

# Система прокачки газовых смесей лазеров с использованием высокочастотного барьерного разряда

С.И.Мошкунов, С.В.Небогаткин, И.Е.Ребров, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков

*Исследован электрогидродинамический поток в газе при высокочастотном барьерном разряде, распределенном по поверхности диэлектрика. Предложена система прокачки электроразрядных лазеров с величиной газового потока более 15 л/с.*

*Ключевые слова:* электрогидродинамический поток, барьерный разряд, система прокачки, электроразрядные лазеры.

## 1. Введение

Для формирования скоростных газовых сред традиционно применяются различные типы механических вентиляторов с вращающимися лопастями, имеющие, однако, ряд принципиальных недостатков, таких как габариты, вес, форм-фактор, вибрации, шум и т.д., которые обусловлены наличием деталей, вращающихся с высокой скоростью. В трактах импульсно-периодических лазеров благодаря возникновению акустических колебаний возможна самопрокачка газа, но она носит выраженный резонансный характер, связанный с возбуждением собственных частот акустического резонатора [1]. Альтернативой данным системам служат электрические системы прокачки, работа которых основана на эффекте «электрического ветра» [2–12], или электрогидродинамическом (ЭГД) эффекте [13–16].

Использованию систем электрической прокачки в электроразрядных газовых лазерах уделяется достаточно большое внимание [4–11]. Преимущество электрической прокачки перед механической заключается в отсутствии движущихся частей и связанных с ними причин отказа работы из-за изнашивания ротора или тепловой и механической усталости вентиляторов. Такая система работает абсолютно бесшумно, не создает вибраций и отличается неплохой экономичностью, а также является достаточно простым и компактным устройством. При этом обеспечивается вакуумная чистота, что особенно важно для защиты окружающей среды от агрессивных газовых сред при их прокачке.

В электроразрядных лазерах находят применение системы прокачки, в которых ЭГД поток создается за счет коронного разряда в газе [4, 7, 11]. Недостатком коронного разряда является существование предельной (до 3 л/с) величины газового потока [7], что ограничивает возможность применения таких систем в мощных лазерах.

В работе [6] было предложено вместо коронного разряда использовать периодический газовый разряд через

диэлектрический барьер. Благодаря искусственно увеличенной межэлектродной емкости и перестраиваемой частоте переменного напряжения такой разряд значительно мощнее коронного. В дальнейшем нами был разработан новый подход к получению «электрического ветра», основанный на использовании высокочастотного барьерного разряда, распределенного по поверхности диэлектрика [9, 10]. Этот разряд служит источником ионов, которые дрейфуют во внешнем электрическом поле и за счет передачи импульса молекулам нейтрального газа создают ЭГД поток. Площадь разряда на поверхности диэлектрика может превышать  $10^3$  см<sup>2</sup> [6]. Предложенный подход не имеет принципиальных ограничений по расходу газа, что открывает возможность создания мощных систем электрической прокачки, способных конкурировать с электромеханическими вентиляторами.

Цель настоящей работы – исследование возможности получения ЭГД потоков с величиной более 10 л/с для прокачки газовых сред электроразрядных лазеров.

## 2. Описание экспериментальной установки

В экспериментах применялась схема (рис. 1), подробно описанная в [9, 10]. Источником заряженных частиц служил плазменный эмиттер (ПЭ) с создаваемым на нем высокочастотным барьерным разрядом, распределенным по поверхности диэлектрика. ПЭ состоял из диэлектрической трубки 1 (керамика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) радиусом 5 мм и длиной 30 см, внутрь которой вставлялась медная трубка 2, служившая внутренним электродом. Внешним электродом являлся медный желоб 3 длиной 20 см. На диэлектрическую трубку и медный желоб наматывалась медная проволока 4 диаметром 0,5 мм, шаг намотки составлял 5 мм.

Переменное напряжение  $U_f = 5–12$  кВ прикладывалось к внешним электродам плазменного эмиттера, а внутренний электрод соединялся с землей через токовый шунт  $r_s$ . При этом на внешней поверхности диэлектрической трубки возникал плазменный слой барьерного разряда. Выделявшееся при работе ПЭ тепло отводилось водой, протекавшей через трубку 2.

Над ПЭ находилась металлическая сетка 5 с прозрачностью  $\sigma = 0,7$ , которая являлась коллектором ионного пучка. Расстояние  $d$  от коллектора до эмиттера варьировалось. Через ограничительное сопротивление  $R = 110$  кОм к сетке прикладывалось постоянное напряжение  $U_0 =$

С.И.Мошкунов, С.В.Небогаткин, И.Е.Ребров, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186 С.-Петербург, Дворцовая набережная, 18; e-mail: rc@iperas.nw.ru

Поступила 28 июня 2011 г., после доработки – 12 октября 2011 г..

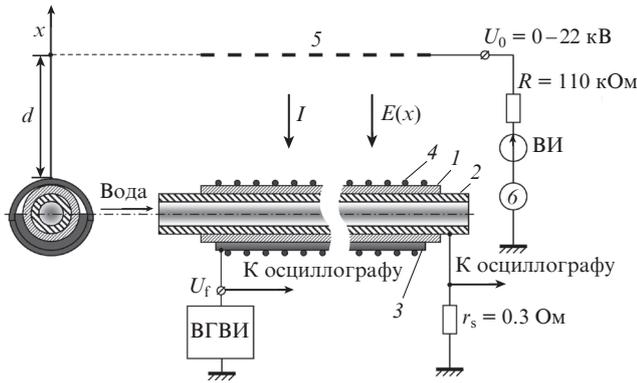


Рис.1. Схема экспериментальной установки:  
 1 – диэлектрическая трубка из керамики  $Al_2O_3$ ; 2 – медная трубка (внутренний электрод); 3 – медный желоб (внешний электрод); 4 – медная проволока; 5 – металлическая сетка с прозрачностью  $\sigma = 0.7$ ; 6 – микроамперметр.

0–22 кВ положительной полярности от высоковольтного источника (ВИ). Под действием внешнего поля  $E(x)$  электроны вытягивались из плазмы барьерного разряда и за счет реакции трехчастичного прилипания к молекулам кислорода образовывали отрицательные ионы [17], при движении которых в сторону сетки создавался ЭГД поток. Возникающий при этом ток  $I$  регистрировался микроамперметром 6.

Для питания плазменного эмиттера использовался специально разработанный высокочастотный генератор высоковольтных импульсов (ВГВИ) на основе полумостовой схемы, нагруженной на электроды ПЭ. Его особенностью является использование высоковольтного полупроводникового коммутатора, предложенного в [18]. ВГВИ выполнен полностью на базе твердотельной электроники [19, 20]. На выходе ВГВИ формировались квази-прямоугольные импульсы положительной полярности с изменяемой амплитудой напряжения ( $U_f = 0–12$  кВ), длительностью  $t_p \approx 7$  мкс, частотой следования  $f = 10–25$  кГц и высокочастотной составляющей на фронте напряжения.

Напряжение  $U_f$  измерялось высоковольтным шупом Tektronix P6015A, а ток барьерного разряда  $I_f$  – низкоиндуктивным омическим шунтом  $r_s = 0.3$  Ом. Осциллограммы напряжения и тока регистрировались осциллографом LeCroy WaveSurfer 432.

На рис.2 показаны типичные осциллограммы напряжения и тока плазменного эмиттера. Ток барьерного разряда начинается на фронте и спаде высоковольтных импульсов.

Скоростные характеристики электрогидродинамического потока контролировались с помощью термоанемометра АТТ-1004. Измерения проводились на расстоянии  $\sim 5$  см от сеточного коллектора по направлению потока.

### 3. Расчетные зависимости характеристик электрогидродинамического потока

Для анализа экспериментов приведем некоторые расчетные характеристики ЭГД потока. В работах [6, 9, 10] нами была предложена одномерная модель, описывающая пучок ионов, дрейфующих во внешнем электрическом поле – между плоскопараллельными эмиттером и коллектором ионов. Такая модель соответствует конструкции плазменного эмиттера с диэлектрической трубкой бесконечного радиуса (см. рис.1). Для стационарных условий были

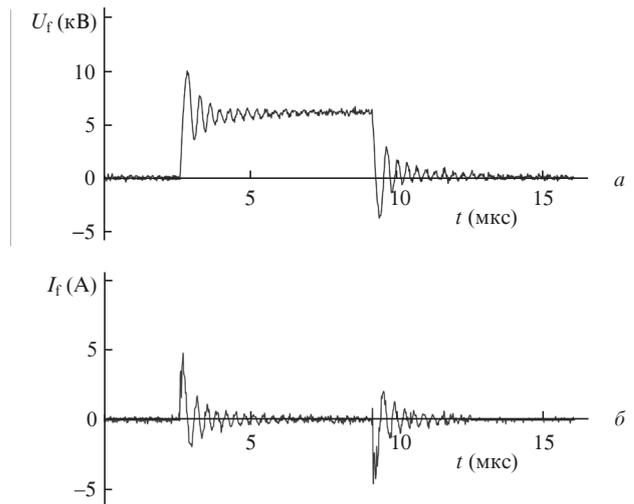


Рис.2. Типичные осциллограммы напряжения  $U_f$  (а) и тока  $I_f$  (б) плазменного эмиттера.

получены распределения напряженности электрического поля  $E(x)$ , концентрации ионов  $n(x)$  и плотности ионного тока  $j$ . При  $x > 0$  их приближенные выражения имеют следующий вид:

$$E(x) = \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{x}{d}}, \tag{1}$$

$$n(x) = \frac{3 \epsilon_0 E_0}{4 e d} \sqrt{\frac{d}{x}}, \tag{2}$$

$$j = \frac{9 \mu \epsilon_0 E_0^2}{8 d}, \tag{3}$$

где  $\mu$  – подвижность ионов;  $E_0 = U_0/d$  – средняя напряженность поля в промежутке;  $U_0$  – напряжение смещения на коллекторе;  $d$  – расстояние между эмиттером и коллектором;  $e$  – заряд электрона;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Зависимость тока  $I$  от напряжения на коллекторе  $U_0$  описывается выражением

$$I = S j = \frac{9 S \mu \epsilon_0 U_0^2}{8 d^3}, \tag{4}$$

где  $S$  – эффективная площадь эмиттера ионов.

Сила, обусловленная действием электрического поля  $E(x)$  на пространственный заряд ионов  $n(x)$ , создает градиент давления в газе [3, 12]:

$$\frac{dp}{dx} = n(x) e E(x) = \frac{j}{\mu}. \tag{5}$$

Подставив выражение (3) в (5), можно определить давление электрических сил у сеточного коллектора:

$$p = \frac{1}{\mu} \int_0^d j dx = \frac{9}{8} \epsilon_0 E_0^2; \tag{6}$$

величину  $p$  у сетки также можно представить как

$$p = \rho V^2, \tag{7}$$

где  $\rho$  – плотность газа в межэлектродном промежутке;  $V$  – скорость газового потока. Приравняв выражения (6) и (7), найдем

$$V = \sqrt{\frac{9 \epsilon_0}{8 \rho}} E_0. \tag{8}$$

Полагая, что  $\rho = 1.2928 \text{ кг/м}^3$ , для воздуха при комнатных условиях [21] получаем

$$V \approx 0.28E_0, \tag{9}$$

где  $V$  – выражено в м/с, а  $E_0$  – в кВ/см.

### 4. Результаты экспериментов

В экспериментах исследовалось влияние режимов питания плазменного эмиттера (амплитуды напряжения, длительности и частоты импульсов твердотельного генератора) на характеристики высокочастотного барьерного разряда и ток ионного пучка, а также на скорость и пространственный профиль скоростей электрогидродинамического потока в окружающем воздухе.

На рис.3 представлены характерные фотографии свечения плазмы барьерного разряда на поверхности диэлектрической трубки плазменного эмиттера при разных значениях  $U_f$  и  $f$ . Напряжение зажигания барьерного разряда, при котором на ПЭ появлялся слабо светящийся плазменный слой, составляло 4 кВ. Видно, что чем выше  $U_f$  и  $f$ , тем большую поверхность занимает разрядная плазма, а следовательно, тем больше эффективная площадь эмиссии ионов  $S$ .

На рис.4 показаны экспериментальные зависимости среднего тока ионного пучка  $I$  от напряжения на коллекторе  $U_0$  при неизменном расстоянии между эмиттером и коллектором  $d = 18 \text{ мм}$  и разных значениях  $U_f$  и  $f$ . Ток  $I$  растет пропорционально  $U_0^2$ , что согласуется с формулой (4). Увеличение  $I = jS$  с ростом  $U_f$  и  $f$  обусловлено, очевидно, соответствующим увеличением  $S$ .

Измеренные зависимости скорости ЭГД потока  $V$  от напряжения  $U_0$  для тех же условий экспериментов, что и на рис.4, приведены на рис.5. Видно, что величина  $V$  также растет с повышением  $U_0$ ,  $U_f$  и  $f$ , но, в отличие от ионного тока, скорость потока прямо пропорциональна  $U_0$  [4, 9].

Профили распределения скорости воздушного потока в плоскости, перпендикулярной потоку, представлены на рис.6. Наблюдается некоторая асимметрия поперечного профиля  $V$  относительно оси трубки ПЭ. Возможно, она связана с влиянием измерительного датчика на вектор скорости потока.

В случае, показанном на рис.6 при  $U_0 = 20 \text{ кВ}$ , величина газогового потока  $W$  в поперечном сечении с  $V = 1 \text{ м/с}$  составляет примерно 4 л/с, что выше предельного значе-

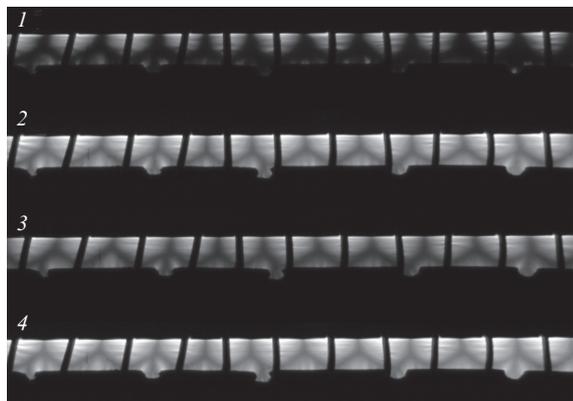


Рис.3. Фотографии свечения плазмы барьерного разряда на поверхности эмиттера ионов при  $U_f = 6 \text{ кВ}, f = 20 \text{ кГц}$  (1),  $U_f = 10 \text{ кВ}, f = 20 \text{ кГц}$  (2),  $U_f = 10 \text{ кВ}, f = 10 \text{ кГц}$  (3) и  $U_f = 10 \text{ кВ}, f = 25 \text{ кГц}$  (4).

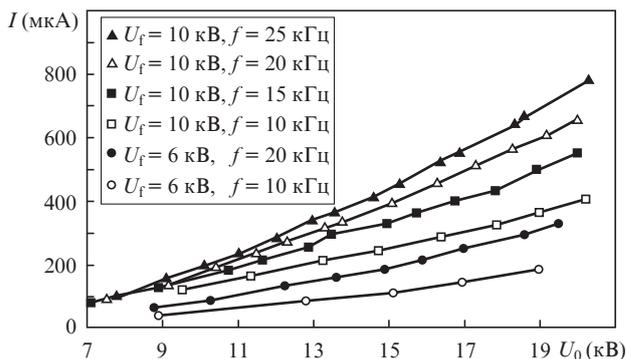


Рис.4. Экспериментальные зависимости тока ионного пучка  $I$  от напряжения на коллекторе  $U_0$  при  $d = 18 \text{ мм}$  и разных значениях  $U_f$  и  $f$ .

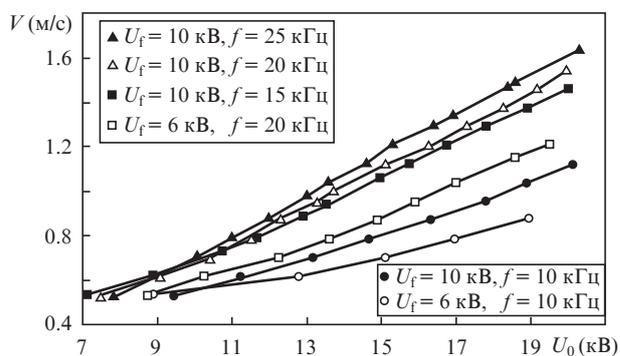


Рис.5. Экспериментальные зависимости скорости воздушного потока  $V$  от  $U_0$  при  $d = 18 \text{ мм}$  и разных значениях  $U_f$  и  $f$ .

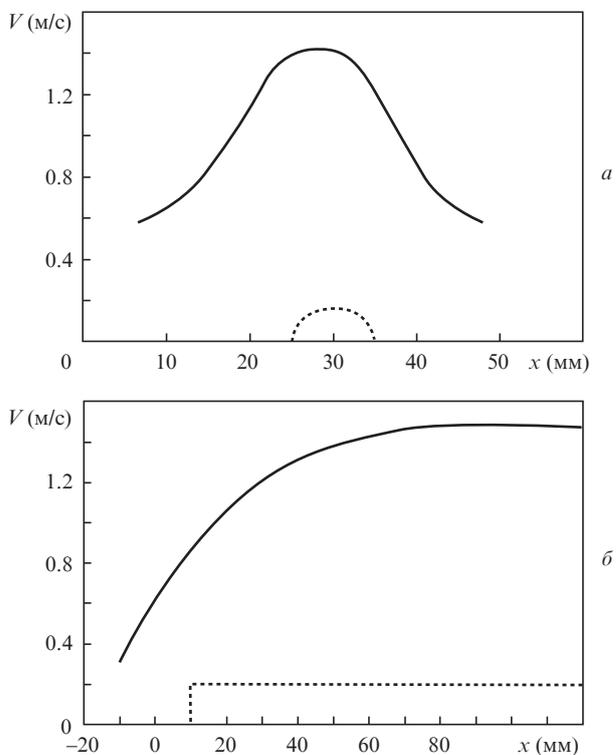


Рис.6. Профили распределения скорости в плоскости, перпендикулярной воздушному потоку (при  $U_f = 10 \text{ кВ}, f = 15 \text{ кГц}$  и  $d = 18 \text{ мм}$ ), поперек (а) и вдоль (б) трубки ПЭ. Штриховыми линиями показаны профили трубки.

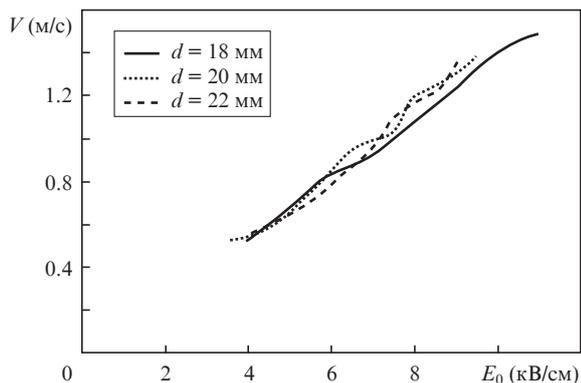


Рис.7. Экспериментальные зависимости скорости  $V$  от средней напряженности поля  $E_0 = U_0/d$  при разных  $d$  и  $U_f = 10$  кВ,  $f = 15$  кГц.

ния, достигаемого при использовании коронного разряда и напряжении 30 кВ [7].

Поскольку при барьерном разряде применяются электроды со значительно меньшей кривизной на краю, их эрозия незначительна по сравнению с эрозией коронирующих электродов. Это является важным преимуществом для их применения в технологических лазерах с ресурсом работы более  $10^9$  имп.

На рис.7 показаны экспериментальные зависимости  $V$  от величины  $E_0 = U_0/d$  при трех значениях  $d$ . Они хорошо ложатся на одну прямую, что согласуется с формулой (9). Однако наклон  $V/E_0 \approx 0.14$  м·см·с<sup>-1</sup>·кВ<sup>-1</sup> этих экспериментальных зависимостей примерно в два раза ниже расчетного значения  $0.28$  м·см·с<sup>-1</sup>·кВ<sup>-1</sup> (см. формулу (9)). Вероятно, это связано с принятыми в расчетах приближенными допущениями о плоской геометрии ионного пучка, независимости плотности ионного тока  $j$  от концентрации ионов у поверхности ПЭ  $n(0)$  и от времени, а также с пренебрежением вязкостью воздуха.

## 5. Прототип устройства прокачки газовых смесей электроразрядных лазеров

Важнейшим фактором, влияющим на максимальную частоту следования импульсов электроразрядных лазеров, является скорость рабочей газовой смеси  $V_d$  в разрядном промежутке лазера. В свою очередь скорость прокачки определяется величиной газового потока, который обеспечивает система прокачки:

$$W = V_d S_d = V_d h l, \quad (10)$$

где  $S_d$  – площадь потока в разрядном промежутке;  $h$  – расстояние между электродами;  $l$  – длина разряда. Оценим величину газового потока и его скорость в контуре прокачки эксимерного лазера CL-5000, серийно выпускаемого российской фирмой ОптоСистемы [22].

Для эксимерных смесей коэффициент сменности  $K$  газа через разрядный промежуток не должен быть менее четырех:

$$K = \frac{V_d}{w f}, \quad (11)$$

где  $w$  – ширина разряда.

Лазер CL-5000 имеет следующие параметры:  $h = 1.2$  см,  $l = 25$  см,  $w \approx 0,3$  см,  $S_d = 30$  см<sup>2</sup>, а максимальная частота следования импульсов составляет 300 Гц [21, 22]; в этом случае  $W \geq 11$  л/с.

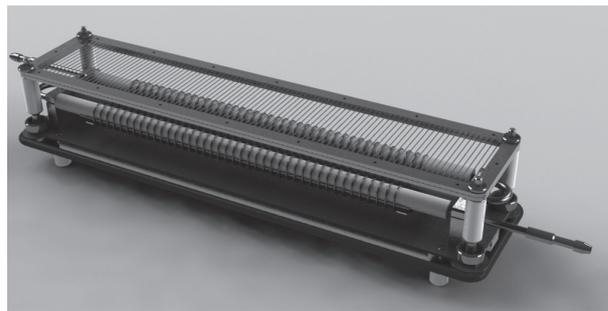


Рис.8. ЭГД устройство.

В рассмотренной выше системе прокачки  $V \sim E_0$ , поэтому максимальная скорость  $V_{\max}$  воздушного потока у поверхности сеточного коллектора должна быть ограничена максимальным значением  $E_0^{\max}$ , определяемым пробивной напряженностью  $E_{br}$  поля между ПЭ и коллектором. В рабочей смеси  $F_2:Ar:Ne = 10:150:4500$  мБар, характерной для ArF-лазера, средневзвешенная плотность  $\langle \rho \rangle \approx 0.93$  кг/м<sup>3</sup> [21], а  $E_{br} \approx 10$  кВ/см [20]. Поле  $E(x)$  максимально на коллекторе, т.е. при  $x = d$  (см. (1)). Поэтому, полагая, что  $E(d) = E_{br}$ , получим оценку для электрической прочности:  $E_0^{\max} = \frac{2}{3} E_{br} = 6.7$  кВ/см, а из формулы (9) –  $V_{\max} \approx 1.6$  м/с, что близко к скорости, достигнутой в атмосферном воздухе.

Согласно результатам экспериментов [9, 10], величина  $W$  растет пропорционально числу трубок ПЭ за счет увеличения  $S$ . Поэтому для получения  $W \geq 11$  л/с в конструкции ПЭ необходимо использовать не менее трех трубок, аналогичных рассмотренной выше.

На рис.8 показано устройство прокачки газовых смесей электроразрядных лазеров с тремя трубчатыми эмиттерами, изготовленное из металлокерамики. Устройство может быть вмонтировано в разрядную камеру вместо крыльчатки вентилятора. При его работе в воздухе величина потока превышала 15 л/с, что соответствует скорости прокачки в разрядном промежутке  $V_d = W/S_d \approx 5$  м/с.

## 6. Заключение

Исследован электрогидродинамический поток в воздухе, образующийся при эмиссии ионов из плазмы высокочастотного барьерного разряда. Показано, что скорость потока пропорциональна напряженности электрического поля между эмиттером и коллектором ионов. Для питания плазменного эмиттера ионов впервые применен полностью твердотельный генератор импульсов с напряжением  $U_f = 0-12$  кВ, перестраиваемой частотой следования импульсов  $f = 10-25$  кГц и длительностью импульсов  $t_p = 7$  мкс. Экспериментально установлено, что увеличение напряжения и частоты питания плазменного эмиттера приводит к увеличению площади эмиссии ионов, а также к росту тока ионов и скорости воздушного потока. Предложена система прокачки электроразрядных лазеров с величиной газового потока 15 л/с и более и скоростью свыше 1.6 м/с.

1. Баранов В.Ю., Низьев В.Г., Пикульский С.В., Толстов В.Ф. *ЖЭТФ*, **2** (8), 478 (1980).
2. Stuetzer O.M. *J. Appl. Phys.*, **30** (7), 984 (1959).
3. Robinson M. *Transaction AIEEE Commun. Electron.*, **80**, 143 (1961).
4. Горкин С.Б., Козлов Б.А., Соловьев В.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **58** (2), 42 (1994).
5. Шуаибов А.К. *ЖТФ*, **68** (9), 84, (1998).

6. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Формирование электрического ветра с помощью высокочастотного барьерного разряда. Препринт ЦНПППЭ РАН* (М.: РИИС ФИАН, 2003).
7. Козлов Б.А., Соловьев В.И. *ЖТФ*, **7** (7), 70 (2007).
8. Козлов Б.А., В.И. Соловьев. *ЖТФ*, **76** (7), 1 (2006).
9. Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Прикладная физика*, **4**, 111 (2009).
10. Миколуцкий С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Мощный источник электрического ветра на основе высокочастотного барьерного разряда в газе. Препринт ИЭЭ РАН* (С.Пб.: ИЭЭ РАН, 2009).
11. Treshalov A., Lisovski A., Chikeev E. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **253**, 4747 (2002).
12. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/227.pdf>.
13. Reece Roth J., Xin Dai. *Abstr. 44th AIAA Aerospace Sci. Meeting and Exhibit* (Nevada, USA, 2006, p. 1).
14. Yang F., Jewell-Larsen N.E., Brown D.L., Pendergrass K., Parker D.A., Krichtafovitch I.A., Mamishev A.V. *Abstr. 13th Intern. Symp. High Voltage Eng.* (Rotterdam, Netherland, 2003, p. 1).
15. Karpov S.V., Krichtafovitch I.A. *Proc. COMSOL Multiphysics Conf.* (Boston, USA, 2005, p. 399).
16. Jewell-Larsen N.E., Karpov S.V., Krichtafovitch I.A., Jayanty V., Hsu C.P., Mamishev A.V. *Proc. ESA Annual Meeting Electrostatics* (Albuquerque, USA, 2008, E1, p. 1).
17. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В., Напартович А.П., Панькин М.В., Трушкин Н.И. *Физика плазмы*, **26** (2), 172 (2000).
18. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Препринт ИПЭФ РАН* (М.: ИПЭФ РАН, 2004).
19. Грязнов О.В., Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *Прикладная физика*, **5**, 32 (2008).
20. Варгапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И. и др. *Квантовая электроника*, **39** (8), 714 (2009).
21. *Таблицы физических величин. Справочник*. Под ред. И.К.Кикоина (М.: Атомиздат, 1976).
22. <http://www.optosystems.ru>.