

# О влиянии молекулярных добавок на параметры излучения лазера на атомарных переходах ксенона

А.В.Феденев, В.Ф.Тарасенко, В.С.Скакун

*Экспериментально исследован лазер на атомарных переходах ксенона при различных длительностях и мощностях накачки пучком электронов в широком диапазоне рабочих смесей и давлений, в том числе при добавках молекулярных газов. Показано, что максимальные удельные мощности генерации реализуются при больших удельных мощностях накачки (более  $200 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ ) и длительности импульса тока пучка десятки наносекунд в смесях  $\text{Ar}-\text{Xe}$  повышенного давления с добавками молекулярных газов ( $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ ). Получена удельная мощность излучения  $\sim 4 \text{ кВт}/\text{см}^3$ . При длительности импульса накачки сотни наносекунд – примерно 1 мкс наибольшие энергии излучения реализуются без молекулярных добавок при относительно малой плотности тока пучка (удельная мощность накачки  $\sim 10 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ ). Однако на установках с удельными мощностями накачки более  $40 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$  при ограничении давления рабочей смеси прочностью лазерной камеры молекулярные добавки дают увеличение энергии излучения и КПД. На широкоапертурных установках с большими мощностями накачки молекулярные добавки позволяют улучшить распределение плотности мощности излучения по сечению лазерного пучка.*

**Ключевые слова:** ксеноновый лазер, удельная мощность излучения, накачка пучком электронов.

## 1. Введение

Лазеру на атомарных переходах ксенона посвящено большое число работ (см. [1–20] и цитируемую там литературу). Это связано со сложностью физических процессов, происходящих в таком лазере, и большим разнообразием способов его возбуждения. Лазерное излучение было получено на более чем десяти линиях в ближней ИК области спектра при накачке пучком электронов, продуктами ядерных реакций, самостоятельным разрядом, разрядом, контролируемым или инициируемым пучком электронов и т. д. Однако до сих пор полностью не выяснен вопрос о влиянии примесей или специальных добавок молекулярных газов на характеристики генерации ксенонового лазера.

Так, в работах [5, 12] было показано, что при большой плотности тока электронного пучка накачки ( $10-100 \text{ А}/\text{см}^2$ ) добавки молекулярных газов и гелия позволяют увеличить мощность и энергию генерации. С другой стороны, при малых плотностях тока пучка даже сравнительно небольшие примеси молекулярных газов приводили к уменьшению мощности и энергии излучения ксенонового лазера [8, 15, 20]. В работе [15] при интенсивности накачки  $\sim 40 \text{ Вт}/\text{см}^2$  и концентрации примесей воздуха или  $\text{CO}_2$  более 0.01 % регистрировалось резкое уменьшение мощности излучения. При удельной мощности накачки  $\sim 0.4 \text{ кВт}/\text{см}^3$  и добавках азота также наблюдалось уменьшение мощности излучения [8].

Из результатов расчетов, представленных в работе [20], следует, что при наличии в смеси  $\text{Ar}-\text{Xe}$  (давление

$2-2.5 \text{ атм}$ ) примесей азота и воды с концентрацией 0.05 % эффективность генерации уменьшается на  $\sim 30\%$  при удельной мощности накачки  $\sim 10 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$  и что такая же концентрация примесей не влияет на энергию и КПД излучения при удельной мощности накачки  $\sim 30 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ . Заметим, что энергии излучения, полученные из расчета и экспериментально при удельной мощности накачки  $\sim 30 \text{ кВт}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ , совпали. Более того, совпали также расчетные энергии излучения в чистой смеси и при наличии примесей азота и воды с концентрацией 0.05 % [20].

В настоящей работе приведены результаты исследований лазера на атомарных переходах ксенона при различных плотностях (от 0.005 до  $100 \text{ А}/\text{см}^2$ ) и длительностях (от 5 нс до 100 мкс) импульса тока пучка накачки (далее – длительностях пучка). Давление смеси изменялось от 0.5 до 3.5 атм. Генерация исследовалась в смеси  $\text{Ar}-\text{Xe}$  и при добавках к этой смеси молекулярных газов  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ .

## 2. Экспериментальные установки и методики измерений

Исследования проводились на четырех установках, подробно описанных в работах [5, 7, 12–14]. Установка 1 [12] состояла из ускорителя электронов с планарным вакуумным диодом, который формировал электронный пучок сечением  $1 \times 4 \text{ см}$ , и лазерной камеры. Плотность тока на оси оптического резонатора составляла  $\sim 50 \text{ А}/\text{см}^2$  при длительности импульса тока на полувысоте  $\tau_p \sim 3 \text{ нс}$ . Средняя энергия электронов за фольгой равнялась  $\sim 140 \text{ кэВ}$ .

Установка 2 [13] также состояла из ускорителя электронов с планарным вакуумным диодом, который формировал электронный пучок сечением  $2 \times 42 \text{ см}$ , и лазер-

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4; тел.: (3822) 25 86 85, 25 93 92; факс: (3822) 25 94 10; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

ной камеры с активным объемом 0.2 л. Плотность тока за фольгой составляла 20–100 А/см<sup>2</sup> при  $\tau_p \sim 60$  нс. Средняя энергия электронов за фольгой равнялась  $\sim 150$  кэВ.

В установке 3 [14] использовался коаксиальный вакуумный диод с плазменным катодом, который формировал радиально сходящийся электронный пучок. За счет этого при давлении 1–1.5 атм обеспечивалась высокая однородность накачки по сечению лазерной камеры объемом 18 л (диаметр 20 см, активная длина 60 см). Плотность тока при  $\tau_p = 30 - 100$  мкс составляла 0.1–0.005 А/см<sup>2</sup>. Средняя энергия электронов за фольгой равнялась  $\sim 170$  кэВ.

В установке 4 [21], на которой было получено большинство представленных в настоящей работе данных, также использовался коаксиальный вакуумный диод, формировавший радиально сходящийся электронный пучок. За счет этого обеспечивалась высокая однородность накачки по сечению лазерной камеры объемом 31 л (диаметр 20 см, активная длина 100 см). Плотность тока до фольги составляла 5–40 А/см<sup>2</sup> при  $\tau_p \sim 400$  нс. Средняя энергия электронов за фольгой зависела от зарядного напряжения. При изменении зарядного напряжения от 50 до 85 кВ напряжение на вакуумном диоде изменялось от 300 до 500 кВ. На данной установке полная энергия, вложенная в газ, определялась по скачку давления [21].

В экспериментах применялись внутренние плоскопараллельные резонаторы, состоящие из глухого зеркала с алюминиевым покрытием и выходных зеркал с коэффициентами отражения 99, 95, 33, 27 и 6 % на  $\lambda = 1.73$  мкм. Энергия лазерного излучения измерялась калориметром ИМО-2Н и пирозлектрическим датчиком PE-25, а форма импульса излучения – фотосопротивлением ФСГ-22-3А2, сигнал с которого одновременно с сигналом тока пучка в вакуумном диоде подавался на осциллограф TDS-3032.

Рабочие смеси готовились непосредственно в лазерных камерах. Чистота газов согласно паспорту составляла 99.998 % для аргона и 99.9992 % для ксенона. Как известно, для лазера на атомарных переходах ксенона весьма важна чистота исходных газов и сохранение ее в процессе экспериментов, а также равномерное распределение ксенона по всему активному объему. При взаимодействии электронного пучка со стенками лазерной камеры и фольгой происходит выделение абсорбированных газов и загрязнение рабочей смеси примесями.

С другой стороны, после замены рабочей смеси в широкоапертурных лазерах необходимо ее принудительное перемешивание или длительная выдержка перед началом экспериментов. Перемешивание смеси может быть достигнуто после нескольких включений ускорителя [11, 18], но при этом трудно контролировать наличие примесей за счет десорбции газа из стенок лазерной камеры. В связи с этим в настоящей работе проводились измерения после нескольких предварительных включений ускорителя, когда энергия излучения и ее распределение по сечению лазерной камеры переставали изменяться.

Отметим, что полная энергия излучения после перемешивания смеси увеличивалась, но при этом в лазерной камере могло накапливаться небольшое количество неконтролируемых примесей. Эффективности генерации даны относительно вложенной в рабочую смесь энергии, которая измерялась по скачку давления или рассчитывалась по методике, описанной в [14].

### 3. Экспериментальные результаты

Описанные установки позволяли реализовать все основные режимы накачки электронным пучком лазера на смеси Ar–Xe. Данная смесь была выбрана для исследований, поскольку при использовании смесей ксенона с другими газами или чистого ксенона энергия излучения значительно меньше.

На установке 1 благодаря малой длительности пучка накачки генерация возникает после его окончания. Максимальная энергия излучения была получена в смеси Ar : Xe = 10 : 1 при давлении 1.5 атм. При добавлении к смеси Ar : Xe = 100 : 1 примерно 1 % азота наблюдались увеличение мощности и длительности импульса излучения (от 80 до 150 нс) на  $\lambda = 2.03$  мкм и срыв генерации на  $\lambda = 1.73$  мкм. Суммарная энергия генерации при этом возрастала. Однако при увеличении давления до 2.5 атм увеличение энергии генерации на  $\lambda = 2.03$  мкм при добавке азота было незначительным. При добавках углекислого газа вместо азота при давлении смеси 1.5 атм мощность излучения на  $\lambda = 2.03$  мкм возрастала (на 30 % при [CO<sub>2</sub>]  $\sim 0.5$  %), а длительность импульса не изменялась. Примесь CO<sub>2</sub> при давлении Ar–Xe-смеси 2.5 атм не приводила к увеличению энергии генерации. Основные результаты, полученные на этой установке при исследовании различных смесей, изложены в [12].

На установке 2 генерация возникла во время действия пучка электронов и основная энергия излучалась до окончания пучка, хотя длительность импульса излучения превышала длительность тока пучка на  $\sim 100$  нс. Максимальная энергия излучения была получена при давлении 3 атм, соотношении компонентов Ar : Xe = 100 : 1 и максимальной плотности тока пучка 95 А/см<sup>2</sup> (удельная мощность накачки  $\sim 1$  МВт·см<sup>-3</sup>·атм<sup>-1</sup>). Генерация с кварцевой пластинкой в качестве выходного зеркала регистрировалась на  $\lambda = 2.65, 2.63$  и 1.73 мкм, причем наибольшая мощность излучения была получена на  $\lambda = 2.65$  мкм. Работа при более высоком давлении не проводилась из-за возможности разрыва фольги.

На данной установке был получен максимальный положительный эффект от использования молекулярных добавок. При добавлении к смеси азота или CO<sub>2</sub> наблюдалось увеличение мощности, энергии генерации и, соответственно, КПД в два-три раза. На рис.1 приведены зависимости удельной энергии излучения от содержания ксенона в смесях Ar–Xe–N<sub>2</sub> и Ar–Xe при давлении 2.5

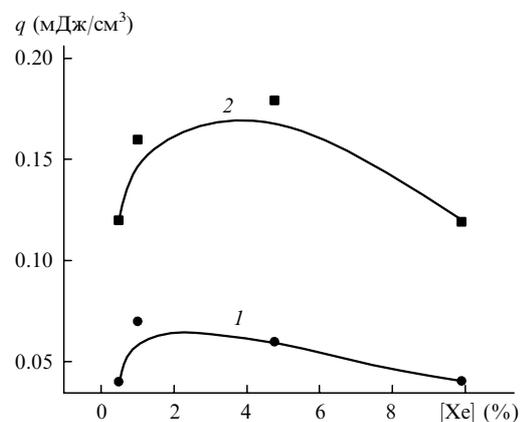


Рис.1. Зависимости удельной энергии излучения  $q$  от концентрации ксенона в смесях Ar–Xe (1) и Ar–Xe–N<sub>2</sub> (2) при плотности тока накачки 95 А/см<sup>2</sup> и давлении смеси 2.5 атм, полученные на установке 2.

атм. Наибольший эффект в данных условиях достигался при максимальной плотности тока пучка. Увеличение концентрации ксенона до 4.8 % в смеси с добавками молекулярных газов приводило к увеличению мощности и энергии излучения. Молекулярные добавки вызывали появление в спектре излучения линии с  $\lambda = 2.03$  мкм. Максимальная интенсивность генерации при этом регистрировалась на линиях с  $\lambda = 2.65$  и  $2.03$  мкм, которые имели примерно равную интенсивность. Суммарная удельная мощность излучения на всех линиях при давлении 3 атм составила  $4 \text{ кВт/см}^3$ . Результаты, полученные на этой установке, приведены также в [5, 12].

На установке 3 при малых плотностях тока пучка была реализована квазистационарная генерация с длительностью импульса излучения 30–100 мкс. Максимальная энергия излучения в смеси  $\text{Ar} : \text{Xe} = 100 : 1$  была получена при давлении 1 атм и удельной мощности накачки  $1\text{--}3 \text{ кВт/см}^3$ . При увеличении давления свыше 1 атм наблюдалось уменьшение не только эффективности генерации, но и энергии излучения. Основной вклад в энергию генерации при использовании широкополосного зеркала давала линия с  $\lambda = 1.73$  мкм. На данной установке даже малые добавки молекулярных газов (мы могли фиксировать их минимальные концентрации  $0.05\text{--}0.1\%$ ) приводили к уменьшению мощности и энергии излучения. При этом с уменьшением мощности накачки одинаковые концентрации молекулярных добавок вызывали более существенное уменьшение энергии и мощности излучения. При увеличении плотности тока пучка и уменьшении длительности импульса до  $\sim 6$  мкс (удельная мощность накачки при давлении 1 атм составила  $\sim 6 \text{ кВт/см}^3$ ) добавки азота также не дали положительного эффекта.

Установка 4 позволила провести исследования в промежуточных по сравнению с установками 2 и 3 областях длительностей тока пучка и мощностей накачки. Как мы уже отмечали, на установке 2 наблюдался наибольший положительный эффект от применения молекулярных добавок, а на установке 3 добавки-примеси молекулярных газов приводили к снижению мощности и энергии генерации. На рис.2–5 показаны основные зависимости удельной и полной энергии излучения при изменении состава и давления смеси, а также поведение генерации во времени. Генерация возникала с запаздыванием отно-

сительно начала импульса тока пучка на  $\sim 30$  нс и заканчивалась спустя  $\sim 200$  нс после его окончания. Основной вклад в генерацию на смеси  $\text{Ar} - \text{Xe}$  при использовании широкополосного зеркала давала линия с  $\lambda = 1.73$  мкм. Максимальная энергия излучения была получена при давлении 3.5 атм в смеси  $\text{Ar} : \text{Xe} = 100 : 1$  и удельном энергокладе  $\sim 56 \text{ мДж/см}^3$  (удельная мощность накачки составляла  $\sim 140 \text{ кВт/см}^3$ ) (рис.2). Однако бóльшая эффективность генерации достигалась при дав-

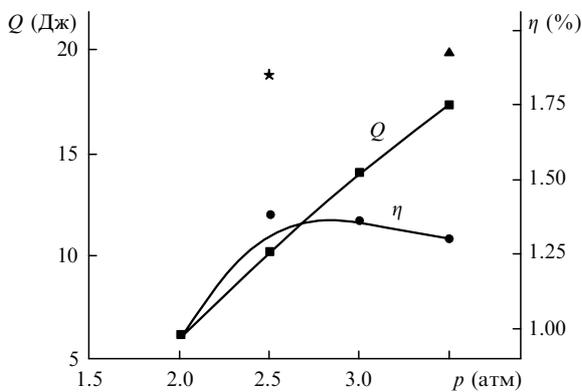


Рис.2. Зависимости КПД генерации  $\eta$  и энергии излучения  $Q$  от давления смеси  $\text{Ar} - \text{Xe}$  при парциальном давлении ксенона 21 Тор, полученные на установке 4 при удельных энергокладах  $10\text{--}12 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ ;  $\star$  – максимальная эффективность генерации при удельном энергокладе  $7.4 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ ,  $\blacktriangle$  – максимальная энергия генерации, полученная при удельном энергокладе  $16 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ .

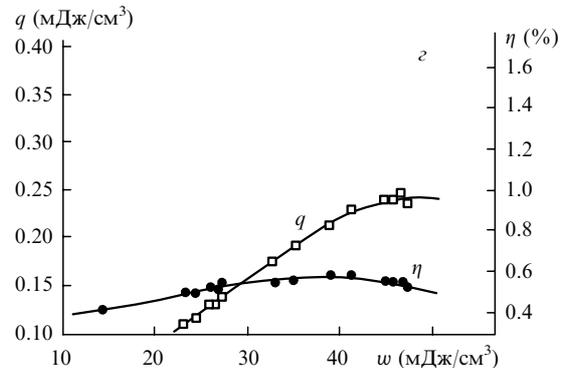
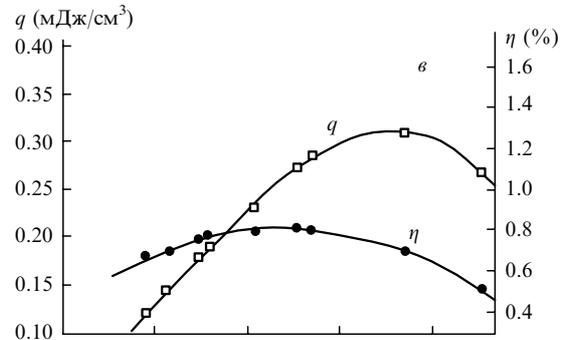
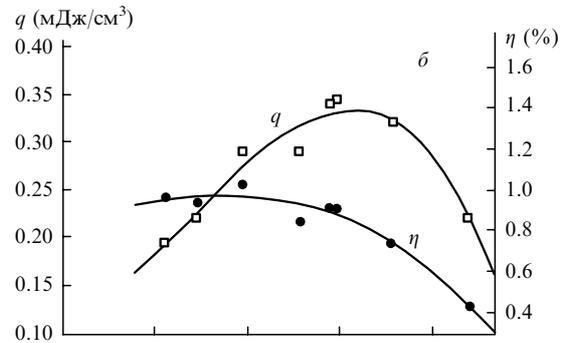
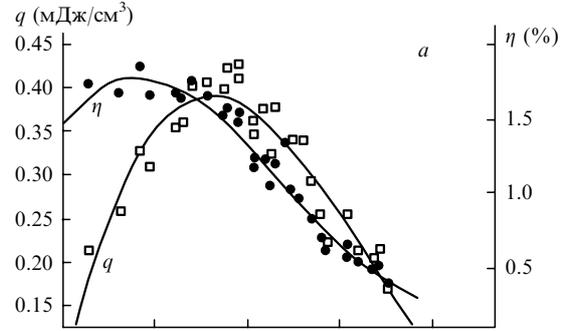


Рис.3. Зависимости удельной энергии излучения  $q$  и КПД  $\eta$  от удельной энергии накачки  $w$  при давлении 2.5 атм для смесей  $\text{Ar} : \text{Xe} = 100 : 1.1$  (а),  $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{N}_2 = 100 : 1.1 : 0.16$  (б),  $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{N}_2 = 100 : 1.1 : 0.4$  (в) и  $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{N}_2 = 100 : 1.1 : 0.64$  (г).

лении смеси 2.5 атм (рис.2 и 3,а). Добавки азота к рабочей смеси на данной установке приводили как к уменьшению энергии излучения (при малых энергозкладах), так и к увеличению ее (при удельных энергозкладах более 30 мДж/см<sup>3</sup>). На рис.3 приведены зависимости удельной энергии излучения и КПД от удельной энергии накачки для различных смесей, в том числе и с добавками азота, при давлении 2.5 атм. Это давление было выбрано для сравнения по двум причинам. При нем были получены максимальные КПД в смеси Ag–Xe, и, кроме того, при увеличении давления свыше 2.5 атм ухудшалась равномерность распределения мощности возбуждения по сечению лазерной камеры.

В смеси Ag–Xe при давлении 2.5 атм максимальные удельные энергии излучения (0.4–0.42 мДж/см<sup>3</sup>) достигаются при удельном энергозкладе 25–30 мДж/см<sup>3</sup>, а при удельном энергозкладе 40 мДж/см<sup>3</sup> удельная энергия излучения уменьшалась до 0.22–0.25 мДж/см<sup>3</sup> (рис.3,а). В смеси с оптимальной добавкой азота при удельном энергозкладе 20–25 мДж/см<sup>3</sup> удельная энергия излучения не превышала 0.22 мДж/см<sup>3</sup>, однако при удельном энергозкладе 40 мДж/см<sup>3</sup> удельная энергия излучения увеличилась до 0.33 мДж/см<sup>3</sup> (рис.3,б). Повышение концентрации азота относительно оптимальной приводило к смещению максимума удельной энергии излучения в сторону больших энергозкладов, но энергия излучения (полная и удельная) и эффективность лазера при этом уменьшались.

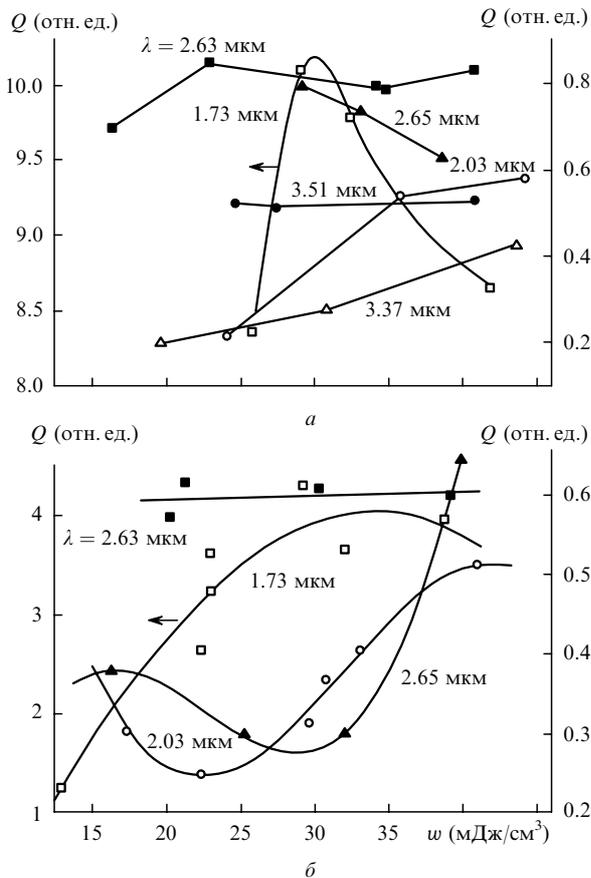


Рис.4. Зависимости энергии генерации  $Q$  для различных переходов атома ксенона в смесях Ag: Xe = 100: 1.1 при давлении 2.5 атм (а) и Ag: Xe: N<sub>2</sub> = 100: 1.4: 0.4 при давлении 2.0 атм (б) от усредненной по активному объему удельной энергии возбуждения  $w$ , полученные на установке 4.

На рис.4 показано изменение спектрального состава излучения в смеси Ag–Xe без добавок и с добавками азота. Основная энергия в обоих случаях излучается на переходе с  $\lambda = 1.73$  мкм (рис.4 и 5). Энергия генерации на  $\lambda = 2.63$  мкм практически не меняется с изменением энергозклада для обеих смесей. Основные различия в спектрах излучения проявляются в том, что в присутствии азота в спектре не регистрируется лазерное излучение на переходах с  $\lambda = 3.37$  и 3.51 мкм, а энергия генерации на  $\lambda = 2.65$  мкм резко возрастает с ростом удельного энергозклада свыше 35 мДж/см<sup>3</sup>. Добавки азота при одинаковых энергозкладах уменьшают провал на осциллограмме импульса излучения (на  $\lambda = 1.73$  мкм). При частичной замене аргона гелием и сохранении давления смеси 2.5 атм на установке 4 наблюдалось уменьшение

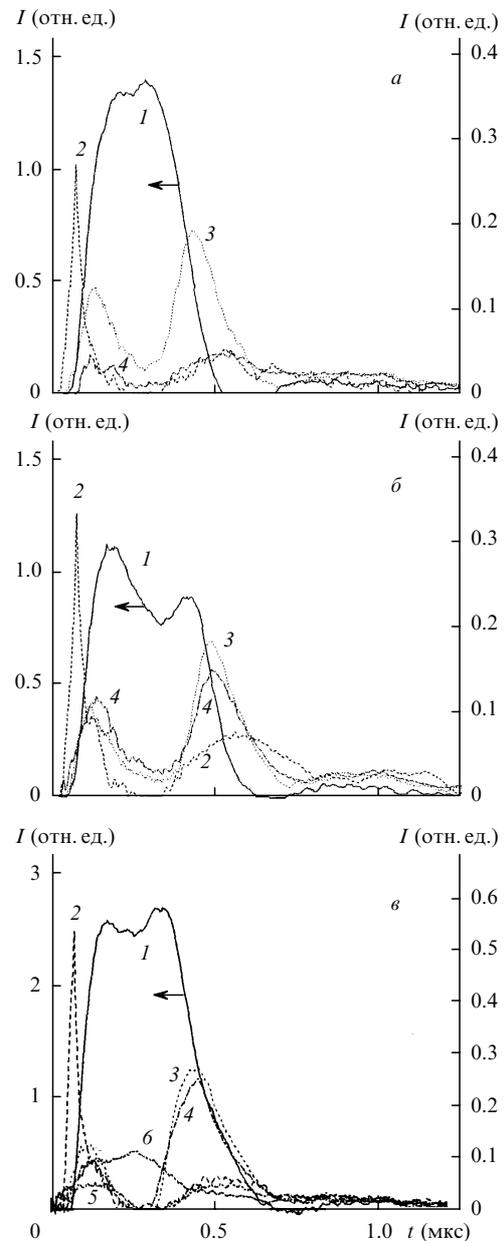


Рис.5. Осциллограммы импульсов генерации на переходах атома ксенона с  $\lambda = 1.73$  (1), 2.03 (2), 2.63 (3), 2.65 (4), 3.37 (5) и 3.51 мкм (6) в смесях Ag: Xe: N<sub>2</sub> = 100: 1.4: 0.4 (а), Ag: Xe: N<sub>2</sub> = 100: 1.4: 0.4 (б) и Ag: Xe = 100: 1.1 (в) при давлении смесей 2.0 (а, б) и 2.5 атм (в) и удельной мощности накачки 29–31 (а), 38–40 (б) и ~32 мДж/см<sup>3</sup> (в), полученные на установке 4.

удельной энергии излучения и КПД по сравнению с параметрами, полученными в смесях Ar–Xe и Ar–Xe–N<sub>2</sub>.

#### 4. Обсуждение полученных результатов

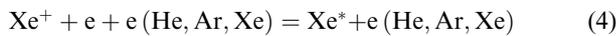
Основные процессы, приводящие к накачке верхнего лазерного уровня в смеси Ar–Xe, в настоящее время достаточно хорошо изучены [16]. Это рекомбинация молекулярных ионов



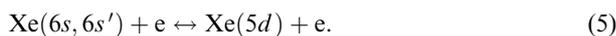
передача возбуждения от Ar\* к Xe



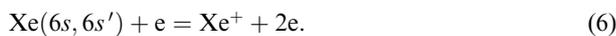
реакция трехчастичной рекомбинации ионов Xe<sup>+</sup>



и процесс возбуждения электронами из состояний 6s, 6s'



Константы скоростей перечисленных реакций приведены в работе [16]. Положительные ионы ксенона образуются в процессе прямой ионизации вторичными электронами, при перезарядке и за счет ступенчатой ионизации плазменными электронами, в том числе из состояний 6s, 6s' ксенона в процессе



Тушение нижних рабочих уровней атомами аргона и ксенона определяет величину инверсии на лазерных переходах и спектр генерации.

Максимальные эффективности излучения ~ 4 % реализуются в смеси Ar–Xe при давлении ~ 1 атм и удельных мощностях накачки 1–3 кВт/см<sup>3</sup> в случае возбуждения в квазистационарном режиме пучками электронов с длительностью десятки микросекунд, ранее такие же результаты были получены в работах [9, 17, 18]. Максимум эффективности, который наблюдается при давлении смеси 1 атм, обусловлен оптимальной температурой плазменных электронов, необходимой для реализации канала заселения верхнего лазерного уровня за счет ступенчатого возбуждения и ионизации (реакции (5) и (6)). В этих условиях, тем более при уменьшении мощности накачки, молекулярные добавки приводят к уменьшению энергии излучения и КПД. Добавка молекулярного газа или наличие примесей вызывает уменьшение температуры электронов и снижает вклад реакций (5), (6) в накачку верхнего лазерного уровня.

При увеличении мощности накачки и относительно малых длительностях пучка (десятки наносекунд) наблюдается уменьшение эффективности излучения. Однако удельная мощность излучения при этом возрастала до удельной мощности накачки 1 МВт/см<sup>3</sup>, при больших удельных мощностях накачки измерения мы не проводили. Снижение КПД обусловлено увеличением концентрации электронов выше оптимальной и, соответственно,

большой скоростью перемешивания электронами лазерных уровней. В этих условиях увеличение давления смеси позволяет снизить мощность накачки на одну частицу и уменьшить перемешивание лазерных уровней, но при этом температура электронов уменьшается и большее число метастабильных уровней ксенона идет на образование молекул, соответственно снижается и роль процессов (5), (6). С другой стороны, увеличивается вклад рекомбинации ионов (в основном реакции (1)) в заселение верхнего лазерного уровня. В результате при увеличении давления смеси наблюдается рост энергии излучения, но, как показывают наши результаты и результаты других экспериментальных работ [9, 17], эффективность генерации при этом уменьшается. Молекулярные добавки уменьшают концентрацию электронов, что дает положительный эффект за счет уменьшения перемешивания лазерных уровней, и охлаждают электроны, что увеличивает скорость рекомбинации и, возможно, скорость очистки нижнего лазерного уровня [5]. Максимальное увеличение мощности и энергии излучения за счет молекулярных добавок получено при длительностях тока пучка порядка десятков наносекунд.

При наносекундной длительности пучка электронов с большой плотностью (генерация имеет место только в послесвечении) молекулярные добавки также ускоряют охлаждение электронов (увеличивается скорость рекомбинации) и уменьшают концентрацию электронов (уменьшается перемешивание лазерных уровней). Однако в послесвечении охлаждение электронов происходит быстрее, чем во время действия пучка, и относительное увеличение энергии излучения при молекулярных добавках меньше, чем при длительностях пучка в десятки наносекунд, а при возрастании давления смеси оно практически отсутствует.

С увеличением длительности импульса тока пучка до нескольких сотен наносекунд наибольшие энергии излучения достигаются, при прочих равных условиях, при оптимальных плотностях тока пучка (мощностях накачки) и повышении давления до 2–5 атм. В условиях оптимальных мощностей накачки реализуются наибольшие КПД и молекулярные добавки приводят к уменьшению энергии излучения. Однако при увеличении мощности накачки (в широкоапертурных установках это достигается при увеличении зарядного напряжения импульсного генератора, что дает одновременное увеличение напряжения на вакуумном диоде (энергии электронов) и плотности тока пучка) при постоянном давлении наблюдается снижение КПД генерации, а затем энергии излучения (рис.3,а). Положительный эффект молекулярных добавок при повышенных энергозатратах заключается не только в увеличении энергии излучения и КПД, но и в более равномерном распределении плотности мощности излучения по сечению выходного лазерного пучка. Это достигается за счет увеличения энергии электронов при повышенных зарядных напряжениях.

Отметим, что при использовании накачки разрядом, инициируемым или контролируемым электронным пучком, за счет электрического поля можно увеличить температуру электронов. Это позволило при повышенном давлении смеси Ar–Xe (3–5 атм) сделать электронную температуру оптимальной для возбуждения и ионизации метастабильных уровней ксенона (процессы (5), (6)) и получить при давлении несколько атмосфер эффективность генерации по энергии, запасаемой в емкостном накопи-

теле, около 4 % [2, 4, 10]. Охлаждение электронов за счет молекулярных добавок в этих условиях уменьшает энергию излучения и КПД лазера.

## 5. Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований лазера на атомарных переходах ксенона в широком диапазоне рабочих смесей, давлений, длительностей и удельных мощностей импульса накачки пучком электронов определены условия, при которых добавки молекулярных газов к смеси Ag–Xe позволяют улучшить выходные характеристики лазера. Проанализированы причины, влияющие на КПД ксенонового лазера. Подтверждено, что максимальные КПД лазера на смеси Ag–Xe реализуются при участии в заселении верхнего лазерного уровня ступенчатого возбуждения и ионизации метастабильных уровней ксенона.

Увеличение удельного энерговклада в рабочую среду ксенонового лазера выше оптимального приводит вначале к уменьшению КПД генерации, а при больших удельных мощностях накачки и к уменьшению мощности лазерного излучения. При получении коротких импульсов излучения (десятки наносекунд) мощность генерации лазера на атомарных переходах ксенона, энергия излучения и КПД могут быть увеличены за счет малых добавок молекулярных газов (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>). При длительностях импульса накачки 100 нс и более перевозбуждение рабочей среды приводит к провалу на импульсе генерации при максимальных плотностях тока пучка, а добавка молекулярного газа или гелия уменьшает этот провал или ведет к его исчезновению. Малые добавки молекулярных газов (несколько процентов) практически не влияют на давление рабочей смеси, которое обычно выбирается при больших мощностях накачки максимально возможным, и позволяют увеличить мощность и энергию излучения при мощностях накачки более 40 кВт·см<sup>-3</sup>·атм<sup>-1</sup>. Однако большее увеличение энергии излучения достигается при сохранении удельного энерговклада и повышении давления смеси Ag–Xe.

Данная работа была проведена при поддержке МНТЦ (проект № 1206).

1. Lawton S.A., Richards J.B., Newman L.A., Spech L., De Temple T.A. *J. Appl. Phys.*, **50**, 3888 (1979).
2. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **7**, 663 (1980).
3. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н. *Письма в ЖТФ*, **8**, 837 (1982).
4. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **11**, 1722 (1984).
5. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 874 (1985).
6. Басов Н.Г., Баранов В.В., Данилычев В.А., Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Ржевский А.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **13**, 1543 (1986).
7. Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е., Месяц Г.А., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Чагин А.А., Щанин П.М. *Письма в ЖТФ*, **12**, 37 (1986).
8. Держиев В.И., Коваль Н.Н., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Фомин Е.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **14**, 427 (1987).
9. Watterson R.L., Jacob J.N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 417 (1990).
10. Suda A., Wexler V.L., Riley K.J., Fildman V.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 911 (1990).
11. Litzenberger L.N., Trainor D.W., McGeoch M.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 1668 (1990).
12. Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. *Оптика и спектроскопия*, **71**, 669 (1991).
13. Серета О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 535 (1993).
14. Bugaev A.S., Koval N.N., Lomaev M.I., Mel'chenko S.V., Ryzhov V.V., Tarasenko V.F., Turchanovsky I.Yu., Fedenev A.V., Shchanin P.M. *Laser and Particle Beams*, **12**, № 4, 633 (1994).
15. Patterson E.L., Samlin G.E. *J. Appl. Phys.*, **76**, 2582 (1994).
16. Карелин А.В., Синянский А.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **24**, 387 (1997).
17. Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **25**, 493 (1998).
18. Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Скаун В.С. *Квантовая электроника*, **26**, 209 (1999).
19. Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **28**, 121 (1999).
20. Fedenev A.V., Karelin A.V., Simakova O.V., Tarasenko V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 137 (2002).
21. Абдуллин Э.Н., Горбачев С.И., Ефремов А.И., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Фомин Е.А., Щанин П.М. *Квантовая электроника*, **20**, 652 (1993).