

УДК 533.9

СВЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ, СОЗДАВАЕМОГО МОЩНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

А. В. Водопьянов, М. Ю. Глявин, А. Г. Лучинин, С. В. Разин, А. В. Сидоров, А. П. Фоклин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В интервале длин волн $200 \div 650$ нм исследовано свечение плазмы импульсного разряда в азоте, возникающего под действием мощного сфокусированного излучения гиротрона терагерцового диапазона (частота излучения $0,67$ ТГц, длительность импульса 20 нс, мощность 40 кВт). Давление в разрядной камере варьировалось в пределах от $0,1$ до 350 торр. Обнаружено, что при высоких (более 50 торр) давлениях после окончания терагерцового импульса гиротрона существует длительное (в течение $1,0 \div 1,5$ мс) немонотонное послесвечение, интенсивность которого может значительно (в несколько раз), превосходить интенсивность свечения плазмы во время воздействия на неё импульса терагерцового излучения. При давлениях ниже 50 торр длительность послесвечения оказывается существенно меньше — порядка нескольких десятков микросекунд. Наблюдаемое длительное послесвечение представляет собой излучение в некоторых колебательных полосах второй положительной системы N_2 и обусловлено, по-видимому, процессами ассоциативного возбуждения электронных уровней молекул азота с участием долгоживущих метастабилей $N_2(A^3\Sigma_u^+)$.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы были созданы мощные импульсные гиротроны терагерцового диапазона частот [1–3], что дало возможность начать исследования газоразрядных явлений в квазиоптических пучках терагерцовых волн. Плотная плазма, создаваемая терагерцовым волновым пучком, является новым, малоизученным объектом физики газового разряда, поэтому её исследования представляют фундаментальный интерес. В ряде работ [4–8] изучался самостоятельный и инициированный пробой газа и возникающий при этом разряд в сфокусированных пучках терагерцового излучения гиротронов, исследовались временные и пространственные особенности свечения разрядной плазмы при различных давлениях и в различных областях спектра. В качестве рабочего газа в этих экспериментах использовался аргон. Было экспериментально показано, что такой разряд может являться интенсивным источником как оптического, так и ультрафиолетового/вакуумного ультрафиолетового излучений [6–8]. Кроме того, в этих работах был реализован разряд в неоднородном потоке газа. При этом удалось получить локализованный разряд с характерными размерами порядка 1 мм, генерирующий излучение с мощностью до 10 кВт в диапазоне длин волн $112 \div 180$ нм, что может представлять интерес с прикладной точки зрения.

Не меньший интерес вызывают исследования разряда, возникающего под действием мощного сфокусированного пучка терагерцового излучения в молекулярных газах. В данной работе представлены первые результаты изучения такого разряда в азоте. Определены условия зажигания разряда, исследована динамика свечения разрядной плазмы в различных спектральных интервалах и при различных давлениях, предложено качественное объяснение наблюдаемых экспериментальных фактов.

* sevraz@appl.sci-nnov.ru

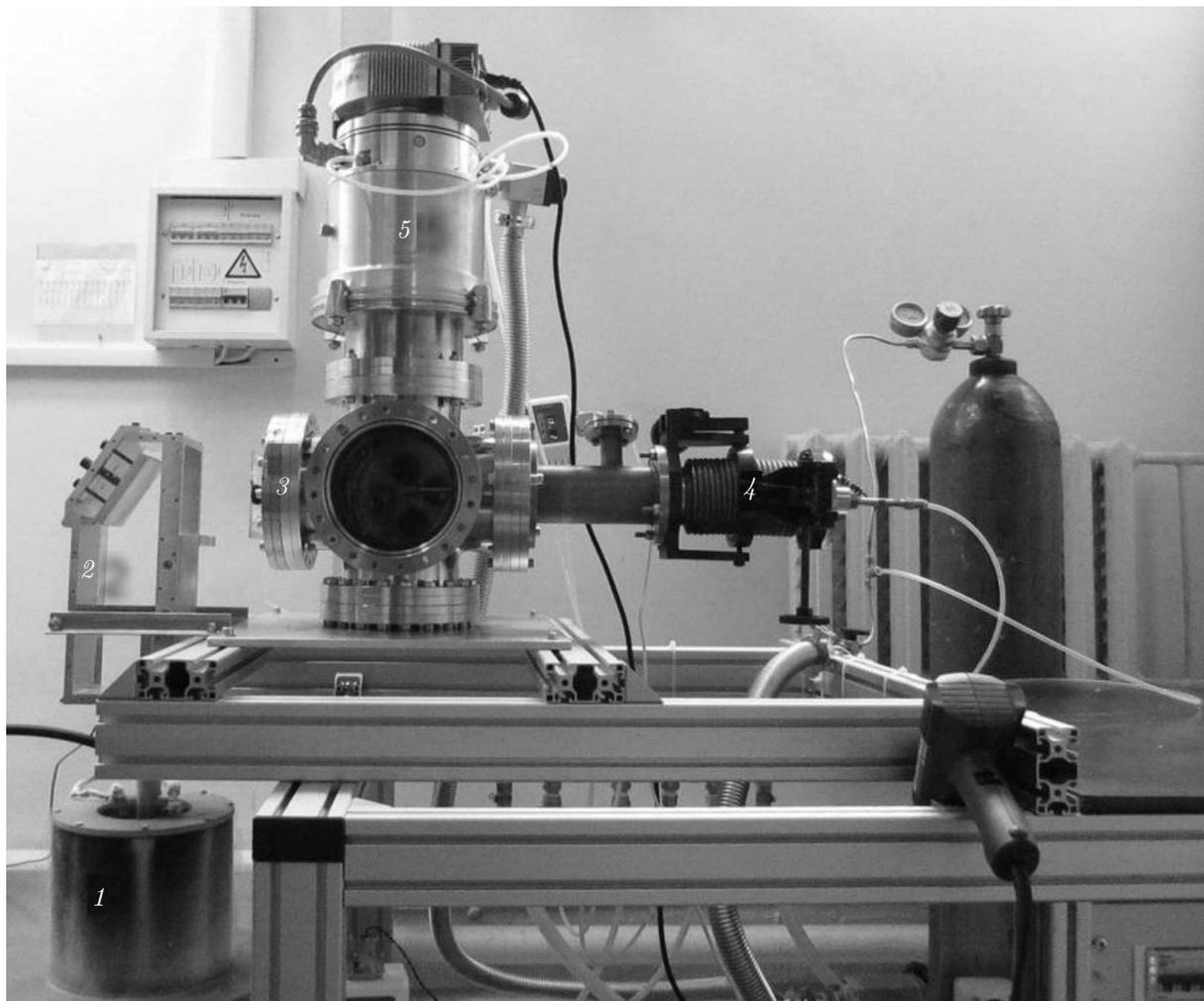


Рис. 1. Экспериментальная установка (фото): 1 — гиротрон, 2 — квазиоптический преобразователь, 3 — разрядная камера с окном для оптической диагностики свечения разряда, 4 — система напуска рабочего газа с 3-координатным вакуумным узлом для юстировки дополнительного параболического зеркала, 5 — турбомолекулярный насос

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (см. рис. 1) подробно описана в работе [5]. Источником терагерцовых волн (частота 0,67 ТГц) служил импульсный гиротрон [3] (длительность импульса 20 мкс), излучение которого с помощью квазиоптического преобразователя трансформировалось в гауссов пучок и фокусировалось в разрядную камеру (мощность в пучке составляла 40 кВт). В область фокальной перетяжки пучка помещалось дополнительное параболическое фокусирующее зеркало с апертурой 1 см и фокусным расстоянием 0,8 мм, у которого для удобства наблюдения разряда была вырезана часть отражающей поверхности. Такая фокусирующая система обеспечивала поток мощности до 16 МВт/см^2 , при этом напряжённость действующего электрического поля достигала 80 кВ/см. Свечение разряда диагностировалось с помощью фотоэлектронного умножителя, способного регистрировать излучение в диапазоне длин волн $200 \div 650 \text{ нм}$ с максимумом чувствительности в области $400 \div 420 \text{ нм}$. Кроме того, для анализа спектрального состава излучения плазмы использовались различные оптические фильтры, а также монохроматор-спектрограф

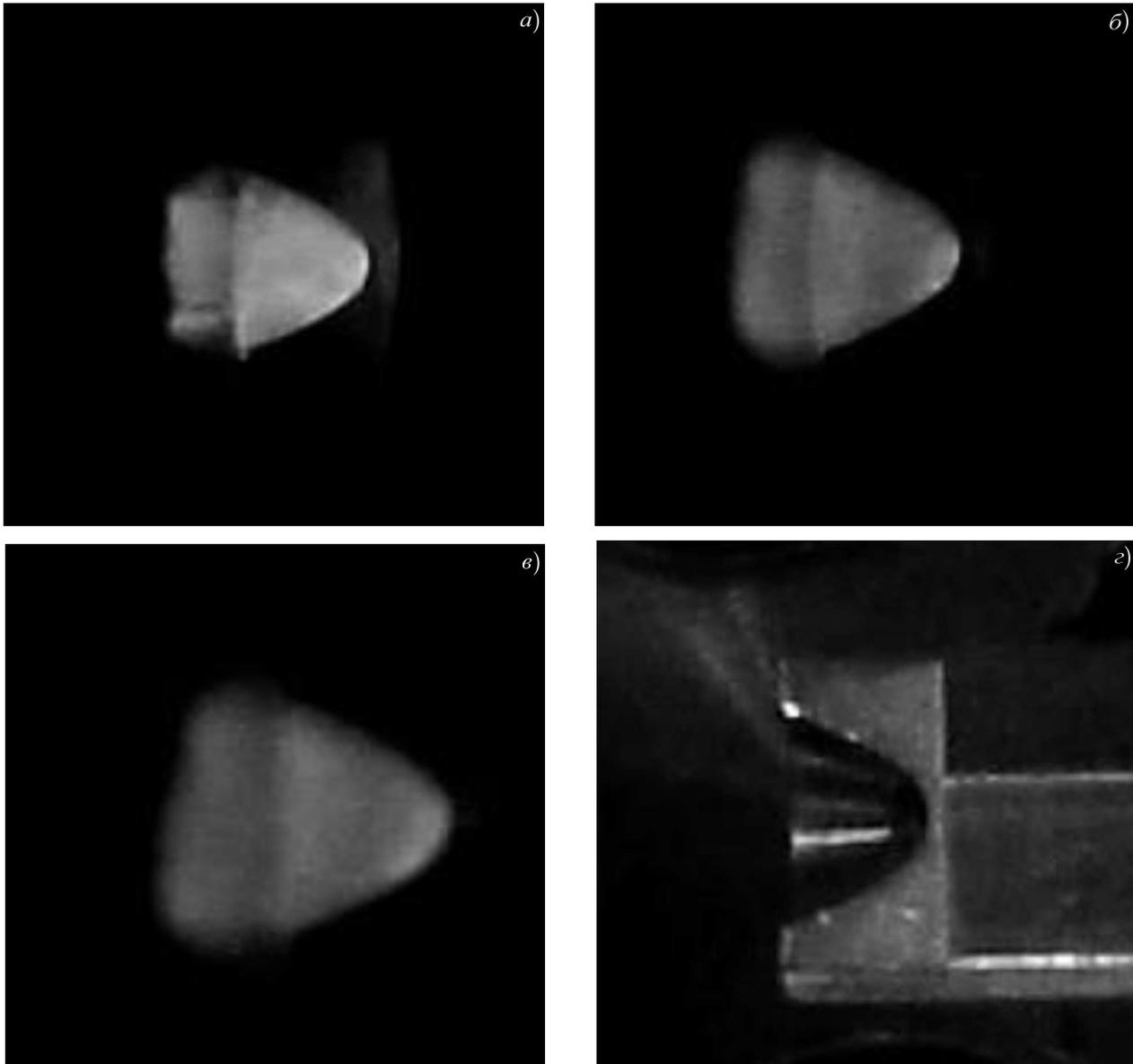


Рис. 2. Типичный вид разряда в неподвижном газе. Давление азота составляет 47 торр (а), 23 торр (б), 18 торр (в), 0,001 торр (разряд отсутствует, г). Видно дополнительное фокусирующее параболическое зеркало, часть которого удалена для обеспечения наилучших условий наблюдения разряда. Терагерцовое излучение распространяется слева направо

«MS 5204i» фирмы «SOL Instruments» с рабочим диапазоном длин волн $200 \div 900$ нм. Откачка газов из разрядной камеры осуществлялась форвакуумным и турбомолекулярным насосами до остаточного давления 10^{-6} торр, рабочее давление в камере варьировалось в пределах от 0,1 до 350 торр. Часть экспериментов (аналогично выполненным ранее в аргоне [5, 7]) была проведена в условиях, когда разряд зажигался в сильнонеоднородном газовом потоке, который формировался при инжекции газа под давлением до 5,5 атм в разрядную камеру через отверстие с диаметром 0,15 мм, расположенное в вершине параболического зеркала.

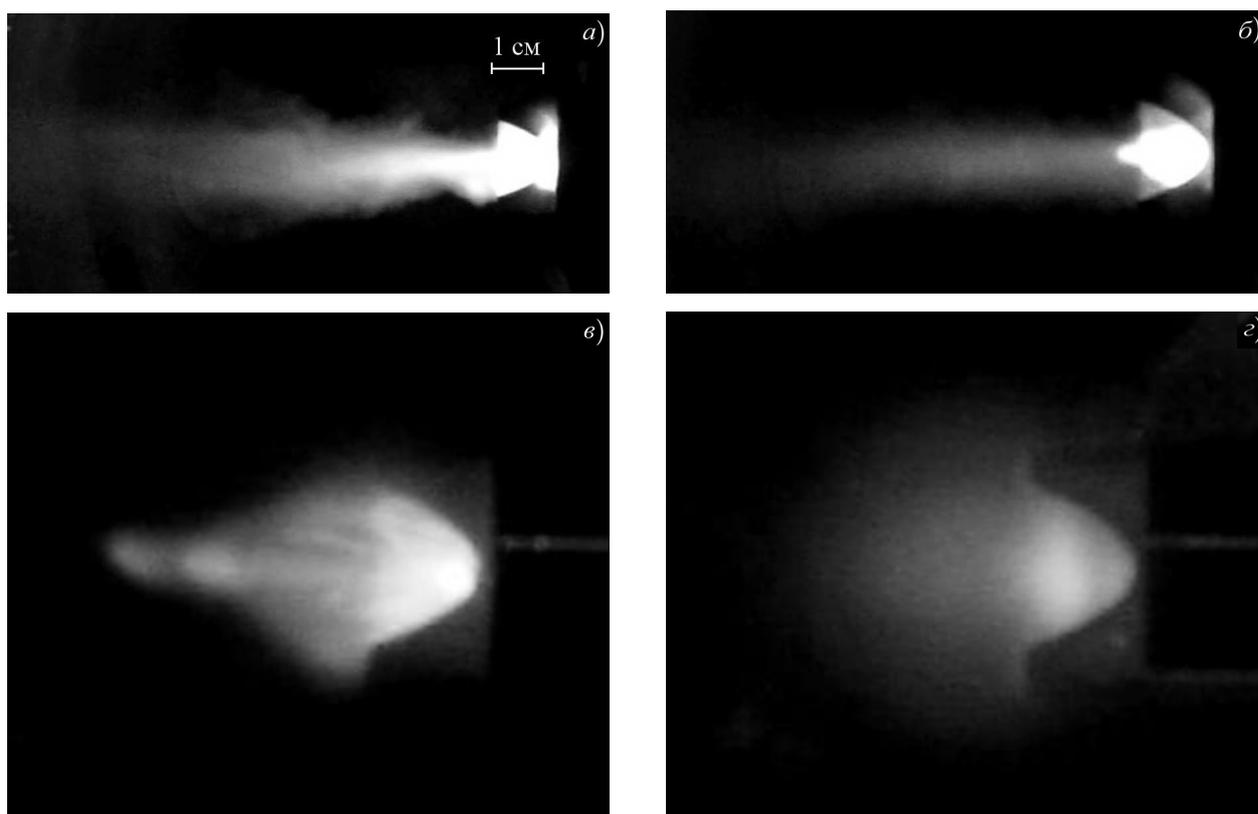


Рис. 3. Интегральные по времени фотографии свечения плазмы разряда в потоке газа в видимом диапазоне частот при различных фоновых давлениях азота в разрядной камере: 100 торр (а), 53 торр (б), 12 торр (в), 0,5 торр (г). Терагерцовое излучение распространяется слева направо

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Фотографии разряда при различных давлениях приведены на рис. 2. Из него видно, что в условиях экспериментов форма свечения слабо зависит от давления газа. В сильнонеоднородном газовом потоке внешний вид разряда существенно отличался. На рис. 3 показаны интегральные по времени фотографии разряда в видимом диапазоне длин волн при наличии потока газа и при различных фоновых давлениях азота на периферии разрядной камеры. Как видно из приведённых фотографий, при высоких фоновых давлениях разряд имеет большой продольный размер, который с понижением давления значительно уменьшается. Такое поведение разряда связано с тем, что при относительно низких фоновых давлениях условия для пробоя выполняются только в небольшой области пространства вблизи отверстия напуска газа, где концентрация молекул велика и разряд не распространяется навстречу терагерцовому излучению, как это имеет место при высоких давлениях. Следует заметить, что аналогичная картина наблюдалась ранее для терагерцового разряда в аргоне [5, 7, 8].

При наличии газового потока разряд зажигался до давления в камере 0,2 торр, в то время как в неподвижном газе (т. е. в условиях отсутствия потока газа) разряд возникал при давлениях не ниже 12 торр.

Эксперименты по исследованию динамики свечения разрядной плазмы как с потоком, так и без потока газа показали, что при относительно высоких давлениях (более 50 торр) после окончания терагерцового импульса гиротрона наблюдается послесвечение, состоящее из двух пиков,

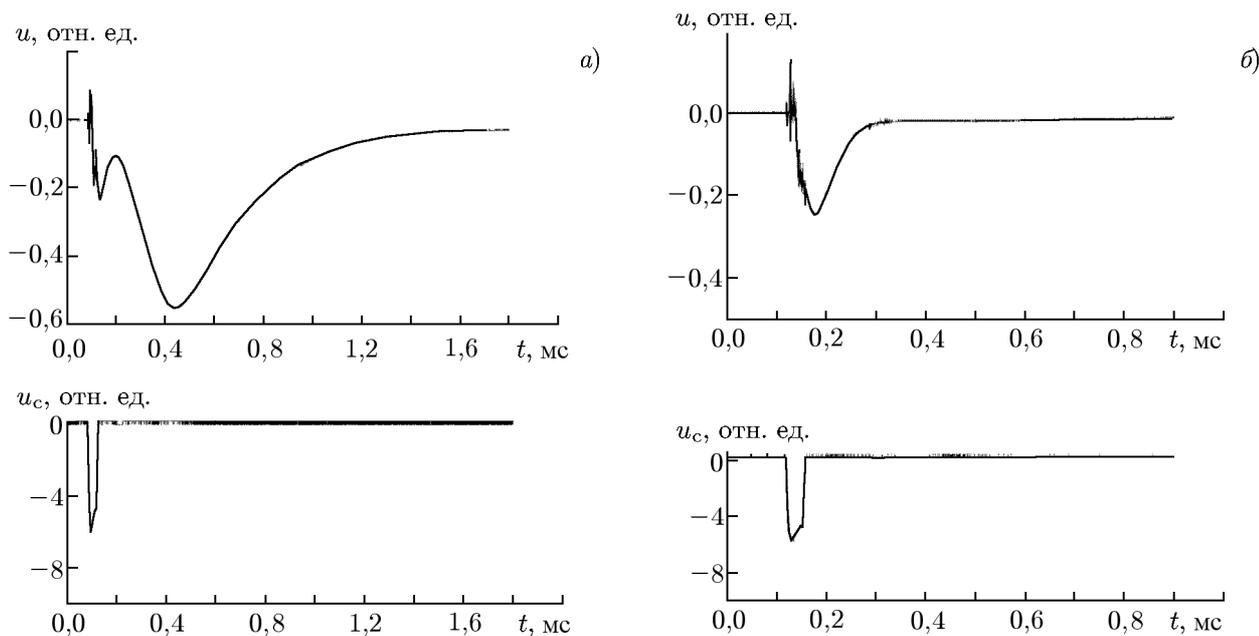


Рис. 4. Временные осциллограммы сигналов: сигнал фотоэлектронного умножителя (сверху) при давлении газа 160 торр (а) и 23 торр (б); импульс высокого напряжения на катод гиротрона (снизу), длительность которого близка к длительности терагерцового излучения

которые имеют существенно различные временные масштабы. Первый пик имеет длительность порядка нескольких десятков микросекунд и сравнительно небольшую амплитуду, в то время как длительность второго пика достигает $1,0 \div 1,5$ мс и его интенсивность может значительно (в несколько раз), превосходить интенсивность свечения плазмы во время импульса (см. рис. 4а). При давлениях ниже 50 торр второй пик послесвечения пропадает, а амплитуда первого пика изменяется незначительно (см. рис. 4б). При этом его длительность с уменьшением давления слабо возрастает и достигает приблизительно 100 мкс при давлении порядка 1 торр.

Спектроскопические исследования с помощью оптических фильтров показали, что длительное послесвечение происходит в ультрафиолетовой области спектра — в диапазоне длин волн λ приблизительно $300 \div 400$ нм, где возможно интенсивное излучение во второй положительной ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) системе азота. Менее продолжительное послесвечение лежит в существенно более широком спектральном интервале — приблизительно $300 \div 650$ нм, в длинноволновой части которого может присутствовать излучение в первой положительной ($B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) системе N_2 . В результате более детальных исследований с помощью монохроматора «MS 5204i» было обнаружено, что наиболее интенсивное длительное свечение (при высоких давлениях) связано с электронно-колебательными полосами $0 \rightarrow 1$ ($\lambda = 357,7$ нм), $4 \rightarrow 7$ ($\lambda = 385,8$ нм) и $3 \rightarrow 7$ ($\lambda = 414,2$ нм) второй положительной системы азота (см. рис. 5а), при этом первый пик послесвечения отсутствует. В то же время излучение в других электронно-колебательных полосах, в частности $0 \rightarrow 0$ ($\lambda = 337,1$ нм), $1 \rightarrow 2$ ($\lambda = 353,7$ нм) и $0 \rightarrow 4$ ($\lambda = 434,4$ нм), вообще не характеризуется сколько-нибудь заметным послесвечением (см. рис. 5б).

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время кинетика процессов, приводящих к описанным экспериментальным фактам, до конца не ясна. Основываясь на литературных данных [9–16], можно предположить, что основную роль в генерации послесвечения играют различные долгоживущие активные частицы

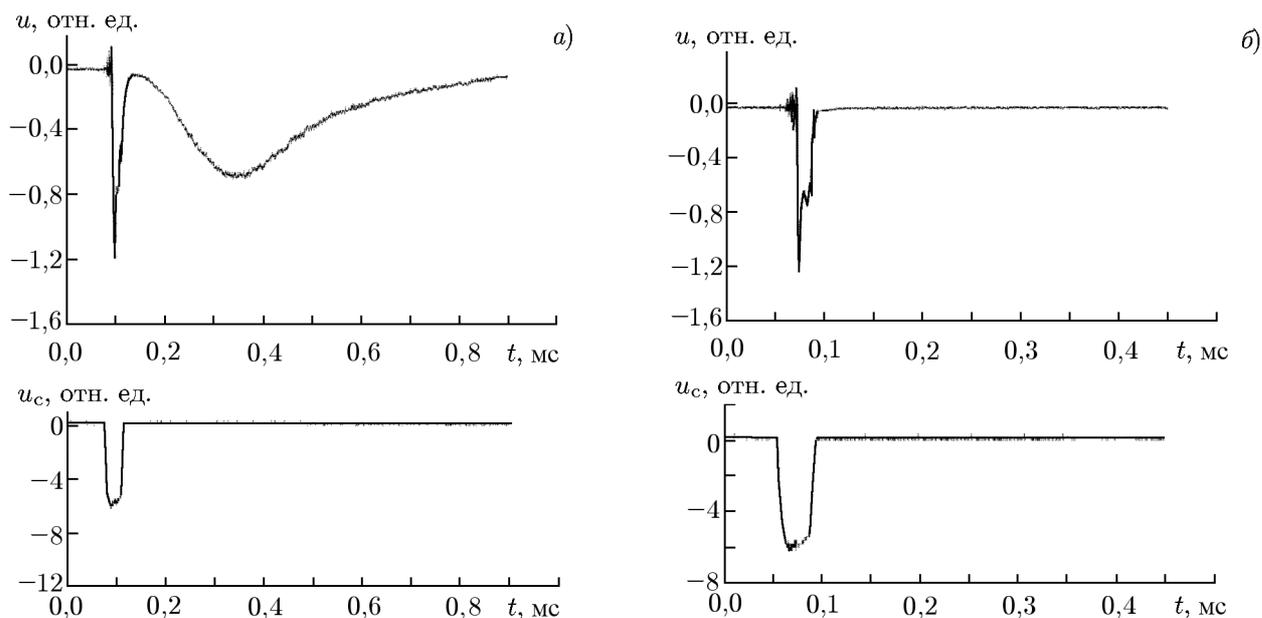


Рис. 5. Свечение разрядной плазмы (сверху) в различных электронно-колебательных полосах второй положительной системы азота (фоновое давление азота 320 торр): (а) полоса $4 \rightarrow 7$ ($\lambda = 385,8$ нм); (б) полоса $0 \rightarrow 0$ ($\lambda = 337,1$ нм) и импульс высокого напряжения на катоде гиротрона (снизу), длительность которого близка к длительности терагерцового излучения

плазмы, такие, например, как атомы азота и электронно-возбуждённые молекулы азота, находящиеся в метастабильных состояниях $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$ и $A^3\Sigma_u^+$.

Относительно короткий (десятки микросекунд) первый всплеск излучения, наблюдаемый в диапазоне длин волн 300–650 нм по окончании импульса гиротрона при всех давлениях газа, может быть связан, например, с реакциями $N_2(a^1\Pi_g) + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow N_2(a^1\Sigma_u^-) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$, $N_2(a^1\Sigma_u^-) + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$ с участием молекул в состояниях $a^1\Sigma_u^-$ и $a^1\Pi_g$, в результате которых происходит заселение уровня $B^3\Pi_g$ с последующим его высвечиванием (первая положительная система N_2 , длинноволновая область названного диапазона). В пользу такого предположения может говорить тот факт, что в условиях экспериментов столкновительное время жизни состояния $a^1\Sigma_u^-$ по порядку величины близко к длительности первого пика в послесвечении. Излучение в коротковолновой области указанного диапазона не является излучением во второй положительной системе азота, т. к. оно не наблюдалось в экспериментах с использованием монохроматора, а может представлять собой, например, атомарное излучение. Что касается второго, длительного (1,0–1,5 мс), всплеска послесвечения, имеющего место только при высоких давлениях газа, то наблюдаемая динамика свечения плазмы может быть качественно объяснена следующим образом. Из литературы [9–16] известно, что при определённых условиях в азотном разряде и его послесвечении в результате различных процессов (таких, например, как $N_2(X^1\Sigma_g^+) + e \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + e$; $N(^4S) + N(^4S) + N_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$; $N(^2P) + N_2(X^1\Sigma_g^+, v \geq 10) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + N(^4S)$ и других) эффективно образуются наиболее долгоживущие метастабильные азота в состоянии $A^3\Sigma_u^+$. В послеразрядный период в результате реакций с их участием, в частности в реакции $N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + N_2(X^1\Sigma_g^+)$ происходит заселение электронного уровня $C^3\Pi_u$, высвечивание которого и приводит к наблюдаемому в экспериментах длительному послесвечению во второй положительной системе азота. Однако детальное объяснение наблюдаемой динамики свечения разрядной плазмы требует, безусловно, дальнейших исследований.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены первые результаты исследований импульсного разряда в азоте, возникающего под действием мощного сфокусированного пучка терагерцового излучения. Экспериментально определены условия зажигания разряда, исследована динамика свечения разрядной плазмы в диапазоне длин волн $200 \div 650$ нм в интервале давлений $0,1 \div 350$ торр. Обнаружено длительное, до 1,5 мс, немонотонное интенсивное послесвечение в некоторых электронно-колебательных полосах второй положительной системы азота. Сделано предположение о том, что основную роль в наблюдаемой динамике такого послесвечения разряда играет долгоживущее метестабильное состояние азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 13-02-01407). Исследования динамики свечения плазмы разряда с помощью монохроматора «MS 5204i» были выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00609).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bratman V., Glyavin M., Idehara T., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37, No. 1. P. 36.
2. Bratman V. L., Glyavin M. Yu., Kalynov Yu. K., et al. // Int. J. IRMM & THz Waves. 2011. V. 32. P. 371.
3. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Nusinovich G. S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. no. 153503.
4. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalynov Yu. K., et al. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. no. 083507.
5. Глявин М. Ю., Голубев С. В., Зорин В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 622.
6. Bratman V. L., Izotov I. V., Kalynov Yu. K., et al. // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. Art. no. 123512.
7. Glyavin M. Yu., Golubev S. V., Izotov I. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. Art. no. 174101.
8. Razin S. V., Sidorov A. V., Golubev S. V., et al. // Proc. 9-th Int. Workshop “Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications”, July 24–30, 2014, Nizhny Novgorod—Perm—Nizhny Novgorod, Russia. P. 89.
9. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
10. Bogatov N. A., Gitlin M. S., Golubev S. V., Razin S. V. // Abstr. 9th European Sectional Conf. Atomic and Molecular Physics Ionized Gases (ESCAMPIG), August 30–September 2, 1988, Lisbon, Portugal. V. 12H. P. 79.
11. Bogatov N. A., Golubev S. V., Kutuzov I. // Abstr. 9th European Sectional Conf. Atomic and Molecular Phys. Ionized Gases (ESCAMPIG), August 30–September 2, 1988, Lisbon, Portugal. V. 12H. P. 77.
12. Henriques J., Tatarova E., Dias F. M., Ferreira C. M. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. Art. no. 103304.
13. Попов Н. А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 5. С. 482.
14. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 1. С. 58.
15. Alves L. L., Marques L., Pintassilgo C. D., et al. // Plasma Sources Sci. Techn. 2012. V. 21. Art. no. 045008.
16. Pan J., Tan Z., Wang X., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, No. 2. P. 557.

Поступила в редакцию 2 ноября 2015 г.; принята в печать 19 мая 2016 г.

**GLOWING OF PLASMA OF A PULSE DISCHARGE PRODUCED IN NITROGEN
BY HIGH-POWER TERAHERTZ-WAVE RADIATION**

A. V. Vodopyanov, M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, and A. P. Fokin

We studied glowing of plasma of a pulse discharge ignited in nitrogen by a high-power focused radiation of a terahertz-wave gyrotron (a radiation frequency of 0.67 GHz, a pulse duration of 20 μ s, and a power of 40 kW). The pressure in the discharge chamber varied in the 0.1–350 Torr range. It was found that at high pressures (of more than 50 Torr), long-term non-monotonic afterglow exists after the end of the terahertz pulse (for about 1.0–1.5 ms), whose intensity can exceed the plasma glow intensity significantly (by several times) during the action of the terahertz radiation pulse on the plasma. At pressures below 50 Torr, the afterglow duration proves to be significantly shorter, specifically, about several tens of microseconds. The observed long-term afterglow is radiation in certain oscillational bands of the second positive system N_2 and is due, evidently, to the processes of associative excitation of electron levels in nitrogen molecules with participation of long-living metastables $N_2(A^3\Sigma_u^+)$.