

EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA TOIMETISED. 32. KÕIDE  
FÜSIKA \* МАТЕМАТИКА. 1983, NR. 1

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР. ТОМ 32  
ФИЗИКА \* МАТЕМАТИКА. 1983, № 1

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1983.1.17>

УДК 621.373.8

А. ВИЛЛ, Т. КЛЕМЕНТИ,  
В. МИХКЕЛЬСОО, В. АЛТУХОВ

### ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ЭКСИМЕРНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР

A. VILL, T. KLEMENTI, V. MIHKELSOO, V. ALTUHNHOV. ELEKTRILISE ERGASTUSEGA  
EKSIMEERIMPULSSLASER

A. VILL, T. KLEMENTI, V. MIHKELSOO, V. ALTUHNHOV. DISCHARGE-PUMPED HIGH PULSE  
RATE EXCIMER LASER

(Представил К. К. Ребане)

Эксимерные лазеры с излучением в УФ-области спектра, в частности электроразрядные импульсно-периодические лазеры с большой частотой повторения импульсов, отличает простота конструкции, высокая эффективность, большая пиковая мощность и высокая средняя мощность излучения [1-5], благодаря чему они находят все более широкое научное и практическое применение. Они используются, например, для накачки перестраиваемых лазеров на красителях, высокой очистки веществ в селективной лазерной химии и т. д.

Перед нами стояла цель разработать и экспериментально исследовать компактный эксимерный импульсно-периодический лазер со сравнительно высокой эффективностью и высокой энергией в импульсе, а также подобрать оптимальные параметры системы питания и лазерного излучения путем модельного расчета осциллограмм разрядного тока и напряжения контура.

Электрическая схема эксимерного импульсно-периодического лазера ЭЛИ-2 представляет собой традиционную ТЕА-схему [6] с поперечным продувом рабочего газа между электродами. Генератор Блюмляйна собран на конденсаторах типа КВИ-3, в качестве коммутатора служит тиратрон ТГИ-1-1000/25. Существенно, что параллельно с контуром разряда включены «обостряющие» конденсаторы, позволяющие при оптимальном подборе их емкости повышать КПД более чем в 1,5 раза. Предионизация осуществляется УФ-подсветкой емкостным разрядом через диэлектрик (в данном случае — стекло). Предионизаторы максимально приближены к разрядному объему. Межэлектродное расстояние составляет около 20 мм, длина электродов — 600 мм, радиус кривизны обоих электродов — 20 мм. Использованный способ предионизации обеспечивает однородный емкостный разряд и повышенную диффузность основного разряда. Кроме того, однородность емкостного разряда исключает эрозию электродов, что весьма суще-

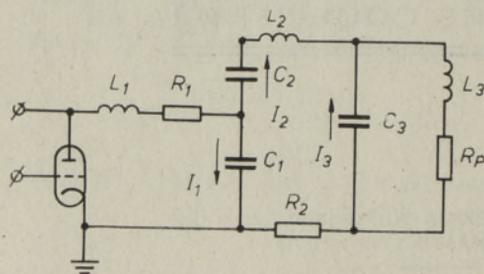


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема системы питания лазера.

ственно для импульсно-периодических лазеров с длительным сроком службы.

Конструктивно лазер выполнен из двух модулей: а) излучателя с балластным объемом и системой порцион-

ной смены и дозировки газа и б) блока управления с блоком питания. Последний может обеспечить работу лазера с частотой повторения импульсов до 100 Гц. Для зарядки высоковольтных емкостей используется импульсный трансформатор, в первичную обмотку которого включены накопительные конденсаторы. Коммутатором служит тиристор ТЧИ-100. Продув газа через лазерную кювету обеспечивается тремя параллельными осевыми вентиляторами, вращение которых в рабочем объеме осуществляется с помощью магнитных муфт. Балластный объем составляет 100 л, кпд блока питания  $\sim 70\%$ .

Для расчета осциллограмм тока и напряжения разрядного контура системы питания лазера необходимо было решить систему уравнений Кирхгофа, которую для нашей электроразрядной системы (рис. 1) удобно записать в виде

$$I_1 = F/L_1 - q_1/L_1 C_1 - R_1(I_1 + I_2)/L_1, \quad (1)$$

$$I_2 = -F/L_2, \quad F = R_2 I_2 - q_1/C_1 + q_2/C_2 - q_3/C_3, \quad (2)$$

$$I_3 = F/L_2 - q_3/L_3 C_3 - R_p(I_2 + I_3)/L_3. \quad (3)$$

Здесь токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и начальные условия для зарядов и токов  $I_i(0)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) при заданном начальном напряжении  $V_0$  определяются соотношениями

$$I_1 = \dot{q}_1, \quad I_1(0) = 0, \quad q_1(0) = C_1 V_0,$$

$$I_2 = \dot{q}_2, \quad I_2(0) = 0, \quad q_2(0) = C_2 V_0,$$

$$I_3 = \dot{q}_3, \quad I_3(0) = 0, \quad q_3(0) = 0.$$

Значения сопротивления  $R_1$  и индуктивностей  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  контуров разрядной схемы

$$R_1 = 0,1 \text{ Ом}, \quad L_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$L_2 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}, \quad L_3 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}$$

выбирались исходя из общих конструктивных соображений и предполагаемой средней мощности лазера ( $\sim 10$  Вт), а значения других параметров  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $R_2$  и  $R_p$  подбирались по принципу максимально достижимого кпд и наилучшего совпадения расчетных осциллограмм разряда с экспериментально наблюдаемыми осциллограммами напряжения на «обостряющей» емкости  $C_3$ . Сопротивление плазмы  $R_p$  аппроксимировалось ступенькой с падением  $R_p$  до 0,5 Ом в момент пробоя разрядного промежутка примерно через 80 нс после начала коммутации. Качественное и количественное соответствие в поведении расчетных и измеренных осциллограмм (см. рис. 2) указывает на приемлемость использованной нами аппроксимации для  $R_p(t)$ . При выборе значения  $C_3$  наряду с оптимальным коэффициентом передачи запасенной в конденсаторах энергии в плазму

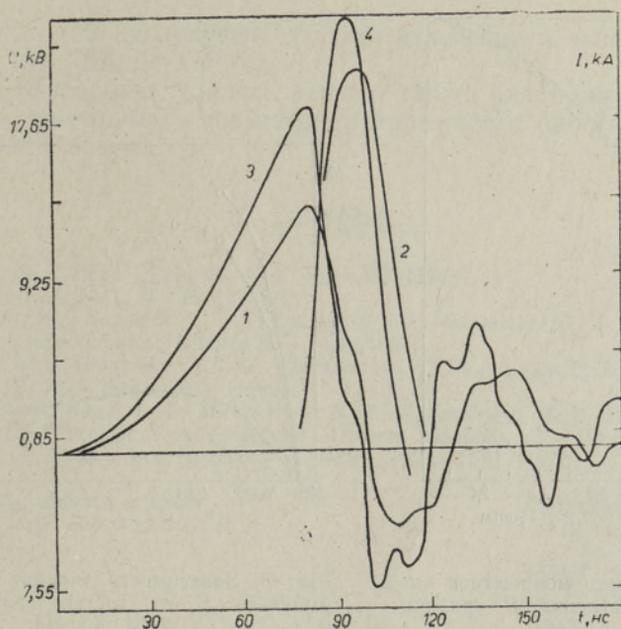


Рис. 2. Временные зависимости разрядного тока (2, 4) и напряжения (1, 3): кривые 1 и 2 при  $C_3 = 10^{-18}$  Ф, кривые 3 и 4 при  $C_3 = 5 \cdot 10^{-9}$  Ф.

$$K = \epsilon_b / \epsilon_0, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0 = V_0^2(C_1 + C_2)/2$ ,  $\epsilon_b = \int R_p(t) I_p(t) dt$ , учитывалось условие достижения максимального КПД, ограничивающее величину  $C_3$  снизу. При этом энерговыход в разряд считался до первого прохождения разрядного тока  $I_p(t) = I_2(t) + I_3(t)$  через нуль.

Таким образом были найдены значения  $R_2 \leq 0,01$  Ом,  $C_1 = 9 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_2 = 19 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_3 = 10 \cdot 10^{-9}$  Ф, обеспечивающие максимальный выход энергии генерации на стандартной рабочей смеси  $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{He}$  (0,2:4:95,8%). Варьируя параметры системы питания, удалось подобрать благоприятный режим разряда с достаточно крутым фронтом нарастания напряжения ( $\sim 18$  кВ за 80 нс) и с коротким ( $\sim 20$  нс), но сильным ( $\sim 25$  кА) импульсом разрядного тока (см. рис. 2). Используя найденные значения  $C_1$  и  $C_2$ , а также измеренное для этой смеси напряжение пробоя  $V_0 = 24$  кВ, получаем для  $\text{XeCl}$ -лазера КПД  $\sim 0,9\%$ .

В случае работы на  $\text{XeF}$  в качестве донора галогена использовался  $\text{NF}_3$ , так как стеклотекстолитовый изолятор разрядной камеры не позволяет работать со фтором. Генерация была получена на смеси  $\text{NF}_3:\text{Xe}:\text{He}$  (1:3:500) при давлении 2,3 атм. Энергия излучения в импульсе при частоте по-

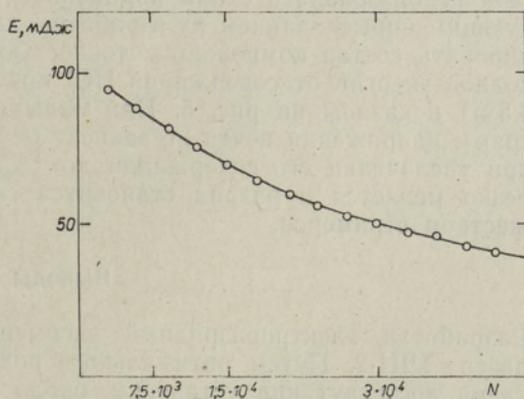


Рис. 3. Зависимость энергии генерации в импульсе  $E$  от числа импульсов  $N$  при работе на  $\text{XeF}$ .

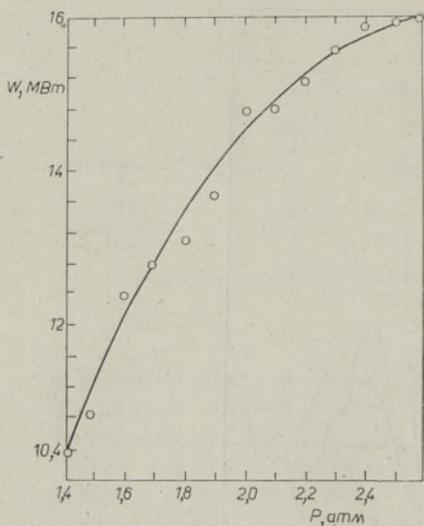


Рис. 4. Зависимость мощности в импульсе  $W$  от давления  $P$  при работе с  $\text{XeCl}$ .

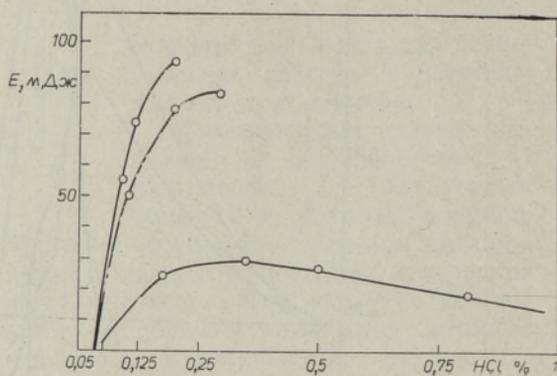


Рис. 5. Зависимость энергии излучения в импульсе  $E$  от состава рабочей смеси  $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{He}$ .

вторения импульсов до 100 Гц составила 100 мДж, средняя мощность — 10 Вт. К сожалению, срок службы смеси, содержащей  $\text{NF}_3$  с доступной нам чистотой ( $\sim 96\%$ ), довольно мал и при балластном объеме 100 л исчисляется примерно  $3 \cdot 10^4$  импульсами (при уменьшении энергии генерации вдвое, рис. 3). При определении ресурса параллельно регистрировались осциллограммы напряжения, вид которых почти не изменялся по мере старения рабочей смеси.

В случае  $\text{XeCl}$  для стандартной смеси  $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{He}$  энергия излучения в импульсе составляет 75 мДж, кпд  $\sim 0,9\%$  и частота повторения импульсов до 100 Гц. Длительность непрерывной работы на  $\text{XeCl}$  исчисляется  $10^6$ — $10^8$  импульсами, что значительно дольше, чем на  $\text{XeF}$ . Форма и длительность импульса генерации регистрировались с помощью ФЭК-29 и стробоскопического осциллографа С7-13. Длительность импульса генерации  $\text{XeCl}$ -лазера составляет  $\sim 15$  нс. При снижении давления от 2,6 до 1,4 атм мощность в импульсе на  $\text{XeCl}$  уменьшается от 16 до 10,4 МВт (см. рис. 4).

При анализе зависимости выходной энергии от состава рабочего газа использовалась схема порционной дозировки компонент с последующим впрыскиванием их в рабочую камеру. При этом удается регулировать состав компонент с точностью до 0,005%. Зависимости выходной энергии от содержания  $\text{HCl}$  при различных дозах  $\text{Xe}$  (0,6; 2,3; 3,5%) показаны на рис. 5. При малых дозах  $\text{HCl}$  характер осциллограмм напряжения почти не зависит от состава рабочей смеси, однако при увеличении его содержания до 1% форма импульса напряжения резко меняется и разряд становится сильно неустойчивым со множеством стримеров.

### Выводы

Разработан электроразрядный эксимерный импульсно-периодический лазер ЭЛИ-2. Путем оптимального подбора параметров системы питания достигнут кпд установки около 1%. При частоте повторения

импульсов до 100 Гц получена энергия излучения в импульсе 75 мДж на XeCl и 100 мДж на XeF.

В ходе разработки удалось решить также ряд инженерно-технических задач, связанных с повышением надежности работы и удобством обслуживания лазера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Fahlen, T. S. J. Appl. Phys.*, **49**, № 2, 455—457 (1978).
2. *Laser Focus*, **14**, № 1, 28—29 (1978).
3. *Баранов В. Ю., Баранов Г. С., Борисов В. М., Кирюхин Ю. Б., Мамонов С. Г.* Квант. электроника, **7**, № 4, 896—898 (1980).
4. *Тарасенко В. Ф., Верховский В. С., Федоров А. И., Тельминов Е. Н.* Квант, электроника, **7**, № 9, 2039—2041 (1980).
5. *Алтухов В. И., Вилл А. А., Михельсоо В. Т., Клементи Т. И.* В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Л., «Наука», 1981, с. 105.
6. *Lafamme, A. K. Rev. Sci. Instrum.*, **41**, № 11, 1578—1581 (1970).

*Институт физики и СКБ  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
12 января 1982

После переработки  
2 марта 1982