

01;04;07

©1994 г.

## НАПРЯЖЕННОСТЬ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ СТОЛБЕ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ Ag II, Kr II И He-Ne ЛАЗЕРОВ

*А.Е.Козин, С.И.Мольков*

На основе больцман-инвариантного закона подобия получены формулы, описывающие зависимости напряженности продольного электрического поля в положительном столбе разряда низкого давления от радиуса разрядного капилляра, плотности тока, давления наполнения, магнитной индукции в Ag II, Kr II ионных лазерах и от радиуса разрядного капилляра, плотности тока, давления наполнения и мольной доли He в He-Ne лазерах. В формуле для разряда в He-Ne лазерах учтен эффект "выключения" ступенчатой ионизации He при разрушении метастабилей He атомами Ne.

### Введение

Напряженность продольного электрического поля в положительном столбе разряда относится к числу наиболее информативных характеристик состояния плазмы. Знание ее зависимости от внешних параметров разряда позволяет рассчитывать параметры плазмы и выходные характеристики лазеров, решать задачи оптимизации и, таким образом, может облегчить разработку и проектирование новых конструкций. Получение подобных зависимостей теоретическим путем связано со значительными трудностями. Более удобным является вывод формул, основанных на обработке экспериментальных данных с учетом законов подобия разряда. Целью настоящей работы были исследование зависимости величины напряженности продольного электрического поля  $E_z$  от внешних параметров разряда в активных элементах Ag II, Kr II лазеров в капиллярах из бериллиевой керамики и He-Ne лазеров в условиях генерации излучения и получение полуэмпирических формул для ее расчета в широком диапазоне разрядных условий.

### Законы подобия разряда

Для сильноточного разряда ионного аргонового лазера в [1] эмпирически был установлен больцман-инвариантный закон подобия: в капилляре с равными внешними инвариантами  $pR$ ,  $jR$  ( $p$  — давление,  $j$  —

## Параметры активных элементов

Газ	Длина капилляра, мм	Диаметр капилляра, мм
Ar	125	1.5
	200	4.0
	200	3.5
	200	3.2
	200	3.0
	250	3.5
	500	2.8
Kr	500	2.8
	500	2.5
He+Ne	110	4.0
	150	1.1 [8]
	180	1.4
	200	2.0
	300	6.0 [6]
	300	4.0 [6]
	300	2.3 [6]
	400	2.0
	500	2.0
	510	2.0
	-	0.4 [9]

плотность тока разряда,  $R$  — радиус капилляра)  $R$ -преобразование сохраняет внутренние инварианты, в том числе  $E_z R$ . В случае кварцевого капилляра при отсутствии продольного магнитного поля формула для  $E_z R$  имеет вид [1]

$$E_z R = 0.45(pR)^{0.2}. \quad (1)$$

Здесь и далее  $pR$  выражено в Па·см,  $E_z R$  в В. В [2] закон подобия для сильноточного разряда распространен на случай наличия магнитного поля с дополнительным внешним инвариантом  $BR$  ( $B$  — индукция магнитного поля), а в [3] в качестве внешних инвариантов введены характеристики стенки разрядного капилляра (коэффициенты вторичной электронной и ионной эмиссии, коэффициенты аккомодации атомов и ионов на стенках капилляра и температура стенки). Важность учета влияния свойств стенки на характеристики разряда показывает, например, существенное различие (в 1.5 раза) значений  $E_z$ , рассчитанных по формуле (1) и измеренных в капилляре из алюминиевых сегментов, покрытых пленкой  $Al_2O_3$  [4].

Имеющиеся для разряда в He-Ne смеси экспериментальные и теоретические данные [5] также подтверждают справедливость применения бoльцман-инвариантного закона подобия, приближенный характер которого связан со ступенчатой ионизацией. Дополнительным внутренним инвариантом в этом типе разряда является мольная доля Ne

$m = n_2/n$ , где  $n = n_1 + n_2$ ,  $n_1, n_2$  — концентрации гелия и неона соответственно.

При малых давлениях, когда роль ступенчатой ионизации мала, добавка неона к гелию ведет к увеличению концентрации электронов  $n_e$  и уменьшению  $E_z$  из-за роста коэффициента ионизации. С увеличением давления роль ступенчатой ионизации через метастабильные уровни He повышается. В этом случае добавка He, приводящая к эффективному опустошению метастабильных уровней He при резонансной передаче энергии возбуждения на быстрораспадающиеся уровни He, вызывает уменьшение коэффициента ионизации, а в зависимости  $E_z$  от  $m$  появляется максимум [6]. Функциональную зависимость, описывающую такое поведение  $E_z(m)$  и удовлетворяющую закону подобия разряда, представим в виде

$$E_z R = \frac{m + d}{am^2 + bm + c}, \quad (2)$$

где  $a, b, c, d$  — параметры, зависящие от  $pR$  и  $jR$  и определенные ниже.

Параметры активных элементов, исследованные в настоящей работе, и использованные литературные данные сведены в таблицу.

### Разряд в Ag II, Kr II лазерах

Экспериментальные зависимости напряжения горения  $U_r$  от тока разряда  $i$  в диапазоне  $p = 35-133$  Па и  $B = 0-0.12$  Тл были использованы для расчета напряженности продольного электрического поля по формулам

$$E_z = \frac{U_r - U_{ак}}{l}, \quad E_z = \frac{U_{r1} - U_{r2}}{l_1 - l_2}, \quad (3)$$

где  $U_{ак}$  — сумма падений напряжения на аноде и катоде,  $l$  — длина активного элемента.

Вторая формула, служившая для контроля, применялась в случае трубок одинакового диаметра и конструкции, но разной длины  $l_1$  и  $l_2$ . Анодное падение напряжения для рассматриваемых трубок с цилиндрическим анодом отрицательно [7] и не превышает нескольких вольт. Таким образом, можно приближенно принять  $U_{ак}$ , равную катодному падению напряжения, величина которого, как следует из экспериментов с эквивалентным диодом, составляет 15 В для Ag и 10 для Kr.

На рис. 1 представлены типичные зависимости  $E_z R = f(pR)$  при двух значениях  $BR$  для Ag. Видно, что точки, относящиеся к разрядам с одинаковыми значениями  $jR$  и  $BR$ , группируются около одних и тех же кривых, что подтверждает приближенное выполнение больцман-инвариантного закона подобия в указанном диапазоне разрядных условий. Наблюдающийся разброс точек связан с плохой воспроизводимостью давления в разрядном капилляре, различиями в конструкциях разрядных трубок и приближенностью метода определения  $E_z$ .

Регрессионный анализ экспериментальных данных, обработанных указанным выше способом, приводит к выражениям вида

$$E_z R = \left( 1.311 \cdot 10^{-3} \cdot jR + \frac{0.328pR}{pR + 1067 \cdot (BR)^{1.32}} \right) (pR)^{0.23} + 0.05, \quad (4)$$

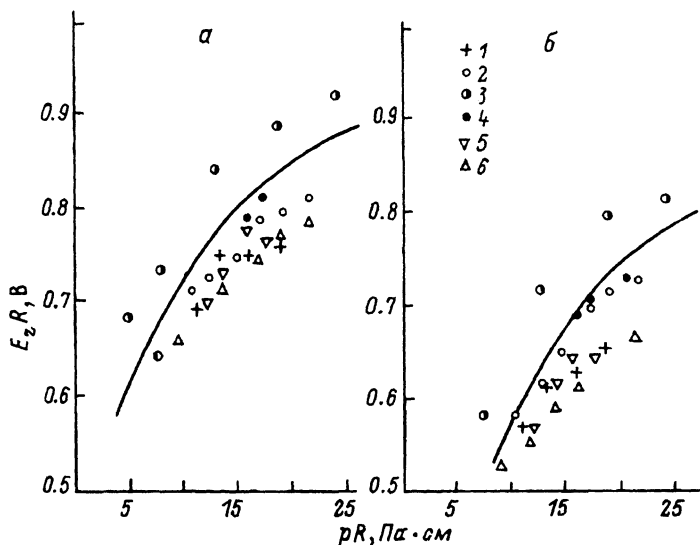


Рис. 1. Зависимость  $E_z R$  от  $pR$  для Ag при  $jR = 54$  А/см.

$Vr, Tл \cdot см$ : а — 0, б —  $1.4 \cdot 10^{-2}$ ; сплошная линия — расчет по формуле (4); значки — эксперимент. Диаметры капилляра: 1 — 0.4, 2 — 0.35, 3 — 0.35, 4 — 0.32, 5 — 0.28, 6 — 0.15 см.

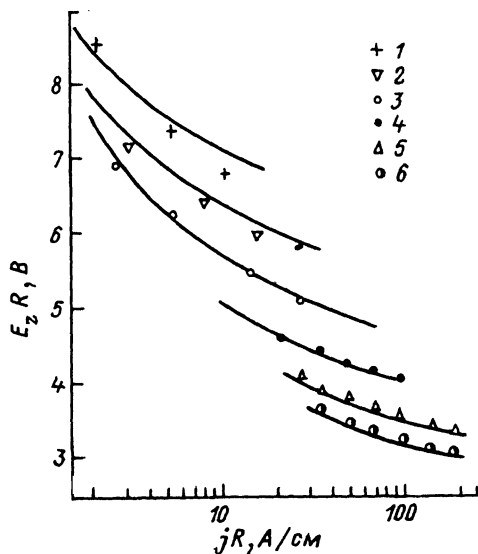


Рис. 2. Зависимость  $E_z R$  от  $jR$  для He-Ne смеси.

Сплошные линии — расчет по формуле (2), экспериментальные данные для  $pR$  (Па·см): 1-3 — 162.6, 106.6, 61.3 при  $m = 0.09$  [6]; 4 — 33.3 при  $m = 0.125$ ; 5 — 13.3 при  $m = 0.167$ ; 6 — 10.6 при  $m = 0.25$ .

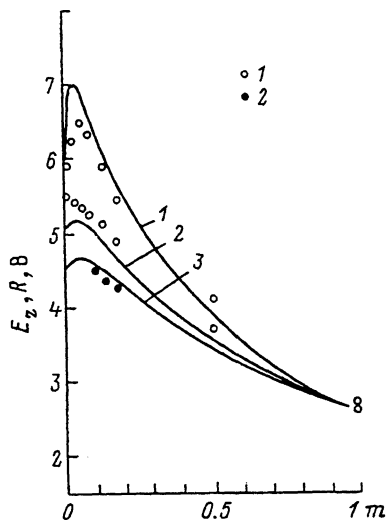


Рис. 3. Зависимость  $E_z R$  от  $m$  для He-Ne смеси при  $jR = 14$  мА/см.

$pR = 120$  (1), 30.6 (2), 13.3 Па·см (3); сплошные линии — расчет по формуле (2); 1, 2 — экспериментальные данные для диаметров капилляра 0.23 [6] и 0.2 см.

$$E_z R = \left( 9.6 \cdot 10^{-3} \cdot jR + \frac{0.74pR}{pR + 1093(BR)^{1.55}} \right) \left( \frac{pR}{133.3} \right)^{0.24(1+6.7 \cdot 10^{-3} \cdot jR)} \quad (5)$$

для Аг и Кг соответственно, где  $BR$  выражено в Тл·см. Ошибка расчета не превышает 18% для (4) и 20% для (5).

### Разряд в He-Ne лазерах

При анализе зависимости напряженности поля  $E_z$  от внешних параметров разряда  $j$ ,  $p$  и  $m$  рассматривались экспериментальные данные по  $E_z$ , полученные методом зондов Ленгмюра на стеклянных и кварцевых разрядных трубках в диапазоне  $p = 65-1330$  Па,  $i = 1-100$  мА, при изменении мольной доли Ne от 0.09 до 0.25. В результате регрессионного анализа экспериментальных данных получены следующие выражения для параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , входящих в формулу (2):

$$\begin{aligned} a &= (0.116 + 3.4 \cdot 10^{-4} jR)(pR)^{0.17}, \\ b &= \left( \frac{6}{(jR)^{0.11}} + 0.056(pR)^{0.85} \right)^{-1}, \\ c &= \frac{0.217}{(pR)^{1.1}}, \\ d &= \frac{0.133}{pR} \left( 4 + \frac{25}{jR} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 2,3 показаны кривые  $E_z R = f(jR, pR, m)$ , рассчитанные по формуле (2) с коэффициентами (6). В целом видно удовлетворительное совпадение с экспериментом как хода кривых, так и абсолютных значений  $E_z R$ . Наблюдающееся расхождение составляет около 5% для области  $pR < 50$  Па·см и 10% для области  $pR > 50$  Па·см.

### Список литературы

- [1] Овсепян Ю.И. // Кинетика низкотемпературной плазмы и газовые лазеры. Тр. ФИАН. М.: Наука, 1984. Т. 145. С. 3-78.
- [2] Мольков С.И. // Расчет параметров плазмы сильноточного дугового разряда, используемого для возбуждения аргоновых лазеров с учетом влияния продольного магнитного поля и перезарядки ионов на атомах. Тр. X Сибирского совещания по спектроскопии. Томск, 1981. С. 101.
- [3] Мольков С.И., Степанов В.А. // Электронная техника. Сер. 4. Электроравакуумные и газоразрядные приборы. ЦНИИ "Электроника", 1988. Вып. 4. С. 15-22.
- [4] Донин В.И. // Газовые лазеры / Под ред. Р.И.Солоухина, В.П. Чеботарева. Новосибирск: Наука, 1977. С. 153-158.
- [5] Seelig W. // Zeitschr. für ang. Mathematik und Physik. 1974. Bd25. N 6. S. 727-733.
- [6] Ищенко П.И., Удальцов В.В. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 8. С. 1670-1675.
- [7] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / Под ред. Л.А.Сена и В.Е.Голанта. М.: Наука, 1971. 544 с.
- [8] Грязневич В.П., Привалов В.Е. // ЖПС. 1989. Т. 33. № 4. С. 634.
- [9] Schübcker D. et al. // IEEE. J. Quant. Electron. 1979. Vol. 15. N 4. P. 232-239.

Научно-производственное объединение  
"Плазма"  
Рязань

Поступило в Редакцию  
1 апреля 1993 г.