

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ РАЗРЯДОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ И НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

И. М. Уланов, К. Н. Колмаков, М. В. Исупов, А. Ю. Литвинцев
Институт Теплофизики СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева 1,
E-mail: konst@itp.nsc.ru

Введение

Индукционные разряды обладают рядом несомненных преимуществ перед электродным принципом генерации низкотемпературной плазмы: 1) создание сверхчистой плазмы, неподверженной загрязнению продуктами эрозии электродов; 2) возможность работы с агрессивными плазмообразующими средами; 3) неограниченный ресурс работы газоразрядного устройства; 4) возможность изменять газоразрядные параметры (давление, ток, частота) в широких пределах, обеспечивая оптимальные условия генерации плазмы. Эти особенности делают использование индукционной плазмы в плазмохимических и светотехнических технологиях более привлекательным по сравнению с электродными разрядами. Индукционный разряд трансформаторного типа (ИРТТ), являясь разновидностью индукционных разрядов, представляет собой замкнутый газовый токопроводящий канал, индуктивно связанный с системой первичных обмоток посредством магнитопровода. Использование магнитопроводящих материалов позволяет осуществить генерацию плазмы на частотах килогерцового диапазона, что на один-два порядка меньше частот, используемых при возбуждении соленоидальных ВЧ разрядов. К тому же в случае трансформаторного разряда практически нет необходимости компенсации реактивной мощности, приводящей, в случае с соленоидальными ВЧ разрядами, к тщательному согласованию нагрузки (плазмы) с источником питания для каждого конкретного случая.

Отсутствие систематических данных о свойствах ИРТТ не позволяет сделать однозначный вывод о целесообразности применения данного типа разряда в технологиях, основанных на использовании низкотемпературной плазмы трансформаторного разряда. Поэтому целью проведенных исследований, результаты которых представлены в данной работе, было изучение основных характеристик ИРТТ (электрических, энергетических, спектральных и оптических) и процессов, характерных для прикладного использования низкотемпературной плазмы в различных плазмохимических технологиях – синтез монооксида азота, конверсия природного газа и т. п.

Принцип работы. Основные соотношения

Протекание тока в индукционном разряде трансформаторного типа связано с изменением магнитного потока в магнитопроводе индуцированным током в первичной обмотке (рис. 1). Устойчивый разряд переменного тока существует, когда характерное время затухания плазмы (определяемое для низких давлений амбиполярной диффузией) больше периода осцилляции внешнего электромагнитного поля. Критерий того, что характеристики плазмы не меняются за период внешнего поля согласно [1], будут: $\tau \cdot \omega \geq 10$ (где $\tau = \Lambda^2/D_a$ – характерное время затухания плазмы, ω – частота внешнего поля).

Практически во всем диапазоне рабочих параметров циркуляция электрического поля в трансформаторном разряде отлична от нуля только за счет изменяющегося во времени магнитного потока в магнитопроводе $\oint_{L_k} \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$, поскольку отношение составляющих электрических полей, обусловленных переменным магнитным потоком, индуци-

рованным током в плазме Φ_i , и переменным магнитным потоком в магнитопроводе, индуцированным током в первичной обмотке Φ_m , равно

$$\frac{E_i}{E} = \left(\frac{\omega \Phi_i}{L_k} \right) / \left(\frac{\omega \Phi_{m0}}{L_k} \right) = \frac{\mu_0 I L_k}{4 B_{m0} S} \approx \frac{\pi \mu_0 I}{B_{m0} L_k} \approx 4 \cdot 10^{-6} \left(\frac{I}{B_{m0} L_k} \right)$$

и при реальные размерах плазменного кольца $L_k = 1 \div 3$ м, токов $I = 1 \div 10$ кА и

$$B_{m0} = 0.1 \div 1 \text{ Тл}, \quad \frac{E_i}{E} \leq 10^{-2}.$$

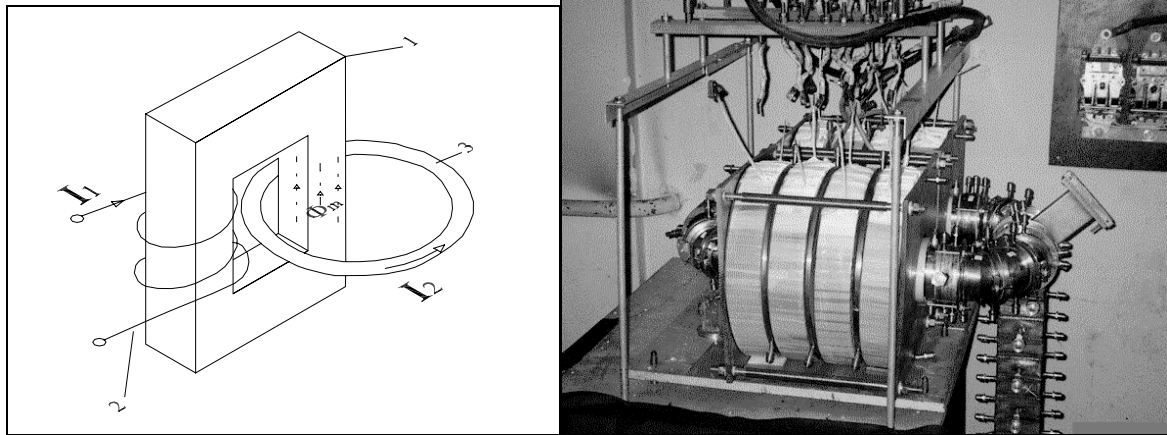


Рис. 1. Принципиальная схема низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа и фотография плазмотрона: 1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – плазменный виток

Трансформаторный плазмотрон по типу преобразования энергии относится к индуктивным электротермическим установкам, где индуктором является первичная обмотка трансформатора, магнитопровод отсутствует, а вторичной обмоткой является металлический проводник, а не плазма. Следовательно, для согласования источника питания с трансформаторным плазмотроном можно воспользоваться известными схемами расчета, применяемыми в индукционных установках. Эквивалентная схема замещения источник питания–трансформаторный плазмотрон показана на рис. 2; здесь R_r и $-X_r$ активное и реактивное сопротивления генератора, $R_{тр}$ и $X_{тр}$ – активное и реактивное сопротивления трансформатора, X_{C1} и X_{C2} – емкостные сопротивления для согласования.

В установившемся режиме гармонических колебаний колебательный контур, образованный трансформатором и согласующими емкостями, удобно представить в виде параллельной схемы замещения, содержащей (параллельно включенные) эквивалентное активное сопротивление R_3 и реактивное X_3 . При этом R_3 и X_3 определяются следующими формулами [2]:

$$R_3 = \frac{R_{тр} \cdot B_{C1}^2}{(B_{12} + X_{тр} \cdot B_{C1} \cdot B_{C2})^2 + R_{тр}^2 \cdot B_{C1}^2 \cdot B_{C2}^2} \quad X_3 = \frac{(B_{12} + X_{тр} \cdot B_{C1} \cdot B_{C2}) \cdot (X_{тр} \cdot B_{C1} - 1) + R_{тр}^2 \cdot B_{C1}^2 \cdot B_{C2}}{(B_{12} + X_{тр} \cdot B_{C1} \cdot B_{C2})^2 + R_{тр}^2 \cdot B_{C1}^2 \cdot B_{C2}^2}$$

$$B_{12} = B_{C1} - B_{C2} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_3}{R_3} \quad Z_3 = \frac{R_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

где B_{C1} , B_{C2} – емкостные проводимости; φ – фазовый угол; Z_3 – полное сопротивление контура.

Значение Z_{Σ} должно соответствовать внутреннему сопротивлению генератора (источника питания), а $\operatorname{tg}\varphi$ нагрузок должен соответствовать паспортным данным источника питания для передачи последним максимальной активной мощности в трансформаторный разряд.

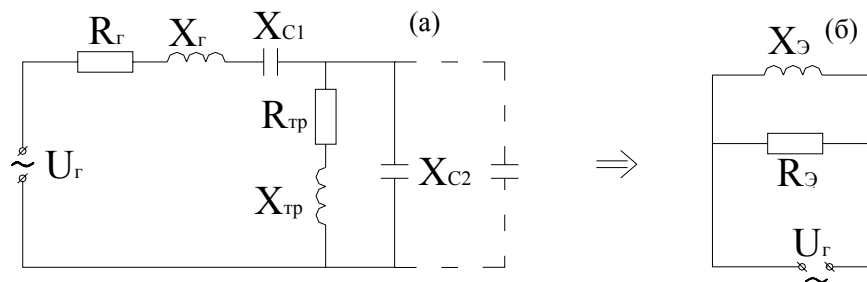


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения источник питания:
(а) – трансформаторный плазмотрон; (б) – параллельная схема замещения

Описание экспериментальных установок

Исследование электрических и энергетических характеристик трансформаторного разряда, а также изучение протекания плазмохимических реакций (термический синтез озона, получение NO, конверсия природного газа) проводилось на установке № 1, принципиальная схема которой показана на рис. 3-а. Мощность установки могла варьироваться в широких пределах (от 10 кВт до 180 кВт). Магнитопровод состоял из нескольких отдельных секций, изготовленных из холоднокатаной электротехнической листовой стали 3425 толщиной 80 мкм. Внешний диаметр каждой из секций магнитопровода – 420 мм, внутренний – 160 мм, высота – 70 мм. Каждая секция имела свою систему первичных обмоток. Все обмотки подключались к генератору (источнику питания) ППЧ-250-10 либо параллельно, либо параллельно последовательно, в зависимости от условий эксперимента. Экспериментальная установка позволяла применять разрядные камеры различного диаметра (60, 80 и 100 мм) и различной длины (до 2 м), изготовленные из металлических водоохлаждаемых электрически изолированных друг от друга секций. Плазмообразующий газ подавался в разрядную камеру через два тангенциальных отверстия \varnothing 6 мм с углом наклона $\psi_{вх} = 20^{\circ}$. Расход газа контролировался ротаметрами и расходными шайбами.

Исследование спектральных и излучательных свойств «трансформаторного разряда» в различных газах проводилось на установке № 2, показанной на рис. 3-б. Отличие данной установки от предыдущей заключается в том, что разрядная камера была изготовлена из плавленного кварца. Использовались кварцевые камеры различных диаметров: 20, 34 и 58 мм, длиной до 0,6 м. Мощность установки могла варьироваться от 0,05 кВт до 1 кВт. Газоразрядная колба (1) посредством откачных трубок (5), впаянных в колбу, присоединялась к газовой линии (6), что позволяло в ходе эксперимента изменять давление газа в камере. Оптические приборы (10) устанавливались таким образом, что расстояние между приемником излучения и газоразрядной колбой в 10 раз превышало габаритные размеры самой колбы. Такое расположение приемников излучения позволяет рассматривать тороидальный разряд как точечный источник света.

Для регистрации излучения разряда в видимой области спектра использовался цифровой люксметр. Для измерения полного потока излучения разряда использовался измеритель мощности импульсов оптического излучения, спектральный диапазон чувствительности которого лежит в пределах 330–11000 нм. Для отсеечения длинноволновой части спектра, лежащей в интервале 1300–11000 нм, и связанной с тепловым излучением стенок газоразрядной колбы и нагретых деталей установки, использовался водяной фильтр.

Регистрация спектра излучения разряда в спектральном диапазоне 200–800 нм производилась при помощи измерительной системы, состоящей из монохроматора, фотоэлек-

тронного умножителя и компьютера с АЦП. Предварительно регистрирующая система калибровалась образцовой температурной лампой.

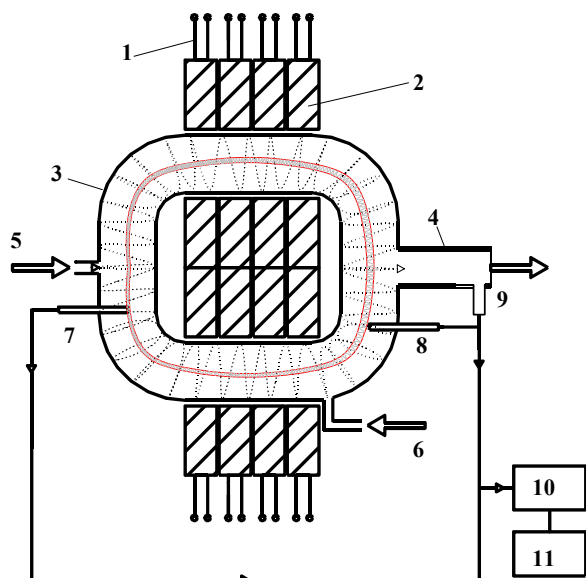


Рис. 3-а. Экспериментальная установка № 1:

1. первичные обмотки;
2. секции магнитопровода;
3. разрядная камера;
4. теплообменник;
5. камера основной подачи;
6. камера вторичной подачи газа;
7. зонд № 1 ($L/d = 0.6$);
8. зонд № 2 ($L/d \approx 8$);
9. зонд № 3;
10. спектрофотометр;
11. масс-спектрометр

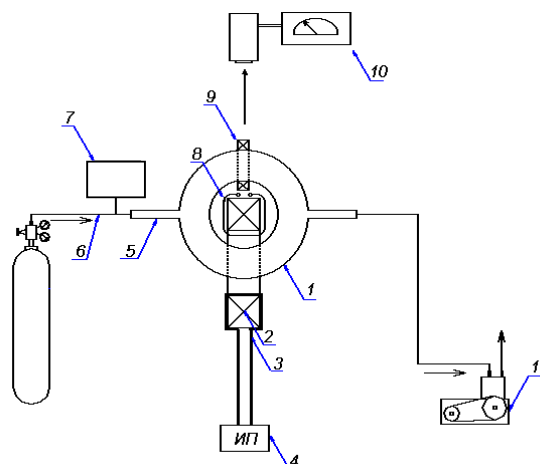


Рис. 3-б. Экспериментальная установка № 2:

1. газоразрядная колба;
2. магнитопровод;
3. первичная обмотка;
4. высокочастотный источник питания;
5. откачные трубки;
6. газовая линия;
7. вакуумметр;
8. измерительный виток;
9. трансформатор тока;
10. оптические приборы;
11. фрвакуумный насос

Электрические и энергетические характеристики трансформаторного разряда

Типичная зависимость напряженности электрического поля от давления газа представлена на рис. 4-а для аргона. На графике представлены результаты экспериментов как с применением, так и без применения вихревой подачи газа. Видно, что в случае неприменения вихревого течения газа в разрядной камере в диапазоне давлений, где разряд не контрагирован и стабилизирован стенкой, кривая зависимости напряженности электрического поля от давления падающая. С дальнейшим увеличением давления происходит контракция разряда и нарастание токово-конвективной неустойчивости, что приводит к пространственной неустойчивости разряда. Происходит увеличение теплообмена между дугой и стенкой. Это и приводит к росту требуемого для поддержания разряда электрического поля.

В случае применения вихревой подачи плазмообразующего газа в области давлений, где разряд контрагирован, описанная выше неустойчивость разряда слабо выражена. В области же низких давлений (где разряд диффузен) характер поведения зависимости напряженности электрического поля от давления аналогичен ситуации, когда вихревая подача газа не используется.

Таким образом, без применения вихревой стабилизации разряда достичь атмосферного давления в разрядной камере практически невозможно, поскольку уменьшение диаметра разрядной камеры с целью снижения гидродинамической неустойчивости разряда

(иначе говоря, применение стабилизации разряда стенкой) приводит к резкому возрастанию напряженности поля в разряде. В результате этого требуемое значение напряжения на разряде может превышать максимальное напряжение, которое способен индуцировать магнитопровод, изготовленный даже из самых современных аморфных сплавов. В условиях вихревой подачи газа неустойчивости разряда практически не развиваются. Это позволяет поднять давление в разрядной камере до атмосферного и выше при отсутствии существенных флуктуаций напряжения на разряде.

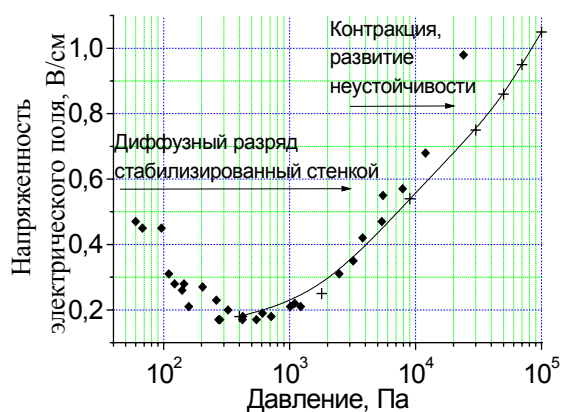


Рис. 4-а. Среднее значение напряженности электрического поля в разряде в зависимости от давления аргона. $I = 100$ А:

- ♦ – отсутствие вихревого течения;
- + – вихревая подача аргона

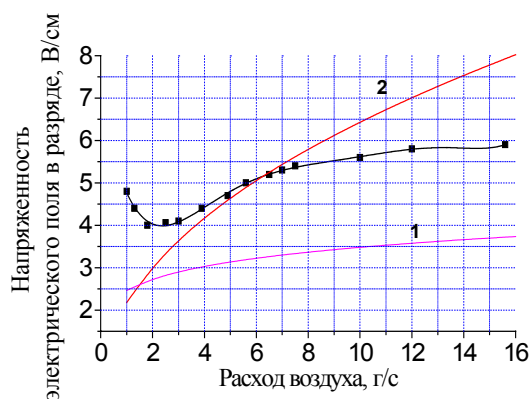


Рис. 4-б. Напряженность электрического поля в разряде на воздухе в зависимости от расхода. $I = 125$ А:

1. зависимость на начальном участке воздушной дуги [3] в ЭДП;
2. на развитом турбулентном участке разряда на воздухе [3] в ЭДП

На рис. 4-б представлены результаты измерения напряженности электрического поля в разряде на воздухе в зависимости от расхода газа (вихревое течение). Характер зависимости напряженности поля от расхода аналогичен для всех видов плазмообразующего газа и связан с гидродинамикой газового потока в разрядной камере: при низких расходах вихревая стабилизация не достаточна для подавления гидродинамических неустойчивости, что приводит к увеличению теплообмена между токопроводящим каналом и стенкой камеры, а следовательно, к увеличению требуемого для поддержания разряда напряженности электрического поля. При больших расходах газа происходит «вынос энергии» струей плазмы из разрядной камеры, что при условии постоянства тока приводит к возрастанию требуемого напряжения.

На рис. 5-а и 6-а представлено температурное распределение воздушной плазмы в разрядной камере для двух расстояний от места подачи газа (0,6 калибра – 60 мм и 8 калибра – порядка 800 мм от ввода газа в разрядную камеру) и разных расходов воздуха. Из графиков видно, что на температурные распределения влияют два основных фактора: расход плазмообразующего газа и расстояние от места подачи газа. Повышение расхода газа приводит к локализации высокотемпературной зоны в центре разрядной камеры, причем градиент температуры с увеличением расхода становится больше. С увеличением расстояния от места ввода газа происходит сглаживание температурного профиля.

Использование трансформаторного разряда в плазмохимических технологиях: синтез NO как модельный эксперимент

Помимо практического интереса получения NO интерес к исследованию этого плазмохимического процесса в данной работе был продиктован полнотой эксперимен-

тальных и теоретических работ в этой области. Это позволило использовать данный процесс как «модельный» в плане понимания особенностей трансформаторного разряда применительно к плазмохимическим технологиям. Эксперименты по исследованию синтеза NO из воздуха проводились на установке № 1 (см. рис. 3-а).

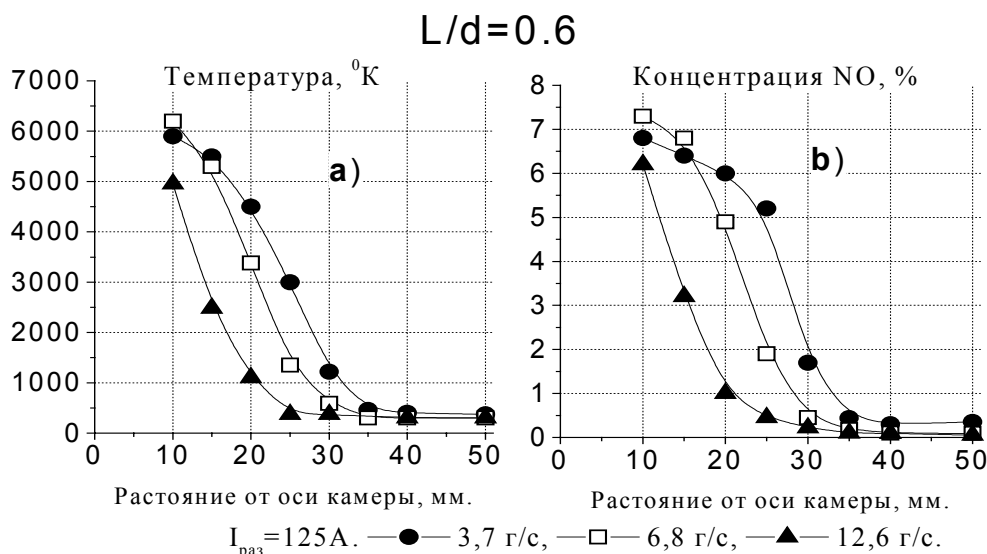


Рис. 5. Температурные распределения и распределение концентрации NO в воздушной плазме на расстоянии 60 мм от места вихревого ввода воздуха в камеру ($L/d = 0.6$): а – распределение температуры; б – распределение концентрации монооксида азота

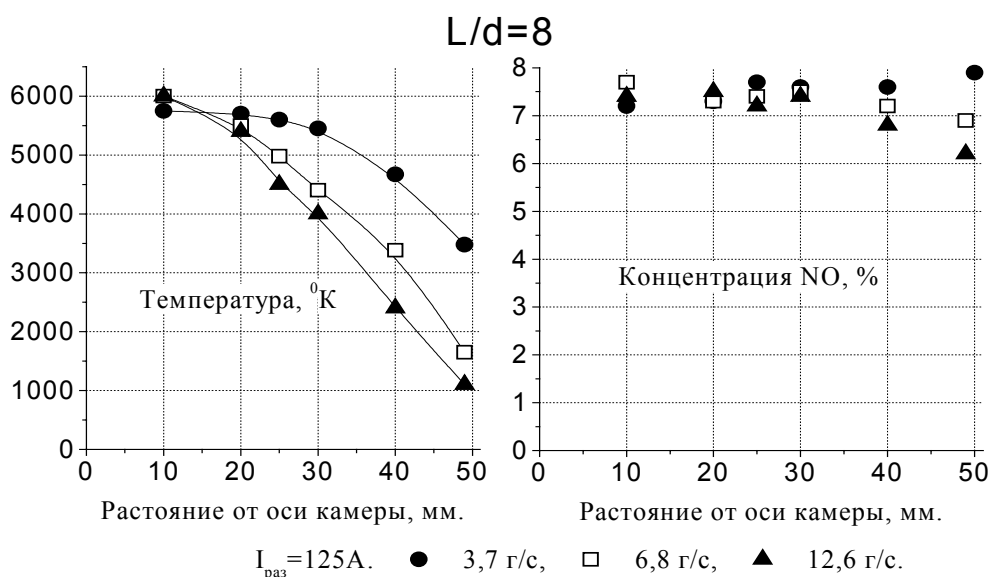


Рис. 6. Температурные распределения и распределение концентрации NO в воздушной плазме на расстоянии 800 мм от места вихревого ввода воздуха в камеру ($L/d = 8$): а – распределение температуры; б – распределение концентрации монооксида азота

В процессе экспериментов производились измерения температурных и концентрационных распределений в разрядной камере на различных расстояниях от места ввода воздуха в разрядную камеру. Результаты экспериментов представлены на рис. 5-б и 6-б. Видно, что рядом с местом ввода воздуха ($L/d = 0.6$) распределение концентрации монооксида азота аналогично распределению температур. Вдали от места ввода ($L/d = 8$) распределение концентрации монооксида азота практически не зависит от температуры газа. Обращает внимание, что вблизи стенки разрядной камеры, где уровень температуры отно-

сительно низок ($T \sim 300 \div 2000$ K) концентрации NO, измеренные рядом и вдали от места подачи воздуха в разрядную камеру, сильно различаются. При высоких же температурах ($T > 5000$ K) значения концентраций NO, измеренные в разных сечениях камеры, близки друг к другу.

В экспериментах также производились измерения концентрации NO на выходе плазмотрона, а точнее, на выходе теплообменника (зонд №3 – см. рис. 3-а.). Результаты представлены на рис. 7. Оценка средней скорости охлаждения высокотемпературного воздуха в теплообменнике показала, что темп охлаждения газа в теплообменнике не превышал 10^4 K/c. Это позволило рассчитать значение концентрации NO, которое бы достигалось при условии термодинамического равновесия газа перед процессом охлаждения в теплообменнике (см. рис. 7-а, кривая 2).

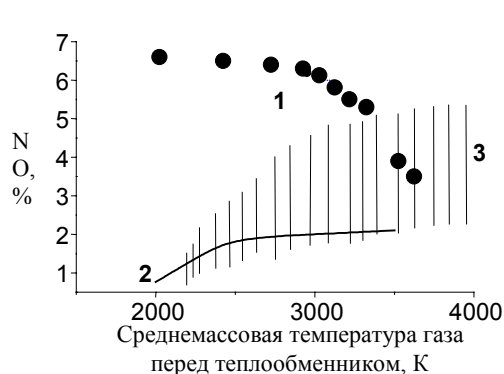


Рис. 7-а. Концентрация монооксида азота на выходе из теплообменника (зонд № 3) в зависимости от среднemasовой температуры газа на входе в теплообменник:

1. экспериментальные данные (зонд № 3);
2. расчетное значение концентрации NO которое бы достигалось при условии термодинамического равновесия газа перед процессом охлаждения в теплообменнике;
3. область экспериментальных значений различных авторов [4, 5, 6], при использовании процесса закалки равновесного газа

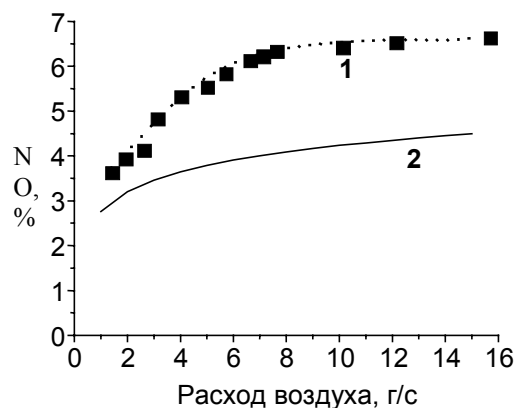


Рис. 7-б. Концентрация монооксида азота на выходе из теплообменника (зонд № 3) в зависимости от расхода воздуха:

1. экспериментальные данные (зонд № 3);
2. расчет по предложенной модели «автозакалки»

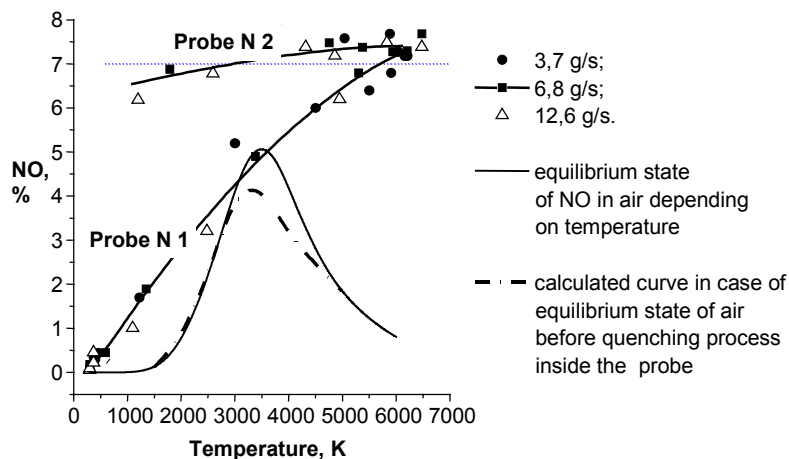


Рис. 7-с. Значения концентрации NO в зависимости от среднemasовой температуры газовой пробы для разных расстояний от места подачи газа (зонд № 1: $L = 60$ мм и зонд № 2: $L = 800$ мм, см. рис. 3-а)

Из рис. 5 и 6 видно, что содержание NO, измеренное при низких ($T \sim 300 \div 2000$ K) и при высоких ($T > 4000$ K) температурах, значительно больше соответствующего равно-

весного и расчетных значений, полученных при условии термодинамического равновесия газа перед процессом охлаждения в зонде (рис. 7-с).

Различие экспериментальных и расчетных концентраций монооксида азота, полученного при охлаждении воздуха с температур выше 5000 К, является известным фактом. Объяснение данному феномену активно дискутировалось в [7, 8, 9]. Согласно одному из объяснений [10], дополнительная наработка NO происходит в процессе закалки высокотемпературного газа ($> 4000\text{--}5000\text{ К}$) за счет отрыва колебательной и поступательной температуры в начальный момент охлаждения (за время, недостаточное для V–T релаксации). В данной работе этот эффект не обсуждается, а основное внимание уделялось объяснению высокого содержания NO в периферийном газе при температурах ниже 2000 К.

Для объяснения обнаруженного эффекта образования высокой концентрации монооксида азота в периферийной, низкотемпературной части вихревого потока, стабилизирующего воздушную плазму трансформаторного разряда, была предложена физическая модель, качественно описывающая данный эффект. Согласно предложенной модели, вероятным объяснением высокого содержания NO при $T \leq 2000\text{ К}$, с нашей точки зрения, может быть наличие быстрого охлаждения газа непосредственно в разрядной камере – «автозакалка». Термин «автозакалка» следует понимать как процесс быстрого охлаждения турбулентных «горячих» образований в периферийном «холодном» газе за счет процессов турбулентного переноса на границе между вынужденным и свободным вихрем, стабилизирующим разряд. В рамках этих представлений была разработана количественная модель, согласно которой наличие монооксида азота в периферийной низкотемпературной зоне разрядной камеры является результатом охлаждения высокотемпературных турбулентных формаций в периферийных слоях газа со скоростью, достаточной для сохранения высокой концентрации NO [14, 15]:

$$\varphi = dT/dt = -\alpha \cdot (T - T_x) / (\rho(T) \cdot C_p \cdot L_0) \approx -a(T) \cdot (T - T_x) / L_0^2,$$

где $a(T) = 10^{-4} \cdot (-0.16 + 1.06 \cdot 10^{-3} \cdot T + 8.07 \cdot 10^{-7} \cdot T^2)$, L_0 – колмогоровский масштаб турбулентности, определяемый как: $\frac{L_0}{L^c} \approx \left(\frac{Re_{\text{вп}}}{Re} \right)^{3/4}$.

На рис. 7-б кривая 2 показывает результаты расчета. Видно качественное согласие в характере поведения кривых, но различие в абсолютных значениях. Принимая во внимание обсуждаемый в [10] эффект возможного механизма получения сверхравновесных концентраций NO в процессе охлаждения высокотемпературного воздуха, можно считать, что предложенная модель удовлетворительно объясняет обнаруженный эффект.

Излучательные характеристики «трансформаторного разряда»

В настоящее время газоразрядная низкотемпературная плазма широко используется в светотехнической промышленности. Отсутствие электродов в «трансформаторном разряде» позволяет реализовывать наиболее оптимальные условия горения разряда (сила тока разряда, диаметр газоразрядной колбы, давление газа внутри газоразрядной колбы), благодаря чему эффективность таких индукционных источников света может быть существенно выше эффективности «электродных» газоразрядных ламп. К тому же безэлектродный принцип генерации разряда позволяет существенно увеличить ресурс работы таких ламп.

В ходе работы проведены исследования излучательных и спектральных характеристик индукционного разряда трансформаторного типа в неоне, ксеноне, криптоне, азоте, аргоне, водороде, в парах кадмия, серы, ртути для мощностей разряда от 100 Вт до 100 кВт, диаметров разрядных камер от 20 мм до 100 мм. Результаты некоторых исследований представлены в настоящей работе, а также в работах [16, 17].

Ртуть

На рис. 8 представлены результаты экспериментов по исследованию зависимости напряженности электрического поля и световой отдачи ртутного разряда от давления паров ртути, показана зависимость градиента потенциала ИРТГ от давления паров ртути при фиксированном токе разряда. Представленные результаты соответствуют области минимума ВАХ ИРТГ. В диапазоне давлений паров ртути 0.1–100 Па градиент потенциала ИРТГ практически не зависит от давления. При $p > 100$ Па градиент потенциала возрастает: $E \sim \log(p)$. При фиксированных давлениях и токах градиент потенциала определяется диаметром газоразрядной колбы: с увеличением диаметра градиент уменьшается.

Полученные зависимости электрических характеристик ИРТГ от условий горения разряда (значений p , I , d) качественно совпадают с зависимостями для дуговых ртутных разрядов постоянного тока [1].

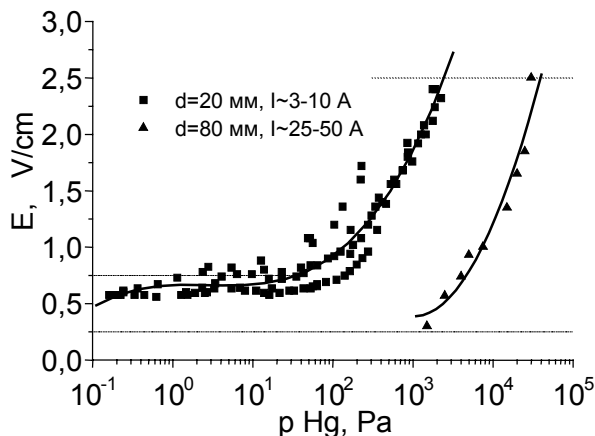


Рис. 8-а. Напряженность электрического поля в «трансформаторном разряде» в парах ртути в зависимости от давления для двух диаметров разрядной камеры

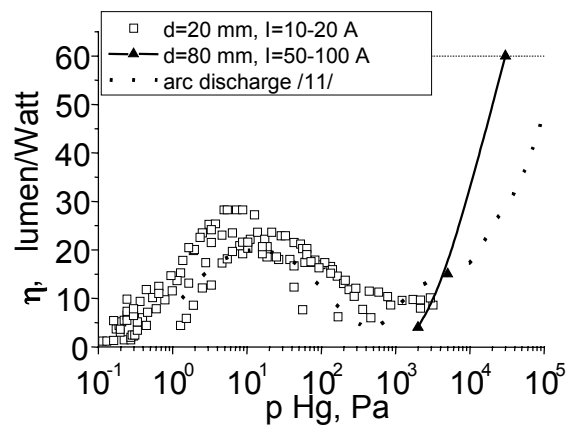


Рис. 8-б. Световая отдача ртутного разряда для двух диаметров разрядной камеры. Пунктирной линией приведены литературные данные для ртутных, дуговых разрядов постоянного тока

На рис. 9 представлена зависимость η_{253} от давления паров ртути в диапазоне 1–30000 Па, представлены как результаты исследований ИРТГ малой мощности, так и характеристики мощного ИРТГ. Максимум КПД резонансной линии расположен в области давлений 3–6 Па и составляет 24–32 % от вкладываемой в разряд мощности. Дальнейшее увеличение давления вызывает резкое уменьшение КПД практически до нуля при давлениях ~ 1 кПа. В случае мощного ИРТГ картина немного другая: при давлениях ~ 1 кПа КПД резонансной линии составляет ~ 8 %, однако также уменьшается с ростом давления. При этом КПД резонансной линии в отличие от нерезонансных линий УФ и видимого диапазонов спектра сильно зависит от мощности разряда.

На рис. 10 представлены зависимости энергетического КПД резонансной линии мощного ИРТГ при фиксированном давлении паров ртути в зависимости от удельной мощности. Из графиков видно, что существуют две характерные области давлений паров ртути – менее 5 кПа и более 5 кПа. При $p < 5$ кПа увеличение мощности приводит к резкому спаду величины η_{253} . Максимум η_{253} наблюдался при $p \sim 3-6$ Па и $P \sim 1$ Вт/см (ИРТГ малой мощности) и составил ~ 50 %. В области давлений более 5 кПа характер зависимости КПД от мощности разряда кардинально изменяется: η_{253} практически не зависит от давления и мощности и составляет для $p \sim 30$ кПа около 1.5 %.

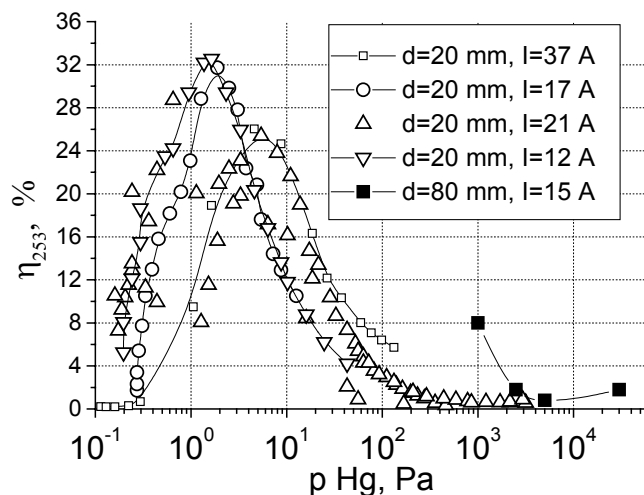


Рис. 9. Зависимость энергетического КПД резонансной линии 253 нм ИРТТ от давления паров ртути при фиксированном токе разряда

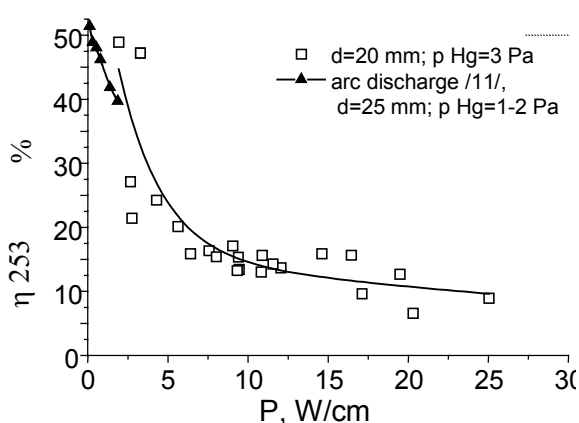


Рис. 10-а. Зависимость КПД резонансной линии 253 нм от мощности разряда при фиксированном давлении для ИРТТ малой мощности ($d = 20$ мм)

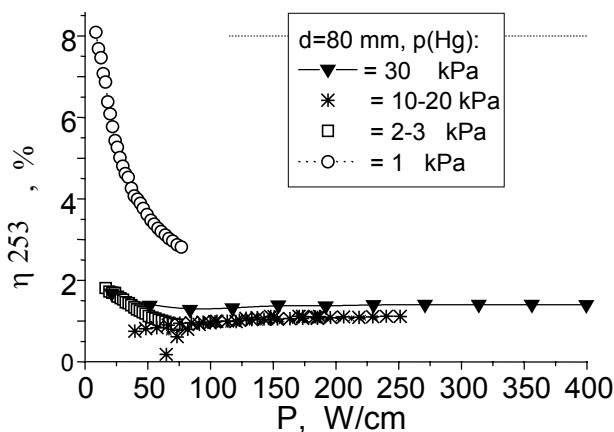


Рис. 10-б. Зависимость КПД резонансной линии 253 нм от мощности разряда при фиксированном давлении для мощного ИРТТ ($d = 80$ мм)

Ксенон

На рис. 11 представлены зависимости градиента потенциала ИРТТ и световой отдачи «трансформаторного разряда» с ксеноновым наполнением от давления ксенона при фиксированном токе разряда. Из первого графика видно, что в диапазоне давлений ксенона 0.1–5 кПа величина E слабо зависит от давления. Начиная с давлений ~ 5 –8 кПа ксеноновый разряд контрагируется, что сопровождается увеличением градиента потенциала: $E \sim \text{Log}(p)$. При давлениях ксенона ~ 20 кПа начинают проявляться неустойчивости разряда – канал разряда перестает быть стабилизированным стенкой газоразрядной колбы. Неустойчивости разряда несущественны при давлениях ~ 20 кПа, при давлениях близких к атмосферному достигают очень больших величин: величина пульсаций давления $\Delta p_{\text{кс}}/p$ в системе достигает ~ 10 %, пульсации градиента $\Delta E/E \sim 5$ %, пульсации светового потока $\Delta F/F \sim 8$ %. Характерная частота пульсаций (по порядку величины) составляет 1 Гц.

На рис. 11-б показана зависимость световой отдачи ИРТТ от давления ксенона при двух различных токах разряда 25 и 60 А. Как видно из рисунка, в диапазоне давлений 0.1–10 кПа световая отдача мала и только начиная с давлений ~ 10 кПа, начинает возрастать.

тать. Величина световой отдачи при фиксированном давлении определяется силой тока: увеличение силы тока приводит к увеличению световой отдачи.

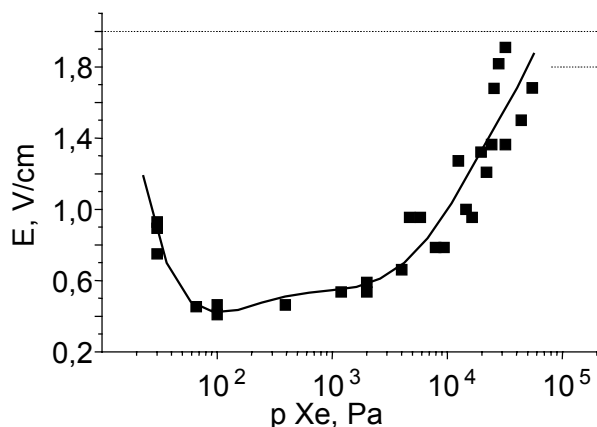


Рис. 11-а. Зависимость градиента потенциала ИРТГ с ксеноновым наполнением от давления ксенона. Диаметр газоразрядной колбы 20 мм, ток разряда 25–30 А

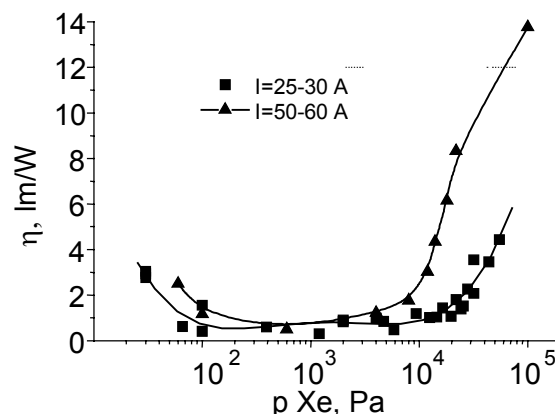


Рис. 11-б. Зависимость световой отдачи ИРТГ с ксеноновым наполнением от давления ксенона. Диаметр колбы 20 мм. Токи разряда 25–30 и 50–60 А

Неон

На рис. 12-а представлены зависимости напряженности электрического поля индукционного разряда в неоне от давления неона для нескольких диаметров разрядных трубок и токов разряда (частота тока 250 кГц). Также для сравнения на рис. 12 представлены результаты исследований дуговых разрядов постоянного тока в неоне [12] и индукционных разрядов в неоне при частоте тока 450 кГц [13].

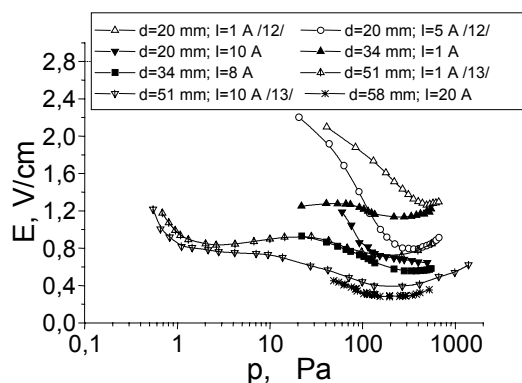


Рис. 12-а. Зависимость градиента потенциала в неоновом разряде от давления для разных диаметров и токов разряда

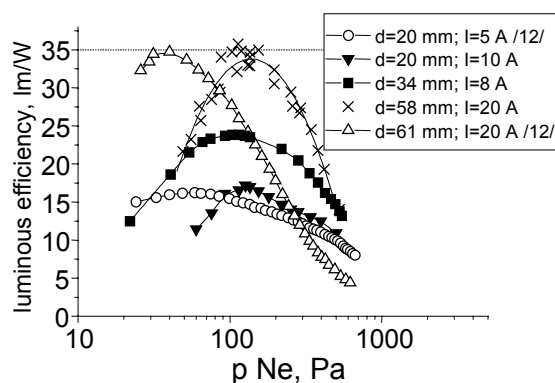


Рис. 12-б. Световая отдача неоновом разряде в зависимости от давления для разных диаметров и токов разряда

Анализ представленных на рис. 12-а данных показывает, что в исследованном диапазоне давлений неона независимо от силы тока разряда, диаметра трубки, типа разряда (дуговой либо индукционный разряд трансформаторного типа) зависимость напряженности электрического поля E от давления неона p имеет одинаковый характер: существует область давлений неона (от 100 до 500 Па), где величина E достигает минимума, причем с уменьшением диаметра газоразрядной трубки D и силы тока разряда I (при фиксированном давлении неона) напряженность электрического поля возрастает.

Таким образом, полученные для индукционного разряда в неоне зависимости $E(p, D, I)$ качественно совпадают с аналогичными зависимостями для положительного столба газового разряда в неоне. Тем не менее, могут наблюдаться количественные расхождения, обусловленные различиями в условиях генерации индукционных разрядов трансформаторного типа и хорошо исследованных «электродных» разрядов. Отсутствие электродов (соответственно, влияния приэлектродных процессов на газовый разряд), другая геометрия газоразрядной колбы и газового разряда (тор вместо цилиндрической трубки), генерация разряда индукционным способом на частотах $\sim 10\text{--}200$ кГц могут привести к тем или иным количественным отличиям между параметрами индукционных и «электродных» разрядов.

На рис. 12-b представлена зависимость световой отдачи неоновой «трансформаторного разряда» от давления для разных диаметров разрядных трубок. Также для сравнения приведена световая отдача дугового неоновой разряда постоянного тока [12] (диаметр колбы 61 мм, давление неона 1 мм рт. ст.). При фиксированном давлении неона величина световой отдачи разряда, в основном, определяется двумя другими параметрами: величиной диаметра трубки D и силой тока разряда I . Увеличение диаметра трубки приводит к росту световой отдачи разряда вследствие уменьшения тепловых потерь на стенках колбы. Так, согласно [12], при увеличении диаметра с 20 до 60 мм максимально достижимые значения световой отдачи дугового разряда в неоне возрастают с 28 до 42 лм/Вт. Эффект увеличения световой отдачи с увеличением диаметра колбы наиболее ярко выражен при малых диаметрах колбы, когда вклад пристеночных потерь в общий энергетический баланс разряда особенно велик.

Заключение

Проведено комплексное исследование электрических, энергетических, оптических и спектральных характеристик индукционного разряда трансформаторного типа, генерируемого на частотах $10\text{--}250$ кГц в аргоне, неоне, ксеноне, воздухе; в кислородно-аргоновых и метано-аргоновых смесях; в парах ртути, кадмия и серы. Рассмотрены вопросы согласования источника питания с нагрузкой (индукционным разрядом), выведены критерии, предъявляемые к геометрическим, магнитным и частотным параметрам магнитопроводов, необходимые для расчета оптимальных характеристик трансформаторного плазмотрона.

На основе проведенных исследований созданы опытно-экспериментальные образцы следующих прикладных разработок: плазмохимический реактор трансформаторного типа для получения монооксида азота из воздуха (рис. 1); мощный источник УФ излучения на базе ртутного разряда трансформаторного типа (рис. 13-a); неоновый индукционный источник света трансформаторного типа (рис. 13-b).

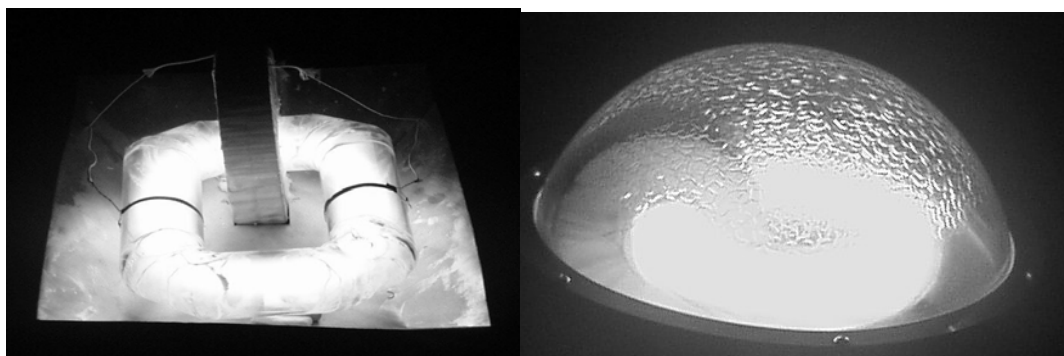


Рис. 13-а. Мощный источник УФ излучения на базе ртутного разряда трансформаторного типа

Рис. 13-б. Неоновый индукционный источник света трансформаторного типа

Литература:

1. Eckert H. U. Получение плазмы с помощью индукционного нагрева газа токами низкой частоты // РТнК. 1971. Т. 9. № 8. AIAA Journal. 1971. №. 8. P. 1452–1456.
2. Коган В. А, Уланов И. М. Исследование возможности создания плазмотронов трансформаторного типа. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 1. С. 105–110.
3. Жуков М. Ф., Аньшаков А. С. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981.
4. Использование плазмы в химических процессах / Под ред. Л. С. Полака. М., 1970.
5. Пархоменко В. Д., Сорока П. И., Краснокутский Ю. И. и др. Плазмохимическая технология. Новосибирск: Наука, 1991. Т. 4, Сер. Низкотемпературная плазма.
6. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме / Под ред. Л. С. Полака. М.: Наука, 1965.
7. Потапкин Б. В. и др. // Химия высоких энергий. 1983. Т. 17. № 6. С. 524–530.
8. Гуцол А. Ф., Животов В. К., и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. М.: ИАЭ им. Курчатова. 1983. Вып.1 (14).
9. Гуцол А. Ф., Животов В. К., и др. Химия высоких энергий. М., 1984. Т. 18, Вып. 3. С. 252–259. Химия высоких энергий. М., 1985. Т. 19. Вып. 1. С. 89–92.
10. Животов В. К., Русанов В. Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. Клярфельд Б. Н., Тарасков И. М. Экономичность свечения и градиент потенциала в положительном столбе разряда в неоне // ЖТФ. 1934. Т. 4. № 3. С. 504.
13. Piejak R., Godyak V., Alexandrovich B. Electric field in inductively coupled discharge // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. № 7. P. 3590.
14. Kolmakov K. N., Ulanov I. M., Predtechensky M. R., Prikhodko V. G.. The «self-quenching» effect for nitrogen monoxide // Thermophysics and Aeromechanics. 2000. V. 7. № 3. P. 419–426.
15. Kolmakov K. N. The self-quenching process of nitrogen monoxide by vortex stabilization of high dense discharge // Proc. 14-th International Symposium on Plasma Chemistry. Prague, 1999. P. 2325–2330.
16. Isupov M. V., Ulanov I.M., Yu A., Litvintsev, Kolmakov K. N. Experimental study of energy characteristics for the inductive discharge of transformer type in mercury vapor // Thermophysics and Aeromechanics. 2002. V. 9. № 1. P. 145–154.
17. Didenko A. N., Ulanov I. M., Predtechensky M. R. Kolmakov K. N. An Intense Source of Optical Emission from Electrodeless Low-Frequency Discharge in vapors of sulphur and mercury // Physics-Doclady. 2000. V. 45. № 4. P. 155–157.