

Импульсный CO₂-лазер с рентгеновским предьонизатором на основе высоковольтного тлеющего разряда низкого давления

В.Ф.Орешкин, А.М.Серёгин, В.В.Синайский, А.Р.Сорокин, Т.А.Щетинкина

Создан рентгеновский предьонизатор с плотностью энергии в электронном пучке 0.1 Дж/см² для импульсно-периодических газовых лазеров на основе высоковольтного (20–40 кВ) тлеющего разряда низкого давления. Приведены результаты расчетов концентрации электронов в смеси CO₂–N₂–He для титановой и других фольг в зависимости от напряжения на предьонизаторе. Предьонизатор может работать как в моноимпульсном режиме, так и в режиме с частотами повторения до сотен герц. В импульсном CO₂-лазере атмосферного давления с рентгеновской предьонизацией получен удельный энергосъем 51 Дж/л. Показана эффективность использования такого предьонизатора для других активных сред (CO-лазеров и эксимерных лазеров), что открывает новые перспективы в создании импульсно-периодических газовых лазеров.

Ключевые слова: газовые лазеры, предьонизация, CO₂-лазер.

1. Введение

Ключевой проблемой при создании импульсно-периодических газовых лазеров является создание эффективного предьонизатора. Именно он определяет тип, характер и свойства объемного разряда, от него в решающей степени зависят все характеристики лазера. В последнее время во всем мире наиболее интенсивные исследования ведутся по совершенствованию рентгеновских предьонизаторов и лазеров на их основе. Применение рентгеновской предьонизации позволило создать CO₂-лазеры с объемом активной среды 280 л, удельным энергосъемом 40 Дж/л и КПД 20 % [1–4], эксимерные XeCl-лазеры с удельным энергосъемом 10 Дж/л и КПД 5.3 % [5], при этом объемная плотность электронов предьонизации n_0 составляла $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Значительно меньшая деградация химического состава активной среды газовых лазеров под воздействием рентгеновского излучения по сравнению с воздействием электронными пучками или искровыми УФ источниками предьонизации позволяет существенно уменьшить затраты на обновление активной среды и увеличить ресурс работы лазера, получая расходуемость, близкую к дифракционной.

Однако использование в предьонизаторе [1–5] сверхвысоких напряжений (сотни киловольт) сильно затрудняет его применение в импульсно-периодических газовых лазерах. Снизить напряжение до 50 кВ (рабочее напряжение большинства коммутаторов, работающих с частотой более 30 Гц) удается в рентгеновских предьонизаторах, в которых применяются вакуумные диоды. В работе

[6] описан такой источник мягкого рентгеновского излучения. Он работает с максимальной частотой повторения импульсов 35 Гц, позволяя создавать предварительную ионизацию с объемной плотностью электронов $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ в CO₂-лазерах и лазерах на галогенидах инертных газов (плотность энергии электронов в пучке 0.01 Дж/см²). Авторы [6] указывают на возможность создания более мощных установок с частотой повторения импульсов до нескольких килогерц.

Следует заметить, что вакуумные диоды с использованием взрывной эмиссии электронов плохо работают в импульсно-периодическом режиме. Типичный ресурс обычных автокатодов составляет $\sim 10^4$ импульсов (при плотности тока $\sim 1 \text{ А/см}^2$) [7]. Диод нормально функционирует лишь при давлениях ниже 10^{-4} Тор и требует сложной системы откачки для своей работы в импульсно-периодическом режиме.

Широкоапертурные пучки электронов со средними (10–70 кэВ) [8, 9] и более высокими [10, 11] энергиями можно получать и в высоковольтном тлеющем разряде низкого давления. Частота повторения импульсов в этом случае может составлять десятки и сотни килогерц и ограничена только возможностями коммутатора и тепловой стойкостью фольги [12].

Целью настоящей работы являлось создание рентгеновского предьонизатора для импульсно-периодических лазеров с рабочим напряжением менее 50 кВ и плотностью энергии в пучке электронов 0.1 Дж/см², а также импульсного CO₂-лазера на его основе.

2. Конструкция лазера

Элементы конструкции лазера и схема электропитания представлены на рис. 1. Основной разряд создавался между катодом и анодом, имеющими профиль Эрнста. Ширина электродов ~ 80 мм, длина ~ 180 мм, расстояние между ними 30 мм. Основной разряд коммутировался тиратроном ТГИ2-15000/50 (Т₁). В качестве рентгеновского предьонизатора использовалось устройство, где

В.Ф.Орешкин, А.М.Серёгин, В.В.Синайский, Т.А.Щетинкина. ГУП «НПО Астрофизика», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95; e-mail: aphysica@aha.ru
А.Р.Сорокин. Институт физики полупроводников СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13; e-mail: ifp@isp.nsc.ru

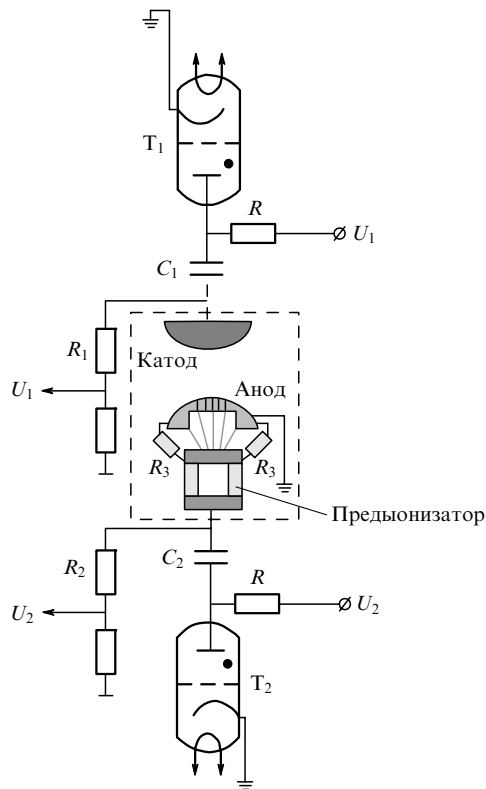


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 U_1 – напряжение основного разряда лазера; U_2 – напряжение питания предыонизатора; R_3 – сопротивление шунта предыонизатора.

электронный пучок получался в высоковольтном тлеющем разряде низкого давления. Корпус предыонизатора размером $\sim 160 \times 70 \times 50$ мм был выполнен из оргстекла. Нижняя крышка из алюминиевого сплава являлась катодом, верхняя алюминиевая крышка, перфорированная отверстиями с прозрачностью $\sim 80\%$, служила поддерживающей решеткой для фольги и являлась анодом предыонизатора. С помощью клея К-400 к ней вакуумно-плотно крепилась фольга – конвертер энергии пучка электронов в энергию рентгеновского излучения. Расстояние между плоскопараллельными катодом и анодом предыонизатора равнялось 35 мм. Электрические параметры предыонизатора контролировались с помощью делителя напряжения и токового шунта из резисторов ТВО.

На рис.2 приведены типичные осциллограммы плотности тока и напряжения в предыонизаторе. Плотность энергии в электронном пучке вычислялась интегрированием по осциллограммам напряжения и тока и составляла в рабочих режимах $0.05 - 0.1$ Дж/см², при этом не учитывалась энергия электронов, если она была менее 20 кэВ. Заметим, что удельная выходная энергия импульсных газовых лазеров логарифмически возрастает с ростом начальной концентрации электронов [13, 14], которая, в свою очередь, зависит от интенсивности источника ионизирующего излучения $S_0 = n_0/t$, где t – длительность импульса рентгеновского излучения. В соответствии с [15]

$$S_0 = \frac{UJ\beta\mu f}{2W}, \quad (1)$$

где U – ускоряющее напряжение; J – плотность тока электронного пучка; β – КПД преобразования энергии элект-

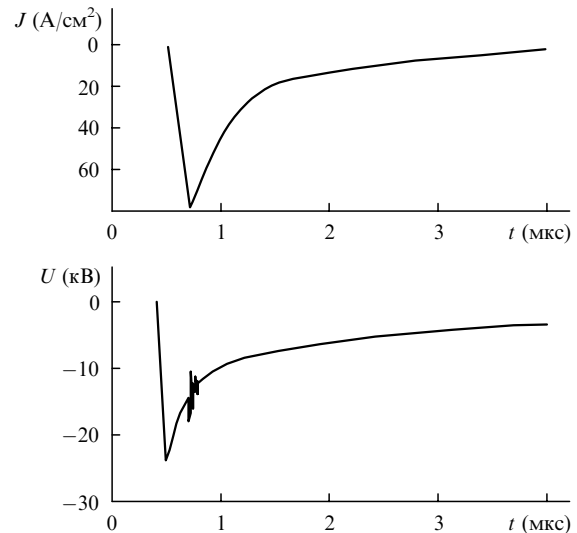


Рис.2. Типичные осциллограммы плотности тока и напряжения в предыонизаторе.

ронов в рентгеновское излучение; W – энергия образования одной пары электрон–ион; μ – коэффициент поглощения рентгеновского излучения; f – геометрический фактор, учитывающий телесный угол полезной части рентгеновского пучка, а также потери на поглощение и рассеяние.

Во Введении указывалось, что параметры как СО₂-лазеров, так и эксимерных лазеров существенно улучшаются при $n_0 = 10^{10} - 10^{12}$ см⁻³. В соответствии с (1) такую концентрацию электронов в активной среде можно получить, если плотность энергии электронного пучка в рентгеновской предыонизаторе $UJt \geq 0.1$ Дж/см².

Изменение давления Не в предыонизаторе (от нескольких торр до долей торра) позволяет легко менять длительность импульса рентгеновского излучения от 30 нс до 30 мкс. Электронная пушка предыонизатора создавала пучки электронов с максимальной энергией от 15 до 40 кэВ, плотностью энергии 0.1 Дж/см² и работала как в моноимпульсном режиме, так и в режиме с частотой повторения, превышающей 100 Гц. В импульсно-периодическом режиме (в том числе и при частоте более 100 Гц) вид осциллограмм тока и напряжения на предыонизаторе не изменялся. В настоящей работе эксперименты с СО₂-лазером проведены в моноимпульсном режиме. Результаты экспериментов в импульсно-периодическом режиме будут приведены в следующих публикациях.

Необходимое давление в пушке достигалось подачей Не через натекатель и откачкой форвакуумным насосом 2НВР-5Д. Давление газа контролировалось на выходе из предыонизатора с помощью термоманного преобразователя ПМТ-4М и прибора ВИТ-2. Электронный пучок имел сечение 2×12 см и тормозился в титановой фольге толщиной 12 мкм, создавая рентгеновское излучение и, тем самым, предварительную ионизацию в основном разряде в результате прохождения мягкого рентгеновского излучения через отверстия перфорированного анода. Фольга предыонизатора отстояла от поверхности анода основного разряда на 2 см.

Для коммутации тока в предыонизаторе использовался тиратрон ТГИ2-15000/50 (Т₂). Система запуска тиратронов основного разряда и предыонизатора позволяла плавно менять задержку в срабатывании тиратронов относительно друг друга, причем разброс в сраба-

тивании тиратронов относительно запускающего импульса не превышал 10 нс. В качестве накопительных применялись керамические конденсаторы К15-10 емкостью $C_1 = 20$ нФ и $C_2 = 4.7$ нФ. К настоящему моменту преионизатор выдал 10^6 импульсов без изменения своих характеристик. Резонатор лазера состоял из глухого медного зеркала (радиус кривизны 6.2 м) и полупрозрачного зеркала из KCl (или ZnSe) с диэлектрическим покрытием и коэффициентом отражения 90 % (или 80 %).

В этой системе был получен устойчивый однородный разряд в смесях с большим содержанием молекулярных газов. В наших условиях оптимальной оказалась смесь состава CO₂:N₂:He = 1:2:4. Энергия генерации лазера составила 2.6 Дж. Измерения энергии проводились с помощью приемника излучения ТПИ-2М с ампервольтметром Ф-30 или прибора ИМО-2М. Результаты измерений оказались идентичными. Активная среда имела размер $3 \times 2 \times 11$ см, и ее излучение диафрагмировалось оправой полупрозрачного зеркала диаметром 28 мм. Отпечаток на термобумаге и копировальной бумаге имел размер 18×26 мм, что соответствовало объему активной среды ~ 51.5 см³ и удельному энергосъему 51 Дж/л. КПД от энергии, запасенной в накопительной емкости, составил более 10 %. Удельный энергосъем 51 Дж/л удалось получить благодаря высокому энерговкладу в лазерную смесь с большим содержанием молекулярных газов вследствие высокой и однородной начальной концентрации электронов в активной среде CO₂-лазера.

3. Режим преионизации и длительность импульса

Важной особенностью созданного преионизатора является то, что длительность рентгеновского излучения в нем легко регулировать. Полученные с его помощью длительности импульсов находятся в диапазоне 10 нс–30 мкс. Этот диапазон может быть легко расширен до миллисекунд в случае использования искусственных формирующих линий. В этом преионизаторе можно использовать и просто непрерывный тлеющий разряд.

Для сравнения заметим, что электронные пучки в вакуумных ускорителях имеют длительность не более нескольких микросекунд для катодов на взрывной эмиссии, а применение термокатодов и плазменных источников электронов с полым катодом, хотя и позволяет получать ленточные электронные пучки с большой длительностью (вплоть до непрерывного режима), но настолько усложняет установку, что может быть оправдано лишь в отдельных случаях для крупных и дорогих установок. Искровой разряд, широко используемый для преионизации в газовых лазерах, имеет высокую температуру, необходимую для эффективной преионизации лишь в течение нескольких десятков, в лучшем случае сотен, наносекунд. Далее искровой канал расширяется и охлаждается. Трубочатые кварцевые лампы имеют сравнительно низкую температуру газового разряда и могут быть эффективны лишь при добавках в активную среду лазера легкоионизируемых веществ типа трипропиламина и др.

В режиме длинного импульса (более 3 мкс) плотность энергии электронного пучка в рентгеновском преионизаторе удавалось увеличить с 0.1 до 0.3 Дж/см². Эффективность созданного рентгеновского преионизатора была продемонстрирована для CO-лазеров. На смеси состава CO:N₂:He = 1:9:10 при атмосферном давлении

был получен объемный разряд с энерговкладом ~ 500 Дж/л, визуально очень однородный. Попытки получить генерацию при этом не предпринимались, т. к. активная смесь не охлаждалась, а ее длина была малой (~ 11 см).

4. Оценка вариантов использования различных материалов фольги преионизатора

Важным элементом преионизатора, влияющим на концентрацию электронов n_0 в активной среде, является фольга – конвертер рентгеновского излучения, от нее зависит коэффициент β в формуле (1). Кроме того, концентрация n_0 зависит от состава и давления активных сред газовых лазеров.

Расчеты концентрации электронов преионизации для различных активных сред и материалов фольги проводились согласно [16]. Для титановой фольги толщиной 12 мкм (рис.3) концентрация электронов в активной среде состава CO₂:N₂:He = 1:2:4 превышает 2×10^{10} см⁻³. При расчетах полагалось, что плотность энергии электронного пучка в преионизаторе составляет 0.1 Дж/см², а КПД преобразования электронного пучка в энергию γ -квантов – 1 %. Учитывалось воздействие как тормозного, так и характеристического рентгеновского излучения, хотя вклад последнего в наших условиях оказался незначительным.

Стоит заметить, что мы ограничились компьютерными расчетами и не проводили непосредственных измерений начальной концентрации электронов. В нашем случае, ввиду малости площади электродов основного разряда (20 см²), превышение полезного сигнала над уровнем неизбежных наводок оказывается невелико [13], что затрудняет проведение корректных измерений. Расчеты проверялись авторами работ [6, 16] экспериментально, и было отмечено хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента.

В импульсно-периодическом режиме значительно возрастают тепловые нагрузки на фольгу. Подходящей для работы в таких условиях может оказаться алюминивно-бериллиевая фольга толщиной 50 мкм (Al – 50 %, Be – 50 %). Она вакуумно-плотная, обладает высокими прочностью и жесткостью. Для алюминивно-бериллие-

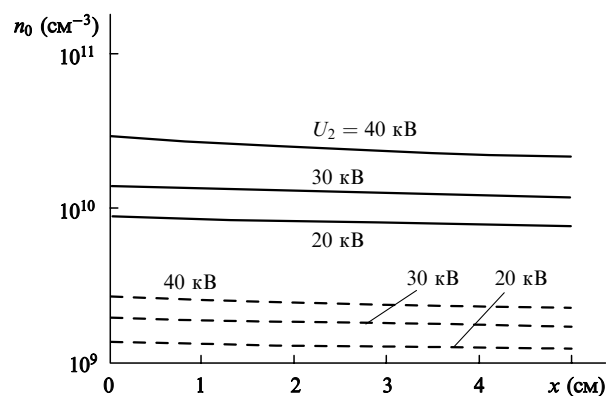


Рис.3. Распределения концентрации начальных электронов преионизации в активной среде CO₂-лазера для смеси состава CO₂:N₂:He = 1:2:4 при использовании титановой фольги толщиной 12 мкм (сплошные линии) и алюминивно-бериллиевой фольги толщиной 50 мкм (штриховые линии) для различных напряжений на преионизаторе.

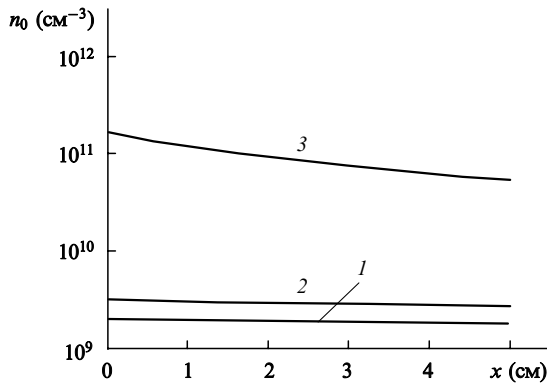


Рис.4. Распределения концентрации электронов предыонизации в активной среде CO_2 -лазера для различных сред при использовании алюминиево-бериллиевой фольги толщиной 50 мкм и напряжении на предыонизаторе 30 кВ: 1 – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:4$ (1 атм); 2 – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:1$ (1 атм); 3 – $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{Ne} = 2.5:20:1000$ (4 атм).

вой фольги результаты расчетов приведены на рис.3. Видно, что распределение концентрации электронов в активной среде достаточно однородное, что положительно влияет на качество разряда накачки. Концентрация электронов предыонизации при использовании алюминиево-бериллиевой фольги толщиной 50 мкм на порядок ниже, чем при использовании титановой фольги толщиной 12 мкм, однако в эксимерных лазерах применяются инертные газы с большим атомным номером и высокой плотностью, в которых поглощение рентгеновского излучения намного эффективнее. Расчеты показали, что даже для алюминиево-бериллиевой фольги концентрация электронов предыонизации в эксимерной среде составляет $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и более (рис.4).

Выходная энергия растет с ростом начальной концентрации не только в CO_2 -лазерах, в значительной мере это справедливо и для эксимерных лазеров [17]. Однако данная зависимость является слабой (логарифмической).

Проведенный нами эксперимент показал, что при снижении напряжения на предыонизаторе с 28 до 15 кВ (см. рис.1) выходная энергия CO_2 -лазера уменьшилась лишь на 11 %, т. е. можно говорить о возможности масштабирования созданного лазера. Действительно, снизив плотность энергии в пучке с 0.1 до 0,01 Дж/см², мы можем на порядок увеличить площадь поперечного сечения электронного пучка, а следовательно, и объем активной среды лазера. В этом случае ввиду незначительного изменения удельного энергосъема выходная энергия лазера увеличится почти на порядок.

5. Выводы

Таким образом, создан удобный, простой в изготовлении и эксплуатации рентгеновский предыонизатор для импульсно-периодических газовых лазеров, имеющих малые габариты и вес. Экспериментально установлено, что:

- предыонизатор работает при напряжениях 15–50 кВ на серийных тиратронах как в моноимпульсном режиме, так и в режиме с частотой повторения импульсов до сотен герц и более;

- предыонизатор позволяет получать электронные пучки с высокой однородностью распределения тока и плотностью энергии $\sim 0.1 \text{ Дж/см}^2$, что на порядок пре-

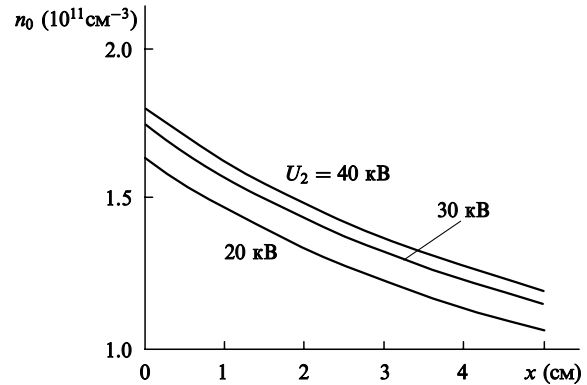


Рис.5. Распределения концентрации электронов предыонизации в активной среде CO_2 -лазера для смеси состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:4$ при использовании бериллиевой фольги толщиной 50 мкм с золотым покрытием толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$ для различных напряжений на предыонизаторе.

вышает плотность энергии в лучших известных образцах [6];

- CO_2 -лазер с использованием рентгеновского предыонизатора имеет удельный энергосъем 51 Дж/л и КПД более 10 %; выходная энергия лазера составила 2.6 Дж;

- CO_2 -лазер с рентгеновским предыонизатором допускает масштабирование, и его энергия может быть увеличена по крайней мере на порядок при незначительном снижении удельного энергосъема и КПД.

Расчеты показали, что начальная концентрация электронов в активной среде CO_2 -лазера для титановой фольги толщиной 12 мкм и смеси состава $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:4$ при атмосферном давлении превышает $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для нашей установки и условий эксперимента она составляет $5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$.

В случае оптимизации предыонизатора, в частности при переходе к чисто бериллиевой фольге с золотым покрытием (рис.5), концентрацию электронов можно повысить до $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и более, что приведет к росту энергетических характеристик различных газовых лазеров высокого давления.

1. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И. и др. *Квантовая электроника*, **3**, 601 (1976).
2. Басманов В.Ф., Босамыкин В.С. и др. *ЖТФ*, **52** (1), 128 (1982).
3. Павловский А.И., Босамыкин В.С. и др. *Квантовая электроника*, **14**, 428 (1987).
4. Буранов С.Н., Горохов В.В. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 891 (1991).
5. Павловский А.И., Карелин В.И. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **54**, 2032 (1990).
6. Levatter J.I., Zaizguang Li. *Rev. Sci. Instrum.*, **52**, 1651 (1981).
7. Эрикссон Г.Ф., Мейс П.Н. *Приборы для научных исследований*, № 5, 65 (1981).
8. Сорокин А.Р., Бохан П.А. *Письма в ЖТФ*, **20** (17), 86 (1994).
9. Сорокин А.Р. *Письма в ЖТФ*, **17** (23), 92 (1991).
10. O'Brien B.V. *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 503 (1973).
11. Garnsworthy R.K., Mathias L.E.S., Carmichael C.H.H. *Appl. Phys. Lett.*, **19**, 506 (1971).
12. Бохан П.А., Сорокин А.Р. *ЖТФ*, **55** (1), 88 (1985).
13. Suzuki Sh., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 26 (1980).
14. Suzuki Sh., Ishibashi Y., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **53**, 184 (1982).
15. Lin S.C., Levatter J.I. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 505 (1979).
16. Козырев А.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. *Квантовая электроника*, **11**, 524 (1984).
17. Katsumi Midorikawa, Minoru Obara, Tomoo Fujioka. *IEEE J. Quantum Electron.*, **20**, 198 (1984).