

А. М. Ражев, Д. С. Чуркин, А. С. Завьялов

Институт лазерной физики СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 13/3, Новосибирск, 630090, РоссияНовосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: razhev@laser.nsc.ru

**ИМПУЛЬСНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР
НА МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОДОРОДЕ**

Впервые создан импульсный индукционный лазер на молекулярном водороде. Описана система формирования импульсного индукционного разряда тороидальной формы для возбуждения электронных уровней молекул водорода. Получена генерация на двух длинах волн – 0,89 и 1,12 мкм. Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных, временных и энергетических характеристик лазерного излучения при различных давлениях и уровнях накачки. Достигнута наибольшая в настоящее время импульсная мощность генерации – 6,7 кВт. Измерена длительность импульсов на полувысоте, которая составила 18 ± 1 нс. Лазерное излучение в поперечном сечении имело форму кольца с внешним диаметром 3,3 см и шириной около 4 мм.

Ключевые слова: импульсный индукционный водородный лазер, спектр генерации, энергия, мощность, длительность.

Введение

Интерес к водородному лазеру, работающему в ближней ИК области спектра, обусловлен тем, что он позволяет получать импульсное когерентное излучение с короткой (наносекундной) длительностью и высокой импульсной мощностью. Такие параметры лазерного ИК излучения в настоящее время уже находят много различных применений в нанотехнологиях, медицине, фотографии, спектроскопии, диагностике и др.

Впервые о создании H_2 лазера сообщалось в 1964 г. [1]. В дальнейшем этот лазер исследовался в [2–6]. В этих работах [1–6] изучались процессы возбуждения лазерных уровней. Основное внимание уделялось спектральному составу излучения и обсуждению механизмов образования инверсии. В работах [1–4] была получена генерация на шести линиях в области спектра 0,85–1,3 мкм. В этих экспериментах было показано, что основная мощность генерации сосредоточена в двух линиях с длинами волн 0,89 и 1,12 мкм. Вся мощность распределялась между ними в соотношении 4 : 1 соответственно. Остальные линии были на 2–3 порядка слабее. В [6] генерация была получена дополнительно еще на одной линии – 1,316 мкм. Было установлено, что все линии

генерации соответствуют системе полос электронного перехода $2s\sigma^1\Sigma_g^+(E) \rightarrow 2p\sigma^1\Sigma_u^+(B)$ (в дальнейшем $E^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+$) молекулы водорода. Специально проведенные исследования [1–5] показали, что основным механизмом создания инверсии является возбуждение лазерных уровней прямым электронным ударом из основного состояния молекулы водорода. При этом распределение инверсии по колебательным уровням полностью соответствует принципу Франка – Кондона.

В [1–6] для возбуждения лазерных уровней молекул водорода и получения генерации использовался импульсный продольный электрический разряд в стеклянных трубках длиной 100–200 см и диаметром от 0,7 до 4,5 см. Вблизи концов трубок в стеклянных отводах располагались электроды различной формы, сделанные из разных материалов. К электродам прикладывалось импульсное напряжение 20–60 кВ с длительностью полупериода разряда около 1 мкс. По торцам трубки герметизировались диэлектрическими или металлическими зеркалами, образующими лазерный резонатор. Добротность резонатора оптимизировалась по максимальной мощности генерации. В [4] была получена импульсная мощность генерации 0,7–1,0 кВт (точно не указана) с длительно-

стью 200 нс. Максимальная импульсная мощность 1,5 кВт была достигнута в [5], при этом длительность импульсов генерации на полувывоте была 100 нс. В этих экспериментах увеличение мощности генерации получалось в результате охлаждения трубки с водородом жидким азотом до температуры 100 К. Вся мощность генерации соответствовала одной линии с длиной волны 0,89 мкм. В [5] упоминалось присутствие в спектре других линий, но об их длинах волн и вкладе в мощность генерации ничего не сообщалось. В [1–4; 6] исследования проводились при комнатной температуре, при этом мощность генерации либо не измерялась, либо была значительно ниже, чем в [5].

Одной из актуальных проблем лазерной физики является поиск новых способов возбуждения активных сред, направленных на повышение эффективности и мощности существующих лазеров, а также создание новых лазеров. Новые способы возбуждения лазеров, в отличие от существующих, должны обеспечивать не только более эффективный ввод энергии в активную среду, но и высокое качество излучения в требуемом спектральном диапазоне. Кроме того, важными являются простота конструкции системы возбуждения и большой ресурс работы квантового генератора.

Для получения эффективной лазерной генерации с новым качеством излучения в работах [7–10] предложено и экспериментально реализовано возбуждение газовых лазеров новым методом – импульсным индукционным тороидальным разрядом. В [7] описан индукционный импульсный лазер на электронных переходах атомов фтора в области 703–731 нм. В [8; 9] сообщалось о получении эффективной генерации на самоограниченных электронных переходах молекулярного азота в УФ области спектра с длинами волн 337,1 и 357,7 нм. В этих экспериментах была достигнута высокая импульсная мощность УФ лазерного излучения – до 300 кВт. В работе [10] описан первый импульсный индукционный лазер на колебательно-вращательных переходах основного электронного состояния молекул CO_2 , где была получена генерация на длине волны 10,6 мкм с энергией более 100 мДж. Первые успешные эксперименты по созданию новых газовых лазеров с импульсной индукционной накачкой, показали перспек-

тивность использования этого способа возбуждения активных сред для исследований и разработки высокоэффективных источников когерентного и некогерентного излучений во всем оптическом диапазоне спектра.

Целью данной работы являлось исследование излучения импульсного индукционного разряда в водороде и получение генерации на электронных переходах молекул H_2 в области 0,8–1,3 мкм. Конечным результатом было увеличение мощности и эффективности генерации этого лазера по сравнению с результатами, полученными в [1–6].

Электронные состояния и переходы в молекулах H_2

Схема кривых потенциальной энергии верхнего, нижнего и основного электронных состояний молекулы водорода показана на рис. 1 [4]. Колебательные уровни отмечены горизонтальными линиями.

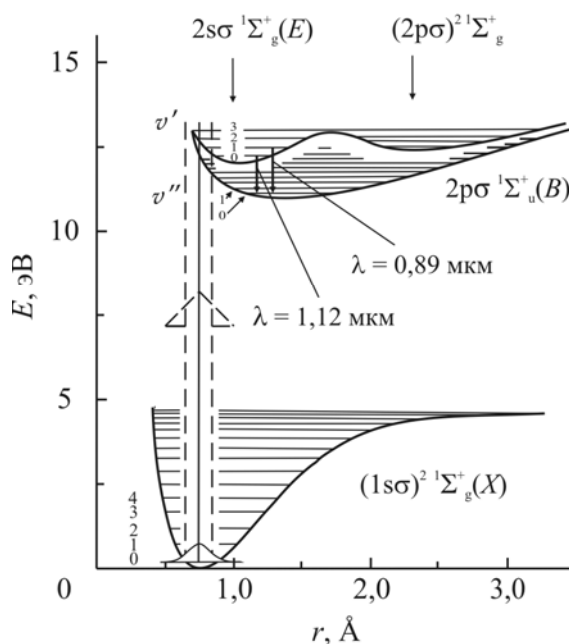


Рис. 1. Кривые потенциальной энергии электронно-колебательных состояний молекулы водорода. По оси абсцисс отложена величина межъядерного расстояния, по оси ординат – энергия

На рисунке видно, что потенциальные кривые этих электронных состояний сильно сдвинуты друг относительно друга. Потенциальная кривая верхнего лазерного уровня,

расчет которой был выполнен в [11], имеет два минимума. В области внутреннего минимума волновая функция этого состояния близка к волновой функции состояния $2s\sigma^1\Sigma_g^+$, а в области внешнего минимума – к волновой функции $(2p\sigma)^2\Sigma_g^+$. Внутренний минимум соответствует экспериментально обнаруженному состоянию, которое мы выше обозначили как $E^1\Sigma_g^+$ состояние, и имеет отношение к данной работе. Внешний минимум $(2p\sigma)^2\Sigma_g^+$ в данном случае является второстепенным. Потенциальная кривая $E^1\Sigma_g^+$ состояния сдвинута относительно основного состояния $X^1\Sigma_g^+$, имеющего равновесное расстояние $0,74 \text{ \AA}$, но существенно меньше, чем $B^1\Sigma_u^+$ состояние с равновесным расстоянием $1,29 \text{ \AA}$. Равновесные межъядерные расстояния отличаются примерно в 1,7 раза. Из других электронных состояний необходимо отметить состояние $2p\pi^1\Pi(C)$, или короче – $C^1\Pi$. Потенциальная кривая этого состояния в своей нижней части практически совпадает с кривой $E^1\Sigma_g^+$ состояния. Основные их параметры очень близки [11]. Переход из $E^1\Sigma_g^+$ состояния в основное $X^1\Sigma_g^+$ состояние запрещен, тогда как $B^1\Sigma_u^+$ и $C^1\Pi$ состояния оптически связаны с основным состоянием. При этом наблюдаются хорошо известные полосы Лаймана и Вернера, лежащие в вакуумной ультрафиолетовой части спектра. В инфракрасной области спектра наблюдается излучение на электронном переходе $E^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+$, которое исследуется в данной работе. В соответствии с правилами отбора $C^1\Pi \rightarrow B^1\Sigma_u^+$ переход запрещен, а переход $E^1\Sigma_g^+ \rightarrow C^1\Pi$ разрешен. Излучение на последнем соответствует диапазону длин волн $80\text{--}100 \text{ мкм}$. Радиационное время жизни $B^1\Sigma_u^+$ и $C^1\Pi$ состояний равно соответственно $1,6$ и $0,5 \text{ нс}$ [4]. Каким-либо сведений о вероятности спонтанного излучения на переходе $B^1\Sigma_u^+ \rightarrow E^1\Sigma_g^+$ и его силе осциллятора нами в литературе не найдено. Из-за больших колебательных и вращательных постоянных при комнатных температурах заселены только несколько нижних вращательных уровней невозбужденного колебательного $X_{v=0}$. При этом заселением верхних колебательных уровней $X^1\Sigma_g^+$ состояния можно пренебречь. Из-за малой частоты импульсов и, следовательно, большого времени между повторяющимися импульсами тока практически все молекулы находятся в состоянии $X_{v=0}$. На основе механизма создания инверсии прямым электрон-

ным ударом при столкновениях молекул водорода с электронами в плазме разряда в соответствии с принципом Франка – Кондона преимущественно должны заселяться высоко лежащие колебательные уровни $B^1\Sigma_u^+$ состояния $v'' = 5, 6, 7, 8, 9$. Низко лежащие колебательные уровни $v'' = 0, 1, 2, 3$ должны заселяться значительно слабее. Для $E^1\Sigma_g^+$ состояния ситуация обратная, и заселение идет в основном на нижние колебательные уровни $v' = 0, 1, 2, 3$. С учетом формы потенциальных кривых наибольшими являются вероятности переходов $E^1\Sigma_g^+ (v' = 0, 1, 2) \rightarrow B^1\Sigma_u^+ (v'' = 0, 1, 2)$. Из изложенного выше следует, что инверсию можно получить только на этих переходах, по крайней мере в начальной стадии разряда, когда энергия электронов максимальна. Именно такая ситуация и наблюдалась в экспериментах [1; 2], где была получена генерация на шести линиях в области от $0,835$ до $1,306 \text{ мкм}$ в полосах $(2, 1)$, $(1, 0)$, $(0, 0)$ и $(0, 1)$, а в работе [6] еще на одной линии – $1,316 \text{ мкм}$ в полосе $(0, 1)$. В спектре генерации были обнаружены лишь P -ветви. В каждой полосе спектр генерации состоял из одной вращательной линии [4].

Индукционный разряд

При проведении исследований в качестве активной среды была использована импульсная индуктивно связанная водородная плазма, или, другими словами, импульсный индукционный разряд в водороде.

Название «индукционный разряд» произошло от названия «вихревой безэлектродный разряд», под которым понимается движение электронов и ионов в переменном электромагнитном поле, т. е. ток проводимости в объеме газа, в котором отсутствуют какие-либо электроды. Впервые такой безэлектродный разряд был исследован в работах [12–14].

Наиболее важные закономерности вихревого безэлектродного (в дальнейшем – индукционного) разряда были изучены и описаны в [15; 16]. В этих работах была показана возможность введения в газовую среду индукционным методом мощностей порядка сотен и тысяч киловатт при достаточно высоких КПД. Было получено, что в газе может быть выделено свыше 50% мощности, потребляемой от питающей сети. При этом форма разрядного пространства

может быть любой. Мощность вводится в газовую среду путем электрической или магнитной индукции или электромагнитного излучения с длинами волн, значительно превышающими размеры молекул. В дальнейшем происходит трансформация этой мощности в химическую, тепловую энергию или энергию светового излучения. Эти свойства индукционных разрядов открывают возможность их широкого применения, в том числе и для создания высокоинтенсивных, экономичных, эффективных источников света. В [7–10] мы взяли за основу описанные выше особенности индукционных разрядов, чтобы использовать их при создании газовых лазеров. Был выбран импульсный режим возбуждения газов индукционным разрядом, так как предполагалось, что в этом случае можно достичь более высокой удельной мощности накачки среды и легче создать инверсию населенностей на переходах атомов и молекул. В работах [7–10] удалось успешно использовать индукционный разряд для селективного возбуждения электронных переходов в атомах и молекулах, в том числе в УФ азотном лазере на самоограниченных электронных переходах молекулы азота, в котором принципиально невозможно получение стационарной инверсии вследствие большого времени жизни нижнего лазерного уровня [17].

Экспериментальная установка

В описанных ниже экспериментах импульсный индукционный разряд создавался с использованием индуктора в виде спирали, расположенного с внешней стороны трубки, заполненной водородом. При определенных условиях образованная в трубке индуктивно связанная плазма, представляющая собой объем, заполненный ионизованным газом, является как бы короткозамкнутым вторичным витком трансформатора. Таким образом, при относительно небольших давлениях газа индукционный разряд как активная среда для лазера будет иметь тороидальную форму. Очевидно, что излучение такого разряда на выходе трубки в поперечном сечении будет иметь форму кольца.

Для регистрации спектров спонтанного и лазерного излучения водорода в области спектра от 0,4 до 1,3 мкм использовался спектрометр фирмы SOLAR LS, модель

S-150 с разрешением 0,66 нм. Регистрация спонтанного излучения проводилась в отсутствие зеркал резонатора. Энергия лазерного излучения измерялась пироэлектрическим измерителем энергии фирмы «Ophir Optronics», модель PE50-BB. Исследования временных характеристик спонтанного излучения и генерации индукционного водородного лазера проводились с использованием коаксиального фотоэлемента ФК-15 и осциллографа TDS 2024 с полосой 200 МГц. Пространственное распределение интенсивности лазерного излучения по сечению трубки и профиль пучка анализировались с использованием цифровой видеокамеры модели WinCamD.

В экспериментах, описанных ниже, были использованы различные трубки из кварца и керамики с внутренним диаметром от 2,2 до 3,4 см. Трубки с толщиной стенок 2–3 мм имели длину 60–80 см. Наиболее интересные результаты были получены в трубке с внутренним диаметром 3,4 см и длиной 80 см. Поэтому все эксперименты были проведены с использованием только этой трубки. Расположенный на ней индуктор состоял из 30 секций, намотанных изолированным многожильным проводом по 6 витков каждая. Секции соединялись параллельно, в результате достигалась минимальная полная индуктивность индуктора. Общая длина индуктора, определявшая длину активной среды лазера, оказалась равной 60 см. По торцам трубка герметизировалась юстировочными узлами, в которых перпендикулярно оси трубки располагались диэлектрические зеркала, образующие лазерный резонатор, представлявший собой открытый интерферометр Фабри – Перо. Добротность резонатора оптимизировалась в ходе экспериментов по максимальной энергии генерации, аналогично тому, как это делалось в работах [7–10].

В качестве активной среды водородного лазера использовался чистый водород. Попытки добавления к водороду других газов (He, Ne, Ar, F₂, NF₃, SF₆, CF₂Cl₂ и др.), а также замена водорода на другие водородсодержащие молекулы не дали положительных результатов. Поэтому приведенные ниже результаты экспериментов относятся к возбуждению импульсным индукционным разрядом чистого водорода.

Электрическая схема системы возбуждения, использованной в данной работе для

формирования импульсного индукционного разряда, показана на рис. 2.

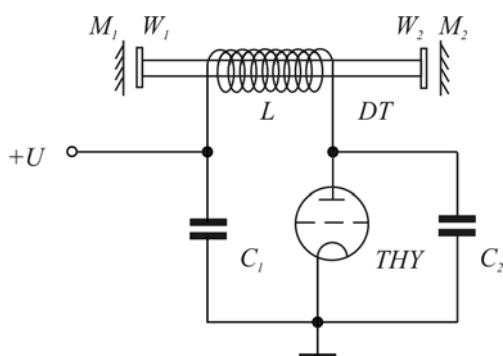


Рис. 2. Электрическая схема системы возбуждения импульсного индукционного разряда в трубке с водородом. $C_1 = 28,6$ нФ; $C_2 = 54,6$ нФ; *THY* – тиратрон модели ТПИ1-10к/50; *L* – индуктор; *DT* – разрядная трубка; W_1, W_2 – плоскопараллельные кварцевые пластины; M_1, M_2 – плоские диэлектрические зеркала

Схема работала следующим образом. Емкости C_1 и C_2 заряжались от источника питания (модель ALE 152A фирмы «Lambda EM») до напряжения 20–30 кВ. Емкость C_2 заряжалась через индуктор *L*. Суммарная энергия, запасаемая в этих емкостях, варьировалась от 18 до 37 Дж. Высоковольтный коммутатор *THY* (тиратрон модели ТПИ1-10к/50) запускался в момент достижения максимума напряжения на емкостях C_1 и C_2 . При включении тиратрона вследствие низкой индуктивности контура, образованного тиратроном и емкостью C_2 , последняя начинала разряжаться через тиратрон быстрее, чем C_1 . При этом происходила смена полярности напряжения на C_2 . Приблизительно через 50 нс, т. е. когда смена полярности осуществлялась полностью, индуктор *L* насыщался, емкость C_1 начинала перезаряжаться на емкость C_2 . В результате такой последовательности работы электрической схемы и перезарядки емкостей C_1 и C_2 на индукторе *L* возникало переменное напряжение. Это приводило к возникновению импульсного индукционного разряда, в котором осуществлялось электронное возбуждение молекул водорода.

Результаты и обсуждение

Импульсный индукционный разряд в водородной трубке был получен при давлениях в диапазоне 0,1–10 торр. В экспериментах исследо-

валась интенсивность излучения индукционного разряда в зависимости от зарядного напряжения и конструкции индуктора *L*. При этом оптический резонатор удалялся, и зеркала M_1 и M_2 заменялись на кварцевые плоскопараллельные пластины W_1 и W_2 . При низких давлениях 0,1–0,5 торр в спектре излучения разряда присутствовали только 4 линии с длинами волн 410; 434; 486 и 656 нм, которые мы отнесли к серии Бальмера атомарного водорода. При дальнейшем повышении давления водорода интенсивность атомарных линий уменьшалась и появлялись линии излучения в области 0,89–1,2 мкм, относящиеся к переходу $E^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+$ молекулярного водорода [1]. Интенсивность линий была различна, наибольшие значения имели линии с длинами волн 0,89 и 1,12 мкм. При установке оптического резонатора с высокой добротностью в данном спектральном интервале на этих линиях была получена генерация. По аналогии с [3] мы отнесли их соответственно к полосам (1, 0) и (0, 0), в каждой из которых генерация происходила только на одной вращательной линии $P(2)$. Интересным результатом этих исследований является тот факт, что в импульсном индукционном разряде такая генерация была получена впервые. В экспериментах исследовались спектральные, временные и энергетические характеристики генерации индукционного водородного инфракрасного лазера. По максимальной энергии генерации оптимизировалась добротность резонатора. Было найдено, что при плотном заднем зеркале с отражением 99 % в области 0,89–1,15 мкм, оптимальное отражение выходного зеркала равно 50 %. Генерация на переходах $E^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+$ молекулярного водорода возникла при давлении 0,5 торр. Максимальная интенсивность ее достигалась при 2,5 торр, затем она уменьшалась и прекращалась при давлениях свыше 3 торр. Спектр генерации индукционного H_2 лазера показан на рис. 3.

Отношение интенсивностей линий зависело от добротности резонатора и давления водорода в трубке. Во всех измерениях интенсивность линии 0,89 мкм была больше, чем линии 1,12 мкм. При максимальной энергии генерации соотношение интенсивностей было равно 6 : 1. Абсолютное значение энергии генерации зависело от зарядного напряжения. Эта зависимость показана

на рис. 4, откуда следует, что максимальная энергия была получена при зарядном напряжении 27 кВ и равнялась 0,12 мДж.

Дальнейшее увеличение напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 от 27 до 30 кВ приводило к снижению энергии генерации H_2 лазера. Причины такого снижения нам пока не известны. Можно, однако, предположить, что для этого лазера существует оптимальный уровень энерговклада, при котором достигается максимальный КПД вложенной в индукционный разряд энергии. При более высоком уровне накачки вследствие высокой плотности электронов разряда начинается тушение верхнего лазерного уровня молекул водорода в результате столкновений с этими электронами. Форма импульсов генерации показана на рис. 5. Измерения длительности импульсов генерации показали, что в исследованном диапазоне давлений она практически не изменялась и на полувысоте была равна 18 ± 1 нс. Вблизи основания длительность увеличивалась почти до 40 нс. Однако во всех случаях эта длительность была значительно меньше, чем в аналогичная в работах [1–6]. Отсюда следует, что получается большая импульсная мощность генерации, которая составляет 6,7 кВт и значительно превышает достигнутую в работах [4; 6].

Генерация H_2 лазера на выходе трубки в поперечном сечении имела форму кольца с внешним диаметром 3,3 см и внутренним около 2,9 см. Более детальные исследования профиля пучка показали, что минимальная интенсивность лазерного излучения находится вблизи поверхности внутренней стенки трубки диаметром 3,4 см. В дальнейшем по направлению от этой поверхности трубки к центру интенсивность генерации увеличивалась и достигала максимума на расстоянии около 1 мм. Затем она убывала почти до нуля на расстоянии около 4 мм от этой поверхности. Таким образом, внутренний диаметр кольца излучения оценивался около 2,6–2,7 см, а диаметр кольца с максимальной интенсивностью лазерного излучения соответствовал приблизительно 3,2 см. Оценки расходимости лазерного излучения показали, что она приблизительно составляет 0,8–1,2 мрад. Кольцевая форма лазерного пучка является особенностью импульсных индукционных лазеров с тороидальным индукционным разрядом [7–10]. Однако это,

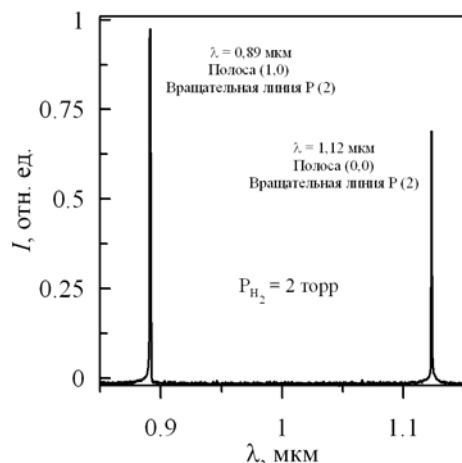


Рис. 3. Относительная интенсивность спектральных линий генерации H_2 лазера при давлении водорода 2 торр и пропускании выходного зеркала $T = 80\%$ на $\lambda = 0,89$ мкм и $T = 40\%$ на $\lambda = 1,12$ мкм

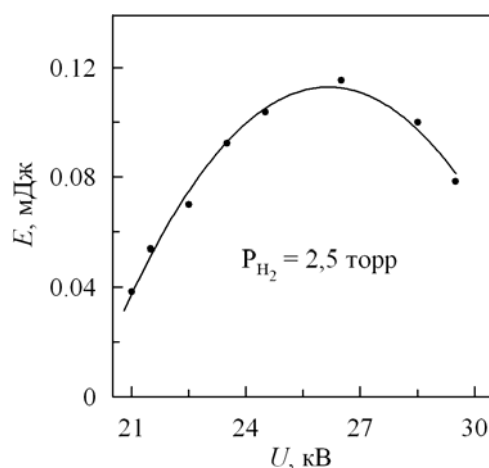


Рис. 4. Зависимость суммарной энергии генерации двух линий индукционного H_2 лазера от зарядного напряжения U

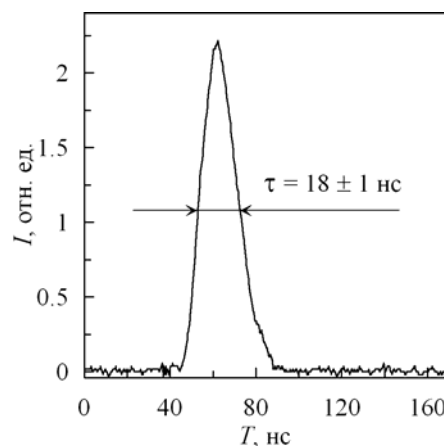


Рис. 5. Типичная осциллограмма импульсов генерации индукционного H_2 лазера на двух длинах волн – $\lambda = 0,89$ мкм и $\lambda = 1,12$ мкм

на наш взгляд, не является недостатком, а наоборот, может иметь определенные преимущества при использовании таких пучков. Кольцевое излучение с малой расходимостью хорошо фокусируется с распределением энергии по сечению пучка в фокусе, подобным бесселевым пучкам [18].

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований впервые создан импульсный индукционный лазер на электронных переходах молекулярного водорода. Получена генерация на двух линиях с динамическими волн 0,89 и 1,12 мкм. Лазерный пучок представлял собой кольцо внешним диаметром 3,3 см и шириной 3–4 мм. Исследованы спектральные, энергетические и временные характеристики лазерного излучения. Достигнута наибольшая в настоящее время импульсная мощность генерации этого лазера – 6,7 кВт. Длительность импульсов излучения на полувысоте была равна 18 ± 1 нс. Измеренная расходимость лазерного излучения составила 0,8–1,2 мрад.

Список литературы

1. Бажулин П. А., Князев И. Н., Петраш Г. Г. Импульсная генерация лазера на молекулярном водороде // ЖЭТФ. 1964. Т. 47, вып. 5. С. 1590–1591.
2. Бажулин П. А., Князев И. Н., Петраш Г. Г. Стимулированное излучение молекул водорода и дейтерия в ближней инфракрасной области спектра // ЖЭТФ. 1965. Т. 49, вып. 1. С. 16–23.
3. Князев И. Н. Вращательная структура спектра генерации молекул водорода и дейтерия // ЖПС. 1965. Т. 3, вып. 6. С. 510–515.
4. Князев И. Н. Исследование физических процессов в импульсных газоразрядных лазерах на молекулах водорода, дейтерия и на первой положительной системе полос молекулы азота // Тр. ФИАН. 1971. Т. 56. С. 119–146.
5. Каслин В. М., Кунькова З. Э., Петраш Г. Г. Генерация в инфракрасной области на линиях молекулярного водорода при охлаждении рабочего газа // Квантовая электроника. 1972. Т. 11, № 5. С. 101–103.
6. Vockasten K., Lundholm T., Andrade O. Laser Lines in Atomic and Molecular Hydrogen // J. Opt. Soc. 1966. Vol. 56. No. 9. P. 1260–1265.
7. Ражев А. М., Мхитарян В. М., Чуркин Д. С. FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, вып. 5. С. 290–294.
8. Ражев А. М., Чуркин Д. С. Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86, вып. 6. С. 479–483.
9. Ражев А. М., Чуркин Д. С., Тарасов Н. С. Исследование параметров генерации индукционного лазера на молекулярном азоте // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 4. С. 113–117.
10. Razhev A. M., Churkin D. S. Pulsed Inductive Discharge CO₂ Laser // Optics Communications. 2009. Vol. 282. No. 7. P. 1354–1357.
11. Davidson E. R. First Excited $^1\Sigma_g^+$ State of the Hydrogen Molecule // J. Chem. Phys. 1961. Vol. 35. No. 4. P. 1189–1202.
12. Tesla N. Electric Discharge in Vacuum Tubes // Electrical Engineer. 1891. July 1st.
13. Thompson J. J. On the Discharge of Electricity through Exhausted Tubes without Electrodes // Phil. Mag. 1981. Vol. 32. No. 5. P. 321–445.
14. Thompson J. J. Conduction of Electricity through Gases: 3rd ed. Cambridge University Press, 1933. Vol. 2: Ionization by Collision and the Gaseous Discharge.
15. Бабат Г. И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы // Вестник электропромышленности. 1942. № 2. С. 1–12.
16. Бабат Г. И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы (окончание) // Вестник электропромышленности. 1942. № 3. С. 2–8.
17. Jeunehomme M., Duncan A. B. F. Lifetime Measurements of Some Excited States of Nitrogen, Nitric Oxide, and Formaldehyde // J. Phys. C. 1964. Vol. 41. No. 6. P. 1692–1699.
18. McGloin D., Dholakia K. Bessel Beams: Diffraction in New Light // Contemporary Physics. 2005. Vol. 46. No. 1. P. 15–28.

A. M. Razhev, D. S. Churkin, F. S. Zavyalov

PULSED INDUCTIVE MOLECULAR HYDROGEN LASER

A pulsed inductive discharge molecular H₂ laser has been created for the first time. The excitation system of a toroidal pulsed inductive discharge for molecular hydrogen electron levels excitation was developed. Generation at two wavelengths of 0,89 and 1,12 μm was obtained. The spectral, temporal and energy parameters of laser emission under various pressures and pumping conditions were investigated. The maximum pulse power of 6,7 kW was achieved. The measured pulse duration was 18 ± 1 ns. In the cross-section, the laser radiation had the ring shape with an external diameter of 33 mm and thickness of 4 mm.

Keywords: pulsed inductive hydrogen laser, generation spectrum, energy, power, duration.