

ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА В КОНСТРУКЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ГИГРОМЕТРА

© 2012 г. А. Д. Лыков*; В. И. Астахов*, канд. физ.-мат. наук;
Л. И. Коршунов*, канд. физ.-мат. наук; В. А. Юшков*, канд. физ.-мат. наук;
В. Л. Будович**, канд. техн. наук; Д. В. Будович**; А. Д. Дубакин**

* Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный

** Бюро аналитического приборостроения “Хромдет-экология”, Москва

E-mail: alykov@mail.ru

Приведено описание флуоресцентного гигрометра для измерения микроконцентрации водяного пара в стратосфере. Рассмотрены источники вакуумного ультрафиолета, используемые в гигрометре. Обсуждаются вопросы температурной зависимости характеристик водородных и криптоновых ламп тлеющего разряда, а также работа ламп в режиме модуляции. Приведены результаты лабораторных и натурных испытаний гигрометра.

Ключевые слова: водородная лампа, криптоновая лампа тлеющего разряда, флуоресценция, влажность стратосферы.

Коды OCIS: 120.4640

Поступила в редакцию 27.02.2012

Введение

Влажность стратосферы (на высотах 10–30 км) меняется в пределах от 2 до 10 млн⁻¹ [1], но даже таких малых количеств водяного пара достаточно для того, чтобы влиять на ее температурный и радиационный режимы, а также на химические процессы разрушения стратосферного озона. Прямые контактные измерения микроконцентрации водяного пара в указанном диапазоне высот с борта аэрологического баллона представляют трудную техническую задачу, так как аппаратура должна надежно работать в температурном диапазоне от –90 °С до +10 °С и диапазоне давления от 300 до 10 гПа, обладая при этом инерционностью не хуже 1 с.

Успешным в применении оказался флуоресцентный метод [2], основанный на реакции фотодиссоциации молекул водяного пара под воздействием вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения с длиной волны менее 137 нм. Образовавшиеся в результате фотодиссоциации возбужденные молекулы гидроксила ОН* флуоресцируют, а интенсивность этой флуоресценции J оказывается (для условий нижней стра-

тосферы) прямо пропорциональной значению концентрации водяного пара μ и выражается соотношением

$$\mu = AJ,$$

где A – коэффициент пропорциональности, определяемый в лабораторных условиях. Так как интенсивность флуоресценции мала, для ее измерения используют фотоэлектронные умножители.

Успешное развитие флуоресцентного метода для измерения стратосферной влажности основывалось на результатах фундаментальных работ А.Н. Теренина [3, 4], в которых подробно исследованы процессы фотодиссоциации молекул водяного пара под действием излучения из области ВУФ. В этих работах был сделан важный для гигрометрии вывод: “Так как в спектре ОН*, полученном при фотодиссоциации Н₂О, преобладает полоса 306,2 нм, то спектрально не разложенное свечение пучка и его тушение должно быть приписано именно ей”. Это открывает принципиальную возможность определять концентрацию водяного пара по интенсивности свечения продуктов фотодиссоциации молекулы воды.

Приборная реализация этого метода применительно к различным подъемным средствам (самолет, метеорологический воздушный шар, долгодрейфующий аэростат, метеорологическая ракета) была осуществлена в США [5], Германии [6] и СССР [7, 8]. Отличительной особенностью российского флуоресцентного гигрометра для баллонного зондирования (FLASH) является применение соосной оптической схемы, которая позволила разработать компактный и легкий гигрометр массой $\approx 0,5$ кг. Ключевым элементом баллонного гигрометра является бортовой источник ВУФ излучения, который должен быть компактным, иметь интенсивность порядка 10^{14} фотон/с для квантов с энергией более 9,07 эВ (длина волны менее 137 нм) и сохраняющим стабильные характеристики в процессе калибровок прибора и проведения измерений в атмосфере.

Оптическая схема гигрометра

Внешний вид баллонного флуоресцентного гигрометра FLASH представлен на рис. 1. А его оптическая схема – на рис. 2. Гигрометр с водородной лампой функционирует следующим образом. Излучение лампы с длинами волн менее 137 нм (в основном линия Лаймана – 121,6 нм) приводит к фотодиссоциации молекул воды в исследуемом объеме воздуха, который находится примерно на расстоянии 30 см от окна водородной лампы и внешней линзы приемной оптической системы. Излучение флуоресценции, интенсивность которой пропорциональна концентрации молекул воды, с помощью объектива фокусируется через интерференционный светофильтр с полосой пропускания 306–315 нм на окно фотоумножителя, работающего в режиме счета фотонов. Для повышения эффективности приема полезного сигнала и уменьшения габаритов прибора источник излучения и приемная оптическая система расположены соосно. Измерения осуществляются в открытом пространстве в непосредственной близости от объектива. Прибор не нуждается в аспирационной системе для забора анализируемого воздуха. Это упрощает его конструкцию, но накладывает серьезные ограничения на интенсивность фонового излучения – прибор может работать только в ночных или сумеречных условиях, когда солнечный зенитный угол более 91 градуса. В условиях измерений при ограниченном фоновом излучении применяется модуляция из-

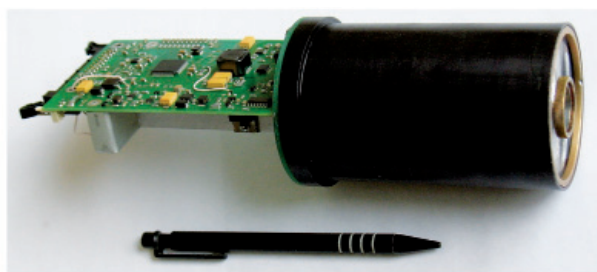


Рис. 1. Внешний вид оптического гигрометра.

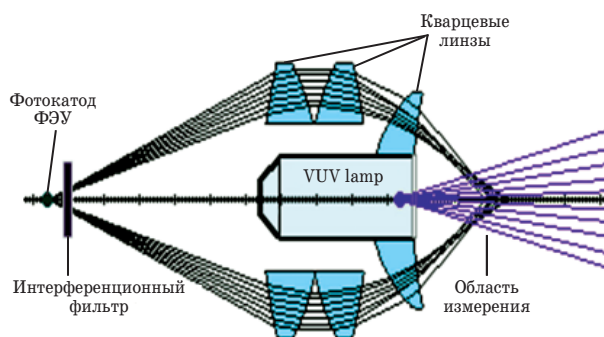


Рис. 2. Оптическая схема флуоресцентного гигрометра.

меряемого излучения с синхронным детектированием сигнала флуоресценции. Работа водородной лампы в модуляционном режиме и синхронное детектирование сигнала флуоресценции с фотоумножителя обеспечивается микроконтроллером. Конструкция гигрометра не предполагает мониторинг интенсивности источника ВУФ излучения в процессе измерения влажности. Это накладывает особые требования на стабильность работы водородной лампы в составе баллонного гигрометра.

Бортовые источники ВУФ излучения для баллонного гигрометра

За рубежом при реализации флуоресцентного метода для измерения влажности атмосферного воздуха используется отпаянная разрядная лампа, наполненная гелием или аргонном со следами водорода, описанная в работе [9]. Мощность такой лампы составляет 15 Вт. Разряд происходит между коваровыми электродами через средний кварцевый капилляр с наружным диаметром 6 мм и длиной 40 мм. Лампа снабжена окном из монокристалла фторида магния, расположенным вблизи откры-

того конца капилляра. В боковом отростке содержится порошок урана и некоторое количество гидрида урана. Отросток можно нагревать и поддерживать при постоянной температуре. Гидрид урана служит источником H_2 , тогда как уран действует одновременно как эффективный химический поглотитель газовых загрязнений, возникающих в процессе разряда. Однако такая конструкция лампы с термостатированием ее элементов не подходит для компактного флуоресцентного гигрометра. В работе [10] сообщается, что для упрощения конструкции водородной лампы вместо гидрида урана применяется гидрид $ZrCo$, обладающий теми же термодинамическими свойствами. В такой лампе используется смесь молекулярного водорода при давлении в несколько паскаль с аргоном при давлении 2–7 гПа. Однако в лампах такого типа ресурс ограничен несколькими десятками часов из-за загрязнения окна лампы продуктами газового разряда. Применение проточных водородных ламп [11] позволяет избавиться от деградации окна, но усложняет конструкцию и габариты.

Для использования в гигрометре FLASH авторами статьи была разработана малогабаритная лампа тлеющего разряда (CDLN-1070), излучающая в ВУФ-области резонансную линию водорода 121,6 нм (10,2 эВ). При этом использовался опыт создания таких ламп, накопленный в ГОИ им С.И. Вавилова, частично отраженный в [12], а также конструктивные и технологические решения, полученные разработчиком при создании ксеноновых и криптоновых резонансных ламп [13]. Внешний вид лампы представлен на рис. 3. Окно лампы выполнено из монокристалла фторида магния, электроды из никеля, конструкционные элементы из стали и керамики. Все элементы соединены с помощью стеклоэмали. Для работы данных ламп характерным является наличие в центре окна области постоянной интенсивности диаметром 6–8 мм и уменьшение интенсивности к краям окна.

Тлеющий разряд ограничен стенками керамического капилляра, размеры которого определяют распределение интенсивности излучения. Лампа заполнена смесью гелий – водород, в которой поддерживался тлеющий разряд постоянного тока. При этом в ВУФ-области помимо резонансной линии атомарного водорода излучается многолинейчатый спектр водорода. Задача состояла в том, чтобы добиться максимальной интенсивности линии Лаймана, при



Рис. 3. Внешний вид водородной лампы.

сохранении высокой стабильности излучения. Для этого производился подбор концентрации водорода и давления газовой смеси в лампе на откачном посту. Для контроля интенсивности излучения лампы в области вакуумного ультрафиолета использовалась проточная ионизационная камера [14], где в качестве рабочей использовалась смесь паров гексана или бензола с азотом. Энергия ионизации гексана составляет 10,17 эВ, что очень близко к энергии квантов, излучаемых в линии Лаймана. Таким образом, молекулярная часть спектра лампы практически не давала вклада в ионизационный ток. Для дополнительного подавления линий молекулярного водорода с длиной волны меньшей 121,6 нм в смесь, протекающую в ионизационной камере, добавляли 1% об. кислорода. Таким способом были подобраны концентрация водорода и давление смеси в лампе, обеспечивающее наибольший сигнал ионизационной камеры, то есть наибольшую интенсивность линии Лаймана. При этом контролировалась кратковременная стабильность лампы, определяемая отношением вариации тока ионизационной камеры к его амплитуде. Эта величина не превышала 1%. Долговременная стабильность излучения этой линии контролировалась на готовых (после отпайки) лампах также с помощью проточной ионизационной камеры. В камере находился чистый воздух и периодически подавалась смесь паров гексана с воздухом. Лампы тестировали не менее 200 часов. Изменение сигнала составляло не более 0,1% / час.

Зависимость ионизационного тока, определяемого линией Лаймана от тока разряда, приведена рис. 4. Линейность этой зависимости указывает на возможность увеличения раз-

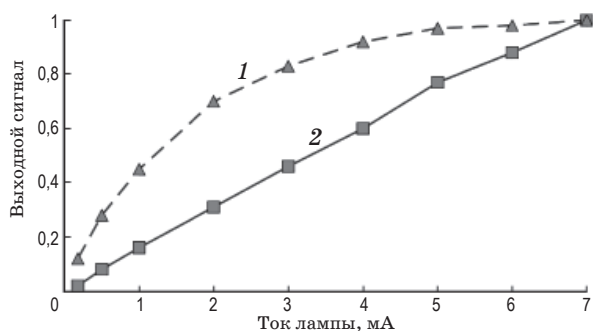


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения (относительные единицы) от тока разряда для криптоновой (1) и водородной (2) ламп.

рядного тока для увеличения интенсивности резонансной линии водорода, и, следовательно, для повышения чувствительности флуоресцентного метода. Такая зависимость определяет и требования к поддержанию постоянного тока разряда лампы в процессе калибровок и измерений. Для достижения заявленной (10%) погрешности измерений баллонного гигрометра обеспечивалась стабилизация тока лампы не хуже 1%. На том же рисунке приведена зависимость выходного сигнала в относительных единицах от тока лампы, полученная в тех же условиях для криптоновой лампы (лампа CDL-1050 производства "Хромдет-экология"). Наблюдаемое для криптоновой лампы насыщение выходного сигнала связано с насыщением интенсивности резонансных линий [15].

Отметим, что криптоновую лампу также можно использовать в составе флуоресцентного гигрометра, но при этом приходится ограничиваться высотным диапазоном измерений в 15–30 км, где общее давление анализируемого воздуха не превышает 100 гПа и поглощением ВУФ излучения молекулярным кислородом на расстоянии 30 см можно пренебречь. Для оценок использовалось значение коэффициента поглощения кислородом криптоновой линии излучения на длине волны 123,6 нм, равное $1 \times 10^{-20} \text{ см}^2$. Для сравнения для молекулярного кислорода окно "прозрачности" для линии Лаймана характеризуется значением поглощения, равным $1,5 \times 10^{-17} \text{ см}^2$. Поэтому при использовании водородной лампы высотный диапазон измерения гигрометром начинается с высоты примерно 7 км.

Температурная зависимость интенсивности ВУФ-излучения водородных ламп

Водородные лампы, использующиеся во флуоресцентном гигрометре, в условиях реального эксперимента подвергаются воздействию температурных перепадов от +40 до -90 °С. Эксперименты показали, что температура лампы в конструкции гигрометра может опуститься в процессе полета до -50 °С. Поэтому исследование температурной зависимости интенсивности ВУФ-излучения водородной лампы проводилось в диапазоне температур от +20 до -50 °С. Методика исследования основана на использовании в качестве термостата морозильной камеры типа MDF-U32V с толщиной стенки 150 мм, позволяющей получать в объеме камеры температуру от комнатной до -90 °С. Для вывода излучения лампы из камеры использовалась дьюаровская трубка с окнами из MgF_2 длиной 150 мм и диаметром 20 мм. На одном конце трубки крепилась лампа, на другом конце – детектор вакуумного ультрафиолетового излучения водородной лампы. Зазор между трубкой и стенкой технологического отверстия камеры тщательно герметизировался. На баллоне лампы закреплялся термодатчик, регистрирующий температуру поверхности лампы. Детектором вакуумного ультрафиолетового излучения лампы в диапазоне 110–160 нм служил фотоэлемент Hamamatsu R1132. Исследовалась температурная зависимость двух типов ламп: лампы CDL-1070 фирмы Хромдет и водородная лампа ЛГВ-1 разработки ГОИ. Для определения вклада линии Лаймана в полную интенсивность излучения в диапазоне 110–160 нм использовался фильтр из монокристалла CaF_2 , коротковолновая граница которого ($\approx 130 \text{ нм}$) полностью отсекает линию Лаймана. Вклад линии Лаймана в ВУФ-излучение обеих ламп оценивался нами в 80% и оставался неизменным при уменьшении температуры лампы от +40 до -50 °С.

Температурный ход зависимости интенсивности показал, что с уменьшением температуры интенсивность ВУФ-излучения возрастает, что может быть связано с температурной зависимостью коэффициента пропускания окна лампы. Процесс изменения обратимый – при возвращении к первоначальным условиям интенсивность возвращается к первоначальному значению. Возрастание интенсивности монотонное и составляет 4–5% для разных партий

ламп при изменении температуры в камере от +20 до -50 °С.

Температурные исследования водородных ламп проводились также с регистрацией линии Бальмера (656,3 нм) на боковой поверхности лампы. Такой контроль интенсивности в линии Лаймана возможен благодаря наличию очень хорошей корреляции между интенсивностью этих двух линий. Сигнал на длине волны 656,3 нм обусловлен в основном красной линией Бальмера, где нижнее состояние является верхним состоянием для излучения в линии Лаймана. В эксперименте сама лампа находилась в охлаждаемой камере, а температура ее стенок измерялась термистором. Излучение в линии Бальмера через световод длиной 30 см регистрировалось фотоумножителем ФЭУ-110 с интерференционным фильтром, находящимися при неизменной комнатной температуре.

Результаты температурных исследований по описанным двум методикам практически совпадают. Проведенные измерения показали, что максимальная погрешность измерений гигрометром, связанная с изменением температуры водородной лампы, не превышает 5%. Поэтому конструкция гигрометра не предполагает измерение температуры лампы в полете, а возможное изменение ее интенсивности при ее охлаждении входит в оценку погрешности измерений гигрометром. При этом следует упомянуть, что в процессе полета электронные устройства, ФЭУ и бортовые источники питания находятся в термостатируемом объеме и их температура не отличается от тех значений, при которых проводилась градуировка гигрометра.

Функционирование лампы в составе гигрометра

Для измерения концентрации водяного пара при наличии фонового излучения необходимо обеспечить модуляционный режим работы лампы, который обеспечивает корректный учет фонового излучения в сигнале флуоресценции. Фоновое излучение измерялось в момент выключения лампы. При включенной лампе фотоумножитель измеряет суммарный сигнал флуоресценции и фонового излучения. Разность сигналов, измеренных фотоумножителем при включенной и выключенной лампе, определяется исключительно флуоресценцией от возбужденных молекул гидроксидов.

Для реализации этого метода измерения блок питания лампы имеет возможность модулировать ее включение по сигналам микроконтроллера. В соответствии с программой микроконтроллер генерирует модулирующий сигнал с частотой около 800 Гц и регулируемой скважностью. Частота модуляции выбрана для наиболее точного измерения изменяющегося фонового излучения и Фликкер-шумов. Скважность модуляции регулируется и в зависимости от режима измерений может изменяться на порядок. При слабых фоновых засветках периоды включения и выключения лампы равны и составляют 0,6 мс. При больших фоновых засветках и неизменной частоте модуляции (800 Гц) периоды включения и выключения лампы регулируются и могут достигать соотношения 1:8. При большой интенсивности фонового излучения большая часть времени отводится его измерению для корректного учета в измеряемом сигнале при включенной лампе. В этом случае ток лампы регулируется микроконтроллером и увеличивается пропорционально для поддержания постоянства ее среднего тока (около 5 мА). Такая система модуляции позволяет обеспечивать ток лампы в режиме ее горения от 2,5 до 40 мА в импульсе при среднем токе 5 мА. Для улучшения воспроизводимости результатов в лампе поддерживался дежурный ток величиной порядка 0,1 мА. Кроме того, из результатов измерений исключались данные, полученные в течение 100 мкс после подачи сигнала на увеличение тока лампы и в течение 10 мкс после подачи сигнала на уменьшение тока лампы. Поскольку интенсивность свечения лампы определяет в значительной степени чувствительность и точность измерений, то это отражается на требованиях к стабильности режима ее работы в терминах постоянства тока разряда в процессе измерения влажности. Для этого блок питания лампы обеспечивает стабилизацию напряжения и тока лампы во всем диапазоне режимов и температур. Конструкция блока питания обеспечивает напряжение зажигания лампы (около 600 В), напряжение горения лампы (300 В) и поддерживает значение тока разряда с точностью не хуже 1%. Полетные эксперименты в стратосфере показали, что при изменении внешней температуры лампы на 40 градусов напряжение горения разряда в лампе изменялось не более чем на 3 В, а ток не более чем на 100 мкА. Это составляет всего 1% от номинальных значений напряже-

ния и тока и дает не более одной десятой части общей погрешности гигрометра.

Существует и более длительный процесс выхода лампы на режим в том случае, если она долго хранилась выключенной. Для этого по методике измерения лампа включается еще перед запуском прибора в полет. Само измерение начинается только тогда, когда прибор достигнет высоты в 2 км. Таким образом, лампа начинает работу за 20–30 мин до начала реальных измерений и за это время все процессы в лампе стабилизируются.

Функциональная схема блока питания водородной лампы для работы в модуляционном режиме изображена на рис. 5. Работой блока питания управляет микроконтроллер. Сигнал LAMPON активирует работу всего блока. Высокий уровень этого сигнала запрещает работу преобразователя напряжения питающего лампу и делает неактивной всю схему. Сигнал LAMPMODUL предназначен для модуляции излучения лампы. Логической единице этого сигнала соответствует включенное состояние лампы, при этом ключи К1 и К2 замкнуты. Сигнал LAMP_CONTR служит для задания среднего тока лампы, а следовательно, интенсивности ее излучения. Сигнал I_LAMP служит для контроля тока лампы с помощью АЦП микроконтроллера.

Известно, что разряд в газоразрядной лампе обладает отрицательным электрическим сопротивлением. Для стабильного горения разряда в такой лампе источник питания должен обладать внутренним сопротивлением, несколько превосходящим величину ее внутреннего отрицательного сопротивления. Часто для этого последовательно с лампой включают соответствующей величины резистор. Однако коэффициент полезного действия такой схемы крайне низкий из-за тепловых потерь на этом резисторе. В описываемом устройстве для улучшения КПД блока питания лампы и повышения стабильности ее горения применена схема с активным источником тока. Такой источник тока обладает большим внутренним динамическим сопротивлением, во много раз превосходящим величину отрицательного сопротивления лампы. В то же время такой источник тока способен работать при незначительном статическом падении напряжения на нем, а значит, и незначительной потере энергии источника питания. На функциональной схеме (рис. 5) он обозначен как ИТ. Требуемое небольшое падение напряжения на ИТ достигается действи-

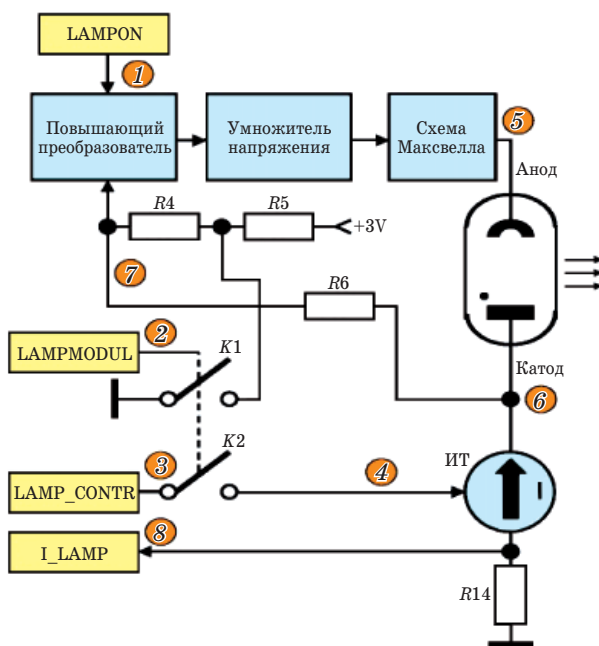


Рис. 5. Функциональная схема блока питания водородной лампы для работы в модуляционном режиме. Пояснение в тексте.

ем следящей обратной связи, охватывающей схему генерации напряжения питания лампы посредством резисторов R4, R5 и R6. Во время состояния, когда лампа выключена (сигнал “2” LAMPMODUL низкий уровень), работа повышающего преобразователя блокирована подачей на его вход напряжения 3,3 вольта благодаря разомкнутому ключу К1. В это время ключ К2 также разомкнут, управляющее напряжение на входе источника тока ИТ равно нулю. Это соответствует практически бесконечному сопротивлению ИТ и разрыву в цепи катода лампы.

При включении лампы (сигнал “2” LAMPMODUL высокий уровень) процессы протекают в две стадии – сначала поджиг разряда в лампе и затем период стационарного горения разряда. Происходит это следующим образом.

При включении лампы ключи К1 и К2 замыкаются. На управляющий вход ИТ поступает сигнал с датчика тока LAMP_CONTR и его сопротивление резко понижается. Поскольку за время паузы плазма в лампе полностью распалась, ток через лампу отсутствует и напряжение на ее катоде равно нулю. Это в свою очередь приводит к образованию большого сигнала ошибки на входе повышающего преобразователя. Благодаря этому повышающий преобразователь включается на полную

мощность и буквально за несколько тактов его рабочей частоты “накачивает” в умножитель напряжения достаточный заряд для возобновления горения плазмы в лампе. Ускоренному поджигу разряда в лампе способствует дополнительный каскад умножителя напряжения, обозначенный на функциональной схеме как “Схема Максвелла”. Она представляет собой обычный диодно-емкостной умножитель напряжения, но с очень малыми по емкости конденсаторами. Поэтому она обеспечивает дополнительное увеличение напряжения питания лампы лишь в отсутствие тока через нее. Когда плазма в лампе возникла и через нее потек ток, эта схема практически не принимает участия в работе устройства.

Поджиг разряда в лампе характеризуется начальным броском тока, затем следящая обратная связь устанавливается в стационарное состояние. Далее схема находится в режиме стационарного горения разряда в лампе. Схема, таким образом, регулирует напряжение на аноде лампы, чтобы на источнике тока падало минимальное, но достаточное для его нормального функционирования напряжение. Оно должно находиться в пределах 5–20 В. Когда импульс управления лампой приходит в состояние “0”, лампа выключается. Как уже было описано выше, это достигается разрывом в цепи катода лампы путем выключения схемы источника тока и блокированием генератора напряжения питания лампы. Благодаря такой “двойной” коммутации удается сохранить энергию в цепях питания лампы и обеспечить тем самым возможность ее быстрого поджига в начале нового цикла.

Натурные испытания водородной лампы в составе флуоресцентного гигрометра

Натурные испытания лампы в составе гигрометра проводились в баллонных экспериментах с высотой подъема измерительной аппаратуры до 20 км, где давление понижалось до 50 гПа. При этом температура атмосферы в процессе полета изменялась от +20 до –90 °С. Температура электроники и ФЭУ поддерживалась в пределах 20 ± 1 °С в течение всего полета.

Подъем измерительной аппаратуры происходит со скоростью 5 м/с, а спуск осуществляется на парашюте с переменной скоростью. Максимальное значение скорости спуска на

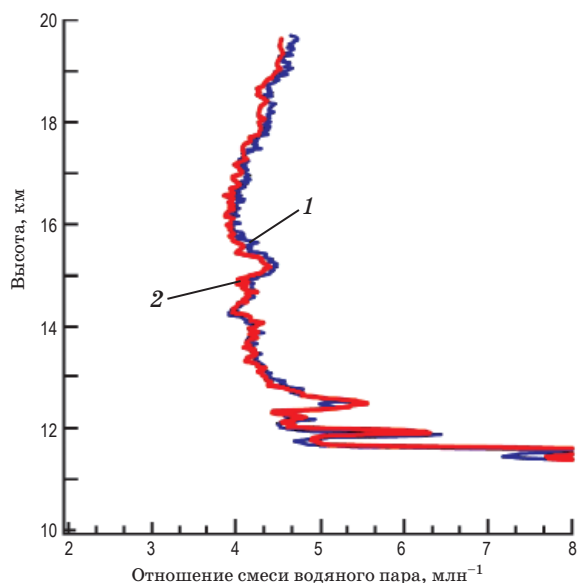


Рис. 6. Вертикальные профили концентрации водяного пара, полученные на подъеме (1) и спуске (2) баллонного гигрометра. Ny-Alesund, 79° с.ш. 21.12.2011.

высотах 20–15 км может составлять значение 40 м/с с последующим замедлением до 5–7 м/с. Таким образом, измерительный прибор на высотах 20–12 км проходит через примерно одну и ту же воздушную массу с интервалом 30 мин.

На рис. 6 представлен вертикальный профиль водяного пара, полученный в пуске гигрометра 12 декабря 2011 года на ст. Нью-Алесунд (Шпицберген). Как упоминалось выше, в конструкции гигрометра FLASH не предусмотрен мониторинг интенсивности водородной лампы в процессе измерения на баллонах, но предприняты меры для стабилизации ее работы в полете (поддержание тока разряда лампы с необходимой точностью, учет температурной зависимости интенсивности лампы, термостатирование электронных блоков). Критерием достаточности этих мер для уверенности в том, что интенсивность водородной лампы не меняется в процессе измерения, может служить факт совпадения данных измерений концентрации водяного пара на подъеме и спуске в стратосфере. Как видно из рис. 6, измеренные значения концентрации водяного пара на подъеме и на спуске хорошо совпадают (расхождение не превышает абсолютной погрешности измерений в $0,2 \text{ млн}^{-1}$).

Заключение

Результаты проведенных лабораторных и натурных испытаний флуоресцентного гигрометра позволяют сделать следующие выводы:

- малогабаритная водородная лампа CDL-1070 удовлетворяет требованиям полетной аппаратуры для баллонного зондирования, обеспечивая стабильные характеристики при работе в температурном диапазоне от +20 до -90 °С и диапазоне давлений 1000–10 гПа, и может быть использована в составе флуоресцентного гигрометра для измерения влажности атмосферы в диапазоне высот 7–30 км;

- при понижении температуры лампы от +20 до -50 °С наблюдается слабое (не более 4–5%) возрастание интенсивности, что обеспечивает общую погрешность измерений гигрометром

не более 10% для условий верхней тропосферы и нижней стратосферы (7–30 км);

- конструкция водородной лампы CDL-1070 дает возможность работать в модуляционном режиме, что позволяет проводить корректный учет паразитного фонового излучения в сигнале гигрометра;

- интенсивность свечения лампы линейно связана с током разряда в диапазоне значений 0–8 мА;

- стабильные характеристики водородной лампы в предстартовых калибровках и в полете позволяют отказаться от мониторинга ее интенсивности в баллонных экспериментах.

Криптоновая лампа CDL-1050 также может быть использована как источник вакуумного фотодиссоциирующего излучения в составе баллонного гигрометра, однако диапазон измерений ограничен значениями 15–30 км.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Kley D., et al. SPARC Assessment of Upper Troposphere and Stratosphere Water Vapour (WCRP-No.113, WMO/TD-No.1043S, SPARC Report № 2, 2000).
2. Kley D., Stone E. Measurements of Water Vapor in the Stratosphere by photodissociation with Ly- α Light // Sci. Instrument. 1978. V. 49. № 6. P. 691–697.
3. Terenin A., Neujmin H. Photodissociation of molecules in Schumann ultraviolet // Nature. 1934. V. 134. № 3381. P. 255.
4. Неуймин Г.Г., Теренин А.Н. Разложение многоатомных молекул под действием Шуманновской радиации // Изв. АН СССР. 1936. № 4. С. 529.
5. Weinstock E.M. et al. A new fast response photofragment fluorescence hygrometer for use on the NASA ER-2 and Perseus remotely piloted aircraft // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 3544–3554.
6. Zoger M. et al. Fast in situ stratospheric hygrometers: a new family of balloon-borne and airborne Lyman alpha photofragment fluorescence hygrometers // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. № 1. P. 1807–1816.
7. Кретова М.В., Хапланов М.Г., Юшков В.А. Резонансно-флуоресцентный гигрометр для измерения влажности в стратосфере // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 3. С. 195–198.
8. Lykov A., Khaykin S., Yushkov V., Korshunov L., Cocquerez F. Observation of water vapour on board long-duration super pressure balloon using FLASH-B Lyman alpha hygrometer. Proceedings of the 19-th ESA Symposium on European Rocket and Balloon. 7–11 June Bad Reichenhall, Germany. 2009. P. 159–164.
9. Dieke G.H., Cunningham S.P. // J. Opt. Soc. Am. 1952. V. 42. № 4. P. 187–189.
10. Woyke T., Schiller C., Schmidt U., Schober T., Zoger M. ZrCo as a new H₂ storage and getter for Lyman alpha radiation sources // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 155–158.
11. Zoger M., Tuitjer F. Lampenkorper fur Plasmaentladungslampen sowie Plasmaentladungslampen (in german), German, Patent DE 197 13019 C1, 1998.
12. Волкова Г.А., Шишацкая Л.П., Яковлев С.А. Принципы построения и основные характеристики мало-мощных ламп для вакуумной ультрафиолетовой области // Оптический журнал. 1995. № 3. С. 66–70.
13. Будович В.Л., Будович Д.В., Полотнюк Е.Б. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 4.
14. Будович В.Л., Мещеров Б.Р., Полотнюк Е.Б. Проточная ионизационная камера для измерения интенсивности источников вакуумного ультрафиолетового излучения // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 92–95.
15. Шишацкая Л.П., Яковлев С.Я., Волкова Г.А. Газоразрядные лампы для вакуумной УФ-области спектра // Оптический журнал. 1995. № 7. С. 72–74.