

УДК 621.373.826.038.838

А.И. Федоров

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ N₂-ЛАЗЕРОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию малогабаритных и миниатюрных N₂-лазеров с поперечным и продольным разрядами возбуждения с различными типами УФ-предыонизации. Сделан анализ основных работ по N₂-лазерам, из которого следуют новые возможности повышения их эффективности.

Азотные лазеры привлекают к себе внимание многих исследователей на протяжении более 20 лет благодаря возможности работы при комнатной температуре, использованию недорогого легкодоступного газа, простоте изготовления и перспективам получения высоких удельных параметров УФ-излучения и η лазеров.

В данной статье обобщаются результаты экспериментальных исследований по созданию малогабаритных и миниатюрных N₂-лазеров с поперечным и продольным разрядами возбуждения низкого (ТЕ), атмосферного (ТЕА) и высокого давления (ТЕАН) как без дополнительного источника УФ-предыонизации, так и с ним в виде коронной, искровой или плазменной [1–8]. Кроме того, сделан анализ основных работ

по N₂-лазерам, которые сведены в табл. 1–4. Отметим, что учитывались лишь те работы, в которых использовались новые элементы лазерных систем или был получен хотя бы один из максимальных параметров излучения соответствующего режима возбуждения.

Так, в табл. 1 приведены основные работы и максимальные параметры излучения первых лазеров низкого давления без УФ-предыонизации. Отметим, что авторы первых работ [9–12] использовали двухконтурные емкостные схемы возбуждения (С–С). Емкости выполнялись в виде полосковых линий (С_п), на отрезках кабелей (С_{каб}) или в коаксиальном виде (С_{коак}) для уменьшения индуктивности разрядного контура. В дальнейших работах исследователи исполь-

Таблица 1

Основные работы и максимальные параметры излучения по азотным ТЕ-лазерам

№ п/п	Генератор накачки	P, Торр	L, см	V, л	U ₀ , кВ	W, МВт	$\frac{W_{уд.}}{МВт (л-атм)}$	Q, мДж	$\frac{Q_{уд.}}{Дж (л-атм)}$	τ _{h/2} , нс	η, %	Год	Литература
1	C _п – C _{каб}	20	200	–	25	0,2	–	–	–	–	–	1965	[9]
2	C _п – C _{каб}	20	200	–	25	0,3	–	–	–	–	–	1965	[11]
3	Бл–н	30	183	–	75	2,5	–	10	–	4	–	1967	[16]
4	C _п – C _п	35	100	–	30	2	–	20	–	10	–	1968	[10]
5	C _п – C _{коак} ^{**}	30	80	0,1	20	0,3	60	3	0,6	10	–	1972	[12]
<i>P_{ср} = 1,5 Вт f = 1200 Гц</i>													
6	C – C _{каб}	55	100	–	30	1,1	–	13	–	12	–	1973	[17]
7	Бл–н (C)	30	100	0,07	20	1,4	400	10	2,8	7	0,1	1973	[1]*
8	2 Бл–н (C)	30	104	0,07	15	2,1	600	11	3,2	5	0,1	1974	[2]*
9	Бл–н	70	70	0,006	6	3	48·10 ²	–	–	4	1	1974	[13]
					11	9	14·10 ³	–	–				
10	C–Бл–н	50	50	0,015	12	0,17	100	1	1,4	6	–	1976	[18]
11	Бл–н	30	60	0,045	25	1	400	7	3,2	7	0,1	1978	[19]
12	C _п – C _{коак} ^{**}	110	30	0,001	10	0,2	13·10 ²	2,2	15	11	3	1986	[15]
						0,2	16·10 ³	2,6	19	1,2	0,5		

*Работы автора.

**Работы, в которых использовались обострительные емкости, обеспечивающие формирование объемного разряда в активной среде.

зовали в основном полосковые генераторы Блюмляйн (Бл–н), обеспечивающие короткие импульсы возбуждения. Так, в работе Годара [13] была получена пиковая мощность 9 МВт при $\eta = 1\%$.

Нами впервые были применены генераторы Блюмляйн на керамических конденсаторах (Бл–н (С)) [1, 2] или двойного Блюмляйн (2Бл–н (С)). В дальнейшем нами были использованы данные способы получения объемных разрядов в эксимерных лазерах и предложен новый режим возбуждения – квазистационарный для двухконтурных схем накачки, для которого обострительная емкость играет основную роль в формировании предварительного объемного разряда в активной среде [14]. Так, автору [12] удалось возбудить активный объем 0,1 л и получить среднюю мощность излучения 1,5 Вт при $f = 1,2$ кГц. Позже в [15] использование двухконтурной схемы возбуждения, в которой коаксиальная обострительная емкость одновременно являлась лазерной камерой (минимальные паразитные потери запасаемой энергии), позволило увеличить рабочее давление до 110 Торр без предыонизации и получить $\eta = 3\%$. Тем самым выявлен резерв потенциальных возможностей N_2 –лазера.

Применение дополнительных источников УФ–предыонизации для N_2 –лазеров расширило область рабочих давлений и соответственно привело к увеличению выходных параметров излучения. Оказалось, что эффективность лазеров сильно зависела от типа источника предыонизации и газовых добавок в виде He, He:NF₃(SF₆), влияющих на параметры объемного разряда в активной среде. При этом понятие ТЕА–лазеров, по аналогии с СО₂–лазерами, оказывается неоднозначным. Например, если оптимальное давление $N_2 = 150$ Торр, а буферного газа He = 600 Торр, то это ТЕА–лазер. В другом случае, если $N_2 = 760$ Торр и He = 2000 Торр, это лазер высокого давления, названный как «ТЕАН–лазер». Первые нами были применены автоматическая коронная предыонизация на обоих электродах для ТЕАН–лазера [3], плазменные электроды [5] и коронная предыонизация, стабилизированная сетчатым электродом [7] для ТЕА–лазеров. Дальнейшее повышение выходных параметров излучения было обусловлено как режимом ввода энер-

гии в разряд (двухконтурные схемы возбуждения с источником УФ–предыонизации) [7, 14], так и выбором типа электродов.

В табл. 2 приведены первые и основные работы с максимальными параметрами излучения по азотным лазерам с различными источниками УФ–предыонизации и добавками He или He:NF₃(SF₆). Так, в работе [20] в двухконтурной схеме возбуждения с коронной предыонизацией была получена апертура излучения $D \times H = 1,7 \times 2$ см². Это достигалось за счет высокой стабильности разряда, обеспечивающейся соотношением емкостей (накопительной и обострительной) контуров $C_n/C_{o6} \geq 3$. Добавки He:NF₃ увеличивали энергию излучения на порядок по сравнению с чистым N₂. Исследования влияния качества поверхности электродов на выходные параметры генерации успешно были проведены авторами [21–23].

Максимальная энергия 30 мДж и длительность импульса излучения на полувысоте 19 нс были получены в системе с коронной предыонизацией на аноде и мелко-рельефной поверхностью катода с добавками He:SF₆ [21]. Данная работа подтверждает модель взрывной эмиссии, разработанной Г.А. Месяцем [24], которая обеспечивает поставку начальных электронов в газовый промежуток. Так, авторы [22] получили $Q = 25$ мДж в смесях He:NF₃ с апертурой излучения $D \times H = 2,5 \times 3,5$ см² при атмосферном давлении. При этом роль предыонизации выполнял сетчатый катод, т.е. неоднородности сетки стабилизировали разряд. Такая стабилизация разряда наблюдается лишь с квазистационарным режимом накачки [4, 7] в двухконтурных схемах. Аналогичные результаты были получены нами с плазменной [5] и коронной предыонизацией [7].

На основании проведенных исследований нами были разработаны малогабаритные ТЕ– и ТЕА–лазеры с изменяющейся апертурой излучения с автоматической искровой [4], плазменной [5, 6] или коронной предыонизацией через сетчатый катод в двухконтурных схемах накачки. Отметим, что получение устойчивого объемного разряда в N_2 зависело: 1) от режима ввода энергии в газ; 2) от рабочей поверхности электродов; 3) от типа и интенсивности источника УФ–предыонизации.

Основные работы и максимальные параметры излучения по азотным лазерам с различными источниками УФ-предыонизации

№ п/п	Генератор накачки	Тип УФ-пред.	$P(N_2)$, Torr	V , л	Q , мДж	$\frac{Q_{уд.}}{Дж}$ (л·атм)	$\tau_{h/2}$, нс	η , %	Год	Литература
1	2 Бл-н		30 He	0,03	3	2	2,5	—	1972	[25]
2	Бл-н		100 He	—	—	—	4	—	1974	[26]
3	Бл-н		100	0,05	14	2,4	7	0,1	1974	[27]
4	2 Бл-н		180 SF ₆	0,04	18 20	2 2,5	8,5 6	— —	1974	[28]
5	Бл-н		380 760	—	0,9 0,7	— —	1,4 0,9	0,03 0,02	1975	[29]
6	—”—	—”—	1140	0,004	1	0,16	1	—	1976	[30]
7	2 Бл-н (С)		320 He	0,003	0,13 0,15	1,25 0,2	5 2	— —	1976	[3]*
8**	$C_H - C_{об} - C_{УФ}$		150 He He:NF ₃	0,12 $D \times H =$ 1,7 × 2	1,2 4,5 10	0,05 0,04 0,09	9	0,01 0,02 0,05	1979	[20]
9	2 $C_H - C_{п.об}$		30 SF ₆	—	18 30	— —	14 19	— —	1980	[21]
10**	$C_H - C_{об}$		60 He:NF ₃	0,5 2,5 × 3,5	20 25	0,04 0,05	4 10	— —	1982	[22]
11	$C_H - C_{об}$		60	0,03	1	0,3	7	—	1984	[31]
12	2 $C_H - C_{п.об}$		760 He	—	0,04	—	—	0,07	1985	[32]
13	$C_H - C_{об}$		150 He:SF ₆	0,1	6,1 7,7	0,3 0,08	5 4,7	— 0,04	1986	[33]
14	$C_H - C_{об}$		110 He	0,006	2	0,25	9	0,07	1986	[34]
15	—”—		55	0,025	2,3	0,9	7	0,07	1987	[23]
16**	—”—		100 CO ₂	0,46 2,5 × 2,6	0,3 600	0,004 8,6	5 12 мкс	— —	1988	[35]
17	—”—		114	0,18	10	0,4	5	0,04	1989	[4]*
18	2 Бл-н (С)		70	0,08	10	1,25	6	—	1990	[36]
19**	$C_H - C_{об}$		100	0,008 0,6 × 0,7	0,5	0,4	5	0,01	1990	[5]*
20	—”—		150	0,009	0,3	0,15	5	0,06	1991	[6]*
21**	—”—		120	0,006 0,4 × 0,7	0,13	0,13	5	0,03	1995	[7]*

**Работы, в которых апертура излучения соответствовала условию $H \geq D$.

В табл. 3 приведены максимальные параметры излучения для ТЕ-, ТЕА- и ТЕАН-лазеров, полученные различными

авторами. Независимо от области рабочих давлений выделены наиболее высокие параметры излучения. Для сравнения эффек-

тивности типов возбуждения приведено усредненное зарядное напряжение ($U_{0, \text{cp}}$) для данных работ. Максимальные параметры в

основном наблюдались для ТЕ–лазеров, работающих при оптимальных давлениях 0,05–0,15 атм. Так, при «идеальном»

Таблица 3

Основные работы и максимальные параметры излучения по азотным ТЕ–, ТЕА– и ТЕАН–лазерам

Режим	Тип возбуждения	$P_{\text{опт}}$, атм	$U_{0, \text{cp}}$, кВ	W , МВт	Q , мДж	$\frac{Q_{\text{уд}}}{\text{Дж}}$ (л·атм)	$\tau_{h/2}$, нс	η , %
I	ТЕ	0,05–0,15	6–10	9 [13]	20 [10]	19 [15]	1,2–19 [17, 21]	1–3 [13, 15]
II	ТЕА	0,05–0,2 He:N ₂ (SF ₆)	15	5 [21]	30 [21]	0,16 [30]	2–10 [3*, 21]	0,07 [34]
III	ТЕАН	1–2,5	12	0,6 [29]	0,6 [29]	1 [37]	0,5–2 [38, 39]	0,18 [40]

согласовании системы накачки и активного объема (минимальные потери запасаемой энергии на элементах схемы) для генератора Блюмляйн $\eta = 1\%$, а для двухконтурной схемы накачки $\eta = 3\%$. Кроме того, были получены самые длинные импульсы генерации $\tau_{h/2} = 19$ нс для N₂–лазера. Однако максимальная энергия излучения 30 мДж характерна для ТЕА–лазера с добавками He:SF₆. Основное преимущество ТЕАН–лазеров заключалось в том, что они позволяли создавать сверхминиатюрные приборы, обеспечивающие наиболее короткие импульсы генерации $\tau_{h/2} = 0,5$ нс.

Как с практической, так и с научной точки зрения для N₂–лазеров очень важным является сравнение удельных параметров излучения для поперечного и продольного разрядов возбуждения.

Авторы работы [45], используя секционный продольный разряд с УФ–предыонизацией, показали высокую однородность лазерного излучения при относительно низких зарядных напряжениях ~20 кВ. Тем самым открыли возможность создания миниатюрных простых и дешевых лазеров с малой

расходимостью излучения. Для сравнения в одной из ранних работ [41] при активной длине продольного разряда 22 см без источника предыонизации для накачки требовалось рабочее напряжение 100 кВ при давлении N₂ 10 Торр. Нами была разработана серия миниатюрных лазеров с продольным разрядом и искровой предыонизацией при зарядных напряжениях 6–12 кВ [8, 48]. Были исследованы выходные параметры излучения в зависимости от элементов схемы накачки и вкладываемой энергии в газ.

В табл. 4 приведены основные работы по миниатюрным N₂–лазерам с максимальными удельными параметрами излучения с поперечным и продольным возбуждением. Для сравнения даны работы с продольным разрядом без источника предыонизации. В этом случае среднее значение зарядного напряжения равнялось 50 кВ, что более чем в 4 раза выше, чем с УФ–предыонизацией. Мгновенная мощность излучения для систем с УФ–предыонизацией практически одинакова. Максимальная удельная мощность излучения достигла 2,5 МВт·л⁻¹·атм⁻¹ для ТЕАН–лазеров. Отметим, что для продоль-

Таблица 4

Основные работы и максимальные параметры излучения миниатюрных азотных лазеров с продольным и поперечным возбуждением

Режим	Тип возбуждения	$P_{\text{опт}}$, Торр	$U_{0, \text{cp}}$, кВ	W , МВт	$\frac{W_{\text{уд}}}{\text{МВт}}$ (л·атм)	Q , мДж	$\frac{Q_{\text{уд}}}{\text{Дж}}$ (л·атм)	$\tau_{h/2}$, нс	η , %
I	Продольный	10	50	0,02 [41]	0,18 [43]	0,1 [44]	10 [44]	5 [41]	–
	Продольный с УФ–предыонизацией	30–60	12	0,16 [42]	0,02 [45]	1,3 [42]	2 [42]	2,5–8 [8*, 42]	0,01 [8*, 45]
II	ТЕА	30–110	12	0,33 [23]	0,08 [3*]	2,3 [23]	15 [3*]	2,5–10 [34, 43]	0,1 [3*]
	ТЕАН	760	12	0,1 [46]	2,5 [46]	0,2 [37]	1,25 [46]	0,5–2 [47, 3*]	0,18 [40]

ного и ТЕА–разрядов наблюдалась максимальная энергия излучения на уровне миллиджоулей, т.е. их эффективность соизмерима. Хотя на данный момент η ТЕА– и ТЕАН–лазеров выше, чем у лазеров с накачкой продольным разрядом. Этот факт говорит, видимо, о больших потенциальных возможностях N_2 –лазеров с продольным разрядом.

Таким образом, в процессе исследований N_2 –лазеров, возбуждаемых самостоятельным поперечным или продольным разрядом с различными источниками УФ–предыонизации в области давлений от 10 Торр до нескольких атмосфер, и анализа работ других ученых нами были получены следующие результаты:

1. Впервые была показана высокая эффективность применения генераторов Блюмляйн на основе керамических конденсаторов для ТЕ–, ТЕА–, ТЕАН–лазеров.

2. Впервые была применена и исследована автоматическая коронная предыонизация на электродах для ТЕА– и ТЕАН–лазеров до 20 атм с He, а также коронная предыонизация в сочетании с сетчатым электродом и двухконтурной схемой накачки, обеспечивающей апертуру излучения $H > D$ для ТЕА–лазера.

3. Впервые была получена генерация на азоте с плазменными электродами для двух режимов накачки. При давлениях $\leq 0,4$ атм осуществлялась обычная пространственная накачка с апертурой излучения $H \geq D$. А при давлениях $> 0,4$ атм в виде двух параллельных полос накачка обеспечивалась двумя скользящими поверхностными разрядами.

4. Показано, что максимальные удельные параметры излучения связаны с режимом ввода энергии в разряд, источником предыонизации и рабочей поверхностью электродов.

5. Оптимальная и наиболее надежная схема накачки N_2 –лазера – это двухконтурная схема накачки с автоматической стабилизированной коронной предыонизацией.

6. Показано, что миниатюрные N_2 –лазеры с продольным разрядом и УФ–предыонизацией способны конкурировать с ТЕА–лазерами.

1. Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Федоров А.И. // Квантовая электроника. 1973. № 3(15). С. 103–105.
2. Тарасенко В.Ф., Федоров А.И., Бычков Ю.И. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 5. С. 1226–1227.
3. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 213–214.
4. Федоров А.И., Тихомиров С.И., Жунусов Б.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 1003–1005.
5. Зикрин Б.О., Кузьмин Г.П., Тихомиров С.И., Федоров А.И. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Оптика лазеров». Л., 1990. С. 414.
6. Федоров А.И. // Тез. докл. IX Всесоюз. семинара «Лазеры на парах металлов и их применение». Ростов-на-Дону, 1991. С. 6.
7. Федоров А.И. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 11. С. 1664–1668.
8. Федоров А.И. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 163–165.
9. Leonard D.A. // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 7. P. 4–6.
10. Geller M., Altman D.E., Detemple T.A. // Appl. Optics. 1968. V. 7. № 11. P. 2232–2237.
11. Gerry E.T. // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 7. P. 6–8.
12. Targ R. // IEEE J. of QE. 1972. V. QE–8. P. 726–728.
13. Godard B. // IEEE J. of QE. 1974. V. QE–10. № 2. P. 147–153.
14. Бычков Ю.И., Мельченко С.В., Месяц Г.А., Суслев А.И., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И., Ястремский А.Г. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 12. С. 2423–2431.
15. Oliveira dos Santos B., Fellows C.E., de Oliveira J.B. et al. // Appl. Phys. B. 1986. V. 41. P. 241–244.
16. Shipman J.D. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10. P. 3–4.
17. Woodward B.W., Ehlers V.J. // Rev. Sci. Instrum. 1973. V. 44. № 7. P. 882–887.
18. Wang C.P. // Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. № 1. P. 92–95.
19. Сидоров Ю.Л., Суханов А.Н. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 3. С. 580–589.
20. Rothem A., Rosenwaks S. // Opt. Commun. 1979. V. 30. № 2. P. 227–230.
21. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 23. P. 341–344.
22. Armandillo E. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. № 7. P. 611–613.
23. Stankov K.A., Kurtev S.Z., Mibev I.Y. // Opt. Commun. 1987. V. 62. № 1. P. 32–34.
24. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 253 с.
25. Basting D., Schäfer P.F., and Steyer B. // Opto-Electronics. 1972. V. 4. P. 43–49.
26. Hasson V., Preussler D., Klimek J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. № 11. P. 654–656.
27. Ищенко В.Н., Луцицин В.Н., Старинский В.Н. // ОМП. 1974. № 3. С. 32–34.
28. Levatter J.I., Lin Shao-Chi. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. № 12. P. 703–705.
29. Von Bergmann H.M., Hasson V., Preussler D. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 27. P. 553.

30. Hasson V., Von Bergmann H.M., Preussler D. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. № 1. P. 17–18.
31. Bojara A., Gawlik W., Grabski R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1984. V. 55. № 2. P. 166–168.
32. Stankov K., Kurtev S. // Opt. Commun. 1985. V. 56. № 1. P. 36–38.
33. Efthimiopoulos T., Bacharides Ch. // Optical Engineering. 1986. V. 25. № 9. P. 1055–1057.
34. Rickwood K.R., Serafetinides A.A., Papadopoulos A.D. et al. Electro-Opt. and Laser. UK Conf. Proc. Brighton. 1986.
35. Брынзалов П.П., Зикрин Б.О., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 22. С. 2033–2036.
36. Serbezov V., Atanasov P.A. // Meas. Sci. Technol. 1990. V. 1. P. 601–604. (Printed in the UK).
37. Von Bergmann H.M., Penderis A.J. // J. Phys. E. 1977. V. 10. P. 602–604.
38. Knyazev I.M., Letakhov V.S., Movsev V.G. // Optics Commun. 1972. V. 6. P. 250–252.
39. Houtman H., Meyer J. // Rev. Sci. Instrum. 1983. V. 54. № 12. P. 1629–1630.
40. Iwasaki C., Jitsung T. // IEEE J. QE. QE–18. 1982. P. 423–427.
41. Тарасенко В.Ф., Курбатов Ю.А. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 182–183.
42. Furuhashi H., Shimizu M., Goto T. // Meas. Sci. Technol. 1990. V. 1. P. 401–405. (Printed in the UK).
43. Brito Crus C.H., Loureiro V., Tavares A.D. et al. // Appl. Phys. B. 1984. V. 35. P. 131–133.
44. Горлов А.И., Кюн В.В., Скоз В.С. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 9. С. 1781–1784.
45. Furuhashi H., Goto T. // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59. № 12. P. 2552–2556.
46. Hasson V., Von Bergmann H.M. // Rev. Sci. Instrum. 1979. V. 50. № 1. P. 59–63.
47. Von Bergmann H.M. // J. Phys. E. 1977. V. 10. P. 1210–1212.
48. Федоров А.И. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 1. С. 96–101.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
9 октября 1997 г.

A.I. Fedorov. New Prospects of N₂–Minilaser of Development.

This paper presents the generalized results of experimental investigations in creating the small–size N₂–minilasers with transverse and longitudinal discharges of excitation of low (TE), atmospheric (TEA), and high (TEAH) pressure all without an optional source of UV preionization and with such sources as corona, spark, or plasma discharges [1–8]. Besides, the basic investigations were analyzed, which are given in Tables 1–4. We took into account only those papers where the new elements of laser systems were used or only one maximum radiation parameters of a given excitation mode was obtained.