

# FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом

А. М. Ражев<sup>1)</sup>, В. М. Мхитарян\*, Д. С. Чуркин

Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*Институт физических исследований Национальной Академии Наук Республики Армения, 378410 Аштарак-2, Армения,

Поступила в редакцию 11 июля 2005 г.

Предложено использование импульсного индукционного поперечного разряда для возбуждения газовых лазеров на электронных переходах атомов и молекул. Создан лазер на электронных переходах атомов фтора (FI) с накачкой индукционным поперечным разрядом. Получена лазерная генерация на трех длинах волн: 703.75; 712.79 и 731.1 нм при возбуждении газовых смесей He-F<sub>2</sub> (NF<sub>3</sub>) в диапазоне давлений от 20 до 350 торр. Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных, временных и энергетических характеристик созданного индукционного FI-лазера.

PACS: 32.70.Fw, 42.55.Lt, 52.80.Yr

В литературе известны публикации по получению непрерывной лазерной генерации с использованием высокочастотного индукционного разряда [1–3]. В работах [1, 2] сообщалось о получении непрерывной генерации на переходах атомарных ионов аргона в зеленой области спектра при возбуждении продольным индукционным высокочастотным разрядом. В работе [3] была получена генерация на колебательных переходах молекул CO<sub>2</sub> в области 10.6 мкм в расширяющемся потоке азота, нагретом индукционным разрядом при добавлении в него холодного CO<sub>2</sub>. О возможности создания лазеров с использованием возбуждения импульсным индукционным разрядом сообщалось в [4].

В данной работе предложен и экспериментально реализован метод возбуждения лазерных активных сред индукционным импульсным поперечным разрядом для получения генерации на электронных переходах атомов и молекул в газах. При этом важным являлось то, что частота следования импульсов должна быть от единиц герц и выше, то есть все процессы формирования разряда, создания инверсии населенностей, усиления, поглощения, тушения должны протекать в течение каждого импульса вне зависимости от предыстории предыдущего импульса.

Из литературы по газовым лазерам хорошо известно, что импульсный поперечный электрический разряд как метод возбуждения газовых лазеров имеет ряд преимуществ перед импульсным продольным или непрерывным разрядом. Под поперечным разрядом здесь понимается электрический разряд, в кото-

ром ток протекает в направлении, перпендикулярном оптической оси. Он обеспечивает получение генерации на очень большом количестве переходов атомов, молекул и их ионов, вследствие реализации разнообразных, в том числе и новых механизмов образования инверсии в широком диапазоне давлений, включая атмосферное. Это достигается за счет того, что в поперечном разряде удастся обеспечить значительно более высокий уровень импульсной мощности возбуждения, что приводит к возникновению генерации на различных переходах, в том числе и тех, на которых при других типах разряда усиления не удастся достичь. В результате можно создавать лазеры с большой энергией излучения и достигать высоких значений кпд: 1–10%. Импульсный индукционный поперечный разряд отличается от обычных импульсных как продольного, так и поперечного разряда тем, что формируется в условиях отсутствия каких-либо электродов в активной среде как следствие индукции магнитного поля, созданной системой возбуждения. При правильном выборе материала трубки можно обеспечить чистоту активной среды и реализовать большой ресурс работы лазеров. При формировании такого разряда не возникают катодные пятна на поверхности электродов, являющиеся причиной неустойчивости и контрагирования разряда, приводящие к ухудшению однородности разряда, загрязнению газовой смеси, срыву генерации, ограничению частоты следования импульсов. Использование импульсного индукционного разряда является перспективным методом возбуждения не только газовых лазеров, но и лазеров на парах металлов. Кроме того, этим способом можно создавать плазму для

<sup>1)</sup>e-mail: razhev@laser.nsc.ru

получения излучения, включая вынужденное, в любых диапазонах спектра, особенно в области от 10 до 150 нм, представляющей значительный интерес для микроэлектроники и фотолитографии.

Для демонстрации возможности создания индукционного лазера были выбраны переходы нейтральных атомов фтора, которые возбуждались импульсным индукционным поперечным разрядом в смеси  $\text{He:F}_2(\text{NF}_3)$ . Такой выбор был обусловлен тем, что инверсия на переходах атомов фтора достигается при относительно низких уровнях возбуждения в широком диапазоне давлений. При этом достигается высокий коэффициент усиления, обеспечивающий режим сверхсветимости в низкодобротном резонаторе, а излучение имеет место в красной области спектра и легко регистрируется переход от спонтанного излучения в режим генерации.

В литературе много публикаций по получению генерации на различных переходах атомов фтора в спектральном диапазоне 623–780 нм [5–16]. Полное число линий, на которых наблюдалась генерация, равно 17. Однако в каждой работе из-за различия в условиях возбуждения был получен свой спектр, отличавшийся количеством линий с разными длинами волн. Для создания инверсии на атомарных переходах фтора использовались два способа возбуждения – продольный электрический разряд [5–9] в смесях низкого (0.5–50 торр) давления гелия с фторсодержащими молекулами и поперечный разряд [10, 12, 13, 15], обеспечивающий получение генерации на этих же смесях в широком диапазоне давлений вплоть до 3 атм. В качестве доноров фтора при низких давлениях использовались молекулы  $\text{HF}$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6$ ,  $\text{NF}_3$ ,  $\text{F}_2$ , тогда как при высоких давлениях, как правило, использовались лишь  $\text{NF}_3$ ,  $\text{F}_2$ , что связано с однородностью разряда, достигаемой с использованием предварительной УФ ионизации разрядного промежутка.

В большинстве описанных в литературе экспериментов генерация на переходах атомов фтора происходила в режиме сверхсветимости. Длительность импульсов генерации в различных экспериментах составляла от нескольких микросекунд (в продольном разряде) до десятков наносекунд (в поперечном разряде). Газовая смесь, являвшаяся активной средой лазера, состояла, как правило, из гелия и добавок фторсодержащих молекул в соотношении от 30:1 до 1000:1. Гелий был необходим для реализации механизма образования инверсии на переходах атомов фтора через возбужденные состояния атомов гелия. Использование других инертных газов, таких как  $\text{Ne}$  или  $\text{Ar}$  в качестве буферного газа, не приводило к до-

стижению генерации. Перечисленные выше особенности режима работы FI-лазера дали нам основание считать его хорошим объектом для получения генерации в импульсном индукционном поперечном разряде.

Для создания импульсного индукционного поперечного разряда была использована система возбуждения эксимерного лазера, которая была собрана по схеме L-C-инвертор и описана нами в работе [17]. В этой системе возбуждения была удалена обостряющая емкость и подключен индуктор  $L$  (рис.1), кото-

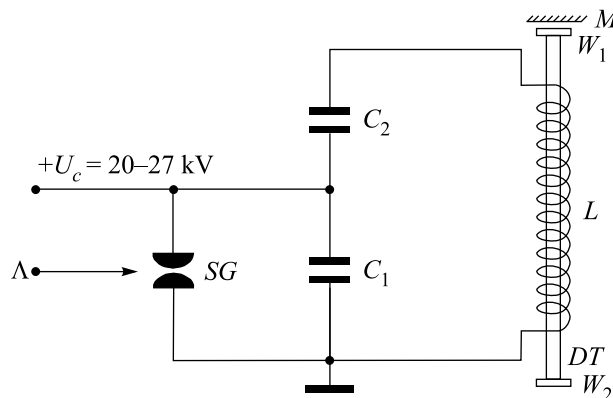


Рис.1. Электрическая схема системы возбуждения лазера импульсным индукционным поперечным разрядом.  $SG$  – стандартный искровой разрядник РУ-65,  $C_1 = 50$  нф,  $C_2 = 100$  нф.  $DT$  – разрядная трубка,  $L$  – индуктор

рый представлял собой соленоид длиной 40–60 см. Соленоид состоял из набора отдельных соленоидов, выполненных в виде секций, соединенных параллельно и расположенных вдоль стеклянной трубки, в которую напускались газовые смеси. Каждая из секций имела количество витков от 3 до 20, намотанных изолированным многожильным проводом сечением от 1.5 до 4 мм<sup>2</sup>. При проведении исследований изменялись параметры индуктора, такие как суммарная индуктивность и сопротивление, обеспечивающие требуемые значения индукции магнитного поля и напряженности электрического поля в трубке, а следовательно, и параметры индукционного разряда. Эксперименты проводились со стеклянными трубками с внутренним диаметром от 1 до 4 см и длиной активной области 40–60 см. По торцам трубки располагались юстировочные узлы с плоскопараллельными пластинами  $W_1$  и  $W_2$  из кварца или  $\text{CaF}_2$ . Пластины устанавливались перпендикулярно оси трубки и использовались в качестве герметизирующих окон и элементов оптического резонатора. С одной стороны

трубки располагалось плотное плоское  $Al$  зеркало или диэлектрическое  $M1$ .

В экспериментах исследовались интенсивность и длительность излучения индукционного разряда, а также его спектральные и энергетические характеристики при различных условиях возбуждения. Для проведения измерений использовались коаксиальные фотоэлементы с высоким временным разрешением ФЭК-22 и ФЭК-15, осциллографы Tektronix TDS-220 и C1-104, спектрометр фирмы Ocean Optics, модель HR 2000, пирозлектрический измеритель энергии лазерного излучения фирмы Ophir Optronics LTD. Точность измерений составляла 5%.

Для создания лазера в качестве активной среды использовались газовые смеси  $He:F_2(NF_3)$  различного состава при разных давлениях. Газовые смеси прокачивались вдоль трубки с небольшой скоростью. В экспериментах зарядное напряжение  $U_c$  на накопительных конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  изменялось от 20 до 27 кВ. Наилучшие результаты были получены в трубке внутренним диаметром 1.9 см при максимальном напряжении  $U = 27$  кВ, при этом полная индуктивность индуктора  $L$  была равна 60 нГн.

При низких давлениях смеси  $He:F_2$  в диапазоне от 1 до 4 торр индукционный разряд визуально заполнял по сечению трубку относительно равномерно, но генерация не достигалась. Повышение давления от 4 до 20 торр приводило к перераспределению разряда от центра к краям трубки, и разряд принимал форму кольца.

При давлениях смеси  $He:F_2$  от 20 до 350 торр была получена генерация на переходах атомов фтора в области 703–731 нм. Излучение формировалось в виде кольца, имевшего внешний диаметр около 1.9 см, а внутренний – около 1.7 см. Таким образом, при длине соленоида 40 см активный объем оказывался равным  $22\text{ см}^3$ .

Зависимость интенсивности генерации от соотношения компонент смеси показана на рис.2. Оптимальным для данных условий возбуждения является состав  $He:F_2 - 100:1$ . При замене  $F_2$  на  $NF_3$  генерация также была получена, но меньшей интенсивности. Поэтому дальнейшие исследования проводились на смесях  $He:F_2-100:1$ .

На рис.3 представлена зависимость интенсивности лазерного излучения от полного давления смеси  $He:F_2 - 100:1$ . Видно, что в области низких давлений до 60 торр интенсивность лазерного излучения быстро увеличивается, но в дальнейшем с ростом давления она достигает максимума, а затем медленно падает. Такой характер зависимости можно объяснить, с одной стороны, увеличением коэффициента усиле-

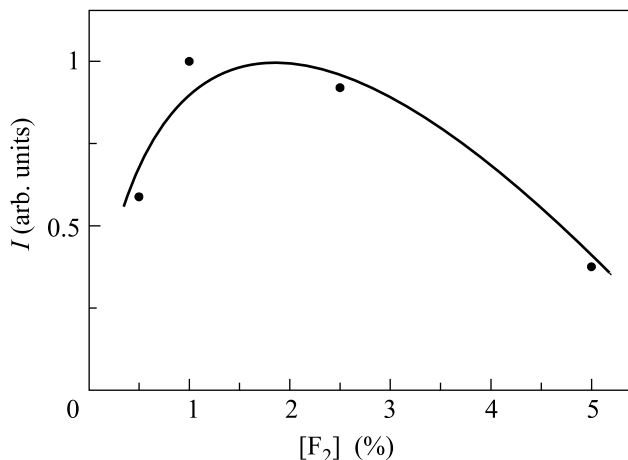


Рис.2. Зависимость интенсивности излучения FI-лазера от концентрации  $F_2$  в He при оптимальном давлении,  $U_c = 27$  кВ

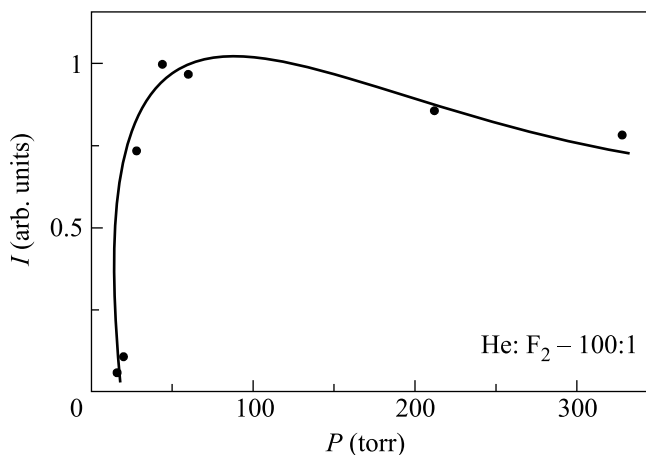


Рис.3. Зависимость интенсивности излучения FI-лазера от полного давления смеси  $He:F_2 - 100:1$ ,  $U_c = 27$  кВ

ния в среде с ростом давления, а с другой, – изменением электронных параметров индукционного разряда внутри трубки.

Исследования спектрального состава излучения показали, что генерация возникает на трех линиях 703.7469, 712.7890, 731.1019 нм, которые относятся соответственно к переходам  $3p^2P_{3/2}^o \rightarrow 3s^2P_{3/2}$ ;  $3p^2P_{1/2}^o \rightarrow 3s^2P_{1/2}$  и  $3p^2S_{1/2}^o \rightarrow 3s^2P_{3/2}$  [18].

В экспериментах было получено, что количество спектральных линий излучения FI-лазера и соотношение их интенсивностей существенным образом зависят от полного давления газовой смеси. На рис.4 показана динамика спектра генерации в диапазоне давлений от 28 до 328 торр.

На рис.5 представлены осциллограммы напряжения и спонтанного излучения при давлении 15 торр,

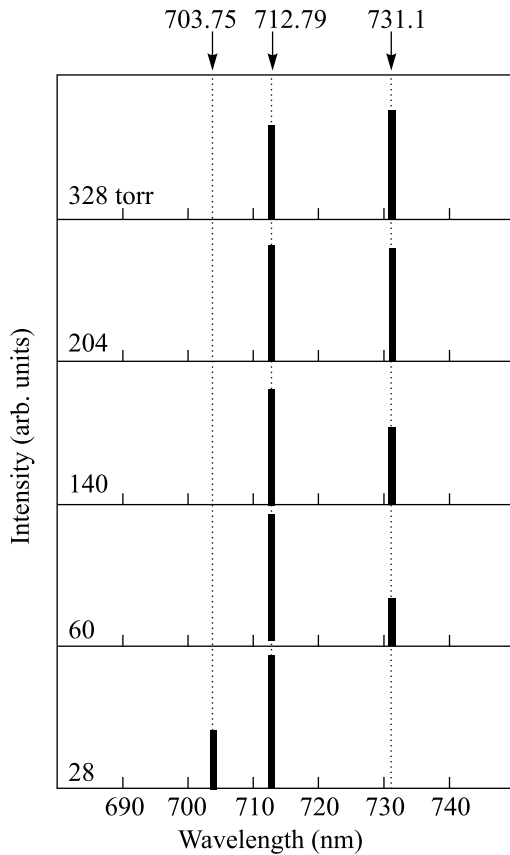


Рис.4. Зависимость спектрального состава излучения FI-лазера от полного давления смеси He:F<sub>2</sub> – 100:1.  $U_c = 27$  кВ

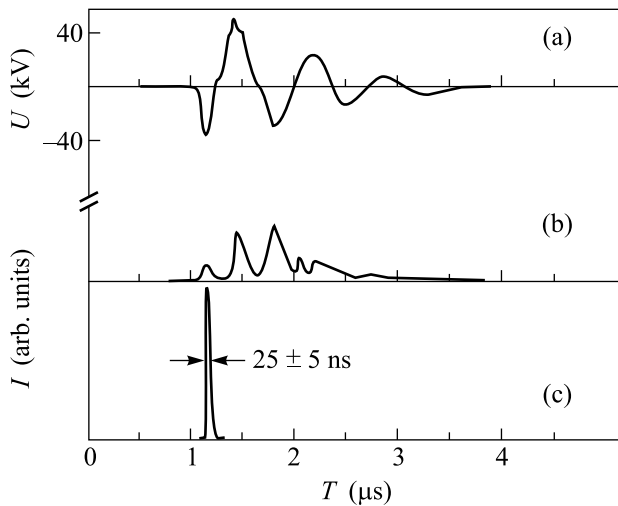


Рис.5. Временная зависимость напряжения на индукторе  $L$  (a), спонтанного излучения индукционного разряда в смеси He:F<sub>2</sub> – 100:1 при давлении 15 торр (b) и лазерного излучения при давлении смеси 250 торр (c)

а также лазерного излучения при давлении 250 торр. Из временного поведения напряжения на индукто-

ре видно, что оно имеет колебательный характер и указывает на то, что в этих первых экспериментах не было хорошего согласования параметров системы возбуждения с параметрами активной среды. Спонтанное излучение, так же как и напряжение, имело колебательный вид, однако с периодом, вдвое меньшим, то есть оно возникало как на положительном, так и на отрицательном полупериодах импульса напряжения. В отличие от спонтанного излучения, импульс генерации возникал только вначале импульса возбуждения на фронте первого полупериода и имел другую форму при существенно меньшей длительности. Это является одним из доказательств перехода в режим усиления и генерации. Другими доказательствами достижения этого режима являются спектральный состав и направленность излучения. При достижении режима генерации с ростом давления от 40 до 300 торр происходило сокращение длительности  $\tau$  импульсов лазерного излучения (рис.6), откуда следует, что длительность импульсов зави-

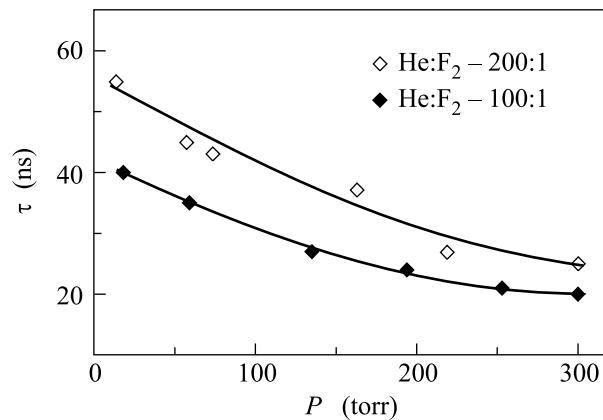


Рис.6. Зависимость длительности импульса излучения FI-лазера (на полувысоте) от полного давления газовых смесей разного состава,  $P = 250$  торр,  $U_c = 27$  кВ

сит не только от полного давления, но и от соотношения компонент смеси. Такое поведение типично для лазеров с поперечным разрядом, имеющих короткую длительность импульсов тока в газовых смесях [10, 12, 13, 15]. Минимальная длительность импульсов генерации была  $20 \pm 2$  нс в смеси He:F<sub>2</sub> – 100:1 при давлении от 260 торр и выше. Максимальная энергия лазерного излучения составила 0.12 мДж, что соответствовало импульсной мощности 6 кВт.

В экспериментах был измерен коэффициент усиления в активной среде методом потерь в резонаторе. Максимальное значение коэффициента усиления было  $0.025 \text{ см}^{-1}$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований создан первый лазер с возбуждением импульсным индукционным поперечным разрядом. На примере переходов атомов фтора показана возможность создания инверсии населенностей на электронных переходах атомов и молекул в индукционном электрическом разряде.

1. W. E. Bell, Appl. Phys. Lett. **7**, 190 (1965).
2. J. P. Goldborough, E. B. Hodges, and W. E. Bell, Appl. Phys. Lett. **8**, 137 (1966).
3. Л. И. Киселевский, Д. К. Скутов, С. А. Соколов, Журнал прикладной спектроскопии **XXI**, 951 (1974).
4. В. М. Мхитарян, Лазер Информ. № 15–16, 18 (2004).
5. M. A. Kovacs and C. J. Ultee, Appl. Phys. Lett. **17**, 39 (1970).
6. W. Q. Jeffers and C. E. Wiswall, Appl. Phys. Lett. **17**, 444 (1970).
7. A. E. Florin and R. J. Jensen, IEEE J. Quantum Electron. **QE-7**, 472 (1971).
8. J. R. English, III, H. C. Gardner, and J. A. Merritt, IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 843 (1972).
9. D. G. Sutton, L. Galvan, P. R. Valenzuela, and S. N. Suchard, IEEE J. Quantum Electron. **QE-11**, 54 (1975).
10. I. J. Bigio and R. F. Begley, Appl. Phys. Lett. **28**, 263 (1976).
11. L. O. Hocker and T. B. Phi, Appl. Phys. Lett. **29**, 493 (1976).
12. T. R. Loree and R. C. Sze, Opt. Commun. **21**, 255 (1977).
13. В. Н. Лисицын, А. М. Ражев, Письма в ЖТФ **3**, 862 (1977).
14. L. O. Hocker, J. Opt. Soc. Am. **68**, 262 (1978).
15. S. Sumida, M. Obara, and T. Fujioka, J. Appl. Phys. **50**, 3884 (1979).
16. J. E. Lawler, J. W. Parker, L. W. Anderson, and W. A. Fitzsimmons, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-15**, 609 (1979).
17. А. М. Ражев, А. А. Жупиков, Е. С. Каргапольцев, Квантовая электроника **34**, 95 (2004).
18. А. Р. Стриганов, Г. А. Одинцова, Таблицы спектральных линий атомов и ионов, Справочник, М.: Энергоиздат, 1982.