

## ИК Хе I-лазер с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом

А.М. Ражев<sup>1,3</sup>, Д.С. Чуркин<sup>1,2</sup>, Е.С. Каргапольцев<sup>1</sup>,  
Р.А. Ткаченко<sup>1</sup>, И.А. Трунов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Поступила в редакцию 23.01.2020 г.

В работе описан созданный ИК-лазер с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом, генерирующий в области 900–2050 нм на переходах атомов Хе I. В качестве активной среды использовался ксенон и его смеси с гелием и аргоном. Проведены экспериментальные исследования влияния состава активной газовой среды на интенсивность излучения атомов Хе I. Спектр генерации состоял из трех линий с длинами волн 904,5; 1733 и 2026 нм. Соотношение интенсивностей сильно зависело от состава активной среды. Длительность оптических импульсов излучения достигала  $(8 \pm 1)$  нс на полувысоте.

*Ключевые слова:* импульсный индукционный цилиндрический разряд, ИК Хе I-лазер, спектр генерации; pulsed inductive cylindrical discharge, IR Xe I laser, generation spectrum.

### Введение

На сегодняшний день среди наиболее востребованных источников лазерного излучения в ближней и средней ИК-областях особое место занимает лазер на переходах нейтральных атомов ксенона. В литературе имеется большое количество работ, посвященных исследованию ксеноновых лазеров, что объясняется широкими возможностями их применения, например для создания различных сканирующих атмосферных лидаров [1], в волоконных оптических линиях связи для передачи излучения в ближней ИК-области на значительные расстояния с малыми потерями. Также они широко используются в науке благодаря тому, что их активная среда позволяет генерировать лазерное излучение в широком диапазоне длин волн (900–29000 нм [2–4]). Это открывает большие возможности по созданию лазеров с частотой генерации, перестраиваемой только с помощью замены элементов резонатора, без смены активной среды и принципиальных изменений конструкции лазерного излучателя или электрической схемы накачки.

Несмотря на множество способов накачки Хе I-лазеров [5–16], чаще всего сегодня используются накачка электронным пучком и ВЧ-разрядом. В предыдущих экспериментах мы показали возможность накачки импульсным индукционным разрядом активных газовых лазерных сред, работающих как на передаче возбуждения от атомов буферного газа [17], так и при прямом возбуждении молекул (азота и водорода) электронным ударом [18, 19]. В отличие от существующих методов накачки индукционный разряд формируется при отсутствии каких-либо электродов в активной среде, что позволяет избежать их эрозии и загрязнения активной среды, которое происходит в электроразрядных лазерах и приводит к нестабильности энергии генерации, снижению ресурса работы и ухудшению качества лазерного пучка. Следовательно, отсутствие электродов в индукционном разряде и химическая инертность активной среды позволяют создавать Хе I-лазеры с большим ресурсом работы.

В связи с вышеперечисленными преимуществами были проведены предварительные исследования по накачке ксенона импульсным индукционным продольным разрядом, которые показали возможность создания индукционного Хе I-лазера [20]. Цель настоящей работы — исследование спектральных и временных характеристик излучения на электронных переходах нейтральных атомов ксенона в импульсном индукционном цилиндрическом разряде.

\* Александр Михайлович Ражев (razhev@laser.nsc.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Евгений Сергеевич Каргапольцев (djohn797@mail.ru); Роман Андреевич Ткаченко (tkachenkora23@yandex.ru); Игорь Александрович Трунов (trunov.igor1998@gmail.com).

## 1. Экспериментальная установка

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка, электрическая схема которой включала в себя генератор импульсных напряжений, выполненный по схеме LC-инвертор, состоящий из емкостей  $C_1 = 64,8$  нФ,  $C_2 = 48,6$  нФ и тиратрона ТПИ1-10к/50 в качестве высоковольтного коммутатора, а также разрядный контур, содержащий две емкости  $C_3 = 9,1$  нФ,  $C_4 = 18,2$  нФ, индуктор  $L_1$  и рельсовый разрядник SG (рис. 1). В качестве индукционного лазерного излучателя использовалась керамическая трубка диаметром 20 мм и длиной 800 мм, торцы которой герметизировались плоскопараллельными пластинами  $W_1$ ,  $W_2$  из  $\text{CaF}_2$ , размещенными в юстировочных узлах. В качестве индуктора  $L_1$  использовался набор из намотанных на трубку 32 катушек, выполненных из многожильного провода ПВ-3 сечением  $4 \text{ мм}^2$ , включенных параллельно. Резонатор был образован задним плоским алюминиевым зеркалом  $M$  и передней подложкой  $W_1$ . Осуществлялась продольная прокачка газовых смесей с небольшой (около 1 л/мин) скоростью. В экспериментах лазер работал с частотой следования импульсов 1 Гц.

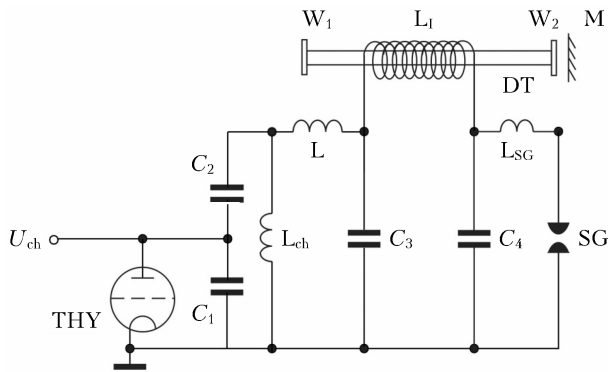


Рис. 1. Электрическая схема системы возбуждения Xe I-лазера с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом:  $C_1 = 64,8$ ;  $C_2 = 48,6$ ;  $C_3 = 9,1$ ;  $C_4 = 18,2$  нФ;  $L_{ch}$  – зарядная индуктивность;  $L_1$  – индуктор; DT – разрядная трубка;  $U_{ch} = 27$  кВ; THY – тиратрон серии ТПИ1-10к/50; SG – рельсовый разрядник

Спектральные характеристики излучения ксенона в импульсном индукционном цилиндрическом разряде исследовались при помощи монохроматора ЛОМО МДР-204 с дифракционной решеткой 300 штр/мм (рабочая спектральная область 800–5000 нм), длительность оптических импульсов – при помощи охлаждаемого фотодиода ФД-511-2 и осциллографа Tektronix 2024B с полосой 100 МГц.

## 2. Результаты и обсуждение

В экспериментах ИК-генерация, соответствующая переходам нейтральных атомов ксенона, возникла при относительно небольшом давлении 0,1–1 торр. Спектральный состав лазерного излу-

чения индукционного Xe I-лазера анализировался в области 800–5000 нм. В таких условиях накачки спектр генерации состоял из трех линий с длинами волн  $\lambda_1 = 904,5$ ;  $\lambda_2 = 1733$  и  $\lambda_3 = 2026$  нм, которые мы отнесли к переходам нейтральных атомов ксенона  $6p^2[5/2]_2 \rightarrow 6s^2[3/2]_2^0$ ,  $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[5/2]_2$  и  $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[3/2]_1$  соответственно [21]. Максимальная интенсивность лазерного излучения достигалась при давлении ~0,3–0,4 торр. Спектр генерации в чистом ксеноне при давлении ~0,3 торр представлен на рис. 2.

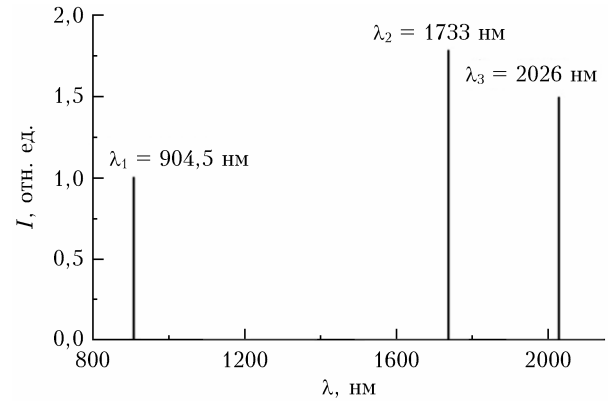


Рис. 2. Спектр излучения ИК Xe I-лазера с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом; интенсивность линии  $\lambda_1$  увеличена в ~100 раз

Известно [22], что добавление гелия или аргона позволяет значительно повысить энергию генерации Xe I-лазера, возбуждаемого поперечным разрядом. Мы также использовали эти газы в качестве добавок. При разбавлении ксенона гелием рабочее давление в зависимости от соотношения компонент увеличивалось до ~1 торр, однако в смеси He–Xe исчезло излучение на  $\lambda_1$  и уменьшалась интенсивность излучения нейтральных атомов ксенона на  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  (рис. 3). Более того, интенсивность генерации на  $\lambda_2$  была на порядок меньше, чем на  $\lambda_3$ , и резко падала с увеличением парциального давления гелия в двухкомпонентной смеси He–Xe.

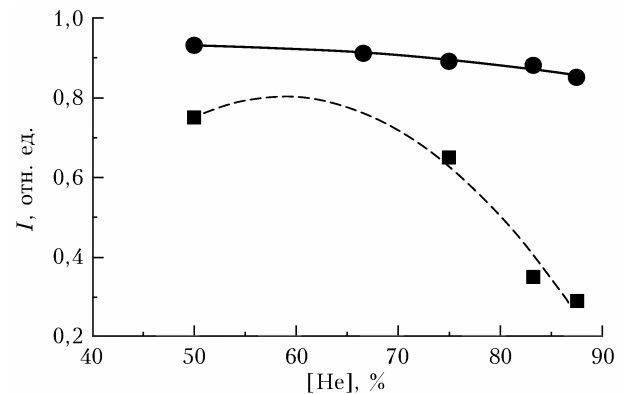


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения атомов Xe I на  $\lambda_2 = 1733$  нм (сплошная линия) и  $\lambda_3 = 2026$  нм (штриховая линия) при различном содержании гелия в двухкомпонентной смеси He–Xe

При использовании аргона в качестве буферного газа интенсивность излучения на  $\lambda_2 = 1733$  нм была в 2 раза меньше, чем в чистом ксеноне (рис. 4). С ростом концентрации аргона в смеси с ксеноном интенсивность генерации уменьшалась. Оптимальное давление смеси Ar–Xe составляло  $\sim 1$  торр.

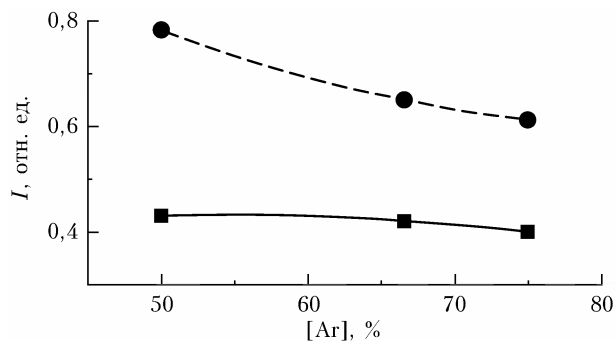


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения атомов Xe I на  $\lambda_2 = 1733$  нм (сплошная линия) и  $\lambda_3 = 2026$  нм (штриховая линия) при различном содержании аргона в двухкомпонентной смеси Ar–Xe

Были проведены исследования временных характеристик генерации индукционного Xe I-лазера. В экспериментах длительность оптических импульсов составляла  $(8 \pm 1)$  нс на полувывоте (рис. 5). Лазерная генерация возникала на переднем фронте импульса накачки, поэтому мы предполагаем, что основным механизмом формирования инверсии в индукционном разряде является прямое возбуждение атомов ксенона электронным ударом из основного состояния.

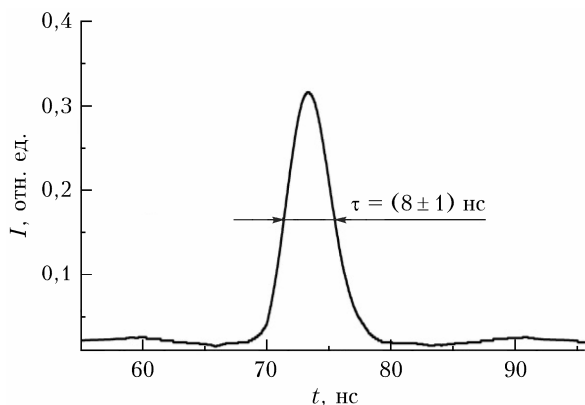


Рис. 5. Оциллограмма оптического импульса генерации ИК Xe I-лазера с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом

В настоящей работе исследований энергетических характеристик генерации индукционного Xe I-лазера не проводилось. Были произведены оценки энергии генерации, которая в наших экспериментах не превышала 0,1 мДж. С целью увеличения энергии генерации и КПД индукционного Xe I-лазера планируются дальнейшие эксперименты, которые позволяют определить оптимальную конфигурацию индукционного лазерного излучателя и состав смеси, а также уточнить прочие параметры накачки.

## Заключение

Разработана система формирования импульсного индукционного цилиндрического разряда в ксеноне и его смесях с гелием и аргоном. Впервые в импульсном индукционном цилиндрическом разряде получено лазерное излучение на переходах нейтральных атомов ксенона в области 900–2050 нм. Спектр генерации состоял из трех линий с длинами волн 904,5; 1733 и 2026 нм. Использование в качестве буферных газов гелия и аргона приводило к исчезновению излучения на  $\lambda_1 = 904,5$  нм и уменьшению интенсивности излучения на  $\lambda_2 = 1733$  нм и  $\lambda_3 = 2026$  нм. Длительность оптических импульсов составляла  $(8 \pm 1)$  нс на полувывоте.

1. *Kopica M., Choi J.W.* Simple laser system for methane detection // Proc. SPIE. 2003. V. 5234. P. 624–627.
2. *Patel C.K.N., Bennett W.R., Jr., Faust W.L., McFarlane R.A.* Infrared spectroscopy using stimulated emission techniques // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9, N 102. P. 102–104.
3. *Faust W.L., McFarlane R.A., Patel C.K.N., Garrett C.G.B.* Noble gas optical maser lines at wavelengths between 2 and 35  $\mu$  // Phys. Rev. 1963. V. 133. P. 1476–1486.
4. *Andrade O., Gallardo.* High gain laser lines in noble gases // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 11, N 3. P. 99–100.
5. *Patel C.K.N., Faust W.L., McFarlane R.A.* High gain gaseous (Xe–He) optical masers // Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1, N 4. P. 84–85.
6. *Faust W.L., McFarlane R.A., Patel C.K.N., Garrett C.G.B.* Gas maser spectroscopy in the infrared // Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1, N 4. P. 85–88.
7. *Lawton S.A., Richards J.B., Newman L.A., Specht L., De Temple T.A.* The high-pressure neutral infrared xenon laser // J. Appl. Phys. 1978. V. 50. N 6. P. 3888–3898.
8. *Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф.* Генерация в смеси Ar–Xe при комбинированной накачке // Квант. электрон. 1980. Т. 7, № 663. С. 381–382.
9. *Basov N.G., Chegunov A.Yu., Danilychev V.A., Holin I.V., Ustinovskiy M.N.* Powerful electroionization laser on Xe infrared atomic transitions // IEEE J. Quant. Electron. 1983. V. 19, N 2. P. 126–128.
10. *Басов Н.Г., Данилычев В.А., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю.* Генерация на длине волны  $\lambda = 1,73$  мкм в смеси Ar–Xe при накачке электронным пучком // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, № 10. С. 590–593.
11. *Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н.* Мощная генерация в смеси Ar–Xe при возбуждении пучком электронов микросекундной длительности // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, № 14. С. 837–840.
12. *DeYoung R.J., Julufka N.W., Hohl F.* Nuclear-pumped lasing of 3He–Xe and 3He–Kr // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30, N 1. P. 19–21.
13. *Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривоносос В.Н., Мельников С.П., Подмошенский И.В., Синянский А.А.* Низкопороговые лазеры с ядерной накачкой на переходах атомарного ксенона // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 1. С. 80–83.
14. *Муравьев И.И., Шевнин А.М., Янчарина А.М., Евтушенко Г.С.* Рекомбинационный лазер на плазменной струе гелия и ксенона // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 4. С. 793–795.
15. *Данилычев В.А., Зворыкин В.Д., Холин И.В., Чугунов А.Ю.* Исследование плазменного рекомбинационного

- лазера на смеси He–Xe, возбуждаемого лазерными импульсами с  $\lambda = 10,6$  мкм // Квант. электрон. 1984. Т. 9, № 1. С. 92–98.
16. *Littzenberger L., Trainor D., McGeoch M.* A 650 J e-beam-pumped atomic xenon laser // IEEE J. Quant. Electron. 1990. V. 26, N 9. P. 1668–1675.
  17. *Ражев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С.* FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 82, № 5. С. 290–294.
  18. *Ражев А.М., Чуркин Д.С.* Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86, № 6. С. 479–483.
  19. *Ражев А.М., Чуркин Д.С., Завьялов А.С.* Импульсный индукционный лазер на молекулярном водороде // Журн. Вестн. НГУ. Сер. Физ. 2009. Т. 4, № 3. С. 12–18.
  20. *Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S.* IR lasing on atomic xenon with pumping by longitudinal pulse inductive discharge // Laser Phys. Lett. 2019. V. 16, N 4. Art. No. 045004.
  21. *Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С.* Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 899 с.
  22. *Холин И.В.* Мощные инфракрасные Ar–Xe-лазеры высокого давления // Квант. электрон. 2003. Т. 33, № 2. С. 129–141.

*A.M. Razhev, D.S. Churkin, E.S. Kargapol'tsev, R.A. Tkachenko, I.A. Trunov.* **IR Xe I laser pumped by pulsed induction cylindrical discharge.**

An IR laser, which operates in the region 900–2050 nm at transitions of Xe I atoms and is pumped by pulsed inductive cylindrical discharge, has been created. Xenon and its mixtures with helium and argon were used as active media. The influence of the composition of the active gas medium on the intensity of Xe I atom radiation was experimentally studied. The lasing spectrum consisted of three lines with wavelengths of 904.5, 1733, and 2026 nm. The intensity ratio strongly depended on the composition of the active medium. The duration of the optical radiation pulses attained  $8 \pm 1$  ns (FWHM).