Се, картина корреляций должна была быть схожа. Измеренная длительность вспышек Na при СЛ, полученная из спектров автокорреляций, составляет ~ 10 нс (зависит от длины волны), а измеренная задержка 0.21 нс

значительно меньше времени жизни возбужденного состояния. Таким образом, высвечивание Na в среднем происходит в то же самое время, что и континуум, но более длительно, и симметрично во времени «окружает» вспышку континуума.

Принято делить кавитационные пузырьки на сонолюминесцентные (излучают континуум СЛ) и хемилюминесцентные (ответственны за линии и полосы в спектрах) [12, 13], но из результатов следует, что есть пузырьки, которые дают оба типа эмиссии [1]. Вывод о синхронности вспышек Na и континуума относится к таким пузырькам. Именно в них возможна корреляция между вспышкой континуума и металла, что дает две компоненты в корреляционном спектре Na. Если бы пузырьки однозначно делились на два типа и вспыхивали независимо, то широкая компонента в спектрах корреляций рис. 5 не наблюдалась бы вообще. Анализ распределения числа корреляций по времени задержки позволяет оценить число пузырьков, относящихся к разным типам: сонолюминесцентные, хемилюминесцентные, «смешанные» [4]. По методике [4], количество вспыхивающих пузырьков за период ультразвука, дающих только континуум, только Na и оба типа эмиссии в спектрах СЛ примерно равно 100, 150, 200, соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим возможные механизмы эмиссии Na в контексте длительности и задержки вспышек. Химические реакции рекомбинации радикалов предложены в качестве механизма возбуждения атомов Na при СЛ [6]. В этом случае длительность вспышки Na должна быть много больше наблюдаемой, так как время жизни радикалов составляет микросекунды [14]. Неупругие соударения с нейтральными частицами могут приводить к переходам в возбужденные состояния, но эти процессы должны сопровождаться примерно равновероятными обратными переходами (безызлучательная деактивация возбужденного состояния). Неупругие соударения с ионами должны давать очень малое время возбуждения и малую длительность вспышки, так как фаза ионизации в пузырьке коротка во времени. Резонансное возбуждение светом континуума с длиной волны 589 нм также маловероятно, так как излучение континуума в области 589 нм слабое, короткое во времени, что не объясняет наблюдаемую интенсивность линии и длительность вспышки Na. Электроразрядная гипотеза предполагает вспышки на фазе расширения пузырька вследствие формирования

дзета-потенциалов [15]. В этом случае континуум должен совпадать по времени с эмиссией Na, но широкие сателлиты линии Na должны отсутствовать, а наблюдаться только узкие компоненты дублета. Рассматривались и другие механизмы СЛ [16]. Во всех случаях должна иметь место задержка между возбуждением и высвечиванием Na, обусловленная временем жизни его возбужденного состояния. Эта задержка может уменьшаться, если есть эффективный канал гашения возбужденного состояния. Действительно, свободные атомы натрия химически активны и должны связываться сразу по мере их появления. Время химических реакций (время движения атомов вдоль координаты реакции) — пикосекунды. Измеренная здесь задержка «континуум-Na» ~ 0.21 нс может означать время деактивации возбужденных состояний Na вследствие соударений или химического связывания. В случае церия возбужденные состояния его ионов в растворе подвержены только собственному времени жизни ~ 33 нс, без других каналов гашения. Таким образом, кроме механизмов возбуждения и гашения, актуален механизм генерации и сохранения свободных атомов Na на всех фазах жизни пузырька, связанных с СЛ. Гомолитическая диссоциация объясняет появление свободных атомов Na только в «горячие» моменты, связанные с максимальным сжатием пузырьков. Экспериментальным результатом данной работы является обнаружение длительной вспышки Na, почти симметричной во времени относительно вспышки континуума. Этот результат был бы объясним, если бы нейтральные атомы металла имелись в пузырьке и до, и после момента коллапса. Таким образом, механизм СЛ Na оставляет много вопросов.

Согласно полученным данным, свечение Na при СЛ эволюционирует так. На фазе расширения и большей части фазы сжатия пузырек не светится. Пузырек сжимается, начинает адиабатически нагреваться и, пока его плотность еще низка, начинает светиться центральная часть D-линии Na, в частности, разрешаются узкие компоненты его дублета. Плотность и температура растут, дублет Na сливается в одну видимую линию, линия уширяется и смещается, возникают сателлиты. Плотность и температура максимальны, вспыхивает и гаснет континуум. Пузырек расширяется, плотность и температура падают, линия Na снова сужается, и вспышка завершается угасанием центральной части линии Na, при этом дублет становится снова разрешимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально, автокорреляционным методом выяснено, что длительность вспышки центральной части D -линии Na (589 нм) при СЛ раствора NaCl (21 нс) намного больше, чем периферийной (2 нс). Это согласуется с предложенной нами ранее динамической моделью интегральной формы линии Na при СЛ. Прояснен механизм появления узких компонент дублета D -линии Na при СЛ, т.к. длительность их вспышки (> 21 нс) оказывается больше, чем время пребывания пузырька в сжатом состоянии. Корреляционным методом подтверждено наличие пузырьков, за одну вспышку излучающих и Na, и континуум. Вычислено, что их число сопоставимо с числом пузырьков, излучающих только Na, или только континуум. Корреляционным методом определено, что вспышка континуума происходит примерно в центре длительной вспышки Na с исчезающе малой задержкой 0.21 нс (Na после континуума). При СЛ раствора CeCl_3 корреляционным методом измерена задержка вспышки линии Ce^{3+} (350 нм) после вспышки континуума (31 нс), согласующаяся со временем жизни люминесценции (33 нс) и моделью высвечивания Ce^{3+} из раствора, что подчеркивает отличие от механизма эмиссии Na при СЛ.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер: 124022100074-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордейчук Т. В., Казачек М. В. Время-коррелированный счет фотонов для оценки длительности вспышек Na и континуума в спектрах многопузырьковой сонолюминесценции // Опт. и спектр. 2020. Т. 128. № 10. С. 1492–1500.
2. Ko I., Kwak H.-Y. Measurement of pulse width from a bubble cloud under multibubble sonoluminescence conditions // J. Phys. Soc. Japan. 2010. V. 79. № 12. P. 124406 (6).
3. Казачек М. В., Гордейчук Т. В. Счетчик корреляций на базе осциллографа и компьютера // Приборы и техника эксперимента // ПТЭ. 2019. Т. 62. № 1. С. 28–29.
4. Казачек М. В., Гордейчук Т. В. Применение корреляционного метода для определения количества вспыхивающих пузырьков и количества фотонов в вспышке при многопузырьковой сонолюминесценции // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 6. С. 11–15.
5. Казачек М. В. Математическая обработка импульсов для улучшения временных характеристик счетчика корреляций // ПТЭ. 2023. Т. 66. № 6. С. 176–180.
6. Lepoint-Mullie F., Voglet N., Lepoint T., Avni R. Evidence for the emission of 'alkali-metal-noble-gas' van der Waals molecules from cavitation bubbles // Ultrason. Sonochem. 2001. V. 8. № 2. P. 151–158.
7. Казачек М. В., Гордейчук Т. В. Ширина импульсов континуума в различных областях оптического спектра многопузырьковой сонолюминесценции корреляционным методом // Опт. и спектр. 2023. Т. 131. № 9. С. 1236–1240.
8. Казачек М. В., Гордейчук Т. В. Одна простая модель формы D -линии Na в спектрах сонолюминесценции // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 6. С. 39–48.
9. Brenner M.P., Hilgenfeldt S., Lohse D. Single-bubble sonoluminescence // Rev. Mod. Phys. 2002. V. 74. P. 425–484.
10. Шарунов Г. Л., Гареев Б. М., Абдрахманов А. М. Однопузырьковая сонолюминесценция водных растворов хлоридов лантанидов и модели сонохимии нелетучих солей металлов // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. № 11. С. 634–638.
11. Казачек М. В., Гордейчук Т. В. Определение времени жизни люминесценции Ce^{3+} методом время-коррелированного счета фотонов при сонолюминесценции водного раствора CeCl_3 // Опт. и спектр. 2021. Т. 129. № 9. С. 1152–1155.
12. Xu H., Eddingsaas N.C., Suslick K.S. Spatial separation of cavitating bubble populations: the nanodroplet injection model // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 6060–6061.
13. Sunartio D., Yasui K., Tuziuti T., Kozuka T., Iida Y., Ashokkumar M., Grieser F. Correlation between Na^* emission and "chemically active" acoustic cavitation bubbles // Chem. Phys. Chem. 2007. V. 8. № 16. P. 2331–2335.
14. Кондратьев В. Н. Свободный гидроксил: монография. М: Государственное объединенное научно-техническое издательство. Редакция химической литературы, 1939. 138 с.
15. Margulis M. A., Margulis I. M. Contemporary review on nature of sonoluminescence and sonochemical reactions // Ultrason. Sonochem. 2002. V. 9. № 1. P. 1–10.
16. Борисенко В. А. Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор) // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 3. С. 333–360.

ATOMIC SODIUM SONOLUMINESCENCE FEATURES DURING BUBBLE COLLAPSE IN A CAVITATION CLOUD BY TIME-CORRELATED SINGLE PHOTON COUNTING

M. V. Kazachek^a, T. V. Gordeychuk^{a,*}

^a*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEBRAS
43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia*

**e-mail: tanya@poi.dvo.ru*

The pulse width of multibubble sonoluminescence flashes in an aqueous NaCl solution was measured by a correlation method for the spectral range of 300–800 nm. The flash pulse width had a maximum value of 21 ns in the spectral region adjacent immediately to the Na D-line peak (589 nm) and decreased to 2 ns with distance from the line peak. The measured dependence of the flash pulse width on the wavelength agreed with the dynamic Na line shape model proposed by us earlier, where the spectral line width and shift were governed by a fast change in the emitting medium density during bubble collapse. Using the correlation method, the sequence of metal and continuum flashes was determined to measure the relative delay between them. The results showed that Na emission takes a longer time as compared to continuum emission and occurred almost symmetrically in time around a continuum flash with a vanishingly small delay of 0.21 ns after the continuum flash. Using the same method for a CeCl₃ solution, a cerium line flash (350 nm) was revealed to occur after a continuum flash with a delay of 31 ns close to the Ce emission lifetime of 33 ns to be indicative of essential distinction between the mechanisms of Na and Ce emission under multibubble sonoluminescence.

Keywords: ultrasonic cavitation, sonoluminescence, optical spectra, flash pulse width, time-correlation method, Na, Ce