

# ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КСЕНОН-СОДЕРЖАЩИХ ЯДЕРНО-ВОЗБУЖДАЕМЫХ СМЕСЕЙ

Интерес к исследованию ядерно-возбуждающей плазмы ксенонового лазера определен в первую очередь тем, что в настоящее время продемонстрирована возможность преобразования ядерной энергии в энергию когерентного оптического излучения на атомарных 5d-6p переходах ксенона как с прямой, так и с комбинированной ядерными накачками. Причем, ксеноновому лазеру с ядерной накачкой принадлежат все рекордные для лазеров с прямой ядерной накачкой выходные характеристики [1]. В случае комбинированной ядерной накачки продемонстрирована возможность работы ксенонового лазера при высоких до 650°С температурах активной среды [5]. Наиболее интенсивная линия ксенонового лазера с  $\lambda = 1,73$  мкм лежит в окне прозрачности атмосферы, что однозначно повышает его практическую значимость.

Мощное высокоэффективное спонтанное излучение ядерно-возбуждаемой плазмы ксенон-содержащих смесей может быть полезным дополнением для различных практических приложений ядерно-энергетической установки, излучающей как когерентное, так и некогерентное оптическое излучение. То, что активная среда лазера представляет собой смесь инертных газов, снимает проблему деградации среды в нежелательных химических реакциях и позволяет надеяться на создание ядерно-возбуждаемого источника оптического излучения с большим ресурсом работы.

Эксперименты проводились на спектральной установке с радиоизотопным возбуждением и системой регистрации на основе монохроматора SPM-2 с кварцевой призмой и ФЭУ-106. Относительная спектральная чувствительность установки (монохроматора МДР-2 и ФЭУ-106), снималась при помощи калиброванной лампы накаливания СИРШ-85-200-1. Для возбуждения газовых сред использовались  $\alpha$ -источники ФАКТ-1 с  $^{210}\text{Po}$  (диаметр рабочего слоя 7 мм). Объем области возбуждения составлял  $\sim 40$  см<sup>3</sup> (18 источников ФАКТ-1 с суммарной начальной активностью  $3 \times 10^{10}$  Бк). Свет выводился в окно из лейкосапфира. Измерения проводились в области длин волн 200-830 нм, что определяется чувствительностью ФЭУ-106. Точность определения длин волн составляла  $\sim 0.3$  нм в области 200 нм и  $\sim 1$  нм при  $\lambda \sim 800$  нм.

Основным компонентом активных сред лазеров на атомарных переходах ксенона является аргон, содержание которого колеблется от 99 до 50 % в зависимости от длины волны излучения лазера и способов возбуждения. Таким образом, энерговклад и спектр излучения во многом определяются кинетикой плазмы аргона. Характерный спектр излучения, полученный при возбуждении чистого аргона (при давлении 3,5 атм.) потоком  $\alpha$ -частиц показан на рис. 1. Следует отметить, что при возбуждении чистого аргона излучением стационарного ядерного реактора спектр излучения

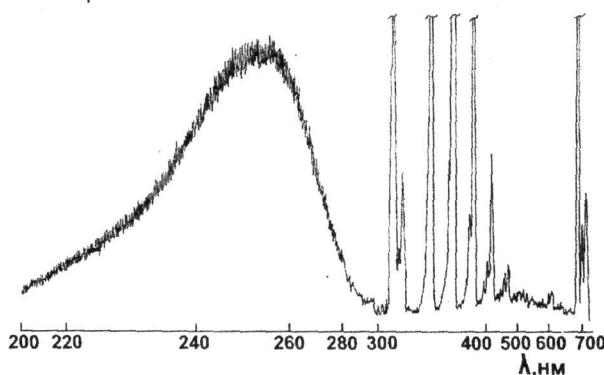


Рис. 1. Аппаратный спектр люминесценции чистого аргона

аналогичен спектру, показанному на рис. 1. Использование радиоизотопной установки позволило провести исследования в более широком спектральном диапазоне.

Как видно из рис. 1 спектр излучения чистого аргона в исследуемом диапазоне можно разделить на две условные части: длинноволновая часть спектра с набором атомарных линий аргона и широкая полоса в области  $\sim 200\text{--}300$  нм, в которой излучается до 90% энергии исследуемого диапазона, так называемый «третий континуум».

Спектр излучения всех инертных газов состоит из трех основных континуумов, именуемых «первый», «второй» и «третий» континуумы, причем их интенсивность и ширина определяются условиями проводимого эксперимента, в частности, источником возбуждения и давления смеси. Диапазон излучения сдвигается в коротковолновую область спектра с уменьшением порядкового номера элемента. «Первый» континуум начинается вблизи резонансной линии соответствующего элемента и принадлежит переходам с высоких колебательных уровней состояния  ${}^1,{}^3\Sigma_u^+$  при больших межъядерных расстояниях в основное состояние  ${}^1\Sigma_g^+$ . Максимум интенсивности «второго» континуума соответствует переходу с низких колебательных уровней первых возбужденных состояний  ${}^1,{}^3\Sigma_u^+$  молекул инертных газов в основное состояние  ${}^1\Sigma_g^+$  [6].

О природе третьего «континуума» существует множество мнений, полный анализ которых дан в работе [7]. Согласно [7] наиболее вероятным является соответствие «третьему» континууму переходов из состояния  $\text{Ar}_2^{+*}$ , ассоциируемого на бесконечности с состояниями  $\text{Ar}^+(3s^23p^5)$  и  $\text{Ar}^*({}^3P_{1,2})$  в нижние состояния  ${}^2\Sigma_g^+$  и  ${}^2\Pi_g$ , асимп-

тически переходящими в  $\text{Ar}^+(3s3p^6) + \text{Ar}({}^1S_0)$ . Данное предположение хорошо объясняет многие экспериментальные факты, в частности, влияние водорода на интенсивность «третьего» континуума в аргоне, которое показано на рис. 2.

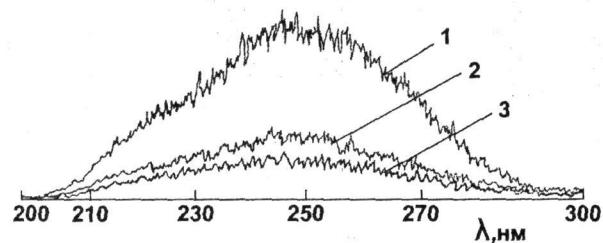


Рис. 2. Влияние добавок  $\text{H}_2$  на интенсивность «третьего» континуума аргона ( $P_{\text{Ar}} = 3,5$  атм.):

1 — чистый Ar, 2 — 1%  $\text{H}_2$ , 3 — 1,5%  $\text{H}_2$

Исчезновение «третьего континуума» с увеличением содержания в смеси  $\text{H}_2$ , объясняется процессами перезарядки ионов аргона на молекулах водорода. Аналогичное поведение «третьего континуума» наблюдалось и при добавлении гелия (рис. 3), что не может быть объяснено процессами перезарядки на атомах гелия в силу того, что потенциал ионизации гелия выше потенциала ионизации любого другого инертного газа. Предположение о влиянии примесей, содержащихся в гелии, в частности  $\text{N}_2$ , дает заведомо завышенное значение констант скоростей перезарядки ионов аргона на молекулах азота.

Предположение, сделанное в работе [8, 9] о соответствии «третьего континуума» переходам из состояния  ${}^3\Pi_g$ , асимптотически связанного с

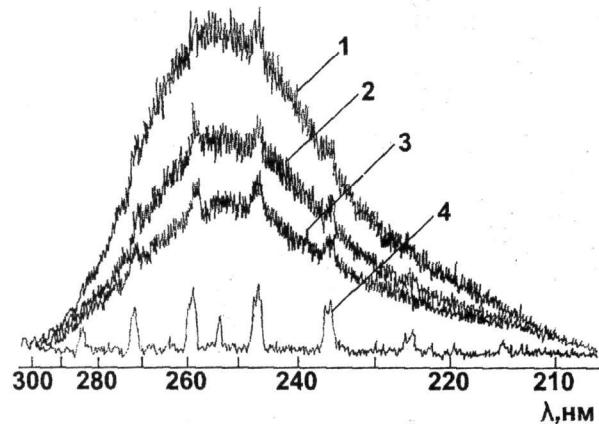


Рис. 3. Влияние добавок He на интенсивность «третьего» континуума аргона ( $P_{\text{Ar}} = 3,5$  атм.):

1 — чистый Ar, 2 — 1% He, 3 — 1,5% He, 4 — 5% He

$\text{Ar}^{2+}(^3\text{P}_g)$  и  $\text{Ar}(^1\text{S}_g)$ , в состояние  ${}^3\Pi_u$  с пределом диссоциации  $\text{Ar}^+(^2\text{P}_u)$  и  $\text{Ar}^+(^2\text{P}_u)$ , противоречит результатам работы [7]. Согласно [7], при накачке сильноточным пучком протонов “третий” континуум в чистом Xe существует в течение  $t > 1 \text{ мкс}$ , хотя накачка среды проводилась за  $\tau_{1/2} = 80 \text{ нс}$ . В случае принадлежности полосы переходам из состояния  ${}^3\Pi_g$ , асимптотически связанного с  $\text{Ar}^{2+}(^3\text{P}_g)$  и  $\text{Ar}(^1\text{S}_g)$ , то при любых плотностях тока континуум должен отслеживать накачку и заканчиваться при окончании действия пучка, так как указанное состояние эффективно исчезает в реакциях Пеннинга.

Характерной особенностью спектра излучения Ar-Xe смеси является сильное широкополосное излучение ионной гетероядерной молекулы  $\text{ArXe}^+$ . При возбуждении смеси Ar-Xe (давление смесей до 10 Тор) электрическим разрядом наблюдались пять равных по интенсивности полос ионной гетероядерной молекулы  $\text{ArXe}^+$ , условно названных A (с максимумом при  $\lambda=329 \text{ нм}$ ), B (с максимумом при  $\lambda=346 \text{ нм}$ ), C (с максимумом при  $\lambda=349 \text{ нм}$ ), D (с максимумом при  $\lambda=508 \text{ нм}$ ), E (с максимумом при  $\lambda=545 \text{ нм}$ ) [10].

В наших экспериментах при возбуждении а-частицами наблюдалась только полосы A и D, которые излучаются с одного состояния с пределом диссоциации  $\text{Ar}^+(^2\text{P}_{1/2}) + \text{Xe}(^1\text{S}_0)$ . Полосы B, C и E, излучающие из состояния, диссоциирующего на  $\text{Ar}^+(^2\text{P}_{3/2}) + \text{Xe}(^1\text{S}_0)$ , в наблюдаемом спектре излучения отсутствовали. Интенсивность полосы D приблизительно в 17 раз слабее интенсивности полосы A (интенсивность определялась в фотонах/с).

Эти результаты позволяют сделать вывод, что при ионизации аргона жестким ионизатором преимущественно образуются ионы в состоянии  $\text{Ar}^+(^2\text{P}_{1/2})$  или при высоком давлении газа происходит быстрая релаксация состояний атомарных или молекулярных ионов, обеспечивающих излучение в полосах B, C и E. Обнаружена одинаковая зависимость интенсивности полос A и D от давления ксенона в смеси, что подтверждает вывод, о том, что они излучаются с одного уровня [10].

С точки зрения различных практических приложений большое значение имеет коэффициент преобразования ядерной энергии в спонтанное излучение. Для определения эффективности преобразования ядерной энергии в оптическое спонтанное излучение  $\eta$  для полосы A, ее ин-

тенсивность сравнивалась с интенсивностью второй положительной системы азота в смеси  $\text{Ar}(1,5 \text{ Атм}) + \text{N}_2$ . Эффективность люминесценции второй положительной системы азота в смеси  $\text{Ar} + \text{N}_2$  в силу изученности кинетики основных процессов, участвующих в формировании излучения при возбуждении жестким ионизатором [11] определялась из расчета.

Для смеси Ar-Xe (30 Тор) при общем давление смеси 1,5 Атм измеренное значение  $\eta$  составило  $\sim 5 \%$ . Большая величина  $\eta$  свидетельствует о высокой эффективности процессов образования ионной гетероядерной молекулы  $\text{ArXe}^+$  и устойчивости возбужденного состояния молекулы, с которого излучаются полосы с максимумами в  $\lambda = 329$  и  $508 \text{ нм}$ .

Способность источников ядерной энергии возбуждать и ионизовать большие объемы газовых сред при высоких давлениях, в отличие от других традиционных источников накачки, наряду с высокими коэффициентами преобразования активных газовых сред, определяет интерес к ядерно-возбуждаемым источникам спонтанного излучения. Активный объем таких ядерно-возбуждаемых источников спонтанного излучения ограничивается только геометрическими размерами реакторов.

Помимо использования спонтанного излучения при подпороговой накачки активных сред лазеров с ядерной накачки для различных приложений, возможно и отдельное использование ядерно-возбуждаемых источников спонтанного излучения. В частности, УФ широкополосные излучения димеров инертных газов можно использовать для накачки активных сред твердотельных лазеров. В смесях инертных газов не нарабатывается вредных примесей в результате радиационно-химических реакций. Поэтому такие смеси могут быть использованы в качестве сцинтиллятора для радиационно-фотохимического синтеза.

## ЛИТЕРАТУРА

- Батырбеков Э.Г. К вопросу преобразования энергии ядерных реакций в лазерное излучение. I. Прямая ядерная накачка // Вестник НЯЦ. 2008. №3. С. 1-15.
- Мавлютов А.А., Миськевич А.И., Чжасо Сю Линь. Оценка порога генерации эксимерных лазеров с ядерной накачкой: Приборы и техника эксперимента. 2001. В. 3. С. 108-114.
- Weiser J., Krucken R., Ulrich A. Low Energy Beam Pumped Lasers as a Model System for Nuclear Pumped Lasers:

IV Междунар. конф. «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». Обнинск, 2007. С. 55-56.

4. Sakasai K., Kakuta T., Yamagishi H., Nakazawa M., Yamanaka N., Iguchi T. Experiments for optical neutron detection using nuclear pumped laser // Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. V. 43, N 3. P. 1549-1553.

5. Батыrbеков Э.Г. К вопросу преобразования энергии ядерных реакций в лазерного излучения. II. Комбинированная ядерная накачка // Вестник НЯЦ. 2008. № 3. С. 16-28.

6. Mullicen R.S. Potential curves of diatomic rare-gas molecules and their ions, with particular reference to Xe<sub>2</sub> // J. Chem. Phys. 1970. V. 52. P. 5170-5180.

7. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. Широкополосные континуумы в инертных газах и их смесях с галогенами // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. В. 1. С. 7-30.

8. Grieel T., Drotleff H.W., Hammer J.W., Petbau K. The Third Continuum of the Rare Gas Emitted by Heavy Ion Beam Induced Plasma // J. Chem. Phys. 1990. V. 53. P. 4581-7.

9. Krotz W., Ulrich A., Busch B., Ribitzki G., Wieser J. Third excimer continuum of argon excited by a heavy-ion beam // Phys. Rev. 1991. A 43. P. 6089-6094.

10. Tanaka Y., Yoshino K., Freemen D.E. Emission Spectra of Heteronuclear Diatomic Rare Gas Positive Ions // J. Chem. Phys. 1975. V. 62, N 11. P. 4484-4496.

11. Басов Н.Г., Данилычев В.А. Лазеры на конденсированных и сжатых газах // УФН. 1986. Т. 148. В. 1. С. 55-100.

## Резюме

Ядролық қуат оптикалық игерүесіз сөулелену күдінің өзгертуі мәселесіне арналған ғылыми макала. Белсенді ортанды люминесценциялы зерттеудердің корытындысында, лазерлік генерацияның тікелей, сонымен бірге комбинациялы әдіспен ядролық толтырудар арқылы алу мүмкіндігі – Xe атомарлы ауысулардағы лазерлердің белсенді орталары көрсетілген. Өлшеудің корытындысы ядролық реакциялардың куатының тиімділігі когерентсіз оптикалық сөулеленуге өзгеруі көрсетілген.

## Summary

Article is devoted to the problem of transformation of the nuclear energy to spontaneous optical irradiation one. Research results of a luminescence of laser active media on atomic transitions Xe, on which the opportunity of laser generation receiving both with direct and combined nuclear pumping was shown, are given. Results of efficiency measurement of transformation of nuclear reactions energy into non-coherent optical irradiation are given.

УДК: 539.196; 535.37

Поступила 26.08.08г.