

Малогабаритный мощный электроразрядный эксимерный лазер с высокоэффективным использованием скользящего разряда по поверхности оксидной керамики / М.П. Антоненко, Н.С. Белокриницкий, Н.Г. Зубрилин, Ю.И. Ступак, М.П. Черноморец // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. -С. 41-46.

Проведены исследования возможностей применения скользящего разряда по поверхности оксидной керамики в конструкциях среднemasштабных эксимерных лазеров. Скользящий разряд использовался как для УФ-предионизации из-под сеточного катода, так и в качестве плазменных электродов. Проведены исследования режимов генерации и оптимизации различных схем возбуждения. Создан компактный эксимерный лазер с размерами излучателя $970 \times 415 \times 210 \text{ мм}^2$ и энергией генерации 1 Дж. Создана конструкция плазменных электродов, позволяющая получать в среде ХеСl-лазера однородный объемный разряд с низким потенциалом зажигания. Библиография 10 назв. Иллюстраций 4.

М. П. Антоненко, Н. С. Белокриницкий, Н. Г. Зубрилин, Ю. И. Ступак,
М. П. Черноморец
(Акционерная экологическая ассоциация "Белка", Киев)

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ МОЩНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ
ЭКСИМЕРНЫЙ ЛАЗЕР С ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫМ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА
ПО ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

В настоящее время существует ряд фирм и организаций, которые производят эксимерные лазеры для научных и производственных целей. В большинстве случаев эти лазеры имеют энергию в импульсе 100—200 МДж и частоту следования импульсов 100—200 Гц. Однако для решения многих задач требуется энергия в импульсе 1 Дж и более. К подобным задачам прежде всего следует отнести дистанционное зондирование атмосферы, обработку материалов и создание новых материалов с использованием технологий, основанных как на физических, так и на фотохимических процессах. Настоящая работа посвящена вопросам разработки лазеров такого класса.

Известно, что одним из ключевых условий хорошей работы электроразрядного эксимерного лазера является создание интенсивной и однородной предионизации разрядного объема. Простым и удобным способом предионизации является УФ-подсветка искровым разрядом (свободная искра или искра по поверхности диэлектрика).

Авторами работы [1] проводилось сравнение спектров и интенсивности свечения в ВУФ-области для свободной искры (СИ) и скользящего разряда (СР) по поверхности диэлектрика в типичной среде CO_2 -лазера. Было показано, что интенсивность подсветки активного объема в случае СР может быть в несколько раз больше как за счет отличия характеристик СР и СИ, так и за счет возможности более оптимального размещения СР по отношению к активному объему. Мы проводили сравнение интенсивности свечения ряда СИ и ряда искр СР по поверхности кварца в воздухе. Оказалось, что при одинаковой схеме импульсного питания и геометрии измерений интенсивность ряда искр СР в полосе пропускания фильтра УФС-2 почти вдвое больше, чем для СИ, причём это увеличение достигается в основном благодаря большей оптимальной длине искр СР по сравнению с искрами СИ.

В эксимерных лазерах СР по листу диэлектрика применялся в работах [2—4], где он одновременно служил плазменным электродом для объемного разряда накачки. Была показана высокая эффективность плазменных электродов: при энерговыкладе в плазменный лист $5 \cdot 10^{-2}$ Дж / см² в типичной смеси

KrF-лазера достигалась плотность электронов предыонизации $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, что определяло высокую однородность объемного разряда и большой удельный энергосъем лазера (более 6 Дж/л [4]).

В [4] диэлектриком для плазменного листа служил стеклотекстолит. При использовании СР по стеклотекстолиту для УФ-подсветки происходит выделение в рабочий объем лазера загрязняющих примесей, а в случае плазменных электродов, кроме того, — сравнительно быстрое выгорание диэлектрика из-за его малой теплопроводности и больших токовых нагрузок. Дальнейшее применение СР в эксимерных лазерах требует подбора таких технологичных диэлектриков, которые устойчивы при контакте с плотной плазмой, создаваемой в агрессивной среде, и выдерживают большие токовые нагрузки.

В настоящей работе предложено использовать в качестве диэлектрика для СР в эксимерных лазерах оксидную поликоровую керамику отечественного промышленного производства. Скользящий разряд по поверхности поликоровой керамики служил в одном случае для УФ-подсветки активного объема через сеточный катод, а в другом — в качестве плазменных электродов. Поликоровая керамика отличается устойчивостью в агрессивных средах, высокой механической и электрической прочностью, имеет диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 9,5$) почти в 2 раза выше, чем стеклотекстолит. Указанные достоинства очень важны для получения высокого коэффициента заполнения поверхности искровыми каналами. Так, при сравнительных испытаниях плотность каналов на поверхности керамики оказалась в 1,5 раза выше, чем на поверхности стеклотекстолита.

Конструктивной особенностью в нашей работе является использование СР не по плоской поверхности, как в [2—4], а по поверхности цилиндрических трубок [5]. Основным критерием здесь была технологичность при изготовлении микромодулей из керамики, на которые нанесены токовводы, и их монтаже в лазерном блоке. Из индивидуальных трубок (микромодулей) набирались как необходимая поверхность для УФ-подсветки, так и среднemasштабные плазменные электроды. Токовводы на внешней активной (соприкасающейся с объемным разрядом) поверхности трубок и металлическое покрытие на внутренней пассивной поверхности со стороны, обращенной к разряду, наносились из тугоплавкого, химически стойкого сплава с хорошей адгезией к поверхности используемой нами керамики, которая обеспечивалась применением специально отработанных для этих целей технологий.

На схеме лазера с УФ-подсветкой скользящим разрядом (рис. 1) геометрические размеры активной области камеры составляют $3,5 \times 2,0 \times 70 \text{ см}^3$, где первое число показывает межэлектродное расстояние. Плоский резонатор состоит из "глухого" диэлектрического зеркала и выходного кварцевого окна лазерной камеры. Накачка лазера осуществлялась двойной линией Блюмляйна, собранной из конденсаторов К15-10. Емкость нижней ступени $C_0'' = 37,8 \text{ нФ}$, емкость верхней ступени $C_0' = 120 \text{ нФ}$. Обострительная емкость $C_1 = 15 \text{ нФ}$ собрана из конденсаторов К15-4. Поскольку СР отличается большой однородностью свечения по сравнению с СИ, то схема не должна быть критичной к выбору задержки между предыонизацией и основным разрядом [4]. В данной схеме напряжение предыонизации подается на трубки при коммутации линии Блюмляйна автоматически с емкости C_2 , состоящей из двух пар последовательно соединенных конденсаторов К15-10 (3,3 нФ, 30 кВ) с помощью четырех отрезков кабеля РК - 75. Коммутатором является разрядник РУ-65.

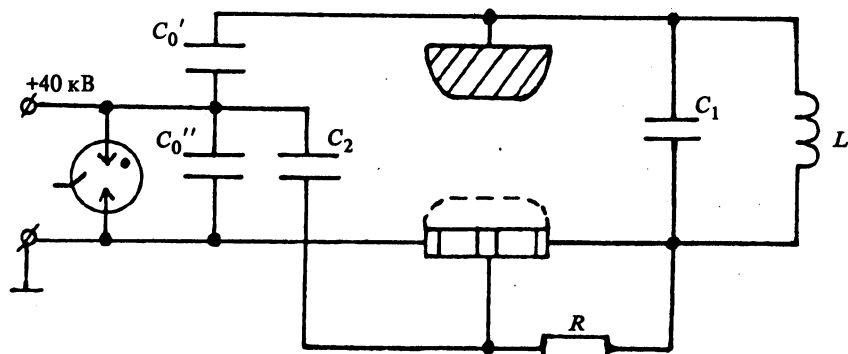


Рис. 1. Схема ХеСl-лазера с УФ-подсветкой через сеточный катод.
Объяснение в тексте.

Использовалась типичная для ХеСl-лазеров смесь на основе буферного газа Ne с содержанием Хе 3,2 кПа и НСl 0,53 кПа при полном давлении 0,45 МПа. При зарядном напряжении 36 кВ лазер генерировал импульс излучения длительностью 50 нс с энергией 1 Дж и КПД по накопленной энергии 1%.

По оценкам, энергозатрат в СР составлял $1,5 \cdot 10^{-2}$ Дж/см². Скользящий разряд поджигался при напряжении на электродах трубок 5-6 кВ. При длине фронта напряжения на электродах камеры 100 нс задержка основного разряда от начала предыонизации составляла 80 нс. Чтобы определить влияние предыонизации на выходную энергию, мы провели несколько опытов. Для обострения фронта тока СР к трубкам подсоединялись обострительные конденсаторы общей емкостью 1 нФ. Кроме того, с помощью магнитного ключа из ферритовых колец, надетых на кабели на выходе емкостей C₂, изменялась задержка между началом СР и основным разрядом, увеличивалась крутизна фронта напряжения на электродах СР. Магнитный ключ срабатывал при напряжении на C₂ в одном случае 20 кВ, а в другом — 35 кВ. Задержка уменьшалась до 40 и 20 нс соответственно. При всех изменениях в цепи питания СР выходная энергия лазера оставалась постоянной. Этот факт свидетельствует, на наш взгляд, о том, что предыонизация достаточно эффективна и не является "узким местом" в нашей инженерно-технологической конструкции лазера.

Использование СР представляется перспективным для получения больших энергий в импульсе путем реализации широкоапертурных эксимерных лазеров [6], что позволяет осуществить эффективную предыонизацию больших объемов активной среды. Широкоапертурный электрический разряд более устойчив к шнурованию и в нем легче реализовать длинные импульсы накачки с квазистационарной стадией горения. Известно, что в квазистационарной стадии объемный разряд является стабилизатором напряжения [7], т.е. сопротивление его увеличивается при уменьшении тока. Поэтому хорошее согласование сопротивлений формирующей линии и разряда и высокий КПД накачки наблюдаются при пониженных напряжениях на линии [8, 9]. С другой стороны, при обычном уровне предыонизации для получения высокой однородности

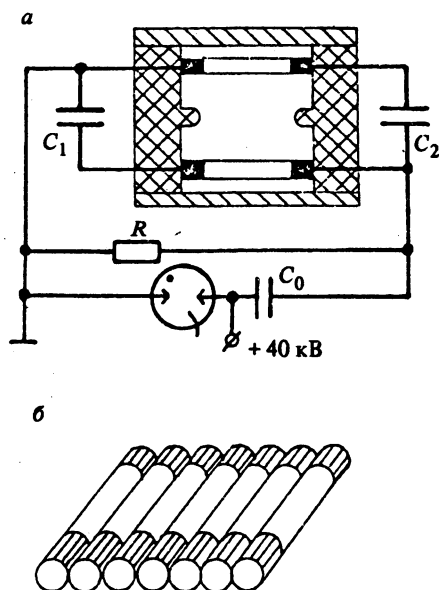


Рис. 2. Схема ХеСl-лазера с плазменными электродами (а) и вид электрода (б).
Объяснение в тексте

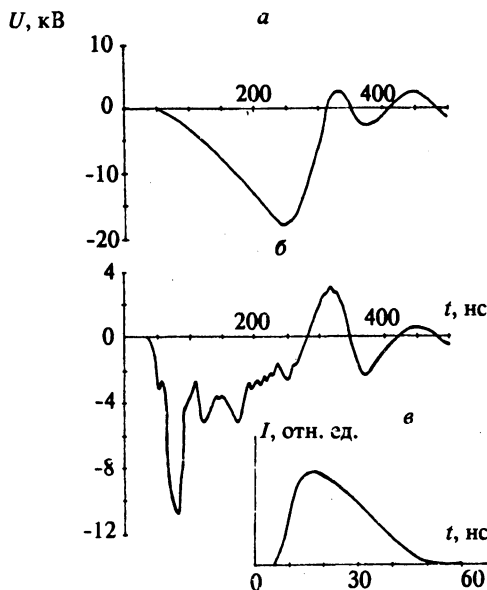


Рис. 3. Осциллограммы напряжений на емкости C_1 (а) и трубках верхнего электрода (б) и осциллограмма импульса генерации (в) лазера с плазменными электродами.

разряда требуется трех-четырёхкратное перенапряжение на линии [7]. В работе [8] для повышения концентрации электронов перед основным разрядом применялся высоковольтный предимпульс, а в [9] — мощная рентгеновская предыонизация.

Мы попытались реализовать накачку ХеСl-лазера при низком напряжении зажигания разряда в конструкции с плазменными электродами. Корпус камеры лазера с плазменными электродами (рис. 2) изготовлен из капролона. Геометрическая длина линейки плазменных электродов — 50 см, расстояние между электродами — 3 см, ширина активной области — 2 см. Внешний диаметр трубок равен 1 см.

Накопительный конденсатор C_0 емкостью 100 нФ заряжался до напряжения 25—40 кВ. Разрядные емкости C_1 и C_2 набирались из конденсаторов КВИ-3. Оптимальная газовая смесь имела следующий состав: НСl — 0,8 кПа, Хе — 4 кПа, Ne — 0,5 МПа.

Синхронизированные осциллограммы напряжения на конденсаторе C_1 и трубках верхнего электрода и осциллограмма импульса генерации (рис. 3) снимались при зарядном напряжении 36 кВ и $C_1 = C_2 = 55$ нФ.

Как видно из рис. 4, максимальная энергия генерации равнялась 240 МДж при полном КПД 0,3%. Напряжение зажигания основного разряда (см. рис. 3) равно 18,5 кВ. Оно зависит от давления в камере, величины зарядного напряжения и величины емкостей C_1 и C_2 , но не превышает 22 кВ ($U_3 = 40$ кВ, $P = 0,5$ МПа, $C_1 = C_2 = 30$ нФ). Пониженное напряжение зажигания разряда может быть вызвано несколькими причинами. В статье [6] в конструкции с одним плазменным электродом концентрация электронов предыонизации составляла $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для газовой среды ХеСl-лазера. При двух

плазменных электродах и сравнимом удельном энергокладе в СР она может достигать 10^{11} см^{-3} . Кроме того, плазма СР непосредственно в основном разрядном промежутке служит мощным источником начальных электронов в прикатодной области. Существенную роль, по-видимому, играет также пространственная модуляция напряженности поля в приэлектродных областях.

Из сравнения длительности импульса генерации (40 нс) и длительности переднего фронта напряжения на камере (200 нс) видно, что энергия генерации определяется запасом энергии на конденсаторах C_1 и C_2 к моменту зажигания основного разряда, а непосредственный вклад от C_0 мал. КПД лазера от энергии в C_1 и C_2 составлял 0,8—0,85% и почти не зависел от величины $C_1 + C_2$ при ее изменении от 50 до 110 нФ, а полный КПД возрастал при этом на 35%.

Оценки величины сопротивления трубок одного электрода перед зажиганием основного разряда по осциллограммам (рис. 3, а, б) дают значение $R = 0,4 \text{ Ом}$. Значение $R = 0,3 \text{ Ом}$ получается при оценках по формуле Теллера [10].

Можно оценить сопротивление межэлектродного промежутка R_d . В нашем эксперименте напряжение на C_1 и C_2 , давление и состав газа, запас энергии на $C_1 + C_2$ на единицу активного объема близки к данным работы [8]. В [8] удельное сопротивление газа равнялось $11,4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При таком удельном сопротивлении полное сопротивление нашей камеры $R_d = 0,35 \text{ Ом}$. В действительности оно может быть больше, так как квазистационарная стадия разряда не успеет сформироваться. Тем не менее очевидно, что значительная часть энергии, запасенной в C_1 и C_2 , выделяется на сопротивлении трубок, что снижает КПД лазера.

Сечение лазерного пучка имеет почти квадратную форму ($2,2 \times 2 \text{ см}^2$) с высокой степенью однородности распределения энергии. В приэлектродных областях размером 4 мм генерация отсутствует.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная схема накачки лазера не является оптимальной. К моменту зажигания разряда на емкостях C_1 и C_2 запасено только 30% энергии от первоначальной величины на C_0 . Удельный энергоклад от емкостей C_1 и C_2 составляет менее $0,01 \text{ Дж/см}^3$, а удельная мощность полезной накачки равна примерно $150 \text{ кВт/см}^3 \cdot \text{атм}$, т.е. накачка ненамного превышает пороговые условия. Из рис. 4 видно, что генерация возникает только при зарядном напряжении более

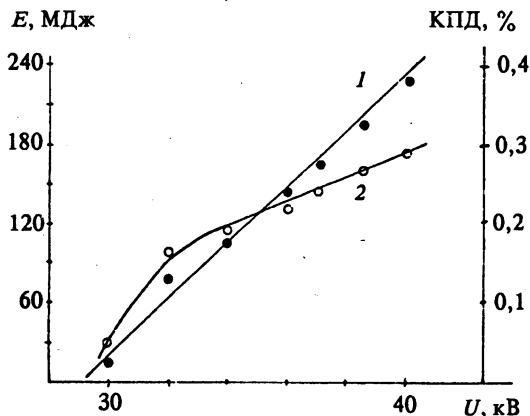


Рис. 4. Зависимость выходной энергии (1) и КПД (2) лазера с плазменными электродами от зарядного напряжения ($P = 0,5 \text{ МПа}$, $C_1 = C_2 = 55 \text{ нФ}$).

30 кВ, а полный КПД устойчиво растет с увеличением зарядного напряжения. При более эффективной передаче энергии от C_0 к обостряющим емкостям можно ожидать заметного возрастания полного КПД лазера.

В процессе исследований лазер с УФ-подсветкой отработал около $5 \cdot 10^5$ импульсов, а лазер с плазменными электродами — 10^4 импульсов. Заметных изменений на поверхности трубок и ухудшения их работы не обнаружено.

Таким образом, скользящий разряд по поверхности оксидной поликоровой керамики можно с успехом использовать для УФ-предыонизации в эксимерных лазерах и для конструирования лазеров с плазменными электродами. Создан компактный эксимерный лазер с размерами излучателя $970 \times 415 \times 210$ мм³ и энергией генерации 1 Дж. Кроме того, разработана конструкция плазменных электродов, позволяющая получать в среде ХеСl-лазера однородный объемный разряд с низким потенциалом зажигания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарослов Д. Ю., Карлов Н. В., Кузьмин Г. П., Никифоров С. М. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 6. С. 1221.
2. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Давидовский А. М., Христофоров О. Б. // Там же. 1981. Т. 8, № 1. С. 77.
3. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Христофоров О. Б. // Там же. Т. 8, № 1. С. 165.
4. Христофоров О. Б. // Автореф. канд. дис. М., 1984.
5. А.с. 1552961 (СССР).
6. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Молчанов Д. Н. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14, № 8. С. 1542.
7. Taylor R. S., Corcum P. B., Watanabe S., Leopold K. E. // IEEE J. 1983. QE-19, № 3. P. 416.
8. Long W. H. (Jr), Plummer M. J., Steppaerts E. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Т. 43, № 6. P. 735.
9. Бычков Ю. Б., Винник М. Л., Лосев В. Ф. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14, № 8. С. 1582-1584.
10. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М., 1974.

Рукопись поступила 9.03.92