

УДК 535.33:537.525.7

ИК ИНДУКЦИОННЫЙ Хе-ЛАЗЕР С НАКАЧКОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ПРОДОЛЬНОМ ИНДУКЦИОННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2020 г. А. М. Ражев^{1, *}, Д. С. Чуркин^{1, 2}, Е. С. Каргапольцев¹,
Р. А. Ткаченко¹, И. А. Трунов^{1, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский государственный технический университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: razhev@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Впервые сообщается о получении ИК лазерного излучения атомов ХеI в области 1700–2050 нм при накачке ксенона и его смесей с гелием и аргоном импульсным продольным индукционным разрядом. Спектр генерации состоял из двух линий с длинами волн 1733 и 2026 нм. Длительность оптических импульсов излучения достигала 60 ± 2 нс на полувысоте.

DOI: 10.31857/S0367676520070248

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день лазеры на переходах инертных газов являются одними из наиболее востребованных источников лазерного излучения в ближней и средней ИК области. Среди подобных лазеров широкое распространение получили ХеI-лазеры. Впервые генерация на ИК переходах ксенона была получена при накачке активной среды объемным самостоятельным электрическим разрядом [1, 2]. Также позднее стала использоваться накачка электрическим разрядом, стабилизированным пучком электронов [3–5], накачка электронным пучком с наносекундной [4] и микросекундной [6, 7] длительностью импульса, накачка двухкомпонентных ксеноновых смесей осколками деления ядерных реакций [8, 9], накачка импульсной плазменной струей [10] и оптическим пробоем смеси газов [11].

Несмотря на широкий спектр способов накачки ХеI-лазеров, сегодня самыми часто используемыми методами являются накачка электронным пучком и ВЧ разрядом. В случае накачки активной смеси электронным пучком, оптимальными являются двух или трехкомпонентные смеси ксенона с аргоном и гелием в соотношении He/Ar : Хе – 100 : 1 и давлении до нескольких атмосфер. Спектр генерации чаще всего содержит излучение на длинах волн 1.73, 2.03, 2.63, 2.65 и 3.37 мкм, а энергия генерации может достигать 650 Дж [12] при КПД – до нескольких % (в электроионизационных лазерах почти 10% [13]). Длительность им-

пульсов генерации, как правило, соответствует длительности импульсов накачки и может достигать от величины нескольких мкс до нескольких мс [14]. Во втором случае лазерная генерация может осуществляться в непрерывном режиме, при этом, мощность может достигать 3.5 Вт [15]. Лазерное излучение чаще всего состоит из нескольких (до десятка) линий в области 1.7–3.7 мкм [16].

Многообразие работ, посвященных исследованию почти всех известных методов накачки ксеноновых смесей (кроме химического), обусловлено широкими возможностями применения ксеноновых лазеров. На данный момент ксеноновые лазеры используются для создания различных сканирующих и атмосферных лидаров [17], поскольку лазерная генерация происходит на длинах волн, находящихся в окнах прозрачности земной атмосферы. Также, ксеноновый лазер может использоваться в волоконных оптических линиях связи для передачи излучения в ближней ИК области с малыми потерями на значительные расстояния. Более того, ксеноновые лазеры широко используются в науке благодаря тому, что данная активная среда позволяет генерировать лазерное излучение на различных длинах волн в достаточно широком диапазоне (0.9–29 мкм [18–20]) и имеет самый низкий порог генерации среди газовых лазеров [21]. Следовательно, это открывает большие возможности без смены активной среды и принципиальных изменений конструкции лазерного излучателя или электри-

ческой схемы накачки, а только заменой элементов резонатора выделять определенные спектральные линии на заданной длине волны.

В наших предыдущих экспериментах по созданию газовых лазеров, накачиваемых импульсным индукционным разрядом, была показана возможность накачки активных газовых лазерных сред, работающих как на передаче возбуждения от атомов буферного газа [22], так и при прямом возбуждении молекул (в данном случае азота и водорода) электронным ударом [23, 24]. Кроме того, используемый в выше описанных исследованиях индукционный разряд формируется в отсутствие каких-либо электродов в активной среде, что позволяет избежать формирования процессов загрязнения активной среды, протекающих в электроразрядных лазерах и приводящих к нестабильности работы лазера и ухудшению его электротехнических характеристик. Следовательно, отсутствие электродов в индукционном разряде и химическая инертность газовых компонент активной среды позволяет создавать ХеI-лазеры с очень большим ресурсом работы. В связи с вышеперечисленными преимуществами были проведены пробные эксперименты по накачке ХеI-лазера импульсным индукционным продольным разрядом. В результате чего в разрядной трубке с активной длиной 500 мм была зарегистрирована лазерная генерация в области 900–1000 нм [25]. Таким образом, мы считаем, что импульсный индукционный разряд может быть предложен в качестве альтернативного метода накачки ИК ХеI-лазера. Соответственно, целью данной работы является исследование спектральных и временных характеристик излучения ХеI-лазера на электронных переходах нейтральных атомов ксенона в импульсном продольном индукционном разряде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка, электрическая схема которой выполнена по типу схемы Блюмляйна, аналогичная описанной в [26]. Данная система накачки включала в себя две накопительные емкости $C_1 = 30$ нФ и $C_2 = 55$ нФ, заряжаемые от импульсного источника ALE-152 LambdaEMI до зарядного напряжения $U_{ch} = 27$ кВ, и высоковольтный коммутатор – тиратрон серии ТПИ1-10/50. В качестве индукционного лазерного излучателя использовалась стеклянная трубка с капилляром и обводным каналом. Такая конструкция обеспечивала протекание тока по замкнутому контуру, при этом, рабочая область была образована капилляром диаметром 7 мм и длиной 300 мм – для достижения высокой плотности тока, – а диаметр обводного канала был значительно больше (20 мм) для снижения полного сопротивления контура. Торцы трубки герметизировались плоскопараллельными пластинами из

CaF₂, размещенными в юстировочных узлах. В качестве индуктора использовался набор из 8 рамок, выполненных из медных изолированных проводов сечением 2.5 мм², установленных вдоль разрядного контура. В литературе такой тип безферритного индуктора называется антенной [27]. Резонатор был образован задним плоскопараллельным алюминиевым зеркалом и передней подложкой из CaF₂. Осуществлялась продольная прокачка газовых смесей с небольшой (около 1 л · мин⁻¹) скоростью.

Спектральные характеристики излучения ксенонного лазера в импульсном продольном индукционном разряде исследовались при помощи монохроматора ЛОМО МДР-204 с дифракционной решеткой 300 штр/мм (рабочая спектральная область 800–5000 нм). Исследование длительности оптических импульсов производилось при помощи охлаждаемого фотодиода ФД-511-2 и осциллографа Tektronix 2024В с полосой 100 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые ИК лазерное излучение при накачке ксенона импульсным продольным индукционным разрядом было получено в спектральной области 900–1000 нм в предшествующих этой работе экспериментах при использовании похожей разрядной трубки с активной длиной около 500 мм [25]. Спектр излучения был представлен двумя линиями с длинами волн 904.5 и 979.9 нм соответственно. В данной работе с целью исследования возможности создания компактных индукционных ХеI-лазеров, эксперименты проводились с разрядной трубкой такого же диаметра, но с меньшей активной длиной (300 мм). Эксперименты проводились при одном зарядном напряжении, равном 27 кВ, с частотой следования импульсов 1 Гц.

Исследования спектрального состава лазерного излучения индукционного ХеI-лазера проводились в области 800–5000 нм. В данных условиях накачки, излучения на вышеупомянутых длинах волн 904.5 и 979.9 нм обнаружено не было, однако в спектре генерации были зарегистрированы две линии с длинами волн $\lambda_1 = 1733$ нм и $\lambda_2 = 2026$ нм, которые мы отнесли к переходам нейтральных атомов ксенона $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[5/2]_2$ и $5d[3/2]_1^0 \rightarrow 6p[3/2]_1$ соответственно [28]. При этом рабочее давление не превышало нескольких торр. Максимальная интенсивность лазерного излучения достигалась при давлениях около 0.3–0.4 торр. Спектр генерации в чистом ксеноне при давлении ~0.3 торр представлен на рис. 1. По нашему мнению, отсутствие в спектре генерации линий с длинами волн 904.5 и 980 нм связано с тем, что они имеют меньший коэффициент усиления, поэтому при уменьшении активной длины режим лазерной генерации для них не достигается.

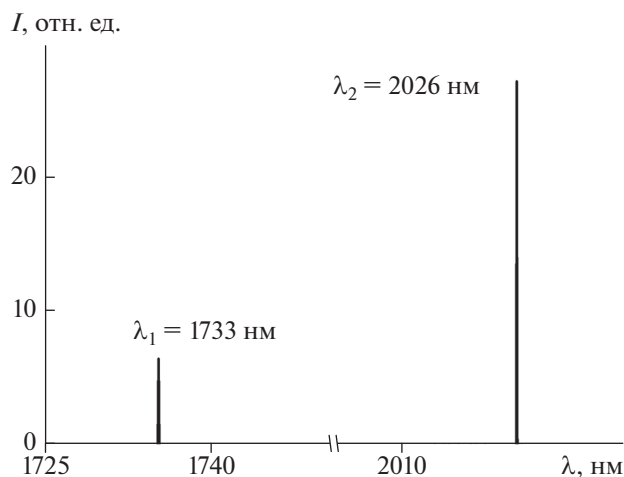


Рис. 1. Спектр излучения ИК ХеI-лазера с накачкой импульсным продольным индукционным разрядом.

Поскольку из литературы известно [28], что добавление гелия или аргона позволяет значительно повысить энергию генерации ХеI-лазера, мы в своих экспериментах также пробовали использовать эти газы в качестве добавок. При разбавлении ксенона гелием рабочее давление в зависимости от соотношения компонент увеличивалось приблизительно до 1 торр, однако в смеси Не–Хе происходило уменьшение интенсивности излучения нейтральных атомов ксенона на двух ранее указанных длинах волн (рис. 2а).

Более того, интенсивность генерации на длине волны λ_1 была на порядок меньше, чем интенсивность λ_2 , и резко уменьшалась с увеличением парциального давления гелия в двухкомпонентной смеси Не–Хе. При этом проведенные исследования спектрального состава в диапазоне 800–5000 нм показали, что других линий, которые можно было

бы отнести к лазерному излучению атомов или ионов Хе или Не в спектре не появляется.

При использовании аргона в качестве буферного газа интенсивность излучения на длине волны 2026 нм была в 2 раза меньше, чем в чистом ксеноне (рис. 2б). Генерации на длине волны 1733 нм в смеси Аг–Хе в спектре зарегистрировано не было. Рабочее давление смеси Аг–Хе не превышало 1 торр. Так же, как и при добавлении гелия к ксенону, в смеси Аг–Хе других линий генерации в области 800–5000 нм не появлялось. Сравнивая результаты спектральных исследований однокомпонентной и двухкомпонентных смесей, можно предположить, что при накачке двухкомпонентной смеси значительная доля энергии идет на возбуждение различных состояний атомов и ионов Не и Аг, что свидетельствует об изменениях в кинетических процессах, протекающих в плазме импульсного индукционного разряда.

Проводились исследования временных характеристик генерации индукционного ХеI-лазера, которые показали, что длительность оптического импульса составляла 60 ± 2 нс на полувысоте (рис. 3). Добавление гелия или аргона к ксенону приводило к уменьшению длительности оптического импульса до ~50 нс на полувысоте.

В этой работе исследований энергетических характеристик генерации индукционного ХеI-лазера не проводилось, измерялась только энергия, которая в наших экспериментах составляла 0.1 мДж. Поскольку созданный лазер может иметь некоторые применения, например, в медицине, то предполагается его дальнейшее исследование, которое позволит определить энергию, мощность, к. п. д. и другие параметры лазерного излучения, поэтому значение энергии не является окончательным и будет увеличено при оптимизации параметров накачки.

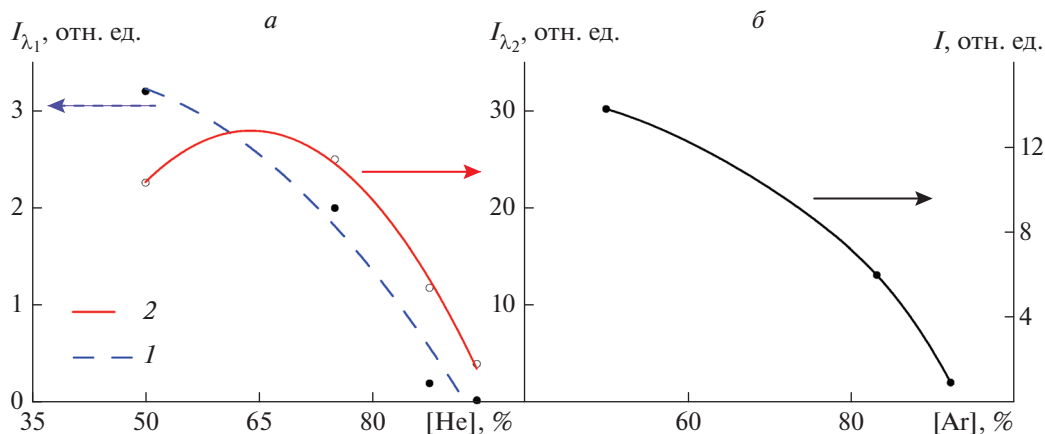


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения атомов ХеI на длинах волн 1733 нм (1) и 2026 нм (2) при различном содержании гелия в двухкомпонентной смеси Не–Хе (а); на длине волны 2026 нм при различном содержании аргона в двухкомпонентной смеси Аг–Хе (б).

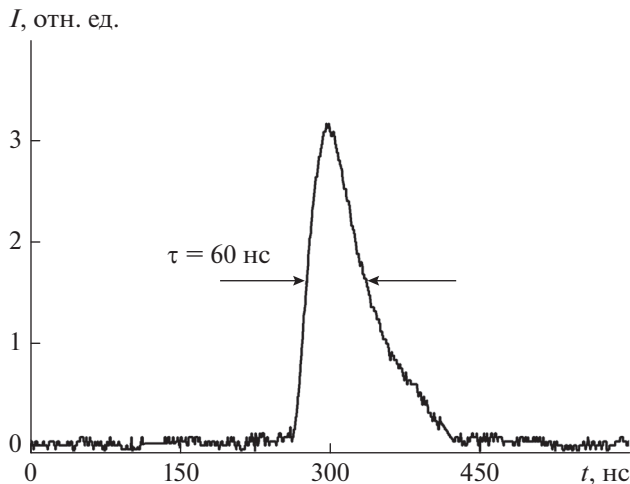


Рис. 3. Осциллограмма оптического импульса генерации ИК ХеI-лазера с накачкой импульсным продольным индукционным разрядом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в импульсном индукционном продольном разряде получено лазерное излучение на переходах нейтральных атомов ксенона в области 1700–2050 нм. Спектр генерации состоял из двух линий с длинами волн 1733 и 2026 нм. В результате спектральных исследований однокомпонентной и двухкомпонентных смесей ксенона с гелием и аргоном выявлено, что добавление буферных газов приводит к уменьшению интенсивности излучения на длинах волн 1733 и 2026 нм. Длительность оптического импульса в однокомпонентной смеси из чистого ксенона составляла 60 ± 2 нс на полувысоте. Использование двухкомпонентных смесей с гелием и аргоном приводило к уменьшению длительности оптического импульса.

Результаты исследований, представленные в работе, получены в рамках государственного задания (тема № АААА-А17-117030310293-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patel C.K.N., Faust W.L., McFarlane R.A. // Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1. № 4. P. 84.
2. Faust W.L., McFarlane R.A., Patel C.K.N., Garrett C.G.B. // Appl. Phys. Lett. 1962. V. 1. № 4. P. 85.
3. Lawton S.A., Richards J.B., Newman L.A. et al. // J. Appl. Phys. 1978. V. 50. P. 3888.
4. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 3. С. 663; Losev V.F., Tarasenko V.F. // Sov. J. Quant. Electron. 1980. V. 10. № 3. P. 381.
5. Basov N.G., Chugunov A.Yu., Danilychev V.A. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1983. V. 19. № 2. P. 126.
6. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Устиновский Н.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 8. № 10. С. 590; Basov N.G., Danilychev V.A., Ustinovskii N.N. et al. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1982. V. 8. P. 256.
7. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 8. № 14. С. 837; Bychkov Yu.I., Losev V.F., Tarasenko V.F., Tel'minov E.N. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1982. V. 8. P. 361.
8. DeYoung R.J., Julufka N.W., Hohl F. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30. № 1. P. 19.
9. Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривонос В.Н. и др. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 1. С. 80; Voinov A.M., Dovbysh L.E., Krivonosov V.N. et al. // Sov. Phys. Doklady. 1979. V. 24. P. 189.
10. Муравьев И.И., Шевнин А.М., Янчарина А.М., Евтушенко Г.С. // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 4. С. 793; Murav'ev I.I., Shevnin A.M., Yancharina A.M., Evtushenko G.S. // Sov. J. Quant. Electron. 1982. V. 12. № 4. P. 493.
11. Данилычев В.А., Зворыкин В.Д., Холин И.В., Чугунов А.Ю. // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 1. С. 92; Danilychev V.A., Zvorykin V.D., Kholin I.V., Chugunov A.Yu. // Sov. J. Quant. Electron. 1982. V. 12. № 1. P. 58.
12. Littzenberger L.N., Trainor D.W., McGeoch M.W. // IEEE J. Quant. Electron. 1990. V. 26. № 9. P. 1668.
13. Basov N.G., Baranov V.V., Chugunov A.Yu. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1985. V. 21. № 11. P. 1756.
14. Середя О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. // Квант. электрон. 1993. Т. 20. № 6. С. 535; Sereda O.V., Tarasenko V.F., Fedenev A.V., Yakovlenko S.I. // Quant. Electron. 1993. V. 23. P. 459.
15. Morley R.J., Wendland J.J., Baker H.J., Hall D.R. // Opt. Commun. 1997. V. 142. № 4. P. 244.
16. Wang J., Paranto J., Lovejoy C. // IEEE J. Quant. Electron. 1984. V. 20. № 3. P. 276.
17. Kopica M., Choi J.W. // Proc. SPIE. 2003. V. 5234. P. 624.
18. Patel C.K.N., Bennett W.R., Jr., Faust W.L. // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. P. 102.
19. Faust W.L., McFarlane R.A., Patel C.K.N., Garrett C.G.B. // Phys. Rev. 1964. V. 133. P. A1476.
20. Andrade O., Gallardo M., Bockasten K. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 11. № 3. P. 99.
21. Сорокин А.Р. // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 3. С. 308; Sorokin A.R. // Sov. J. Quant. Electron. 1983. V. 13. № 2. P. 165.
22. Разжев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. № 5. С. 290; Razhev A.M., Mkhitaryan V.M., Churkin D.S. // JETP Lett. 2005. V. 82. № 5. P. 259.
23. Разжев А.М., Чуркин Д.С. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 6. С. 479; Razhev A.M., Churkin D.S. // JETP Lett. 2007. V. 86. № 6. С. 479.
24. Разжев А.М., Чуркин Д.С., Завьялов А.С. // Вестн. НГУ. Сер. физ. 2009. Т. 4. № 3. С. 12.
25. Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S., Trunov I.A. // Proc. 18th ICLO (St. Petersburg, 2018). P. 82.
26. Razhev A.M., Churkin D.S. // Opt. Commun. 2009. V. 282. № 7. P. 1354.
27. Попов О.А. Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100–15000 кГц. Дис. ... докт. техн. наук. Москва: МЭИ, 2011. 450 с.
28. Холин И.В. // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 2. С. 129; Kholin I.V. // Quant. Electron. 2003. V. 33. № 2. P. 129.