

тем, что более толстая кремниевая подложка имеет большую теплоемкость и теплопроводность, что приводит к задержке и размыванию теплового импульса при прохождении через подложку к пленке. Зависимость изменения темпера-

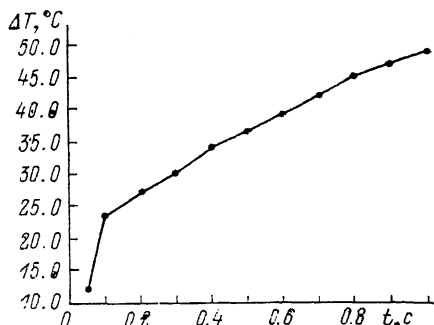
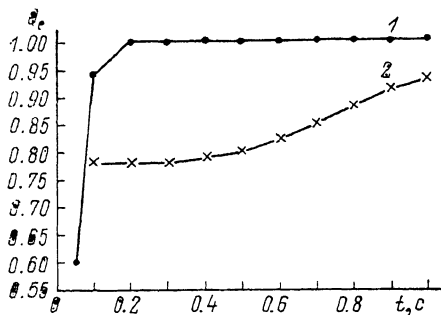


Рис. 3. Зависимость качества стирания  $Q_0$  от длительности импульса питания охладителя  $t$  для слюды (1) и кремния (2).

Рис. 4. Зависимость перепада температуры на рабочей поверхности охладителя  $\Delta T$  от длительности импульса питания  $t$ .

туры на рабочей поверхности охладителя от длительности импульса питания показана на рис. 4.

Таким образом, описанная система демонстрирует быстродействие порядка 10 Гц, причем, как показывают предварительные эксперименты, оптимизация ее параметров позволяет это быстродействие удвоить.

#### Список литературы

- [1] Chudnovskii F. A. // Soviet Phys. Technical Phys. 1978. Vol. 20. N 8. P. 999—1012.
- [2] Агринский П. В., Захарченя Б. П., Цукерман Е. В., Чудновский Ф. А. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 8. С. 716—719.
- [3] Агеев Ю. И., Емельянов С. А., Крузенштерн В. М., Сайгадачный И. А. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 3. С. 148—151.
- [4] Sher E. M. // I European Conf. on Thermoelectrics. London: Peter Peregrinum Ltd, 1988. Ch. 24. P. 277—282.
- [5] Воронин А. Н., Зорин И. В., Чудновский Ф. А., Гальперин В. Л., Кудасов А. С. // Измерительная техника. 1989. № 10. С. 39—41.
- [6] Lanskaaya T. G., Mercurlov I. A., Chudnovskii F. A. // Sov. Phys. Sol. St. 1978. Vol. 20. N 2. P. 336—342.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
26 июля 1989 г.  
В окончательной редакции  
[28 апреля 1990 г.

## СВЧ РАЗРЯД ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУХЕ КАК ИСТОЧНИК ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА

Д. Ф. Быков, С. И. Грицинин, И. А. Косый

Интерес прикладной плазмохимии [1], а также экологические аспекты проекта создания свободно локализованных в атмосфере искусственных плазменных зеркал для дальнейшей телевизионной связи [2] стимулировали постановку

ряда экспериментов с возбуждением микроволновых разрядов в воздухе и исследованием химических последствий плазмообразования [3, 4]. Одной из наиболее важных плазмохимических характеристик разряда является энергетическая цена образования молекулы продукта, позволяющая оценить экономическую эффективность плазмохимического реактора. Определение энергии, необходимой для синтеза молекул оксидов азота, позволяет рассчитать степень загрязнения стратосферы при длительных микроволновых разрядах в ней.

Настоящая работа дополняет результаты предыдущих экспериментов [3, 4]. Использование ряда специальных мер позволило понизить величину регистрируемой концентрации молекул диоксида азота, что в свою очередь дало возможность провести эксперименты при более низком давлении воздуха — до 25 Тор, что соответствует высоте 25 км, т. е. области максимальной концентрации озона. В работе определена зависимость цены реакции синтеза молекулы двуоксида азота ( $\epsilon_{\text{NO}_2}$ ) от исходного давления воздушной среды и проводится анализ полученных результатов.

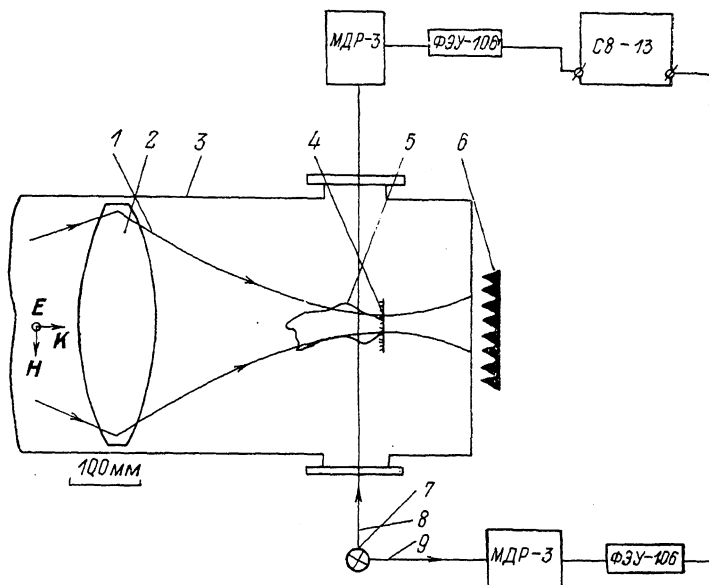


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — пучок СВЧ излучения; 2 — линза, фокусирующая СВЧ излучение; 3 — вакуумная камера; 4 — инициатор пробоя; 5 — плазменное образование; 6 — поглощающая СВЧ излучение нагрузка; 7 — ртутная лампа; 8, 9 — диагностирующие световые пучки.

Схема эксперимента, аналогичная использованной в работах [3, 4], представлена на рис. 1. Сходящийся пучок СВЧ излучения ( $\lambda = 2.0$  см,  $\tau_a \approx 5-50$  мкс,  $P_{\text{вып}} \approx 60-450$  кВт) 1 формируется рупорно-линзовой антенной 2, вводится в вакуумную камеру 3 и фокусируется в пятно диаметром порядка  $\lambda$ . В фокусе пучка (инициатор пробоя) металлодиэлектрическая мишень или система из металлических острий. Пороги разряда, его динамика, структура исследованы в работах [5, 6]. Возникнув вблизи инициатора, разряд в виде слоя с толщиной  $\delta \approx \lambda$  движется навстречу микроволновому излучению со скоростью  $u_{zi}$ .

Наработка диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ) в разряде регистрировалась по поглощению излучения на длине волны  $4047 \text{ \AA}$  (источник — ртутная лампа) с использованием дифференциальной схемы (рис. 1). Чувствительность метода позволяла регистрировать концентрацию (однородную во всей камере) диоксида  $n_{\text{NO}_2} \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (при длине поглощения  $l \approx 40$  см).

Содержание наработанного продукта после серии СВЧ импульсов определялось за времена, при которых успевало происходить равномерное «рассредоточение» молекул  $\text{NO}_2$  по объему камеры. Так как во время СВЧ разряда в нем

образуется практически лишь оксид азота  $\text{NO}$ , доокисляющийся затем в диоксид за относительно большие времена ( $10^4$ – $10^5$  с) в реакции тройных соударений [4]



то для ускорения процесса (1) после серии СВЧ импульсов в камеру подавался кислород при атмосферном давлении. Эта процедура, а также переход к высокочувствительной дифференциальной схеме измерений и сделали возможным продвижение в сторону относительно малых исходных давлений воздушной среды (соответствующих, в частности, давлениям в нижней части стратосферы).

Результаты измерений приведены на рис. 2. Как следует из рисунка, в области относительно высоких давлений ( $p > 100$  Тор) энергетическая цена образования молекулы  $\text{NO}_2$  составляет величину порядка 200 эВ/мол.  $\text{NO}_2$  и слабо меняется с изменением давления. При давлениях, меньших 100 Тор, наблюдается заметный рост энергетической цены вплоть до 800 эВ/мол.  $\text{NO}_2$  при  $p = 25$  Тор.

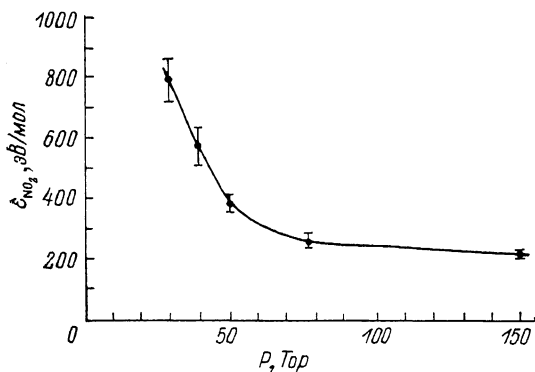


Рис. 2. Зависимость энергетической цены образования молекулы  $\text{NO}_2$  от давления воздушной среды.

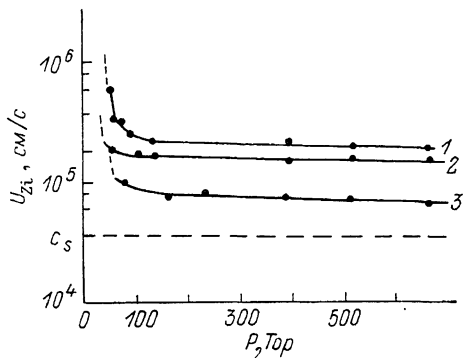


Рис. 3. Зависимость аксиальной скорости движения разряда от давления газовой среды.  $I$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1 —  $5 \cdot 10^4$ , 2 —  $2.5 \cdot 10^4$ , 3 —  $10^4$ .

Сама абсолютная величина цены в области высоких давлений не противоречит ни проведенным ранее измерениям [3, 4], ни опубликованным оценкам и расчетам [7, 8].

Кривая, представленная на рис. 2, получена при варьировании мощности СВЧ излучения, которое осуществлялось так, что отношение  $I/p$  оставалось примерно постоянным ( $I/p \approx 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>·Тор, где  $I$  — плотность потока энергии в СВЧ пучке).

Характерная зависимость цены реакции образования оксида ( $\epsilon_{\text{NO}_2}$ ) (рис. 2) может быть объяснена изменением удельного энерговклада в газовую среду при изменении исходного давления. Величина этого энерговклада при наличии ионизационной волны [5], распространяющейся от фокальной плоскости навстречу СВЧ излучению, определяется простым соотношением

$$w \approx \frac{AIp_0}{u_{zi}p} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{атм}} \right]. \quad (2)$$

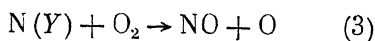
Здесь  $A$  — коэффициент поглощения разрядом мощности создающего его СВЧ излучения,  $p_0 = 1$  атм. Исследования зависимости скорости волны ионизации от давления, проведенные в [5, 6], показывают, что скорость эта практически неизменна в интервале давлений от атмосферного до  $\sim 100$  Тор и быстро возрастает с уменьшением давления при  $p < 100$  Тор (рис. 3). Зависимость  $u_{zi}$  от интенсивности микроволнового излучения в области высоких давлений близка к линейной.

При  $p < 100$  Тор с уменьшением давления возрастает и коэффициент отражения СВЧ мощности от созданной СВЧ пучком плазмы, что означает уменьше-

ние коэффициента поглощения  $A$ . В области же относительно высоких давлений отражением можно пренебречь и  $A \approx \text{const} \approx 1$ .

Резкое увеличение скорости волны ионизации и уменьшение коэффициента  $A$  при  $p < 100$  Тор должно в соответствии с (2) сопровождаться уменьшением удельного энерговклада в газовую среду (составляющую в области высоких давлений  $\approx 0.8$  Дж/см<sup>3</sup>·атм).

Расчет зависимости энергетической цены реакции окисления азота от величины удельного энерговклада может быть выполнен в рамках математической модели разряда в воздухе, развитой в [7, 9, 10]. Результаты расчетов, определяющие зависимость энергетической цены  $\epsilon_{\text{NO}_2}$  от удельного энерговклада  $w$  (зайствованные из [10]), приведены на рис. 4. Расчетная кривая немонотонна: с ростом удельного энерговклада  $\epsilon_{\text{NO}_2}$  возрастает, достигает максимума и затем быстро падает в сторону высоких давлений. Как показывает анализ, область малых удельных энерговкладов ( $w < 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup>·атм) характеризуется тем, что основным каналом парабтки оксидов в ней является прямая диссоциация молекул азота электронным ударом и окисление атомарного азота в реакции



( $Y$  — символ электронно-возбужденного состояния).

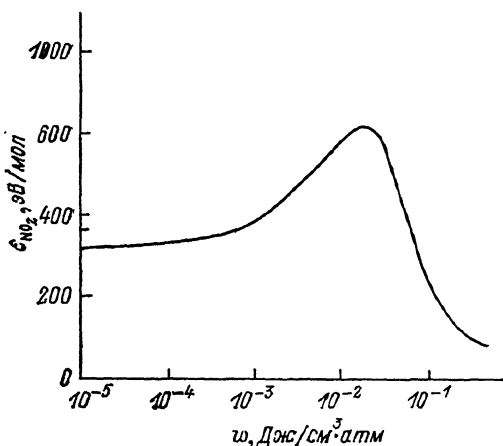


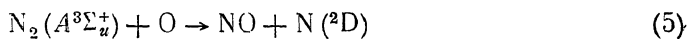
Рис. 4. Расчетная зависимость энергетической цены образования молекулы  $\text{NO}_2$  от удельного энерговклада в воздушную среду.

$$E/n_{\text{и}} = 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{см}^2.$$

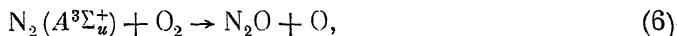
При превышении энерговклада над  $10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup>·атм начинает сказываться реакция связывания нечетного азота



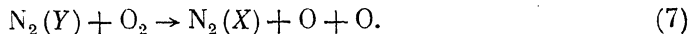
повышающая энергетическую цену процесса окисления. В области же относительно высоких энерговкладов ( $w > 10^{-2}$  Дж/см<sup>3</sup>·атм) в игру вступают электронно-возбужденные метастабильные молекулы азота, роль которых проявляется как в образовании оксида в реакциях



и



так и в существенном повышении скорости реакции диссоциации молекул кислорода



Именно к области высоких значений относятся удельные энерговклады в описанном эксперименте ( $w > 10^{-2}$  Дж/см<sup>3</sup>·атм). Как следует из рис. 4, в этом случае уменьшение  $w$  должно сопровождаться увеличением энергетической цены реакции окисления, что согласуется с экспериментальными результатами, объясняя быстрый рост  $\epsilon_{\text{NO}_2}$  при  $p < 100$  Тор (рис. 2).

Полученные во всем рабочем интервале давлений относительно малые величины энергетической цены реакции окисления азота подтверждают высказанные в [3] опасения о разрушающем озоновый слой действии долгоживущих микроволновых разрядов, возбуждаемых в стратосфере.

Авторы благодарят Г. А. Аскарьяна, Г. М. Батанова, А. Ю. Костянского, В. П. Силакова и А. А. Матвеева за обсуждения и полезные замечания.

## Список литературы

- [1] Русанов В. Д., Фридман А. А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 415 с.
- [2] Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная понижованная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986.
- [3] Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Косый И. А., Костинский А. Ю. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. С. 566.
- [4] Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Грицинин С. И. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 77—84.
- [5] Батанов Г. М., Грицинин С. И., Косый И. А. и др. // Тр. ФИАН. Вопросы физики плазмы и плазменной электроники. Т. 160. М.: Наука, 1985. С. 174—203.
- [6] Голубев С. В., Грицинин С. И., Зорин В. Г. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 136—197.
- [7] Косый И. А., Костинский А. Ю., Матвеев А. А., Силаков В. П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 12. С. 57—61.
- [8] Askaryan G. A., Batanov G. M., Kosy I. A. // Nonlinear World. Proc. of the IV Intern. Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. Vol. 2. Kiev: Naukova Dumka, 1989. P. 65—68.
- [9] Kostinsky A. Yu., Matveev A. A., Silakov V. P. Kinetical Processes in the Non-Equilibrium Nitrogen-Oxygen Plasma. Moscow, 1990. 29 p.
- [10] Kosy I. A., Kostinsky A. Yu., Matveev A. A., Silakov V. P. // Comments Plasma Phys. and Controlled Fusion. 1991. Vol. 14. N 3. P. 15.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
5 февраля 1991 г.