Экспериментальное и теоретическое исследование рекомбинационной динамики неравновесной плазмы в смесях с кислородом

Н.Л. Александров, Е.М. Анохин, М.А. Попов, С.В. Киндышева

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия, anjohn@mail.ru

Рекомбинация электронов с положительными молекулярными ионами кислорода определяет время жизни и концентрацию неравновесной плазмы в кислороде, воздухе и других кислородсодержащих смесях. При этом имеются надежные данные для скорости диссоциативной рекомбинации с ионами О2+, а скорость тройной рекомбинации (третье тело – электрон) берется обычно по аналогии с хорошо изученным случаем атомарных ионов [1].

В [2] наблюдалось значительное отличие экспериментальных и расчетных результатов плотности электронов при распаде плазмы в воздухе и кислороде. Это отличие было приписано тому, что скорость тройной рекомбинации с молекулярными ионами может быть существенно больше аналогичной величины для атомарных ионов. Эта идея была высказана ранее [3] на основе расчетов для модельных молекулярных ионов. Получение количественной информации о скорости тройной электрон-ионной рекомбинации в условиях [2] было затруднено, поскольку при этом одновременно менялись плотность электронов и их температура, а температурная зависимость скорости тройной рекомбинации для молекулярных ионов неизвестна.

Для устранения этой неопределенности в данной работе исследовался распад плазмы высоковольтного наносекундного разряда в кислороде с добавлением углекислого газа и аргона. В смесях с углекислым газом термализация электронов происходит до начала распада плазмы, и рекомбинация электронов происходит уже при комнатной температуре электронов. С другой стороны, добавление СО2 почти не влияет на ионный состав плазмы во время распада, и доминирующим ионом в рассматриваемых условиях, как и в плазме кислорода и воздуха, является ион О2+. В смесях с аргоном термализация электронов происходит значительно медленнее, и температура электронов может значительно превосходить температуру газа. Таким образом, используя смеси кислорода с углекислым газом и аргоном, можно оценить как величину константы скорости тройной рекомбинации для тепловых электронов, так и форму ее температурной зависимости.

В качестве источника плазмы использовался высоковольтный наносекундный разряд с амплитудой импульса 25 кВ и длительностью ~30 нс в смесях кислорода и углекислого газа. Процентное содержание углекислого газа варьировалось от 5 до 20 процентов, при полном давлении газовой смеси от 1 до 10 торр. Зависимость концентрации электронов от времени измерялась СВЧ-интерферометром для начальных концентраций электронов порядка (1-10)×1012 см-3. Из обработки этих зависимостей был определен эффективный коэффициент электрон-ионной рекомбинации для разных давлений и составов смеси.

На основе анализа экспериментальных данных с помощью численного моделирования удалось определить константу скорости тройной электрон-ионной рекомбинации для этих ионов при комнатной температуре электронов. Как и ожидалось, она оказалась существенно больше скорости рекомбинации для атомарных ионов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-31331 мол\_а.

Литература

1. I.A. Kossyi et al Plasma Sources Sci. Technol., 1992, 1, 207.
2. N.L. Aleksandrov et al J. Phys. D: Appl. Phys., 2012, 45, 255202.
3. C.B. Collins Phys. Rev., 1965, 140, A1850.