

УДК 621.375.8

Е.Л. Латуш, Г.Д. Чеботарев, А.В. Васильченко

## ИМПУЛЬСНЫЕ КАТАФОРЕЗНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ КАДМИЯ И СТРОНЦИЯ

Впервые теоретически обоснован и экспериментально реализован катафорезный ввод паров металлов в активную среду импульсно-периодических He–Cd<sup>+</sup>- и He–Sr<sup>+</sup>-лазеров. Для малогабаритного He–Sr<sup>+</sup>-лазера с диаметром разрядного канала 3 мм и длиной активной зоны 26 см при катафорезной прокачке паров стронция достигнуты высокие значения средней (510 мВт) и рекордные значения удельной средней мощности генерации (277 мВт/см<sup>3</sup>) и коэффициента усиления (0,15 см<sup>-1</sup>).

1. К настоящему времени явление катафореза в непрерывных лазерах на парах металлов (ЛПМ) достаточно хорошо изучено и широко используется [1–3]. Основными преимуществами катафорезного ввода паров в ЛПМ являются: 1) достижение однородного распределения концентрации активных атомов вдоль газоразрядного канала, 2) отсутствие перекрытия разрядного канала кусочками металла, 3) отсутствие громоздкой внешней печи, 4) возможность подгонки требуемого оптимального давления паров металла (в определенных пределах) независимо от тока разряда.

Именно катафорезный непрерывный лазер на парах кадмия ( $\lambda = 441,6; 354$  и  $325$  нм) получил наиболее широкое практическое применение и имеет наибольший объем продаж из всех лазеров на парах металлов [3, 4].

Что касается импульсных ЛПМ, то катафорезный ввод паров металлов в них до настоящего времени практически не рассматривался и тем более не использовался. Скорее предпринимались попытки исключить его влияние (приводящее к неоднородности активной среды), например, путем равномерного размещения кусочков металла вдоль активной части канала [3]. При этом в импульсных лазерах широко применяется режим саморазогрева активной зоны током разряда [3, 5].

Между тем из самых общих соображений не видно каких-либо принципиальных ограничений на использование катафореза для удобного и однородного ввода паров металлов в активную среду импульсно-периодических ЛПМ со всеми преимуществами, перечисленными выше для непрерывного режима. При этом можно рассчитывать на некоторые новые возможности, присущие импульсным ЛПМ. Во-первых, в импульсном режиме, по сравнению с непрерывным, всегда реализуется гораздо больший набор длин волн генерации. Так, например, в парах кадмия генерация осуществляется на 26 только ионных переходах кадмия в диапазоне от 0,325 до 3,288 мкм [3]. Во-вторых, активные среды с импульсным, а часто принципиально импульсным режимом работы (самоограниченные, рекомбинационные лазеры) гораздо многочисленней. В-третьих,

именно в импульсном режиме достигаются наивысшие пиковые и средние мощности генерации.

Что касается применений, то здесь тоже часто предпочтительней оказывается именно импульсно-периодический режим (микротехнология, медицина и др.), либо импульсный характер работы оказывается несущественным, а важна многоволновость излучения (цветовая медицина, флуоресцентный анализ, голография, цветные лазерные проекционные устройства).

В данной статье анализируются возможности и перспективности катафорезного ввода паров металлов в активную часть газоразрядного канала в условиях импульсно-периодического разряда, а также возможности практического использования этого явления для создания однородных активных сред перезарядочного He–Cd<sup>+</sup> и рекомбинационного He–Sr<sup>+</sup> импульсных лазеров, являющихся существенно различными по свойствам излучения и механизмам накачки.

2. Оценим достижимую скорость прокачки паров металла вдоль газоразрядной трубки в импульсно-периодическом режиме. Зависимость направленной скорости иона металла от времени в импульсе тока газового разряда имеет вид [3]

$$V_i = V_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (1)$$

где  $V_0 = bE_i$  – установившаяся скорость иона металла;  $b$  – подвижность ионов металла в газовом разряде;  $E_i$  – напряженность поля во время импульса тока;  $\tau = 1/(v_6 + v_m)$  – характерное время установления направленной скорости иона;  $v_6, v_m$  – эффективные частоты столкновений ионов металла с атомами буферного газа и атомами металла.

Проведенные нами оценки на основании [6–7] для типичных условий работы импульсных ионных ЛПМ дают  $\tau \approx 0,1 \div 1$  нс, что значительно меньше типичной длительности импульса тока  $\tau \sim 0,1 \div 1$  мкс. Тогда для  $V_i$  можно с достаточной степенью точности записать следующим образом:

$$V_i = V_0 = bE_i. \quad (2)$$

Для возбуждения импульсного разряда обычно используют схемы с полным разрядом накопительной

емкости, при этом зависимость  $E_i$  от  $t$  приближенно можно представить в виде

$$E_i = E_0 \exp(-t/\tau_i), \quad (3)$$

где  $E_0$  – начальная напряженность электрического поля в импульсном разряде. Подставив (3) в (2), для средней скорости иона за время импульса найдем

$$\langle V_i \rangle = \frac{1}{\tau_i} \int_0^{\infty} V_i(t) dt = bE_0. \quad (4)$$

В импульсно-периодическом режиме средняя направленная скорость ионов будет

$$V_f = \langle V_i \rangle \tau_i (1/T) = bE_0 \tau_i f, \quad (5)$$

где  $T$  – период, а  $f$  – частота следования импульсов.

Для средней скорости прокатки паров металла в импульсно-периодическом разряде получим следующее выражение:

$$V = bE_0 \tau_i f \theta, \quad (6)$$

где  $\theta = n^+/n$  – коэффициент ионизации паров металла;  $n^+$ ,  $n$  – усредненные по радиусу трубки концентрации ионов металла и исходная концентрация атомов металла.

Для типичных параметров возбуждения импульсного He–Cd<sup>+</sup>-лазера ( $E_0 \approx 100$  В/см;  $\tau_i \sim 0,2$  мкс;  $f \sim 5 \div 10$  кГц [3]) с использованием данных [8] для  $b$  и  $\theta$  ( $b \approx 0,357 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при давлении гелия  $p_{\text{He}} \approx 3$  Торр;  $\theta \sim 10^{-2}$ ) из (6) получим скорость прокатки паров кадмия:  $V_{\text{Cd}} \approx 3,57 \div 7$  см/с. Аналогичные оценки для условий работы He–Sr<sup>+</sup>-лазера ( $E_0 \approx 1000$  В/см;  $\tau_i \sim 0,1$  мкс;  $f \sim 5 \div 10$  кГц [3];  $b \approx 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $p_{\text{He}} \approx 0,5$  атм,  $\theta \sim 0,5$  [9]) дают следующую скорость прокатки паров стронция:  $V_{\text{Sr}} \approx 20 \div 40$  см/с. Полученные скорости прокатки паров соизмеримы со скоростями в непрерывных ЛПМ, что говорит о принципиальной возможности катафорезного ввода паров металла в активную среду импульсно-периодических ЛПМ.

Однако для создания активной среды при катафорезном вводе паров металла, наряду с высокой скоростью прокатки, необходимым условием является достижение однородного распределения концентрации паров металла вдоль газоразрядного канала. Условие однородного распределения паров металла вдоль трубки в импульсно-периодическом катафорезном ионном ЛПМ можно получить из решения уравнения диффузии для концентрации паров металла. Вывод этого уравнения в условиях непрерывного разряда дается в [1]:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + \frac{\beta}{L} \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right) = 0, \quad (7)$$

где

$$\beta = \theta e E_0 L / (k T). \quad (8)$$

Здесь  $e$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $L$  – длина активной части канала;  $z$  – координата вдоль оси трубки;  $T$  – температура газа.

Чтобы (7) стало применимо для установившегося импульсно-периодического режима (когда  $n$  не зависит от  $t$ ), можно усреднить напряженность поля за достаточно большое число импульсов. Тогда параметр  $\beta$  в (7) примет вид

$$\beta = [\theta e E_0 L / (k T)] \tau_i f, \quad (9)$$

и решение уравнения (7) будет описывать распределение паров металла в импульсно-периодическом режиме:

$$n/n_0 = 1 - \exp[\beta(1-z/L)] / (1 - \exp \beta), \quad (10)$$

где  $n_0$  – концентрация паров металла в испарителе.

Это решение получено исходя из граничных условий: при  $z = 0$   $n = n_0$ , т.е. в точке, где находится испаритель, концентрация паров металла остается постоянной, а при  $z = L$  (положение конденсора)  $n = 0$ . Зависимость  $n/n_0$  как функции от  $\beta$  показана на рис. 1. Из графика видно, что достаточно однородное распределение паров металла вдоль газоразрядного канала и в то же время надежное запираание паров со стороны анода достигается при таких условиях работы ЛПМ, когда

$$\beta \geq 10, \quad (11)$$

что и является условием однородного распределения паров металла вдоль трубки в условиях импульсно-периодического разряда. Из (9) можно получить, что типичные условия работы импульсно-периодических He–Cd<sup>+</sup>- и He–Sr<sup>+</sup>-лазеров удовлетворяют критерию (11):  $\beta_{\text{Cd}} = 11,4$ ;  $\beta_{\text{Sr}} = 125$ .

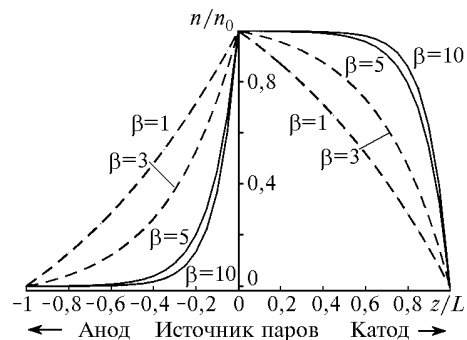


Рис. 1. Распределение относительной концентрации паров металла вдоль разрядной трубки импульсного катафорезного ЛПМ.  $z/L = 0$  соответствует положению источника паров

3. В экспериментах с He–Cd<sup>+</sup>-лазером использовалась типичная трубка непрерывного катафорезного

He–Cd<sup>+</sup>-лазера (рис. 2,а). Длина рабочей части составляла 50 см, диаметр капилляра 3 мм. Испаритель с помещенным туда кусочком кадмия нагревался небольшой внешней печью. В качестве генератора импульсов использовался блок питания, построенный по схеме с полным разрядом емкости через тиратрон. Частота следования импульсов составляла 5–10 кГц, давление гелия варьировалось от 2 до 5 Торр.

Прокачка паров катафорезом наблюдалась визуально по перемещению вдоль трубки цветовой границы раздела разряда. Скорость прокачки паров металла при этом составляла 5–10 см/с, что примерно соответствует расчетной. В данном импульсном He–Cd<sup>+</sup>-лазере впервые с катафорезным вводом паров металла была получена генерация на  $\lambda = 533,7$  и 537,8 нм CdII. Осциллограммы спонтанного излучения и генерации приведены на рис. 3,а. Коэффициент усиления, измеренный методом вносимых в резонатор калиброванных потерь, составил  $\chi = 30\% \text{ м}^{-1}$ , средняя мощность генерации 2 мВт.

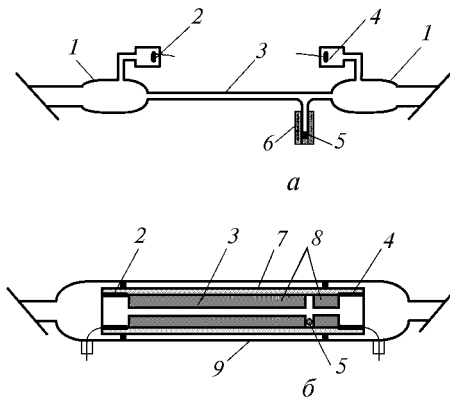


Рис. 2. Разрядные трубки импульсных катафорезных He–Cd<sup>+</sup> (а) и He–Sr<sup>+</sup> (б) лазеров: 1 – конденсор; 2 – катод; 3 – активная зона (для He–Cd<sup>+</sup>-лазера  $L = 50$  см,  $d = 3$  мм; для He–Sr<sup>+</sup>-лазера  $L = 26$  см,  $d = 3$  мм); 4 – анод; 5 – испаряемый металл; 6 – нагреватель; 7 – внешняя ВЕО трубка (длина 35 см, диаметр 13 мм); 8 – внутренняя ВЕО трубка; 9 – стеклянная рубашка

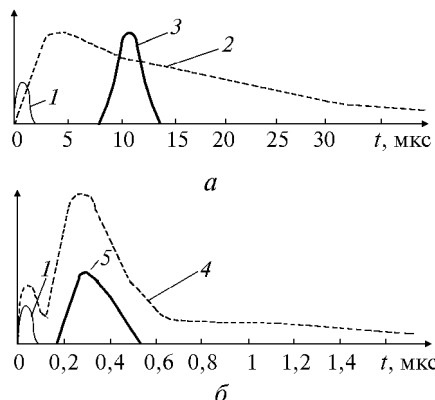


Рис. 3. Осциллограммы спонтанного излучения и генерации в спектре CdII (а) и SrII (б): 1 – импульс тока; 2, 3 – импульс спонтанного излучения и генерации на  $\lambda = 537,8$  и 533,7 нм CdII соответственно; 4, 5 – импульс спонтанного излучения и генерации на  $\lambda = 430,5$  нм SrII соответственно

Получить стабильную совместную генерацию на синей ( $\lambda = 441,6$  нм) и зеленых линиях ( $\lambda = 537,8$  и 533,7 нм) в катафорезном импульсно-периодическом He–Cd<sup>+</sup>-лазере не удалось, так как для первой из них требуются на порядок меньшие импульсные токи разряда [3]. Эта трудность была преодолена при осуществлении комбинированного импульсно-непрерывного режима работы He–Cd<sup>+</sup>-лазера, в котором импульсный ток подбирался оптимальным для зеленых линий, а непрерывный – для синей линии генерации. При этом после импульса тока генерация на  $\lambda = 441,6$  нм восстанавливалась примерно через 500 мкс. Вместе с тем постоянный ток уменьшал в 3 раза амплитуду генерации на зеленых линиях (из-за снижения позитивного влияния электронного девозбуждения [3]). Поэтому такой режим нельзя считать оптимальным для совместной генерации на этих линиях.

Совместную генерацию можно более эффективно реализовать в режиме последовательного переключения импульсов тока различной амплитуды. Если же совместная генерация не требуется, то оптимизация режима для каждой линии производится подбором амплитуды и формы импульса тока. При этом, если среднего тока оказывается недостаточно для саморазогрева активной длины, то разрядный канал можно теплоизолировать.

Для He–Sr<sup>+</sup>-лазера была сконструирована специальная малогабаритная стекло-керамическая катафорезная трубка с диаметром разрядного канала 3 мм и активной длиной 26 см (рис. 2,б). Использовался импульсный блок питания, построенный по схеме Блюмляйна [10]. Испарение стронция происходило из отдельного резервуара в режиме саморазогрева, при этом основной канал оказывался сильно перегретым, что препятствовало оседанию на нем паров стронция. В ходе экспериментов впервые в условиях катафорезной прокачки паров Sr в импульсно-периодическом режиме была получена генерация на линии  $\lambda = 430,5$  нм. При этом давление гелия варьировалось от 0,3 до 1 атм и была достигнута достаточно высокая для данного типа лазеров частота следования импульсов:  $f = 25 \div 50$  кГц.

Осциллограммы спонтанного излучения и генерации линии  $\lambda = 430,5$  нм приведены на рис. 3,б. Оптимальное давление гелия составляло  $p_{\text{He}} = 0,7 \div 0,8$  атм. Средняя мощность генерации достигала  $P_{\text{ср}} = 510$  мВт, и при активном объеме  $1,84 \text{ см}^3$  удельная средняя мощность составила  $P_{\text{ср}}^{\text{уд}} = 277 \text{ мВт/см}^3$ . Последняя величина является рекордной для He–Sr<sup>+</sup>-лазера. Она в 3,8 раз превышает ранее достигнутую  $P_{\text{ср}}^{\text{уд}}$  для саморазогревного He–Sr<sup>+</sup>-лазера без принудительного охлаждения ( $73 \text{ мВт/см}^3$ ) [11] и в 2,1 раза превышает  $P_{\text{ср}}^{\text{уд}}$  в трубке с водяным охлаждением ( $130 \text{ мВт/см}^3$ ) [12]. Коэффициент усиления, измеренный методом калиброванных потерь, также оказался максимальным для He–Sr<sup>+</sup>-лазера:  $\chi = 0,15 \text{ см}^{-1}$ .

Столь высокие удельные энергетические характеристики были достигнуты как за счет использования катафорезного ввода паров металла, так и за счет других конструктивных особенностей трубки. Явление катафореза позволяет получить однородное распределение паров металла вдоль активной части разрядного канала. При этом сам металл вынесен из разрядной зоны и не перекрывает узкий газоразрядный канал. Кроме того, в активной части трубки нет спонтанного возникновения дугового или искрового разряда на кусочках металла и, следовательно, его неконтролируемого испарения. В трубке использовалась толстостенная керамика.

Как следует из [12], в саморазогреваемых лазерах оптимальная частота следования импульсов задается скоростью теплоотвода, которая, в свою очередь, пропорциональна наружному диаметру трубки. Поэтому, увеличивая наружный диаметр и сохраняя внутренний постоянным, мы тем самым интенсифицируем теплоотвод, что ведет к реальной возможности увеличения частоты следования импульсов и средней мощности генерации.

Таким образом, в настоящей работе впервые теоретически обоснован и экспериментально реализован катафорезный ввод паров металлов в активную среду импульсно-периодических He–Cd<sup>+</sup>- и He–Sr<sup>+</sup>-лазеров. Для малогабаритного He–Sr<sup>+</sup>-лазера с диаметром разрядного канала 3 мм и длиной активной части 26 см при катафорезной прокачке паров Sr достигнуты достаточно высокие значения средней мощности

( $P_{\text{cp}} = 510$  мВт) и рекордные значения удельной средней мощности генерации ( $P_{\text{cp}}^{\text{уд}} = 277$  мВт/см<sup>3</sup>), а также коэффициента усиления ( $\chi = 0,15$  см<sup>-1</sup>).

Такой способ введения паров активного вещества может оказаться удобным и для других импульсных лазеров на парах химических элементов, таких как лазеры на бромиде меди, барии, кальция и др.

Работы по этой теме частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-19750). Е.Л. Латуш благодарен Международной Соросовской программе образования в области точных наук (грант № 148d и № 538d).

1. Sosnovsky T.P. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. N 13. P. 5138–5144.
2. Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Папакин В.Ф. и др. // Изв. вузов. Сер. Физ. 1972. N 8. С. 85–92.
3. Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
4. Anderson S.G. // Laser Focus World. 1997. V. 33. N 1. P. 72–92.
5. Петраш Г.Г., Исаев А.А. // Труды ФИАН. 1991. Т. 212. С. 93–108.
6. Райзер Ю.П. Основы современной физики газового разряда. М.: Наука, 1980. 230 с.
7. Лозанский Э.А., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 215 с.
8. Hernqvist K.G. // IEEE J. Quant. Electron. 1972. V. 8. N 9. P. 740–743.
9. Carman R.J. // IEEE J. Quant. Electron. 1990. V. 26. N 9. P. 1588–1608.
10. Бохан П.А., Николаев В.Н., Соломонов В.И. // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. N 1. С. 159–162.
11. Chebotarev G.D., Latush E.L., Sem M.F. // J. Moscow Phys. 1997. V. 7. P. 109–112.
12. Букитун Л.М., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. // Теплофиз. высоких температур. 1986. Т. 24. N 2. С. 402–405.

Ростовский государственный университет

Поступила в редакцию  
7 октября 1997 г.

*E.L. Latush, G.D. Chebotarev, A.V. Vasilchenko. Pulsed Cataphoretic Cadmium and Strontium Vapour Lasers.*

For the first time, theoretically justified and experimentally realised the cataphoretic injection of metal vapour into active media of the pulsed He–Cd<sup>+</sup> and He–Sr<sup>+</sup>-lasers.

For small-size cataphoretic He–Sr<sup>+</sup>-laser with discharge channel of the 3 mm i.d. and active length of 26 cm, high values of the average output power (510 mW) and record values of specific average output power (277 mW/cm<sup>3</sup>) as well as gain coefficient (0.15 cm<sup>-1</sup>) were achieved.