

02;07;10;12

©1994

ВЛИЯНИЕ ТРЕКОВОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЫ НА КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛАЗЕРАХ С НАКАЧКОЙ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ

А.П.Будник, А.С.Вакуловский, И.В.Добровольская

Известно, что даже при значительных удельных мощностях облучения конденсированных сред и плотных газов осколками деления (ОД) необходимо принимать во внимание влияние на кинетические процессы (КП) неомогенных эффектов, обусловленных трековой структурой плазмы [1]. До сих пор модели КП в активных средах лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) разрабатываются аналогично моделям лазеров с накачкой электронным пучком, в которых трековые эффекты вполне обоснованно можно не учитывать. Однако появились экспериментальные данные, указывающие на то, что в плазме активных сред газовых ЛЯН возможно проявление таких эффектов [2,3]. Математическое моделирование пространственно-временной эволюции треков ОД показало [4,5], что в плазме инертных газов могут существовать в течение сотен нс значительные неоднородности концентраций ионов (характерный поперечный размер $r \sim 1$ мкм при плотности газа, близкой к нормальной), образовавшихся непосредственно в первичных процессах столкновений ОД с атомами инертного газа, или продуктов реакций с участием этих ионов. Ионы, возникающие под действием электронов деградационного каскада, в пространстве распределены гораздо более равномерно ($r \sim$ десятки мкм при той же плотности газа). Таким образом, для лазеров, в которых существенно возбуждение уровней за счет перезарядки ионов буферного газа, при накачке их ОД можно ожидать возникновения в активной среде сильных неоднородностей концентрации возбужденных ионов и коэффициента усиления электромагнитного излучения.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния трековой структуры плазмы на КП в активных средах лазеров с накачкой ОД, в которых в процессе накачки лазерных уровней существенный вклад вносит перезарядка ионов буферного газа. Разработана модель КП активных сред ЛЯН, в которой процесс накачки среды ОД рассматривается как обобщенный пуассоновский процесс, характеристики которого задаются на основании расчетов

пространственно-временной эволюции плазмы треков ОД [4,5].

Представляется целесообразным начать исследования с изучения частных случаев, допускающих существенное упрощение задачи, поскольку в общем случае необходимо решать сложную задачу неомогенной кинетики деградации энергии ОД в активной среде с учетом пространственно-временной эволюции электронов деградационного каскада, возможности перекрытия треков и большого числа плазмохимических реакций. Вполне подходящей для этого представляется гелий-кадмиевая смесь. Действительно, во-первых, КП в такой смеси изучались интенсивно, в том числе и под действием осколков деления, и хотя полной ясности, пожалуй, не достигнуто, но достаточно точно известны сечения и константы сечения и константы скорости многих реакций [6-9]. Во-вторых, в процессе накачки уровней иона кадмия (для перехода с $\lambda = 441.6$ нм) существенный вклад вносят процессы перезарядки атомарных и молекулярных ионов гелия на атомах кадмия [8].

Изложим кратко основные положения используемой модели. Процесс передачи энергии ОД активной среде разобьем на две стадии. На первой, следующей непосредственно за пролетом осколка, происходит разлет электронов и ионов от оси трека и релаксация электронов в неупругих столкновениях. На этой стадии, длящейся в течение времени, превышающего время релаксации электронов в неупругих столкновениях, но меньшее, чем время релаксации в упругих столкновениях, можно пренебречь плазмохимическими реакциями и считать, что возмущение среды, создаваемое ОД и электронами деградационного каскада, аддитивно добавляется к ранее созданному под действием предыдущих возмущений среды другими пролетевшими достаточно близко ОД. Временем возникновения такого возмущения по сравнению с характерными временами плазмохимических реакций можно пренебречь. На второй стадии, когда существенны плазмохимические реакции, для гелий-кадмиевой среды при условиях, близких к оптимальным, для лазерной генерации можно пренебречь в первом приближении диффузией ионов, так как процесс перезарядки и конверсии ионов буферного газа протекает достаточно быстро, а тяжелые возбужденные ионы кадмия за время их жизни не успевают значительно переместиться. Кроме того, для мощностей, превышающих пороговые для гелий-кадмиевого лазера, приближенно можно считать плазму квазинейтральной даже вблизи оси трека [4-6]. Вторая стадия длится до тех пор, пока достаточно близко не пролетит осколок. Далее процесс повторяется.

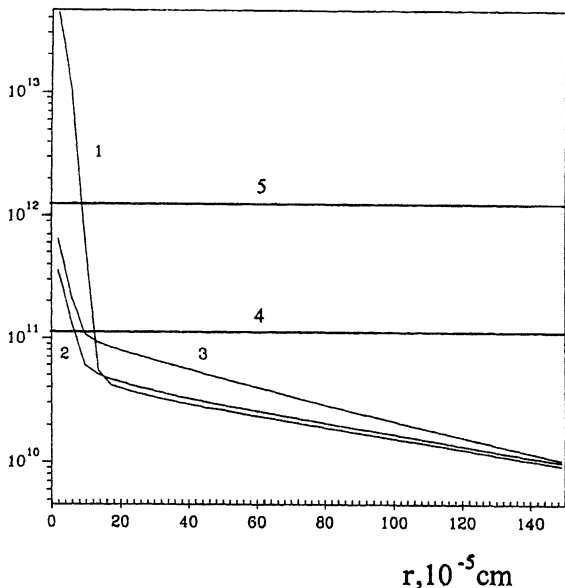
$N, \text{см}^{-3}$ 

Рис. 1. Зависимость концентрации ионов He^+ (1) и He_2^+ (2), а также атомов гелия в 2^1p состоянии (3) от расстояния до оси трека при нормальной плотности гелия через 100 пс после пролета осколка деления; 4, 5 — концентрации ионов He^+ , рассчитанные в приближении постоянной накачки $W = 37 \text{ Вт/см}^3$ и 360 Вт/см^3 соответственно для гелий-кадмиевой среды. Параметры среды: концентрация атомов гелия — $2.68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрация атомов кадмия — $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, температура среды — 650 К.

Рассмотрим вначале характеристики одиночного трека, создаваемого в гелии под действием ОД. Зависимость концентрации атомарных, молекулярных ионов и возбужденных атомов гелия от радиуса до оси трека, рассчитанная к моменту времени, в который можно считать завершившейся релаксацию в неупругих процессах, представлена на рис. 1. Расчеты проводились с использованием модели эволюции трека, разработанной в [4,5]. По сравнению с [4,5] дополнительно были учтены процессы возбуждения атомов гелия ОД, сечения возбуждения которых определялись с использованием соотношения подобия [10]. В соответствии с представленными на рис. 1 результатами, процесс накачки среды ОД в данной точке удобно разбить на две компоненты. Одна из них определяется далекими пролетами ОД. Эта компонента может быть учтена в однородном приближении путем введения средней медленно меняющейся мощности накачки. Вторая компонента обусловлена пролетами осколков вблизи данной точки и должна быть учтена ее им-

пульсная природа. В настоящей работе близкие пролеты ОД моделировались в виде случайного обобщенного пуассоновского процесса, а поток ОД считался в пространстве в среднем изотропным и однородным.

Модель КП в гелий-кадмиевой смеси построена на основе данных работ [6-9]. При моделировании рассматривались атомы гелия в основном и возбужденных (2^3S , 2^1S , 2^3P , 2^1P) состояниях, ионы гелия, молекулярные ионы гелия ($X^2 \sum_u$), атомы кадмия в основном и возбужденном состояниях (5^3P), ионы кадмия в основном и возбужденных ($4d^9 5s^{22} D_{3/2}$, $4d^9 5s^{22} D_{5/2}$, $5p^2 P_{3/2}$, $5p^2 P_{1/2}$, $5d^2 D_{3/2}$, $5d^2 D_{5/2}$, эффективный верхний уровень с энергией 22.5 эВ) состояниях, молекулярные ионы кадмия. Учитывались следующие процессы: пеннинговская ионизация атомов кадмия, процессы конверсии атомарных ионов в молекулярные, перезарядки ионов на атомах кадмия, процессы с участием электронов плазмы, радиационные переходы. Типичные результаты расчетов по такой модели с использованием программы EEDF [11] для одной из реализаций случайного пуассоновского процесса представлены на рис. 2. Параметры среды при расчете были выбраны близкими к оптимальным (концентрация атомов гелия — $2.68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрация атомов кадмия — $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, температура среды — 650 К), а средняя удельная мощность накачки близка к пороговой — $W \approx 40 \text{ Вт/см}^3$.

Из полученных результатов следует, что представление накачки ОД в расчетах импульсным процессом приводит к сильным флуктуациям концентраций атомарных и молекулярных ионов гелия, а также ионов кадмия в возбужденных состояниях. Как следствие этого линейный коэффициент усиления лазерного излучения испытывает сильные флуктуации. Однако среднее его значение при импульсной и непрерывной гомогенной накачке с соответствующей средней мощностью отличаются незначительно.

Таким образом, впервые показано, что плазма активных сред лазеров, возбуждаемых ОД, при умеренных мощностях накачки может представлять статистически сильно неоднородную нестационарную среду. Безусловно, разработанная модель груба и желательно включить в рассмотрение диффузию ионов на второй стадии. Однако оценки показывают, что учет ее не может качественно изменить ситуацию, а должен привести лишь к уменьшению амплитуды выбросов и увеличению их длительности. Укажем также, что в свете вышеизложенного требуют уточнения результаты теоретических работ (см., например, [12]), утверждающих о незначительных различиях КП при накачке ОД и

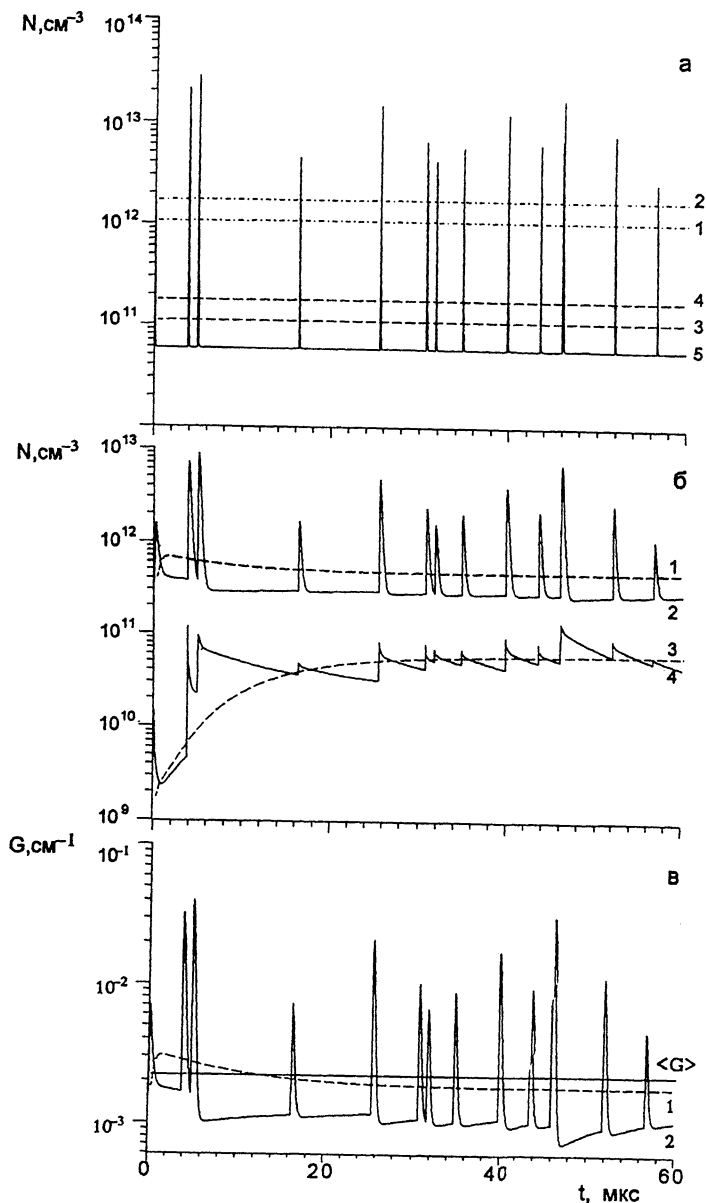


Рис. 2. Зависимость концентраций ионов (а, б) и линейного коэффициента усиления (в) от времени для постоянной и импульсной ($\langle W \rangle = 37 \text{ Вт/см}^3$) накачки. а — концентрации He^+ — 1, 3, 5; He_2^+ — 2, 4; б — концентрации ионов кадмия на верхнем (1, 2) и нижнем (3, 4) уровнях для $\lambda = 441.6 \text{ нм}$. Импульсная накачка — сплошные линии, постоянная — пунктирные (37 Вт/см^3) и штрих-пунктирные (360 Вт/см^3).

электронным пучком, поскольку при таком анализе полностью игнорировалась трековая структура плазмы.

Список литературы

- [1] *Ликаев А.К.* Современная радиационная химия. Радиоллиз жидкостей и газов. Т. 2. М., 1987. 439 с.
- [2] *Dyachenko P.P.* // *Laser and Particle Beams*. 1993. V. 11. N 4. P. 619-634.
- [3] *Полетаев Е.Д., Дорофеев Ю.Б., Дьяченко П.П.* и др. // Препринт ФЭИ № 2158. Обнинск, 1990. 23 с.
- [4] *Будник А.П., Вакуловский А.С., Соколов Ю.В.* // Тр. конф. ЛЯН-92. Обнинск, 26-29 мая 1992 г. Т. 1. Обнинск, 1992. С. 178-185.
- [5] *Будник А.П., Вакуловский А.С., Добровольская И.В., Соколов Ю.В.* // Препринт ФЭИ № 2315. 1993. 18 с.
- [6] *Миськевич А.И.* // *ЖТФ*. 1987. Т. 57. В. 9. С. 1767-1775.
- [7] *Горюнов Ф.Г., Держиев В.И., Жидков А.Г.* и др. // *Квантовая электроника*. 1989. Т. 16. В. 10. С. 2039-2046.
- [8] *Дорофеев Ю.Б., Полетаев Е.Д., Дьяченко П.П., Тараско М.З.* // Препринт ФЭИ № 2311. 1993. 16 с.
- [9] *Белинский С.В., Паращук А.В., Смольский В.Н., Юдин Г.Л.* // Препринт ФЭИ № 2162. 1991. 37 с.
- [10] *Reumann K., Scharner K.-H., Sommer B., Trabert E.* // *Phys. Rev. A*. 1988. V. 38. N 5. P. 2290-2293.
- [11] *Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П.* // *Физика плазмы*. 1992. Т. 18. В. 7. С. 888-900.
- [12] *Moratz T.J., Sauders T.D., Kushner M.J.* // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. N 8. P. 3799-3810.

Государственный научный центр РФ
Физико-энергетический институт
Обнинск

Поступило в Редакцию
6 сентября 1994 г.