

Рентгеновское излучение искровой системы предыонизации и плазмы объемного разряда в лазере с индуктивным накопителем энергии

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко, А.Е.Тельминов

Исследована система предыонизации на основе искровых промежутков в лазере, накачиваемом генератором с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. Показано, что данная система предыонизации кроме УФ и ВУФ излучения формирует импульсы мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов более 5 кэВ. Зарегистрировано рентгеновское излучение из плазмы объемного разряда в азоте, гелии и смеси гелия с NF_3 . Показано, что уменьшение длительности фронта импульса напряжения, подаваемого на искровые промежутки системы предыонизации и на основной промежуток, увеличивает длительность импульса излучения и эффективность экциплесных и ряда других лазеров на плотных газах.

Ключевые слова: искровая предыонизация, объемный разряд, рентгеновское излучение.

1. Введение

В импульсных лазерах на плотных газах для получения объемного разряда широко используются различные системы предыонизации [1–3]. Наиболее простой и широко распространенной является система предыонизации от искровых промежутков, которая служит источником УФ и ВУФ излучения. Искровой разряд зажигается между двумя электродами с малым радиусом кривизны, обычно на фронте импульса напряжения, подаваемого на промежуток. При этом длительность импульса тока разряда через искровые промежутки может быть как меньше, так и больше длительности тока основного разряда через лазерный промежуток. Известно, что при подаче на промежуток между катодом, имеющим малый радиус кривизны, и плоским анодом импульсов высокого напряжения с крутым фронтом (длительностью 1 нс и менее) регистрируется рентгеновское излучение из разрядной плазмы и из анода [4–8]. Мягкое рентгеновское излучение было также получено при разряде с подобной геометрией разрядных промежутков (между тонкими проволоками и сеткой) при амплитуде напряжения в сотни киловольт и длительности фронта импульса напряжения ~ 10 нс [9]. Эти системы использовались для предыонизации в импульсных лазерах на плотных газах [9, 10].

В наших работах [11–15] сообщалось о создании эффективных импульсных лазеров, накачиваемых генератором с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока, в которых использовалась предыонизация от искровых промежутков, находящихся вблизи потенциального электрода и равномерно распределенных по его длине. В частности, были полу-

чены высокие КПД для HF- и DF-лазеров и показано существенное влияние подсветки на характеристики этих лазеров [13–15]. В работе [16] было установлено, что роль УФ подсветки в HF-лазерах с площадью катода менее 300 см² и длительностью импульса менее 150 нс сводится к стабилизации времени запаздывания и амплитуды напряжения электрического пробоя промежутка, а также к выравниванию за счет фотоэффекта распределения плотности тока разряда по поверхности катода.

Цель настоящей работы – исследовать возможность генерации рентгеновского излучения в системе предыонизации от искровых промежутков в лазере, накачиваемом генератором с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. Эти исследования были стимулированы недавними работами по изучению пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения из импульсных наносекундных разрядов [17–20], которые показали, что в плазме наносекундных разрядов можно получить лавинные электронные пучки [17] длительностью менее 1 нс с амплитудой в сотни ампер, а также рентгеновское излучение. При этом рентгеновское излучение наблюдалось при торможении убегающих электронов как на аноде, так и в разрядном промежутке на молекулах и атомах рабочей смеси.

2. Экспериментальные установки и методики

Эксперименты по регистрации рентгеновского излучения из разрядного промежутка лазера проводились с лазером с поперечным разрядом и простой системой предыонизации от искровых промежутков, близким по конструкции к исследованным в работах [11–15]. Генератор накачки лазера позволял формировать объемный разряд при повышенных давлениях в различных газовых смесях. Конструкция разрядного промежутка и системы предыонизации показана на фотографии (рис.1) и упрощенном чертеже (рис.2). На потенциальный электрод подавались импульсы положительной или отрицательной полярности, при этом вначале происходил искровой про-

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко, А.Е.Тельминов. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 23 мая 2006 г., после доработки – 4 августа 2006 г.



Рис.1. Фотография разрядного промежутка лазера с установленными шаблонами.

бой между 72 острыми электродами 3 и острой кромкой потенциального электрода 1, а затем за счет предьонизации промежутка формировался объемный разряд между электродами 1 и 2. На рис.3 приведены осциллограммы тока разряда через основной промежуток и напряжения на нем. При пробое искровых промежутков предьонизации наблюдается глубокий провал на фронте импульса напряжения. Видно, что напряжение пробоя составило ~ 20 кВ, а длительность фронта первого пика напряжения была равна ~ 5 нс. Отметим, что генератор мог работать как в режиме с индуктивным накоплением энергии, так и как обычный LC-генератор.

В лазере использовались профилированные электроды, благодаря которым существенно уменьшались неоднородности электрического поля (локальное усиление поля в основном разрядном промежутке). Электроды изготавливались из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор $d = 4$ см. Лазерная камера заполнялась гелием, азотом или смесью гелия с NF_3 , эксперименты обычно проводились при общем давлении газа или смеси 50–500 Тор.

В экспериментах напряжение на межэлектродном промежутке и ток разряда регистрировались с помощью делителя напряжения и пояса Роговского соответственно. Электрические сигналы записывались цифровым осциллографом TDS-224.

Наличие рентгеновского излучения определялось по засветке фотографической пленки РФ-3 с чувствительностью 1200 P^{-1} , которая помещалась в черный бумажный конверт толщиной 100 мкм и устанавливалась на шаблонах, размещенных слева и справа от разрядного промежутка. Шаблоны представляли собой пластины из органического стекла толщиной 3 и 7 мм, в которых были

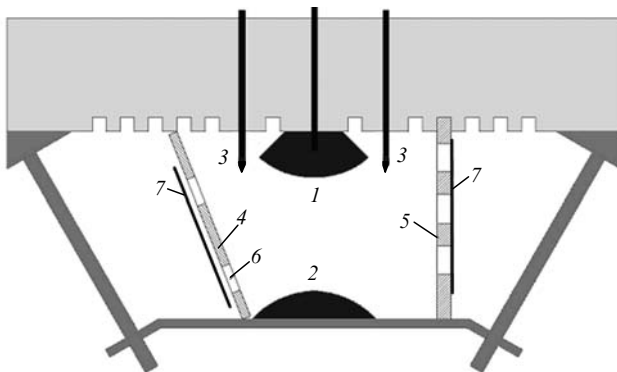


Рис.2. Схема разрядного промежутка: 1, 2 – основные электроды; 3 – электроды в виде острий; 4, 5 – шаблоны; 6 – отверстия в шаблонах; 7 – пакеты с фотопленкой.

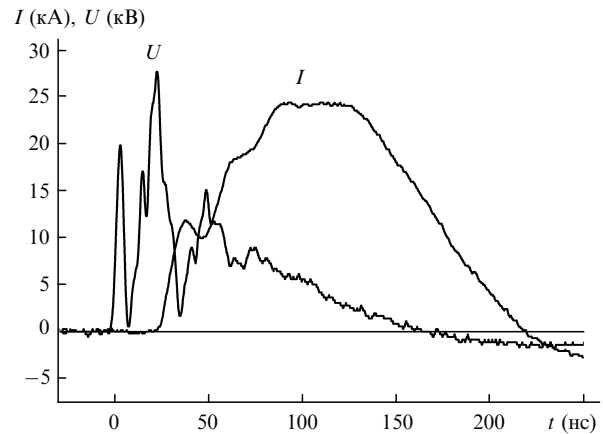


Рис.3. Типичные осциллограммы импульсов тока разряда I и напряжения U на разрядном промежутке.

сделаны отверстия различных диаметров. Таким образом, мягкое рентгеновское излучение могло проходить только через отверстия в пластинках.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Рентгеновское излучение было зарегистрировано при различных полярностях импульсов, прикладываемых к разрядному промежутку, однако при отрицательной полярности потенциального электрода почернение фотопленки было существенно меньше, чем при положительной. Это свидетельствует о локализации источника рентгеновского излучения вблизи электродов 1 и 3. При положительной полярности импульса напряжения на потенциальном электроде достигается наибольшее усиление электрического поля на электродах 3, которые имели малый радиус кривизны и отрицательный потенциал относительно электрода 1. Результаты экспериментов, в которых регистрировалось наибольшее почернение фотопленки, приведены на рис.4–6.

Наиболее интенсивная засветка фотопленки наблюдалась при использовании смеси $\text{He}:\text{NF}_3 = 50:1$ Тор (рис.4). В данном случае автографы излучения были получены даже за тремя слоями черной бумаги общей толщиной 300 мкм и фотопленкой толщиной 200 мкм. На основании этого можно сделать вывод о том, что энергия квантов рентгеновского излучения превышает 10 кэВ. Как показывают оценки, для получения автографа за одним слоем черной фотобумаги достаточно энергии рентгеновских квантов ~ 5 кэВ. Из рис.4 видно, что ав-

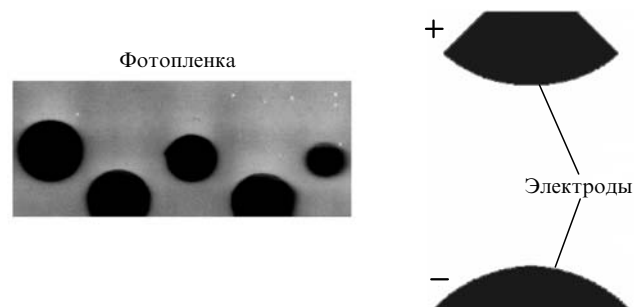


Рис.4. Потемнение фотопленки под действием рентгеновского излучения разряда в смеси $\text{He}:\text{NF}_3 = 50:1$ Тор (получено за 350 импульсов).

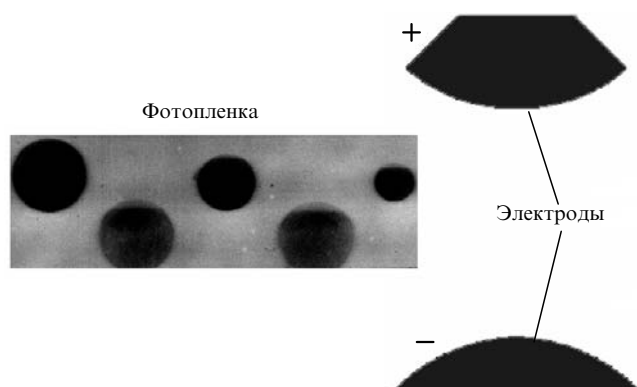


Рис.5. Потемнение фотопленки в однослойном пакете под действием рентгеновского излучения разряда в He при давлении 250 Тор (получено за 350 импульсов).

тографы рентгеновского излучения приплюснуты, причем в верхней части. Это указывает на генерацию рентгеновского излучения преимущественно в области искровых промежутков.

На рис.5 приведены автографы рентгеновского излучения при давлении гелия 250 Тор. Также наблюдается приплюснутость автографа из-за экранировки рентгеновского излучения в верхней части отверстия шаблона. Отметим, что слабое почернение фотопленки обычно наблюдалось по всему диаметру отверстия шаблона, что можно связать с генерацией рентгеновского излучения в основном промежутке. При подаче на потенциальный электрод импульсов положительной полярности и заполнении камеры гелием рентгеновское излучение регистрировалось за 350 импульсов при давлении 500 Тор. При уменьшении давления от 500 до 50 Тор интенсивность засветки фотопленки увеличивалась. Рентгеновское излучение регистрировалось также и вблизи нижнего заземленного электрода (катода) (рис.6). На рис.6 хорошо видны влияние экранировки рентгеновского излучения шаблоном и уменьшение интенсивности почернения при удалении от области искровых промежутков.

Эксперименты по формированию разряда в азоте показали, что в более тяжелом газе почернение фотопленки при одинаковом давлении газов уменьшается, хотя все основные тенденции изменения автографов рентгенов-

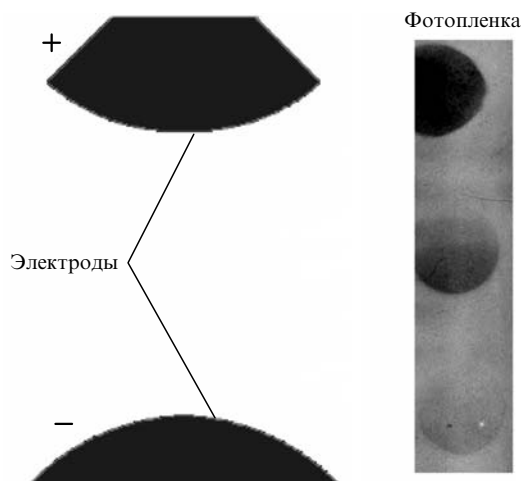


Рис.6. Потемнение фотопленки под действием рентгеновского излучения разряда в He при давлении 50 Тор (получено за 175 импульсов).

ского излучения сохраняются. Так, при давлении азота 38 Тор были получены автографы с экранировкой рентгеновского излучения шаблонами и меньшей засветкой фотопленки, чем в гелии при таком же давлении.

При изменении полярности подаваемых импульсов изменялась форма отпечатков, оставляемых рентгеновским излучением. В случае отрицательной полярности потенциального электрода почернение фотопленки существенно уменьшалось. При этом отпечатки отверстий приобретали правильную круглую форму, а почернение было более сильным вблизи основных электродов 1 и 2. Отверстие, находящееся напротив центра разрядного промежутка, имело наименьшую засветку. На основании этого можно сделать вывод о том, что рентгеновское излучение возникает как вблизи электродов, так и во всем промежутке, причем вблизи электродов оно имеет большую интенсивность.

Отметим, что при увеличении длительности фронта импульса напряжения, которое в данных экспериментах достигалось за счет отключения индуктивного накопителя энергии и использования только емкостного накопителя, мы также регистрировали рентгеновское излучение из области искровых промежутков системы предьонизации, но интенсивность его была существенно меньше. Для получения одинаковой засветки число импульсов напряжения надо было увеличивать в несколько раз.

Проведенные эксперименты показали, что использование генераторов с индуктивными накопителями энергии приводит к значительному росту эффективности генерации и длительности импульсов излучения лазеров на эксиплексных молекулах и азоте, а также нецепных HF- и DF-лазеров. Более медленное нарастание напряжения на разрядном промежутке, характерное для емкостного накопителя, обычно приводило к нарушению однородности разряда. При этом на интегральных фотографиях разрядного промежутка на фоне объемного свечения наблюдались диффузные каналы различной длины, «привязанные» к ярким катодным пятнам. Использование индуктивного накопителя повышало скорость нарастания напряжения на промежутке в 1.5–2 раза, при этом возрастала интенсивность рентгеновского излучения из искровых промежутков. Это приводило к повышению однородности свечения разряда – катодные пятна и каналы в оптимальных режимах накачки практически исчезали. Внутренний КПД электроразрядных лазеров был близок к КПД генерации, полученной при накачке пучком электронов, которая обеспечивает более высокую равномерность энерговклада и снимает проблему контракции разряда. Эксперименты показывают, что уменьшение длительности фронта импульса напряжения на разрядном промежутке и на электродах системы предьонизации позволяет зажигать устойчивый объемный разряд в различных газовых смесях. Высокое качество разряда, в свою очередь, приводит к существенному увеличению энергии и эффективности генерации газовых лазеров. На созданной установке получены КПД генерации по вложенной энергии 4 %, 3 %, 10 % и 7 % для XeCl-, XeF-, HF- и DF-лазеров соответственно.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что системы предьонизации импульсных лазеров на плотных газах, в которых используются искровые про-

межутки, могут излучать не только в УФ и ВУФ диапазонах, но также и в мягком рентгеновском диапазоне с энергией квантов более 5 кэВ. Кроме того, рентгеновские кванты (также с энергией более 5 кэВ) может излучать и основной разрядный промежуток, причем наибольшая интенсивность рентгеновского излучения наблюдается вблизи электродов. Интенсивность рентгеновского излучения и его проникающая способность зависят от многих факторов: амплитуды и длительности фронта импульса напряжения, состава и давления рабочей смеси, конструкции системы предьонизации и основных электродов, а также материала, из которого они изготовлены. Эти особенности искровых систем предьонизации необходимо учитывать при разработке импульсных лазеров на плотных газах.

В лазере, накачиваемом генератором с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока, при использовании в качестве активной среды различных газов зарегистрировано рентгеновское излучение из области искровых промежутков системы предьонизации и плазмы объемного разряда в основном промежутке. Показано, что уменьшение длительности фронта импульса напряжения, подаваемого на искровые промежутки системы предьонизации и на основной промежутке, увеличивает энергию и эффективность генерации электроразрядных лазеров.

Настоящая работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2596).

1. *Газовые лазеры*. Под ред. И.Мак-Даниэль, У.Ниген (М.: Мир, 1986).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
3. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Bellingham, Washington, USA: SPIE, Opt. Eng. Press, 1995).
4. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck O., Wales W. *Nuclear Instruments and Methods*, **44**, 345 (1966).
5. Станкевич Ю.Л., Калинин В.Г. *ДАН СССР*, **177**, 72 (1967).
6. Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. *J. Appl. Phys.*, **39**, 4746 (1968).
7. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. *ЖТФ*, **39**, 1530 (1969).
8. Кремнев В.В., Курбатов Ю.А. *ЖТФ*, **42**, 795 (1972).
9. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И., Никольский В.С. *Квантовая электроника*, **3**, 601 (1976).
10. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Павловский А.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **18**, 891 (1991).
11. Бакшт Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **30**, 506 (2000).
12. Vaksht E.N., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Matsunaga T., Goto T. *Jap. J. Appl. Phys.*, **41**, 3701 (2002).
13. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 1035 (2001).
14. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
15. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 320 (2004).
16. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфуллин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **34**, 111 (2004).
17. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **46** (3), 94 (2003).
18. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Plasma Devices and Operations*, **13** (4), 231 (2005).
19. Tarasenko V.F., Shpak, V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. *Laser Part. Beams*, **23**, 545 (2005).
20. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **48** (12), 40 (2005).