

А.В. Карелин, Р.В. Широков

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ УФ-ЛАЗЕРА С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ НА СМЕСИ He – Cd – CCl₄

Проведено численное моделирование активной среды лазера с ядерной накачкой в смеси He – Cd – CCl₄ ($\lambda = 325,0$ нм) на основе подробной нестационарной кинетической модели. Изучены механизмы влияния добавки четыреххлористого углерода на развитие релаксационных процессов в He – Cd-плазме и на получение генерации. Рассмотрено влияние примеси азота на генерационные характеристики лазера. Показано, что основными причинами, препятствующими получению генерации на переходе с $\lambda = 325,0$ нм, являются паразитное поглощение рабочего излучения метастабильными атомами кадмия, а также перехват накачки малыми неконтролируемыми примесями (азот, пары воды и т.д.). Получены оптимальные условия работы Cd-лазера при накачке от импульсного реактора БАРС-6.

Введение

Среди лазеров на парах металлов II группы с накачкой жестким ионизатором гелий-кадмиевый лазер представляет наибольший интерес, поскольку обладает наименьшим порогом генерации и наибольшим КПД в сочетании с достаточно короткими длинами волн генерации ($\lambda = 325,0; 441,6; 533,7$ и $537,8$ нм на переходах иона кадмия) [1–10]. Кроме того, он привлекает принципиальной возможностью создания достаточно эффективного лазера с ядерной накачкой на переходе с длиной волны, лежащей в УФ-области спектра ($\lambda = 325,0$ нм) (рис. 1).

В данной статье нас будет интересовать возможность получения квазистационарной генерации в условиях ядерной накачки на переходе $4d^9 5s^2 \ ^2D_{3/2} \rightarrow 4d^{10} 5p^2 \ ^2P_{1/2}$ в ионе кадмия с длиной волны 325,0 нм. Ранее, на основании результатов численного моделирования [1, 5, 7], отмечалось, что пороговая плотность потока нейтронов для него составляет $\Phi_{th} \approx 2 \cdot 10^{16}$ н/(см²·с) при давлении He–Cd-смеси 2–3 атм и температуре 360 – 400°С, а максимальный КПД лазера не может превышать 0,2%.

Высокий порог генерации и относительно низкий КПД были обусловлены девозбуждением верхнего рабочего уровня буферным газом гелием и мощным паразитным поглощением рабочего излучения, величины которых были оценены на основе сравнения результатов теоретического моделирования с экспериментами по электронно-пучковой накачке [1, 4, 5]. Однако природа этого паразитного поглощения определена не была. В работе [6] было сделано предположение, что паразитное поглощение на этом переходе может быть обусловлено атомами кадмия на переходе с $\lambda = 325,25$ нм. После чего в [7] было показано, что сечение поглощения на этом переходе и заселенность поглощенных состояний могут достигать значительной величины.

Появление новых экспериментальных результатов [8–10], а именно получение генерации на пере-

ходе с $\lambda = 325,0$ нм при накачке пучком электронов длительностью десятки микросекунд, моделирующим передний фронт реакторного импульса в условиях ядерной накачки, заставило нас вернуться к некоторому пересмотру и уточнению созданной ранее кинетической модели He–Cd-лазера [1, 4, 5, 7], особенно в части, касающейся паразитного поглощения. Основанием для этого послужило то обстоятельство, что, как отмечается в [8–10], срыв генерации на переходе с $\lambda = 325,0$ нм в смеси He–Cd происходит во время действия пучка. При добавлении же в смесь 1 Торр четыреххлористого углерода CCl₄ срыв генерации отсутствует и импульс лазерного излучения заканчивается одновременно с окончанием импульса накачки [10]. Таким образом, было продемонстрировано улучшение генерационных характеристик лазера при введении в активную среду (АС) примеси CCl₄.

В данной статье проводится теоретическое исследование влияния паразитного поглощения и примеси CCl₄ на генерационные характеристики He–Cd-лазера ($\lambda = 325,0$ нм) с накачкой жестким ионизатором при различных способах возбуждения.

1. Кинетическая модель He–Cd–CCl₄-лазера с накачкой жестким ионизатором

При описании кинетики He – Cd-плазмы учитывались следующие компоненты: атомы гелия He и кадмия Cd, ионы гелия He⁺ и кадмия Cd⁺ ($4d^{10} 5s^2 \ ^2S_{1/2}$) в основном состоянии, молекулярные ионы гелия He₂⁺, He₃⁺ и кадмия Cd₂⁺, возбужденные состояния атомов гелия He* и кадмия Cd($5s 5p^3 \ ^2P_{2,1,0}$), двукратный ион кадмия Cd⁺⁺, возбужденные молекулы He₂^{*}, Cd₂^{*}, Cd₃^{*}, 17 возбужденных состояний иона кадмия: $4d^9 5s^2 \ ^2D_{5/2}$, $4d^9 5s^2 \ ^2D_{3/2}$, $4d^{10} 5p^2 \ ^2P_{1/2}$, $5p^2 \ ^2P_{3/2}$, $6s^2 \ ^1S_{1/2}$, $6p^2 \ ^1P_{1/2}$, $6p^2 \ ^3P_{3/2}$, $5d^2 \ ^3D_{3/2}$, $5d^2 \ ^3D_{5/2}$, $6d^2 \ ^3D_{3/2}$, $6d^2 \ ^3D_{5/2}$, $4f^2 \ ^3F_{5/2}$, $4f^2 \ ^3F_{7/2}$, $6f^2 \ ^3F_{5/2}$, $6f^2 \ ^3F_{7/2}$, $6g^2 \ ^3G_{7/2}$, $6g^2 \ ^3G_{9/2}$, а также комплексный ион HeCd⁺. На рис. 1 изображена схема термов иона кадмия, учитываемых в модели, и переходы, на которых исследуется генерация.

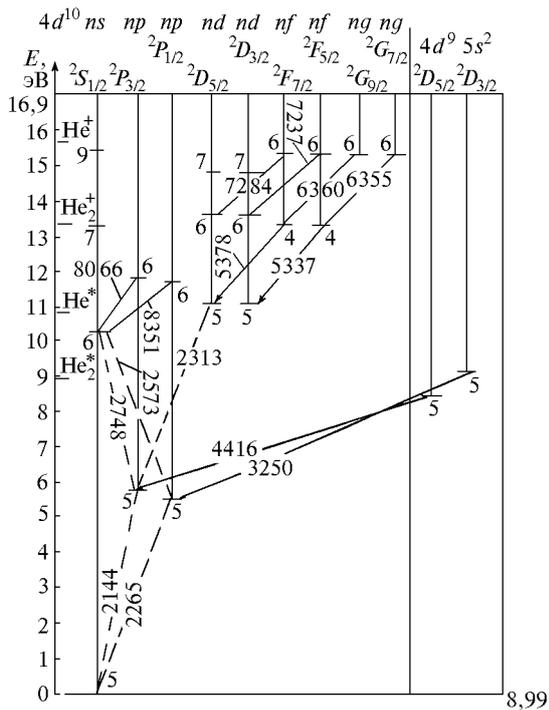


Рис. 1. Схема термов иона кадмия

По сравнению с предыдущей моделью более подробно рассматривается релаксационный поток через возбужденные уровни атома кадмия $5s5p^3P_{0,1,2}$ (уровни учитываются раздельно) и введено паразитное поглощение излучения с $\lambda = 325,0$ нм атомами кадмия на переходе $5p^3P_2 \rightarrow 7s^3S_1$ (325,25 нм) с сечением $2,1 \cdot 10^{-17}$ см². Поскольку в данной модели стала существенной динамика заселения метастабильных состояний атома Cd, то была уточнена скорость реакций диссоциативной рекомбинации молекулярного иона кадмия Cd_2^+ в соответствии с [11].

В модели были уточнены парциальные сечения реакций перезарядки молекулярного иона гелия на атомах кадмия (накачка уровней $4d^9 5s^2 2D_{5/2, 3/2}$, $4d^{10} 5p^2 P_{3/2, 1/2}$ в этих реакциях уменьшена в 1,5 раза, а высвободившаяся часть релаксационного потока направлена на уровни $4d^{10} 6p^2 P_{3/2, 1/2}$). Полная скорость реакции Пеннинга метастабильных атомов гелия He^* на атомах кадмия бралась $8 \cdot 10^{-10}$ см³/с [12]. Примерно 2% потока реакции перезарядки ионов гелия на атомах кадмия направлено с верхних рабочих уровней для зеленых линий ($\lambda = 533,7$ и $537,8$ нм) $4f^2 F_{7/2, 5/2}$ на уровни $6g^2 G_{9/2, 7/2}$. Уширение линии $\lambda = 325,0$ нм полагалось равным 10^{11} (атм·с)⁻¹. При учете реабсорбации излучения на переходах $5p^2 P_{3/2, 1/2} \rightarrow 5s^2 S_{1/2}$ рассматривалась временная зависимость коэффициента ускользания $\Theta([Cd^+](t))$. Скорость перемешивания бейтлеровских уровней гелием составляла в модели 10^{-13} см³/с.

Концентрация N_{Cd} (см⁻³) атомов кадмия в зависимости от температуры T_g (К) рассчитывалась по формуле

$$N_{Cd} = \frac{1}{T_g} \exp\left(62,51 - \frac{12550}{T_g}\right).$$

Эта формула с точностью не менее 0,3% описывает реперные значения [13] в диапазоне температур от 586 до 913 К.

В модели предусмотрена возможность одновременно проводить расчеты для четырех лазерных переходов в ионе кадмия: $\lambda = 325,0; 441,6; 533,7$ и $537,8$ нм (см. рис. 1).

Для описания влияния примеси CCl_4 на кинетику АС рассматривались следующие компоненты: молекула хлора Cl_2 , атом хлора в основном С1 и возбужденном Cl^* состояниях, молекулы CCl , CCl_2 , CCl_3 , CCl_4 , $CdCl^*$, $HeCl^*$, атом углерода С, ионы Cl , Cl^+ , CCl^+ , CCl_2^+ , CCl_3^+ , CCl_4^+ , Cl_2^+ , C^+ . Кроме того, для изучения влияния паразитных примесей в модель вводились реакции с участием азота N_2 , атомы и молекулы которого способны перехватывать релаксационный поток, накачивающий бейтлеровские уровни $4d^9 5s^2 2D_{5/2, 3/2}$ иона кадмия. Всего учитывалось около 300 реакций для He – Cd – CCl_4 – N_2 -смеси.

2. Результаты расчетов

2.1. Накачка He – Cd($-CCl_4$)-лазера электронным пучком микросекундной длительности

В этом разделе мы проведем тестирование нашей кинетической модели на результатах экспериментальных исследований He – Cd-лазера с длиной волны $325,0$ нм, накачиваемого электронным пучком длительностью (по основанию) 42 мкс. Описание экспериментальной установки и полученные результаты приведены в [8–10].

Моделирование кинетики процессов, происходящих в He – Cd-смеси под действием слаботоочного электронного пучка, дало следующие результаты. На рис. 2 показаны экспериментальный и теоретический импульсы излучения с $\lambda = 325,0$ нм. Поведение мощности генерации характеризуется спадом, а затем и срывом генерации во время действия импульса накачки. В [9] такое поведение объясняется снижением скорости заселения верхнего лазерного уровня. Конкретный механизм при этом не обсуждается. Мы полагаем, что ограничение длительности импульса объясняется влиянием паразитного поглощения рабочего излучения атомами кадмия в возбужденном состоянии $5s5p^3P_2$. Накопление этих метастабильных состояний атома кадмия происходит в основном путем диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов кадмия Cd_2^+ . В момент, когда мощность генерации достигает максимума ($t = 10$ мкс), концентрация метастабилей $Cd^*(5p^3P_2)$ составляет $3 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и продолжает расти во времени. Этого хватает, чтобы, несмотря на нарастание накачки и величины инверсной заселенности рабочих уровней, генерируемое средой излучение эффективно поглощалось.

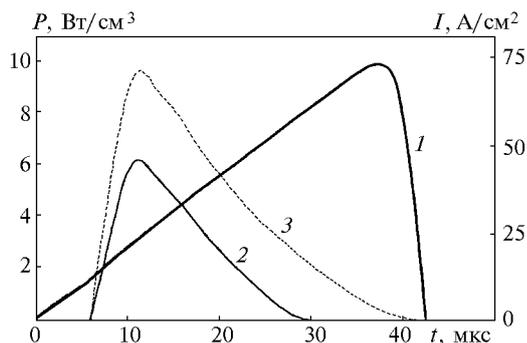


Рис. 2. Импульс накачки пучком электронов (I), генерация на длине волны 325,0 нм в He – Cd-смеси при $T_g = 375^\circ\text{C}$, $[\text{He}] = 2,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $r = 99,5\%$: 2 – эксперимент, 3 – теория

Сравнение результатов эксперимента [10] и теоретических расчетов для He – Cd-лазера с добавлением примеси CCl_4 представлено на рис. 3.

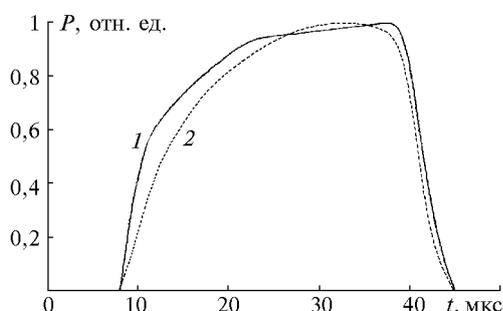
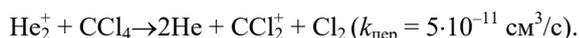


Рис. 3. Импульс генерации в He – Cd – CCl_4 -смеси при $T_g = 375^\circ\text{C}$, $[\text{He}] = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $[\text{CCl}_4] = 3,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $r = 99,5\%$: 1 – эксперимент, 2 – теория

При добавлении CCl_4 наблюдается большее запаздывание импульса генерации, чем в отсутствие примеси. Это объясняется перехватом релаксационного потока с ионов He^+ , He_2^+ и атомов He^* на молекулы примеси CCl_4 и ее компоненты. Отмечается также некоторое запаздывание расчетного импульса генерации относительно экспериментального, которое объясняется, может быть, несколько завышенными коэффициентами скоростей реакций Пеннинга



и реакции перезарядки



Появление квазистационарной генерации при добавлении CCl_4 обусловлено снижением концентрации атомов $\text{Cd}^*(5p^3P_2)$. Последнее, в свою очередь, объясняется тем, что концентрация электроотрицательных ионов хлора Cl^- в плазме настолько велика (к концу импульса накачки $[\text{Cl}^-] = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), а концентрация электронов настолько мала ($N_e = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$), что молекулярные ионы кадмия Cd_2^+ более активно вступают в реакции тройной и бинарной рекомбина-

ции с ионами хлора, чем с электронами. Это приводит к уменьшению концентрации молекулярных ионов кадмия Cd_2^+ и, соответственно, к снижению скорости образования паразитных атомов в ходе диссоциативной рекомбинации ионов Cd_2^+ .

Диссоциативное прилипание электронов с образованием отрицательных ионов и последующей ион-ионной рекомбинацией с молекулярными и атомарными ионами кадмия, таким образом, играет главную роль в уменьшении паразитного поглощения рабочего излучения. При этом перехват релаксационного потока в реакциях типа $\text{He}^+ + \text{Cl}^-(+\text{He}) \rightarrow \text{HeCl}^*(+\text{He})$ заметно сказывается только на последних микросекундах импульса накачки, когда концентрация ионов Cl^- максимальна.

Оптимальное содержание примеси CCl_4 составляет $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (0,1 Торр). Ухудшение лазерной генерации при $[\text{CCl}_4] > 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ обусловлено тем, что растет перехват потока накачки примесью, в то время как паразитное поглощение уже не играет заметной роли при формировании излучения.

2.2. Численное моделирование и оптимизация ЛЯН с $\lambda = 325,0$ нм в условиях возбуждения от реактора БАРС

Проведены расчеты модели He – Cd-лазера, накачиваемого продуктами ядерных реакций от самогасящегося импульсного реактора Барс-6 [14, 15]. Рассматривались выходные характеристики лазерного излучения с $\lambda = 325,0$ нм, получаемые за один импульс накачки. Оптимизация лазера по параметрам АС, резонатора и накачки дала следующие результаты: оптимальная температура АС $T_g = 290^\circ\text{C}$, концентрация гелия $[\text{He}] = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора $T = 2\%$ (предполагалось, что расстояние между зеркалами 40 см) при удельной мощности энерговыклада 34 Вт/см³. Развитие лазерной генерации во времени в таких условиях изображено на рис. 4. Мощность генерации достигает максимума $P_m = 27 \text{ мВт/см}^3$ в момент времени $t = 200$ мкс, когда мощность накачки достигла только 63% своего максимального значения, и затем спадает. Инверсная заселенность рабочих уровней еще растет, но концентрация атомов кадмия $\text{Cd}^*(5p^3P_2)$ в этот момент составляет $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и также продолжает расти. Этим объясняется то, что импульс излучения спадает несколько раньше, чем импульс накачки. И кпд по вложенной в АС энергии за импульс составляет 0,08%.

На рис. 4 приведена также временная развертка импульса генерации в He – Cd – CCl_4 -смеси в оптимальных условиях: $T_g = 350^\circ\text{C}$, $[\text{He}] = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $[\text{CCl}_4] = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 2\%$ при энерговыкладе в АС 82 Вт/см³. Мощность генерации при этом составляет 90 мВт/см³, а кпд $\eta = 0,11\%$. Причина смещения оптимальных условий в область больших значений температуры и давления та же, что и при накачке слабым электронным пучком: добавление примеси

CCl_4 снижает влияние паразитного поглощения лазерного излучения атомами $\text{Cd}^*(5p^3P_2)$.

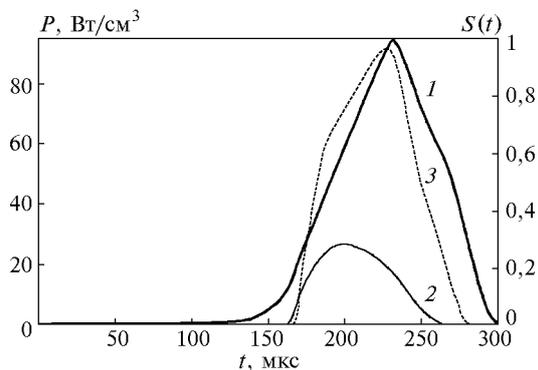


Рис. 4. Временная развертка формы импульса нейтронов $S(t)$ при накачке от реактора Барс-6 (1), импульса генерации в He – Cd-смеси в оптимальных условиях: $T_g = 290^\circ\text{C}$, $[\text{He}] = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $T = 2\%$ (2) и импульса генерации в He – Cd – CCl_4 -смеси

Отметим, что присутствие в АС вредной примеси в небольших количествах способно значительно уменьшить заселенность верхнего рабочего уровня, особенно при низких температурах. Проведенные с He – Cd – N_2 -моделью расчеты показали, что при добавлении в He – Cd-смесь с оптимальными параметрами 0,01% азота мощность лазерного излучения в зависимости от температуры достигает максимума при 360°C и составляет не более $0,11 \text{ мВт/см}^3$.

Заключение

Проведено численное моделирование АС лазера на парах кадмия на основе подробной нестационарной кинетической модели. Сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными позволяет предполагать, что представленная модель неплохо описывает основные кинетические процессы в исследуемой активной среде. Изучены механизмы влияния добавки четыреххлористого углерода на развитие релаксационных процессов в He – Cd-плазме и на получение генерации на переходе

де $4d^9 5s^2 2D_{3/2} \rightarrow 4d^{10} 5p^2 P_{1/2}$ иона кадмия с длиной волны $325,0 \text{ нм}$.

Показано, что основной причиной, препятствующей получению генерации на переходе с $\lambda = 325,0 \text{ нм}$, является паразитное поглощение рабочего излучения метастабильными атомами кадмия. Поэтому для получения генерации на рассматриваемом переходе целесообразно введение в среду небольших (менее 1 Торр) добавок электроотрицательного газа (например, CCl_4), обладающего низкими скоростями реакций перезарядки на молекулярных ионах гелия и Пеннинга с метастабильными атомами гелия, ответственными за накачку верхнего рабочего уровня.

1. Держиев В.И., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Янчарина А.М. // Труды ИОФАН. М.: Наука, 1989. Т. 21. С. 44–115.
2. Дмитриев А.Б., Ильяшенко В.С., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. N 9. С. 818–821.
3. Миськевич А.И., Ильяшенко В.С., Саламаха Б.С., Копай-Гора А.П. // ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 402–404.
4. Горюнов Ф.Г., Держиев В.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 1. С. 18–21.
5. Горюнов Ф.Г., Держиев В.И. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. N 1. С. 10.
6. Барышева А.М., Бочков А.В., Бочкова Н.В. и др. // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 73. N 1. С. 87.
7. Карелин А.В., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. N 7. С. 631–651.
8. Новоселов Ю.Н., Уварин В.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 4. С. 189–192.
9. Новоселов Ю.Н., Уварин В.В. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. N 6. С. 1004–1006.
10. Новоселов Ю.Н., Уварин В.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 23. С. 15–18.
11. Mandl A., Kovacs M., Srivastova B., Jacob J.H., and Klimek D. // Phys. Rev. A. 1981. V. 24. N 6. P. 3160–3172.
12. Baltayn P., Pebay-Peyroula J.C., Sadehi N. // J. Phys. B.: Atom Mol. Phys. 1985. V. 18. N 17. P. 3615–3628.
13. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 256.
14. Снопков А.А., Черашев В.И., Литвин В.И. и др. // Конференция «Лазеры с ядерной накачкой-92». (Тезисы докл.). Обнинск, 1992. Т. 1. С. 144.
15. Кононов В.Н., Боховко М.Б., Дьяченко П.П. и др. Эксперимент по ядерной накачке аргон-ксенонового лазера на импульсном реакторе БАРС-6. Обнинск, 1995. 10 с. (Препринт/Физико-энергетический институт РФ, N 2476).

Институт общей физики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
7 октября 1997 г.

A.V. Karelin, R.V. Shirokov. Optimum Conditions of Nuclear-pumped UV Laser Generation in He – Cd – CCl_4 -mixture.

Numerical simulation of active medium of nuclear-pumped laser in He – Cd – CCl_4 -mixture ($\lambda = 325.0 \text{ nm}$) is conducted. Mechanisms of influence of CCl_4 on development of relaxation in He – Cd-plasma are investigated. Influence of nitrogen impurity on the lasing characteristics of the laser is considered. It is shown that main reasons hindering an obtaining of lasing at $\lambda = 325.0 \text{ nm}$ transition, are both the parasitic absorption of laser radiation by metastable states of cadmium atoms, and interception of relaxation flux by small uncontrollable impurities (nitrogen, water vapor etc.). Optimum conditions of Cd-laser operation under pumping by pulse reactor BARS-6 are obtained.