

Эффективность азотного УФ лазера с накачкой самостоятельным разрядом

В.Ф.Тарасенко

Исследованы особенности возбуждения азотного лазера на второй положительной системе азота (электронные полосы $C^3P_u - B^3P_g$, $\lambda = 337.1$ нм). Проанализированы результаты известных работ, в которых получены наиболее высокие эффективности УФ генерации при накачке самостоятельным разрядом, и даны рекомендации по достижению высокой эффективности азотного лазера. Приведены выходные характеристики лазеров с накачкой на основе полосковых линий и керамических конденсаторов в зависимости от параметров накачки и давления газа.

Ключевые слова: азотный УФ лазер, накачка разрядом, эффективность генерации.

1. Введение

Получение индуцированного УФ излучения в молекулярном азоте (вторая положительная система, электронные полосы $C^3P_u - B^3P_g$, переход $0-0$, $\lambda = 337.1$ нм) длительное время привлекало многих исследователей [1–16]. В начале 70-х гг. азотный лазер был одним из наиболее мощных источников когерентного излучения в УФ области спектра, позволяя получать мегаваттные мощности излучения и частоты повторения в сотни герц и более. В настоящее время в связи с появлением и развитием целого класса эффективных эксимерных (эксимерных) лазеров на смесях инертных газов с галогенидами, излучающих на разных длинах волн в УФ и ВУФ областях спектра [17, 18], интерес к азотному лазеру существенно уменьшился. Тем не менее, благодаря использованию в качестве рабочей среды дешевого и неопасного газа азота, сравнительно простой конструкции и большой мощности излучения при малой длительности импульса излучения (0.5–10 нс), этот лазер продолжает находить практическое применение и привлекать внимание исследователей [19–21].

Однако в опубликованных работах до сих пор нет единой точки зрения относительно максимально достижимых КПД азотного УФ лазера, накачиваемого самостоятельным разрядом. Ранее сообщалось об эффективности излучения 6.5% [3], 3% [12], 1% [6], 0.8% [16] и 0.5% [14]. Если столь высокие КПД излучения для азотного лазера реальны, то не ясно, почему при высоком уровне развития современных технологий нет промышленных азотных лазеров с высокой эффективностью (~1%). В известных работах [9–11] отсутствует также единая интерпретация влияния добавок электроотрицательных газов на характеристики УФ генерации в азоте.

В настоящей работе исследуются особенности возбуждения электроразрядного азотного лазера на второй положительной системе азота. Так как генерация в азоте

возможна на различных переходах и при различных способах накачки, основное внимание уделено генерации на $\lambda = 337.1$ нм (наибольшие мощности излучения при накачке разрядом получены именно на этом переходе) в условиях получения высоких эффективностей лазерного излучения. Данные исследования также стимулировались работой [20], в которой ошибочно утверждалось, что параметр E_0/p ($E_0 = U_0/d$ – максимальная напряженность электрического поля на лазерном промежутке d ; p – давление азота) существенно не влияет на характеристики азотного лазера и что при максимальном напряжении на плазме в азотном лазере достигаются максимальные мощности накачки. В [20] также допущена ошибка при определении напряжения на разрядном промежутке.

2. Экспериментальные установки и методики

Эксперименты проводились на двух установках. В первой использовался источник накачки на основе разряда конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ , во второй – на основе полосковых линий из лавсановой пленки с высокой электрической прочностью и малым ϵ . На рис.1 приведены схема, моделирующая разрядный контур азотного лазера, а также поперечное сечение электродов азотного лазера и емкостного накопителя на основе керамики с минимальной индуктивностью подсоединения к электродам [2]. На рис.1, а L , C , ρ , R_p – индуктивность, емкость, сопротивление линии с распределенными параметрами и сопротивление плазмы разряда соответственно. Схемы заряд-

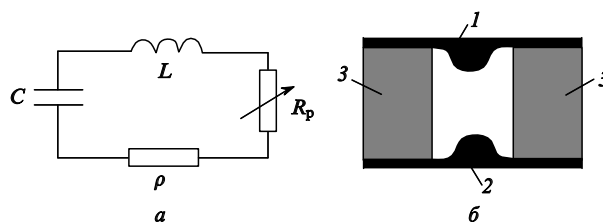


Рис.1. Схема разрядного контура, моделирующая накачку N_2 -лазера (а), и оптимальная компоновка электродов разрядного промежутка 1, 2 с керамическими конденсаторами 3 (б).

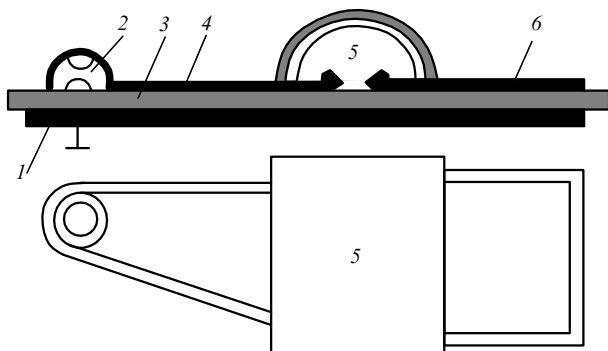


Рис.2. Конструкция азотного лазера с генератором накачки на основе полосковых линий:

1 – заземленный электрод; 2 – разрядник; 3 – лавсановая пленка; 4 – треугольный электрод; 5 – лазерная камера; 6 – прямоугольный электрод.

ки керамических конденсаторов могут быть различными (см., напр., [2, 4, 7, 15]); в настоящей работе мы применяли двухконтурную схему, где накопительный и обострительный конденсаторы были одинаковой емкости. Значительная часть индуктивности разрядного контура (рис.1,б) приходится на разрядный промежуток, и эта часть увеличивается при увеличении длины промежутка.

Схема второго варианта лазера с минимальной индуктивностью подключения емкостного накопителя к лазерной камере (использовались полосковые линии из лавсановой пленки) дана на рис.2. При накачке разрядом полосковых линий могут использоваться как 2 линии [6] (рис.2), так и 4, расположенные симметрично по две и работающие на один разрядный промежуток. Активная длина тестируемых лазеров была равна 20 см, межэлектродное расстояние изменялось от 5 до 20 мм, а ширина разряда составляла 3–10 мм. Отметим, что для возбуждения азотного лазера применение конкретной схемы накачки важно только с точки зрения формирования импульса возбуждения требуемой амплитуды, оптимальной длительности и оптимальной мощности (плотности тока разряда) для выбранных геометрии разрядного промежутка и давления азота.

Энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2Н, форма импульса излучения регистрировалась фотодиодом ФЭК-22, сигнал с которого подавался на скоростной осциллограф. Осциллограммы напряжения и тока регистрировались омическим делителем напряжения и токовым шунтом.

3. Теоретическая модель N₂-лазера

Для расчета мощности излучения азотного лазера использовались уравнения, описывающие ввод энергии в активную среду в процессе накачки, распределение ее между различными энергетическими уровнями и развитие индуцированного излучения. На рис.1,а показана схема, моделирующая процессы в разрядном контуре. При $C = \infty$, $\rho = \text{const}$ эта схема позволяет рассматривать разряд линии с распределенными параметрами и волновым сопротивлением ρ .

Теоретическая модель, созданная для этой схемы, была подробно описана нами в [7], где также приведена часть результатов, полученных при исследовании азотного лазера. Наибольший интерес представляет исследование выходных характеристик лазера при изменении па-

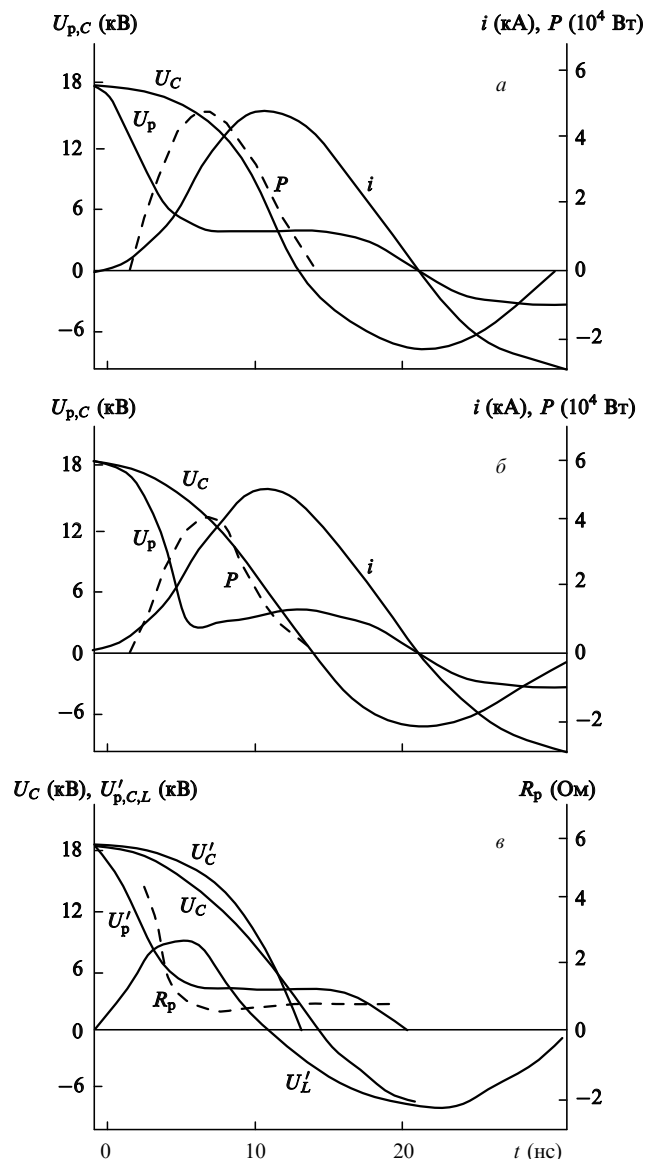


Рис.3. Импульсы напряжения на конденсаторе (U_C) и лазерном промежутке (U_p), тока i и мощности лазерного излучения P , полученные теоретически (а) и экспериментально (б), а также импульсы напряжения на конденсаторе U'_C , индуктивности подводов U'_L , лазерном промежутке U'_p и сопротивление плазмы в лазерном промежутке R_p , полученные при интегрировании и дифференцировании экспериментальных U_C и i (в) для лазера с накачкой от генератора на основе керамических конденсаторов.

раметров p , ρ и E_0/p . На рис.3,а показаны расчетные зависимости напряжения на лазерном промежутке и конденсаторе, разрядного тока и интенсивности лазерного излучения от времени. Эти зависимости полностью определяют заданный режим, а набор подобных результатов позволяет изучать основные закономерности накачки и генерации.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Характеристики разряда в азотном лазере

Азотный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах и имеет высокий квантовый коэффициент полезного действия (~16%). Однако обычно практически реализуется КПД на два и более порядков

меньше. Для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня энергия электронов должна превышать 11.7 эВ. Достижение столь высокой температуры электронов в квазистационарном режиме возможно только при использовании напряжений, давлений и межэлектродных промежутков, соответствующих левой ветви кривой Пашена. Однако давления азота при этом оказываются настолько малыми, что порог генерации в этих условиях не достигается.

При давлениях и разрядных промежутках, которые обычно используются в азотном лазере, условия разряда соответствуют правой ветви кривой Пашена с начальным напряжением, в несколько раз большим статического пробивного напряжения. Поскольку время жизни верхнего лазерного уровня при давлении азота ~ 10 Тор составляет ~ 40 нс, а время жизни нижнего равно ~ 10 мкс (очистки нижнего лазерного уровня во время генерации нет), то для накачки азотного лазера используется импульсный разряд малой длительности. Средняя энергия электронов, достаточная для эффективного возбуждения верхнего лазерного уровня, при этом реализуется только в нестационарной стадии разряда, когда спад напряжения на лазерном промежутке за счет начального напряжения в несколько раз превышает статическое пробивное напряжение [5, 8, 15]. Перенапряжение на лазерном промежутке обусловлено коротким фронтом подаваемого импульса напряжения. Реализуемый тип разряда соответствует аномальному, тлеющему разряду. На характеристики разряда могут оказывать влияние различные факторы (источник накачки, конструкция лазерной камеры и системы предыонизации, давление азота, добавки к азоту других газов и т.д.).

Мы не будем останавливаться на факторах, которые несут частный характер и затрудняют рассмотрение основных особенностей работы азотного лазера. В данной работе мы использовали лазеры с накачкой поперечным разрядом, работающие при малых частотах повторения или в режиме однократных импульсов, когда концентрация электронов (остаточная или за счет предыонизации) не оказывала существенного влияния на нарастание напряжения на разрядном промежутке. Стенки лазерных камер не имели контакта с разрядной областью и не влияли на распределение тока по сечению лазерного промежутка, что обеспечивало однородную накачку. Степень максимальной ионизации рабочего газа не превышала 10^{-3} .

На рис.3,б,в приведены осциллограммы импульсов тока и напряжения на разрядном промежутке, полученные как экспериментально, так и путем графического интегрирования и дифференцирования из осциллограмм тока и напряжения на конденсаторе. Видно, что результаты расчета по модели рис.3,а хорошо совпадают с экспериментальными осциллограммами (рис.3,б) и напряжением на плазме, полученным из осциллограммы тока. Осциллограммы напряжения на лазерном промежутке существенно отличаются от осциллограмм напряжения на емкостном накопителе. Также видно, что импульс излучения значительно короче импульса тока. Наши исследования показывают, что в исследованных лазерах с накачкой поперечным разрядом при длительности фронта импульса напряжения на лазерном промежутке более 30 нс предпробойный ток разряда и удельный энерговклад в газ до спада напряжения на промежутке весьма малы. И только после пробоя лазерного

промежутка, о чем свидетельствуют спад напряжения и заметный рост тока через промежуток, мощность накачки существенно возрастает. Авторы [20] ошибочно утверждали, что при максимальном напряжении на промежутке в условиях их эксперимента мощность накачки максимальна.

На скорость спада напряжения в азоте оказывают влияние рабочее давление и параметр E_0/p [5, 7, 8]. Сопротивления плазмы (газа), которое перед пробоем разрядного промежутка значительно превышает сопротивление источника накачки, после быстрого спада напряжения за единицы наносекунд становится в несколько раз меньше сопротивления источника накачки. При этом разница между сопротивлением источника накачки и сопротивлением плазмы в квазистационарной стадии разряда увеличивается с ростом E_0/p [5, 8]. Согласование этих сопротивлений при объемном разряде в азоте имеет место только при $E_0/p \leq 70$ В·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$, однако в этих условиях электронная температура мала и УФ генерация отсутствует.

4.2. Накачка от накопителя на основе керамических конденсаторов

Основное отличие лазеров, использующих источники накачки на основе конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью, заключается в существенном влиянии неустраняемой индуктивности L разрядного контура, состоящего из подводов между керамикой и разрядным промежутком, керамических конденсаторов и межэлектродного промежутка. В этом случае влияние данной индуктивности больше, чем при использовании полосковых линий с распределенными параметрами, и зависит от конструкции конкретного лазера. Обычно L определяет скорость нарастания тока через разрядный промежуток.

Как видно из рис.3, длительность фазы быстрого спада напряжения в 2 раза меньше длительности переднего фронта импульса тока, т. е. значительная часть энергии импульса накачки тратится напрасно, что снижает эффективность лазера. Повысить эффективность частично можно за счет уменьшения индуктивности разрядного контура L и емкости конденсатора C . Однако, как видно из рис.1,б, компоновка разрядного промежутка с конденсаторами является оптимальной и L может быть лишь незначительно уменьшено при замене конденсаторов брусками из керамики.

Второй путь сокращения импульса накачки – за счет уменьшения емкости конденсаторов – также не дает выигрыша. Это обусловлено увеличением волнового сопротивления разрядного контура и уменьшением тока разряда. При уменьшении C на 20–50 % относительно его оптимального по энергии генерации значения удается увеличить эффективность генерации, но при этом энергия излучения уменьшается.

На рис.4 приведены зависимости энергии излучения от давления для различных напряжений U_p на промежутке при $C = 4 \cdot 10^{-9}$ Ф. Видно, что увеличение напряжения ведет к увеличению оптимального давления, причем оптимальное отношение $E_0/p \sim 200$ В·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$ остается практически постоянным. Увеличение межэлектродного зазора в два раза (штриховая кривая на рис.4) приводит к уменьшению давления азота в два раза, а оптимальное значение параметра $E_0/p \sim 200$ В·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$ при этом сохраняется. Увеличение энергии и КПД генерации

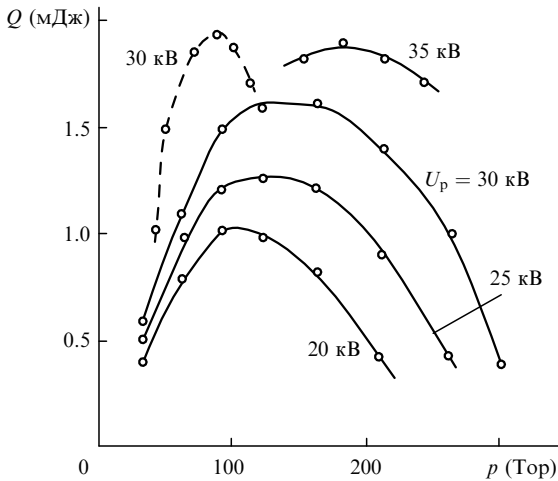


Рис.4. Зависимости энергии излучения азотного лазера от давления азота при разных напряжениях U_p на промежутке для лазера с накачкой на основе керамических конденсаторов с межэлектродным зазором 1 (сплошные кривые) и 2 см (штриховая кривая).

при $d=2$ см связано с уменьшением паразитной индуктивности разрядного контура.

Следует отметить, что при давлениях азота более 30 Тор для получения равномерного разряда необходим внешний ионизатор, в качестве которого нами использовалась УФ подсветка от искровых промежутков. На рис.5 приведены зависимости средней мощности генерации, полученные в азоте и в смеси азота с SF_6 (содержание SF_6 около 10 %). Длительность импульса излучения по полувысоте в азоте составляла 5 нс, а в смеси с SF_6 она увеличилась до 8 нс. При этом энергия излучения и КПД возросли более чем в два раза. Увеличение КПД и энергии генерации обусловлено в этих условиях замедлением скорости спада напряжения на лазерном промежутке, что увеличивает длительность стадии разряда с температурой электронов, достаточной для возбуждения верхнего лазерного уровня.

Добавки SF_6 также могут увеличивать пробивное напряжение, увеличивая энергию излучения, но этот эффект достигается только в тех лазерах, где пробой азота происходит при напряжениях на промежутке, меньших максимального. Заметим, что наибольший эффект от добавления SF_6 наблюдается на лазерах со сравнительно низким КПД при генерации в чистом азоте и при длительности фронта импульса тока, превышающей в два раза и более длительность фазы быстрого спада напряжения. Исследование систем накачки на основе конденсаторов с

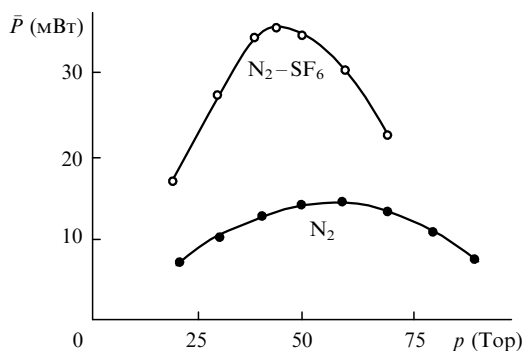


Рис.5. Зависимости средней мощности излучения от давлений азота и смеси азота с SF_6 (давление SF_6 4 Тор) при частоте повторения импульсов 15 Гц.

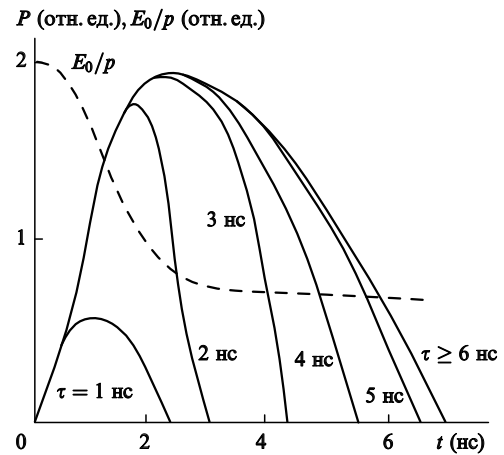


Рис.6. Расчетные импульсы излучения азотного лазера при накачке полосковой линией с волновым сопротивлением 0.5 Ом для разных длительностей импульса накачки τ , а также зависимость параметра E/p от времени (штриховая кривая).

высоким ε показало, что из-за индуктивности выводов конденсаторов реальный КПД таких установок обычно составляет $\sim 0.1\%$ и хорошо совпадает с расчетным для аналогичных условий. При уменьшении L до предельных значений, которые уже практически не реализуемы, КПД в теоретической модели мог достигать 0.4 %.

4.3. Накачка от линии с распределенными параметрами

Проиллюстрируем влияние длительности импульса накачки. На рис.6 приведены осциллограммы импульсов излучения при разных длительностях импульса накачки, а также форма импульса напряжения на разрядном промежутке, полученные в результате расчетов. Видно, что с увеличением длительности импульса накачки длительность импульса излучения вначале возрастает, а затем, начиная с $t=5$ нс, остается без изменения. Таким образом, при данном давлении азота и параметре E/p увеличение длительности импульса накачки приводит только к уменьшению КПД генерации.

На рис.7 приведены зависимости удельной энергии излучения, длительности импульса и КПД от параметра E_0/p . Длительность накачки выбиралась равной длительности импульса излучения. Видно, что при $L=0$ максимальная эффективность генерации достигается при $E_0/p \sim 150 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$. Некоторое уменьшение оптимального E_0/p по сравнению с данными в п.4.2 связано с тем, что скорость роста тока ограничивается только проводимостью газоразрядной плазмы. При накачке полосковыми линиями наиболее выгодно использовать рабочие давления ~ 100 Тор. Увеличение давления приводит к уменьшению длительности накачки и импульса излучения. Снижение p до малых значений выгодно в связи с увеличением времени накачки, однако это уменьшает удельную мощность излучения.

Сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных в условиях получения высоких КПД было проведено для азотного лазера, параметры которого показаны на рис.3. В данном лазере индуктивность подсоединения разрядного промежутка минимальна, длительность импульса накачки мала (~ 3 нс) и не превышает времени быстрого спада напряжения на промежутке. В этом лазере использовался малоиндуктивный разряд-

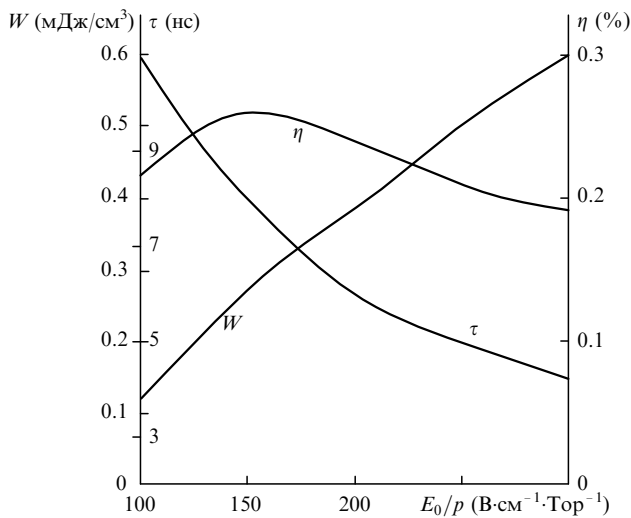


Рис. 7. Расчетные зависимости удельной энергии излучения W , длительности импульса излучения τ и КПД η азотного лазера от параметра E_0/p при накачке полосковой линией с волновым сопротивлением 0.5 Ом, давлении азота 60 Тор и паразитной индуктивности $L = 0$.

ник, заполненный азотом до давления 5.5 атм, что позволило сформировать импульс напряжения с коротким фронтом при малых потерях в разряднике. При давлении 90 Тор и межэлектродном зазоре 9 мм была получена энергия излучения ~ 1 мДж при КПД 0.2–0.27 %. Расчеты по теоретической модели дали для этих условий КПД 0.29 %. В соответствии с проведенными исследованиями для лазеров с максимальными КПД можно рекомендовать область рабочих давлений 50–150 Тор, область $E_0/p = 150 - 200 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$, длительность импульса накачки 2–4 нс, а также минимальные волновое сопротивление системы питания и паразитную индуктивность между лазерной камерой и системой питания.

Для уменьшения потерь в разряднике и получения наносекундного фронта у импульса тока также очень важен коммутируемый разрядником ток, который не должен превышать 10 кА. Соответственно активная длина лазера должна быть сравнительно малой (20–30 см) или следует использовать несколько разрядников. Кроме того, необходимо уменьшать потери на усиленное спонтанное излучение, для чего следует использовать выходной пучок с близким к квадратному сечением, причем размеры межэлектродного промежутка не должны превышать 5–10 мм, а также бегущую волну возбуждения [6] (см. рис. 2). Отметим, что при оптимальном согласовании источника накачки и лазерного промежутка по длительности импульса возбуждения при разряде в азоте добавки электроотрицательного газа к азоту не увеличивают эффективность и энергию излучения азотного лазера.

В работах [3, 6, 12, 14, 16] сообщалось о получении КПД N_2 -лазера более 0.5 %. Согласно нашим результатам, максимальный практический КПД УФ азотного лазера с накачкой самостоятельным разрядом, рассчитанный относительно энергии, запасаемой в емкостном накопителе, не может превышать ~ 0.3 %. По-видимому, в вышеуказанных работах при определении КПД были допущены ошибки. Отметим, что конструкции лазеров, описанных в [6, 14, 16], близки к оптимальным, и эффективности излучения, полученные на них, должны быть близки к предельным (~ 0.3 %).

4.4. Накачка от индуктивного накопителя энергии

Применение индуктивных накопителей энергии позволяет увеличивать мощность накачки, уменьшать влияние индуктивности разрядного контура, формировать короткие однополярные импульсы возбуждения и увеличивать время поддержания высоких значений параметра E/p во время импульса возбуждения [19, 22]. Однако при использовании современных прерывателей тока еще не удается в полной мере использовать все вышеперечисленные преимущества генераторов с индуктивным накоплением энергии для накачки УФ азотного лазера. Тем не менее, как показали наши исследования, эффективность генерации электроразрядного УФ азотного лазера по энергии, вложенной в газ во время импульса излучения, составляла 0.2 % [19], а длительность импульса излучения по основанию при накачке поперечным разрядом достигала 50 нс [22]. Увеличить длительность импульса генерации за счет продления времени поддержания в плазме высокой электронной температуры можно также при накачке СВЧ разрядом. В [13] при длительности СВЧ накачки 50 нс была получена длительность импульса генерации также 50 нс.

5. Заключение

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования показывают, что мощная и относительно эффективная генерация азотного лазера на $\lambda = 337.1$ нм реализуется только в нестационарной стадии разряда. В этот промежуток времени средняя энергия электронов сравнительно высока, что обеспечивает большую скорость возбуждения верхнего лазерного уровня, чем нижнего. Длительность нестационарной стадии разряда при давлениях десятки и сотни торр составляет единицы наносекунд и уменьшается с ростом давления азота и напряженности электрического поля. Увеличение рабочего давления приводит к сокращению импульса генерации за счет более быстрого спада напряжения на лазерном промежутке (уменьшения времени поддержания в разряде высокой температуры электронов).

Добавки электроотрицательных газов (SF_6 , NF_3 , F_2) к азоту вызывают замедление спада напряжения на промежутке и увеличение длительности полезной накачки; при этом в лазерах с длительностью импульса тока, превышающей оптимальную, удается увеличить энергию и длительность импульса генерации. Максимальная эффективность азотного лазера (~ 0.3 %) при накачке поперечным разрядом достигается в области давлений десятки-сотни торр при коротких импульсах накачки, малых волновых сопротивлениях системы питания и малых индуктивностях разрядного контура. Для достижения предельной эффективности необходимо создавать азотные лазеры с сечением выходного пучка лазера, близким к квадратному, при межэлектродном расстоянии 5–10 мм, длительности импульса накачки не более нескольких наносекунд (2–4 нс в зависимости от рабочего давления), параметре $E_0/p = 150 - 200 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$ и малом волновом сопротивлении полосковой линии генератора накачки. При этом необходимо использовать коммутаторы, обеспечивающие высокую скорость нарастания тока с малыми потерями.

Реализация вышеперечисленных параметров весьма сложна, и в настоящий момент только в ряде работ [6, 7, 14, 16] получены предельные эффективности излучения,

не превышающие 0.3 %. Максимальная энергия излучения реализуется в лазерах со сравнительно большими межэлектродными промежутками и при добавлении к азоту электроотрицательных газов. С увеличением межэлектродного зазора уменьшается влияние индуктивности подсоединения источника накачки к лазерной камере и увеличивается напряжение на лазерном промежутке.

Автор выражает глубокую признательность В.В.Савину за создание теоретической модели азотного лазера и проведение расчетов, а также В.Ф.Лосеву и М.И.Ломаеву за помощь в экспериментах.

1. Geller M., Altman D.E., De Temple T.A. *Appl. Optics*, **7**, 2232 (1968).
2. Тарасенко В.Ф., Курбатов Ю.А., Бычков Ю.И. *Квантовая электроника*, № 2 (8), 84 (1972).
3. Girardean-Montant J.P., Roumy M., Hamelin J., Avan L. *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*, **274**, В607 (1972).
4. Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Федоров А.И. *Квантовая электроника*, № 3 (15), 102 (1973).
5. Бычков Ю.И., Кремнев В.В., Тарасенко В.Ф. *ЖПМТФ*, **3**, 167 (1974).
6. Godard V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **10**, 147 (1974).
7. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **2**, 2047 (1975).
8. Савин В.В., Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И. *ЖТФ*, **46**, 198 (1976).
9. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **46**, 2202 (1976).
10. Rebhan U., Hildebrandt J., Skopp G. *Appl. Phys.*, **23**, 341 (1980).
11. Armandillo E., Kearsley A.J. *Appl. Phys Letts*, **41**, 611 (1982).
12. Oliveira dos Santos B., Fellows C.E., de Oliveira e Souza J.B., Mason C.A. *Appl. Phys. B*, **41**, 241 (1986).
13. Бабин А.А., Вихарев А.Л., Гинцбург В.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **15**, № 1, 31 (1989).
14. Baby T., Ramachandran T., Sathianandant K., Nampoori V.P.N., Vallabhan C.P.G. *Rev. Sci. Instr.*, **62**, 2076 (1991).
15. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Верховский В.С. *Электронная техника. Сер. 11*, № 1, 58 (1991).
16. Vazquez Martinez A., Aboites V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 2364 (1993).
17. Ч.Роудз (ред.) *Экцимерные лазеры* (М., Мир, 1981).
18. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed gas lasers* (Bellingham, Washington, SPIE, Opt. Eng. Press, 1995).
19. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **22**, 441 (1995).
20. Аполлонов В.В., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 483 (1997).
21. Гольдорт В.Г., Ищенко В.Н., Кочубей С.А. *ПТЭ*, № 1, 140 (1998).
22. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **17**, 32 (1990).