

СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ ВОЛНОВОДНОГО CO₂ ЛАЗЕРА С ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

С.В. Козгунов, М.З. Новгородов, Н.Н. Соболев

Рассчитаны профили плотности электронов, ионов и электрического поля в плазме поперечного ВЧ разряда, применяемого для волноводного CO₂ лазера. Обнаружены неоднородности в распределении указанных параметров, объясняющие специфические особенности данного лазера.

Волноводные CO₂ лазеры (CO₂ ВЛ), возбуждаемые поперечным ВЧ разрядом, получают большое развитие в связи с широкими возможностями их использования в науке, технике и медицине. Экспериментальные исследования свойств активной среды ВЛ затруднены из-за малых поперечных размеров разрядного канала. Поэтому большое значение приобретает теоретические исследования. В [1] рассчитаны профили концентрации ионов, скорости ионизации и энерговыклада для малых (2 мм) разрядных промежутков, но только для чистого азота. Настоящая работа содержит численный анализ свойств плазмы ВЧ разряда, применяемого для CO₂ ВЛ.

В условиях работы CO₂ ВЛ (давление — десятки и сотни торр, частота поля ω — сотни мегагерц) хорошо выполняется соотношение $\omega \ll \nu_m \delta$, где ν_m — частота столкновений электронов с нейтралами, δ — доля энергии, теряемая электроном при соударении. При этом можно считать, что функция распределения электронов по энергиям "следит" за осцилляциями поля, все время подстраиваясь к мгновенному значению поля. Поэтому можно отказаться от решения кинетического уравнения Больцмана с зависимостью от частоты переменного поля, а воспользоваться имеющимися в литературе решениями для стационарных полей и вычисленными на основе этих решений скоростями элементарных процессов и коэффициентов переноса.

Система уравнений, описывающая самостоятельный ВЧ разряд, включала уравнения непрерывности для электронов и ионов, уравнения потоков, уравнение Пуассона и уравнение нормировки электрического поля. Учитывались объемные процессы прямой ионизации, бинарной рекомбинации, прилипания. На границе с электродами предполагалось, что ионная эмиссия в "анодном" режиме отсутствует, а вторичная эмиссия

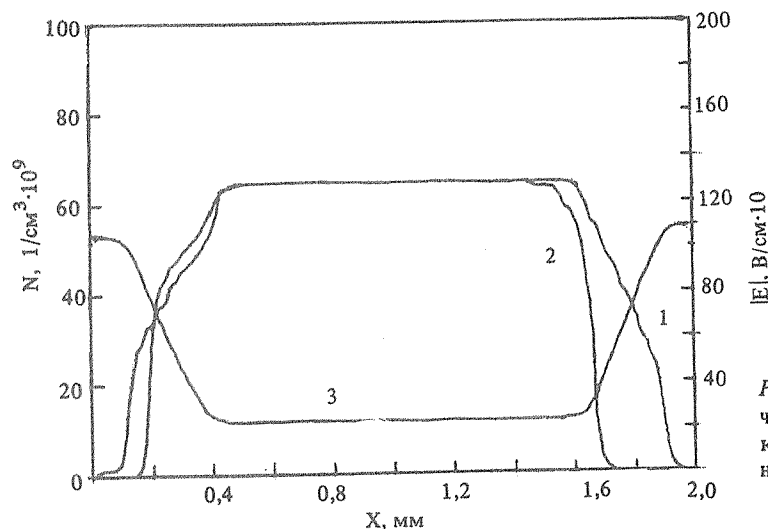


Рис. 1. Распределение параметров плазмы по сечению ВЧ разряда, $U_0 = 100$ В, $p = 25$ торр: 1 — концентрация электронов, 2 — концентрация ионов, 3 — напряженность электрического поля $|E|$.

в "катодном" режиме происходит с коэффициентом $\gamma = 0,01$. Диффузия как процесс, приводящий к размытию резких скачков плотности, не учитывалась, поскольку оценки /2/ и отдельные наши расчеты показывают, что ее роль мала.

Расчеты проводились для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ (1:1:8), частоты переменного поля 100 МГц, ширины разрядного промежутка 2 мм. Давление варьировалось в пределах 25 – 400 торр, напряжение на электродах от 100 до 1000 В. Коэффициенты переноса и элементарных процессов взяты из /3/.

На рис. 1 для примера показано характерное распределение плотности заряженных частиц в момент времени, соответствующий максимальному приложенному напряжению на электродах. На этом же рисунке приведены усредненные по периоду значения модуля электрического поля $|\bar{E}|$. Прежде всего обращает на себя внимание сильная неоднородность всех параметров плазмы вблизи электродов. Концентрации электронов и ионов в середине разрядного промежутка равны и достигают значений порядка 10^{11} см^{-3} , образуя область однородной плазмы. При повышении давления и напряжения ширина однородного участка в

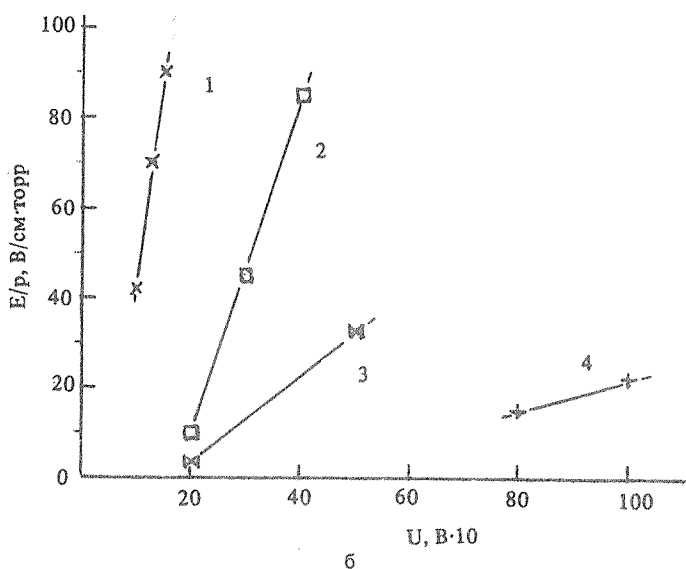
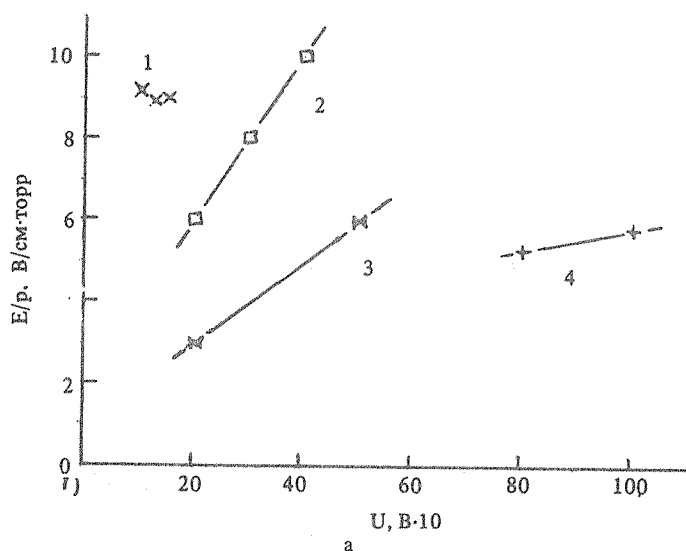


Рис. 2. Приведенная напряженность электрического поля в середине разрядного промежутка (а) и на электродах (б) при p (торр): 1 - 25, 2 - 100, 3 - 200, 4 - 400.

распределении электронов и ионов уменьшается, достигая четверти разрядного промежутка при давлении 400 торр и напряжении около 1000 В. В приэлектродных областях плотности электронов и ионов резко уменьшаются, нейтральность нарушается и усредненный по времени положительный пространственный заряд достигает величины ~ 1 мкКл/см².

На рис. 2а показана зависимость приведенного усредненного электрического поля в середине разрядного промежутка от напряжения на электродах U для нескольких значений давления смеси. Приведенное электрическое поле E/p является одним из важнейших параметров, определяющих накачку на колебательные уровни молекул, участвующих в образовании инверсной заселенности. Значения приведенного поля лежат в пределах 3–10 В/см·торр, причем с увеличением давления и уменьшением напряжения они уменьшаются и приближаются к оптимальным (2–4 В/см·торр), с точки зрения максимальной накачки колебательных уровней /3/.

В разрядах постоянного тока (РПТ), применяемых для CO₂ лазеров, значения E/p заметно больше. В зависимости от условий разряда они составляют 5–15 В/см·торр и находятся далеко от оптимума. Низкие значения E/p в средней части ВЧ разряда являются их преимуществом перед РПТ и, возможно, объясняют тот факт, что в последнее время CO₂ ВЛ с ВЧ разрядом успешно конкурируют с CO₂ лазерами, возбуждаемыми РПТ.

Электрическое поле у электродов на порядок превышает значения поля на оси промежутка (рис. 2б). Это различие тем больше, чем больше напряжение на электродах. Если учесть сказанное выше, то приэлектродные участки, характеризующиеся низкими плотностями электронов и высокими E/p , являются как бы "нерабочими" с лазерной точки зрения. Но они необходимы для поддержания тока разряда. В приэлектродных частях преимущественно идет ударная ионизация, возбуждение высоколежащих электронных состояний молекул, которые потом высвечиваются в видимой области спектра.

Представленные результаты расчета качественно объясняют наблюдаемое с торца разряда распределение светимости ВЧ разряда в направлении электрического поля /4/.

Таким образом, из результатов расчета можно сделать вывод о том, что в поперечном ВЧ разряде формируются оптимальные для CO₂ лазера пространственные распределения электрического поля и плотности электронов. Рождение новых электронов, обеспечивающих протекание разрядного тока, происходит в узких приэлектродных областях, характеризующихся высоким электрическим полем, а накачка колебательных уровней молекул происходит в средней части разряда, где плотность электронов максимальна, а электрическое поле мало.

Полученные сведения о параметрах плазмы позволяют перейти к решению задачи о распределении по сечению разрядного канала температуры газа и колебательно-возбужденных молекул, что важно для количественной оценки работы CO₂ ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев А. С. и др. Физика плазмы, 12, 1264 (1986).
2. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М., Наука, 1980.
3. Lowke J. J., Phelps A. V., Irwin B. W. J. Appl. Phys., 44, 4664 (1973).
4. He D., Baker C. J., Hall D. R. J. Appl. Phys., 55, 4120 (1984).

Поступила в редакцию 3 января 1989 г.