

Л. Я. ЕФРЕМЕНКОВА, Б. М. СМЕРНОВ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ ЛАЗЕР НА ЛАЙМАНОВСКОМ ПЕРЕХОДЕ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 11 VIII 1971)

1. Существующие в настоящее время лазеры (¹, ²), генерирующие излучение в далеком ультрафиолете ($\lambda = 1600 \text{ \AA}$), созданы на переходе молекулярного водорода. Лазер этого типа работает в импульсном режиме и в основе его действия лежит то, что в предрибойном режиме газового разряда резонансно возбужденные электронные уровни молекулы заселяются сильнее, чем колебательно возбужденные уровни основного электронного состояния молекулы. В работе (³) сделана попытка получить импульс лазерного излучения длиной волны около 1760 \AA при облучении жидкого ксенона мощным пучком быстрых электронов.

Данная работа посвящена конкретному расчету параметров лазера, работающего на переходе между резонансно возбужденным и основным состоянием атома водорода ($\lambda = 1216 \text{ \AA}$). Рабочим веществом данного лазера является инертный газ с примесью молекулярного водорода, он должен возбуждаться газовым разрядом и может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Механизм работы рассматриваемого лазера состоит в следующем (⁴). Диссоциативная рекомбинация электронов и молекулярных ионов типа AH^+ (A — атом инертного газа), имеющих в газовом разряде, приводит к образованию быстрых возбужденных атомов водорода $\text{H}(2p)$: генерация возникает на крыле линии перехода $2p - 1s$ атома водорода. Это связано с тем, что быстрых возбужденных атомов водорода больше, чем быстрых атомов водорода в основном состоянии.

2. Проведем оценку параметров лазера, механизм работы которого связан с диссоциативной рекомбинацией электронов и молекулярных ионов. Прежде всего нужно подобрать молекулярные ионы, которые удовлетворяли бы следующим требованиям. Во-первых, если это ионы двухатомных молекул, то они должны состоять из разных частиц, ибо, в противном случае, при диссоциативной рекомбинации одновременно с быстрым возбужденным атомом образуется быстрый атом в основном состоянии. Во-вторых, эти ионы должны интенсивно образовываться в разряде, т. е. их энергия диссоциации должна быть достаточно велика. Далее, диссоциативная рекомбинация этих ионов должна приводить к образованию резонансно возбужденных атомов. Этим требованиям отвечают ионы AH^+ . Молекулярные ионы, состоящие из протонов и атомов инертного газа, обладают достаточно большой энергией диссоциации. В табл. 1 приводятся энергии диссоциации молекулярных ионов и методы получения этих результатов.

Данные табл. 1 для энергий диссоциации свидетельствуют о том, что диссоциативная рекомбинация ионов AH^+ приводит к образованию возбужденных атомов водорода с главным квантовым числом $n = 2$. Переход в другие состояния при малой энергии электронов не происходит в силу закона сохранения энергии. Диссоциативная рекомбинация протекает эффективно, если терм молекулы AH^* пересекает терм молекулярного иона вблизи дна потенциальной ямы. Из атома возбужденного водорода с $n = 2$ и атома инертного газа можно составить три электронных состояния системы AH^* , одно из которых для ряда инертных газов пересекается с термом AH^+ . Это приведет к эффективной диссоциативной рекомбинации та-

Молекулярный ион	HeH ⁺	Метод	NeH ⁺	Метод	ArH ⁺	Метод	KrH ⁺	Метод
Энергия диссоциации, эв	1,85 ⁽⁶⁾	1	2,15 ⁽⁵⁾	1	2,65 ⁽⁷⁾	3	3,0 ⁽⁸⁾	2
	1,84 ⁽⁷⁾	3	2,08 ⁽⁷⁾	3	2,48 ⁽⁸⁾	1		
	2,04 ⁽⁸⁾	2	1,8 ⁽⁹⁾	2	3,0 ⁽⁹⁾	2		

Примечание. Метод нахождения энергии диссоциации: 1 — расчет, 2 — обработка данных по увругому рассеянию протона на атомах инертного газа, 3 — ион-молекулярные реакции.

ких ионов AN⁺ с электроном, в результате которой образуются быстрые атомы водорода в состоянии 2*p*. Эффективность рекомбинации можно увеличить и путем изменения средней энергии рекомбинирующих электронов в разряде.

3. Проследим за кинетикой процессов, происходящих в рассматриваемом лазере, рабочим веществом которого является инертный газ с примесью водорода. При зажигании разряда ионы в такой смеси первоначально образуются при ионизации атомов инертного газа:



Молекулярные ионы AN⁺ появляются в результате ионно-молекулярных реакций, которые происходят весьма эффективно в случае аргона (¹⁰⁻¹²), криптона (^{12, 13}), ксенона (¹²):



В случае гелия и неона молекулярные ионы образуются в результате реакций возбужденного атома с молекулярным водородом (^{10, 12}):



Молекулярные ионы рекомбинируют с электронами, что приводит к образованию быстрых возбужденных атомов водорода с кинетической энергией, составляющей десятые доли электронвольта:



(знак ~ отвечает быстрой частице).

Константа диссоциативной рекомбинации $\alpha \sim (10^{-7} - 10^{-6}) \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$.

Другой, «вредный», механизм разрушения молекулярных ионов AN⁺ обусловлен ион-молекулярными реакциями (^{9, 15})



Образующийся в результате диссоциативной рекомбинации быстрый возбужденный атом водорода отвечает верхнему лазерному уровню, а нижнему уровню соответствует быстрый атом водорода в основном состоянии. Лазер работает на переходе



Время спонтанного излучения (¹⁶) $\tau = 1,6 \cdot 10^{-9}$ сек, длина волны перехода равна 1216 Å. Так как генерация определяется излучением быстрых атомов, то лазерное излучение будет представлено в виде двух линий, отстоящих друг от друга на расстоянии $\lesssim 0,1$ Å (скорость быстрых атомов водорода $\sim 10^6$ см/сек).

Следующий процесс, связанный с разрушением частиц на нижнем лазерном уровне, отвечает торможению быстрых атомов водорода при соуда-

рени с атомами инертного газа:



Далее, медленные атомы водорода рекомбинируют на стенках разрядной трубки с образованием молекулярного водорода:



4. Оценим параметры рассматриваемого лазера, исходя из кинетики происходящих в данной системе процессов. Мы рассмотрим непрерывный режим работы лазера — импульсный достигается более простыми средствами.

1) Условие создания инверсной заселенности следует из уравнения баланса для плотности \tilde{N}_H быстрых атомов водорода, образующихся и разрушающихся в результате процессов (5), (6). Это уравнение имеет вид

$$\frac{d\tilde{N}_H}{dt} = \frac{\tilde{N}^*}{\tau} - \tilde{N}_H N_A k_{\text{упр}} = 0,$$

где \tilde{N}^* — плотность быстрых возбужденных атомов, $\tau = 1,6 \cdot 10^{-9}$ сек — время жизни возбужденного атома водорода, N_A — плотность атомов инертного газа, $k_{\text{упр}}$ — константа упругого столкновения атома водорода с атомом инертного газа. Условие $\tilde{N}^* > \tilde{N}_H$ инверсной заселенности уровней дает для плотности атомов инертного газа

$$N_A > 10^{18} \text{ см}^{-3}. \quad (8)$$

2) Из условия генерации оценим плотность возбужденных атомов водорода. Условие генерации имеет вид $k_0 l \geq \gamma$, где k_0 — показатель усиления активной среды в центре линии перехода, $l \sim 1$ м — длина разрядной трубки, $\gamma \sim 0,1$ — суммарные потери излучения, связанные с потерями на зеркалах и выходом лазерного излучения. Считая уширение линии излучения доплеровским, получим для плотности возбуждения атомов водорода, при которых лазер работает,

$$N^* \sim 10^8 \text{ см}^{-3}. \quad (9a)$$

Исходя из уравнений баланса для плотности возбужденных атомов водорода (3), оценим плотность электронов в разряде

$$N_e \sim \left(\frac{N^*}{\alpha \tau} \right)^{1/2} \geq 10^{12} \text{ см}^{-3}. \quad (9b)$$

При этом была использована величина $\alpha \sim 10^{-7}$ см³/сек для коэффициента рекомбинации и полагалось, что плотность молекулярных ионов порядка плотности электронов. Заметим, что при оптимальных условиях работы лазера основной сорт ионов в разряде может быть связан с ионом A^+ , а не с молекулярным ионом AH^+ .

3) Исходя из условия, чтобы молекулярные ионы разрушались в результате диссоциативной рекомбинации, а не в результате ухода на стенки, получим

$$N_e N_A t_0^2 \geq 10^{27} \text{ см}^{-4}, \quad (10)$$

где N_e — плотность электронов, R_0 — радиус разрядной трубки. Это дает $R_0 > 0,1$ см.

4) Потребовав, чтобы процесс (3) преобладал над процессом (4), т. е. чтобы разрушение молекулярных ионов приводило к образованию возбужденных атомов водорода, получим, считая константу процесса (4) порядка $(^{13}) 10^{-10}$ см³ сек⁻¹,

$$N_e / N_{H_2} \geq 10^{-3}. \quad (11)$$

5. Проведенные оценки позволяют выяснить условия, при которых работает рассматриваемый лазер. Как следует из результатов (8) — (11), разрядная трубка наполняется инертным газом под давлением в несколько десятков тор с примесью молекулярного водорода при парциальном давлении водорода порядка сотых долей тор. В этом газе зажигается разряд с плотностью тока порядка 1 а/см^2 . Преимущество рассматриваемого лазера, генерирующего излучение далекого ультрафиолета, по сравнению с существующими в том, что он может работать в непрерывном режиме. Если нагревание газа в процессе работы лазера потребует использования импульсного режима, то и в этом случае длительность импульса лазера, определяемая тепловыми эффектами, будет выше, чем у существующих ультрафиолетовых лазеров.

Поступило
18 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ R. W. Waynant, J. D. Shipman et al., Appl. Phys. Lett., **17**, 383 (1970).
² Opt. Spectr. Oct., **17** (1970). ³ Н. Г. Басов и др., Письма в ЖЭТФ, **12**, 473 (1970).
⁴ Б. М. Смирнов, ДАН, **183**, 554 (1968). ⁵ V. W. Kaul et al., Zs. Naturforsch., **16a**, 624 (1961). ⁶ H. H. Michels, J. Chem. Phys., **44**, 3834 (1966). ⁷ W. A. Chupka, M. E. Russell, J. Chem. Phys., **49**, 5426 (1968). ⁸ F. A. Herrero, E. M. Nemeth, F. L. Bailey, J. Chem. Phys., **50**, 4591 (1969). ⁹ R. L. Champion et al., Phys. Rev., **2A**, 2327 (1970). ¹⁰ N. G. Adams et al., J. Chem. Phys., **52**, 1951 (1970).
¹¹ F. C. Fehsenfeld et al., J. Chem. Phys., **46**, 2802 (1967). ¹² V. Aquilanti et al., J. Chem. Phys., **43**, 1969 (1965). ¹³ D. P. Stevenson, D. O. Schissler, J. Chem. Phys., **29**, 282 (1958). ¹⁴ С. Е. Куприянов, Автореф. докторской диссертации, М., 1970. ¹⁵ E. W. McDaniel et al., Ion-molecule Reactions, N. Y., 1970. ¹⁶ Г. Бете, Э. Солпитер, Квантовая механика атомов, М., 1960.