УДК 533.9

РАЗРЯД В НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ ГАЗА, ПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ МОЩНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

М. Ю. Глявин ^{1,2}, С. В. Голубев ¹, <u>В. Г. Зорин</u>, И. В. Изотов ¹, А. Г. Литвак ^{1,2}, А. Г. Лучинин ¹, М. В. Морозкин ¹, С. В. Разин ¹, А. В. Сидоров ^{1,2}, В. А. Скалыга ^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Проведены экспериментальные исследования разряда, возникающего в неоднородном потоке газа в квазиоптических пучках электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот (мощность излучения составляла 100 кВт, частота 0,67 ТГц, длительность импульса 20 мкс). Поток формировался при инжекции газа через отверстие малого диаметра в вакуумную камеру при фоновом давлении до 10^{-3} торр. Исследована структура разряда в диапазоне фоновых давлений $10^{-3} \div 10^2$ торр. Продемонстрирована возможность создания разряда с характерными размерами плазмы меньше 1 мм. Исследована динамика светимости разряда в оптическом диапазоне при различных фоновых давления х и скоростях инжекции газа.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для индустрии наноэлектроники требуется источник мягкого рентгеновского излучения с длиной волны 13,5 ± 0,13 нм для проекционной литографии высокого разрешения. Средняя мощностью такого источника должна быть на уровне 1 кВт при размере излучающей области менее 1 мм [1].

Одним из наиболее перспективных источников мягкого рентгеновского излучения считается источник, использующий импульсное излучение CO₂-лазера, которое фокусируется на специально сформированный поток капель олова с диаметром порядка 0,1 мм [2]. Однако наряду с заметными достижениями у таких источников излучения есть ряд принципиальных недостатков, которые не позволяют считать решённой проблему создания технологического источника излучения.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот, которое обеспечивает высокий удельный энерговклад. Целью исследования является разработка физических основ нового точечного источника мягкого рентгеновского излучения для проекционной литографии высокого разрешения. Основной идеей создания точечного разряда с высокой излучательной способностью является реализация разряда в неоднородной струе газа с масштабом неоднородной стособностью является реализация разряда в неоднородной струе газа с масштабом неоднородности порядка 1 мм. В таком случае может быть реализована ситуация, когда условия пробоя выполнены только в малой области пространства и разряд не может выйти за её пределы. В работе [3] показано, что в разряде, поддерживаемом излучением с частотой 0,55 TГц, концентрация плазмы может достигать критической величины (10^{15} см⁻³ для данной частоты). Следовательно, можно рассчитывать на эффективный нагрев электронной компоненты в области плазменного резонанса и генерацию многозарядных ионов, излучающих в области мягкого рентгеновского излучения, которое практически не поглощается в окружающем газе при фоновом давлении на уровне 10^{-3} торр.

М. Ю. Глявин, С. В. Голубев, В. Г. Зорин и др.

622

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Источником терагерцового излучения в экспериментах служил гиротрон [4] с частотой электромагнитного излучения 0,67 ТГц и мощностью до 100 кВт. Длительность импульса могла варьироваться от 20 до 30 мкс. Схема эксперимента и фотография установки представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Излучение гиротрона с помощью специально сконструированного квазиоптического преобразователя (4) трансформировалось в гауссов пучок и фокусировалось в центр вакуумной разрядной камеры (1). В вакуумной разрядной камере располагался 3-координатный вакуумный манипулятор (3) с закреплённым на нём параболическим зеркалом с отверстием с диаметром 300 мкм на его оси (5), через которое инжектировался газ. Параболическое зеркало поме-



Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — вакуумная разрядная камера, 2 — плазма, 3 — вакуумный манипулятор с зеркалом, 4 — зеркало квазиоптического преобразователя

щалось таким образом, чтобы фокусировать терагерцовое излучение в точку, находящуюся от среза отверстия инжекции газа на расстоянии приблизительно 1 мм, где концентрация газа ещё достаточно велика (порядка атмосферной). Откачка вакуумной разрядной камеры осуществлялась с помощью турбомолекулярного насоса (2 на рис. 2). Созданные системы инжекции газа и откачки позволяли исследовать разрядные явления в широком диапазоне давлений фонового газа (аргон): от 10^2 до 10^{-3} торр при избыточном давлении на линии инжекции газа от 200 до 1500 торр.



Рис. 2. Фото экспериментального стенда. 1 — разрядная вакуумная камера, 2 — вакуумный насос, 3 — вакуумный манипулятор с системой напуска газа и дополнительным фокусирующим зеркалом, 4 — преобразователь излучения гиротрона в квазигауссов пучок, 5 — дополнительное фокусирующее параболическое зеркало с соплом для формирования неоднородного потока газа

М. Ю. Глявин, С. В. Голубев, В. Г. Зорин и др.

Оптическое свечение разряда диагностировалось с помощью фотоэлектронного умножителя, способного регистрировать излучение в диапазоне 200÷650 нм с максимумом чувствительности в районе 400 нм, и фотоэлектронного регистратора, позволяющего исследовать динамику свечения разряда с минимальной возможной временной развёрткой 30 мкс.

2. РАЗРЯД В НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

В экспериментах разряд возникал вблизи отверстия инжекции газа, где концентрация газа велика и реализуются условия для пробоя, затем разряд распространялся навстречу электромагнитной волне в область, где напряжённость поля в пучке была существенно меньше пороговой. Таким образом удалось поддерживать разряд при низких фоновых давлениях газа (электрическое поле, которое требуется для самостоятельного пробоя при таком давлении, на три порядка превышает поле в пучке гиротрона). Для иллюстрации на рис. 3–7 представлены пространственновременная развёртка разряда и фотографии инициированного разряда при различных фоновых давлениях газа.



Рис. 3. Пространственно-временна́я развёртка свечения разряда. По вертикали отложено время, по горизонтали — координата навстречу электромагнитному излучению

На фотографиях заметно, что при снижении фонового давления газа свечение разряда становится всё более однородным (см. рис. 4, 5 и 6). При низком давлении скорость диффузии существенно возрастает и неоднородная структура замывается. Оценки показывают, что для аргона коэффициент амбиполярной диффузии D завидавления *р* как сит OT $D[cM^2/c]$ = $= 10^4/(p[\text{торр}])$ [5]. Поэтому при изменении давления от 100 до 1 торр расстояние, на которое продиффундирует плазма за 10 мкс, возрастает от 0,5 до 5 мм. Следовательно, за время импульса гиротрона (20÷30 мкс) пространственная неоднородность концентрации плазмы, имеющая масштаб порядка или менее длины волны, заведомо размоется.

При дальнейшем уменьшении фонового давления условия для пробоя выполнялись только в малой области пространства, и разряд, возникающий в зоне высокого давления, не распространялся в область, где давление газа было на уровне фонового (см. рис. 7). Благодаря этому

удалось локализовать плазменное образование в области с характерным диаметром около 1 мм, как показано на рис. 7.

Эксперименты по исследованию оптического свечения терагерцового разряда при различных давлениях газа вплоть до 10^{-3} торр показали, что при снижении фонового давления газа (менее 100 торр) появляется мощное послесвечение (свечение, возникающее после окончания импульса гиротрона). Послесвечение может длиться несколько десятков микросекунд, причём при уменьшении давления задержка во времени между максимумом послесвечения в оптическом диапазоне и окончанием импульса излучения гиротрона увеличивается и достигает сотен микросекунд (см. рис. 8 и 9).

М. Ю. Глявин, С. В. Голубев, В. Г. Зорин и др.



Рис. 4. Фотография свечения разряда при фоновом давлении газа 100 торр



Рис. 5. Фотография свечения разряда при фоновом давлении газа 20 торр

1 MM



Рис. 6. Фотография свечения разряда при фоно-

Рис. 7. Фотография свечения разряда при фоновом давлении газа 1,5 · 10⁻² торр

1 см

вом давлении газа 0,2 торр Вом давлении газа 1,5 · 10⁻² торр Наблюдаемые особенности свечения разряда, по-видимому, связаны с тем, что распад плазмы разряда низкого давления обусловлен ударно-радиационной рекомбинацией в отличие от разря-

разряда низкого давления обусловлен ударно-радиационной рекомбинацией в отличие от разряда высокого давления, плазма которого распадается за счёт диссоциативной рекомбинации, протекающей за гораздо более короткое время. Действительно, в инертных газах диссоциативная рекомбинация (идущая по схеме $A_2^+ + e \rightarrow A + A^*$, где звёздочка обозначает возбуждённое состояние) существенна при достаточно высоких давлениях нейтрального газа, когда велика скорость реакции конверсии атомарных ионов в молекулярные ($A^+ + A + A \rightarrow A_2^+ + A$). Время конверсии обратно пропорционально квадрату давления и для аргона составляет [6] $\tau_{\text{конв}}[c] = (k_{\text{конв}}N_A^2)^{-1} =$ $= 5 \cdot 10^{-3}/(p[\text{торр}])^2$. Таким образом, для давления порядка 100 торр время конверсии будет порядка 0,5 мкс, что существенно меньше длительности импульса гиротрона, поэтому при таком давлении распад будет происходить за счёт диссоциативной рекомбинации, коэффициент которой β для аргона составляет приблизительно 5 $\cdot 10^{-8}$ см³/с [6].

При концентрации плазмы около 10^{15} см⁻³ получается, что время распада $\tau = 1/(\beta N_{\rm e})$ составляет 50 нс, что гораздо меньше длительности импульса гиротрона. Поэтому при высоком давлении послесвечение не наблюдается или слабо выражено. При низком давлении время конверсии становится достаточно большим (например, 50 мкс для 10 торр) и после окончания импульса терагерцового излучения распад может происходить только за счёт ударно-радиационной рекомбинации, которая гораздо медленнее диссоциативной ($\beta_{\rm TP}[{\rm cm}^3/{\rm c}] = 9 \cdot 10^{-27} (T_{\rm e}[{\rm sB}])^{-9/2} N_{\rm e}[{\rm cm}^{-3}]$) [7].

Возрастание интенсивности свечения после окончания импульса излучения можно, по-видимому, связать с сильной зависимостью коэффициента ударно-радиационной рекомбинации от температуры электронов (пропорционально $T_{\rm e}^{-9/2}$), что может приводить к быстрому возрастанию интенсивности рекомбинационного излучения при охлаждении электронов после окончания терагерцового импульса. Такого ярко выраженного послесвечения не наблюдалось ни в CBЧ разряде [8, 9], что, скорее всего, обусловлено более низкой концентрацией образующейся плазмы, ни



Рис. 8. Осциллограммы сигналов высокого напряжения гиротрона $U_{\rm g}$ (1) и фотоэлектронного умножителя $U_{\rm ph}$ (2). Одна клетка соответствует 20 мкс. Фоновое давление газа 50 торр, время tотсчитывается от момента включения



Рис. 9. Осциллограммы сигналов высокого напряжения гиротрона (1) и фотоэлектронного умножителя (2). Одна клетка соответствует 20 мкс. Фоновое давление газа 7,5 торр, время t отсчитывается от момента включения

в лазерной искре [10], что связано с характерным для лазерной искры высоким давлением газа, при котором распад плазмы происходит существенно быстрее.

Таким образом, впервые реализован точечный (характерный размер менее 1 мм) разряд, поддерживаемый терагерцовым излучением в неоднородном потоке газа с фоновым давлением на уровне 10⁻³ торр, который представляется перспективным источником в установках проекционной литографии высокого разрешения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 11–02–12107-офи_м, 11–02–97072-р_поволжье_а, 13–02–01407-а) и гранта Президента Российской Федерации МК-4743.2012.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ota K., Watanabe Y., Banine V., Franken H. EUV Source Requirements for EUV Lithography // EUV Sources for Lithography Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2005. P. 27.
- 2. Stamm U., Gäbel K. // EUV Sources for Lithography. Washington: SPIE Press, 2005. P. 537.
- 3. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalynov Yu. K., et al. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. no. 083507.
- Luchinin A., Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Nusinovich G. S. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. no. 153503.
- 5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. С. 58.
- 6. Смирнов Б. М. Ионы и возбуждённые атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974.
- 7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. С. 79.
- Голубев С. В., Грицинин С. И., Зорин В. Г. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 136.
- 9. Cook A., Shapiro M., Temkin R. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. no. 011504.
- 10. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.

Поступила в редакцию 28 мая 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

М. Ю. Глявин, С. В. Голубев, В. Г. Зорин и др.

THE DISCHARGE MAINTAINED BY HIGH-POWER TERAHERTZ RADIATION IN A NON-UNIFORM GAS FLOW

M. Yu. Glyavin, S. V. Golubev, V. G. Zorin, I. V. Izotov, A. G. Litvak, A. G. Luchinin, M. V. Morozkin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, and V. A. Skalyga

We have studied experimentally the discharge that occurs in a nonuniform gas flow in quasi-optical electromagnetic radiation of the terahertz frequency range (the radiation power was equal to 100 kW, the frequency to 0.67 THz, and the pulse duration to 20 μ s. The beam was formed by gas injection through a small-diameter aperture to the vacuum chamber under a background pressure of up to 10^{-3} Torr. The structure of the discharge in the range of background pressures from 10 to 10^2 Torr has been investigated and the possibility to produce a discharge with characteristic plasma dimensions less than 1 mm, demonstrated. The dynamics of the discharge luminescence has been studied in the optical range for various values of the background pressures and gas injection rates.