

Табл.1. Реакции буферного и электронного перемешивания рабочих уровней для рассматриваемых переходов и их константы скоростей.

Перемешивание тяжелыми частицами	
Реакция	Константа скорости (см ³ /с)
Xe(3d ₂) + He ↔ Xe(d ₁ ') + He	10 ⁻¹³
Xe(3d ₁ '') + He ↔ Xe(3d ₄ ') + He	7 × 10 ⁻¹²
Xe(3d ₄ ') + He ↔ Xe(3d ₃ ') + He	7.5 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + He ↔ Xe(2p ₆) + He	2 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + He ↔ Xe(2p ₈) + He	4.5 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + He ↔ Xe(1s ₂) + He	10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + He ↔ Xe(1s ₃) + He	2 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + He ↔ Xe(2p ₁₀) + He	2.5 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₉) + He ↔ Xe(1s ₂) + He	2.5 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₉) + He ↔ Xe(1s ₃) + He	2.5 × 10 ⁻¹²
Xe(3d ₂) + Xe ↔ Xe(d ₁ ') + Xe	4 × 10 ⁻¹¹
Xe(d ₁ '') + Xe ↔ Xe(3d ₄ ') + Xe	2.1 × 10 ⁻¹¹
Xe(3d ₄ ') + Xe ↔ Xe(3d ₃ ') + Xe	1.1 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₅) + Xe ↔ Xe(2p ₆) + Xe	1.5 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + Xe ↔ Xe(2p ₇) + Xe	10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + Xe ↔ Xe(2p ₁₀) + Xe	3 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + Xe ↔ Xe(2p ₈) + Xe	3.4 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + Xe ↔ Xe(2p ₉) + Xe	2.8 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₇) + Xe ↔ Xe(2p ₈) + Xe	4 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + Xe ↔ Xe(2p ₉) + Xe	2 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + Xe ↔ Xe(1s ₂) + Xe	2 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + Xe ↔ Xe(1s ₃) + Xe	10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Xe ↔ Xe(2p ₁₀) + Xe	2.5 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Xe ↔ Xe(1s ₂) + Xe	4 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Xe ↔ Xe(1s ₃) + Xe	4 × 10 ⁻¹¹
Xe(3d ₂) + Ar ↔ Xe(d ₁ ') + Ar	10 ⁻¹²
Xe(d ₁ '') + Ar ↔ Xe(3d ₄ ') + Ar	1.8 × 10 ⁻¹²
Xe(3d ₄ ') + Ar ↔ Xe(3d ₃ ') + Ar	3 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₅) + Ar ↔ Xe(2p ₆) + Ar	4 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + Ar ↔ Xe(2p ₈) + Ar	10 ⁻¹¹
Xe(2p ₇) + Ar ↔ Xe(1s ₂) + Ar	4 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₇) + Ar ↔ Xe(2p ₉) + Ar	7.25 × 10 ⁻¹²
Xe(2p ₇) + Ar ↔ Xe(1s ₃) + Ar	10 ⁻¹²
Xe(2p ₉) + Ar ↔ Xe(2p ₁₀) + Ar	3.3 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Ar ↔ Xe(2p ₁₀) + Ar	1.2 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Ar ↔ Xe(1s ₂) + Ar	1.7 × 10 ⁻¹¹
Xe(2p ₉) + Ar ↔ Xe(1s ₃) + Ar	7 × 10 ⁻¹²

Перемешивание электронами

Реакция	Константа скорости (см ³ /с)	\Delta E (эВ)
Xe(2p ₅) + e ↔ Xe(1s ₂) + e	7.5 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.363
Xe(2p ₆) + e ↔ Xe(1s ₂) + e	6.84 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	0.251
Xe(2p ₇) + e ↔ Xe(1s ₂) + e	7 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.219
Xe(2p ₉) + e ↔ Xe(1s ₂) + e	1.1 × 10 ⁻⁶ f ₁ (β)	0.116
Xe(2p ₁₀) + e ↔ Xe(1s ₂) + e	4.7 × 10 ⁻⁶ f ₁ (β)	0.011
Xe(2p ₇) + e ↔ Xe(1s ₃) + e	5 × 10 ⁻⁹ f ₁ (β)	0.342
Xe(2p ₁₀) + e ↔ Xe(1s ₃) + e	1.6 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.133
Xe(2p ₅) + e ↔ Xe(1s ₄) + e	9 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.493
Xe(2p ₆) + e ↔ Xe(1s ₄) + e	2.6 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	1.381
Xe(2p ₆) + e ↔ Xe(1s ₅) + e	1.1 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.501
Xe(2p ₇) + e ↔ Xe(1s ₄) + e	1.1 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.349
Xe(2p ₇) + e ↔ Xe(1s ₅) + e	1.88 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	1.469
Xe(2p ₈) + e ↔ Xe(1s ₅) + e	1.2 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.401

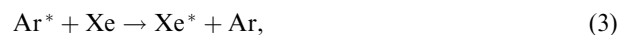
Продолжение табл.1

Реакция	Константа скорости (см ³ /с)	\Delta E (эВ)
Xe(2p ₉) + e ↔ Xe(1s ₄) + e	2.9 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.246
Xe(2p ₉) + e ↔ Xe(1s ₅) + e	5.4 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	1.366
Xe(2p ₁₀) + e ↔ Xe(1s ₅) + e	10 ⁻⁶ f ₁ (β)	1.260
Xe(2p ₁₀) + e ↔ Xe(1s ₄) + e	10 ⁻⁷ f ₁ (β)	1.140
Xe(3d ₂) + e ↔ Xe(2p ₅) + e	1.8 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.467
Xe(3d ₂) + e ↔ Xe(2p ₇) + e	3 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.611
Xe(3d ₂) + e ↔ Xe(2p ₉) + e	4.4 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	0.714
Xe(3d ₂) + e ↔ Xe(2p ₁₀) + e	3 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.820
Xe(d ₁ '') + e ↔ Xe(2p ₆) + e	1.4 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.334
Xe(d ₁ '') + e ↔ Xe(2p ₇) + e	8 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	0.368
Xe(d ₁ '') + e ↔ Xe(2p ₈) + e	3.85 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	0.436
Xe(d ₁ '') + e ↔ Xe(2p ₉) + e	2.2 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.471
Xe(d ₁ '') + e ↔ Xe(2p ₁₀) + e	1.2 × 10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.575
Xe(3d ₄ ') + e ↔ Xe(2p ₆) + e	8.5 × 10 ⁻⁹ f ₁ (β)	0.214
Xe(3d ₄ ') + e ↔ Xe(2p ₈) + e	6 × 10 ⁻⁸ f ₁ (β)	0.315
Xe(3d ₄ ') + e ↔ Xe(2p ₉) + e	10 ⁻⁷ f ₁ (β)	0.353
Xe(1s ₂) + e ↔ Xe(3d ₂) + e	5.75 × 10 ⁻⁷ f ₂ (β)	0.83
Xe(1s ₄) + e ↔ Xe(3d ₂) + e	7 × 10 ⁻⁹ f ₂ (β)	1.96
Xe(1s ₅) + e ↔ Xe(3d ₂) + e	7.2 × 10 ⁻⁹ f ₂ (β)	2.08
Xe(1s ₂) + e ↔ Xe(d ₁ '') + e	10 ⁻⁷ f ₂ (β)	0.586
Xe(1s ₃) + e ↔ Xe(d ₁ '') + e	4.42 × 10 ⁻⁸ f ₂ (β)	0.708
Xe(1s ₄) + e ↔ Xe(d ₁ '') + e	4.37 × 10 ⁻⁹ f ₂ (β)	1.716
Xe(1s ₅) + e ↔ Xe(d ₁ '') + e	1.2 × 10 ⁻⁸ f ₂ (β)	1.836
Xe(1s ₂) + e ↔ Xe(3d ₄ ') + e	7.42 × 10 ⁻⁷ f ₂ (β)	0.466
Xe(1s ₄) + e ↔ Xe(3d ₄ ') + e	4.735 × 10 ⁻⁸ f ₂ (β)	1.596
Xe(1s ₅) + e ↔ Xe(3d ₄ ') + e	1.336 × 10 ⁻⁸ f ₂ (β)	1.716

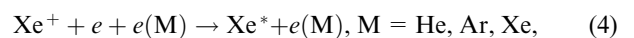
Пр и м е ч а н и е. Приведены только реакции и константы скоростей в одном направлении переходов k_{12} . Константы скоростей прямых и обратных переходов связаны соотношением $k_{21} = (g_2/g_1)k_{12} \times \exp(-\Delta E/T)$, где $\Delta E = E_2 - E_1$, E_1 и E_2 – энергии начального и конечного уровней; g_1 , g_2 – статистические веса начального и конечного уровней; $T = T_g$ в случае перемешивания уровней буфером и $T = T_e$ при электронном перемешивании уровней. Функция $f_1(\beta) = \{[\beta(\beta + 3)]^{1/2}/(\beta + A)\} \times \ln(16 + \beta^{-1})$, где $\beta = |\Delta E|/T_e$; A – величина порядка единицы для переходов $6p - 6s'$ и $5d - 6p$ и ~ 0.5 для переходов $6p - 6s$. Функция $f_2(\beta) = \{[\beta(\beta + 3)]^{1/2}/(\beta + A)\} \exp(-\beta)$, где $\beta = |\Delta E|/T_e$; $A = 1.6 - 2$.



с константой скорости $2 \times 10^{-7} T_e^{-0.5} (0.026/T_g)^{0.75}$ (в см³/с) [10], T_e и T_g – температура электронов и газа; при передаче возбуждения от Ar^* к Xe :



с константой скорости 2×10^{-10} см³/с [11]; в реакциях тройной рекомбинации ионов Xe^+ :

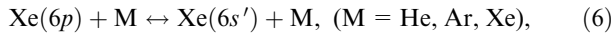


с константами скорости $5.4 \times 10^{-27} T_e^{-4.5}$ и $2.4 \times 10^{-31} \times T_e^{-3.5} T_g$ соответственно (в см⁶/с) [12]; в процессе возбуждения электронами из $6s'$ -состояний:

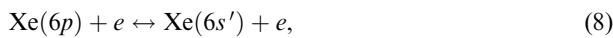


(используемые нами константы скоростей этих реакций для рабочих уровней приведены в табл.1).

При этом на уровень $5d[3/2]_1^0$ – верхний для переходов с длиной волны 1.73, 2.03 и 2.65 мкм – попадает 40 % и 15 % потока реакции в реакциях диссоциативной рекомбинации $ArXe^+$ и Xe_2^+ соответственно, 20 % – в реакции передачи возбуждения от Ar^* к Хе и $(p_m + 1)^{0.2}$ 35 % – в реакции тройной рекомбинации Xe^+ (p_m – число атмосфер, соответствующее давлению смеси). Помимо накачки верхних рабочих уровней, величину и знак инверсии на лазерных переходах определяет тушение нижних рабочих уровней тяжелыми частицами в процессах



и электронное перемешивание уровней



которое ухудшает инверсию на рабочих линиях, тем самым приводя систему к равновесному распределению относительно $6s$ -состояний атома Хе (константы скоростей реакций для рабочих уровней приведены в табл.1; константы буферного перемешивания для уровней $6p$ взяты из [13–16]).

Роль каждого из каналов (1)–(5) при накачке верхних рабочих уровней зависит от состава и давления смеси, соотношения компонентов и мощности накачки. В смеси He–Xe накачку определяет реакция (4), в чистом Хе – реакция (2), в смеси (He)–Ar–Xe – как реакция (1), так и реакция (5). Как показывает эксперимент и подтверждают наши расчеты, в условиях неселективного резонатора составом смеси определяется спектральный состав излучения. В чистом Хе основная энергия «высвечивается» на длине волны 3.51 мкм [17, 18]. В смеси He–Xe в спектре преобладают линии 2.03 и 2.65 мкм [19]. Как упоминалось выше, в оптимальных условиях накачки Ar–Xe-смеси доминирует линия 1.73 мкм. Преобладание той или иной длины волны в спектре в зависимости от состава смеси связано с особенностями внутри- и межмультиплетного перемешивания рабочих уровней электронами и тяжелыми частицами в реакциях (6)–(9) (подробнее см. [7, 8]).

Как показали предварительные расчеты, при использовании селективного резонатора смесь Ar–Xe является оптимальной для всех 6 длин волн. Для каждой из этих длин волн существует диапазон параметров накачки, в пределах которого возникает положительная инверсия. В используемой модели предполагалось, что генерация каждой из длин волн происходит в области оптимальных параметров, поэтому нами было уделено дополнительное внимание спектральным характеристикам в условиях свободной конкуренции линий в смеси Ar–Xe. Цель работы состояла в более точном определении констант скоростей реакций электронного и буферного перемешивания возбужденных уровней в атоме Хе. Ранее константы скоростей электронного перемешивания рассчитывались по формулам аналитической аппроксимации сечений в борновском приближении [20]. Поскольку все методы расчета имеют большую погрешность (от 25 % до 100 % и более), а информация о буферном перемешивании $5d$ -

состояний Хе отсутствует, моделирование на этом этапе состояло в варьировании констант скоростей этих процессов в пределах погрешностей их вычисления при условии наилучшего описания экспериментов по исследованию спектральных характеристик излучения Хе-лазера с неселективным резонатором (см. табл.1). Для тестирования модели мы использовали эксперименты [18, 21, 22], где получены спектральные зависимости в условиях свободной конкуренции линий в смеси Ar–Xe от содержания Хе в смеси и мощности накачки.

На рис.2 приведены сравнительные экспериментальные [18] и расчетные характеристики спектрального распределения энергии излучения в зависимости от относительного содержания ксенона δ_{Xe} в смеси Ar–Xe с давлением 3.5 атм. В диапазоне изменения $\delta_{Xe} = 10^{-4}$ – 5×10^{-2} в спектре генерации преобладают линии с $\lambda = 1.73$ и 2.63 мкм, имеющие общий нижний рабочий уровень. Верхний для $\lambda = 2.63$ мкм уровень $5d[5/2]_2$ заселяется в результате тушения вышележащих $5d$ -уровней тяжелыми частицами и электронами и непосредственной накачки в реакциях диссоциативной рекомбинации ионов $ArXe^+$ и возбуждения электронами из $6s'$ -состояний. Максимуму энергии излучения в расчете и эксперименте соответствует $\delta_{Xe} = 5 \times 10^{-3}$. Если содержание ксенона превышает 5×10^{-3} , наблюдается перераспределение энергии генерации по линиям и падение КПД генерации. В этом случае начинают доминировать линии 3.37 и 3.51 мкм, верхние рабочие уровни которых заселяются атомами Хе в ходе столкновительного каскада из вышележащих состояний.

Расчет (в режиме усиления) на рассматриваемых переходах дал схожие с экспериментом [21] значения коэффициентов усиления. При давлении смеси Ar : Хе = 200 : 1,

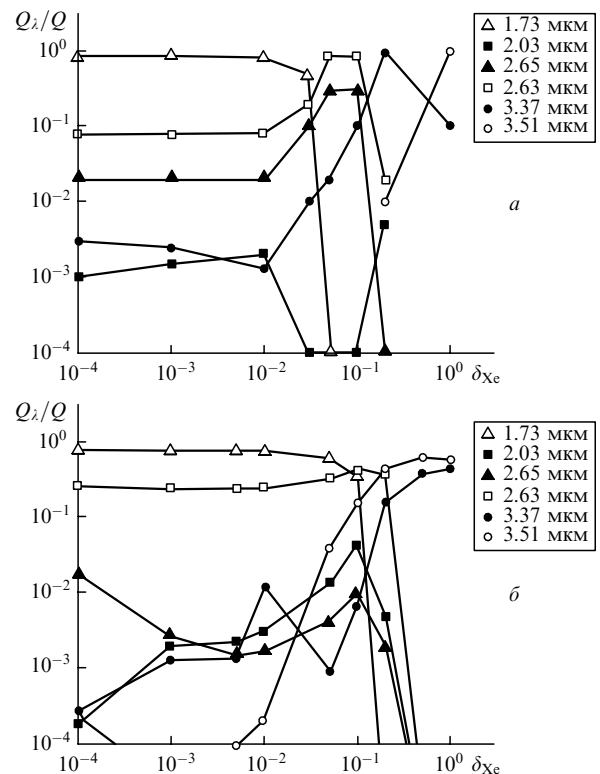


Рис.2. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости удельных энергий излучения на спектральных линиях 1.73 (Δ), 2.03 (■), 2.65 (▲), 2.63 (□), 3.37 (●), 3.51 мкм (○) в смеси Ar–Xe с давлением 3.5 атм от относительного содержания Хе в смеси.

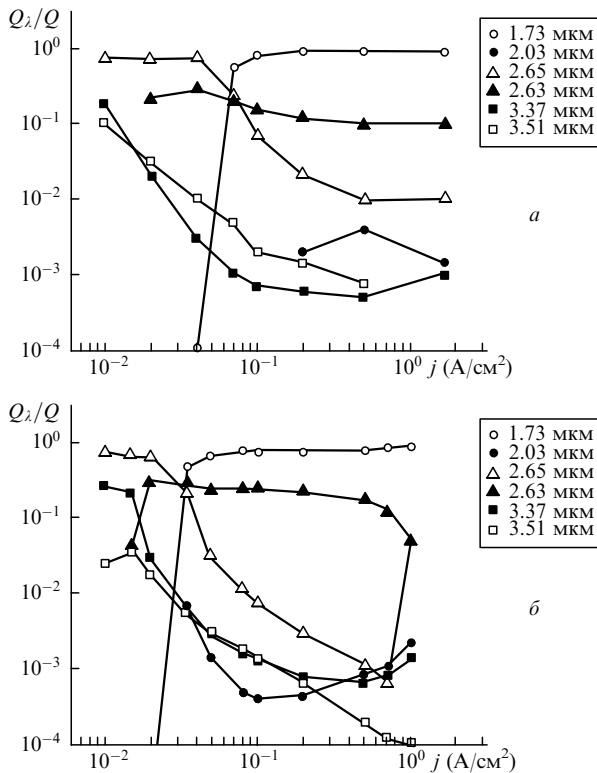


Рис.3. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости спектрального распределения энергии в смеси Ag:Xe = 100:1 при давлении 1 атм от плотности тока пучка j .

составляющем 3.5 атм, все переходы, кроме линии 3.51 мкм, имели положительную инверсию с максимальными коэффициентами усиления 0.14, 0.127, 0.31, 0.15 и 0.09 см^{-1} в расчете и 0.12, 0.14, 0.25, 0.18 и 0.11 см^{-1} в эксперименте на линиях 1.73, 2.03, 2.65, 2.63 и 3.37 мкм соответственно. При уменьшении давления до 1 атм на временных зависимостях коэффициента усиления, соответствующих длинам волн 2.03 и 3.37 мкм, появлялась провал, попадающий для линии 3.37 мкм в отрицательную область. Максимальные значения коэффициентов усиления составили 0.14, 0.1, 0.3, 0.11 и 0.09 см^{-1} в расчете и 0.12, 0.1, 0.2, 0.16 и 0.07 см^{-1} в эксперименте.

На рис. 3 и 4 проведено сравнение экспериментальных [22] и расчетных зависимостей от плотности тока электронного пучка относительных интенсивностей линий на 6 рассматриваемых переходах в смеси Ag:Xe = 100:1 с давлением 1 и 3 атм соответственно. В эксперименте накачка производилась пучком электронов с энергией ~ 250 кэВ, с длительностью П-образного импульса 8 мкс. Плотность тока электронного пучка j менялась в диапазоне 10–500 $\text{мА}/\text{см}^2$. В расчете и эксперименте линия 1.73 мкм начинает доминировать при плотностях тока от 0.1 $\text{А}/\text{см}^2$ и выше [22, 23]. Эта область соответствует росту КПД и энергии генерации лазера.

3. Оптимальные параметры и условия генерации Хе-лазера

Как уже упоминалось выше, при накачке жестким ионизатором максимальные энергетические характеристики выходного излучения получены в смеси Ag–Xe. Смесь Ag–Xe характеризуется большими энергетическими характеристиками и, как следствие, высокими температурой и концентрацией электронов. Большую роль играют реакции с участием

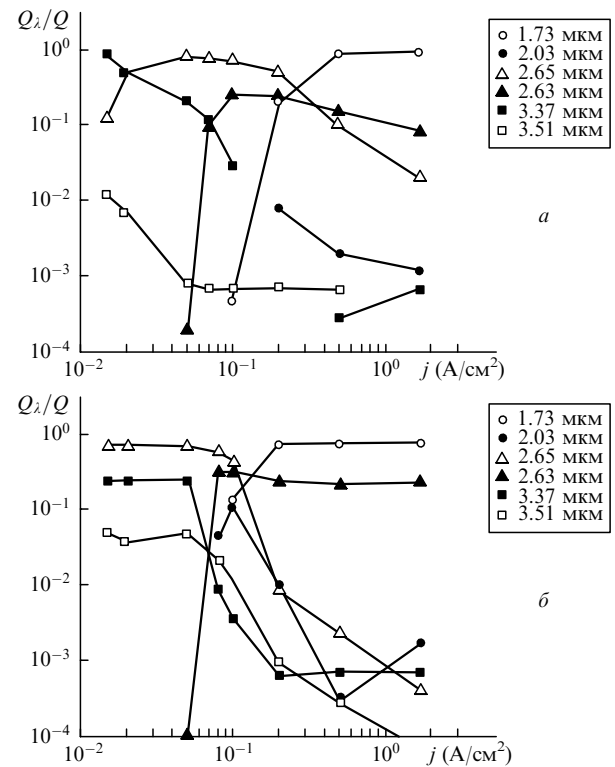


Рис.4. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости спектрального распределения энергии в смеси Ag:Xe = 100:1 при давлении 3 атм от плотности тока пучка j .

электронов, такие как возбуждение электронами верхних рабочих уровней из $6s'$ -состояний Хе (5) и реакции электронного перемешивания возбужденных уровней атома Хе (7)–(8). Анализ имеющихся экспериментальных результатов по изучению Хе-лазера совместно с численным моделированием позволяет выделить область наиболее благоприятных условий для генерации Хе-лазера.

Согласно эксперименту [3] и нашим расчетам [7, 24] область плотности тока ~ 0.5 $\text{А}/\text{см}^2$ при 1 атм и микросекундных пучках (вложенная энергия $E_{\text{in}} = 5 - 10$ Дж/л) является оптимальной. Увеличение мощности накачки выше оптимальной приводит к значительному уменьшению КПД Хе-лазера [3, 7, 24]. На импульсе генерации появляется провал, который соответствует максимуму импульса накачки и углубляется с ростом мощности накачки [3, 9, 23, 24], т. е. импульс генерации приобретает двугорбую форму. Рост энерговклада приводит к росту концентрации и температуры электронов, что увеличивает электронное перемешивание возбужденных уровней в атоме Хе, стремящееся привести систему уровней к равновесному распределению относительно $6s$ -состояний Хе. Провал в центре импульса генерации обусловлен срывом инверсии на рабочем переходе вследствие электронного перемешивания лазерных уровней. Оптимум КПД генерации по мощности накачки достигается вследствие более быстрого роста населенности нижнего рабочего уровня снизу электронами из состояний $6s$, $6s'$ по сравнению с ростом населенности верхнего рабочего уровня.

С ростом мощности накачки оптимальное давление смеси растет. При ядерной накачке (мощность накачки ~ 20 Вт/ см^3) оно составляет 0.5 атм как в эксперименте [2], так и в наших расчетах [7]. При микросекундном электронном пучке как в эксперименте [3, 23], так и в расчетах

[24] оптимальное давление смеси составляет 1 атм при мощности накачки до 0.3 кВт/см³ (плотности тока 0.05–0.5 А/см²) и 3–3.5 атм при мощности накачки до 1–3 кВт/см³ (плотности тока ~2 А/см²) [18], в расчетах же при этих мощностях накачки оптимальным давлением является 3.5–4 атм [7, 24]. В эксперименте [23] получено оптимальное давление 1–1.5 атм при плотностях тока 0.03–0.27 А/см². По нашим оценкам, как и в эксперименте [3], выполненном при примерно той же энергии электронов пучка (250–300 кэВ) и плотности тока пучка 0.4 А/см², это соответствует мощности накачки до 0.3 кВт/см³, а не 1–3 кВт/см³, как оценивается в работе [23].

При увеличении мощности накачки до десятков кВт/см³ в эксперименте [9] максимальный КПД (не более 2%) достигался при 2.5 атм, хотя расчеты для условий этого эксперимента, представленные в той же работе, показали, что в однородной активной среде, которая очищена от примесей посторонних газов, КПД может достигать 3.4% при 4 атм и при мощности накачки около 60 кВт/см³. Мы не исключаем, что в расчетах присутствует некоторое завышение эффективности Хе-лазера при повышенных энергозкладах и давлениях, но, к сожалению, в эксперименте продвинуться в область давлений свыше 3.5 атм пока никому не удалось, и проверить этот факт сложно.

С ростом давления смеси растет оптимальный энергозклад [2, 23]. Увеличение оптимального давления смеси с ростом мощности накачки связано с тем, что в реакциях соударения с атомами Аг требуется большее давление для нарушения равновесия, вызванного электронным перемешиванием уровней. Оптимальное давление смеси определяется в основном увеличением с ростом давления тушения верхнего рабочего уровня тяжелыми частицами, а также столкновительной ширины спектральной линии и трехчастичной конверсии ионов Хе₂⁺ в ионы Хе₃⁺ (в чистом Хе).

Вклад каждого процесса и значение оптимального давления зависят от состава смеси и параметров накачки. Оптимальное давление минимально в чистом Хе вследствие того, что константы тушения верхних рабочих уровней атомами Хе для него максимальны, и максимально в смеси Не–Хе, т.к. константа тушения верхних рабочих уровней атомами Не минимальна и другие паразитные каналы отсутствуют, в отличие от чистого Хе и смесей (Не)–Аг–Хе. Особенностью слабой (~20 Вт/см³) накачки смеси Аг–Хе является то, что в области давления смеси 0.5 атм и выше оптимум связан с уменьшением как концентрации и температуры электронов

(следовательно, и накачки верхних рабочих уровней электронами из 6s'-состояний Хе), так и накачки верхних рабочих уровней при передаче возбуждения от Аг* из-за ассоциации Аг* в Аг₂*.

Оптимальное относительное содержание Хе варьируется от 5 × 10⁻³ [25] до 0.01 [23]. Его значение определяется уменьшением потока диссоциативной рекомбинации ионов АгХе⁺ на верхние рабочие уровни и снижением роста канала образования ионов Хе₂⁺, которые в большей степени накачивают нижние рабочие уровни. Другой причиной ухудшения генерации является увеличение тушения верхних рабочих уровней атомами Хе.

В оптимальном режиме ЭП накачки разбавление гелием смеси Аг–Хе приводит к уменьшению выходной энергии [26]. В условиях миллисекундной накачки, когда удельные энергозклады превышают 100 Дж·л⁻¹·атм⁻¹, применение тройных смесей типа Не–Аг–Хе дает положительный эффект. При столь больших удельных энергозкладах существенный нагрев газовой смеси вызывает обрыв импульса генерации до окончания импульса накачки из-за увеличения степени ионизации и роста температуры газа. Добавка Не в смесь Аг–Хе при ядерной накачке длительностью до 1.5 с приводит к увеличению длительности и энергии лазерного импульса с изменением длины волны генерации с 1.73 на 2.03 мкм. Введение значительного (не менее 1 атм) количества гелия позволяет существенно увеличить допустимую вводимую энергию и надеяться на больший удельный энергозъем с единицы объема активной среды по сравнению с Аг–Хе-лазером (λ = 1.73 мкм), несмотря на потерю в КПД [26].

4. Численная оптимизация Аг–Хе лазера с ЭП накачкой

Максимальные выходные характеристики генерации достигаются в смеси Аг–Хе на длине волны 1.73 мкм. Поиск максимального КПД и энергии генерации и оптимальных условий для их достижения для каждой из 6 длин волн производился варьированием давления смеси, соотношения компонентов, длительности и формы импульса накачки, мощности накачки и коэффициента отражения зеркал резонатора. Результаты оптимизации суммированы в табл.2,3. Максимальные значения выходных характеристик Аг–Хе-смеси могут быть реализованы в некотором интервале параметров.

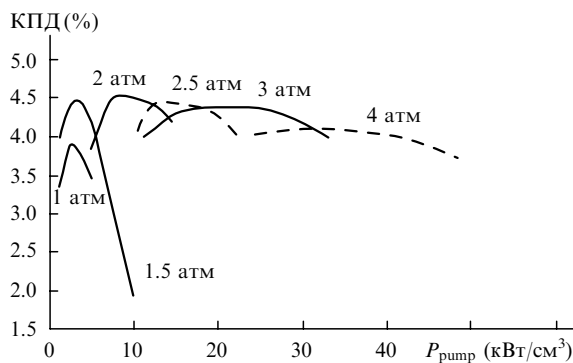
На длине волны 1.73 мкм (табл.2) максимальный расчетный КПД генерации η_{max} = 4.5%, максимальное расчетное значение удельного энергозъема Q_{max} = 19 Дж/л.

Табл.2. Условия достижения максимальных значений КПД (η_{max}) и удельной энергии излучения (Q_{max}) для лазера на смеси Аг–Хе при λ = 1.73, 2.03 и 2.65 мкм.

Параметры лазера	λ = 1.73 мкм		λ = 2.03 мкм		λ = 2.65 мкм	
	при η _{max}	при Q _{max}	при η _{max}	при Q _{max}	при η _{max}	при Q _{max}
Энергозъем (Дж/л)	0.65–4.7	18.5 ± 0.5	0.14–4.0	15.0 ± 0.5	0.05–2.6	9.8 ± 0.1
КПД (%)	4.4 ± 0.1	0.7–2.7	2.0 ± 0.1	0.65–1.35	1.6 ± 0.1	0.4–0.9
Давление смеси Аг–Хе (атм)	1.5–3	5	1–3	5	1–3	5
Соотношение компонентов	от 250:1 до 150:1	от 300:1 до 150:1	от 250:1 до 150:1	от 250:1 до 150:1	от 300:1 до 100:1	от 300:1 до 100:1
Мощность энергозклада (кВт/см ³)	7–30	50	0.5–10.5	11.5–17.5	1.2–17.5	17–30
Энергозклад (Дж/л)	15–110	700–3000	7–200	1100–2300	2.8–170	1100–1700
Длительность импульса (мкс)	1.5–10	15–100	4–100	40–100	2–50	50–100
Обратное время жизни фотона в резонаторе (10 ⁸ с ⁻¹)	1–4	1–4	1–1.5	1–1.5	1.5–2	1.5–2

Табл.3. То же, что в табл.2, при $\lambda = 2.63, 3.37$ и 3.51 мкм.

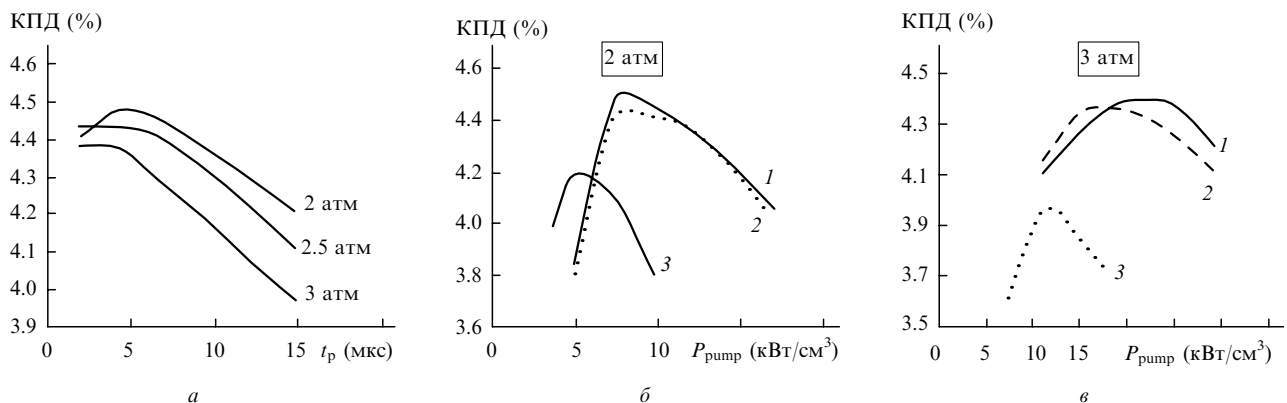
Параметры лазера	$\lambda = 2.63$ мкм		$\lambda = 3.37$ мкм		$\lambda = 3.51$ мкм	
	при η_{\max}	при Q_{\max}	при η_{\max}	при Q_{\max}	при η_{\max}	при Q_{\max}
Энергосъем (Дж/л)	0.05–1.0	3.0 ± 0.1	0.01–1.0	4.5	0.004–0.095	0.55 ± 0.3
КПД (%)	1.15 ± 0.05	0.13–0.75	0.56 ± 0.03	0.4	0.46 ± 0.2	0.02–0.24
Давление смеси Ar–Xe (атм)	1–2.5	5	1–2	5	0.25–2	5
Соотношение компонентов	от 300:1 до 100:1	от 300:1 до 100:1	от 200:1 до 100:1	от 200:1 до 100:1	от 150:1 до 3:1	от 150:1 до 100:1
Мощность энерговклада (кВт/см ³)	3.5–25	30–40	0.25–2	11.5	0.015–2.8	11.5–47
Энерговклад (Дж/л)	5–90	400–2250	1.75–185	1125	0.85–20	230–3000
Длительность импульса (мкс)	1.5–15	10–50	5–100	100	5–100	10–100
Обратное время жизни фотона в резонаторе (10^8 с ⁻¹)	1–3	1–3	0.5	0.5	0.4	0.4

Рис.5. Зависимости КПД генерации с $\lambda = 1.73$ мкм от удельной мощности энерговклада для различных давлений смеси при оптимальных содержании Xe в смеси (Ar: Xe от 250:1 до 150:1) и обратном времени жизни фотона в резонаторе с учетом потерь на излучение $(1-4) \times 10^8$ с⁻¹ и при длительности импульса накачки 2–5 мкс.

На рис.5–8 приведены некоторые из характерных зависимостей КПД и удельной энергии генерации на длине волны 1.73 мкм от различных параметров, по которым проводилась оптимизация. Оптимальная область давления смеси, при котором было получено близкое к максимальному значению КПД генерации, составляет 1.5–3 атм (см. рис.5). При этом с увеличением давления смеси значение оптимальной удельной мощности энерговклада растет. Причины этого описывались выше. Зависимость КПД генерации от относительного содержания Xe в смеси с давлением 2 и 3 атм при различных значениях мощности энерговклада приведены на рис.7. Область

соотношения компонент Ar: Xe от 250:1 до 150:1 соответствует достижению КПД генерации в пределах 4.4 ± 0.1 %. Оптимальной формой импульса накачки является прямоугольная форма. Для достижения максимального КПД генерации при более длинных импульсах накачки требуется снижать мощность энерговклада (см. рис.6, 7). При этом с увеличением длительности накачки (вплоть до 100 мкс) растет роль нагрева газа, ведущего к срыву импульса генерации до окончания импульса накачки и уменьшению эффективности энерговклада. Поэтому для получения максимального КПД генерации оптимальной формой импульса становится трапеция или треугольник с очень пологим спадом. При сохранении максимального энергосъема 19 Дж/л увеличение длительности накачки от 15 до 100 мкс ведет к уменьшению КПД генерации от 2.7 % до 0.7 % (см. рис.8). При смещении из оптимального диапазона длительности импульса накачки КПД генерации слабо уменьшается.

Для $\lambda = 2.03$ мкм максимальный КПД генерации составил около 2 %, максимальный энергосъем – 15 Дж/л. Для $\lambda = 2.65$ мкм эти значения составили 1.7 % и почти 10 Дж/л (табл.2). Оптимальным для этих линий интервалом давлений, в котором сохраняются максимальные энергетические характеристики, является 1–3 атм при соотношении компонент Ar: Xe от 250:1 до 150:1 для $\lambda = 2.03$ мкм и от 300:1 до 100:1 для $\lambda = 2.65$ мкм. Поскольку нижние уровни для этих переходов располагаются выше по энергии и дальше от $6s'$ -состояний, чем нижний уровень для $\lambda = 1.73$ мкм, то такие переходы значительно менее чувствительны к нагреву газа при увеличении мощно-

Рис.6. Зависимости КПД генерации с $\lambda = 1.73$ мкм от длительности импульса накачки при различных давлениях смеси (а) и при длительностях импульса накачки 2 (1), 5 (2) и 15 мкс (3) от удельной мощности энерговклада при давлении смеси 2 атм (б) и 3 атм (в). Остальные параметры те же, что и на рис.5.

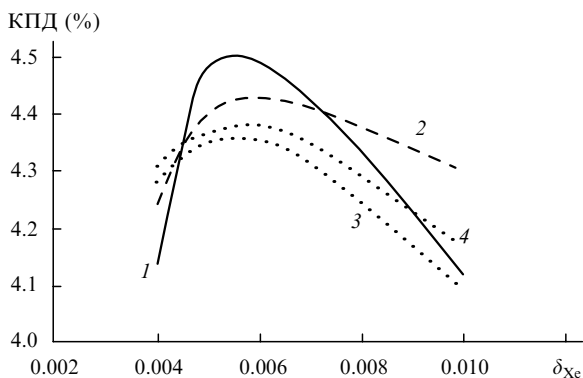


Рис.7. Зависимости КПД генерации с $\lambda = 1.73$ мкм от относительно содержания Хе в смеси $\delta_{Хе}$ с давлением 2 (1, 2) и 3 атм (3, 4) при удельной мощности энергоклада 7.5 (1), 10 (2), 15 (3) и 20 кВт/см² (4). Длительность импульса накачки ~ 5 мкс.

сти накачки и длительности импульса накачки. Поэтому диапазоны энергоклада, мощности энергоклада и длительностей импульса накачки для этих линий оказываются шире, чем для $\lambda = 1.73$ мкм.

Максимальные значения КПД генерации и энергосъема на $\lambda = 2.63$ мкм (табл.3) составили соответственно 1.2 % и 3.1 Дж/л. В пределах небольшой погрешности максимальный КПД генерации сохраняется при давлениях 2.5 атм и соотношении компонент Ag : Хе от 300 : 1 до 100 : 1. Поскольку нижний уровень у $\lambda = 2.63$ мкм такой же, как и у $\lambda = 1.73$ мкм, и области оптимальной мощности энергоклада у этих линий почти совпадают (7–30 кВт/см³ для $\lambda = 1.73$ мкм и 3.5–25 кВт/см³ для $\lambda = 2.63$ мкм), для этого перехода налагаются те же ог-

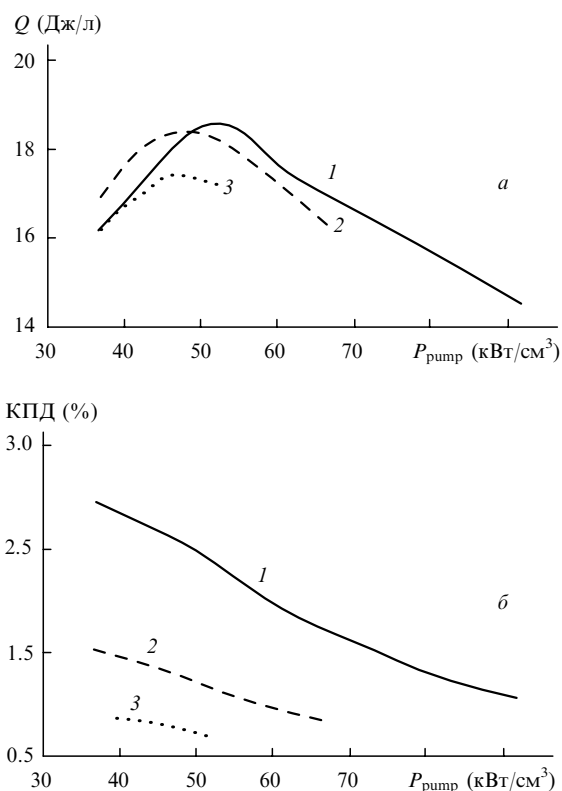


Рис.8. Зависимости удельной энергии (а) и КПД (б) генерации с $\lambda = 1.73$ мкм от удельной мощности энергоклада в смеси с давлением 5 атм при длительностях импульса накачки 15 (1), 30 (2) и 100 мкс (3) и составе смеси Ag : Хе = 150 : 1.

раничения по длительности и форме импульса накачки, что и для $\lambda = 1.73$ мкм (см. выше).

На линии 3.37 мкм (табл.3) максимальный КПД генерации 0.6 % достигается в диапазоне 1–2 атм. При 5 атм может быть достигнут энергосъем 4.5 Дж/л при КПД генерации 0.4 %. Оптимальным соотношением компонентов является интервал от 200 : 1 до 100 : 1. Для этого уровня, как и для $\lambda = 2.03$ мкм, обладающего тем же нижним рабочим уровнем, также нет жестких ограничений на длительность и форму импульса накачки. Максимальное значение КПД генерации сохраняется и при импульсах длительностью до 100 мкс.

На длине волны 3.51 мкм (табл.3) получены самые низкие энергетические характеристики – КПД генерации 0.48 % и энергосъем 0.58 Дж/л. Эту линию отличает расширение диапазона оптимального давления в область низких давлений (0.25–2 атм) и диапазона оптимального соотношения компонентов от 150 : 1 до 3 : 1. Для линии 3.51 мкм снижение оптимального давления сопровождается уменьшением оптимального соотношения компонентов. Если при 2 атм оно составляет от 150 : 1 до 100 : 1, то при 0.25 атм оно достигает 3 : 1. Поскольку оптимум лежит в области небольших по сравнению с линиями 1.73 и 2.63 мкм, обладающими тем же нижним рабочим уровнем, энергокладов (0.015–2.8 кВт/см³), то увеличение длительности импульса накачки вплоть до 100 мкс не ведет к резкому (как в случае с 1.73 и 2.63 мкм) снижению КПД.

5. Заключение

В работе была проведена полная численная оптимизация Хе-лазера с электронно-пучковой накачкой на 6 переходах с длинами волн 1.73, 2.03, 2.65, 2.63, 3.37 и 3.51 мкм. Для всех длин волн максимальные выходные характеристики генерации достигаются в смеси Ag–Хе. Максимальные значения КПД генерации 4.5 % и удельного энергосъема 19 Дж/л достигаются на длине волны 1.73 мкм. Для длин волн $\lambda = 2.03, 2.65, 2.63, 3.37$ и 3.51 мкм максимальный КПД составил $\eta = 2 \%, 1.7 \%, 1.2 \%, 0.6 \%$ и 0.48 % соответственно. В пределах малой погрешности эти значения максимальных выходных характеристик Ag–Хе-смеси могут быть реализованы в целом интервале параметров.

Рост оптимального давления смеси с увеличением мощности накачки связан с тем, что требуется большее давление для нарушения равновесия, к которому ведет электронное перемешивание уровней, в реакциях соударения с атомами аргона. Оптимум по давлению смеси определяется в основном увеличением с ростом давления тушения верхних рабочих уровней тяжелыми частицами, столкновительной ширины спектральной линии, трехчастичной конверсии ионов Хе₂⁺ в ионы Хе₃⁺ (в чистом Хе). Вклад каждого процесса и значение оптимального давления зависят от состава смеси и параметров накачки.

Оптимальной формой импульса накачки является прямоугольная форма. Для достижения максимального КПД генерации при более длинных импульсах накачки требуется снижать мощность энергоклада. При увеличении длительности накачки (вплоть до 100 мкс) растет роль нагрева газа, ведущего к обрыву импульса генерации до окончания импульса накачки и к уменьшению эффективности энергоклада, поэтому для достижения максимального КПД генерации оптимальной формой

импульса становится трапеция или треугольник с очень пологим спадом.

В условиях миллисекундной накачки, когда удельные энергоклады превышают $100 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, применение тройных смесей типа He–Ar–Xe дает положительный эффект. При столь больших удельных энергокладах существенный нагрев газовой смеси вызывает обрыв импульса генерации до окончания импульса накачки из-за увеличения степени ионизации и роста температуры газа.

Работа была поддержана проектом МНТЦ № 1206.

- Patel C.K.N., Faust W.L., McFarlane R.A. *Appl. Phys. Lett.*, **1**, 84 (1962).
- Середа О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 535 (1993).
- Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **25**, 493 (1998).
- Litzenberger L.N., Trainor D.W., McGeoch M.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 1668 (1990).
- 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).
- Карелин А.В., Синянский А.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **24**, 387 (1997).
- Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **28**, 121 (1999).
- Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **28**, 129 (1999).
- Fedenev A.V., Karelin A.V., Simakova O.V., Tarasenko V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 137 (2002).
- Kannari F., Suda A., Obara M., Fujioka T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1587 (1983).
- Piper L.G., Velazco J.E., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **59**, 3323 (1973).
- Биберман Л.А., Воробьев В.С., Якубов В.А. *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы* (М.: Наука, 1982).
- Ku J.K., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **84**, 4304 (1986).
- Horiguchi H., Chang R.S.F., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **75**, 1207 (1981).
- Xu J., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **92**, 4191 (1990).
- Alford W.J., Hays G.N., Ohwa M., Kushner M.J. *J. Appl. Phys.*, **69**, 1843 (1991).
- Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. *Квантовая электроника*, **22**, 1184 (1995).
- Dudin A.Yu., Semenova L.V., Ustinovskii N.N., Kholin I.V., Chugunov A.Yu. *J. Sov. Las. Res.*, **13** (5), 374 (1992).
- Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **18**, 921 (1991).
- Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. *Сечения возбуждения атомов и ионов электронами* (М.: Наука, 1973, с. 144).
- Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **20**, 669 (1993).
- Заярный Д.А., Королев А.Г., Сажина Н.Н., Устиновский Н.Н., Холин И.В. *Квантовая электроника*, **18**, 538 (1991).
- Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Скакун В.С. *Квантовая электроника*, **26**, 209 (1999).
- Karelin A.V., Simakova O.V. *Laser Phys.*, **13** (6), 806 (2003).
- Basov N.G., Baranov V.V., Chugunov A.Yu., Danilychev V.A., Dudin A.Yu., Kholin I.V., Ustinovskii M.N., Zayarnyi D.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1756 (1985).
- Karelin A.V., Simakova O.V. *Laser Phys.*, **10** (6), 1208 (2000).