

Г.Д. Чеботарев, О.О. Пруцаков, Е.Л. Латуш

Исследование процессов контракции и расконтрагирования в активной среде рекомбинационного He–Sr⁺-лазера

Ростовский государственный университет

Поступила в редакцию 15.11.2005 г.

С помощью разработанной самосогласованной математической модели рекомбинационного He–Sr⁺-лазера рассчитана пространственно-временная эволюция параметров плазмы и характеристик генерации в импульсно-периодическом режиме. Расчеты показали хорошее согласие с экспериментом. С помощью модели изучены явления контракции и расконтрагирования импульсно-периодического разряда. Показано, что сжатие импульсно-периодического разряда в гелии является результатом формирования тепловой неоднородности плазмы последовательностью импульсов. Показано также, что расконтрагирование разряда при поступлении в гелий атомов стронция в первую очередь определяется их низким потенциалом ионизации. При этом происходят почти полная двукратная ионизация стронция практически по всему сечению разряда, а также пространственная стабилизация процесса ионизации гелия. В итоге с ростом концентрации стронция происходит выравнивание концентрации электронов по радиусу трубки.

Импульсно-периодические лазеры на парах металлов работают в условиях, при которых разряд в чистом инертном газе контрагирован [1–3]. Контракция создает большие трудности для мощных газоразрядных лазеров, нарушая пространственную однородность активной среды [1–5]. Для борьбы с этой проблемой применяются различные технические решения, приводящие к усложнению конструкции лазера. Однако в лазерах на парах металлов (ЛПМ), содержащих инертный буферный газ и пары металла, имеет место автоматическое расконтрагирование разряда, вследствие чего обеспечивается достаточно высокая пространственная однородность плазмы [1–3]. Поэтому явление расконтрагирования имеет большое значение для физики лазеров на парах металлов, а его детальные исследования представляют несомненный интерес.

Явление контракции разряда в инертных газах достаточно хорошо изучено, при этом наиболее детально исследованы стационарный и импульсный объемный разряды [4–12]. Развитие импульсно-периодических ЛПМ явилось стимулом к исследованиям явлений контракции и расконтрагирования в продольном импульсно-периодическом разряде [1–3, 13–15]. Особенностью этого разряда является то, что в типичных для ЛПМ условиях возбуждения разряда контракция не наблюдается в одиночном импульсе и имеет место лишь при достаточно высоких частотах следования импульсов [3, 14]. Другая особенность — сохранение однородности разряда в условиях парогазовой смеси даже при развитии приэлектродных неустойчивостей или при наличии отдельных участков контрагированного разряда, обедненных парами металла [2, 3, 14].

Сжатие разряда в инертных газах является следствием развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Контракция возникает при одновременном выполнении по крайней мере двух условий: частота образования заряженных частиц должна резко спадать от оси к периферии; объемная рекомбинация заряженных частиц должна преобладать над амбиполярной диффузией [4–6].

Очевидно, что контракция будет преодолена, т.е. произойдет расконтрагирование разряда при нарушении хотя бы одного из этих условий. Газоразрядные условия, способствующие этому, возникают при введении в разряд легкоионизируемой добавки. Качественный анализ механизмов расконтрагирования импульсно-периодического разряда в смесях инертных газов с парами металлов проведен в работах [1–3, 13, 14], где показано, что при введении в разряд паров металла при сравнительно небольшой концентрации (соответствующей типичным условиям генерации ЛПМ) формируется нарастающий к стенкам газоразрядной трубки радиальный профиль ионизационных свойств смеси. В результате проводимость плазмы выравнивается по сечению трубки и диаметр разрядного канала увеличивается. В [2, 13, 15] отмечается важная роль остаточной предимпульсной концентрации электронов в зажигании однородного импульсно-периодического разряда в парогазовой смеси. В [3, 14] сделан вывод о важной роли амбиполярной диффузии ионов металла, участвующей наряду с нагревом газа в формировании неоднородного радиального профиля плотности паров металла с минимумом на оси.

Цель настоящей работы заключается в детальном численном исследовании механизмов контракции

и расконтрагирования импульсно-периодического разряда в He—Sr-смеси с помощью разработанной нами самосогласованной математической модели He—Sr⁺-лазера.

He—Sr⁺-лазер относится к классу ионных рекомбинационных лазеров на парах металлов [16–18]. Он обеспечивает генерацию в фиолетовой (430,5 и 416,2 нм SrII) области спектра с достаточно высоким уровнем средней мощности (до нескольких ватт). Активная среда He—Sr⁺-лазера представляет собой смесь паров стронция и буферного газа гелия. Необходимая плотность паров стронция достигается подогревом активной области. Подогрев может осуществляться как с помощью внешней печи, так и за счет энергии, вводимой в разряд в режиме саморазогрева. Возбуждение активной среды осуществляется короткими мощными импульсами тока, в течение которых происходит почти полная двукратная ионизация стронция. Этому способствует малость потенциалов однократной и двукратной ионизации стронция по сравнению с потенциалом ионизации гелия.

После окончания импульса тока происходит процесс рекомбинации плазмы. Накачка верхних лазерных уровней осуществляется ударно-радиационной рекомбинацией двукратных ионов стронция в послесвечении импульсного разряда, инверсия же достигается в результате эффективной очистки нижних лазерных уровней за счет электронного девозбуждения. Рекомбинационная накачка верхних и столкновительная очистка нижних лазерных уровней максимально эффективны при быстром и глубоком охлаждении электронного газа в раннем послесвечении, что достигается за счет упругих соударений электронов с легкими атомами и ионами гелия. Поэтому увеличение давления гелия способствует росту энергетических характеристик генерации.

В работе [19] изложено описание разработанной нами математической модели He—Sr⁺-лазера, позволяющей рассчитывать временные и энергетические характеристики активной среды в широком диапазоне давлений рабочей смеси. В настоящей работе использовалась новая самосогласованная математическая модель рекомбинационных He—Sr⁺-лазеров, позволяющая рассчитывать пространственно-временную эволюцию параметров плазмы и характеристик генерации в импульсно-периодическом режиме. Основное отличие новой модели от модели [19] состоит в том, что в кинетических уравнениях для долгоживущих компонентов плазмы диффузионные члены вида $6D/R^2$, где D — коэффициент диффузии и R — радиус трубки, были заменены на дивергенции плотностей диффузионных потоков в радиальном направлении. В уравнения для электронной и газовой температур также введены дивергенции плотностей электронного и газового тепловых потоков, обусловленные электронной и газовой теплопроводностью.

В работе [20] были измерены радиальные профили концентрации электронов как в контрагированном, так и в расконтрагированном импульсно-периодических разрядах He—Sr⁺-лазера, а также измерена

электронная температура, поэтому расчеты по модели были проведены для условий данной работы. В частности, внутренний диаметр, активная длина и частота следования импульсов составляли соответственно: $d = 1,55$ см, $L_a = 70$ см, $f = 6$ кГц.

Результаты расчетов пространственно-временных зависимостей параметров плазмы и характеристик генерации He—Sr⁺-лазера в установившемся импульсно-периодическом режиме приведены на рис. 1. На рис. 1, а представлены рассчитанные и экспериментальные [20] радиальные профили концентрации электронов в различные моменты времени относительно максимума тока. На рис. 1, б показаны рассчитанный и экспериментальный профили электронной температуры в послесвечении в момент максимума генерации.

Рассчитанные пространственно-временные зависимости электронной и газовой температуры, концентрации атомов, однократных и двукратных ионов стронция, а также интенсивности генерации на линии 430,5 нм SrII приведены на рис. 1, в–з. Видно, что в установившемся режиме газовая температура за время импульса тока изменяется незначительно (рис. 1, в). Она неоднородна по радиусу, что приводит наряду с амбиполярной диффузией к неоднородному предимпульсному радиальному распределению атомов металла (рис. 1, д). Профиль двукратных ионов стронция в конце импульса тока (рис. 1, ж) практически повторяет предимпульсный профиль атомов стронция (за исключением тонких пристеночных областей), испытывающих в импульсе тока практически полную двукратную ионизацию. Провал концентрации двукратных ионов стронция на оси приводит к минимуму интенсивности генерации на оси трубки (рис. 1, з). Радиальный профиль интенсивности генерации с небольшим провалом на оси является типичным для He—Sr⁺-лазера. Он наблюдался как в наших экспериментах, так и в работах других авторов [2, 21].

Как видно из рис. 1, модель достаточно точно отражает основные закономерности в поведении характеристик активной среды He—Sr⁺-лазера.

На рис. 2 представлены рассчитанные для разных частот следования импульсов установившиеся радиальные профили концентрации электронов и температуры газа, а также предимпульсной концентрации атомов гелия при разряде в чистом гелии.

Видно, что при малых частотах ($f \sim 10^2$ Гц) радиальный профиль газовой температуры близок к однородному (рис. 2, в), а профиль концентрации электронов — к бесселевскому профилю, характерному для неконтрагированного разряда (рис. 2, а, б). При более высоких частотах (выше 10^3 Гц) резко нарастает тепловая неоднородность плазмы (рис. 2, в, г), обуславливающая вследствие действия ионизационно-перегревного механизма сужение профиля концентрации электронов и рост ее значения на оси разряда. Рассчитанный профиль N_e при $f = 6$ кГц близок к экспериментальному в контрагированном разряде [20] (рис. 2, а, б).

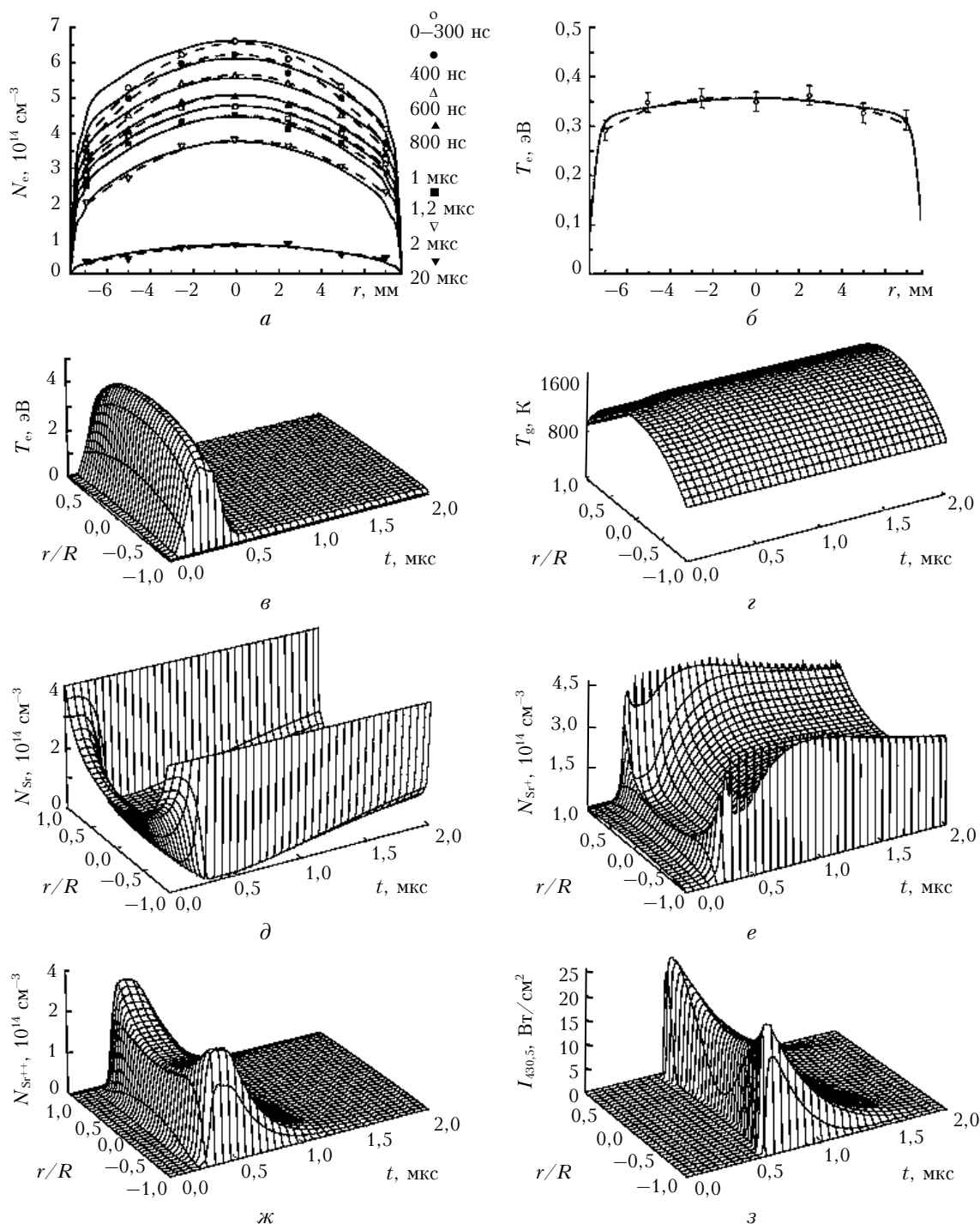


Рис. 1. Радиальные профили концентрации электронов в различные моменты времени относительно максимума тока (а), радиальный профиль температуры электронов в момент максимума генерации (б), пространственно-временные зависимости температуры электронов (в), температуры газа (г), концентрации атомов (д), однократных (е) и двукратных (ж) ионов стронция, а также интенсивности генерации на линии 430,5 нм Sr II (з): $p_{\text{He}} = 250$ торр; штриховые кривые — эксперимент

На рис. 3 показаны радиальные распределения параметров плазмы в различных импульсах. В качестве начальных условий для первого импульса были взяты затравочные однородные распределения всех параметров плазмы. До 60-го импульса моделировался разряд в чистом гелии, после были добавлены атомы стронция.

Видно, что вначале разряд неконтрагирован, сжатие его наступает примерно через 40 импульсов. Это число импульсов соответствует времени установления температурного режима (~ 6 мс). Из рис. 3 д, е видно, что вначале, когда газ только начинает греться, концентрация гелия не успевает сразу же откликнуться на изменение температуры,