

УДК 533.9.082

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ NH_3 -ЛАЗЕР С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ “ДЛИННЫМИ” (~ 100 МКС) ИМПУЛЬСАМИ CO_2 -ЛАЗЕРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

© 2022 г. Д. А. Зазымкина^{а,*}, А. А. Ионин^а, И. О. Киняевский^а, Ю. М. Климачев^а, А. Ю. Козлов^а,
Д. И. Кормашова^а, А. А. Котков^а, Ж.-Ф. Лампин^б, Ю. А. Митягин^а, С. А. Савинов^а,
А. М. Сагитова^а, Д. В. Синицын^а, М. В. Ионин^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

^бИнститут электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, Вильнёв-д'Аск, 59652 Франция

*E-mail: zazymkinada@lebedev.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Впервые реализована генерация терагерцового NH_3 -лазера с оптической накачкой “длинными” (~ 100 мкс) импульсами электроионизационного CO_2 -лазера, причем одновременно с наносекундным разрешением измерены импульсы излучения NH_3 -лазера и “длинные” импульсы CO_2 -лазера-накачки. Определены длительности генерации и задержки начала генерации NH_3 -лазера относительно начала импульса накачки в зависимости от энергии CO_2 -лазера. Измерены длины волн терагерцового излучения NH_3 -лазера при накачке линией 9R(30) CO_2 -лазера: 67.2, 83.8 и 88.9 мкм.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, NH_3 -лазер, CO_2 -лазер, диагностика плазмы

DOI: 10.56304/S2079562922010432

ВВЕДЕНИЕ

Для решения широкого круга задач (например, диагностики плазмы [1], дистанционного детектирования взрывчатых веществ за препятствиями [2], спектроскопии и др.) представляет интерес разработка источников лазерного излучения в терагерцовом диапазоне. Одним из наиболее хорошо изученных в спектроскопическом отношении газовых лазеров такого типа является NH_3 -лазер. Терагерцовое излучение на переходах NH_3 возможно получить за счет оптической накачки CO_2 -лазером, который является эффективным и хорошо отработанным в техническом плане источником излучения. В работе [3] обсуждаются параметры лазера терагерцового диапазона, удовлетворяющие условиям проведения диагностики плазмы в электродинамических ускорителях и токамаках с сильным магнитным полем. Выполнено численное моделирование генерации терагерцового излучения NH_3 -лазера с длиной волны 151.5 мкм под действием мощной импульсной оптической накачки излучением CO_2 -лазера на переходе 10P(32) с длительностью генерации от 0.1 до 0.5 мкс. Для условий расчета время колебательной релаксации составляло 0.2 мкс, а время вращательной релаксации – 0.01 мкс. Эти времена оказываются сравнимы с характерным време-

нем импульса накачки 0.1 мкс, поэтому длительность генерации NH_3 -лазера выше в два раза длительности оптической накачки. При увеличении длительности импульса накачки указанные времена релаксации становятся меньше характерного времени импульса накачки, поэтому временная зависимость интенсивности терагерцового излучения по форме повторяет излучение накачки. Проведенные расчеты показали, что добавление буферного газа (аргон или азот) в ячейку с аммиаком позволяет примерно в полтора раза увеличить эффективность преобразования, которая может достигать 4%.

В работе [4] резонатор терагерцового излучения был организован вдоль оси газовой ячейки с NH_3 , а поперечный зигзагообразный резонатор обеспечивал оптическую накачку импульсами ТЕА CO_2 -лазера с энергией ~ 0.38 Дж на линии 10P(32) с длительностью ~ 200 нс. В реализованной оптической схеме использовалась модуляция добротности резонатора (МДР) для терагерцового излучения. Пиковые значения мощности на длине волны 152 мкм приближались к 10 кВт при импульсах длительностью 5 нс и были получены при частоте повторения импульсов 12 Гц. Было исследовано оптимальное время включения МДР относительно начала импульса CO_2 -лазера, кото-

рое имело, как отмечал автор, “удивительную” задержку 1.5–2.0 мкс, т.е. на порядок большую, чем длительность самого импульса накачки.

Научная группа из Huazhong University of Science and Technology [5, 6] упростила оптическую схему лазерной системы, отказавшись от сложных зеркал с металлической сеткой [5]. При этом были получены следующие линии: 90 мкм (130 мДж) при накачке линией 9R(16) и 151.5 мкм (204 мДж) при накачке линией 10P(32). Эффективность преобразования фотонов, которая определялась по методике, предложенной в [7], составляла 6 и 18% соответственно. Профиль пучка терагерцового излучения с длиной волны 90 мкм имел вид, близкий к Гауссову. Дальнейшее улучшение схемы [6] позволило увеличить эффективность преобразования фотонов до 41.5% для терагерцового излучения с длиной волны 151.5 мкм.

Применение мощного импульсного ТЕА CO_2 -лазера позволило получить генерацию на десятках переходах в оптических ячейках с NH_3 за счет использования почти “глухих” терагерцовых резонаторов с вводом и выводом излучения через миллиметровые отверстия (см., например, [8, 9]). В частности, было обнаружено, что при накачке линией 9R(30) NH_3 -лазер может генерировать более десятка длин волн терагерцового диапазона, а при накачке линией 9R(16) — до пяти. На многих других линиях накачки было получено от 2 до 4 линий генерации NH_3 -лазера.

Таким образом, было показано, что NH_3 -лазер с оптической накачкой может работать на большом числе линий терагерцового диапазона с высокой эффективностью, в том числе на линиях, подходящих для диагностики плазмы. Однако необходимо отметить, что каскадный механизм генерации терагерцового излучения в NH_3 -лазере при оптической накачке излучением CO_2 -лазера подробно не исследовался. Временные формы импульсов терагерцового NH_3 -лазера были получены либо при короткой длительности накачки (~200 нс) [4], либо при длительности накачки до ~3 мкс, но временном разрешении не лучше ~20 нс [10].

Для диагностики плазмы представляет большой интерес NH_3 -лазер, работающий сразу на нескольких длинах волн, что позволит отказаться от оптической схемы сведения лучей от разных лазеров, традиционно используемой в таких экспериментах (см., например, [1]). Для организации многочастотной терагерцовой генерации имеет смысл проведение исследования характеристик NH_3 -лазера при накачке импульсами CO_2 -лазера с длительностью, на порядки превышающими время колебательной релаксации (~0.1 мкс), т.е. организация квазинепрерывного режима накачки.

В данной работе нами был впервые реализован такой режим накачки и одновременно измерены с наносекундным разрешением импульсы излучения NH_3 -лазера и импульсы электроионизационного (ЭИ) CO_2 -лазера с длительностью генерации до ~100 мкс, использованного для оптической накачки.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Нами применялась схема оптической накачки, аналогичная использованной в работе [9]. Оптическая схема эксперимента показана на рис. 1.

В эксперименте использовался ЭИ CO_2 -лазер 1 с газовой смесью $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 5$ и давлением смеси 0.30 атм. Плоское глухое зеркало 2 было установлено непосредственно на камеру активной среды 1 ЭИ CO_2 -лазера. Плоскопараллельная пластина 3 из BaF_2 использовалась как Брюстеровское окно. Оптический резонатор CO_2 -лазера состоял из плоского глухого зеркала 2, плоскопараллельной пластинки 4 из ZnSe , зеркала с отверстием 6 и дифракционной решетки 8 (100 штр./мм). Дифракционная решетка 4 обеспечивала генерацию излучения в CO_2 -лазере на одной длине волны. He-Ne-лазер 7 использовался для юстировки оптической схемы. Шкала 9 и полупроводниковый лазер 10 позволяли настраивать длину волны излучения. Дополнительное глухое плоское зеркало 5 было медным, плоские зеркала 11, 12, 13, 19 — золото на стекле. По нашим оценкам, коэффициент вывода излучения из резонатора с помощью плоскопараллельной пластинки 4 в нашем случае составлял ~50%. Плоскопараллельные пластинки из BaF_2 14 и 16 разделяли излучение CO_2 -лазера, отводя его часть для измерения энергии накачки измерителем мощности и энергии 18 (OPHIR 3A-SH) и формы импульса фотодетектором 17 (PEM-L-3, временное разрешение — 0.5 нс). Для фокусировки использовалось сферическое зеркало 15 (радиус кривизны 100 см). Остальная часть излучения (~94%) была направлена на фокусирующую линзу 20 из BaF_2 (фокусное расстояние 9 см) и попала в кювету с аммиаком.

Аммиак содержался в кювете длиной 20 см, ограниченной с одной стороны окном 21 из NaCl , а с другой — окном из лавсана 25 толщиной 0.05 мм, при давлении от 2 до 10 мбар. Внутри кюветы были расположены два плоских латунных зеркала 24 с отверстием в центре 2 мм на расстоянии 12 см друг от друга, через которые осуществлялся ввод излучения накачки (со стороны окна из NaCl) и вывод терагерцового излучения (с другой стороны).

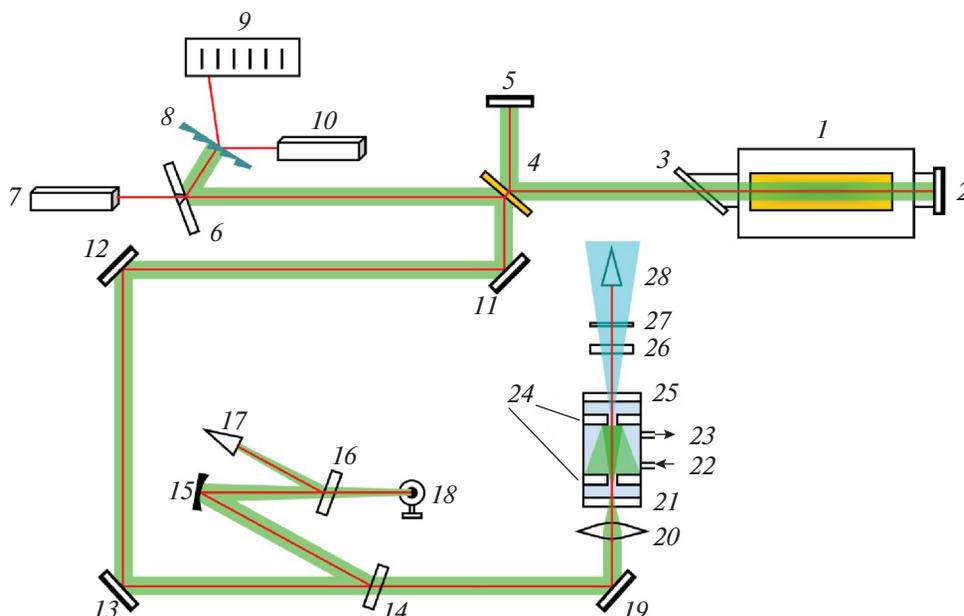


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента: 1 – Активная среда электроионизационного CO₂-лазера; 2, 5 – глухое зеркало; 3, 14, 16 – плоскопараллельные пластины из ВаF₂; 4 – плоскопараллельная пластина из ZnSe; 6 – зеркало с отверстием; 7 – He-Ne-лазер; 8 – дифракционная решетка; 9 – шкала; 10 – полупроводниковый лазер; 11, 12, 13, 19 – плоские зеркала; 15 – сферическое зеркало; 17 – фотодетектор; 18 – измеритель мощности и энергии; 20 – линза; 21 – измеритель давления; 22 – канал для ввода газа; 23 – измеритель давления; 24 – зеркала резонатора в ячейке; 25 – лавсан; 26 – кварцевая пластинка; 27 – черный полиэтилен; 28 – приемник терагерцового излучения.

Излучение CO₂-лазера отсекалось кристаллическим кварцем 26 и черным полиэтиленом 27. Форма импульса NH₃-лазера измерялась приемником терагерцового излучения 28 (болومتر RS 0.4-4 T, ЗАО “Сконтел”, временное разрешение – 1 нс).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения были проведены при накачке излучением CO₂ лазера на линиях 9R(30) ($\lambda \approx 9.22$ мкм) и 9R(16) ($\lambda \approx 9.29$ мкм). Длительность импульсов накачки достигала ~100 мкс, а энергия импульсов накачки – ~1 Дж. Оптимальное давление в кювете с аммиаком для линий 9R(16) и 9R(30) составило 8 и 2 мбар соответственно. Увеличение или снижение давления NH₃ относительно оптимального значения приводило к уменьшению энергии терагерцового излучения. Существовало некоторое промежуточное давление (4.5 мбар), при котором терагерцовое излучение наблюдалось при накачке обеими линиями CO₂-лазера.

Примеры результатов измерений импульсов излучения NH₃-лазера и ЭИ CO₂-лазера представлены на рис. 2 и 3 (давление аммиака 4.5 мбар). На врезках представлены начальные участки импульсов. Временная форма импульсов ЭИ CO₂-лазера откалибрована на измеренное

значения энергии импульсов $E_{\text{имп}}$. Момент времени $t = 0$ соответствует началу импульса ЭИ разряда, длительность которого ~50 мкс. Генерация терагерцового излучения наблюдается в течение наиболее мощной части импульса CO₂-лазера, когда при накачке излучением на линии 9R(16) пиковая мощность превышает ~15 кВт, а при накачке на линии 9R(30) – ~25 кВт. Низкочастотные колебания мощности (~0.5 МГц) в импульсе CO₂-лазера повторяются во временной форме импульса генерации NH₃-лазера (см. врезку к рис. 2). В то же время высокочастотные колебания мощности (~41 МГц) в “длинном” импульсе CO₂-лазера, связанные с межмодовыми биениями [11], повторяются во временной форме импульса генерации NH₃-лазера не всегда (на рис. 2 их нет, а на рис. 3 они есть). По-видимому, это связано с отличиями в возможностях измерительной аппаратуры: использованный нами ИК-приемник имел в 2 раза лучшее разрешение по времени (0.5 нс) и в ~10 раз лучшее соотношение сигнал/шум, чем терагерцовый приемник. Если из рис. 2 видно, что форма излучения NH₃-лазера повторяет форму наиболее мощной части импульса накачки, то на рис. 3 мы наблюдаем два явно выраженных максимума в генерации терагерцового излучения при достаточно стабильной мощности излучения CO₂-лазера. Мы предполагаем, что это проявление каскадного механизма

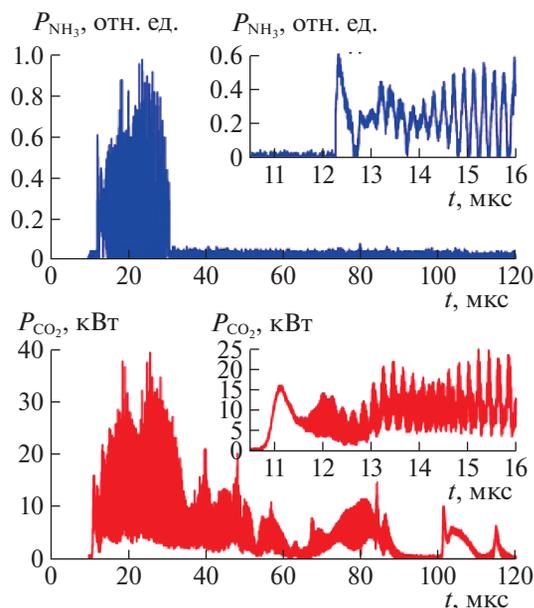


Рис. 2. Импульсы излучения CO_2 -лазера (нижний) и NH_3 -лазера (верхний) при накачке линией 9R(16). $E_{\text{имп}} = 0.59$ Дж.

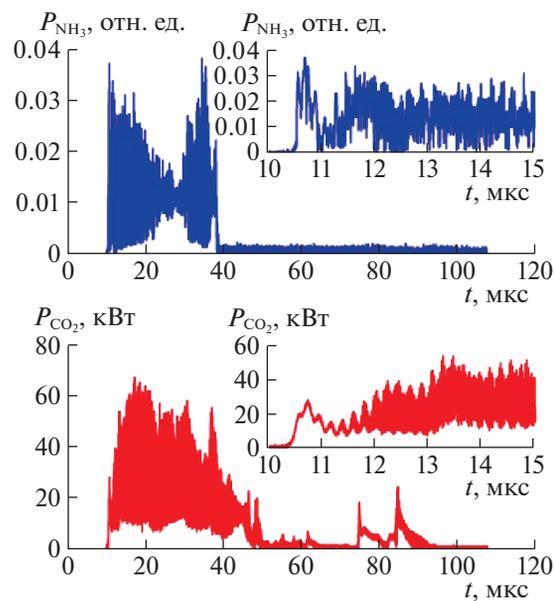


Рис. 3. Импульсы излучения CO_2 -лазера (нижний) и NH_3 -лазера (верхний) при накачке линией 9R(30). $E_{\text{имп}} = 0.91$ Дж.

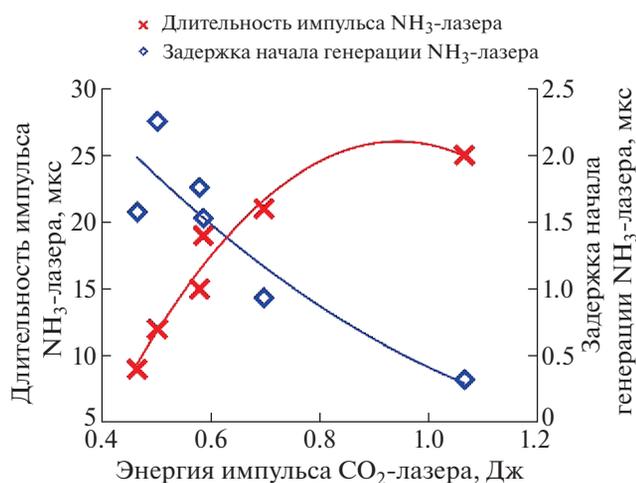


Рис. 4. Зависимость длительности и задержки начала генерации импульса NH_3 -лазера от энергии импульса CO_2 -лазера при накачке линией 9R(16).

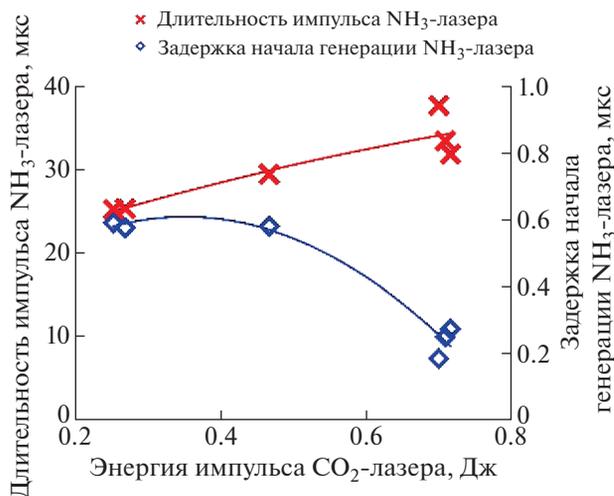


Рис. 5. Зависимость длительности и задержки начала генерации импульса NH_3 -лазера от энергии импульса CO_2 -лазера при накачке линией 9R(30).

генерации NH_3 -лазера, предложенного для объяснения многочастотной генерации при накачке излучением именно этой линией CO_2 -лазера, наблюдавшейся, в частности, в работе [8].

На рис. 4 и 5 представлены зависимости задержки начала генерации относительно начала импульса накачки и длительности импульсов NH_3 -лазера от энергии импульса CO_2 -лазера для линий накачки 9R(16) (а) и 9R(30).

Из рис. 3 и 4 видно, что при одних и тех же значениях энергии накачки длительность импульсов NH_3 -лазера была больше при линии 9R(30), чем для линии 9R(16). В обоих случаях задержка начала генерации NH_3 -лазера уменьшалась, а длительность генерации росла с увеличением энергии CO_2 -лазера. Задержка начала генерации NH_3 -лазера составила ~ 0.3 – 2.5 мкс для линии 9R(16) и ~ 0.2 – 0.6 мкс для линии 9R(30). Длительность генерации NH_3 лазера в зависимости

от энергии импульса CO_2 -лазера лежала в диапазоне от 10 до 25 мкс и от 25 до 40 мкс для линий 9R(16) и 9R(30) соответственно.

Для измерения длины волны терагерцового излучения была использована дифракционная решетка 6 штр./мм с углом блеска 12° . Терагерцовое излучение, выходящее из газовой ячейки с NH_3 , направлялось на дифракционную решетку с помощью параболического зеркала с фокусным расстоянием 150 мм. Отраженное от решетки излучение фокусировалось сферическим зеркалом на высокочувствительный пироэлектрический приемник с временным разрешением ~ 1 мс. Точность контроля угла поворота дифракционной решетки составляла 0.02° . Измерение спектра терагерцового излучения мы решили провести прежде всего при накачке излучением на линии 9R(30) CO_2 -лазера, т.к. в этом случае по результатам более ранних исследований наблюдалось максимальное число линий генерации NH_3 -лазера в терагерцовом диапазоне. Кроме этого, и мы наблюдали необычную форму генерации при накачке излучением именно на этой линии (см. рис. 3). Полученный спектр представлен на рис. 6.

Были зафиксированы три линии терагерцового излучения NH_3 с длиной волны 67.2 ± 1.7 , 83.8 ± 1.7 и 88.9 ± 1.7 мкм, наиболее сильной из которых оказалась линия на 83.8 мкм. Идентификация переходов проведена по результатам работы [8], названия переходов представлены на рис. 6 над соответствующими столбцами диаграммы. В данных условиях накачки основная энергия терагерцового излучения получалась на так называемом “refilling” переходе, т.е. переходе между уровнями основного колебательного состояния молекул NH_3 за счет выравнивания неравновесности населенностей, вызванной забрасыванием молекул NH_3 излучением CO_2 -лазера на первое возбужденное колебательное состояние ν_2 . Необходимо отметить, что зафиксированные нами длины волн не исключают генерации и на других терагерцовых переходах. Во-первых, возможности детектирования ограничены характеристиками отражательной способности используемых дифракционных решеток, а во-вторых, спектр генерации терагерцового излучения сильно зависит от давления NH_3 в ячейке. В частности, в нашем случае при прочих равных условиях, увеличение давления NH_3 до 5.0 мбар привело к увеличению энергии терагерцового сигнала на длинах волн 67.2 и 88.9 мкм в 2 раза, а линия на 83.8 мкм пропала совсем. Поэтому, по-видимому, на рисунке 3 мы могли наблюдать генерацию как минимум двух каскадно-связанных линий первого возбужденного колебательного состояния ν_2 , в том числе на 67.2 и 88.9 мкм. Более детальные выводы можно сделать только в случае исследования временной формы терагерцового излучения с

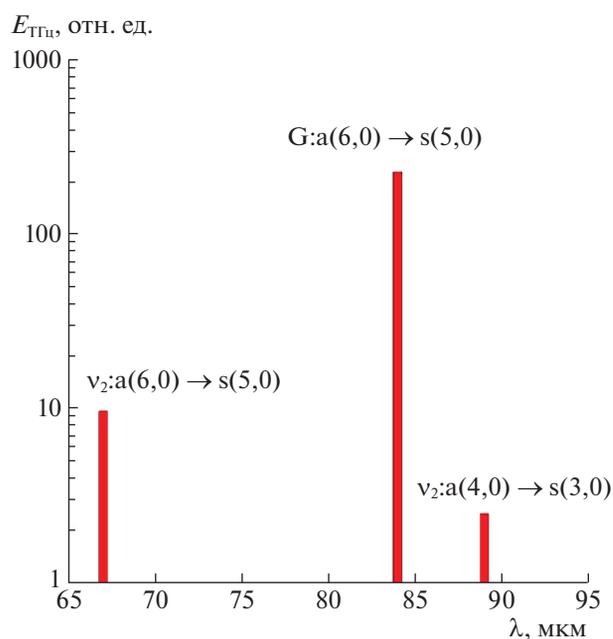


Рис. 6. Спектр терагерцового излучения, полученный при накачке линией 9R(30) CO_2 -лазера, давление аммиака 2.5 мбар.

наносекундным разрешением на каждой из возможных длин волн генерации NH_3 -лазера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе были одновременно измерены с наносекундным разрешением импульсы терагерцового излучения NH_3 -лазера и “длинные” (~ 100 мкс) импульсы ЭИ CO_2 -лазера, использованного для оптической накачки. Задержка начала генерации NH_3 -лазера уменьшалась, а длительность генерации росла с увеличением энергии импульса CO_2 -лазера. Задержка начала генерации NH_3 -лазера составила ~ 0.3 – 2.5 мкс для линии 9R(16) и ~ 0.2 – 0.6 мкс для линии 9R(30). Длительность генерации NH_3 -лазера в зависимости от энергии импульса CO_2 -лазера лежала в диапазоне от 10 до 25 мкс и от 25 до 40 мкс для линий 9R(16) и 9R(30) соответственно.

Также были измерены длины волн терагерцового излучения NH_3 -лазера при накачке линией 9R(30) CO_2 -лазера, оказавшиеся равными 67.2 мкм, 83.8 мкм, 88.9 мкм. Наиболее сильной из полученных линий была линия на 83.8 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-52-16019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Верещински З., Герасимов В.Г., Горбунов Е.П. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. No. 2. С. 198.*
2. *Federici J.F. et al. Counterterrorist Detection Techniques of Explosives. Ed. by Yinon J. 2007. Amsterdam: Elsevier Science. Chap. 11. P. 323–366.*
3. *Mishchenko V.A. et al. // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. No. 6. P. 460–465.*
4. *Wilson T.E. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1993. V. 14. No. 2. P. 303–310.*
5. *Jiu Z. et al. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2010. V. 31. No. 12. P. 1422–1426.*
6. *Miao L. et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7854. P. 78540F.*
7. *Hodges D.T., Foote F.B., Reel R.D. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 29. P. 662.*
8. *Gullberg K., Hartmann B., Kleman B. // Phys. Scr. 1973. V. 8. P. 177.*
9. *Nishi Yo. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. P. 719.*
10. *Woskoboinikow P., Machuzak J., Mulligan W. // IEEE J. Quantum Electron. 1985. V. 21. No. 1. P. 14–17.*
11. *Beairsto C. et al. // Quantum Electron. 1997. V. 27. No. 7. P. 614–620.*

Terahertz NH₃ Laser Optically Pumped by “long” (~100 μs) CO₂ Laser Pulses for Plasma Diagnostics

**D. A. Zazymkina^{1, *}, A. A. Ionin¹, I. O. Kinyaevskiy¹, Yu. M. Klimachev¹, A. Yu. Kozlov¹,
D. I. Kormashova¹, A. A. Kotkov¹, J.-F. Lampin², Yu. A. Mityagin¹, S. A. Savinov¹,
A. M. Sagitova¹, D. V. Sinitsyn¹, and M. V. Ionin¹**

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex, France*

**e-mail: zazymkinada@lebedev.ru*

Received June 29, 2021; revised July 6, 2021; accepted July 8, 2021

Abstract—A terahertz NH₃ laser optically pumped by a “long” (~100 μs) pulse of an electron-beam-controlled discharge CO₂ laser was for the first time launched, the NH₃- and CO₂ laser pulses being simultaneously measured with nanosecond resolution. The NH₃ laser pulse duration and its lasing delay relative to the pump pulse beginning were measured versus the CO₂ laser pulse energy. The terahertz emission wavelengths of the NH₃ laser pumped by 9R(30) CO₂ laser line were identified – 67.2, 83.8, and 88.9 μm.

Keywords: terahertz radiation, NH₃ laser, CO₂ laser, plasma diagnostics