

УДК: 539.196; 535.37

Э.Г. БАТЫРБЕКОВ

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ КСЕНОНОВОГО ЛАЗЕРА С ПРЯМОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

В настоящее время генерация с прямой ядерной накачкой получена на шести различных переходах системы 5d-6p переходов атома ксенона. Наиболее интенсивными из них являются переходы с длинами волн 1.732, 2.026 и 2.652 мкм (см. рис. 1). В качестве источников накачки использовались продукты ядерных реакций $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})\text{F}$ и $\text{He}(\text{n},\text{p})\text{T}$.

Совместно с сотрудниками Иллинойского университета и ФЭИ (г. Обнинск) нами была впервые получена генерация на 5d-6p переходах XeI с $\lambda = 1,73$ мкм с возбуждением продуктами ядерной реакции $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ [1].

Характерной особенностью поведения сигнала генерации, обнаруженной в наших экспериментах, было то, что импульс генерации, обрывался до достижения нейтронным импульсом накачки своего максимума. Обрыв импульса генерации начинался при критическом значении энергии накачки 80 мДж/см³. Аналогичное поведение импульса генерации Ar-Xe лазера наблюдалось другими исследователями при использовании слоев урана, как источника заряженных частиц [2].

Связывать обсуждаемый температурный эффект с перемешиванием рабочих состояний атомов ксенона при столкновении с электронами не представляется, на наш взгляд, логичным. Существенное снижение параметров лазера наблюдается лишь при высокой мощности накачки порядка 500 Вт/см³ и более, т.е. когда концентрация электронов достаточно высока. Но это не объясняет перегрева при малых мощностях накачки $W < 50$ Вт/см³.

Утверждение, сделанное авторами сообщения [3], что срыв генерации при нагреве активного элемента происходит вследствие десорбции молекул воды со стенок лазерной кюветы и «загрязнений» ими активной среды лазера, так же вызывает сомнение.

На рис. 2 приведены результаты расчетов влияния присутствия кислорода на концен-

трацию и температуру электронов в ядерно-возбуждаемой (He)-Ar-Xe плазме. Как видно, влияние электроотрицательной добавки на основные параметры плазмы через процессы, определяющие ионный баланс в (He)-Ar-Xe смесях, незначительно при концентрациях кислорода до 10^{16} см⁻³, что позволяет предположить, что влияние электроотрицательных примесей на параметры ядерно-возбуждаемой плазмы не является основной причиной срыва генерации.

Вопрос о механизмах формирования инверсии в лазерах высокого давления на ИК переходах атома ксенона до сих пор является объектом постоянной научной дискуссии.

Существуют две основные гипотезы процесса накачки 5d уровней атома ксенона в смеси Ar-Xe. Первая предполагает заселение верхних лазерных уровней в процессах диссоциативной рекомбинации иона ArXe^+ с электронами. Вторая гипотеза — диссоциативная рекомбинация иона Xe_2^+ .

Заселение 5d уровней ксенона через процесс диссоциативной рекомбинации иона ArXe^+ хорошо описывает результаты экспериментов с электронным пучком при высоких мощностях энерговклада, когда плотность электронов достаточно велика и процесс рекомбинации ArXe^+ вне конкуренции. В случае ядерной накачки, когда мощность энерговклада мала и концентрация электронов порядка 10^{13} см⁻³, скорость этого процесса много меньше скорости конверсии иона ArXe^+ в ион Xe^+ .

Наиболее успешно описываются экспериментальные зависимости при ядерной накачке с помощью модели, базирующейся на утверждении, что накачка 5d уровней атома ксенона происходит в основном по двум каналам: — через процесс передачи возбуждения от возбужденных атомов и молекул аргона атомам Xe с последующим тушением атомным ударом высоковозбужденных атомов ксенона в состоя-

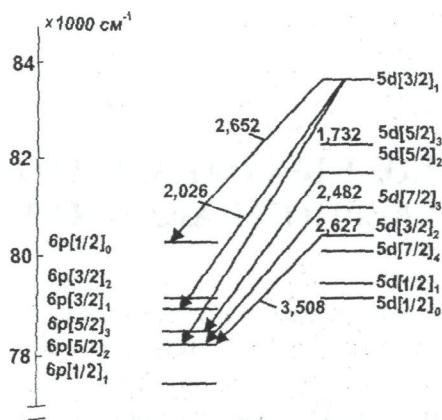


Рис. 1. Диаграмма 5d-6p переходов атома ксенона

ния 5d и через диссоциативную рекомбинацию возбужденного молекулярного иона (Xe^+) с электроном. Причем последний канал является основным, с вероятностью заселения уровня $5d[3/2]_0$ до 90% [4].

Энергия связи гетероядерного иона ArXe^+ невелика $D = 0.18 \text{ эВ}$ [5], поэтому даже при нормальных условиях константа скорости реакции разрушения гетероядерного иона при столкновении с атомами буферного газа оценивается достаточно большим значением $\sim 5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. В конечном счете, в плазме устанавливается динамическое равновесие между концентрациями ионов Xe^+ и ArXe^+ . При нормальных условиях последнее обстоятельство не препятствует достижению высокого КПД ксенонового лазера, поскольку скорость конверсии атомных ионов ксенона в гетероядерные ионы много больше, чем скорость остальных процессов с участием Xe^+ .

Константа скорости реакции разрушения гетероядерного иона при столкновении с атомами буферного газа должна зависеть от температуры среды T по экспоненциальному закону $k_{\text{dist}} = k \exp(-D/T)$. Следовательно, даже при сравнительно небольшом повышении температуры активной среды скорость этой реакции существенно возрастает, и равновесие между атомными и молекулярными гетероядерными ионами ксенона смещается в сторону снижения концентрации последнего.

Нами было так же учтено в расчетах изменение температуры газовой смеси с изменением энерговклада в активную среду. На рис. 3 и 4 представлены результаты таких расчетов для

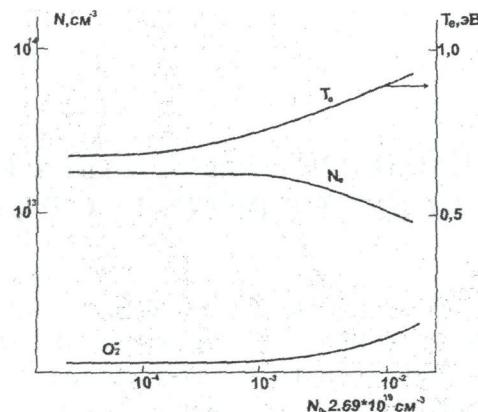


Рис. 2. Влияние присутствия кислорода на концентрацию и температуру электронов

некоторых параметров плазмы смесей инертных газов $\text{He}-\text{Ar}-\text{Xe}$ и $\text{Ar}-\text{Xe}$ с учетом показанной выше температурной зависимости константы k_{dist} . Как следует из рисунков рассмотренный механизм разрушения ионов ArXe^+ с атомами буферного газа действительно может объяснить наблюдаемое резкое ухудшение параметров лазера при нагреве активной среды на несколько сотен градусов.

Различие в степени зависимости энергии лазерного излучения в активной среде Xe лазера для разных длин волн $\lambda = 1,73; 2,03$ и $2,6 \text{ мкм}$ от начальной температуры и состава активной среды было продемонстрировано в работе [6]. Наибольшая зависимость была обнаружена для перехода с $\lambda = 1.73 \text{ мкм}$. Для перехода с длиной волны $\lambda = 2.6 \text{ мкм}$ температурная зависимость оказалась более слабая, чем для линии с $\lambda = 2.03 \text{ мкм}$. С точки зрения состава активной среды наиболее сильная зависимость выявлена для $\text{He}-\text{Xe}$ (400:1) смеси. На этом основании сделан вывод, что причиной наблюдаемого эффекта не являются оптические неоднородности, т.к. для гелиевых сред оптические эффекты, как правило, минимальны.

Чтобы понять степень влияния газовой тепловой линзы, были проведены расчеты газодинамических процессов в лазерной кювете. Расчеты изменения распределения плотности и температуры активной среды лазера по диаметру лазерной трубки во время нейтронного импульса показали, что в течение 10 мс, когда происходит срыв генерации, неоднородность температуры, и, следовательно, неоднородность распределения плотности газа не столь значи-

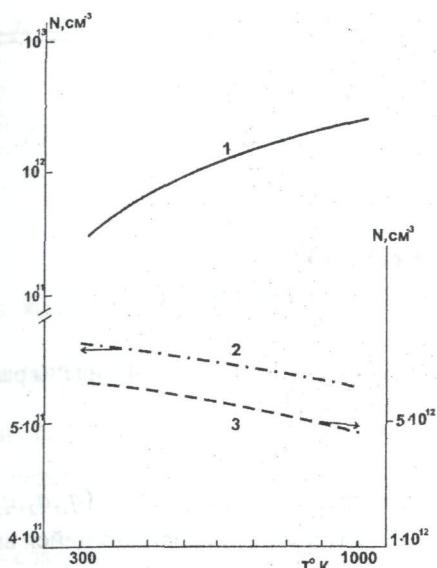


Рис. 3. Влияние температуры среды на концентрацию Xe^+ (1), ArXe^+ (2), Xe^+ (3) в смеси $\text{Ar:Xe}=5:0,01$, $P=0,5 \text{ atm}$, $W=50 \text{ Bt cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

тельны. Однако происходит увеличение самой температуры. Согласно расчетам, срыв генерации происходит при температуре активной среды лазера 530К, что согласуется с результатами экспериментального исследования влияния температуры на выходные характеристики лазера с прямой ядерной накачкой поверхностными источниками заряженных частиц [6,7].

Экспоненциальная зависимость константы скорости реакции разрушения гетероядерного иона ArXe^+ при столкновении с атомами буферного газа от температуры активной среды Т так же объясняет продемонстрированное положительное влияние отрицательных начальных температур активной среды на энергетические параметры ксеноновых лазеров с прямой ядерной накачкой [8]. Таким образом, выполненные на данном этапе исследования подтверждают обнаруженную в экспериментах сильную температурную зависимость параметров лазеров на 5d-6p переходах атомов ксенона, как следствие экспоненциального возрастания скорости разрушения гетероядерных ионов ArXe^+ при столкновениях с атомами буферного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Batyrbekov E.G., Poletaev E.D., Miley G.H. // Transactions of Conference on CLEO'94, 8-13 May 1994, Anaheim, CA, USA, P.120.

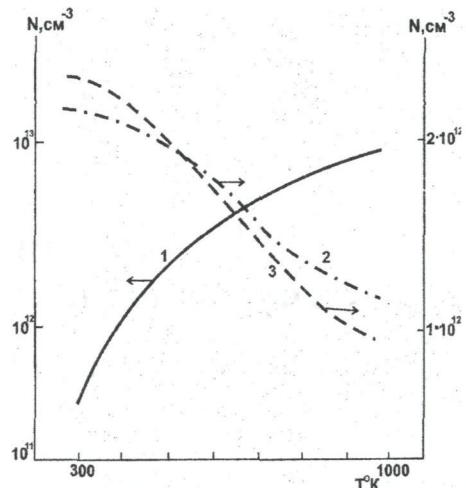


Рис. 4. Влияние температуры среды на концентрацию Xe^+ (1), ArXe^+ (2), Xe^+ (3) в смеси $\text{He:Ar:Xe}=5:5:0,01$, $P=1 \text{ atm}$, $W=50 \text{ Bt cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

2. Alford W.J. and Hays G.H. Measured Laser Parameters for Reactor-Pumped He-Ar-Xe and Ar-Xe Lasers// J. Appl. Phys., 1990, V. 65, № 10, P. 3760.

3. Мавлютов А.А., Миськович А.И., Саламаха Б.С.// Труды Международной конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы ЛЯН». Арзамас-16, 1995, Т.1, С.318-328.

4. Apruzese J.P., Giuliani J.L., Wolford M.F. et.al.// Appl. Phys. Lett. 2006, v.88, N.12, P.121-120.

5. Dehmer P.M., Pratt S.T.// J. Chemical Physics, 1982, V.77, 4804-4817.

6. Магда Э.П., Гребенкин К.Ф. и др.// Письма в ЖТФ, 1992, Т.18, В.5, С.96

7. Konak A.I., Melnikov S.P., Porkharev V.V., Sinyanskii A.A.// Laser and Particle Beams, 1993, V.11, P.4-12.

8. А.А. Арадушкин, А.В. Бочков, А.В. Загидуллин и др. Тезисы докладов IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные лазеры», г. Обнинск 2007 с.40.

Резюме

Тікелей әдіспен ядролық толтырулы лазердің ксенонды атомарлы ауысуларда соғулениң шығу сипаттамаларына температурадан төуелділігі зерттелген. Дөлел бойынша, ен жоғары деңгейге жеткенде генерацияның үзілүі, біріншіден жылдамдық реакциясының константасы температуралық төуелділігін және гетероядерлық ArXe^+ ионының жылдамдық реакциясы буфер газының атомдарымен соқтығыс кезінде байқалады.

Summary

As shown, the generation failure up to achievement of a pumped neutron stream its' maximum point is caused firstly by temperature dependence of a constant of destruction reaction speed of heteronuclear ArXe^+ ion at collision with atoms of buffer gas.

Поступила 10.07.08