

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО. ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА**Генерация на ионах молекулярного азота с длиной волны 391.4 нм в лазерной плазме****И.А.Зятиков, В.Ф.Лосев**

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных, временных, энергетических и пространственных характеристик когерентного излучения на длине волны 391.4 нм (переход $B^2\Sigma_u^+(0) - X^2\Sigma_g^+(0)$ иона молекулярного азота). Генерация происходит в чистом азоте при накачке импульсом излучения с длительностью 70 фс на длине волны 950 нм. Параметры генерации исследуются в зависимости от давления азота, энергии пучка накачки и условий его фокусировки. Определены оптимальные значения энергии накачки (6 мДж) и давления азота (30 мбар). Показано, что расходимость излучения уменьшается с увеличением фокусного расстояния линзы и коррелирует с геометрическими размерами лазерной плазмы. Также показано, что с ростом удельной мощности накачки длительность импульса уменьшается и может быть близкой к спектрально-ограниченной (1.83 пс).

Ключевые слова: генерация, лазерная плазма, молекулярные ионы азота, длительность импульса, спектр, пространственный профиль, расходимость.

1. Введение

Генерация в воздушной лазерной плазме на первой отрицательной системе (переход $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$) ионов молекулярного азота была впервые получена в 2011 г. при накачке коротким и интенсивным ИК лазерным импульсом на длинах волн в средней ИК области ($\lambda = 1.2 - 2.9$ мкм) [1]. Для возникновения генерации использовалось дополнительное (затравочное) излучение на третьей или пятой гармониках накачки, длина волны которого совпадала с соответствующим переходом иона молекулярного азота. С тех пор многие исследователи занимаются изучением генерации [2–6], поскольку такой источник излучения имеет большой потенциал для зондирования атмосферы. Данное излучение проявляется в виде когерентного импульса пикосекундной длительности в прямом направлении и возникает в основном на длинах волн 391.4 и 427.8 нм, которые соответствуют переходам $B^2\Sigma_u^+(v' = 0) - X^2\Sigma_g^+(v = 0, 1)$, где v и v' – колебательные квантовые числа верхнего и нижнего электронных состояний. Генерация была получена как в присутствии внешнего затравочного импульса [2, 4], так и без него [3, 5, 6]. Для случая без внешнего запускающего импульса считается, что в качестве него выступает излучение суперконтинуума (СК), возникающего в лазерной плазме одновременно с излучением ионов молекулярного азота.

Практически во всех работах ширина спектра генерации на длинах волн 391.4 и 427.8 нм обычно составляет ~ 0.3 нм и мало зависит от условий эксперимента [1–3, 7]. Пространственный профиль генерации на длине волны 391 нм близок к гауссову с расходимостью ~ 20 мрад [6, 8]. Энергия генерации находится на микроджоульном уровне [3, 9]. Измерения длительности импульса генерации

показали, что на длинах волн 391 и 428 нм она зависит от давления азота и находится в диапазоне 1.15–7.8 пс (FWHM) [4, 5, 7, 9–11].

До настоящего времени не утихают споры о физических механизмах возникновения генерации в лазерной плазме, которые окончательно так и не установлены. Было предложено несколько механизмов создания инверсной населенности в лазерной плазме. К основным можно отнести: создание инверсии посредством электронного перестолкновения с ионом при фотоионизации [7, 10]; генерация без инверсии через поляризационную связь между возбужденным уровнем $B^2\Sigma_u^+$ и промежуточным уровнем $A^2\Pi_u$ [12, 13]; создание инверсии за счет расселения фотонами накачки нижнего уровня $X^2\Sigma_g^+$ на уровень $A^2\Pi_u$ [14]. Но все они не лишены изъяна и не воспринимаются научным сообществом как окончательный вариант.

Для установления механизма генерации необходимо знать как можно больше информации о ее спектральных, пространственных, энергетических и временных параметрах.

Настоящая статья посвящена исследованию этих характеристик при генерации на длине волны 391.4 нм в чистом азоте для различных значений удельной мощности накачки, давления азота и размеров лазерной плазмы.

2. Аппаратура и методика экспериментов

В экспериментах использовалась титан-сапфировая лазерная система (Avesta Project), которая формировала импульс линейно поляризованного (в горизонтальной плоскости) излучения длительностью 70 фс на длине волны 950 нм и с энергией $E = 4 - 10$ мДж. Диаметр пучка был равен 15 мм, частота следования импульсов 10 Гц. Экспериментальная схема приведена на рис. 1. Для создания лазерной плазмы излучение фокусировалось плоско-выпуклой линзой Л1 с фокусным расстоянием $F = 15, 30$ или 40 см в газовую камеру с азотом. После создания плазмы выходное излучение коллимировалось, фильтровалось и собиралось линзами Л2 и Л3 с фокусными рас-

И.А.Зятиков, В.Ф.Лосев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2023 г., после доработки – 16 августа 2023 г.

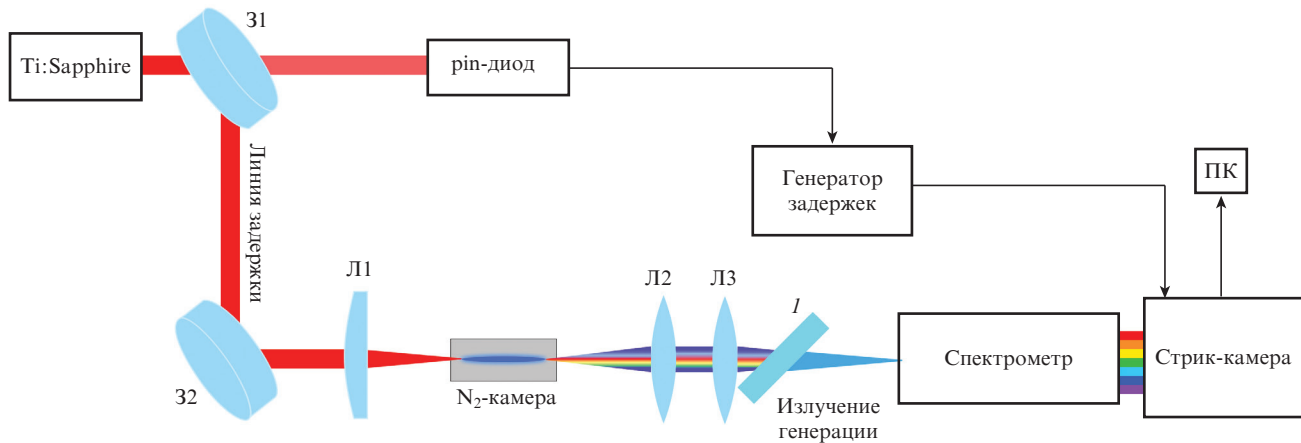


Рис.1. Схема эксперимента: 31 и 32 – поворотные зеркала; Л1, Л2 и Л3 – фокусирующая, коллимирующая и собирающая линзы соответственно; l – дихроичное зеркало; ПК – персональный компьютер.

стояниями $F = 20$ см. Для фильтрации накачки использовалось дихроичное зеркало с высокими коэффициентами отражения (более 98%) на 950 нм и пропускания (более 94%) на 391 нм. Полученный сигнал записывался на стрик-камеру (Hamamatsu Universal Streak Camera C10910), соединенную со спектрометром (Acton SpectraPro SP-2300). По сигналу с pin-диода камера запускалась на частоте следования импульсов накачки. Оптическая линия задержки использовалась для компенсации времени срабатывания блока временной развертки стрик-камеры. При этом профиль лазерного пучка накачки практически не изменялся после ее прохождения. Временное разрешение стрик-камеры составляло 0.8 пс согласно нашим измерениям длительности импульса второй гармоники накачки [11]. Измерения проводились при ширине щели хронографа 5 мкм в режиме одиночного импульса. Дополнительно спектральные измерения проводились на узкополосном спектрометре Ocean Optics HR4000 (330–425 нм) с разрешением 0.035 нм. Для измерений, близких к разрешающей способности прибора B , реальное значение длительности C оценивалось из выражения $C = (A^2 - B^2)^{1/2}$, где A – это измеренная длительность импульса. Энергия пучка накачки регистрировалась измерителем энергии Gentec.

Для получения пространственного профиля генерации в дальней зоне на длине волны 391.4 нм сигнал проходил через систему оптических фильтров и затем фотографировался цифровой камерой (Canon EOS 7D). Экспериментальная расходимость излучения измерялась в дальней зоне по размеру пятна на расстоянии z от лазерной плазмы и рассчитывалась по формуле $\Theta_{\text{exp}} = d_z/z$, где d_z – это диаметр пятна генерации при данном фокусном расстоянии. Кроме этого, расходимость определялась из размеров лазерной плазмы по формуле $\Theta_{\text{eval}} = dl/l$, где d – диаметр плазменного канала, l – его длина. Геометрические размеры плазменного канала оценивались по фотографиям, сделанным сбоку цифровой камерой.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе нами была проведена оптимизация интенсивности генерации в зависимости от давления азота и энергии накачки. Поведение интенсивности излучения и спектра в зависимости от давления показано

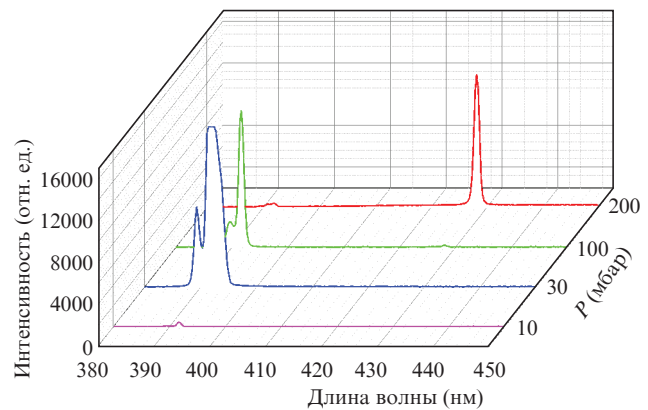


Рис.2. Зависимость спектральной интенсивности излучения от давления азота; $E = 6$ мДж.

на рис.2. Оптимальным давлением P азота для длины волны 391.4 нм было 30 мбар, что хорошо согласуется с литературными данными [12, 15]. Существование оптимального давления, по нашему мнению, связано с тем, что при увеличении давления азота до 30 мбар происходит рост коэффициента усиления выше пороговой величины. Дальнейшее увеличение давления приводит к снижению коэффициента усиления за счет заселения нижнего лазерного уровня $X^2\Sigma_g^+(v=0)$ в процессе столкновительного рассеяния плазменными электронами уровня $X^2\Sigma_g^+(v=1)$. За счет этого, при давлении 200 мбар, генерация на длине волны 391.4 нм практически прекращается, по этой же причине возникает генерация на длине волны 427.8 нм (переход 0–1).

Исследование влияния энергии накачки на интенсивность генерации на длине волны 391.4 нм показало, что она максимальна для энергии в районе 6 мДж (рис.3). Видно, что оптимальная энергия практически не зависит от давления азота. Существование оптимальной энергии накачки, на наш взгляд, связано с превышением пороговой энергии в диапазоне 4–6 мДж, с одной стороны, и нарушением однородности лазерной плазмы при энергии накачки более 6 мДж, с другой стороны (появляется неоднородность интенсивности пучка). Таким образом, в наших экспериментальных условиях при $F = 30$ см для получения максимальной мощности генерации на длине волны 391.4 нм необходимо использовать $P = 30$ мбар и $E = 6$ мДж.

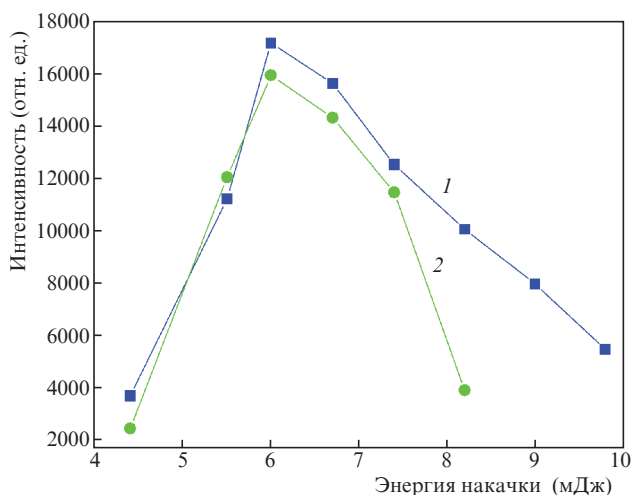


Рис.3. Зависимости интенсивности излучения от энергии накачки при $P = 30$ (1) и 100 (2) мбар.

Исследование спектральных характеристик излучения на длине волны 391.4 нм для всех фокусных расстояний, давлений и энергий накачки показали, что спектр может изменяться в диапазоне 0.14–0.25 нм. На рис.4 приведены спектры генерации при $F = 30$ см и $P = 100$ мбар для разных энергий накачки. Видно, что ширина спектра на полувысоте амплитуды составила 0.32 и 0.14 нм. По нашему мнению, это связано с тем, что генерация в таких условиях реализуется либо на одном, либо на двух вращательных переходах Р-ветви иона молекулярного азота ($\Delta J = -1$).

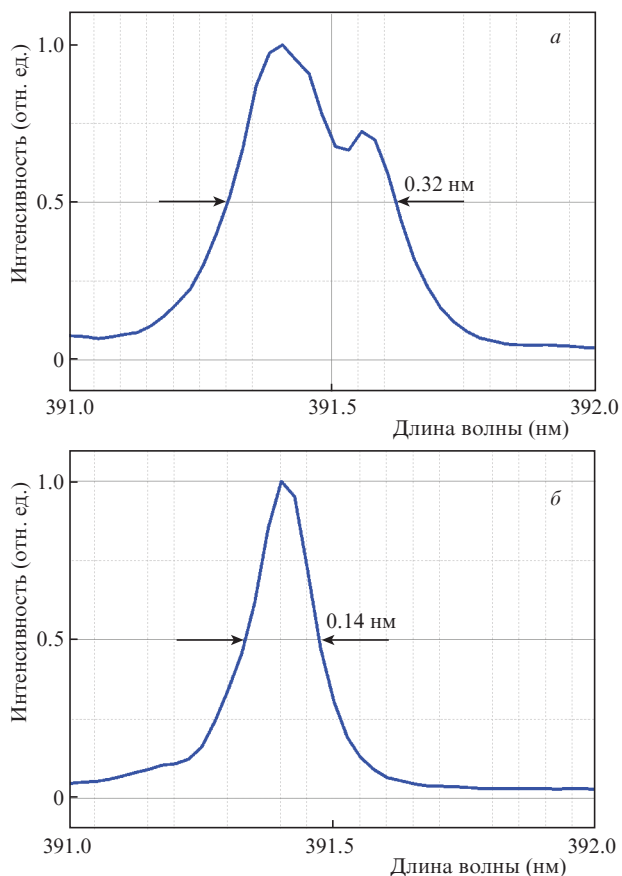


Рис.4. Спектры излучения при $F = 30$ см, $P = 100$ мбар и $E = 8.3$ (а) и 10 мДж (б).

Результаты измерения длительности импульса генерации при различных фокусных расстояниях линзы приведены на рис.5. С учетом разрешающей способности прибора реальное значение длительности импульса генерации для $F = 15, 30$ и 40 см составляет 1.83, 2.78 и 3.5 пс соответственно, что хорошо согласуется с литературными данными [5, 12]. Если мы возьмем измеренную нами спектральную ширину в 0.14 нм, то ей соответствует спектрально-ограниченная длительность в 1.7 пс. Таким образом, измеренная при фокусном расстоянии $F = 15$ см длительность импульса генерации в 1.83 пс близка к спектрально-ограниченной. Заметим, что длительность импульса генерации увеличивается с увеличением фокусного расстояния линзы, т.е. с уменьшением удельной мощности накачки $P_{sp} = P_{pump}/V_{pl}$ и снижением коэффи-

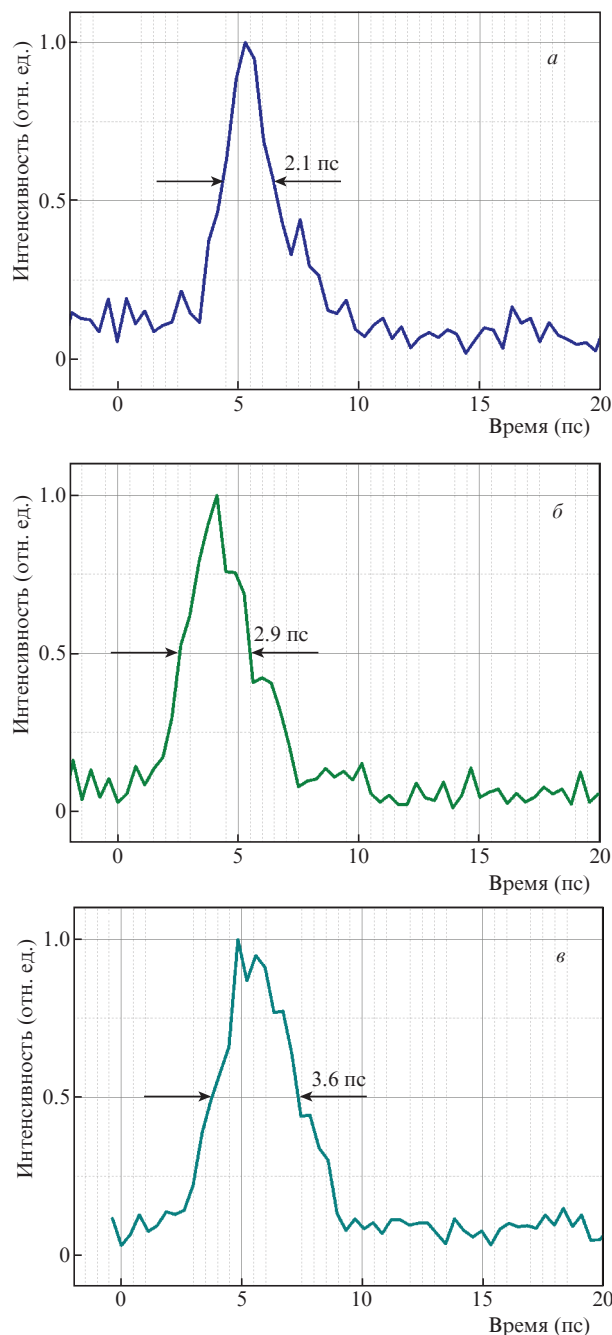


Рис.5. Экспериментально измеренные длительности импульсов генерации при $F = 15$ (а), 30 (б) и 40 см (в); $P = 30$ мбар, $E = 6$ мДж.

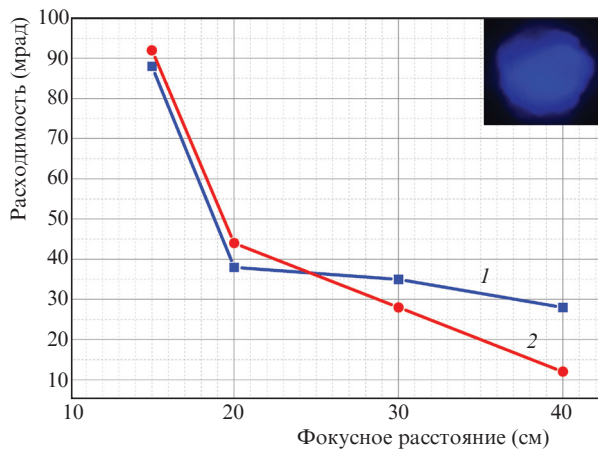


Рис. 6. Зависимости экспериментальной (1) и оценочной (2) расходимости излучения от фокусного расстояния линзы. На вставке показан профиль пучка на длине волны 391.4 нм в дальней зоне; $E = 8$ мДж, $P = 30$ мбар.

циента усиления активной среды. Это повторяет ситуацию с генерацией на длине волны 427.8 нм [16], а именно: длительность импульса генерации зависит от коэффициента усиления, рост которого увеличивает пороговую ширину спектральной линии генерации и, тем самым, сокращает длительность импульса. Следовательно, можно говорить о том, что механизм формирования пикосекундной длительности импульса на длинах волн 391.4 и 427.8 нм при усилении фемтосекундного импульса заправки одинаковый [16].

На рис.6 приведены зависимости расходимости излучения от фокусного расстояния линзы. Расходимость уменьшается с ростом фокусного расстояния линзы, т. е. с увеличением длины лазерной плазмы. Заметим, что длина плазменного канала возрастала с ростом фокусного расстояния линзы с 2.5 до 13 мм, а его диаметр уменьшался с 0.23 до 0.16 мм. Видно, что экспериментальная расходимость излучения очень близка к геометрической расходимости, это обычно характерно для усиленного спонтанного излучения. Однако наши измерения поляризации излучения подтверждают, как и во всех других работах, что излучение полностью поляризовано и совпадает с поляризацией СК. На вставке к рисунку показано типичное распределение интенсивности излучения в дальней зоне. Видно, что распределение интенсивности лазерного излучения имеет форму пятна и близко к гауссову, что говорит о рефракции излучения на плазме и о практи-

чески не заметной роли дифракции, которая обычно наблюдается при более высоком давлении (0.5 – 1 бар) азота или воздуха при генерации на длине волны 427.8 нм [5, 6, 9]. Отметим, что измеренная расходимость при фокусных расстояниях $F = 30$ и 40 см хорошо коррелирует с литературными данными [6, 8].

4. Заключение

Таким образом, в работе были исследованы спектральные, временные, энергетические и пространственные характеристики генерации на ионах молекулярного азота на длине волны 391.4 нм при накачке азота фемтосекундным импульсом излучения на длине волны 950 нм в зависимости от давления, энергии накачки и условий фокусировки ($F = 15, 30$ и 40 см). Для $F = 30$ см определена оптимальная величина давления (30 мбар) и энергии накачки (6 мДж). Показано, что длительность импульса генерации увеличивается с ростом фокусного расстояния линзы от 1.83 до 3.5 пс и может быть близка к спектрально-ограниченной. Изменение ширины спектра излучения обусловлено наличием одной или двух вращательных линий перехода Р-ветви иона молекулярного азота $V^2\Sigma_u^+(v' = 0) - X^2\Sigma_g^+(v = 0)$. Расходимость излучения уменьшается с ростом фокусного расстояния линзы и коррелирует с геометрической расходимостью, определяемой из размеров лазерной плазмы.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-00023.

1. Yao J., Zeng B., Xu H., et al. *Phys. Rev. A*, **84**, 051802 (2011).
2. Ni J., Chu W., Jing C., et al. *Opt. Express*, **21**, 8746 (2013).
3. Wang T.J., Daigle J.F., Ju J., et al. *Phys. Rev. A*, **88**, 053429 (2013).
4. Yao J., Li G., Jing C., et al. *New J. Phys.*, **15**, 023046 (2013).
5. Chu W., Li G., Xie H., et al. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 015301 (2014).
6. Liu Y., Brelet Y., Point G., et al. *Opt. Express*, **21**, 22791 (2013).
7. Li G., Jing C., Zeng B., et al. *Phys. Rev. A*, **89**, 033833 (2014).
8. Liu Y., Ding P., Ibrakovic N., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 203205 (2017).
9. Point G., Liu Y., Brelet Y., et al. *Opt. Lett.*, **39**, 1725 (2014).
10. Lei M., Wu C., Liang Q., et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **50**, 145101 (2017).
11. Ivanov N.G., Zyatikov I.A., Losev V.F., et al. *Opt. Commun.*, **456**, 124573 (2020).
12. Mysyrowicz A., Danylo R., Houard A., et al. *APL Photonics*, **4**, 110807 (2019).
13. Richer M., Lytova M., Morales F., et al. *Optica*, **7**, 586 (2020).
14. Yao J., Jiang S., Chu W., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 143007 (2016).
15. Yao J., Chu W., Liu Z., et al. *Appl. Phys. B*, **124**, 73 (2018).
16. Zyatikov I.A., Losev V.F., Lubenko D.M., et al. *Opt. Lett.*, **45**, 6518 (2020).