

02;04;07;12

©1993

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

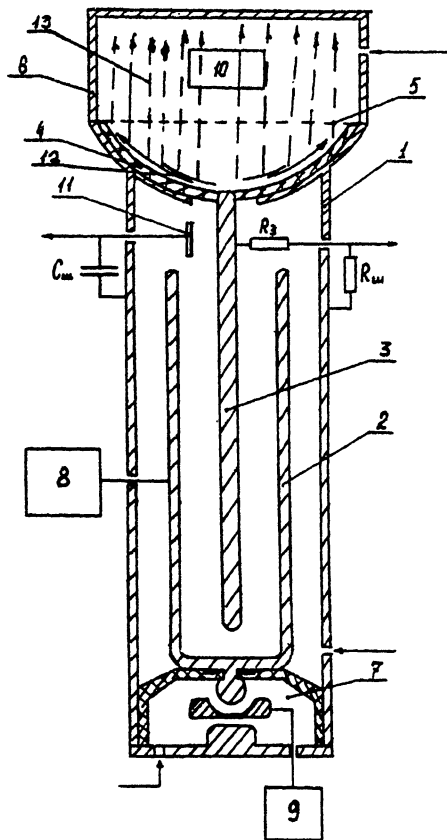
*П.Н. Дашук, С.П. Кулаков, В.Ю. Коробочко,
Ю.В. Рыбин, Е.К. Чистов, А.Н. Шутко*

В работе ставилась задача создания источника мягкого рентгеновского излучения с эффективной энергией $\sim(5-10)$ кэВ, обеспечивающего в рабочей смеси CO_2 лазера ($p \simeq 10^5$ Па) на расстоянии ≤ 30 см от выходного окна излучателя ($S = 60 \times 30$ см) концентрацию фотоэлектронов не меньше чем 10^8 см^{-3} .

Нами был разработан излучатель, использующей мягкое рентгеновское излучение плазмы наносекундного скользящего разряда. Данный тип излучателя позволяет избежать использования разделительных окон между рентгеновским предыонизатором и освещаемым объемом, а также является одним из наиболее эффективных источников интенсивного рентгеновского излучения. Выбор излучателя определяет и основные параметры источника питания, а именно скорость нарастания напряжения на нагрузке $\frac{dU}{dt} \geq 10^{14} \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$, фронт импульса напряжения $\tau_f \simeq 1-3$ нс, при этом амплитуда должна составлять 200–400 кВ, общая длительность импульса напряжения $\tau_u \simeq 10$ нс, волновое сопротивление генератора $\rho \simeq 20$ Ом. Кроме того, конструктивное выполнение генератора должно позволять подключать плоскую газоразрядную нагрузку наиболее оптимальным образом.

Всем требованиям, выполнение которых необходимо для формирования многоканального наносекундного скользящего разряда (излучающей плазменной поверхности), наиболее полно отвечает генератор, основанный на разряде полосковой линии. Нами был выбран вариант генератора с использованием двойной полосковой линии, обеспечивающей максимальное напряжение на нагрузке при заданной величине зарядного напряжения.

Двойная полосковая формирующая линии (см. рисунок) образована внешним заземленным кожухом установки 1, высоковольтными электродами 2 и заземленным через зарядное сопротивление (R_3) электродом 3. Объем генератора заполнен трансформаторным маслом с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.45$ и электрической прочностью не хуже $200 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. Межэлектродные расстояния выбраны



Конструкция генератора мягкого рентгеновского излучения. 1 — кожух генератора; 2, 3 — высоковольтные электроды; 4 — диэлектрик излучателя; 5 — металлическая сетка; 6 — исследовательская камера; 7 — разрядник; 8 — блок импульсной зарядки линии; 9 — блок поджига разрядника; 10 — датчики рентгеновского излучения и концентрации фотоэлектронов; 11 — емкостной делитель напряжения; 12 — плазма скользящего разряда; 13 — рентгеновское излучение.

≈ 33 мм, что позволяет обеспечить электрическую прочность генератора ≈ 700 кВ. Размеры электродов 2 и 3 составляют, соответственно, 70×35 и 66×35 см, емкость электродов 2 на заземленный кожух $C_1 = 195$ пФ, а на заземленный электрод 3 $C_2 = 180$ пФ. Суммарная емкость генератора в зарядном режиме при этом составляет $C_{\Sigma} = C_1 + C_2 = 375$ пФ. Индуктивность контура, образованного электродом 2 и кожухом 1, равна $L_1 = 40$ нГ, а электродом 2 и электродом 3 — $L_2 = 40$ нГ. Волновое сопротивление генератора в разрядном режиме $\rho = 11$ Ом, что

позволяет на согласованной нагрузке $\rho_H = 22 \text{ Ом}$ при максимальном напряжении получить ток амплитудой до 30 кА. Максимальный энергозапас генератора соответственно составляет $W = 84 \text{ Дж}$.

Работа установки состоит в следующем. От импульсного зарядного устройства 8 на электрод 2 подается импульс напряжения положительной полярности, скорость нарастания которого подобрана так, что на нагрузке (R_3) амплитуда предимпульса напряжения не превышает 10% рабочего импульса. В момент достижения максимальной величины зарядного напряжения срабатывает газонаполненный разрядник рельсового типа 7. Величина амплитуды выходного напряжения генератора существенным образом зависит от соотношения времени пробега электромагнитной волны по двойной полосковой линии (τ) и времени коммутации разрядника (τ_k).

В случае, когда $\tau_k < \tau$ (волновой режим) на нагрузке формируется импульс напряжения отрицательной полярности, амплитуда которого составляет $U \simeq 2U_3$, где U_3 — амплитуда зарядного импульса, так как в нашем случае $R_3 \gg \gg 2\rho$. Длительность импульса при этом составляет $\tau_n \simeq 2\tau$. Под действием данного импульса происходит формирование многоканального наносекундного скользящего разряда. Скорость прорастания разряда v пропорциональна $\frac{dU}{dt}$ и составляет для величин $\frac{dU}{dt} \simeq 10^{14} \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$ $v \simeq 5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Следовательно, за время фронта импульса напряжения разряд прорастает на величину $\sim 10 \text{ см}$. После окончания фронта импульса разряд развивается под действием напряжения с частотой $f \simeq (2\tau_n)^{-1}$. При этом величина v уменьшается примерно в 10 раз и разряд не успевает перекрыть разрядный промежуток. Условие завершенности разряда можно сформулировать следующим образом: $l < \tau_f \vartheta = A \frac{U}{\tau_f}$, $\tau_f = AU$, где A — постоянная, составляющая для $\rho = 10^5 \text{ Па}$ величину $A \simeq 4-5 \cdot 10^{-5} \text{ см В}^{-1}$. При $l = 15 \text{ см}$, критической величиной U является $U_k = 300-400 \text{ кВ}$ ($\tau_f = 2-3 \text{ нс}$) [1]. В случае $U < U_k$ происходит формирование незавершенного разряда, а в случае $U > U_k$ — завершенного.

С точки зрения оптимальной работы источника рентгеновского излучения более перспективным для предыонизации CO_2 смесей представляется первый (незавершенный разряд) или близкий к нему режим, когда сопротивление разрядной плазмы $R_p \gg 2\rho$. Для этого следует обеспечить время коммутации разрядника на уровне $\tau_k \leq 4 \text{ нс}$, амплитуду зарядного напряжения $U_3 \simeq 250 \text{ кВ}$, длительность импульса $\tau_n \simeq 10 \text{ нс}$. В данном режиме происходит образование пакета импульсов мягкого рентгеновского излучения с

общей длительностью, зависящей от потерь в разряднике и составляющей $\sim 100-200$ нс.

Исследования ионизирующей способности излучения генерируемого плазмой разряда в данной установке проводилось по регистрации рентгеновского излучения скинтилляционным детектором и по величине фототока.

При скорости нарастания напряжения $\frac{dU}{dt} \simeq 7 \cdot 10^{13}$ В · с, амплитуде импульса $U \simeq 270$ кВ разряда в воздухе ($p = 10^5$ Па), было зарегистрировано рентгеновское излучение с эффективной энергией ~ 8 кэВ. На расстоянии ~ 10 см от поверхности излучателя концентрация электронов, создаваемая предьонизатором, оказалась меньше 10^8 см $^{-3}$. При тех же параметрах импульса в гелии, величина n_e составляла $\sim 10^8$ см $^{-3}$ ($p = 10^5$ Па).

Переход к скоростям напряжения $\frac{dU}{dt} \geq 10^{14}$ В · с $^{-1}$ и амплитудам импульсов, больших 300 кВ, позволил получить на расстоянии 30 см от выходного окна предьонизатора величину $n_e \simeq 2 \cdot 10^9$ см $^{-3}$, для гелия ($p = 10^5$ Па), что примерно в два раза ниже, чем величина, полученная в [1]. Это связано с тем, что в данном случае разряд формировался в более “мягком” режиме.

В воздухе, H_e , смесях $CO_2:N_2:He=1:1:4, 1:1:2$, даже в данном режиме была получена концентрация фотоэлектронов, аналогичная результатам работы [1]. Это связано с тем, что в этих смесях при давлениях, близких к атмосферному, сопротивление разрядной плазмы существенно больше волнового сопротивления генератора. Напряжение на нагрузке носит пиковый характер с длительностью импульса $\tau_{и} \simeq 10$ нс, паузы ~ 10 нс и суммарной длительностью процесса $\tau_{\Sigma} \simeq 100$ нс. Рентгеновское излучение также носит пиковый характер с суммарной длительностью ~ 50 нс и интегральной энергией за весь импульс равной 0.2 Дж. Отметим, что данный режим наиболее подходит для предьонизации смесей CO_2 лазеров. Величина n_e при $p = 10^5$ Па и расстоянии до предьонизатора ~ 30 см для всех исследованных смесей (1:1:8, 1:1:4, 1:1:2) составляла величину $n_e \simeq 2 \cdot 10^8$ см $^{-3}$. Переход к более “жесткому” режиму, аналогичному режиму, использовавшемуся в [1], при сохранении пикового режима излучения, позволит добиться существенного увеличения значения интегральной величины n_e .

Разработанный источник импульсов мягкого рентгеновского излучения может работать и в повторяющемся (частотном) режиме и использоваться не только в режиме предьонизатора газовых лазеров, но также для других приложений: для облучения рентгенорезистов в субмикронной литографии, рентгенодиагностики с наносекундным разре-

шением, для исследований по радиационной биологии, онкологии поверхностных тканей.

Список литературы

- [1] Дацук П.Н., Кулаков С.Л., Кучинский А.А., Рыбин Ю.В., Смирнов В.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 1. С. 50-57.

Санкт-Петербургский
государственный технический
университет

Поступило в Редакцию
17 августа 1993 г.
