

## ВОДОРОДНЫЙ ЛАЗЕР В ВАКУУМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В. С. Антонов, И. Н. Князев, В. С. Летохов,  
В. Г. Мовшев

Впервые наблюдалась сверхсветимость в вакуумном ультрафиолете на переходах молекулярного водорода и дейтерия при атмосферном давлении. При увеличении давления в спектре сверхсветимости наблюдаются аномалии интенсивности переходов, оканчивающихся на колебательных уровнях вблизи границы диссоциации молекулы  $H_2$ . Обнаружено 10 новых лазерных переходов.

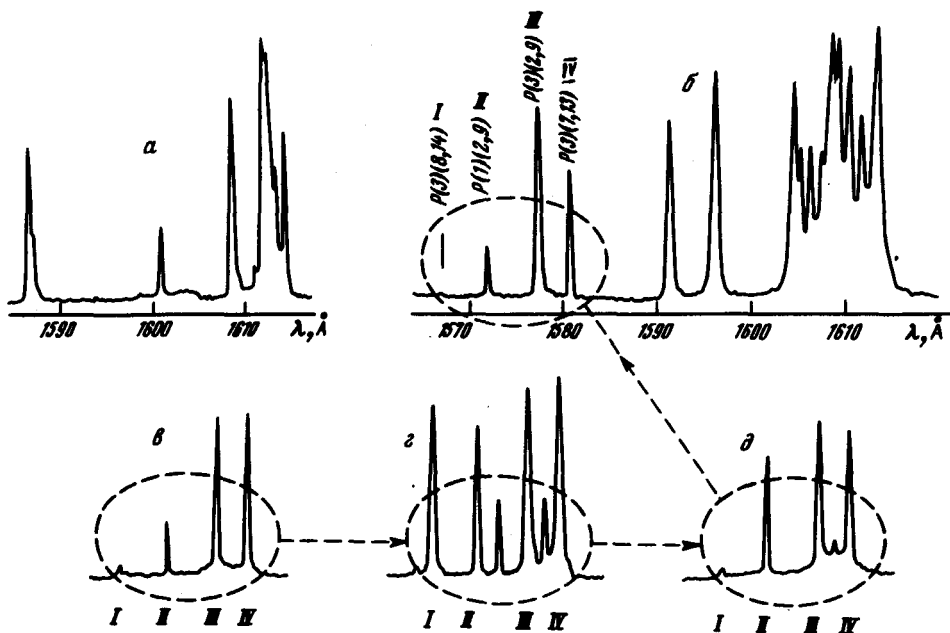
Освоение диапазона вакуумного ультрафиолета (ВУФ) методами квантовой электроники идет по пути создания лазеров мощных импульсов ВУФ когерентного излучения [1, 2] и разработки эффективных методов умножения частоты мощных импульсов видимого диапазона [3, 4]. Одним из перспективных направлений является повышение мощности  $H_2$ -лазера [2] за счет увеличения давления и перехода к четырехуровневой схеме действия [5]. В данной статье сообщается о существенном прогрессе, достигнутом в этом направлении.

Для получения генерации при атмосферном давлении в настоящей работе использовался поперечный разряд в рабочем объеме  $0,006 \times 1 \times 35 \text{ см}^3$  плоской линии Блюмляйна размером  $35 \times 60 \text{ см}^2$  с переменным профилем и волновым сопротивлением  $5 \text{ ом}$  через асимметрично расположенный коммутатор с твердым диэлектриком. Сочетание высокой плотности тока  $j = 10^5 \text{ а/см}^2$  с удовлетворительной пространственной однородностью плазмы приводит к резкому улучшению условий возбуждения лазера в поперечном разряде с узким каналом. В качестве электродов использовались полосы медной фольги толщиной  $50 \text{ мкм}$  с полированными ребрами, наклеенные между отрезками полированного стекла на расстоянии  $1 \pm 0,05 \text{ см}$ . Для визуальной индикации коротковолнового излучения использовалось окно из уранилового стекла с контрольной стеклянной пластинкой, закрепляемое на расстоянии  $15 \text{ см}$  от лазерного канала внутри вакуумной кюветы.

Во всем исследованном интервале давлений до  $1 \text{ атм}$  при напряжении на линии несколько выше порогового  $V_{\text{пор}}$  наблюдается однонаправленное излучение с расходимостью  $\sim 2^\circ$  в плоскости рабочего канала и  $\sim 1^\circ$  в перпендикулярной плоскости. Пороговое напряжение на линии при атмосферном давлении  $V_{\text{пор}} = 28 \text{ кВ}$  лишь в два раза выше, чем при давлении  $p = 0,1 \text{ атм}$ .

Спектры излучения лазерной кюветы на электронном переходе  $B^1 \Sigma_u^+ \rightarrow X^1 \Sigma_g^+$  молекулярного водорода и дейтерия при давлении газа до  $1 \text{ атм}$  регистрировались на приборе ВМС-1 с точностью измерения длин волн  $0,1 \text{ \AA}$ . Микрофотограммы спектров излучения приведены на рисунке. Для наблюдавшегося излучения не соблюдаются соотношения интенсивностей линий, характерных для спонтанного излучения на  $P$ -

и R-ветви, орто- и парамодификации, различных колебательных переходов. Из общего числа в несколько сотен линий спонтанного излучения молекулярного водорода излучение лазерной кюветы содержит лишь 23 линии.



Микрофотограммы спектра сверхсветимости водорода и дейтерия: а —  $D_2$ , 0,6 атм,  $V = 80$  кВ; б —  $H_2$ , 1 атм,  $V = 80$  кВ; в —  $H_2$ , 0,1 атм,  $V = 20$  кВ; г —  $H_2$ , 0,1 атм,  $V = 40$  кВ; д —  $H_2$ , 0,3 атм,  $V = 80$  кВ

При изменении давления газа и напряжения на линии характерное соотношение интенсивностей линий излучения лазерной кюветы в целом сохраняется. Исключение составляют переходы  $P(3)(8,14)$  и  $P(3)(7,13)$  (линии I и IV на рисунке), оканчивающиеся на уровнях вблизи границы диссоциации. При низком давлении газа (рис. в и г) относительно слабая линия I при увеличении напряжения становится сравнимой с наиболее интенсивными линиями в спектре, например, линией III. Меняется соотношение интенсивностей линий I и II, первая становится более интенсивной. Увеличение давления газа сопровождается постепенным общим ослаблением интенсивности линий. Особенно резко ослабляется линия I, отсутствующая в спектрах при  $p \gtrsim 0,3$  атм. Изменяется соотношение линий III и IV (рис. г, д, б), последняя становится менее интенсивной.

Наблюдались новые линии лазерного излучения на следующих длинах волн для водорода:  $1494,2 \text{ \AA} - P(3)(11,14)$ ;  $1565,5 \text{ \AA} - R(1)(8,14)$ ;  $1574,3 \text{ \AA} - P(2)(2,9)$ ;  $1614,8 \text{ \AA} - P(4)(5,12)$ ;  $1616,5 \text{ \AA} - P(5)(5,12)$ ; для дейтерия:  $1589,0 \text{ \AA}$ ;  $1592,3 \text{ \AA}$ ;  $1602,1 \text{ \AA}$ ;  $1606,3 \text{ \AA}$ ;  $1609,5 \text{ \AA}$  (линии  $D_2$  не идентифицированы из-за отсутствия данных о спектре спонтанного излучения). В оптимальных условиях возбуждения энергия лазерного импульса, измеренная вакуумным калиброванным термостолбиком, составляет  $\sim 0,5$  мдж.

Однонаправленность, малая расходимость излучения, общий вид наблюдавшегося спектра излучения являются однозначными признаками сверхсветимости при возбуждении в режиме бегущей волны.

При изменении давления газа и напряжения на разрядном промежутке относительная скорость возбуждения колебательно-вращательных уровней в пределах одного электронного состояния практически не меняется и характерное соотношение интенсивностей линий сверхсветимости должно оставаться неизменным. Наблюдавшееся аномальное возрастание интенсивности линии  $P(3)(8,14)$  при увеличении напряжения, по-видимому, связано с влиянием диссоциативной дезактивации. Столкновительное время жизни уровня  $v'' = 14, J'' = 3$  за счет прямых переходов в непрерывный спектр и на преддиссоциирующие уровни при соударениях  $\tau_{14,3}^{CT} \approx [2^{1/2} N_0 \pi (r_0 + r_{v''})^2 v]^{-1} \exp(\Delta \mathcal{E}_{14,3}/kT) \approx 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ сек} \cdot \text{атм}$  ( $r_0, r_{v''}$  — эффективные радиусы молекулы в основном и возбужденном колебательном состоянии,  $\Delta \mathcal{E}_{14,3} \approx 100 \text{ см}^{-1}$  — энергия, необходимая для перехода в континуум). При  $p = 0,1 \text{ атм}$  это время меньше радиационного времени жизни верхних рабочих состояний ( $\tau_{14,3}^{CT} \approx 0,4 \text{ нсек} < \tau_{\text{рад}} = 0,8 \text{ нсек}$ ). За счет этого время существования инверсии для перехода  $P(3)(8,14)$  существенно больше, чем для остальных переходов, являющихся самоограниченными. Увеличение напряжения на линии Блюмляйна в определенных пределах приводит к возрастанию эффективной длительности импульса возбуждения и, как следствие, к увеличению относительной энергии излучения на линии  $P(3)(8,14)$ . Наблюдавшийся спад интенсивности линий  $P(3)(8,14) \text{ H}_2$  и  $P(3)(7,13) \text{ H}_2$  при увеличении давления, по-видимому, связан с уменьшением коэффициента усиления из-за ударного уширения линий, наибольшего именно для уровней  $v'' = 13, 14$ .

Наблюдавшиеся в экспериментах сравнительно низкие пороги возбуждения при  $p = 1 \text{ атм}$  свидетельствуют об отсутствии существенного самотушения молекул водорода<sup>1)</sup>. Формирование бегущей волны сверхсветимости на длине  $30 \text{ см}$  означает, что длительность импульса излучения существенно меньше  $L/c \approx 1 \text{ нсек}$  ( $L = 35 \text{ см}$ ). При энергии импульса  $0,5 \text{ мдж}$  это соответствует пиковой мощности более  $1 \text{ Мвт}$  и плотности мощности  $200 \text{ Мвт/см}^2$  на выходном отверстии кюветы.

Малая эффективная длительность импульса возбуждения, связанная с быстрым спадом электрического поля и энергии электронов в разрядном промежутке в момент пробоя, не позволяет проявиться основному преимуществу четырехуровневой схемы — отсутствию ограничения на длительность существования усиления и генерации. В связи с этим для возбуждения четырехуровневого столкновительного водородного лазера высокого давления целесообразно перейти к использованию сильноточных электронных пучков, полностью лишенных этого недостатка и обеспечивающих более высокий уровень накачки.

Институт спектроскопии  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
2 апреля 1973 г.  
После переработки  
16 апреля 1973 г.

<sup>1)</sup> Это открывает возможность создания  $\text{H}_2$  ВУФ лазера при более высоких давлениях.

## Литература

- [ 1 ] Н.Г.Басов, В. А.Данилычев, Ю.М.Попов, Д.Д.Ходкевич. Письма в ЖЭТФ, 12, 473, 1970.
  - [ 2 ] R.T.Hodgson. Phys. Rev. Lett., 25, 494, 1970; R.W.Waynant, J.D.Shipman, R.C.Elton, A.W.Ali. Proc. IEEE, 59, 679, 1971.
  - [ 3 ] А.Ф.Акманов, С.А.Ахманов, Б.В.Жданов, А.И.Ковригин, Н.К.Подсотская, Р.В.Хохлов. Письма в ЖЭТФ, 10, 244, 1969.
  - [ 4 ] S.E.Harris, R.V.Miles. Appl. Phys. Lett., 19, 385, 1971.
  - [ 5 ] I.N.Knyazev, V.S.Letokhov, V.G.Movshev. Opt. Comm., 6, 424, 1972.
-