

Н.Г. Иванов, И.Н. Коновалов, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко

Источник рентгеновского излучения для предыонизации разряда в газовых лазерах

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 6.12.2005 г.

Приведены результаты экспериментального исследования источников рентгеновского излучения для предыонизации лазерной смеси в широкоапертурных электроразрядных эксимерных лазерах. Импульс рентгеновского излучения формировался в вакуумном диоде обращенного типа при торможении ускоренных электронов в танталовой фольге. Показано, что использование металлодиэлектрического катода позволяет получать рентгеновское излучение с неоднородностью распределения интенсивности в пределах 10% при энергии квантов до 55 кэВ и экспозиционной дозе излучения до 160 мР.

Введение

Использование рентгеновского излучения для предыонизации лазерной смеси в газовых лазерах позволяет обеспечивать высокую однородность начальной концентрации электронов и тем самым возбуждать большие объемы газа при высоком давлении. Так, в работах [1–3] было показано, что лучшие результаты по эффективности преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения и наибольшая равномерность распределения выходной энергии эксимерных лазеров достигаются при использовании рентгеновского излучения. Использование мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов ~30–50 кэВ позволило получить импульсы лазерного излучения с энергией в десятки джоулей [4, 5].

Формирование рентгеновского излучения в источнике, как правило, происходит в вакуумном диоде при бомбардировке ускоренными электронами мишени с большим атомным номером. Известно, что тормозное излучение при этом имеет непрерывный спектр с максимумом распределения квантов по энергии вблизи половины ускоряющего напряжения [6]. Для эффективной ионизации газа рентгеновское излучение должно удовлетворять определенным требованиям, которые накладываются на энергетический спектр излучения, его интенсивность и равномерность распределения на выходе из вакуумного диода.

В работах [7, 8] было показано, что оптимальный для лазера рабочий диапазон ускоряющих напряжений вакуумного диода находится в пределах 30–50 кВ. Ограничение сверху связано с тем, что при энергии квантов рентгеновского излучения более 35 кэВ происходит уменьшение поглощенной дозы излучения в активной области лазера за счет уменьшения массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения в газе. Кроме того, в электроразрядном ХеСl-лазере, работающем на смеси газов

Ne–Xe–HCl, до 90% экспозиционной дозы квантов, имеющих в спектре рентгеновского излучения энергию в области 34 кэВ, может переизлучаться в К-серии флуоресценции Хе, практически не внося вклада в ионизацию газа. Ограничение снизу, которое обычно наступает при напряжении на диоде менее 25 кВ, обусловлено значительным ростом потерь рентгеновского излучения в фольгах, закрывающих окно для вывода излучения из вакуумного диода и один из электродов газоразрядной камеры лазера.

Для получения высокоинтенсивного рентгеновского излучения в вакуумном диоде обычно используется холодный взрывоэмиссионный катод. Главной проблемой при работе такого катода являются плохие стабильность и равномерность взрывной эмиссии электронов с катода за счет относительно низкого ускоряющего напряжения в диоде [9]. В работе [10] описаны конструкция и результаты исследований источника мягкого рентгеновского излучения с размером выходного окна 5×100 см, разработанного нами ранее. В источнике использовался вакуумный диод обращенного типа. Исследование работы такого источника показало, что при величине накопительной емкости 5 нФ и более в вакуумном диоде развивается неустойчивость, которая ограничивает величину дозы рентгеновского излучения. Кроме того, распределение излучения по сечению выходного окна было недостаточно однородным.

В данной работе исследуется аналогичный рентгеновский источник с целью повышения интенсивности и равномерности выходного излучения.

Аппаратура и методика измерения

Исследования проводились на рентгеновских источниках с размером выходного окна до 5×100 см. Принципиальная электрическая схема источников представлена на рис. 1.

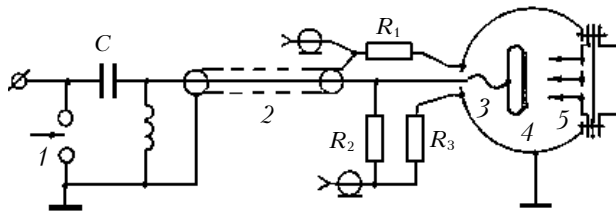


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема источников рентгеновского излучения. $L_1 = 10$ мкГн, $R_1 = 0,02$ Ом, $R_2 = 10$ кОм, $R_3 = 50$ Ом. 1 – управляемый искровой разрядник; 2 – подводный кабель; 3 – электрические проводники; 4 – анод; 5 – катод

В источниках использовался вакуумный диод обращенного типа. Импульсное питание диода осуществлялось от накопительной емкости C , которая заряжалась до 60 кВ и коммутировалась искровым разрядником 1, либо от трехступенчатого генератора Аркадьева–Маркса (ГИН) с ударной емкостью $C = 15$ нФ и собственной индуктивностью ~ 1 мкГн. Величина накопительной емкости C изменялась от 3,3 до 25 нФ. Во всех случаях импульс высокого напряжения положительной полярности подавался на диод с помощью кабеля КВИ-120 2, длина которого изменялась от 2,5 до 13,5 м. Внутри диода высокое напряжение подводилось к аноду 4 с помощью нескольких проводников 3 одинаковой длины. В ходе экспериментов исследовались разные типы катода 5. В одном случае катодом служили полоски из танталовой фольги толщиной 25 мкм, расположенные в шахматном порядке, во втором случае катод представлял собой полоски фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, в третьем – ряд медных проволочек, наклеенных на полоски стеклотекстолита. Зазор между анодом и катодом изменялся от 14 до 23 мм. Для вывода рентгеновского излучения из диода за катодом располагалось окно, закрытое титановой фольгой толщиной 50 мкм. Импульс тока в диоде регистрировался с помощью шунта R_1 , напряжение диода – с делителя R_2, R_3 .

В экспериментах электрические импульсы тока и напряжения регистрировались осциллографом TDS-3014. Измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения за фольгой и ее распределение по выходному окну диода производились с помощью дозиметров КДТ-02М и КИД-1, специально доработанных нами для измерения мягкого рентгеновского излучения. Кроме этого распределение интенсивности излучения регистрировалось с помощью фотопленки РФ-3.

Результаты и обсуждение

Основное внимание в наших исследованиях было обращено на поиск условий формирования однородного электронного пучка в вакуумном диоде, так как именно он в первую очередь задает параметры рентгеновского излучения. В свою очередь известно, что однородность электронного пучка определяется как свойствами катода, так и параметрами системы питания вакуумного диода.

Первоначально наши эксперименты проводились с использованием катода, выполненного из танталовой фольги. При этом питание диода осуществлялось от накопительной емкости C . Исследования показали, что параметры диода в сильной мере зависят от длины кабеля, соединяющего емкость и диод. На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на емкости и тока диода для кабелей с длиной 3,5 и 13,5 м.

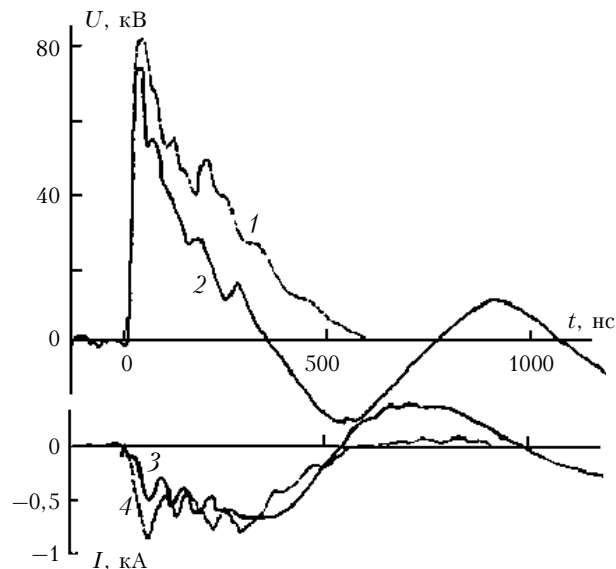


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на емкости U и тока диода I при использовании катода из танталовой фольги и емкости $C = 3,3$ нФ. Зарядное напряжение $U_0 = 60$ кВ, длина подводного кабеля 3,5 (2, 3) и 13,5 м (1, 4)

Видно, что при коротком кабеле импульс напряжения короче, чем ток в диоде, и само напряжение спадает существенно быстрее, чем при длинном кабеле. Это факт и наличие обратной полярности тока говорят о развитии неустойчивости в диоде в течение первого полупериода импульса тока и, следовательно, об укорочении импульса рентгеновского излучения. При длинном кабеле длительность импульса напряжения практически совпадает с длительностью импульса тока и отсутствует переполяривание тока. В этом случае мы регистрировали более высокую дозу рентгеновского излучения.

Анализируя импульсы напряжения, можно отметить, что максимальная величина напряжения в обоих случаях превышает напряжение питания 60 кВ, это связано со скачком напряжения на конструктивной межэлектродной емкости диода. Данный скачок напряжения также говорит о наличии некоторого времени запаздывания до начала работы диода относительно момента подачи импульса питания. Большая величина напряжения облегчает работу вакуумного диода с острым катодом. В связи с этим большее напряжение при длинном кабеле позволяет быстрее и, следовательно, однороднее сформировать катодную плазму, развить за то же время более высокую амплитуду тока в диоде. Именно это, на наш взгляд, позволило реализовать более

устойчивую работу вакуумного диода с длинным кабелем. Вероятно, что в этих условиях сформировался достаточно однородный электронный пучок, который существовал в течение всей длительности импульса напряжения на диоде.

Для увеличения экспозиционной дозы рентгеновского излучения мы увеличили емкость, которая питает вакуумный диод, и ускоряющее напряжение на нем. При этом для удобства работы с высоким напряжением вместо накопительной емкости применяли ГИН при зарядных напряжениях от 20 до 30 кВ. Исследования проводились на том же диоде с танталовым катодом при различной длине подводящего кабеля. В данном случае длина подводящего кабеля в работе диода уже не играла такую важную роль, как при использовании накопительной малоиндуктивной емкости (рис. 2). Поэтому в дальнейшем мы использовали подводящий кабель длиной 2,5 м.

Из осциллограмм, приведенных на рис. 3, видно, что во всех случаях в диоде развивается неустойчивость, приводящая к колебательному режиму тока в диоде.

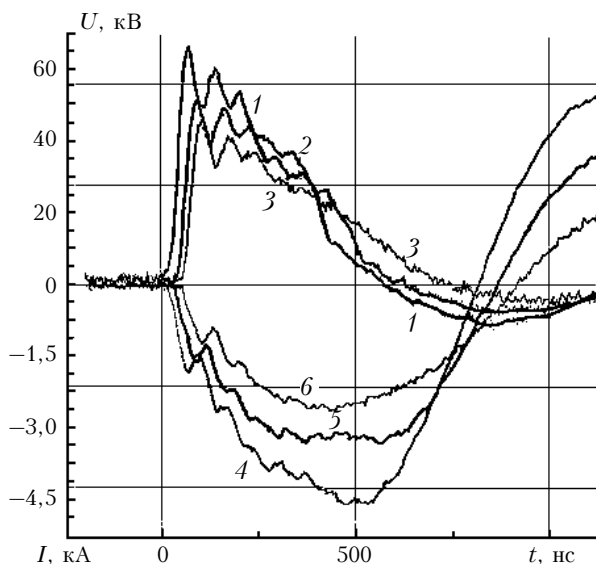


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на входе в диод и тока диода при использовании катода из танталовой фольги и емкости $C = 15$ нФ. $U_0 = 30$ кВ (1, 4), 25 кВ (2, 5), 20 кВ (3, 6). Длина подводящего кабеля 2,5 м

Лучшая ситуация наблюдалась при зарядном напряжении 20 кВ, когда электронный пучок существовал практически в течение всего импульса напряжения, а неустойчивость развивалась только в его конце.

Наличие неустойчивости в диоде с танталовым катодом говорит о недостаточной однородности катодной плазмы. Для улучшения ее однородности металлический острый катод был заменен на металлодиэлектрический (фольгированный стеклотекстолит), поскольку известно, что металлодиэлектрический катод позволяет облегчить формирование плазмы и создать более однородное ее распределение по поверхности катода [11]. Работа такого диода исследовалась при различных расстояниях между ано-

дом и катодом, а также при различных амплитудах импульса напряжения. Изменение расстояния анод-катод от 17 до 23 мм показало, что оптимальное значение близко к величине 19 мм. При этом диод устойчиво работает при зарядном напряжении ГИН до 28 кВ. Осциллограммы импульсов напряжения и тока для этого случая приведены на рис. 4. Амплитуда тока диода достигала 3,5 кА при длительности импульса 700 нс, ускоряющее напряжение в максимуме тока составляло 50–55 кВ.

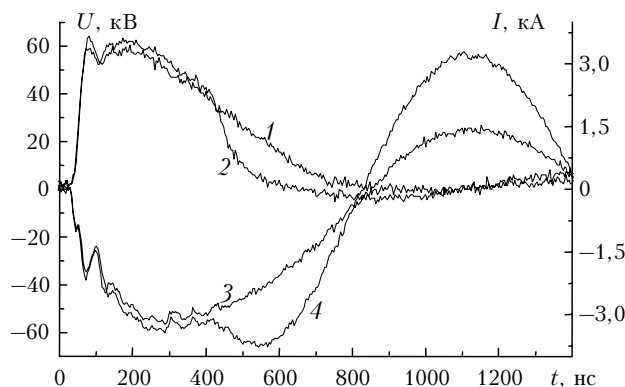


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения на входе в диод (1, 3) и тока диода (2, 4) при использовании катода из фольгированного стеклотекстолита. $C = 15$ нФ, $U_0 = 28$ кВ (1, 2), 30 кВ (3, 4)

Сравнивая данные осциллограммы с осциллограммами, полученными при использовании металлического катода (см. рис. 3), следует отметить меньшую амплитуду импульса напряжения и большую скорость нарастания тока при тех же значениях зарядного напряжения ГИН. Так, время достижения максимального значения тока уменьшилось с 350 до 220 нс. Это говорит о том, что металлодиэлектрический катод начинает работать при меньших напряжениях на диоде по сравнению с металлическим и на его поверхности быстрее появляется плазма. Следствием этого и являются более устойчивая работа диода и лучшая однородность плотности электронного пучка по всей рабочей площади вакуумного диода. Экспозиционная доза рентгеновского излучения в воздухе для всех режимов работы данного диода с размером выходного окна 5×100 см находилась в области 80–100 мР при достаточно хорошей однородности распределения интенсивности излучения.

Детальное исследование величины однородности излучения для различных катодов нами проводилось на источнике с размером выходного окна 4×80 см при зарядных напряжениях ГИН 25–30 кВ. Расстояние между анодом и катодом вакуумного диода в этих экспериментах составляло 18 мм. Распределение дозы рентгеновского излучения в центральной части выходного окна по его длине приведено на рис. 5.

Значение каждой точки усреднялось из 8 срабатываний источника. Из рис. 5 видно, что с металлодиэлектрическим катодом однородность распределения дозы значительно лучше. Количественная

оценка неоднородности без учета крайних точек для катода из танталовой фольги и фольгированного стеклотекстолита дает 37 и 10% соответственно.

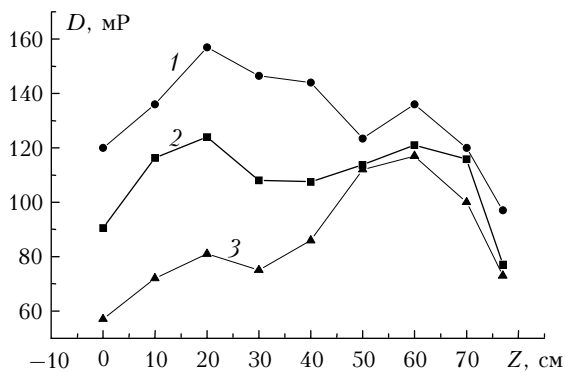


Рис. 5. Экспериментальное распределение дозы рентгеновского излучения по длине выходного окна размером 80×4 см. 1 — катод изготовлен из медных проволочек на стеклотекстолите, $U_0 = 30$ кВ; 2 — из фольгированного стеклотекстолита, $U_0 = 25$ кВ; 3 — из танталовой фольги, $U_0 = 25$ кВ

Для оценки концентрации электронов в лазерной смеси и влияния энергии квантов рентгеновского излучения на степень ионизации газа нами были проведены расчеты линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения в смеси газов Ne—Xe—HCl и доли рентгеновского излучения, выходящего через окно рентгеновского источника, закрытое титановой фольгой (рис. 6).

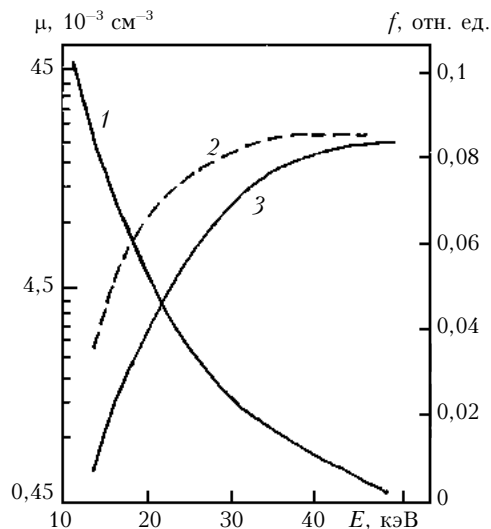


Рис. 6. Зависимость линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения μ в смеси газов Ne:Xe:HCl = 1000:10:1 (1) и доли рентгеновского излучения f , выходящего через окно источника, закрытого титановой фольгой толщиной 50 (2) и 130 мкм (3), от энергии квантов рентгеновского излучения

Отметим, что основное поглощение рентгеновского излучения в такой смеси происходит на ксеноне и неоне. Распределение квантов рентгеновского излучения по энергиям рассчитывалось для различных значений ускоряющего напряжения. Для исследуемой конструкции диода, с учетом телесного угла

полезной части генерируемого рентгеновского пучка и потерь энергии вследствие рассеяния излучения на разделительной решетке, коэффициент пропускания выходного окна брался 0,09. Смесь газов Ne:Xe:HCl = 2000:2,5:1 находилась под давлением 4 атм.

Из рис. 6 следует, что доля выходного рентгеновского излучения зависит от толщины выходной фольги, пропускание которой приближается к единице при энергии квантов более 50 кэВ. Низкоэнергетическая составляющая рентгеновского излучения с энергией квантов 15–25 кэВ дает существенный вклад в ионизацию смеси газов в активной области лазера, однако электроны испытывают значительные потери при прохождении через титановую фольгу.

Оценка конверсии энергии ускоренных электронов в тормозное рентгеновское излучение, ослабления потока рентгеновского излучения при прохождении через титановую фольгу и взаимодействия излучения со смесью газов Ne:Xe:HCl = 1000:10:1 показала, что концентрация электронов в смеси под действием импульса рентгеновского излучения должна составлять $(5-10) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Заключение

Исследование ленточного источника мягкого рентгеновского излучения с вакуумным диодом обращенного типа и холодным взрывоэмиссионным катодом показало возможность формирования достаточно интенсивного и однородного излучения. Данное излучение может обеспечивать в газовой смеси эксимерного лазера начальную концентрацию электронов, достаточную для его эффективной работы. Для питания вакуумного диода рентгеновского источника использовался ГИН с ударной емкостью 15 нФ. Полученное рентгеновское излучение имеет длительность импульса 700 нс и обеспечивает экспозиционную дозу до 160 мР. Неравномерность распределения интенсивности рентгеновского излучения по апертуре выходного окна диода составляет ~10%. Высокая однородность интенсивности рентгеновского излучения была достигнута за счет использования металлодиэлектрического катода.

Данный источник был успешно использован для предьонизации смеси газов в разрядном промежутке широкоапертурного XeCl-лазера с энергией излучения 10,8 Дж и длительностью импульса излучения на полувысоте мощности 300 нс [12].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-08-50321а.

1. Tallman C.R., Bigio I.J. Determination of the minimum X-ray flux for effective preionization of an XeCl laser // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 42. N 2. P. 149–151.
2. Long W.H., Jr., Plummer M.J., Stappaerts E.A. Efficient discharge pumping of an XeCl laser using a high voltage prepulse // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 8. P. 735–737.
3. Коновалов И.Н., Коваль Н.Н., Суслов А.И. Effect of the degree of preionization of a gas on the homogeneity of a volume discharge and generation of radiation in a wide-aperture XeCl laser // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 8. С. 663–668.

4. *Champagne L.F., Dudas A.J., Harris N.W.J.* Current rise-time limitation of the large volume x-ray preionized discharge-pumped XeCl laser // *Appl. Phys.* 1987. V. 62. N 5. P. 1576–1584.
5. *Hasama T., Miyazaki K., Yamada K., Sato T.* 50 J Discharge-Pumped XeCl laser // *IEEE J. Quantum Electron.* 1989. V. 25. N 1. P. 113–120.
6. *Кутайгородский А.И.* Рентгеноструктурный анализ. М.: Гостехтеоретиздат, 1950. 650 с.
7. *Levatter J.I., Zaizquang Li.* Low energy x-ray preionization source for discharge excited laser // *Rev. Sci. Instrum.* 1981. V. 52. N 11. P. 1651–1654.
8. *Shields H., Alcock A.J., Taylor R.S.* Kinetics of an X-ray preionized XeCl gas discharge laser // *Appl. Phys.* 1983. V. 31. N 1. P. 27–35.
9. *Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов* / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1974. 168 с.
10. *Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Коновалов И.Н., Сак К.Д., Червяков В.В.* Источник мягкого рентгеновского излучения для электроразрядного эксимерного лазера // *Приборы и техн. эксперим.* 1994. Т. 4. С. 112–115.
11. *Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии* / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.
12. *Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Сухов М.Ю.* Электроразрядный XeCl-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс // *Квант. электрон.* 2005. Т. 35. № 3. С. 237–240.

N.G. Ivanov, I.N. Kononov, V.F. Losev, Yu.N. Panchenko. **Augmentation of intensity and distribution uniformity of X-ray radiation in a source for preionization of wide-aperture electric-discharge XeCl-laser.**

Results of experimental studies of X-ray radiation sources for laser mixture preionization in wide-aperture electric-discharge excimer lasers are presented. The X-ray pulse was formed in a vacuum diode of reversible type when damping accelerated electrons in the tantalum foil. It is shown that the use of the metal-electric cathode permits obtaining of X-ray radiation with nonhomogeneity of intensity distribution about 10% at a quantum energy up to 55 KeV and an exposition dose up to 160 mP.