

УДК 621.373.826.038.823

Н. Г. БАСОВ, Л. А. ВАСИЛЬЕВ, В. Н. ВОЛКОВ, В. А. ДАНИЛЫЧЕВ,
О. М. КЕРИМОВ, А. И. МИЛАНИЧ, В. Н. ЛОМАКИН,
Н. Д. УСТИНОВ и Т. С. ХАЧАПУРИДZE

**ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ГАЛОИДАХ
ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ**

Теоретические исследования электроионизационного метода возбуждения показали возможность получения высоких (~50%) КПД лазеров на смесях инертных газов с галогенами [1, 2], что привлекает внимание экспериментаторов к данному типу лазеров [3-5].

В настоящей работе исследованы энергетические, пороговые и спектральные характеристики лазеров на эксимерах XeF, XeCl и KrF, а также

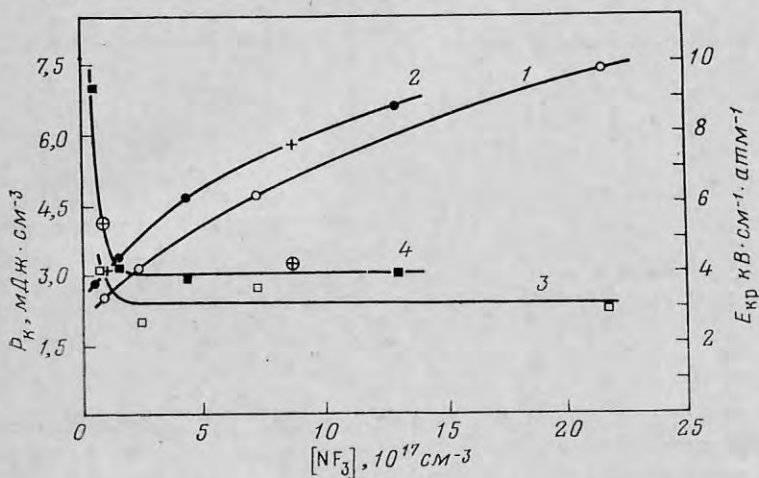


Рис. 1. Зависимость критического поля $E_{кр}$ (1, 2) и удельной энергии P_k (3, 4) от концентрации NF_3 и давления смеси. Плотность тока пучка $j_e=3,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, емкость ~6000 пФ.

p , атм	P_k	$E_{кр}$
2,5	□	○
1,5	■	●
1,0	⊕	+

характеристики разряда в смесях $Ar:Xe(Kr):NF_3(CCl_4)$. Ионизация газовых смесей осуществлялась электронным пучком со следующими параметрами: энергия электронов ~150 кэВ, средняя плотность тока 3,5-6 $\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$, сечение пучка $2,5 \times 50 \text{ см}$, длительность импульса тока пучка по полувысоте ~150 пс. Конструкция генератора электронного пучка аналогична описанной в работе [6]. Лазерная камера с объемом активной обла-

сти $2,5 \times 50 \times 2,3$ см ≈ 300 см откачивалась до давления $\sim 10^{-3}$ тор. В экспериментах использовались газы Ar, Kr (с 1% примесью Xe), Xe высокой чистоты и NF_3 с 6%-примесью азота. Спектральные измерения проводились при помощи кварцевого призмного спектрографа ИСП-30.

На рис. 1 представлены зависимости критического поля $E_{\text{кр}}$ (максимальная напряженность электрического поля, при которой электронный пучок не инициирует пробой разрядного промежутка) и соответствующей данному $E_{\text{кр}}$ вкладываемой в газ полем удельной энергии $P_{\text{к}}$ от концентрации NF_3 и давления смеси. Видно, что $E_{\text{кр}}$ и $P_{\text{к}}$ определяются главным образом концентрацией NF_3 и слабо зависят от давления смеси.

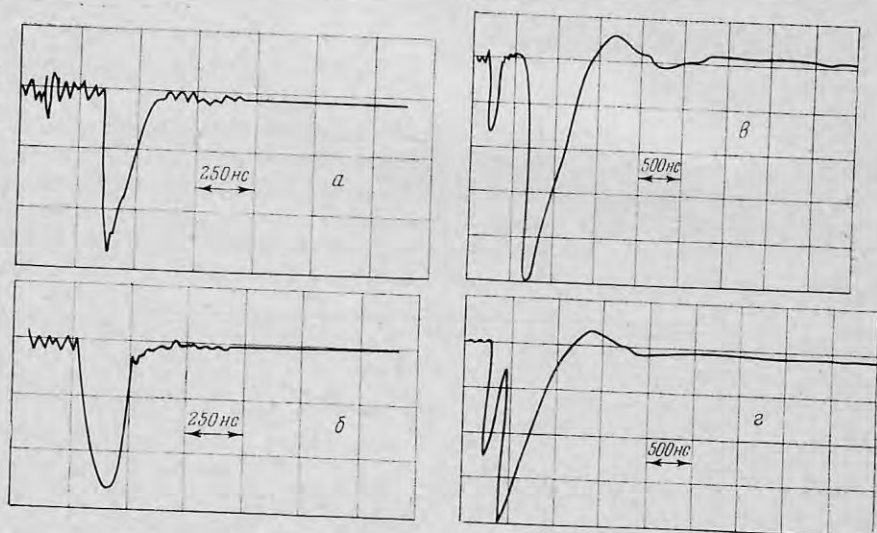


Рис. 2. Осциллограммы тока пучка (а) и разрядного тока (б-г). а - Плотность тока пучка $j_e = 6 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$; б-г - смесь Ar : Xe : $\text{NF}_3 = 1000 : 10 : 1$, разрядное напряжение $U \approx 4 \text{ кВ}$, 250 нс/дел (б); $\sim 6 \text{ кВ}$, 5 мкс/дел (в); $\sim 10,5 \text{ кВ}$, 0,5 мкс/дел (г)

При фиксированном давлении, концентрации NF_3 в смеси, большей $\sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, удельная энергия $P_{\text{к}}$, практически постоянна и возрастает при меньшей концентрации NF_3 .

Для напряженностей поля, больших $E_{\text{кр}}$, за импульсом разрядного тока следует пробой разрядного промежутка (см. рис. 2, в). Зависимость времени задержки пробоя τ от удельной мощности, вкладываемой в газ от поля Q_E , показана на рис. 3. Видно, что задержка τ уменьшается по мере увеличения Q_E . При плотности тока пучка $3,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ пробой наступал после импульса тока во всем диапазоне исследованных напряжений, давлений и концентраций NF_3 . Для плотности тока $6 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ пробой начинает происходить во время импульса тока пучка при удельной мощности, большей $\sim 200 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-3}$. В исследованной области плотности токов $3,5-6 \text{ А} \times \text{см}^{-2}$, концентраций NF_3 $0,38-6,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и давлений 1-3 атм зависимость τ от Q_E экстраполируется гиперболой $\tau Q_E \approx 0,04 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3}$.

Аналогичные осциллограммы разрядного тока для напряженностей, больших критической напряженности поля ($E_{\text{кр}} \approx 3 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ · атм $^{-1}$, смесь Ar : Xe : $\text{CCl}_4 = 1500 : 50 : 1$, $j \approx 6 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, $C = 0,28 \text{ мкФ}$), наблюдались и в смеси, содержащей CCl_4 . Однако в случае содержащих CCl_4 смесей пробой развивался всегда на спаде импульса электронного тока и при изменении

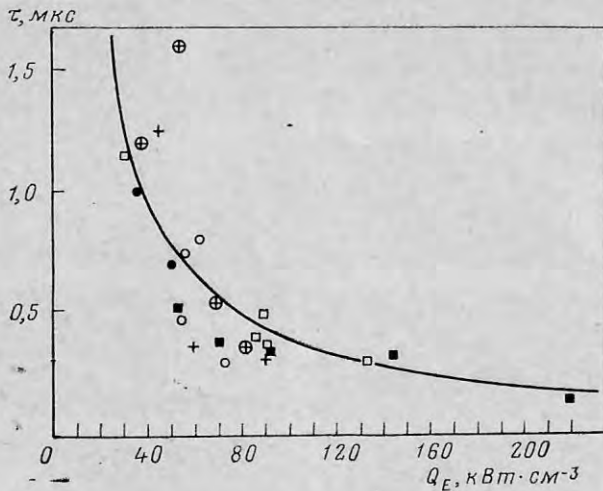


Рис. 3. Зависимость времени задержки пробоя τ разрядного промежутка от удельной мощности Q_E .

Точки	$[NF_3], 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$p, \text{ атм}$	$NF_3 : Xe : Ar$
●	6,65	3,0	1 : 20 : 100
○	3,33	1,5	1 : 20 : 100
+	3,33	3,0	1 : 20 : 220
⊕	1,11	1	1 : 20 : 220
□	1,11	3,0	1 : 20 : 700
■	0,79	3,0	1 : 20 : 1000

напряженности поля от $E_{др}$ вплоть до напряженностей статического пробоя перемещался вдоль заднего фронта импульса тока. Таким образом, диапазон изменения τ для смеси, содержащей CCl_4 , составлял ~ 100 нс.

Приведенная на рис. 2, б осциллограмма показывает, что разрядный ток практически повторяет ток пучка. Следовательно, имеет место режим «чистого прилипания», рекомбинацией электронов можно пренебречь, тогда плотность разрядного тока может быть вычислена по формуле

$$j_p = env_{др} = \frac{j_e \frac{dE}{dx} p}{W[NF_3]} \frac{v_{др}}{c}, \quad (1)$$

где j_p и j_e — плотности разрядного тока и тока пучка, e — заряд электрона, n — концентрация электронов, $v_{др}$ — дрейфовая скорость электронов, $\frac{dE}{dx}$ — тормозная спо-

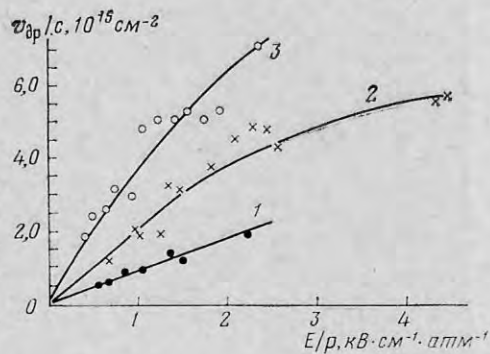


Рис. 4. Зависимость отношения $v_{др}/c$ от E/p . Концентрация NF_3 (%): 1 — 0,097, 2 — 0,30, 3 — 0,72

собность Ag ($\sim 6 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{атм}$ для электронов с энергией 150 кэВ). p — давление смеси, W — энергия рождения электрон-ионной пары, $[NF_3]$ — концентрация NF_3 , c — константа прилипания электронов к молекуле NF_3 .

Используя экспериментально измеренную зависимость величины разрядного тока от напряженности поля E , давления p и формулу (1), вычис-

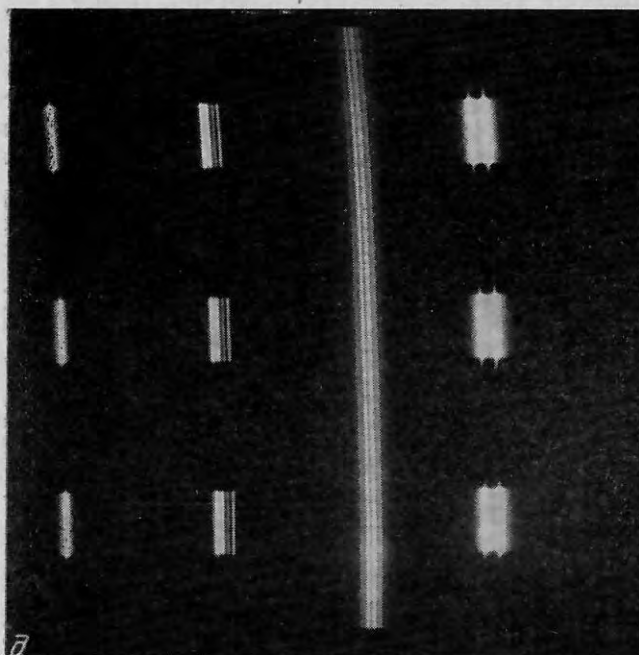
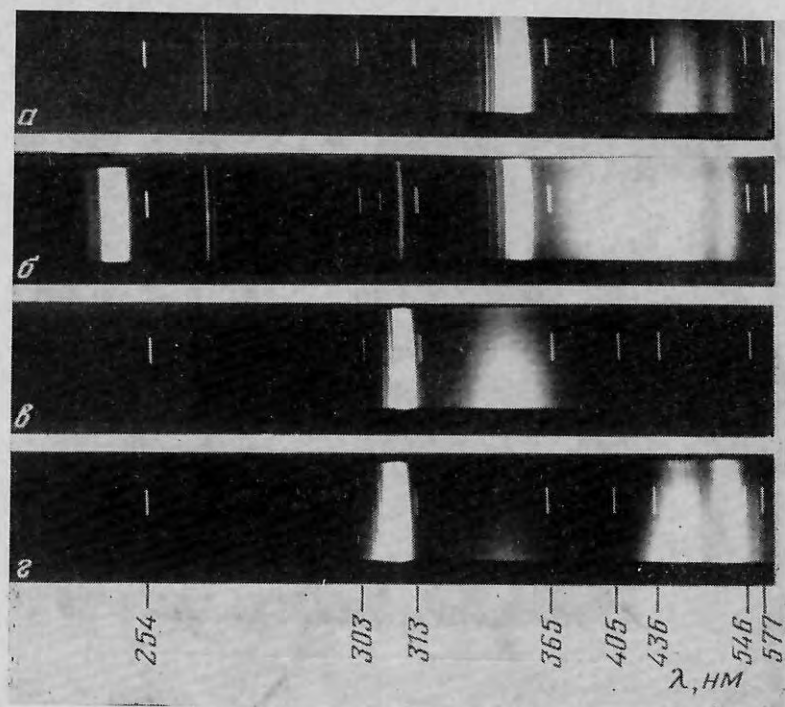


Рис. 5. Спектрограммы спонтанного (а-г) и лазерного (д) излучения смесей:

а - смесь $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{NF}_3 = 1000 : 10 : 1$, $p = 3$ атм;
 б - смесь $\text{Ar} : \text{Kr} : \text{NF}_3 = 1000 : 10 : 1$, $p = 3$ атм;
 в - смесь $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{CCl}_4 = 1000 : 10 : 1$, $p = 3$ атм;
 г - смесь $\text{Xe} : \text{CCl}_4 = 1000 : 1$, $p = 1$ атм;
 д - смесь $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{CCl}_4 = 1500 : 50 : 1$, $p = 2$ атм

ляем зависимость отношения $v_{др}/c$ от E/p для различных концентраций NF_3 (см. рис. 4). Увеличение концентрации NF_3 при заданном E/p приводит за счет неупругих столкновений электронов с молекулой NF_3 к смещению функции распределения электронов в область меньших значений энергии, в которой транспортное сечение в Ar меньше [7]. Это приводит в свою очередь к увеличению дрейфовой скорости электронов. Экстраполируя зависимость $v_{др}/c$ от $[NF_3]$ при фиксированном E/p к нулевым концентрациям NF_3 и взяв для дрейфовой скорости электронов в чистом аргоне

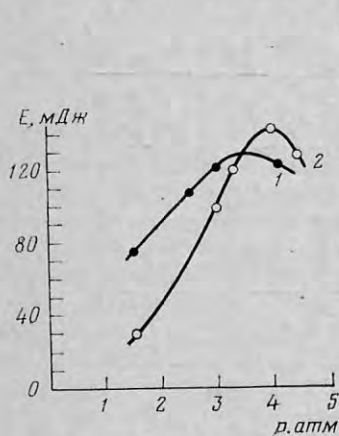


Рис. 6

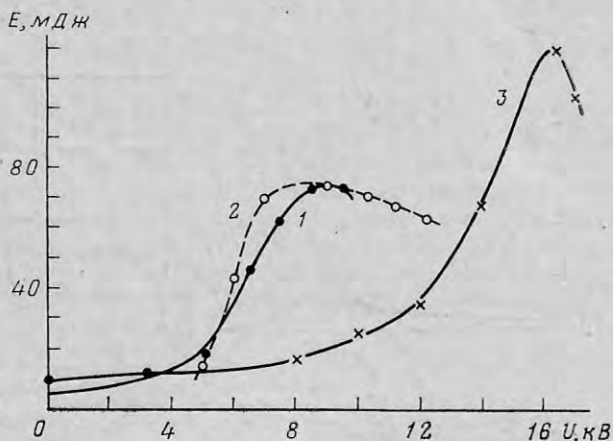


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость энергии излучения ХеF-лазера от давления p . $j_e=6 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$; $C=0,28 \text{ мкФ}$; $R_1=57\%$, $R_2=98\%$. Смесь Ar : Хе : NF_3 : 1 – 1000 : 10 : 1, 2 – 2000 : 10 : 1

Рис. 7. Зависимость энергии излучения ХеF-лазера от напряжения U . Смесь NF_3 : Хе : Ar=1 : 10 : 1000.

Кривая	p , атм	R_1 , %	R_2 , %
1	1,5	57	98
2	1,5	8	98
3	3,0	57	98

($E/p=1 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{тор}^{-1}$) значение $v_{др}\approx 4\cdot 10^5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ [7], определяем константу прилипания электронов к молекуле NF_3 : $c\approx 1,5\cdot 10^{-9} \text{ см}^3\cdot\text{с}^{-1}$. Аналогичным образом была определена константа прилипания электронов к молекуле CCl_4 : $c\approx 3\cdot 10^{-9} \text{ см}^3\cdot\text{с}^{-1}$.

В настоящей работе были исследованы спектры спонтанного излучения смесей Ar : Хе (Kr) : NF_3 ; Ar : Хе : CCl_4 и Хе : CCl_4 (см. рис. 5). Помимо известных ранее полос [8, 9] в спектре смесей Ar : Хе : CCl_4 и Хе : CCl_4 наблюдались две новые широкие полосы с максимумом вблизи 350 и 500 нм. Полоса 350 нм, по-видимому, связана с переходом молекул ХеCl из верхнего связанного ($^2\Sigma_{1/2}$) в нижнее репульсивное состояние ($^2\Pi_{1/2}$ или $^2\Pi_{3/2}$), а полоса 500 нм – с излучением молекулы Хе₂Cl. На полосу 500 нм накладывается большое число линий поглощения. На всех спектрах наблюдается провал вблизи 500 нм, который связан с провалом чувствительности используемой фотопленки РФ-3.

Генерация электроионизационного ХеF-лазера ($\lambda=353 \text{ нм}$) наблюдалась в широком диапазоне составов смесей, давлений, напряжений разрядной емкости и коэффициентов отражения зеркал. Оптимальная смесь

Ar : Xe : NF₃ близка к 1000 : 10 : 1 (рис. 6), типичные зависимости энергии излучения ХеF-лазера от напряжения разрядной емкости представлены на рис. 7.

При давлении 1,5 атм и коэффициентах отражения зеркал 98 и 57% генерация начиналась при накачке одним электронным пучком ($E=5$ мДж, $j_e=6$ А·см⁻², удельная мощность, вкладываемая в газ от пучка, $Q_e=50$ кВт·см⁻³). Для напряжений, больших 5 кВ, наблюдалось резкое увеличение энергии излучения, связанное с насыщением лазерного перехода. Уменьшение энергии лазерного излучения при напряжениях, больших

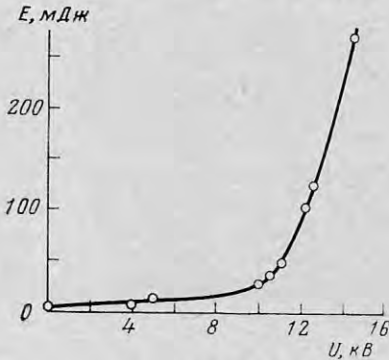


Рис. 8

Рис. 8. Зависимость энергии E излучения ХеСl-лазера от напряжения U . $j_e=6$ А·см⁻², $C=0,28$ мкФ; $p=2$ атм. Смесь Ar : Хе : ССl₄=1500 : 50 : 1



Рис. 9

Рис. 9. Осциллограмма излучения ХеСl-лазера. Развертка 100 нс/дел. Изломы на импульсе соответствуют аксиальному периоду резонатора $2L/C \approx 10$ нс

8–9 кВ, связано с тем, что длительность устойчивой стадии несамостоятельного разряда (рис. 2, з) при этих напряжениях становится меньше длительности тока пучка.

Замена 57%-зеркала на кварцевую подложку ($R=8\%$) (см. рис. 6, б) практически не изменила максимального значения энергии для давления 1,5 атм (для $p=3$ атм максимальная энергия уменьшалась почти вдвое).

Для смеси Ar : Хе : NF₃=1000 : 10 : 1 ($p=1,5$ атм, $R_1=98\%$, $R_2=8\%$) мощность накачки, при которой наблюдалось насыщение лазерного перехода, составила 80 кВт·см⁻³. Так как коэффициент усиления, необходимый для насыщения лазерного перехода в течение импульса накачки, составляет $2 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ (расчет согласно [4]), то эффективность преобразования энергии накачки в энергию излучения

$$\eta = \frac{\alpha/\sigma\hbar\omega}{Q\tau} \approx 2,5\%$$

($\Delta N = \alpha/\sigma$ — инверсия, $\hbar\omega$ — энергия кванта, $\sigma=4 \cdot 10^{-16}$ см² [10] — сечение индуцированного перехода, $\tau=16$ нс [11] — время жизни верхнего лазерного уровня).

Максимальный КПД ХеF-лазера составил $\sim 1,5\%$ (смесь Ar : Хе : NF₃=1000 : 10 : 1, $p=1,5$ атм). Максимальная энергия (мощность) излучения ХеF-лазера получена при давлении 4 атм (смесь Ar : Хе : NF₃=2000 : 10 : 1, $E/p=2$ кВ·см⁻¹·атм⁻¹, $Q_e=150$ кВт·см⁻³, $Q_E=230$ кВт·см⁻³) и составила 0,14 Дж ($\sim 3,5 \cdot 10^6$ Вт).

В отличие от электроионизационного ХеF-лазера генерация на молекуле КгF ($\lambda=249$ нм) в смеси Ar : Кг : NF₃ наблюдалась в узком диапазоне составов смеси при напряженности поля, близкой к напряженности

статического пробоя. Энергия лазерного излучения для оптимальной смеси $\text{Ar} : \text{Kr} : \text{NF}_3 = 600 : 20 : 1$ составляла несколько мДж, пороговая мощность накачки для давления 1,5 атм и коэффициентов отражения зеркал 98 и 93% $\sim 200 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-3}$.

Как и для лазера на молекуле XeF , генерация на молекуле XeCl ($\lambda \approx 308 \text{ нм}$, см. рис. 5) наблюдалась в широком диапазоне составов смеси, давлений и напряжений. В спектре генерации наблюдаются шесть линий, наиболее интенсивные из которых имеют длины волн $\sim 308,5 \text{ нм}$ и $\sim 308,2 \text{ нм}$. Расстояние между линиями, равное $0,20\text{--}0,26 \text{ нм}$, указывает на то, что спектр генерации соответствует переходам из верхнего состояния ($^2\Sigma_{1/2}$) на различные колебательные уровни нижнего слабо связанного состояния ($^2\Sigma_{1/2}$) [9].

Оптимальная смесь $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{CCl}_4$ близка к $1500 : 50 : 1$. Максимальная энергия (мощность) лазерного излучения 270 мДж ($\sim 4 \cdot 10^8 \text{ Вт}$) получена вблизи напряжений статического пробоя разрядного промежутка (см. рис. 8). Осциллограмма лазерного излучения (см. рис. 9) показывает, что переход в режим насыщенного усиления при напряжениях, больших $9\text{--}10 \text{ кВ}$ (рис. 8) сопровождается появлением на импульсе генерации выброса, который продолжает расти по мере увеличения напряжения. Пороговая мощность накачки, при которой начинает происходить насыщение усиления, составила $Q = Q_e + Q_b = 70 + 100 = 170 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-3}$. В отличие от XeF -лазера энергия излучения XeCl -лазера растет при увеличении напряжения вплоть до напряжения статического пробоя разрядного промежутка. Это связано с тем, что в случае XeCl -лазера пробой происходит практически в одно и то же время при всех напряжениях, поэтому эффективно накачка происходит только на переднем фронте импульса. Максимальный КПД получен для смеси $\text{Ar} : \text{Xe} : \text{CCl}_4 = 1500 : 50 : 1$ ($p = 2 \text{ атм}$) и оценивается в 4%.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Литература

1. Long W. H., Appl. Phys. Letts., 31, 393 (1977).
2. Молчанов А. Г., Попов Ю. М., Квантовая электроника, 1, 1122 (1974).
3. Bradford R. S., Lacina W. B., Ault E. R., Bhaumik M. L., Optics Commun., 18, 210 (1976).
4. Fisher C. H., Center R. E., Appl. Phys. Letts., 31, 106 (1977).
5. Бычков Ю. И., Карлов Н. В., Коновалов И. Н., Месяц Г. А., Прохоров А. М., Тарасенко В. Ф., Письма в ЖТФ, 3, вып. 20, 987 (1977).
6. Басов Н. Г., Брунин А. Н., Данилычев В. А., Керимов О. М., Миланич А. И., Ходкевич Д. Д., Письма в ЖТФ, 3, 1297 (1977).
7. Браун С., Элементарные процессы в плазме газового разряда, Госатомиздат, М., 1961.
8. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Долгих В. А., Керимов О. М., Лебедев В. С., Молчанов А. Г., Письма в ЖТФ, 26, 20 (1977).
9. Mangano J. A., Jacob J. H., Rokni M., Hawryluk A., Appl. Phys. Letts., 31, 26 (1977).
10. Tellinghuisen J., Fisono G. C., Hoffman J. M., Hays A. K., J. Chem. Phys., 64, 4796 (1976).
11. Hoffman J. M., Tisono G. C., Hays A. K., J. Chem. Phys., 64, 2484 (1976).
10. Rokni M., Jacob J. H., Mangano J. A., Brochu R., Appl. Phys. Letts., 30, 457 (1977).
11. Eden J. G., Searles S. K., Appl. Phys. Letts., 30, 287 (1977).