

УДК 533.951

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ДИОДА С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

А. А. Ерохин, Ю. В. Коробкин, И. В. Романов, В. М. Романова,
А. А. Рупасов, А. С. Шиканов

Представлены результаты экспериментов по исследованию спектральных характеристик рентгеновского источника на основе лазерно-плазменного катода. Экспериментально установлено, что при соответствующем подборе ускоряющего напряжения спектр излучения является практически монохроматическим и сосредоточен в характеристических линиях материала анода. В частности, для титанового анода количество фотонов излучения в К-линиях составило 10^{11} фотонов за один импульс излучения.

Предложенный и изученный в работах [1 – 4] источник рентгеновского излучения на основе вакуумного диода с лазерно-плазменным катодом, по нашему мнению, является перспективным прибором для тех направлений исследования, в которых требуется квазиточечный источник рентгеновского монохроматического излучения наносекундной длительности со спектральной яркостью до 10^{21} фотонов/(см² · с · ср · кэВ). В данных работах были изучены электрические, мощностные и временные характеристики источника, выбрана оптимальная конфигурация и расположение анода и плоской мишени. Однако исследователей данного источника всегда интересовал вопрос и степени монохроматичности рентгеновского излучения.

Рентгеновский диод с лазерно-плазменным катодом обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными источниками жесткого рентгеновского излучения наносекундной длительности (в частности, со взрывной эмиссией электронов):

1) Высокая эмиссионная способность лазерно-плазменного катода, наблюдающаяся даже при малых значениях рабочего напряжения. В частности, при $U = (3 - 4)U_0$ (U_0 – порог возбуждения характеристического излучения материала анода) достигается максимум отношения интенсивности характеристического излучения к интенсивности тормозного излучения. С увеличением напряжения интенсивность излучения в K -линиях насыщается или даже начинает уменьшаться [5]. В то же самое время интенсивность тормозного излучения с ростом напряжения только увеличивается. Следовательно, наибольший контраст излучения в K -линиях получается при приложении оптимального напряжения, что легко осуществить в наших экспериментах, поскольку источником электронов является лазерная плазма.

2) Использование анода в виде острия позволяет осуществить режим точечного источника.

3) Изменение ускоряющего напряжения и использование различных материалов для изготовления анода позволяет получить монохроматическое рентгеновское излучение в достаточно широком спектральном диапазоне.

4) Излучение диода с лазерно-плазменным катодом начинается при малых энергиях лазерного излучения в импульсе, что объясняется тем, что лазерная плазма используется только как источник электронов.

5) Исследуемый источник с лазерно-плазменным катодом имеет токовые характеристики на несколько порядков превышающие аналогичные характеристики рентгеновских трубок со взрывной эмиссией электронов. Это объясняется существенно большей плотностью электронов лазерной плазмы и ее более высокими скоростями разлета.

6) Стабильность выходных характеристик, простая синхронизация с диагностической аппаратурой, низкая операционная стоимость.

Исследования спектральных характеристик проводились с помощью установки, описанной ниже. Для создания плазмы на поверхности катода использовался лазер на неодимовом фосфатном стекле со следующими параметрами: длительность импульса 10 нс, энергия излучения 0.2 Дж, максимальная плотность потока на мишени (катоде) $\approx 10^{11}$ Вт/см². В качестве спектрографа в области K -линий Ti использовался кристаллический спектрограф ($2d = 19.9 \text{ \AA}$) с дополнительной фокусировкой, описанный в [6]. Преимуществом данного спектрографа является большая светосила, а также высокое пространственное разрешение. Спектр регистрировался на рентгеновскую пленку УФВР.

Для измерения пространственных распределений рентгеновского излучения лазер-

ной плазмы (катода) и титанового анода использовалась камера – обскура с увеличением $\Gamma \approx 4$. Излучение выделялось фильтрами: 10 мкм бериллия или 10 мкм бериллия и 15 мкм титана и регистрировалось на рентгеновскую пленку УФВР.

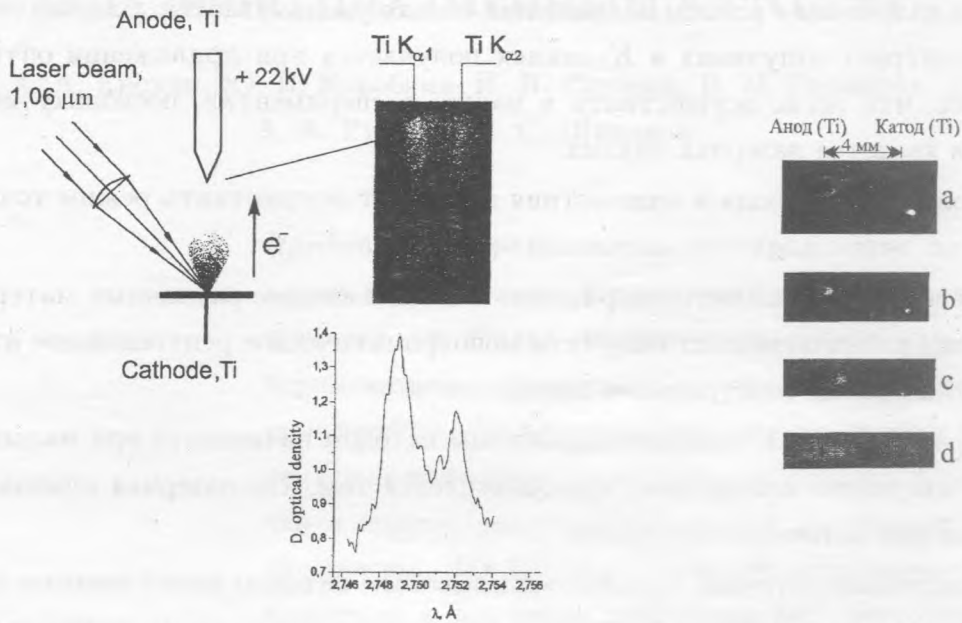


Рис. 1. Геометрия источника рентгеновского излучения с титановым анодом и лазерно-плазменным титановым катодом; спектрограмма и денситограмма излучения линий дублета $K_{\alpha 1}$ (2.749 Å) и $K_{\alpha 2}$ (2.752 Å) титанового анода. Спектрограмма получена за 30 выстрелов лазера. Энергия импульса Q_{cp} – 0.27 Дж, длительность τ – 10 нс, диаметр лазерного пучка на мишени – 150 мкм, плотность мощности $P = 1.5 \cdot 10^{11}$ Вт/см².

Рис. 2. Изображения, полученные с помощью камеры – обскуры. Рабочее напряжение источника 22 кВ, энергия лазерного импульса $Q = 0.33$ Дж, длительность импульса $\tau = 10$ нс: Расстояние от источника до отверстия камеры – обскуры 1 см, увеличение $\Gamma = 4$. Изображения получены за 15 выстрелов лазера. (а) Пленка УФВР, Ве фильтр толщиной 10 мкм, отверстие камеры ϕ 130 мкм, диаметр лазерного пучка на мишени 180 мкм, $I = 1.3 \cdot 10^{11}$ Вт/см²; (б) УФВР, 10 мкм Ве, камера ϕ 190 мкм, пучок ϕ 100 мкм, $I = 4.2 \cdot 10^{11}$ Вт/см²; (с, d) 10 мкм Ве + 15 мкм Ti, камера ϕ 130 мкм, пучок ϕ 100 мкм, $I = 4.2 \cdot 10^{11}$ Вт/см², УФВР (с), пленка DEF позади УФВР (d).

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Излучение лазера фокусировалось асфери-

ческой линзой на поверхность плоской титановой мишени, являющейся катодом. Выбор мишени обусловлен необходимостью сравнить спектральные яркости в исследуемых рентгеновских диапазонах: лазерной плазмы и титанового анода. Спектры регистрировались на кристаллическом слюдяном ($2d = 19.94 \text{ \AA}$) спектрографе с двойной фокусировкой в VII порядке отражения. Радиус сферической поверхности кристалла $R = 100 \text{ мм}$; $a = 111.5 \text{ мм}$, $b = 96.6 \text{ мм}$ – расстояния от центра изгиба кристалла до источника и фотопленки (УФВР) соответственно. Линейная дисперсия $D_x = 7.373 \cdot 10^{-3} \text{ \AA/мм}$.

Диаметр лазерного пятна на мишени не превышал 200 мкм , расстояние между мишенью (катодом) и анодом в большинстве экспериментов составляло $\approx 0.2 \text{ см}$. Титановый анод был выполнен в виде конуса с диаметром острия $\approx 250 \text{ мкм}$. Между катодом и анодом прикладывалось постоянное напряжение в области $3 - 26 \text{ кВ}$. Электроны, вытягиваемые из лазерной плазмы, ускоряются электрическим полем по отношению к аноду и вызывают характеристическое в K - и L -линиях и тормозное, с максимумом при $\lambda_{max} = 1.86/U \text{ нм}$ (U – в кВ), излучения материала анода. При протекании тока по цепи катод-анод разряжается конденсатор емкостью 5 нФ , включенный в цепь.

Квантовый выход рентгеновского излучения в K -линиях анода ($\lambda(K_\alpha) = 2.75 \text{ \AA}$ и $\lambda(K_\beta) = 2.51 \text{ \AA}$) определялся с помощью кремниевого p - i - n -диода типа Quantrad 100-PIN-250 с фильтрами из алюминия толщиной 6 мкм и 100 мкм бериллия (граница пропускания $\sim 3.44 \text{ \AA}$), исходя из известной величины отклика p - i - n -диода 0.2 Кл/Дж . Токвые характеристики диода определялись с помощью пояса Роговского.

В результате проведения эксперимента были исследованы пространственные и спектральные характеристики рентгеновского источника на основе лазерно-плазменного диода с длительностью импульса 20 нс и спектральной яркостью в K -линиях титана $\approx 10^{21} \text{ фотонов/(см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ)}$. Излучение источника состояло из дублета $K_{\alpha 1}(2.749 \text{ \AA})$, $K_{\alpha 2}(2.752 \text{ \AA})$ и линии $K_\beta(2.514 \text{ \AA})$. Фотометрические исследования показали, что тормозное излучение в области $(2.4 - 3) \text{ \AA}$ пренебрежимо мало по сравнению с характеристическим излучением, что указывает на монохроматичность источника в данной области спектра при соответствующем подборе ускоряющего напряжения (рис. 1). Изображения, полученные с помощью камеры – обскуры, указывают на то, что рентгеновское излучение прикатодной титановой плазмы в области $< 3.5 \text{ \AA}$ пренебрежимо мало по сравнению с эмиссией титанового анода при лазерных интенсивностях $\leq 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ (рис. 2). Необходимо отметить, что такие параметры источника, как расстояние между электродами, плотность лазерного излучения на катоде-мишени, размер фокального пятна и приложенное напряжение были оптимизированы в соответ-

ствии с результатами работы [4].

Из экспериментальных данных, можно сделать следующие выводы:

1) При использовании титанового анода и плотностях лазерного потока на катоде $\approx 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ спектральная яркость эмиссии анода в K -линиях достигает величины $\approx 10^{21} \text{ фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ})$ при общем количестве фотонов $\approx 10^{11}$.

2) Исследование пространственного распределения рентгеновского излучения для катода и анода, выполненных из титана, показало, что при плотностях потока лазерного излучения на катода менее, чем $5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$, излучение прикатодной плазмы много меньше по сравнению с характеристическим и тормозным излучением анода. Этот результат находится в согласии с оценкой электронной температуры плазмы при данных плотностях лазерного излучения ($T_e < 10 \text{ эВ}$).

3) Поперечные размеры источника при использовании игольчатого анода не превышали 250 мкм .

4) Измерение спектральных характеристик источника в области $(2.4 - 3.0) \text{ \AA}$, соответствующей длинам волн линий $K_{\alpha 1}(2.749 \text{ \AA})$, $K_{\alpha 2}(2.752 \text{ \AA})$ и $K_{\beta}(2.514 \text{ \AA})$ характеристического излучения титана, показало отсутствие мощного тормозного излучения при выбранном ускоряющем напряжении, что указывает на высокую степень монохроматичности источника в данной области спектра.

5) Интенсивность монохроматического рентгеновского излучения при фиксированном приложенном напряжении практически не изменяется в широкой области $(2 - 300) \text{ мДж}$ энергий лазерного импульса. Этот результат важен с точки зрения создания компактного монохроматического рентгеновского источника для практических целей.

6) Интенсивность рентгеновского излучения зависит от состояния поверхности катода. Как правило, при повторных выстрелах в одно и то же место катода интенсивность рентгеновского излучения уменьшалась.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты N 98-02-17386-а, 97-02-17852-а, 98-02-17385а, 99-02-18499а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дмитриев М. В., Захаренков Ю. А., Шиканов А. С. Препринт ФИАН N 91, М., 1989.
- [2] K o r o b k i n Yu. V., R o z a n o v V. B., S h i c a n o v A. S., and V e r g u n o v a G. A. Preprint N 27, Lebedev Physical Institute, Moscow, 1995.

- [3] К о р о б к и н Yu. V., R o z a n o v V. B., S h i c a n o v A. S., and V e r g u n o v a G. A. The Russian J. of Laser Research, **19**, 101 (1998).
- [4] К о р о б к и н Yu. V., R o m a n o v I. V., R u p a s o v A. A. et al. Physica Scripta, **60**, 76 (1999).
- [5] H e n k e B. L. and T e s l e r M. A. Techniques of low energy X-ray spectroscopy in 0.1 – 2 keV region, Advances in X-ray analysis, **18**, Plenum Press, 1975.
- [6] Б е л я е в Л. М., Г и л ь в а р г А. Б., М и х а й л о в Ю. А. и др. Квантовая электроника, **4**, 129 (1977).

Поступила в редакцию 17 декабря 1999 г.