

УДК 621.378.324

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ ДОБАВОК НА ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АЗОТНОГО ЛАЗЕРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

И. В. Логин, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9809-6271, e-mail: login.ilya@bk.ru

Р. А. Шишов, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-4412-1934, e-mail: roman.shishov2016@yandex.ru

Изучено влияние добавок гелия, неона, аргона и водорода на уровень средней мощности излучения и максимальную частоту повторения импульсов в азотном лазере низкого давления с накачкой продольным разрядом. Установлено, что введение в активный элемент азотного лазера гелия, неона, аргона и водорода с парциальным давлением 5 Торр при оптимальном давлении азота 18 Торр способствует увеличению уровня средней мощности излучения на 20÷30 % и не оказывает влияния на максимальную частоту повторения импульсов. Добавление к чистому азоту неона или аргона не приводит к заметным изменениям средней мощности излучения и максимальной частоты повторения импульсов. В активном элементе из бериллиевой керамики длиной 300 мм и диаметром 4 мм достигнуты максимальные значения средней мощности излучения до 115 мВт в чистом азоте ($P_{N_2} = 18$ Торр), 120 мВт при использовании азота с добавкой водорода в соотношении $P_{N_2} : P_{H_2} = 18 : 5$ Торр и 140 мВт при использовании азота с добавкой гелия в соотношении $P_{N_2} : P_{He} = 18 : 5$ Торр на максимальных частотах повторения импульсов 500 – 600 Гц.

Ключевые слова: азотный лазер низкого давления; средняя мощность излучения; энергия излучения в импульсе; длительность импульса излучения; продольный разряд; метастабильные состояния; частота повторения импульсов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-171-180

Введение

Азотные лазеры низкого давления наиболее востребованы в таких областях, как прецизионная обработка тонких пленок в микро- и нанoeлектронике, УФ – фотолитография, иницирование химических реакций, накачка лазеров на красителях, люминесцентный анализ, биологические исследования, медицина [1 – 4]. Спектр этих применений связан с тем, что азотные лазеры низкого давления работают в отпаянном режиме и обеспечивают формирование импульсов излучения с импульсной мощностью в несколько десятков киловатт при длительности импульсов на полувысоте от трех до десяти наносекунд. Промышленные образцы азотных лазеров типа ЛГИ-505 и ЛГИ-511 обеспечивают генерацию излучения на длине волны 337,1 нм со средней мощностью излучения до 120 и 240 мВт на частотах повторения импульсов до 1 кГц [5].

Расширение областей применения и увеличение производительности действующего лазерного технологического оборудования неизбежно связаны с увеличением средней мощности излучения и частоты повторения импульсов.

Задача увеличения средней мощности излучения без изменения геометрических размеров активного элемента может быть решена или путем увеличения энергии излучения в импульсе, или увеличением частоты повторения импульсов. В свою очередь, энергия излучения в импульсе может быть увеличена оптимизацией условий накачки или применением некоторых газовых добавок, например аргона, способствующего увеличению инверсной населенности в результате селективного возбуждения верхних лазерных уровней азота посредством ударов второго рода [3, 6].

Максимальная частота повторения импульсов в азотных лазерах низкого давления с накачкой продольным разрядом определяется скоростью гетерогенной дезактивации метастабильных нижних состояний молекулярного азота на поверхности разрядного канала [2, 3, 7, 8]. Возбужденные молекулы азота из центральных областей разрядного канала достигают его стенок в результате диффузии. Скорость такой реакции может быть увеличена добавками к рабочему газу (молекулярный азот) некоторых легких инертных газов или молекулярного водорода, способствующих увеличению коэффициента диффузии.

Цель настоящей работы – получение количественной информации о степени влияния добавок легких газов (гелий, неон, аргон или водород) на максимальную частоту повторения импульсов и уровень средней мощности излучения азотного лазера низкого давления с накачкой продольным разрядом.

Экспериментальная часть Экспериментальная установка

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. В её состав входят активный элемент лазера с резонатором (АЭ), импульсный генератор накачки (ИГН), фотоприёмник (ФП) (калориметр (ИМО-2Н) или скоростной вакуумный фотоэлемент ФЭК-15), форвакуумный насос (ФВН), пять баллонов с рабочими газами (азот, гелий, неон, аргон и водород), система вакуумных кранов (K_1 – K_7) и вакуумметр (ВМ) (деформационно-газоразрядный ВДГ-1). При проведении исследований применяется активный элемент промышленного лазера ЛГИ-505, который был напаян на откачной пост. В таком варианте он мог быть откачан и наполнен исследуемыми газами до необходимого давления с заданными парциальными давлениями. Активный элемент этого лазера представляет собой разрядный канал из бериллиевой керамики ($L = 300$ мм, $\varnothing = 4$ мм), охваченный рубашкой водяного охлаждения из стекла, через которую протекает проточная вода.

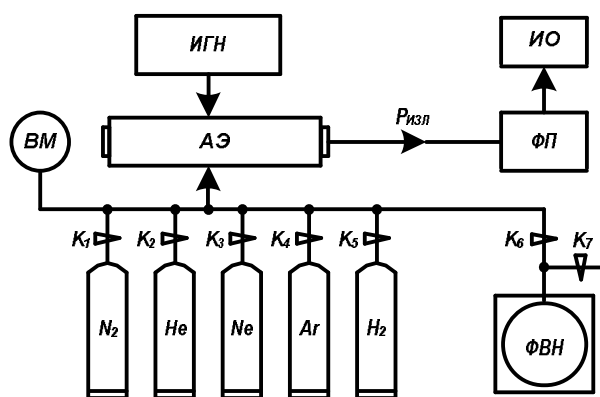


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки
Figure 1 – Block diagram of the experimental setup

Резонатор лазера длиной 760 мм был образован сферическим зеркалом из алюминия радиусом кривизны $R = 5$ м и плоской пластинкой из кварца.

Откачка активного элемента до остаточного давления $P \approx 10^{-2}$ Торр осуществлялась форвакуумным насосом НВР-5DM. Контроль парциальных давлений осуществлялся с помощью деформационно-газоразрядного вакуумметра (ВМ) марки ВДГ-1. Для измерений формы импульсов лазерного излучения применялся вакуумный фотоэлемент ФЭК-15 (ФП). Сигнал с него фиксировался на импульсном осциллографе (ИО) Agilent Technologies DS3202A ($\Delta f = 200$ MHz).

Импульсный генератор накачки был построен по схеме импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 5$. Генератор обеспечивал формирование возбуждающих импульсов амплитудой до 100 кВ с временем нарастания менее 100 наносекунд. В качестве коммутатора применялся импульсный водородный тиратрон ТГИ1–1000/25. Накопительный

конденсатор генератора накачки имел емкость 5 нФ. Напряжения заряда накопительного конденсатора могли плавно изменяться в пределах от 10 до 20 кВ. Обостряющие низкоиндуктивные конденсаторы генератора накачки общей емкостью 100 пФ устанавливались вдоль разрядного канала в непосредственной близости к нему. Такая компоновка основной цепи накачки обеспечивала минимальную длительность тока накачки и наибольшую эффективность накачки.

Измерения тока накачки и напряжения на разрядном промежутке осуществлялись с помощью широкополосного трансформатора Андерсона и резистивного делителя напряжения с наносекундным разрешением [9, 10].

Результаты измерений

На рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости средней мощности излучения лазера при его наполнении азотом от частоты повторения импульсов для нескольких значений давления азота. Как видно из приведенных зависимостей, изменения давления азота в пределах 14 – 22 Торр приводят к изменениям максимального уровня средней мощности излучения в пределах 90 – 115 мВт. При этом оптимальным является давление азота $P_{N_2} = 18$ Торр. Значения «максимальной» частоты повторения импульсов, при которой достигается максимальный уровень средней мощности лазерного излучения, от давления азота зависят очень слабо (500 – 550 Гц).

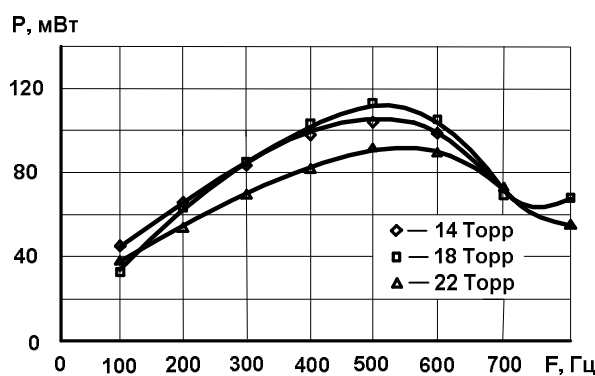


Рисунок 2 – Зависимости средней мощности лазерного излучения от частоты повторения импульсов для трех значений давления азота
Figure 2 – Dependences of the average laser power on the pulse repetition rate for three values of the nitrogen pressure

Для каждой зависимости характерны три участка. На первом участке ($F_{\text{повт}} = 100 - 400$ Гц) средняя мощность излучения увеличивается почти линейно с ростом частоты повторения импульсов. На втором – нарастание замедляется, достигается максимум мощности излучения ($F_{\text{повт}} = 450 - 550$ Гц), после которого мощность излучения резко падает (третий участок).

На частотах повторения импульсов, на которых достигаются максимальные значения мощности излучения, энергия излучения в импульсе уменьшается обратно пропорционально частоте повторения импульсов. На спаде каждой зависимости величина энергии излучения уменьшается еще быстрее, чем обратная зависимость от частоты повторения импульсов.

На рисунке 3 приведены зависимости энергии лазерного излучения в импульсе от частоты повторения импульсов для условий, которые соответствуют зависимостям, представленным на рисунке 2. Приведенные зависимости указывают на монотонный спад энергии излучения в импульсе. При этом скорость спада увеличивается после достижения частот повторения импульсов в 600 Гц. Максимальные значения энергии излучения в импульсе $W_{\text{изл}} \approx 0,43$ мДж соответствуют давлениям азота 18 и 22 Торр и достигаются на минимальной частоте повторения импульсов $F_{\text{повт}} = 100$ Гц. На максимальных частотах повторения импульсов ($F_{\text{мах}} = 700 - 800$ Гц) энергия излучения в импульсе уменьшается более чем на порядок.

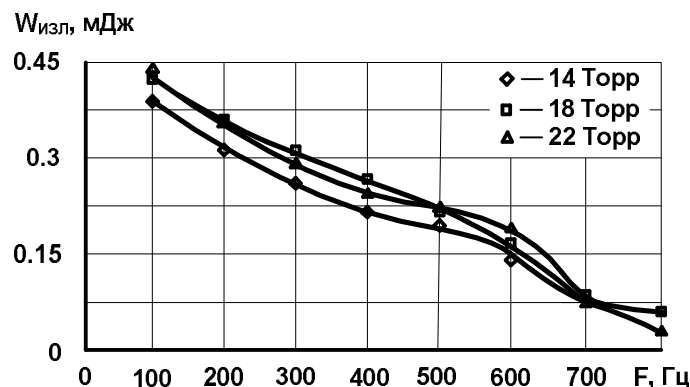


Рисунок 3 – Зависимости энергии лазерного излучения в импульсе от частоты повторения импульсов

Figure 3 – Dependences of the laser radiation energy in a pulse on the pulse repetition rate

Типичная осциллограмма импульса лазерного излучения для данных условий приведена на рисунке 4. Как видно из осциллограммы, длительность импульса лазерного излучения на полувысоте составляет $\tau = 8$ нс. Значение длительности импульса излучения с изменениями частоты повторения почти не изменяется. Для максимального значения энергии излучения в импульсе $W_{\text{изл}} \approx 0,43$ мДж это соответствует импульсной мощности $P_{\text{имп}} \approx 54$ кВт. На частоте повторения импульсов 500 Гц импульсная мощность уменьшается до $\approx 24 - 30$ кВт.

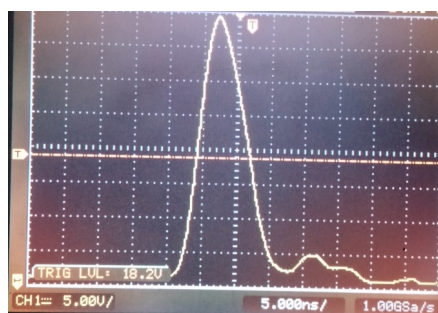


Рисунок 4 – Осциллограмма импульса лазерного излучения. Развертка – 5 нс/дел

Figure 4 – Oscillogram of a laser pulse. Sweep – 5 ns/div

На рисунке 5 приведены зависимости максимальной средней мощности излучения лазера от парциального давления гелия, который добавлялся в активную среду лазера при давлениях азота 14, 18 и 22 Торр. Полученные зависимости указывают на наличие оптимальных парциальных давлений азота и гелия, при которых мощность излучения лазера достигает максимальных значений. Так, для парциального давления азота в активном элементе 14 Торр оптимальным парциальным давлением добавки гелия является 1 – 3 Торр. При этих соотношениях парциальных давлений достигается максимальный уровень средней мощности лазерного излучения в 100 мВт на частоте повторения импульсов 500 Гц.

Для парциального давления азота $P_{N_2} = 18$ Торр оптимальными являются парциальные давления гелия на уровне 4 – 5 Торр. При этих соотношениях между компонентами смеси достигается максимальный уровень средней мощности лазерного излучения в 140 мВт.

При увеличении парциального давления азота в активном элементе до 22 Торр оптимальные парциальные давления гелия находятся в пределах от 2,5 до 3,5 Торр. Максимальная средняя мощность в этом случае достигает значения в 125 мВт.

Все приведенные зависимости получены при работе лазера на частоте повторения $F_{\text{повт}} = 500$ Гц.

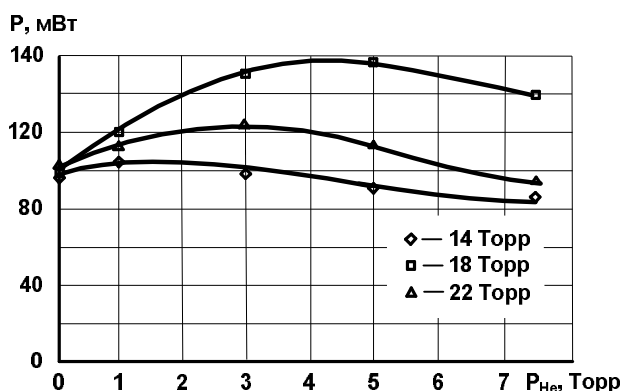


Рисунок 5 – Зависимости максимальной средней мощности излучения лазера от парциального давления гелия в смеси с азотом

Парциальные давления азота отражены под графиками

Figure 5 – Dependences of the maximum average laser radiation power on the partial pressure of helium in a mixture with nitrogen. Nitrogen partial pressures are shown below the graphs

Введение в рабочую смесь молекулярного водорода в количестве от 1 до 10 Торр показало, что оптимальным является парциальное давление водорода в ≈ 5 Торр. При этом наиболее заметное увеличение средней мощности излучения характерно для парциального давления азота $P_{\text{N}_2} = 14$ Торр. В этом случае достигается максимальная средняя мощность излучения $P_{\text{изл}} = 125$ мВт при напряжении заряда накопительного конденсатора $U_{\text{зар}} = 12$ кВ. Для парциальных давлений азота 18 и 22 Торр максимальный уровень средней мощности излучения не превышает 100 мВт. Оптимальное значение частоты повторения импульсов для смесей $\text{N}_2 + \text{H}_2$ находится в пределах 500 – 600 Гц.

На рисунке 6 приведены сравнительные зависимости средней мощности излучения от парциальных давлений добавок к азоту гелия и водорода. Сравнение зависимостей средней мощности излучения при использовании смесей $\text{N}_2 + \text{He} = 18 + 5$ (Торр) и $\text{N}_2 + \text{H}_2 = 18 + 5$ (Торр) показывает, что добавки гелия обеспечивают достижение более высоких значений мощности лазерного излучения по сравнению с добавками водорода.

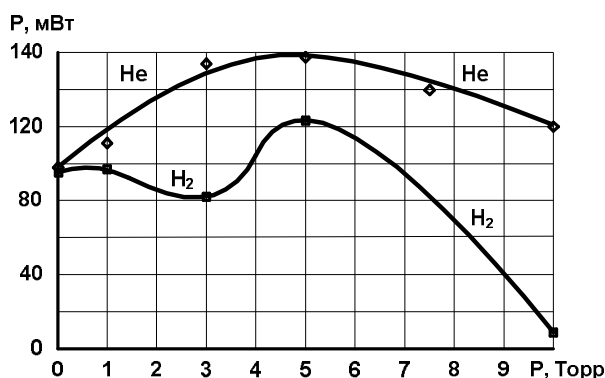


Рисунок 6 – Зависимости максимальной средней мощности излучения лазера от парциальных давлений гелия и водорода в смеси с азотом

Figure 6 – Dependences of the maximum average laser radiation power on the partial pressures of helium and hydrogen in a mixture with nitrogen

Введение в активную среду азотного лазера неона и аргона с парциальными давлениями 1 – 10 Торр не оказало заметного влияния ни на уровень средней мощности лазерного излучения, ни на максимальное значение частоты повторения импульсов.

Осциллографирование импульсов напряжения на разрядной трубке и токов накачки показало, что при использовании чистого азота величина напряжения пробоя в зависимости от давления находится в пределах 50 – 60 кВ, а время спада напряжения на трубке составляет ≈ 40 нс. Величина тока разряда достигает 800 А при длительности на полувысоте $\tau \leq 25$ нс.

Введение в разрядную трубку дополнительно к азоту гелия или водорода приводит к увеличению напряжения пробоя и сокращению времени спада напряжения до 30 нс. Амплитуда тока разряда (тока накачки) в этих условиях увеличивается в 1,5 – 1,8 раза по сравнению с токами разряда в чистом азоте. Длительность тока разряда при этом остается на уровне 22 – 25 нс. При применении в качестве добавки к азоту молекулярного водорода имеет место такая же тенденция в изменениях параметров напряжения на трубке и тока накачки, а именно – увеличение напряжения пробоя и тока разряда. При этом напряжение пробоя в смеси $N_2 + H_2$ превышает значение напряжения пробоя в смеси $N_2 + He$, а величина тока увеличивается в 1,4 – 1,5 раза.

Обсуждение результатов измерений

Полученные результаты измерений показывают, что введение в активный элемент азотного лазера низкого давления таких газовых добавок как гелий, неон, аргон или водород по-разному влияют на уровень средней мощности излучения и частоту повторения импульсов, на которой достигается наиболее высокий уровень средней мощности излучения. Как было установлено, неон не оказывает заметного влияния на энергетические параметры импульсов излучения. Добавки аргона приводят к некоторому снижению и энергии лазерного излучения в импульсе, и частоты повторения импульсов.

Добавки молекулярного водорода или гелия к азоту способствуют увеличению энергии излучения в импульсе и уровня средней мощности на 20 – 30 % по сравнению с аналогичными параметрами излучения при использовании в качестве активной среды только молекулярного азота. При этом значения максимальных частот повторения импульсов остаются в пределах 500 – 600 Гц.

Полученные в результате осциллографирования данные о макропараметрах плазмы разряда накачки указывают на то, что при введении в разрядную трубку с азотом легких газовых компонент (He или H_2) в плазме газового разряда увеличивается концентрация свободных электронов при незначительно изменившейся температуре. В таких условиях увеличивается скорость возбуждения молекул азота и, как следствие, происходит увеличение энергии излучения в импульсе.

Максимальное значение частоты повторения импульсов определяется характерным временем диффузии молекул азота, находящихся в метастабильных состояниях, к стенкам разрядного канала, где и происходит их дезактивация [2, 7, 8].

Характерное время, в течение которого молекулы азота из центральной части разрядного канала достигнут его стенок, определяется временем диффузии и может быть оценено с помощью соотношения [11, 12]:

$$\tau = r^2/4D, \quad (1)$$

где τ – характерное время диффузии молекул; r – радиус разрядного канала; D – коэффициент диффузии молекул азота.

Коэффициент диффузии является функцией давления и температуры [11, 12]. С увеличением давления его значение уменьшается, а с увеличением температуры – увеличивается. В таблице приведены значения коэффициентов диффузии для оптимального рабочего давления азота в разрядной камере $P = 18$ Торр и для газовых смесей $N_2 + \langle X \rangle$, где $\langle X \rangle$ – парциальные давления газовых добавок. Значения коэффициентов диффузии вычислялись по соотношениям, приведенным в [12]. В таблице приведены также соответствующие вычисленные и экспериментальные значения частот повторения импульсов, в паузе между которыми молекулы азота достигают стенок разрядного канала и дезактивируются. Максимальные значения этих частот повторения определялись как обратная величина характерному времени диффузии:

$$F_{MAX} = 1/\tau = 4D/\tau. \quad (2)$$

Расчетные и экспериментальные значения максимальных частот повторения импульсов для применявшихся газов и их смесей

Calculated and experimental values of the maximum pulse repetition rates for the gases used and their mixtures

Индивидуальные газы P = 18 Торр	N₂	He	Ne	Ar	H₂
D_{инд}, см²/с	7,18	68,4	19,08	6,59	54,04
τ, мс	1,4	1,4	0,52	1,5	0,18
F_{max(расч)}, Гц	719	7100	1900	666	5500
Газовые смеси P_{N₂} + P_x = 18 + 5 Торр		N₂ + He	N₂ + Ne	N₂ + Ar	N₂ + H₂
D_Σ, см²/с		64,76	18,44	6,7	51,28
τ, мс		0,15	0,54	1,4	1,9
F_{max(расч)}, Гц		6660	1850	670	5260
F_{max(эксп)}, Гц	500	500	550	400	600

Расчетные данные, приведенные в таблице, показывают, что характерные времена диффузии при использовании смесей с легкими инертными газами и водородом обеспечивают несколько меньшие значения времен диффузии по сравнению с временем диффузии в чистом азоте. Значения частот повторения импульсов также мало отличаются от соответствующих значений частот повторения при зажигании разряда накачки в приведенных индивидуальных газах.

Экспериментальные значения частот повторения импульсов $F_{\text{MAX}} = 500 - 600$ Гц для чистого азота и его смесей с водородом и гелием намного меньше, чем вычисленные значения $F_{\text{MAX}} \approx 5260 - 6660$ Гц. Приведенные в таблице вычисленные значения частот повторения импульсов не соответствуют полученным экспериментально и не могут быть использованы для адекватного описания наблюдаемых параметров излучения азотного лазера.

В этих обстоятельствах необходимо расширить круг рассматриваемых процессов, влияющих на параметры излучения. К одному из таких факторов, влияющих на параметры излучения, следует отнести связь распределения мощности излучения по сечению пучка с условиями накачки [13, 14]. Было установлено, что при работе лазера на частотах повторения импульсов $F \leq 500 - 800$ Гц (в зависимости от давления азота и типа генератора накачки), излучение, выходящее из резонатора лазера, имеет кольцевую структуру – центральная часть пучка окружена характерным «ореолом». При этом мощность излучения, приходящаяся на «ореол», достигает 40 % от всей мощности излучения лазера. На частотах повторения импульсов $F \geq 800$ Гц излучение концентрируется преимущественно в центральной части пучка.

Такое поведение излучения может быть обусловлено изменением структуры плазмы разряда накачки по сечению разрядного канала. Известно, что разряд низкого давления в длинных трубках первоначально начинает развиваться по стенкам разрядного канала [15, 16]. Затем разрядная плазма заполняет и центральную часть разрядного канала. В таком случае при формировании разрядов с наносекундной длительностью значительная доля мощности накачки приходится на возбуждение молекул азота именно в пристеночных областях и лазерное излучение в этих условиях формируется в виде концентрических колец с центральным пятном.

С ростом частоты повторения импульсов электрическая мощность накачки увеличивается, температура газа в центральной части разрядного канала возрастает и, как показано в [17, 18], происходит шнурование разряда, т.е. плазма разряда локализуется в центральной части разрядного канала. В этих условиях имеет место перераспределение плотности тока накачки по сечению разрядного канала в сторону его существенного увеличения именно в его центральной части. Следствием такого перераспределения тока накачки по сечению канала является уменьшение области накачки, приходящейся на пристеночные области, и возбуждение молекул азота преимущественно в центральной части разрядного канала и, как резуль-

тат, резкое снижение мощности излучения в импульсе из-за существенного уменьшения объема активной среды.

В связи с этим для увеличения средней мощности излучения и частоты повторения импульсов необходимо уменьшать давление азота в активном элементе или газовой смеси за счет добавления к азоту «легких» газов – гелия или водорода, которые приводят к увеличению коэффициента диффузии. В то же время снижение давления азота приведёт к снижению энергии излучения в импульсе, и добиться увеличения средней мощности излучения при увеличении частоты повторения импульсов будет проблематично. В этих условиях достичь увеличения частоты повторения импульсов и уровня средней мощности излучения можно только в результате применения газоразрядной трубки с меньшим диаметром.

Заключение

Полученные результаты кратко заключаются в следующем.

1. В лазере, работающем на азоте без каких-либо газовых добавок, определено оптимальное давление $P_{\text{опт}} = 18$ Торр, при котором достигается максимальный уровень средней мощности излучения $P_{\text{ср}} = 115$ мВт на частотах повторения импульсов 500 – 550 Гц.

2. Из применявшихся газовых добавок (He, Ne, Ar, H₂) к молекулярному азоту только добавки водорода и гелия приводят к увеличению мощности лазерного излучения. Это увеличение составляет 20 – 30 % от максимального значения мощности излучения лазера, работающего на чистом азоте. Оптимальные значения парциальных давлений этих добавок находятся в пределах 5 – 6 Торр.

3. Максимальные значения частот повторения импульсов 500 – 550 Гц, на которых достигается максимальная средняя мощность излучения, имеют одинаковые значения как для чистого азота, так и для его смесей с легкими газами.

4. Добавление к молекулярному азоту водорода или гелия приводит к увеличению средней мощности излучения с уровня 110 мВт (N₂) до уровня 130 мВт (N₂ + H₂) и 140 мВт (N₂ + He).

5. Обоснована гипотеза ограничения частоты повторения импульсов и уровня средней мощности излучения в азотных лазерах низкого давления с накачкой продольным разрядом, связанная с перераспределением плотности тока накачки по сечению разрядного канала.

Библиографический список

1. Вейко В. П. Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике // СПб: НИУИТМО, 2011. 141 с.
2. Кюн В. В., Самородов В. Г., Токунов Ю. М. Лазеры на молекулярном азоте // Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ Электроника, 1991. 46 с.
3. Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул / под ред. В. Ф. Тарасенко. Томск: СТТ, 2014, 440 с.
4. Khomich V. Yu., Yamschikov V. A. Foundations of electro-discharge excitation systems for CO₂, N₂ and F₂-lasers. Moscow: Fizmatlit, 2015.
5. Интернет-ресурс: www.plasmalabs.ru.
6. Козырев В. А., Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф., Тельминов А. Е. О неоднородности плотности мощности излучения в выходном пучке азотного лазера // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 8. С. 731-735.
7. Свиридов А. Н., Тропихин Ю. Д. Кинетика генерации N₂-лазера в импульсно-периодическом режиме. II. Теория // Квантовая электроника. 1978. Т.6. № 9. С. 2085-2097.
8. Свиридов А. Н., Тропихин Ю. Д. Кинетика генерации N₂-лазера в импульсно-периодическом режиме. II. Эксперимент // Квантовая электроника. 1978. Т.6. № 10. С. 2085-2097.
9. Anderson J. M. Wide Frequency Range Current Transformers. Rev. Sci. Instrum. 1971, no. 7, pp. 915-926.
10. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Энергоатомиздат, 1983, 264 с.
11. Трофимова Т. И. Физика в таблицах и формулах. М.: Дрофа, 2002. 432 с.

12. Физические величины: справочник / под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
13. Deev M. E., Kozlov B. A., Pelikov P. A., Shuvarikov Yu. S., Yastrebkov A. B. Nitrogen laser of low pressure with improved distribution radiation on the cross section of the beam // Conference Abstracts. XII International Conference AMPL-2015. Tomsk. sept. 14-18. pp. 39-40.
14. Kozlov B. A., Stepanov A. P. Pumping conditions and cross-section laser power distribution in low-pressure nitrogen laser // St. Petersburg. Russia. 4-8 June 2018. Laser optics. 18th International Conference. 68 p.
15. Недоспасов А. В., Новик А. Е. Скорость распространения фронта ионизации при пробое длинных разрядных трубок // ЖТФ. 1960. Т. XXX, вып.11, С. 1329-1336.
16. Недоспасов А. В. О некоторых явлениях при зажигании электрических разрядов в длинных трубках // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. С. 483-487.
17. Велихов Е. П., Ковалев А. С., Рахимов А. Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. 160 с.
18. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.

UDC 621.378.324

THE EFFECT OF GAS ADDITIVES ON EMISSION PARAMETERS OF LOW-PRESSURE NITROGEN LASER

B. A. Kozlov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), professor of the Electronic Devices Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

I. V. Login, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-9809-6271, e-mail: login.ilya@bk.ru

R. A. Shishov, master student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-4412-1934, e-mail: roman.shishov2016@yandex.ru

The effect of helium, neon, argon, and hydrogen additions on the average radiation power level and the maximum pulse repetition rate in a low-pressure nitrogen laser pumped by a longitudinal discharge is studied. It was found that the introduction of helium, neon, argon, and hydrogen into the active element of a nitrogen laser with a partial pressure of 5 Torr at an optimal nitrogen pressure of 18 Torr promote an increase in the average radiation power level by 20 – 30 % and does not affect the maximum pulse repetition rate. The addition of neon or argon to pure nitrogen does not lead to noticeable changes in the average radiation power and the maximum pulse repetition rate. In an active element made of beryllium ceramics 300 mm long and 4 mm in diameter, the maximum values of the average radiation power of up to 115 mW were achieved in pure nitrogen ($P_{N_2} = 18$ Torr), 120 mW when using nitrogen with the addition of hydrogen in the ratio $P_{N_2} : P_{H_2} = 18 : 5$ Torr and 140 mW when using nitrogen with the addition of helium in the ratio $P_{N_2} : P_{He} = 18 : 5$ Torr at the maximum pulse repetition rates of 500 – 600 Hz.

Key words: low pressure nitrogen laser; average radiation power; radiation energy in a pulse; the duration of the radiation pulse; longitudinal discharge; metastable states; pulse repetition rate

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-171-180

References

1. **Veiko V. P.** *Lazernye mikro- i nanotekhnologii v mikroelektronike* (Laser micro- and nanotechnologies in microelectronics). St. Petersburg: NYUITMO. 2011, 141 p. (in Russian).
2. **Kyun V. V., Samorodov V. G., Tokunov Yu. M.** *Lazery na molekulyarnom azote* (Lasers on molecular nitrogen. Reviews on electronic technology). Moscow: Central Research Institute of Electronics. 1991, 46 p. (in Russian).
3. **Edited by V. F. Tarasenko.** *Impul'snye lazery na perekhodah atomov i molekul* / pod red. V. F. Tarasenko. Tomsk: STT. 2014, 440 p. (in Russian).

4. **Khomich V. Yu., Yamschikov V. A.** *Foundations of electro-discharge excitation systems for CO₂, N₂ and F₂-lasers*. Moscow: Fizmatlit, 2015, 256 p.
5. Internet resource: www.plasmalabs.ru.
6. **Kozyrev V. A., Panchenko A. N., Tarasenko V. F., Telminov A. E.** O neodnorodnosti plotnosti moshchnosti izlucheniya v vyhodnom puchke azotnogo lazera. *Kvantovaya elektronika*. 2008, vol. 38, no. 8, pp. 731-735. (in Russian).
7. **Sviridov A. N., Tropikhin Yu. D.** Kinetika generacii N2-lazera v impul'sno-periodicheskom rezhime. II. Teoriya. *Kvantovaya elektronika*. 1978, vol. 6, no. 9, pp. 2085-2097. (in Russian).
8. **Sviridov A. N., Tropikhin Yu. D.** Kinetika generacii N2-lazera v impul'sno-periodicheskom rezhime. II. Eksperiment. *Kvantovaya elektronika*. 1978, vol.6, no. 10, pp. 2085-2097.
9. **Anderson J. M.** Wide Frequency Range Current Transformers. *Rev. Sci. Instrum.* 1971, no.7, pp. 915-926.
10. **Shvab A.** *Izmereniya na vysokom napryazhenii*. (Measurements at high voltage). Moscow: Energoatomizdat, 1983, 264 p. (in Russian).
11. **Trofimova T. I.** *Fizika v tablicah i formulah* (Physics in tables and formulas). M.: Bustard, 2002, 432 p. (in Russian).
12. **Ed. Grigorieva I. S., Meilikhova E. Z.** *Physical quantities*. Handbook. M.: Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
13. **Deev M. E., Kozlov B. A., Pelikov P. A., Shuvarikov Yu. S., Yastrebkov A. B.** Nitrogen laser of low pressure with improved distribution radiation on the cross section of the beam. *Conference Abstracts. XII International Conference AMPL-2015*. Tomsk. sept. 14-18, pp. 39-40.
14. **Kozlov B. A., Stepanov A. P.** Pumping conditions and cross-section laser power distribution in low-pressure nitrogen laser. St. Petersburg. Russia. 4-8 June 2018. *Laser optics. 18th International Conference*. 68 p.
15. **Nedospasov A. V., Novik A. E.** Skorost' rasprostraneniya fronta ionizacii pri probae dlinnyh razryadnyh trubok. *ZHTF*. 1960, vol. XXX, issue.11, pp. 1329-1336. (in Russian).
16. **Nedospasov A. V.** O nekotoryh yavleniyah pri zazhiganii elektricheskikh razryadov v dlinnyh trubkah. *TVT*. 2013, vol. 51, no. 4. pp. 483-487. (in Russian).
17. **Velikhov E. P., Kovalev A. S., Rakhimov A. T.** *Fizicheskie yavleniya v gazorazryadnoj plazme* (Physical phenomena in gas discharge plasma). Moscow: Nauka. 1987, 160 p.
18. **Raiser Yu. P.** *Fizika gazovogo razryada* (Physics of gas discharge). Dolgoprudny.: Intellect. 2009. 736 p. (in Russian).