

# XeCl-лазер низкого давления с накачкой продольным разрядом

А.И.Федоров

*Исследованы параметры излучения газоразрядного XeCl-лазера и N<sub>2</sub>-лазера с продольным разрядом накачки и автоматической искровой УФ предыонизацией. Впервые проведена оптимизация параметров излучения XeCl-лазера, работающего при низком давлении (30 Тор), как с буферными газами Ar, Ne, He, так и без буферного газа. Лазер генерировал излучение с длительностью импульсов на полувысоте 5 нс, средней мощностью 0.5 мВт и энергией 0.15 мДж. Для XeCl-лазера с продольным разрядом накачки и буферным газом гелием получена удельная энергия излучения 1.8 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>, а с аргоном и в смесях без буферного газа она равнялась 1.5 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>. Для N<sub>2</sub>-лазера получены импульсы излучения с длительностью на полувысоте 2.5 нс, средней мощностью 0.35 мВт и энергией 0.05 мДж.*

**Ключевые слова:** продольный разряд возбуждения, азотные и эксимерные лазеры с УФ предыонизацией, УФ излучение.

## 1. Введение

В миниатюрных эксимерных УФ лазерах в основном используется поперечный разряд возбуждения с дополнительными источниками УФ предыонизации [1, 2]. Однако использование для накачки продольного разряда имеет ряд преимуществ: простота и надежность конструкции лазера, круглое сечение пучка входного излучения и высокая степень его однородности, которой соответствует низкая расходимость излучения [3]. В работе [4] впервые была показана возможность применения продольного разряда для возбуждения эксимерных молекул, в частности ХеF\*. Авторами была получена энергия излучения 0.12 мДж при давлении рабочей смеси  $p = 152$  Тор. Однако при высоком зарядном напряжении  $U_0 = 120$  кВ энергетические параметры лазерного излучения оказались недостаточно хорошими. Это было связано с большим (30 см) межэлектродным расстоянием в активной газовой среде. Авторами работы [5] впервые была показана возможность стабилизации продольного разряда возбуждения за счет коронной УФ предыонизации. Они понизили величину  $U_0$  в два раза путем использования двух разрядных промежутков, параллельно заряжаемых и последовательно возбуждаемых. Такая система накачки была названа продольным «емкостным» разрядом возбуждения. Авторы [5] получили генерацию на молекулах КгF\* и ХеF\* с энергией излучения 0.05 и 0.035 мДж соответственно при давлении 380 Тор. В работе [6] для накачки ХеCl-лазера использовался скользящий поверхностный разряд. Он обеспечивал УФ предыонизацию активной газовой среды, а затем импульс накачки для ее возбуждения. Авторы [6] показали, что параметры излучения этого лазера на порядок выше, чем при использовании обычного

продольного разряда накачки. Ими была получена энергия излучения 0.32 мДж при  $p = 532$  Тор и  $U_0 = 36$  кВ, а в тех же условиях при использовании обычных электродов она составляла 0.03 мДж.

В работе [7] впервые была показана возможность получения генерации на эксимерных молекулах КгF\*, ХеF\* и ХеCl\* в смесях без буферного газа при накачке поперечным разрядом. Авторы работы [8], используя «емкостной» продольный разряд накачки, получили на молекуле КгF\* (без буферного газа) энергию излучения 0.08 мДж при  $U_0 = 84$  кВ и рабочем давлении 302 Тор. Дальнейшее улучшение продольной системы накачки для ХеCl-лазера было продемонстрировано в работе [9]. Ее авторы использовали ряд дополнительных искровых источников УФ предыонизации для стабилизации нескольких продольных последовательно соединенных разрядов высокого давления. Была получена энергия излучения 0.1 мДж с длительностью импульса излучения на полувысоте 15 нс при  $p = 1140$  Тор и  $U_0 = 40$  кВ. Суммарная длина разряда, состоящего из четырех последовательно соединенных промежутков, равнялась 26 см.

В настоящей работе представлены результаты исследований ХеCl-лазера низкого давления с накачкой продольным разрядом и с автоматическими искровыми источниками УФ предыонизации в зависимости от параметров генератора накачки и выбора двух- или трехкомпонентных газовых смесей активной среды.

## 2. Техника эксперимента

В экспериментах использовалась миниатюрная лазерная установка, аналогичная представленной в работе [9]. В качестве лазерного объема использовались кварцевые трубки с внутренними диаметрами 0.4 и 0.5 см. Трубки имели четыре разрядных промежутка с продольной накачкой (рис.1). Длина каждого промежутка составляла 4 см. Использовались пять пар штырьковых стальных электродов диаметром 0.2 см. Следовательно, разрядный канал имел общую длину 16 см, а активный рабочий объем мог изменяться от 1.6 до 2 см<sup>3</sup>. Резонатор состоял из

А.И.Федоров. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Академика Зуева, 1; e-mail: fedorov@asd.iao.ru

Поступила в редакцию 18 декабря 2012 г., после доработки – 29 мая 2013 г.

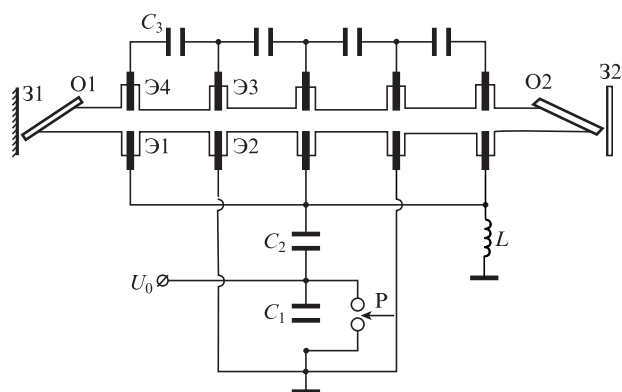


Рис.1. Электрическая схема питания XeCl-лазера с продольным разрядом накачки и с автоматической искровой УФ предьонизацией: Э1, Э2, Э3, Э4 – электроды;  $C_1$ ,  $C_2$  – емкости генератора Блюмляйна;  $C_3$  – обострительная емкость продольных промежутков возбуждения; P – управляемый коммутатор (разрядник); L – зарядная индуктивность; O1, O2 – оптические окна; 31, 32 – зеркала резонатора.

алюминиевого отражающего зеркала и кварцевой плоскопараллельной пластины. Накачка активной среды осуществлялась генератором Блюмляйна. Его емкости  $C_1$  и  $C_2$  могли изменяться от 4 до 9 нФ. Оптимальная зарядная емкость генератора накачки для наших условий возбуждения была равна 12 нФ. Емкость  $C_3$  использовалась в качестве обострительной емкости источника УФ предьонизации лазерного канала и ее величина могла изменяться от 0.6 до 1.3 нФ. В качестве коммутатора использовался промышленный разрядник РУ-62, который делал схему возбуждения более простой и позволял получать лучшие характеристики излучения, чем при использовании тиратрона [10].

Рассмотрим работу схемы возбуждения на примере модуля, состоящего из четырех электродов. При срабатывании управляемого разрядника P происходила инверсия напряжения на емкости  $C_1$  и быстро нарастающий высоковольтный импульс прикладывался к парам электродов Э1–Э4, Э2–Э3 и т.д. через обострительную емкость  $C_3$ . После пробоя этих промежутков (они обеспечивали ионизацию газа) одновременно происходила зарядка обострительной емкости  $C_3$  через разряды УФ предьонизации. После ее зарядки до пробойного напряжения между первой парой электродов Э3 и Э4 обеспечивался основной продольный разряд вдоль оси трубки. При соответствующих условиях наблюдался также разряд между электродами Э1 и Э2. При этом одновременно срабатывали все четыре продольных промежутка. Эксперименты проводились в азоте и газовых смесях Хе–НСI и Не (Ne, Ar)–Хе–НСI. Параметры лазерного излучения регистрировались с помощью калориметра ИМО-2Н, фотодиода ФЭК-22 СПУМ и осциллографа Tektronix TDS 3032.

### 3. Экспериментальные результаты

Для отработки параметров лазерной установки были проведены предварительные эксперименты с использованием в качестве активной среды молекулярного азота. Исследовались выходные энергетические характеристики излучения в зависимости от изменения параметров генератора накачки и величины вкладываемой в разряд энергии. На рис.2,а приведена зависимость средней мощности излучения от емкости обострительного конденсатора  $C_3$ . Максимальная средняя мощность излучения до-

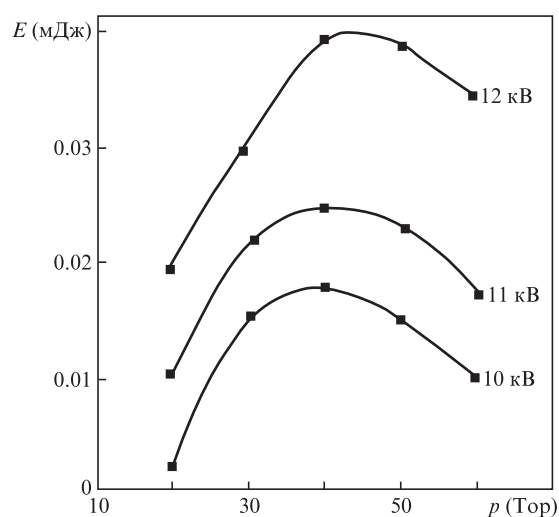
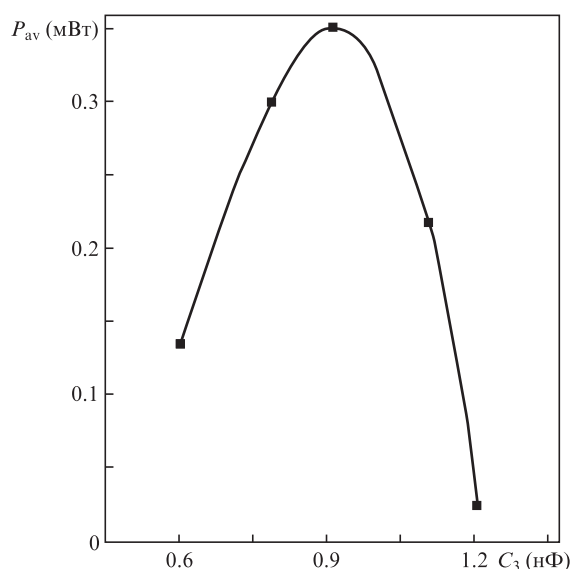


Рис.2. Зависимости средней мощности излучения от емкости обострительного конденсатора для азотного лазера при  $p = 40$  Тор,  $U_0 = 12$  кВ,  $f = 10$  Гц (а) и энергии излучения от рабочего давления активной среды при различном зарядном напряжении (б).

стигала 0.35 мВт с обострительной емкостью 0.9 нФ при частоте следования импульсов возбуждения  $f = 10$  Гц,  $U_0 = 12$  кВ и давлении азота 40 Тор. Длительность импульса генерации на полувывоте равнялась 2.5 нс. На основании оптимизации параметров генератора накачки были проведены исследования энергии излучения от рабочего напряжения и давления активной среды (рис.2,б). Оптимальное давление азота равнялось 40 Тор независимо от зарядного напряжения. С ростом  $U_0$  линейно росла энергия излучения. Максимальная энергия излучения 0.05 мДж была зарегистрирована при  $U_0 = 13$  кВ. Нами были проведены исследования долговечности работы азотного лазера в отпаянном режиме. На одной порции газа лазер стабильно излучал  $\sim 1 \times 10^5$  импульсов. При этом максимальная частота их следования достигала 15 Гц. Результаты исследований показали, что наблюдается жесткая связь между согласованием волнового сопротивления разрядной плазмы и источником возбуждения с автоматической УФ предьонизацией. Так, с ростом давления азота выше оптимального (40 Тор) снижалась выходная энергия излучения независимо от величины  $U_0$ . При этом

разряд оставался однородным. Особенностью данной схемы накачки являлись низкие зарядные напряжения, которые существенно (более чем в два раза) меньше использованных в работе [3], а, как известно, для многих практических применений, особенно в медицине, необходимо по возможности использовать менее высоковольтное напряжение.

На данной установке нами были проведены экспериментальные исследования ХеСl-лазера. На рис.3 приведены импульсы генерации и зависимости энергии излучения от суммарного рабочего давления смеси при различных соотношениях газовых компонентов Хе–НСl и при постоянных давлениях НСl, равных 2 и 4 Тор. Длительность импульса генерации на полувысоте была 5 нс. В качестве буферного газа использовался гелий. Оптимальные соотношения газовых компонентов Хе : НСl = 2 : 1 для  $p_{\text{НСl}} = 4$  Тор и 20 : 1 для  $p_{\text{НСl}} = 2$  Тор. Рост давления Хе уменьшал энергию излучения при  $p_{\text{НСl}} = 4$  Тор (рис.3,а). При низких давлениях основными компонентами смеси являлись Хе и НСl. Увеличение содержания буферного газа гелия приводило к уменьшению энергии излучения при суммарных давлениях смесей, превышающих оптимальное значение 30 Тор. На рис.3,б приведены аналогичные зависимости при  $p_{\text{НСl}} = 2$  Тор. Энергия излучения возрастала почти в два раза для соотношения Хе : НСl = 5 : 1.

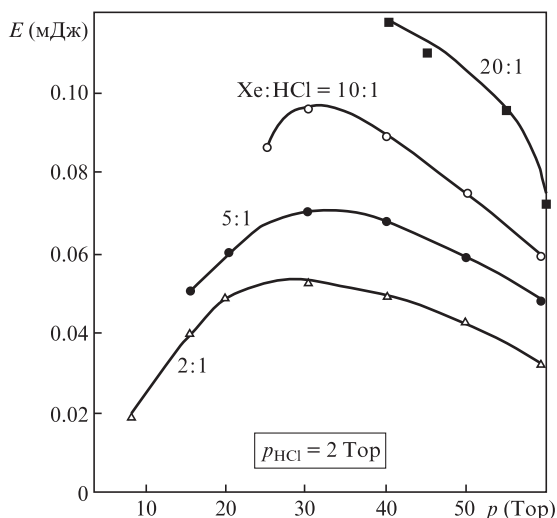
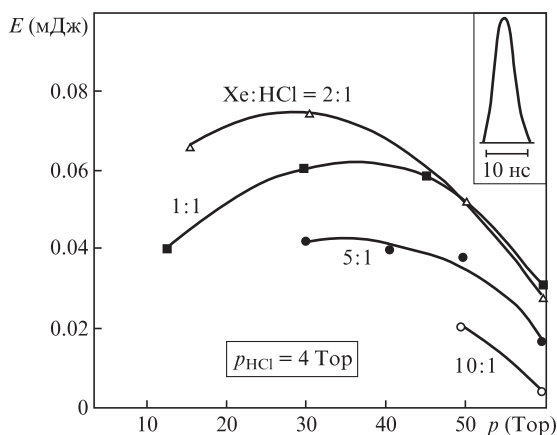


Рис.3. Зависимости энергии излучения ХеСl-лазера при использовании газовой смеси Хе–Хе–НСl от суммарного давления при различном соотношении компонентов Хе и НСl,  $U_0 = 12$  кВ и  $p_{\text{НСl}} = 4$  (а) и 2 Тор (б). На вставке приведен импульс генерации ХеСl-лазера.

Она также возрастала с увеличением содержания гелия до суммарного давления 30 Тор, а при дальнейшем росте его содержания уменьшалась. Аналогичные зависимости наблюдались для всех других соотношений основных компонентов смеси. При  $p_{\text{НСl}} = 2$  Тор оптимальным было соотношение газовых компонентов Хе : НСl = 20 : 1, которое в десять раз отличалось от предыдущего случая, а энергия излучения увеличивалась почти в два раза. В смесях с малым содержанием буферного газа гелия максимальная энергия излучения равнялась 0.11 мДж, а пиковая мощность была 20 кВт. Следовательно, при использовании продольного разряда возбуждения с интенсивным источником УФ предыонизации существенную роль в газовой смеси играют лишь концентрации НСl и Хе. Из приведенных результатов также следует, что при давлении НСl, равном 4 Тор, оптимальное рабочее давление смеси составляет  $\sim 30$  Тор, а для давления НСl, равного 2 Тор, оптимальным является рабочее давление 40 Тор. Для последней смеси энергия излучения была в два раза больше, чем для смеси с  $p_{\text{НСl}} = 4$  Тор. Для исследуемых рабочих смесей максимальная энергия излучения 0.15 мДж была получена при  $p_{\text{НСl}} \approx 3$  Тор. Следует отметить, что при использовании поперечного разряда возбуждения в режиме быстрой накачки давление  $p_{\text{НСl}} = 3$  Тор также является оптимальным [11].

На рис.4 приведены зависимости энергии излучения ХеСl-лазера при различных соотношениях газовых компонентов Хе и НСl от суммарного давления их смесей с буферными газами Аг и Не. В случае Аг при больших концентрациях НСl разряд был менее однороден. Максимальная энергия импульса излучения достигала 0.07 мДж при оптимальном соотношении газовых компонентов Хе : НСl = 5 : 1 и суммарном давлении смеси 30 Тор. Аналогичные характеристики излучения наблюдались при ис-

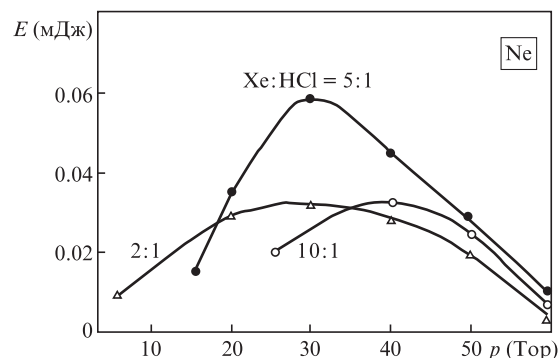
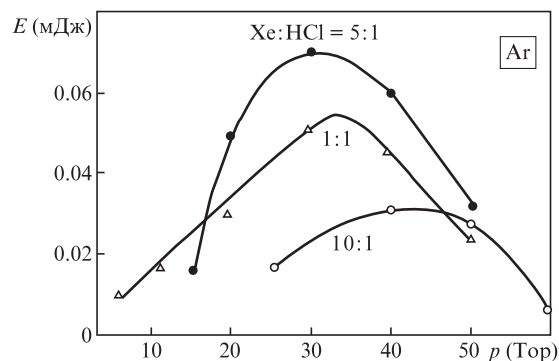


Рис.4. Зависимости энергии излучения ХеСl-лазера в газовой смеси Хе и НСl с буферными газами Аг (а) и Не (б) от суммарного давления при различном соотношении компонентов Хе и НСl;  $U_0 = 12$  кВ,  $p_{\text{НСl}} = 2$  Тор.

пользовании Ne. Максимальная энергия импульса излучения достигала 0.06 мДж при оптимальном соотношении газовых компонентов Xe: HCl = 5:1 и оптимальном суммарном давлении 30 Тор. Таким образом, для буферных газов Ar и Ne энергетические параметры излучения были примерно одинаковы, но ниже, чем для He. При этом для гелия оптимальным являлось соотношение компонентов Xe: HCl = 20:1. Следовательно, при возбуждении продольным разрядом с дополнительным искровым источником УФ предыонизации более высокие характеристики излучения достигались в смесях с буферным газом гелием или без него в режиме быстрой накачки. Это, видимо, связано с большими соотношениями  $E/p$  ( $100 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$ ) и высокими удельными мощностями накачки ( $\sim 2-3 \text{ МВт}/\text{см}^3$ ). В таком разряде буферный газ не играет существенной роли как в стабилизации формирования разряда, так и в дополнительном канале образования рабочих молекул, по сравнению со случаем лазеров высокого давления, возбуждаемых поперечным разрядом [12–15].

На рис.5 приведены обобщающие результаты исследований XeCl-лазера. Это зависимости средней мощности излучения от суммарного рабочего давления смесей Xe: HCl = 5:1 ( $p_{\text{HCl}} = 2 \text{ Тор}$ ) с буферными газами Ar, Ne и He, а также зависимости энергии излучения для оптимальной смеси HCl: He = 1:1 с Xe от давления Xe при давлениях HCl, равных 2 и 4 Тор. В исследуемом продольном ре-

жиме накачки для смеси Xe: HCl = 5:1 оптимальным являлось давление, равное 30 Тор. При этом концентрация буферного газа не намного превышает концентрацию основных компонентов смеси. Нами впервые наблюдалась генерация излучения молекулами XeCl\* при низких давлениях в смесях без буферного газа. Увеличение давления буферного газа приводило к снижению энергии излучения независимо от выбранного газа, при этом характер кривых одинаков, что указывает на единый механизм возбуждения молекул XeCl. Максимальные параметры излучения были получены для гелия. Наиболее наглядно роль Xe и HCl проявляется в смеси с соотношением компонентов HCl: He = 1:1 при  $p_{\text{HCl}} = 2$  и 4 Тор. При низких содержаниях HCl с ростом концентрации Xe энергия излучения растет почти линейно – видимо, Xe выполняет одновременно роль буферного газа. При большом давлении HCl (4 Тор) и соотношении Xe: HCl = 2:1 наблюдается максимум энергии излучения, а далее с ростом давления Xe энергия излучения падает монотонно из-за возрастания неустойчивости разряда.

Таким образом, выбор генератора Блюмляйна с оптимизацией его параметров накачки и газовых компонентов активной среды XeCl-лазера позволил нам снизить зарядное напряжение более чем в 3 раза, а рабочее давление активной среды – более чем на порядок, и уменьшить активную длину лазерного канала в 1.5 раза по сравнению с работой [9]. При этом энергия излучения в нашем случае была в 1.5 раза выше. Кроме того, нами была получена в смесях с буферным газом гелием удельная энергия излучения  $1.8 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , практически сравнимая с удельной энергией для режима накачки поперечным разрядом, для которого характерны высокие удельные мощности возбуждения. Согласно данным работы [16] для эффективного возбуждения KгF-лазера в режиме быстрого поперечного разряда в смесях с буферным газом гелием необходимо использовать высокие удельные мощности накачки активной среды  $W$ , которые определялись как  $W = E_c/(V\tau)$ , где  $E_c$  – энергия, запасаемая в обострительной емкости;  $V$  – активный объем лазера;  $\tau$  – длительность по основанию первого полупериода тока разряда. В работе [16] для KгF-лазера в оптимальном режиме возбуждения обеспечивалась удельная мощность накачки  $4 \text{ МВт}/\text{см}^3$ . В нашем случае для XeCl-лазера с активным объемом  $2 \text{ см}^3$ , обострительной емкостью  $0.9 \text{ нФ}$ , напряжением  $U_0 = 12 \text{ кВ}$  и длительностью первого полупериода тока разряда  $10 \text{ нс}$  удельная мощность накачки составляла  $3.3 \text{ МВт}/\text{см}^3$ . При этом удельная энергия излучения для смесей с буферным газом Ar достигала  $1.5 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , что соответствует удельной энергии для смесей, не содержащих буферного газа.

#### 4. Заключение

В работе впервые проведены исследования и оптимизация параметров излучения XeCl-лазера с продольным разрядом накачки и УФ предыонизацией, работающего при низком давлении (30 Тор) с буферными газами Ar, Ne и He. Показано, что лазер может эффективно работать в смесях без буферного газа. Это позволяет получать новые данные для расчета кинетики эксимерных лазеров, возбуждаемых самостоятельным разрядом. Лабораторный образец лазера обеспечивал импульсы излучения длительностью на полувысоте 5 нс при частоте их следования 15 Гц и зарядном напряжении до 13 кВ со средней мощностью

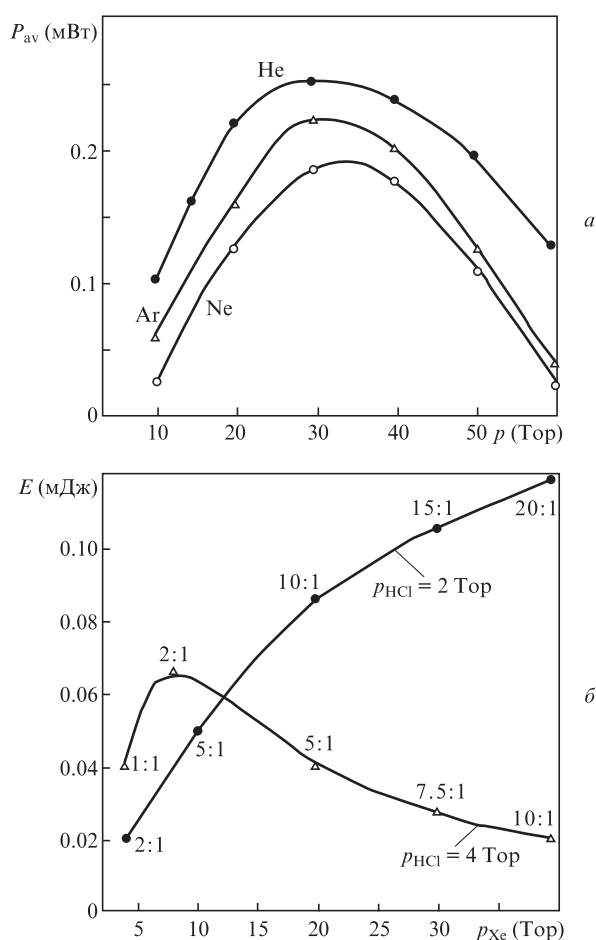


Рис.5. Зависимости средней мощности излучения XeCl-лазера от суммарного давления газовой смеси Xe: HCl = 5:1 ( $p_{\text{HCl}} = 2 \text{ Тор}$ ) с буферными газами Ar, Ne и He при  $f = 3 \text{ Гц}$ ,  $U_0 = 12 \text{ кВ}$  (а) и энергии излучения для смесей He–Xe–HCl (He: HCl = 1:1) от давления Xe при  $U_0 = 12 \text{ кВ}$  и  $p_{\text{HCl}} = 2$  и 4 Тор (б).

0.5 мВт и энергией излучения 0.15 мДж. Для ХеСl-лазера с продольным разрядом накачки и буферным газом гелием впервые получена удельная энергия излучения  $1.8 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , для смесей с аргоном и для смесей без буферного газа она составила  $1.5 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ . Были проведены также исследования параметров излучения N<sub>2</sub>-лазера, который работал при давлении 40 Тор с частотой 15 Гц и зарядном напряжении 13 кВ. Он обеспечивал импульсы излучения длительностью на полувывсоте 2.5 нс, средней мощностью 0.35 мВт и энергией излучения 0.05 мДж.

1. Hasson V., von Bergmann H.M. *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (12), 1542 (1979).
2. Sze R.C. *J. Appl. Phys.*, **54** (3), 1224 (1983).
3. Furuhashi H., Goto T. *Rev. Sci. Instrum.*, **59** (12), 2552 (1988).
4. Исаков И.М., Леонов А.Г., Оглуздин В.Е. *Письма в ЖТФ*, **3** (18), 965 (1977).
5. Newman L.A. *Appl. Phys. Lett.*, **33** (6), 501 (1978).
6. Zhou Z., Zeng Y., Qiu M. *Appl. Phys. Lett.*, **43** (4), 347 (1983).
7. Зубрилин Н.Г., Миланич А.И., Черноморец М.П. и др. *Квантовая электроника*, **12** (3), 643 (1985).
8. De la Rosa J., Eichler H.J. *Opt. Commun.*, **64** (3), 285 (1987).
9. Furuhashi H., Hiramatsu M., Goto T. *Appl. Phys. Lett.*, **50** (14), 883 (1987).
10. Головин Ю.Ф., Дымшиц Ю.Н., Ершов Л.С. и др. *Опт.-мех. пром.*, № 2, 35 (1984).
11. Федоров А.И., Бричков С.А. *Оптика атмосферы*, **2** (6), 772 (1989).
12. Hiramatsu M., Goto T. *Rev. Laser Eng.*, **16** (7), 402 (1988).
13. Федоров А.И., Мельченко С.В. *ЖТФ*, **60** (4), 105 (1990).
14. Furuhashi H., Ichikawa M., Fuwa E., Goto T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (6), 1520 (1993).
15. Furuhashi H., Uchida Y., Yamada J. *Bulletin of Aichi Institute of Technology*, **1** (5), 157 (1994).
16. Ражев А.М., Щедрин А.И., Калюжная А.Г. и др. *Квантовая электроника*, **34** (10), 901 (2004).