

04;07;09;12

Особенности формирования приэлектродного заряда в лазерах с поперечным высокочастотным разрядом в асимметричных конструкциях

© Г.П. Строкань

Научно-исследовательский институт физики при Южном федеральном университете,
344104 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: sgpet@ip.rsu.ru

(Поступило в Редакцию 30 марта 2007 г.)

Приведены экспериментальные результаты измерений электрических характеристик разряда в лазерных трубках асимметричных конструкций и даны объяснения отличным от аналогичных разрядов характеристикам, связанным с особенностью формирования приэлектродного заряда.

PACS: 52.80.Pi

Введение

Использование поперечного высокочастотного (ВЧ) разряда (ПВЧР) для накачки ионных лазеров на парах кадмия [1] показало преимущество такого типа возбуждения перед катафорезными лазерами и лазерами с полым катодом. Последующие работы [2–6], проведенные в этом направлении, подтвердили перспективность этого способа накачки и с другими активными средами. Как правило, на первоначальном этапе исследования использовались простейшие конструкции разрядных кювет, представлявшие собой кварцевые трубки с двумя внешними электродами, в них легко осуществлялись импульсный, а в ряде случаев и квазинепрерывный режимы работы. Однако получение непрерывной генерации в таких разрядных трубках затруднено из-за сильного разогрева элементов конструкции активной части лазера, что приводило к чрезмерному увеличению давления рабочего вещества и тепловому разрушению разрядной трубки.

Для исключения негативного влияния перегрева в работе [7] использовались разрядные трубки асимметричных конструкций, в которых внешний диаметр определялся путем расчета из условий равенства оптимальной мощности накачки и оптимальной мощности, необходимой для разогрева паров металла. Это позволило получить „чисто“ непрерывный режим работы в гелий-кадмиевом лазере, один из электродов которого имел форму щели, другой — плоский (рис. 1, *a*). Как отмечается в работе, отличительной особенностью асимметричных конструкций является высокое значение оптимального давления гелия, в два раза превышающее давление для разрядных трубок симметричных конструкций, и как следствие — большая мощность генерации.

Для объяснения подобного факта, очевидно, необходимо исследовать электрические характеристики газового разряда в подобных асимметричных конструкциях, что и проделано в настоящей работе.

Экспериментальная часть

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ПВЧР в трубках асимметричных конструкций использовались установка и методика, аналогичные работе [8], с той лишь разницей, что в этом случае определялись ВАХ в разные полупериоды поля, т.е. как в тот момент, когда катодом является щелевой электрод, так и в тот момент, когда катодом являлся плоский электрод. Чтобы исключить влияние емкости стенок диэлектрической оболочки и для проведения измерений на постоянном токе использовалась асимметричная конструкция разрядной трубки (рис. 1, *b*). Глубина щели изменялась от 3 до 9 мм при постоянной ширине щели 3 мм. Частота мощности возбуждения составляла 1.2 МГц, на таких частотах сдвиг фаз между током и напряжением пренебрежимо мал.

На рис. 2 приведены ВАХ ВЧ-разряда в гелии, полученные для щелевого катода при различной глубине щели, там же для сравнения показаны ВАХ разряда постоянного тока (РПТ), полученные в этой же трубке. Напряжение горения ВЧ-разряда в этом случае зна-

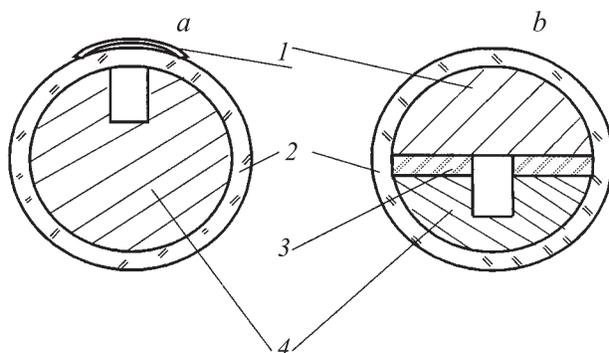


Рис. 1. Поперечный разрез трубок асимметричных конструкций с внешним (*a*) и внутренним (*b*) плоскими электродами: 1 — плоский электрод, 2 — диэлектрическая трубка, 3 — изолятор, 4 — щелевой электрод.

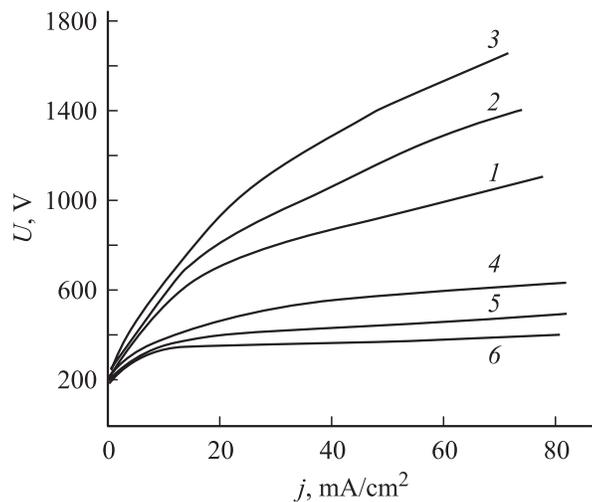


Рис. 2. ВАХ ВЧ-разряда (1–3) и РПТ (4–6) асимметричных конструкций для щелевого катода при различной глубине щели: 4 mm — 1 и 4; 6 — 2 и 5; 9 — 3 и 6. Частота 1.2 МГц, давление гелия 15 hPa.

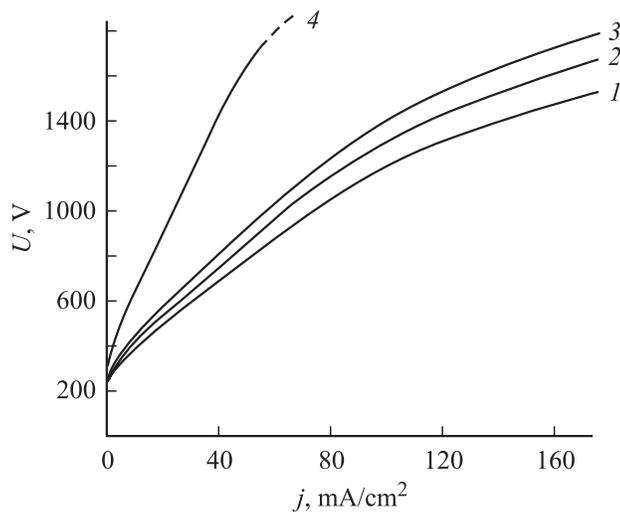


Рис. 3. ВАХ ВЧ-разряда (1–3) и РПТ (4) асимметричных конструкций для щелевого анода. Глубина щели: 4 mm — 1 и 4; 6 — 2; 9 — 3. Частота 1.2 МГц, давление гелия 15 hPa.

чительно выше, чем для РПТ. Такое поведение ВАХ ВЧ-разряда существенно отличается от случая в симметричных конструкциях, в которых напряжение горения всегда ниже, чем в РПТ, что объясняется меньшими электронными потерями в ВЧ-разряде [9,10]. Невысокое напряжение горения РПТ для щелевого катода по сравнению с плоским электродом вызвано эффектом полого катода [11]. Подтверждением эффекта полого катода является тот факт, что с ростом глубины щели катода напряжение горения РПТ уменьшается (рис. 2, кривые 4–6). В то же время ВАХ ВЧ-разряда ведут себя противоположным образом — с ростом глубины щели напряжение горения возрастает (кривые 1–3).

На рис. 3 приведены ВАХ ВЧ-разряда и РПТ в тот момент, когда катодом является плоский электрод. В этом случае напряжение горения ВЧ-разряда меньше, чем для РПТ, т.е. проявляются свойства, присущие симметричным конструкциям. Эти ВАХ ВЧ-разряда могут быть сравнены с ВАХ РПТ в конструкциях „полый анод–катод“, применявшихся в работе [12]. В этом случае, в отличие от РПТ, напряжение горения ВЧ-разряда с щелевым анодом не превышает напряжения горения ВЧ-разряда с щелевым катодом.

Кроме отмеченных особенностей поведения ВАХ ВЧ-разряда необходимо выделить тот факт, что с ростом глубины щели наблюдается увеличение напряжения горения для ВЧ-разряда (рис. 3, кривые 1–3), т.е. явление, противоположное эффекту полого катода. Однако в целом напряжение горения ВЧ-разряда в этом случае остается значительно ниже напряжения горения РПТ при одной и той же плотности тока. Пунктирная часть кривой 4 на этом рисунке соответствует зоне неустойчивости разряда, обусловленного образованием дугового пробоя между электродами. Подобная неустойчивость не наблюдается для ВЧ-разряда даже при превышении плотности тока разряда более, чем в два раза.

Обсуждение полученных результатов

Значительное превышение напряжения горения ВЧ-разряда для щелевых катодов над напряжением горения РПТ, а также рост напряжения горения ВЧ-разряда с ростом глубины щели могут быть поняты при рассмотрении образования и влияния слоя пространственного заряда (СПЗ), возникающего в приэлектродных областях в каждый полупериод поля. Как было замечено ранее, для исключения сдвига фаз между током и напряжением ограничимся малыми частотами накачки, частоты порядка 1 МГц соответствуют принятому допущению.

Пусть в начальный момент рассмотрения катодом является плоский электрод. Уменьшение внешнего поля вызывает снижение энергии быстрых электронов, ускоренных в СПЗ, и при снижении ее до потенциала ионизации и ниже прекращается ионизация атомов газа за счет прямого электронного удара. Для разряда в гелии в этом случае можно пренебречь и ступенчатой ионизацией. Кроме того, за счет уменьшения энергии ионов, бомбардирующих катод, снижается и коэффициент электронной эмиссии, что приводит к прекращению потока быстрых электронов. При низкой напряженности поля происходит частичное экранирование СПЗ вследствие притока медленных электронов из объема, возникает движение тепловых электронов на электрод. Это движение носит характер амбиполярной диффузии, с той лишь разницей, что в силу малого времени (процесс переключения при $\partial U/\partial t = 2 \text{ V/ns}$ и частоте 1 МГц составит 20–30 ns) ионы не успевают уйти из объема, и поэтому заряд Q_1 СПЗ плоского электрода распределится в объеме.

Здесь можно отметить два основных процесса, приводящих к гибели заряда: объемная рекомбинация и уход ионов за счет амбиполярной диффузии. Характерное время электрон-ионной рекомбинации

$$\tau_1 = (\beta_e n_i)^{-1}$$

для значений концентрации ионов $n_i = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, что соответствует типичной концентрации ионов в СПЗ для гамма-режима при лазерных условиях [13] и $\beta_e = 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$, $\tau_r = 10^{-4} \text{ s}$.

Характерное время амбиполярной диффузии ионов $\tau_a = \lambda^2/D_a$ при ширине щели 3 mm, давлении гелия 40 hPa и электронной температуре 0.1 eV, будет $\tau_a = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$. Здесь λ — характерная диффузионная длина, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, определенный из [14]. Из этих оценок видно, что за время переключения внешнего поля заряд СПЗ Q_1 у плоского электрода не изменится, это справедливо и для щелевого катода с зарядом Q_2 , который будет меньше из-за низкого напряжения горения.

Следовательно, при переключении катода с плоского электрода на щелевой в объеме остается нескомпенсированный заряд:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2,$$

перепишем это выражение в виде

$$\rho l S_{k1} = \rho_1 d_{k1} S_{k1} - \rho_2 d_{k2} S_{k2},$$

где ρ , ρ_1 и ρ_2 — плотности зарядов в объеме, в СПЗ у плоского щелевого катодов соответственно, l — глубина щели, S_{k1} , S_{k2} , d_{k1} и d_{k2} — площади и катодные расстояния плоского и щелевого катодов. Из уравнений электростатики получим

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{d_{k1}}{l} \left(\frac{\partial E_1}{\partial x} - \frac{S_{k2} d_{k2}}{S_{k1} d_{k1}} \frac{\partial E_2}{\partial x} \right).$$

Здесь E_1 , E_2 — напряженность поля у первого и второго катодов. Проинтегрируем последнее выражение по всему разрядному промежутку

$$\int_{d_{k2}}^l \frac{\partial E_x}{\partial x} dx = \frac{d_{k1}}{l} \left(\int_0^{d_{k1}} \frac{\partial E_1}{\partial x} dx - A \int_0^{d_{k2}} \frac{\partial E_2}{\partial x} dx \right),$$

где $A = d_{k2} S_{k2} / d_{k1} S_{k1}$, а нулевая координата в нижнем пределе интегрирования соответствует плоскости катода. Полагая, как и в работах [15,16], что на расстоянии d_k , поле $E_x = E_1 = E_2 = 0$, получим

$$E_x(l) = (d_{k1}/l)(A E_2(0) - E_1(0)),$$

используя линейную аппроксимацию поля на катодном расстоянии и считая, что поле в объеме нарастает линейно, находим выражение, определяющее падение

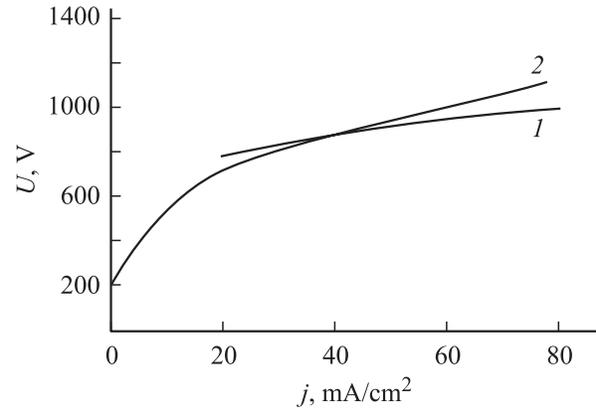


Рис. 4. ВАХ ВЧ-разряда в гелии для щелевого катода $3 \times 4 \text{ mm}$, рассчитанная (1) и экспериментальная (2). Частота 1.2 МГц, давление гелия 15 hPa.

напряжения на объемном заряде U_0 в тот момент, когда катодом является щелевой электрод

$$U_0 = (S_{k1}/S_{k1})U_2 - U_1,$$

где U_1 — ВЧ-напряжение на электродах при плоском катоде, и которое практически равно напряжению на СПЗ, U_2 — напряжение на СПЗ в тот момент, когда катодом является щелевой электрод. Напряжение на электродах для щелевого катода определится суммой напряжений в объеме и на СПЗ:

$$U = (1 + S_{k1}/S_{k1})U_2 - U_1. \quad (1)$$

Отношение площадей электродов в этом выражении свидетельствует о том, что с ростом глубины щели напряжение горения ВЧ-разряда возрастает. Рассчитанное по (1) ВЧ-напряжение горения при различных токах, с учетом характеристик РПТ, приведено на рис. 4, там же приведена экспериментальная кривая для щели $3 \times 4 \text{ mm}$. Расхождение кривых при плотности тока менее 20 mA/cm^2 связано с тем, что разряд переходит в слаботочную фазу, называемую альфа-режимом [17], которая не рассматривается в приведенных расчетах и не используется для накачки лазеров с ПВЧР. В области больших токов расхождение связано с тем, что в рассмотрении заложен одномерный случай для нормального разряда, в то же время экспериментальная кривая отражает результаты трехмерного случая и перехода в аномальный режим разряда. В целом можно считать совпадение кривых удовлетворительным для понимания процессов формирования приэлектродных зарядов.

Заключение

Измерение ВАХ ВЧ-разряда в трубках с электродами асимметричной конфигурации и их анализ позволяют сделать вывод о том, что в ту часть периода поля, когда катодом является щелевой электрод, в объеме возникает

нескомпенсированный заряд. Это приводит к возрастанию напряжения на электродах по сравнению с разрядом постоянного тока. Проведенные вычисления показали, что падение напряжения в объеме разряда сравнимо с падением в СПЗ, и напряженность поля в объеме может достигать 0.5–1 кВ/см. Высокая напряженность поля приводит к возрастанию электронной температуры в плазме этой части разряда. Это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении процессов заселения и расселения рабочих лазерных уровней.

Достаточно хорошее совпадение (порядка 10%) рассчитанной и измеренной ВАХ ВЧ-разряда в асимметричной конструкции может служить подтверждением правильности предположения о возникновении нескомпенсированного заряда в объеме. Тот факт, что на величину напряжения в объеме разряда влияет отношение площадей электродов, может быть использован для выбора величины электронной температуры в разряде и, как следствие задания необходимых параметров — для накачки рабочих уровней лазеров с ПВЧР.

Список литературы

- [1] Латуш Е.Л., Михалевский В.С., Сэм М.Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. Вып. 2. С. 81–83.
- [2] Александров С.В., Елагин В.В., Фотиади А.Э. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 3. С. 160–161.
- [3] Дятлов М.Г., Касьян В.Г., Левин В.Г. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 13. С. 644–646.
- [4] Корольков А.Н., Руделев С.А., Степанов В.А. // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1977. Вып. 9 (60). С. 12–17.
- [5] Кузовников А.А., Савинов В.П., Якунин В.Г. Вест. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия. 1980. Т. 21. Вып. 4. С. 75–77.
- [6] Zabolitow N., Telbizov P. // Opt. Comm. 1986. Vol. 59. N 4. P. 290–292.
- [7] Строкань Г.П., Толмачев Г.Н. // Автометрия. 1984. № 1. С. 61–63.
- [8] Бородин А.В., Кравченко В.Ф., Строкань Г.П. // ЖТФ. 1996. Вып. 8. С. 44–49.
- [9] Тучин В.В. Динамические процессы в газоразрядных лазерах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
- [10] Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. М.: Атомиздат, 1980. 302 с. (Howatson A.M. An Introduction to Gas Discharges. Oxford–New York: Pergamon Press, 1976.)
- [11] Москалев Б.Н. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.
- [12] Rozsa K. // Phys. Lett. 1977. Vol. 63A. N 3. P. 231–232.
- [13] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [14] Мессе Г., Бархон Е. Электронные и ионные столкновения. М.: ИЛ, 1958. 604 с. (Massey H.S.W. and Burhop E.H.S. Electronic and Ionic Impact Phenomena. Oxford: Clarendon Press, 1952)
- [15] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Т. 1. М.-Л.: Гостехиздат, 1952. 432 с.
- [16] Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. М.-Л.: Гостехиздат, 1958. 836 с.
- [17] Левицкий С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. Вып. 5. С. 970–975.