

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах

научно-квалификационной работы на тему:

«Генерация на ионах молекулярного азота в лазерной плазме»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность): 01.04.05 – оптика

Аспирант



(подпись)

Зятиков Илья Александрович

Научный руководитель:

Лосев Валерий Фёдорович,
д.ф.-м.н., профессор, г.н.с.
ИСЭ СО РАН

Актуальность темы научного исследования

Впервые генерация на первой отрицательной системе $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ иона молекулярного азота, излучающего на длинах волн 391,4 нм (переход $v' = 0 - v'' = 0$) и 427,8 нм (переход $v' = 0 - v'' = 1$) в прямом направлении была получена в 2011 г. при накачке коротким и интенсивным лазерным импульсом на длинах волн в средней ИК области ($\lambda = 1,2 \div 2,9 \mu\text{m}$) [1]. С тех пор генерацию на ионах азота начали активно исследовать из-за перспективного использования в различных областях спектроскопии, в том числе для зондирования атмосферы [2,3]. Большой коэффициент усиления, по сравнению с электроразрядными азотными лазерами, позволяет получать генерацию без применения резонатора. Для её обеспечения необходимо дополнительное (затравочное) излучение на третьей или пятой гармониках накачки, длина волны которого совпадала с соответствующим переходом иона азота. В более поздних работах, генерация на ионах азота была получена как в присутствии внешнего дополнительного излучения на длинах волн генерации [2], так и без него (self-seed) [3, 4]. В последнем случае считается, что в качестве внешнего запускающего импульса выступает излучение суперконтинуума на рабочей длине волны. Он возникает в лазерной плазме во время импульса накачки.

Отличительной особенностью данного вида генерации является пикосекундная длительность импульса [5-7]. Известно, что азотные лазеры имеют длительность импульса несколько наносекунд. Лазерные пучки в УФ области спектра и на границе видимого диапазона (391,4 нм, 427,8 нм) позволяет исследовать биологические процессы в живых тканях организма и растений с пикосекундным временным разрешением.

Несмотря на большой интерес к данной теме, физические механизмы, лежащие в основе возникновения генерации, всё ещё не определены и продолжают обсуждаться в литературе [8-10]. Работы, посвящённые измерению длительности импульса генерации, были проведены, как правило, при одних условиях накачки и только косвенными методами («памп-проб»,

либо кросскорреляционный метод). Прямых измерений длительности импульса стрик-камерой практически не проводилось.

Цель научного исследования

Получение и экспериментальное изучение временных и спектральных характеристик генерации на первой отрицательной системе ионов молекулярного азота $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$, излучающего на длинах волн 391,4 нм (переход $v' = 0 - v'' = 0$) и 427,8 нм (переход $v' = 0 - v'' = 1$) при различных интенсивностях импульса накачки с длительностью 50 – 60 фс на длине волны 950 нм. Исследование параметров лазерной плазмы и проведение анализа параметров активной среды.

Основные задачи научного исследования

Для достижения цели в работе требовалось решить следующие задачи:

Получить генерацию на первой отрицательной системе ионов молекулярного азота в воздухе и чистом азоте, определить поляризацию полученного излучения.

Провести анализ методик измерения длительности импульса генерации на ионах молекулярного азота, используемых в литературе.

Провести измерение спектральных характеристик генерации на ионах азота, используя спектрометры Acton SpectraPro SP-2300 и Ocean HR-4000 при различных интенсивностях накачки.

Изучить и освоить стрик-камеру Hamamatsu, Universal Streak Camera C10910, позволяющую измерять длительность импульса генерации с пикосекундным временным разрешением. Провести измерение временных параметров импульса генерации на ионах азота, используя данную стрик-камеру, при различных интенсивностях накачки.

Исследовать параметры лазерной плазмы и провести анализ параметров активной среды.

Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, и его основные результаты

1. Методики измерения длительности импульса генерации на ионах азота

Для достижения поставленной цели был проведён анализ существующих на сегодняшний момент методик измерения длительности импульса ионов молекулярного азота в лазерной плазме.

Для того, чтобы понять механизм генерации на ионах молекулярного азота, важно знать все характеристики данного вида излучения. Одним из важных параметров генерации является длительность импульса. Основным способом определения временного поведения коэффициента усиления является метод «памп-проб» [11]. Для измерения длительности импульса генерации используют кросскорреляционный метод [12], либо стрик-камеру с высоким временным разрешением [13].

Схематичное изображение метода «памп-проб» показано на рисунке 1. Линейно поляризованный фемтосекундный лазерный импульс из Ti:сапфировой лазерной системы разделяется на два пучка с помощью делительной пластины (80:20). Первый пучок с энергией 80% используется в качестве накачки для создания лазерной плазмы в азотной камере; другой пучок, называемый «пробным» импульсом, фокусируется на ВВО кристалле. Генерируемый импульс второй гармоники используется для затравки генерации в плазме. Переменная линия задержки используется для настройки задержки между импульсом накачки и «пробным» импульсом. Полученный сигнал из лазерной плазмы фокусируется на спектрометр. вместе с накачкой. Изменяя изменение усиления, как функцию задержки между приходом импульса накачки и «пробным» импульсом, получают информацию о временной динамике усиления.

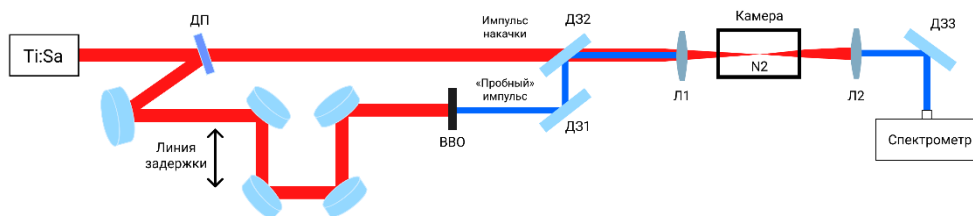


Рисунок 1. Схема измерения методом «памп-проб». ДС – делительная пластинка с 20% отражением и 80% пропусканием. ДЗ1-3 – дихроичные зеркала с высоким отражением второй гармоники и высоким пропусканием накачки. Л1 и Л2 – фокусирующая и коллимирующая линзы соответственно.

Суть кросскорреляционного метода (рис. 2) для измерения длительности импульса генерации заключается в том, что фемтосекундный лазерный импульс разделяется на 3 пучка. Первый пучок используется в качестве накачки для создания лазерной плазмы в азотной камере. Вторым пучком, после удвоения частоты в ВВО кристалле, выступает в качестве затравки для создания генерации. После прохождения через азотную камеру, импульс накачки вместе с созданной генерацией частотно смешиваются во втором нелинейном кристалле ВВО для создания третьего сигнала суммарной частоты, который затем записывается на спектрометре, как функция задержки между приходом импульса накачки и генерацией. Время задержки всех трёх импульсов также регулируется с помощью линий задержек. Недостатком данного метода является то, что сложение сигналов в нелинейном кристалле является нелинейным процессом. В результате этого, временной профиль импульса излучения может отличаться от действительного.

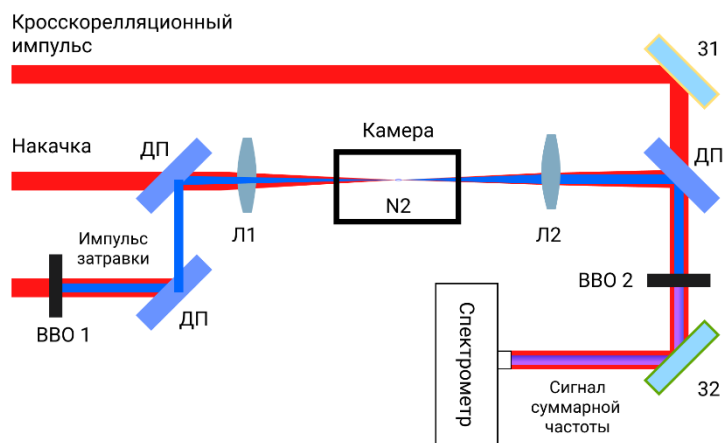


Рисунок 2. Схема измерения кросскорреляционным методом. ДП – делительная пластина с высоким отражением второй гармоники и высоким пропусканием накачки. Л1 и Л2 – фокусирующая и коллимирующая линзы соответственно. 32 – зеркало с высоким отражением на длине волны сигнала суммарной частоты.

Таким образом, данные методы не позволяют корректно измерить временную форму импульса генерации.

Реальный временной профиль генерации может быть получен с использованием стрик-камеры с высоким временным разрешением. В работах по измерению длительности генерации временное разрешение стрик-камеры составляет 8 пс [14] и 30 пс [15]. Однако, данного разрешения недостаточно для корректного измерения длительности импульса в единицы пикосекунд.

2. Экспериментальная аппаратура и методики измерения

Для формирования лазерной плазмы использовалось излучение, генерируемое твердотельным комплексом «Старт-480». Лазерный комплекс включает в себя Ti:Sa задающий генератор с непрерывным лазером накачки, решетчатый стретчер, регенеративный и многопроходовые усилители с импульсными лазерами накачки на длине волны 532 нм, решетчатый компрессор. Данный комплекс формировал спектрально-ограниченный импульс на центральной длине волны 950 нм с длительностью импульса на полувысоте 60 фс. Энергия импульса накачки составляла 8 – 12 мДж, диаметр пучка 1.5 см (по уровню интенсивности $1/e^2$), частота повторения импульсов 10 Гц [13]. Пучок фокусировался плоско-выпуклыми линзами с фокусными расстояниями 15, 30 и 50 см для создания лазерной плазмы. Экспериментальная схема представлена на рисунке 3.

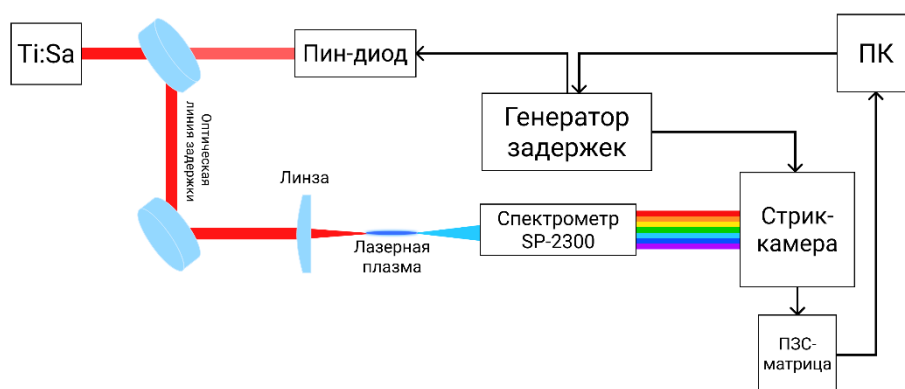


Рисунок 3. Блок-схема для измерения длительности генерации на ионах азота:

Ti:Sa лазерная система, поворотные зеркала, фокусирующая линза, лазерная плазма и регистрирующие элементы.

Для определения размеров лазерной плазмы, она фотографировалась сбоку цифровой камерой. Распределение интенсивности импульса накачки оценивалось по отпечаткам на фотобумаге. Измерения временных и спектральных характеристик генерации на ионах азота проводились на стрик-камера (Hamamatsu Universal Streak Camera C10910), которая совмещена со спектрометром (Acton SpectraPro SP-2300). Камера имеет две

временные развёртки: быструю (минимальная развёртка 100 пс) и медленную (минимальная развёртка 1 нс). Максимальное временное разрешение стрик-камеры, согласно паспорту прибора, составляет 0,644 пс в режиме одиночного импульса. Измерения проводились на быстрой развёртке в режиме одиночного импульса с шириной щели хронографа 20 мкм. Камера запускалась сигналом с пин-диода. Для компенсации времени срабатывания блока развёртки стрик-камеры лазерное излучение проходило оптическую линию задержки и после этого фокусировалось линзой для создания лазерной плазмы в воздухе или чистом азоте. Спектральные измерения проводились на спектрометре Acton SpectraPro SP-2300 с решеткой 1200 штр/мм с разрешением 0,23 нм, а также на спектрометре Ocean Optics HR-4000CG-UV-NIR с решеткой 300 штр/мм с разрешением 0,75 нм. При измерениях параметров, близких к разрешению прибора B , реальный параметр C определялся по следующей формуле:

$$C = \sqrt{A^2 - B^2}, \quad (1)$$

где A это измеренная длительность импульса или ширина спектра.

3. Экспериментальные результаты.

3.1 Спектральные измерения генерации на ионах азота в лазерной плазме.

В экспериментах исследовались спектральные характеристики генерации на ионах азота на длинах волн 391.4 (0-0) и 427.8 (0-1), соответствующие ионному переходу $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$. На рис.4 изображен типичный измеренный на спектрометре Acton SpectraPro SP-2300 спектр генерации на длине волны 427.8 нм при фокусировании в воздухе линзой с $F = 30$ см. С учётом формулы (1) реальная ширина спектра для данного фокусного расстояния составляет 0.29 нм. Изменение интенсивности накачки не приводило к значительному изменению ширины спектра генерации. Полученное значение ширины спектра находится в хорошем согласии с литературными данными в похожих экспериментальных условиях [4, 16].

Дополнительные максимумы на спектре генерации возможно связаны с полупериодом вращения иона азота, которые также наблюдались и в других работах [9, 16, 17].

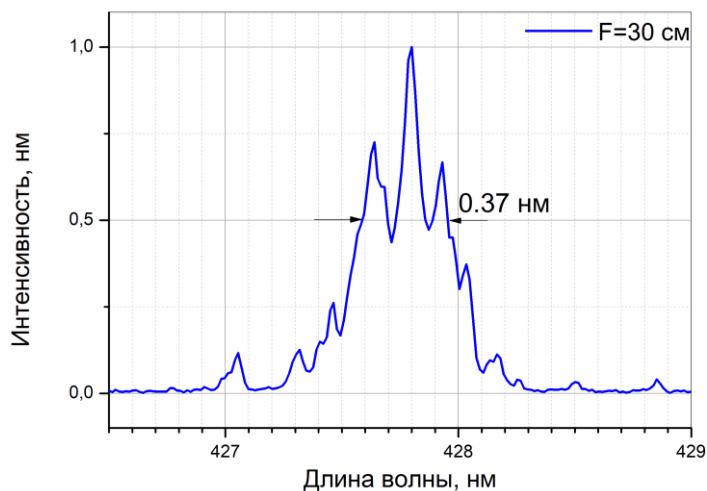


Рисунок 4. Нормированный спектр генерации для $F = 30$ см.

Для оценки направленности излучения измерялось пространственное распределение интенсивности излучения на длинах волн 391.4 и 427.8 нм в чистом азоте при давлении 1 атм на расстоянии 20 см от лазерной плазмы (Рис.5).

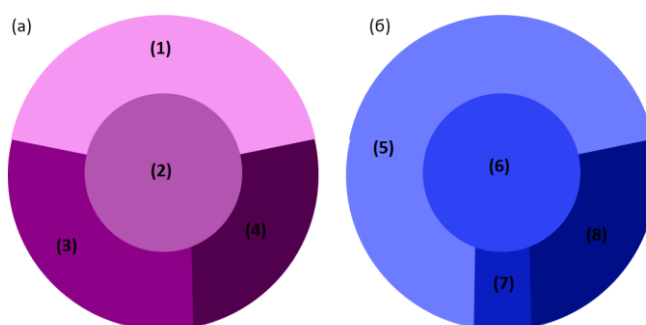


Рисунок 5. Схематичное пространственное распределение интенсивности генерации на длине волны 391.4 (а) и 427.8 (б). Область (1) соответствует интенсивности 100 отн.ед.; область (2) – 250 отн.ед.; область (3) – 600 отн.ед.; область (4) – 900 отн.ед.; область (5) – 100 отн.ед.; область (6) – 200 отн.ед.; область (7) – 250 отн.ед.; область (8) – 500 отн.ед.

Радиус пятна генерации составляет 4 мм. Из литературы известно, что генерация на длине волны 391.4 нм имеет форму пятна [18, 19], а генерация на длине волны 427.8 нм имеет форму полого конуса [19]. Однако, не до конца ясно, почему 427.8 нм имеет не гауссов пространственный профиль, в отличие от 391.4 нм, а форму полого конуса, которая совпадает с пространственным распределением суперконтинуума. Возможно, это связано с различной природой излучения двух длин волн. В работе [4] в одних и тех же экспериментальных условиях (фокусное расстояние линзы, длина волны, энергия и длительность импульса) было показано, что в режиме без внешней затравки присутствует генерация только на длине волны 427.8 нм. С внешним затравочным сигналом, в качестве которого выступал белый свет, появлялось излучение на других длинах волн, в том числе на 391.4 нм. Отсюда можно сделать вывод о том, что для генерации на длине волны 427.8 нм необходимы фотоны суперконтинуума, поэтому она имеет пространственное распределение в виде полого конуса. Стоит отметить тот факт, что пороговое значение энергии накачки, необходимое для получения генерации на длине волны 427.8 нм без внешнего затравочного сигнала составляет 8-10 мДж, что существенно превышает критическую мощность. Для генерации на 391.4 нм необходим внешний запускающий импульс, поэтому пространственный профиль имеет гауссову форму.

Различия между полученными в литературе данными о пространственном распределении интенсивности с данными, представленными на рисунке 5, может быть связано с наличием аберраций, возникающих из-за несимметричного падения пучка на фокусирующую линзу. Входное и выходное окна азотной камеры также могут искажать волновой фронт пучка и приводить к возникновению аберраций. Отсутствие полости на длине волны 427.8 возможно связано с тем, что полость конуса, зарегистрированная в ближней зоне, может иметь меньший диаметр, чем диаметр входного отверстия спектрометра. Стоит отметить, что в наших экспериментах в режиме без внешнего затравочного сигнала наблюдались

одновременно генерации на 391.4 нм и 427.8 нм. Ранее нами был получен в других условиях пространственный профиль генерации на 427.8 нм в виде полого конуса [13]. Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования находятся в процессе для лучшего понимания данного вопроса.

Основным доказательством когерентности излучения на ионах азота является наличие поляризации. Из литературы известно, что как усиленное спонтанное излучение, так и спонтанное излучение не имеет поляризации. В то время как при генерации излучение имеет поляризацию, которая параллельна поляризации внешней затравки, либо суперконтинуума [1, 5]. Для подтверждения этого нами было проведено исследование поляризации излучения при генерации на длинах волн 391.4 нм и 427.8 нм путём установки поляризационного фильтра перед спектрометром (рис. 6).

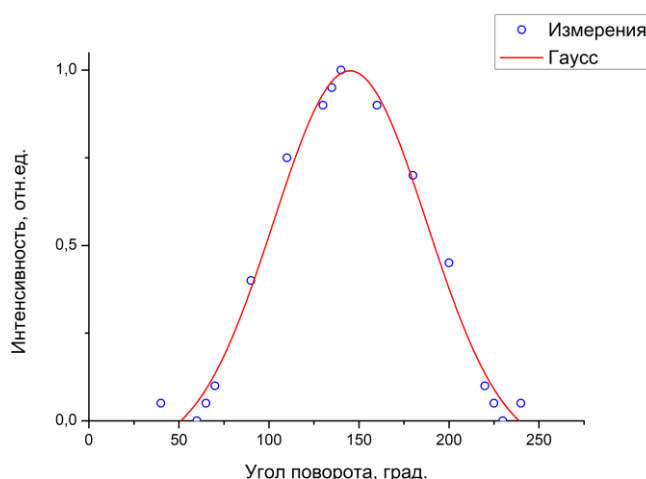


Рисунок 6. Поляризация генерации на длине волны 391.4 нм

Как видно из графика, излучение на длине волны 391.4 нм имеет линейную (горизонтальную) поляризацию, которая совпадает с поляризацией суперконтинуума. Поляризация излучения на длине волны 427.8 нм имела такое же распределение интенсивности в зависимости от угла поворота поляризационного фильтра. Это является доказательством того, что фотоны суперконтинуума усиливаются в активной среде.

3.2 Длительность импульса генерации на ионах азота

В первых работах было высказано предположение, что длительность импульса генерации может быть спектрально ограниченной. На основе проведённых спектральных измерений ширины линии импульса генерации на длинах волн 427.8 нм (~ 0.28 нм) и 391 нм (~ 0.24 нм) было подсчитано, что эти линии соответствуют спектрально-ограниченным длительностям импульса 0.96 пс и 0.93 пс соответственно [4]. Вскоре после этого, измерения длительности кросскорреляционным методом и стрик-камерой показали, что длительность больше, чем спектрально-ограниченная (2-7.8 пс) [14-16, 20].

В наших экспериментах исследовалась длительность импульса генерации при различных интенсивностях. Варьирование интенсивности накачки происходило путём изменения фокусного расстояний линзы. Другие параметры излучения (энергия, длительность и длина волны импульса накачки) оставались фиксированными. Измеренные длительности импульса генерации представлены на рисунке 7. С учётом формулы (1) реальные длительности составляют 1.15, 3.7, и 4.6 пс для $F = 15, 30,$ и 50 см соответственно. Полученные длительности хорошо совпадают с литературными данными в похожих экспериментальных условиях [12, 16, 17, 20]. Стоит отметить, что длительность импульса генерации увеличивается с увеличением фокусного расстояния линзы, т.е. с уменьшением пиковой интенсивности.

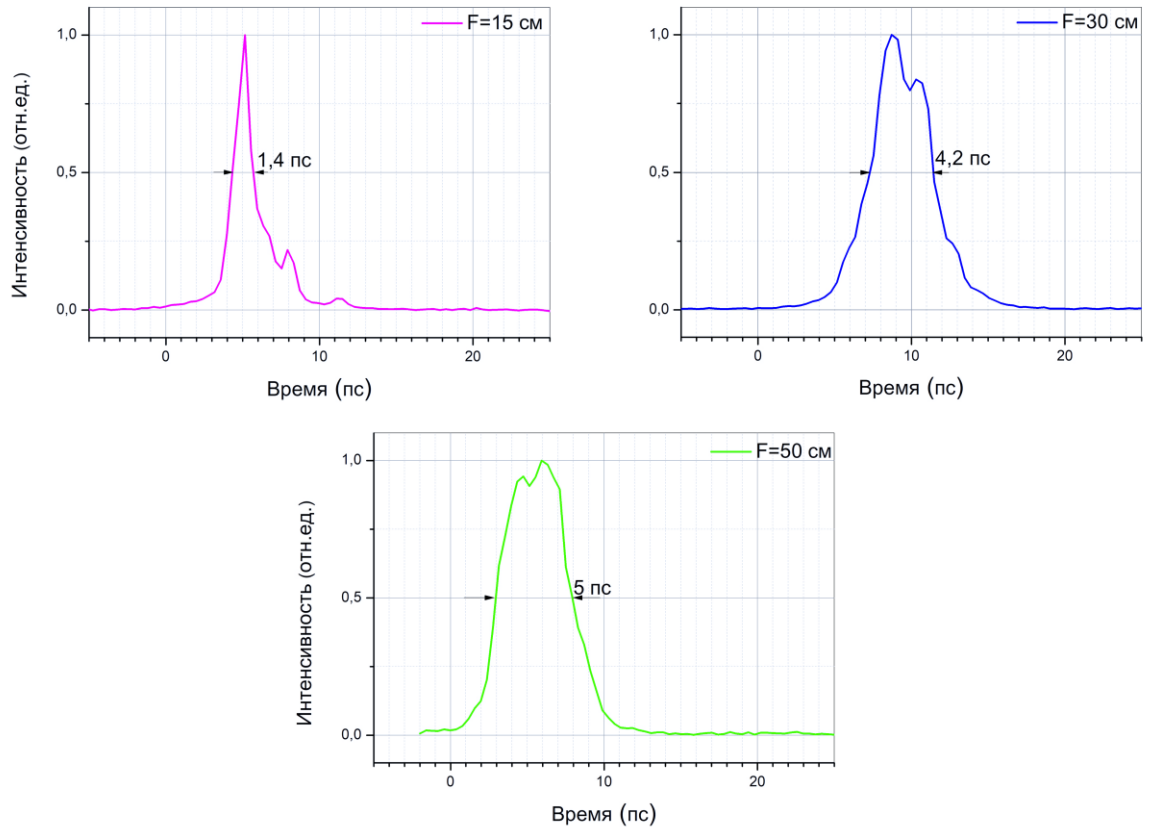


Рисунок 7. Нормированные длительности импульса генерации для $F = 15, 30,$ и 50 см. Нулевая точка соответствует времени прихода импульса накачки.

3.3. Анализ параметров лазерной плазмы и активной среды

Для того, чтобы анализировать параметры активной среды необходимо определить геометрическое распределение и плотность активных частиц. Фотографии плазменных каналов для различных фокусных расстояний линз представлены на рисунке 8.



Рисунок 8. Фотографии профилей излучения плазмы при фокусировании импульса накачки линзами с (а) $F = 15$ см, (б) $F = 30$ см, и (в) $F = 50$ см. Импульс накачки распространяется справа налево. Одно деление соответствует 1 мм.

Продольные размеры самой яркой области плазмы составляют 3, 7, и 10 мм для линз с фокусными расстояниями $F = 15, 30,$ и 50 см соответственно. Оценка диаметра плазменного канала составляет 0.3 мм для

$F = 15$ см, 0.4 мм для $F = 30$ см, 0.5 мм для $F = 50$ см. Отсюда можно сделать вывод о том, что существует увеличение длины и уменьшение диаметра активной среды с увеличением фокусного расстояния линзы. Время прохода импульса излучения через такие плазменные каналы составляет 10, 23, и 33 пс для фокусных расстояний 15, 30, и 50 см соответственно.

Зная размеры активной среды и мощность накачки, можно оценить концентрацию ионов молекулярного азота, которая должна быть сравнима с концентрацией электронов в плазме. Проведём расчёты для случая $F = 50$ см. Диаметр плазменного канала составляет 0,5 мм (рис. 8), пиковая интенсивность накачки отсюда составляет $8 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Электронная плотность для такой интенсивности излучения составляет $N_e \sim 10^{17}$ см⁻³ [21], т.е. первоначальная концентрация ионов азота в лазерной плазме составляет $N_{\text{ион}} \sim 10^{17}$ см⁻³. С учётом потерь возможно, получить $\sim 10^{16}$ см⁻³ фотонов или меньше за счёт вынужденного излучения. Приняв во внимание объём активной среды ($1.3 \cdot 10^{-3}$ см³), получим $N_{\phi} \leq 1.3 \cdot 10^{13}$ фотонов за счёт генерации. Это верхняя оценка инверсии. Оценим реальное количество фотонов в импульсе генерации, считая типичную энергию ~ 1 мкДж [22]. Это даёт $N_{\phi} = 2.1 \cdot 10^{12}$ фотонов ($1.6 \cdot 10^{15}$ см⁻³). Снижение количества фотонов на порядок в реальных экспериментах можно объяснить большой скоростью тушения верхнего лазерного уровня электронами плазмы, потерями на рассеяния и поглощение, конечный телесный угол усилительной среды, и возможным заселением других уровней иона азота (например $A^2\Pi_u$).

Важным параметром активной среды является ненасыщенный коэффициент усиления g_0 , который можно также оценить [23]. Поскольку рост интенсивности излучения при усилении выражается как $I = I_0 \exp(g_0 L)$, где I_0 – начальная интенсивность, а L – длина активной среды, то можно считать, что усиление наступает при $g_0 L \geq 1$. Из этого можно оценить коэффициент усиления $g_0 \geq 1/L$. Если мы определим L из длительности τ_m за которое фотонная лавина развивается до максимальной интенсивности генерации (рис. 7), то получим $L = 0.15; 0.21$ и 0.24 см при фокусных

расстояниях 15, 30 и 50 см соответственно. Оценка коэффициента усиления для таких активных сред даёт $g_0 \geq 6.7, 4.8, 4.2 \text{ см}^{-1}$. Эти величины хорошо коррелируют с литературными данными по которым коэффициент усиления g_0 на переходе $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$ ионов молекулярного азота находится в диапазоне $3 - 8 \text{ см}^{-1}$ [9, 24, 25]. Если считать, что L есть длина плазмы, которая соответствует полной длительности импульса (по основанию, т.е. ~ 13 пс), то получим $L = 0.39 \text{ см}$ и $g_0 \geq 2.6 \text{ см}^{-1}$. Аналогичные длительности импульса по основанию 13-15 пс наблюдались и в других работах [16, 19]. Зная значение g_0 , можно оценить инверсную населённость активной среды на кубический сантиметр из выражения $\Delta N = g_0/\sigma$, где σ – сечение индуцированного излучения. Например, для $g_0 \geq 6.7 \text{ см}^{-1}$ и $\sigma = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [26, 27] получим $\Delta N \geq 2.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, или для нашего объёма $2.8 \cdot 10^{12}$, что неплохо коррелирует с экспериментальным количеством фотонов в импульсе генерации $2.1 \cdot 10^{12}$ ($1.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Основные выводы по научной работе

1. Получена генерация на длине волны 427.8 нм в воздухе, в чистом азоте получена генерация на длинах волн 391.4 и 427.8 нм. Генерация имеет линейную (горизонтальную) поляризацию, которая совпадает с поляризацией накачки (суперконтинуума).
2. Анализ методик измерения длительности импульса генерации на ионах молекулярного азота, используемых в литературе, показал, что только прямое измерение длительности импульса с помощью стрик-камеры с высоким временным разрешением позволяет получить реальный временной профиль импульса генерации.
3. Измерен спектр генерации в воздухе на длине волны 427.8 нм спектрометром Acton SpectraPro SP-2300 с разрешением 0.23 нм. Спектр не сильно изменяется при изменении фокусного расстояния линзы и находится в диапазоне 0.27 – 0.3 нм. Дополнительные максимумы на спектре генерации возможно связаны с полупериодом вращения иона азота.

4. Получен пространственный профиль генерации на длинах волн 427.8 и 391.4 нм в азотной камере с давлением 1 атм. Несоответствие пространственных профилей с литературными данными, возможно, связано с наличием aberrаций, возникающих из-за несимметричного падения пучка на фокусирующую линзу.

5. Проведены измерения длительности импульса генерации в воздухе на длине волны 427.8 нм стрик-камерой Hamamatsu, Universal Streak Camera C10910 при различных фокусных расстояниях линзы ($F = 15, 30, 50$ см). Длительность импульса увеличивается с увеличением фокусного расстояния линзы (уменьшением пиковой интенсивности). Полученные значения длительности импульса (1.15, 3.7, и 4.6 пс) хорошо совпадают с литературными данными в аналогичных экспериментальных условиях.

6. Анализ параметров активной среды показал, что ненасыщенный коэффициент усиления уменьшается с 6.7 до 4.2 см^{-1} с увеличением пиковой интенсивности от $8 \cdot 10^{13}$ до $2.3 \cdot 10^{14}$ $\text{Вт}/\text{см}^2$. Полученные значения коэффициента усиления хорошо коррелируют с литературными данными. Получено хорошее совпадение оценки инверсной населённости активной среды $\Delta N \geq 2.8 \cdot 10^{12}$ из расчёта коэффициента усиления, с реальным экспериментальным количеством фотонов ($2.1 \cdot 10^{12}$) в импульсе генерации энергией ~ 1 мкДж.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Экспериментально показано, что в воздушной лазерной плазме на ионах азота возможно формировать длительность импульса генерации, близкую к спектрально ограниченной (1.15 пс).

2. Изменение интенсивности импульса излучения накачки с $8 \cdot 10^{13}$ до $2.3 \cdot 10^{14}$ $\text{Вт}/\text{см}^2$ приводит к уменьшению длительности импульса генерации с 4.6 до 1.15 пс и увеличению ненасыщенного коэффициента усиления с 4.2 до 6.7 см^{-1} .

3. Для получения генерации на длине волны 391.4 нм в чистом азоте при создании лазерной плазмы излучением накачки на длине волны 950 нм и длительностью 60 фс необходимо обеспечивать интенсивность накачки в диапазоне от $6.5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² до $9 \cdot 10^{13}$ Вт/см².

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных измерительных приборов, методик измерений, и совпадают с данными других авторов.

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений

Новизна и научная ценность результатов исследования обеспечивается публикациями в рецензированных журналах с высоким импакт-фактором (Q1).

Практическая значимость результатов исследования

Генерация на ионах молекулярного азота позволяет исследовать биологические процессы в живых тканях организма и растений с пикосекундным временным разрешением и осуществлять зондирование атмосферы в неблагоприятных условиях.

Личный вклад автора

Представленные в работе основные результаты исследования были получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Постановка цели и основных задач работы осуществлялись совместно с научным руководителем Лосевым В.Ф. Подготовка экспериментального оборудования, проведение экспериментов и обработка большинства результатов осуществлялась автором лично. Частично использовались результаты, полученные с.н.с. Ивановым Н.Г. и с.н.с Прокопьевым В.Е.

Анализ, интерпретация и обсуждение полученных результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем. Написание публикаций осуществлялось при активном участии автора, подготовка докладов на конференции проводилась автором лично.

Апробация результатов работы

Конференции:

1. I.A. Zyatikov, N.G. Ivanov, V.F. Losev, V.E. Prokop'ev. Superradiance by nitrogen ions in atmospheric filament. Book of abstracts: modern problems of laser physics. The VIII International Symposium MPLP-2018. 2018. С. 240-241.

2. I.A. Zyatikov, V.F. Losev, and V.E. Prokoev. Superradiance pulse generation by molecular nitrogen ions in atmospheric filament. Book of abstracts: ultrafast optical science. The III International Conference UltrafastLight-2019. 2019. С. 227.

3. I.A. Zyatikov, N.G. Ivanov, V.F. Losev, V.E. Prokoev. Temporal dynamics of super-radiance by molecular nitrogen ions in air filament. Book of abstracts: Pulsed Lasers and Laser Applications - "AMPL-2019" Abstracts of XIV International Conference. 2019. С. 13.

4. I.A. Zyatikov, V.F. Losev, and V.E. Prokoev. Temporal dynamics of air lasing from molecular nitrogen ions. Book of abstracts: ultrafast optical science. The IV International Conference UltrafastLight-2020. 2020. С. 252.

Публикации:

1. N.G. Ivanov, V.F. Losev, V.E. Prokop'ev, K.A. Sitnik, I.A. Zyatikov. High time-resolved spectroscopy of filament plasma in air. Opt. Commun. 431, 120. (2019).

2. И.А. Зятиков, Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, В.Е. Прокопьев. Исследование спек-трально-временных параметров сверхизлучения на ионах молекулярного азота в воздушном филаменте. Квантовая электроника. 49(10). 947. (2019).

3. N. G. Ivanov, I. A. Zyatikov, V. F. Losev, and V. E. Prokop'ev. Temporal behavior of air lasing by molecular nitrogen ions. *Opt. Commun.* 456. 124573. (2020).

4. I.A. Zyatikov, V.F. Losev, D.M. Lubenko, E.A. Sandabkin. Analysis of the active medium parameters of molecular nitrogen ions in ambient air. *Opt. Lett.* 45(23). 6518 (2020).

5. Зятиков И. А., Лосев В. Ф. , Прокопьев В. Е. , Лубенко Д. М. , Сандабкин Е. А. Длительность импульса сверхизлучения на ионах молекулярного азота в воздушной лазерной плазме. *Изв. вузов. Физика.* 3. 161. (2020).

Список литературы

1. J. Yao, B. Zeng, H. Xu, G. Li, W. Chu, J. Ni, H. Zhang, S. L. Chin, Y. Cheng, and Z. Xu, *Phys. Rev. A* **84**, 051802 (2011).
2. Pavel Polynkin. *Air Lasing*. Springer Series in Optical Sciences **208**, (2018).
3. H. Xu, Y. Cheng, S.L. Chin, and H.B. Sun, *Laser Photonics Rev.*, **1**, (2015).
4. T. J. Wang, J. F. Daigle, J. Ju, S. Yuan, R. Li, and S. L. Chin, *Phys. Rev. A* **88**, 053429 (2013).
5. T. J. Wang, J. Ju, J. F. Daigle, S. Yuan, R. Li, and S. L. Chin, *Laser Phys. Lett.* **10**, 125401 (2013).
6. Y. Liu, P. Ding, G. Lambert, A. Houard, V. Tikhonchuk, and A. Mysyrowicz, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 133203 (2015).
7. Y. Liu, P. Ding, N. Ibrakovic, et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 203205 (2017).
8. V. Tikhonchuk, Y. Liu, R. Danylo, A. Houard, and A. Mysyrowicz, *New J. Phys.* **23**, 023035 (2021).
9. J. Yao, W. Chu, Z. Liu, J. Chen, B. Xu, Y. Cheng, *Applied Physics B* **124**, 73 (2018).

10. A. Mysyrowicz, R. Danylo, A. Houard, V. Tikhonchuk, et al., *APL Photonics* **4**, 110807 (2019).
11. H. Zhang, C. Jing, G. Li, H. Xie, J. Yao et al., *Phys. Rev. A* **88**, 063417 (2013).
12. G. Li, C. Jing, B. Zeng, H. Xie, J. Yao et al., *Phys. Rev. A* **89**, 033833 (2014).
13. N. G. Ivanov, I. A. Zyatikov, V. F. Losev, and V. E. Prokop'ev, *Opt. Commun.* **456**, 124573 (2020).
14. M. Lei, C. Wu, Q. Liang, A. Zhang, Y. Li, Q. Cheng, S. Wang, H. Yang, Q. Gong, and H. Jiang, *J. Phys. B* **50**, 145101 (2017).
15. J. Qiao, P. A. Jaanimagi, R. Boni, J. Bromage, and E. Hill, *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 073104 (2013).
16. J. Yao, G. Li, C. Jing, B. Zeng, W. Chu, J. Ni, H. Zhang, H. Xie, C. Zhang, H. Li, H. Xu, S. L. Chin, Y. Cheng, and Z. Xu, *New J. Phys.* **15**, 023046 (2013).
17. X. Zhong, Z. Miao, L. Zhang, et al., *Phys. Rev. A* **96** 043422 (2017).
18. Y. Liu, Y. Brelet, G. Point, A. Houard, and A. Mysyrowicz, *Opt. Express* **21**, 22791 (2013).
19. W. Chu, G. Li, H. Xe, J. Ni, J. Yao, B. Zheng, H. Zhang, C. Jing, H. Xu, Y. Cheng, and Z. Xu, *Laser Phys. Lett.* **11**, 015301 (2014).
20. D. Zhou, X. Zhang, Q. Lu, Q. Liang, and Y. Liu, *Chin. Opt. Lett.* **18**, 023201 (2020).
21. F. Theberge, W. Liu, P. T. Simard, A. Becker, and S. L. Chin, *Phys. Rev. E* **74**, 036406 (2006).
22. G. Point, Y. Liu, Y. Brelet, S. Mitryukovskiy, P. Ding, and A. Mysyrowicz, *Opt. Lett.* **39**, 1725 (2014).
23. Зятиков И. А., Лосев В. Ф. , Прокопьев В. Е. , Лубенко Д. М. , Сандабкин Е. А. Длительность импульса сверхизлучения на ионах молекулярного азота в воздушной лазерной плазме. *Изв. вузов. Физика.* **3**, 161. (2020).

24. X. Zhong, Z. Miao, L. Zhang, H. Jiang, Y. Liu, Q. Gong, and C. Wu, *Phys. Rev. A* **97**, 033409 (2018).
25. K. Zhai, Z. Li, H. Xie, C. Jing, G. Li, B. Zeng, W. Chu, J. Ni, J. Yao, and Y. Cheng, *Chin. Opt. Lett.* **13**, 050201 (2015).
26. V. A. Dolgikh, I. G. Rudoi, A. Yu. Samarin, and A. M. Soroka, *Sov. J. Quantum Electron.* **18**, 854 (1988).
27. D. Kartashov, S. Alisauskas, A. Pugzlys, M. N. Shneider, and A. Baltuska, *J. Phys. B* **48**, 094016 (2015).