

03;07

Инверсная населенность в разряде аргона, вызванная потоком газа

© Г.А. Галечян

E-mail: galechian@web.am

Поступило в Редакцию 15 мая 2007 г.

Рассматриваются процессы создания инверсной населенности возбужденных состояний атомов в электрическом разряде аргона при повышенном давлении в продольном турбулентном потоке газа посредством перевода положительного столба из состояния однородного неконтрагированного разряда в контрагированное, при котором произойдет вспышка суперлюминесцентного излучения. На основе полученных результатов предлагается создать газоразрядный оптический квантовый генератор, управляемый потоком газа.

PACS: 42.55.-f

Развитие квантовой электроники начиналось с предложений получения инверсной населенности возбужденных состояний, которые послужили основой для усиления света в среде посредством индуцированных переходов и создания оптических квантовых генераторов. Известен ряд способов создания инверсной населенности в газах. К их числу относятся возбуждение при соударениях электронов с частицами в электрическом разряде, химическое возбуждение, фотодиссоциация, газодинамические процессы, оптическая накачка, электронно-лучевое возбуждение [1]. Кроме того, в последнее время был предложен метод получения инверсии населенности возбужденных состояний в газовом разряде при повышенном давлении акустической волной [2,3].

В данной работе предлагается новый способ получения инверсной населенности в разряде аргона при повышенном давлении — потоком газа, направленным вдоль положительного столба.

Газовый разряд в потоке газа в квантовой электронике широко используется, в частности, для создания газоразрядных лазеров на углекислом газе при высоких давлениях [4,5].

Основным назначением потока, связанным с его использованием в конвективных СО₂-лазерах, является стабилизация разряда турбулентным течением, создание однородного, неконтрагированного, равно-

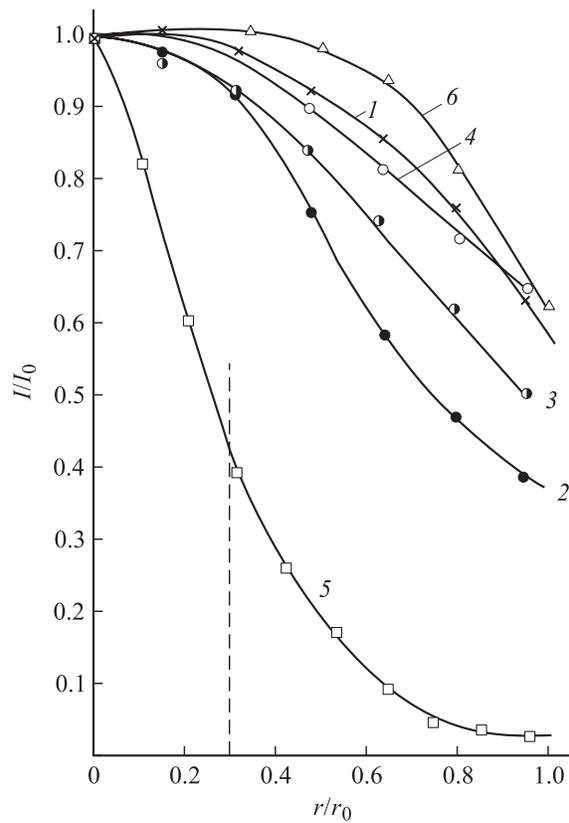


Рис. 1. Распределения относительного зондового тока насыщения двойных электрических зондов по радиусу положительного столба тлеющего разряда в продольном потоке гелия. I_0 — наибольшее значение зондового тока.

мерного по всему объему возбуждения газа при высоких давлениях, отвод тепла, выделяемого током в плазменном столбе, увеличение энерговклада в разряд [6,7].

Рассмотрим влияние потока газа на параметры электрического разряда.

На рис. 1 представлены зависимости распределения зондового тока насыщения двойных электрических зондов от радиуса положительного

столба при различных давлениях гелия в продольном потоке газа в трубке с внутренним диаметром $r_0 = 1$ см. Кривые 1–4 получены при скорости 250 м/с, кривая 6 — при скорости 450 м/с, 5 — в отсутствие потока газа. Кривая 1 соответствует диффузному параболическому распределению плотности тока по радиусу трубки при давлении 3 Torr в соответствии с теорией Шоттки [6] положительного столба тлеющего разряда; 2 и 3 — 22 и 58 Torr соответственно, контрагированные разряды в потоке; 4 — 78 Torr, расконтрагированный турбулентным потоком разряд, профиль соответствует диффузному плазменному столбу; 5 — контрагированный разряд в отсутствие потока газа при давлении 50 Torr, колоколообразное распределение плотности тока по радиусу трубки, штриховая линия соответствует видимой границе положительного, которая находится в полном соответствии с аналогичным пересечением штриховой линии и кривой профиля распределения концентрации электронов по радиусу плазменного столба в монографии Грановского [8]; 6 — 55 Torr, расконтрагированный разряд в более высокоскоростном потоке газа, поэтому распределение плотности электронов по радиусу положительного столба является более однородным, почти плоское распределение.

Получив расконтрагированный, однородный положительный столб с турбулентным потоком аргона при повышенном давлении, резко остановив течение газа через разряд, перекроем заслонками на входе и выходе разрядной трубки (одновременно), в результате произойдет скачкообразная контракция разряда. Распределение плотности тока по радиусу положительного столба преобразуется от профиля, соответствующего расконтрагированному разряду при повышенном давлении (кривые 6 или 4 на рис. 1), на профиль контрагированного разряда в отсутствие потока (кривая 5). Концентрация электронов на периферии плазменного столба резко уменьшится, вследствие ряда рекомбинационных и релаксационных процессов в разряде установится инверсная населенность и произойдет вспышка суперлюминесцентного оптического излучения.

В [2,3] экспериментально получена аналогичная ситуация в разрядной трубке, но со звуковой волной, направленной вдоль положительного столба.

В работах [7,9–11] приведено рассмотрение явлений, имеющих аналогии между разрядом в потоке газа и в поле акустической волны, в частности повышение интенсивности акустической волны больше

определенной величины сопровождается увеличением диаметра плазменного столба, созданием равномерного неконтрагированного разряда при высоких давлениях газа. Интенсивная резонансная звуковая волна в трубке образует акустическое течение, которое порождает в разряде вихревое движение, вызывающее перемешивание плазмы в радиальном направлении; в результате устанавливается расконтрагированный однородный стабилизированный положительный столб.

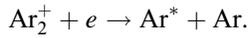
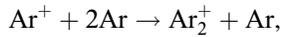
В [2,3] показано, что увеличение интенсивности резонансной акустической волны частотой 190 Hz больше 83 dB в плазменном столбе при повышенном давлении аргона (100 Torr) приводит к образованию в разряде однородного расконтрагированного положительного столба вследствие возникновения в плазменном столбе вихревого движения, перемешивающего плазму по радиусу трубки внутренним диаметром 6 см. Выключение звука в таком разряде вызывает скачкообразную контракцию положительного столба. При этом устанавливается шнурованный плазменный столб, на периферии которого концентрация электронов резко убывает, и формируется инверсная населенность с последующей вспышкой оптического суперлюминесцентного излучения на длине волны $\lambda = 5882 \text{ \AA}$, интенсивность которой увеличивается примерно в 100 раз по сравнению с интенсивностью в стационарном плазменном столбе до выключения звука. На спектре излучения такого разряда отчетливо видно появление четко выраженных спектральных линий с $\lambda_1 = 5888 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5882 \text{ \AA}$, $\lambda_3 = 4876 \text{ \AA}$ [2,3].

Анализ спектрального состава излучения вспышек показывает, что они соответствуют трем переходам энергетических уровней атомарного аргона: $7d-4p$ — длина волны 4876 \AA , $7s-4p$ — длина волны 5888 \AA , $6s-4p$ — длина волны 5882 \AA [2].

В [2,3] приведена диаграмма атомных уровней аргона, из которой следует, что нижний уровень $4p$ связан с $4s$ и сила осцилляторов перехода $4p-4s$ примерно в 100 раз больше вышеуказанных переходов, по этой причине уровень $4p$ быстро опустошается. Вследствие этого может возникнуть инверсная населенность между каждым из уровней $7d$, $7s$, $6s$, с одной стороны, и уровнем $4p$ — с другой. Эта инверсная населенность является причиной возникновения наблюдаемых вспышек.

Рассмотрим процесс образования возбужденных состояний аргона на верхнем лазерном уровне. Известно, что при достаточно высоких

давлениях ($P > 10 \text{ Torr}$) нейтрализация заряженных частиц в плазме происходит посредством диссоциативной объемной рекомбинации [12] электронов и молекулярных ионов. В разряде инертных газов при высоких давлениях ($P > 10 \text{ Torr}$) и относительно низких газовых температурах ($T < 1000 \text{ K}$) преобладают молекулярные ионы. Можно признать, что в рассматриваемых экспериментальных условиях происходят следующие процессы:



Эти процессы выполняются с высокой скоростью и приводят к эффективному формированию возбужденных атомов инертного газа. Известно также, что высоковозбужденные атомы получаются в результате диссоциации молекул электронным ударом [13,14].

Из квантовой теории известно, что атомные уровни, обладающие высокими квантовыми числами ($n \gg 1$), имеют большую продолжительность жизни. Средняя продолжительность жизни t_n зависит от значения главного квантового числа n как $t_n \sim n^4$.

В положительном столбе при контракции разряда формируются потоки, которые направлены в некоторых местах от центра к стенкам трубки и в некоторых местах от стенок к оси. Эти потоки двигают заряженные частицы из области разряда к стенкам и, наоборот, холодные нейтральные частицы — от стенки к оси разряда. Следовательно, в первом случае горячие электроны быстро охлаждаются, главным образом из-за упругих столкновений с холодными атомами. Тогда идет интенсивный рекомбинационный процесс электронов с ионами, и в основном с молекулярными ионами. Аналогичная интенсивная рекомбинация происходит также в местах, где акустические потоки направлены к центру трубки и частицы холодного газа входят в середину разряда, они вызывают интенсивную рекомбинацию. Оказывается, что при таких рекомбинационных процессах, т. е. в течение диссоциативной рекомбинации, интенсивно рождаются высоковозбужденные долгоживущие атомы. Так, в обозначенных местах происходит накопление высоковозбужденных атомов.

В эксперименте заселяются уровни $7s$, $6s$, $7d$. Из-за этого наблюдается увеличение интенсивности излучения от переходов $7s \rightarrow 4p$,

$6s \rightarrow 4p$, $7d \rightarrow 4p$. Что касается вспышек и местоположения их формирования, то это, по всей вероятности, наблюдаемое суперлюминесцентное излучение наступает, когда преодолевается порог перенаселенности для сверхизлучения. Более подробно в [2,3].

В заключение отметим, что суперлюминесцентное излучение в разряде аргона возникает (интенсивность света увеличивается в 100 раз больше, чем до контракции) при выключении интенсивности акустической волны в положительном столбе повышенного давления газа, при которой происходят скачкообразное сжатие разряда и образование инверсной населенности.

Для реализации наблюдаемого эффекта важными являются звуковые колебания, создающие акустическое течение, вызывающее турбулентное перемешивание плазмы по радиусу трубки. Тот же самый эффект может быть вызван вихревыми потоками, генерированными другим способом. Звуковые волны в данном случае в трубке производят изменение плазменной конфигурации с однородного неконтрагированного плазменного столба в контрагированное, вследствие чего образуется инверсная населенность в разряде аргона с последующим суперлюминесцентным излучением. Совершенно аналогичные процессы произойдут в неконтрагированном разряде с турбулентным потоком, направленным вдоль положительного столба при повышенном давлении, если уменьшить скорость потока настолько, чтобы разряд скачкообразно сконтрагировал. В этом случае в разряде аргона образуется аналогичная инверсная населенность с последующей вспышкой суперлюминесцентного излучения. Пристроив к такой разрядной трубке оптический резонатор, реализуется оптический квантовый генератор, управляемый потоком газа.

Следует отметить, что трансформацию неконтрагированного разряда при повышенном давлении в контрагированное состояние возможно производить двумя способами:

1) отключением потока газа, т.е. перекрыть течение на входе и выходе разрядной трубки одновременно, в результате которого произойдет контракция положительного столба с последующей вспышкой суперлюминесцентного монохроматического излучения;

2) уменьшение скорости потока газа выключением, например, одного из двух насосов, подключенных к разрядной трубке (см. рис. 2); при этом произойдет спад скорости потока газа, понизится число Рейнольдса и наступит контракция разряда, сопровождаемого последующей вспышкой лазерного излучения [6,7].

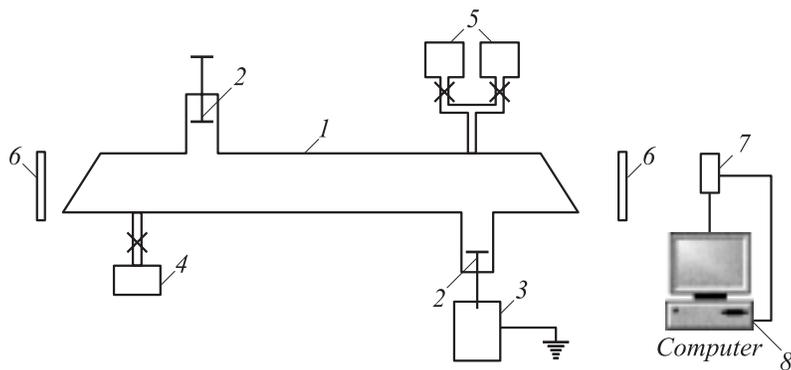


Рис. 2. Схема газоразрядного лазера, управляемого потоком газа: 1 — разрядная трубка, 2 — электроды, 3 — высоковольтный источник питания, 4 — контейнер с газом, 5 — насосы, 6 — зеркала оптического резонатора, 7 — приемник оптического излучения, 8 — компьютер.

На рис. 2 приведена схема газоразрядного лазера, управляемого потоком газа. Для получения однородного неконтрагированного разряда при повышенном давлении скорость потока газа через лазерную трубку должна быть больше 150 m/s . Это зависит от величины давления газа. Чем больше давление в разряде, тем при меньшей скорости газа в трубке может быть достигнуто расконтрагирование положительного столба. Скорость газа можно измерять трубкой Пито или калиброванным контейнером (4). После того как в трубке (1) получен неконтрагированный разряд при повышенном давлении, следует одновременно перекрыть течение газа на входе и выходе трубки, в результате наступит контракция разряда. Разность электрического напряжения на электродах при этом уменьшится, величина тока повысится, следовательно, нет опасности гашения разряда. В разряде аргона образуется инверсная населенность с последующей лазерной импульсной генерацией. Вместо аргона можно подобрать другой газ с соответствующими атомными уровнями, позволяющими создание инверсной населенности. Контракцию неконтрагированного разряда при повышенном давлении можно вызвать также выключением одного из двух насосов (5), подключенных в лазерной трубке. При этом уменьшается число Рейнольдса и положительный столб контрагирует.

Список литературы

- [1] *Справочник по лазерам.* / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 1. М.: Сов. радио, 1978.
- [2] *Арамян А.Р.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 69. В. 5. С. 355–357.
- [3] *Аратуян А.Р.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. N 15. P. 155002-1-155002-4.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [5] *Brown C.O., Devis J.W.* // Appl. Phys. 1972. N 2. V. 21. P. 480–490.
- [6] *Галечян Г.А.* // Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1983. В. 10. С. 73–91.
- [7] *Galechyan G.A.* // Laser Physics. 1994. V. 4. N 1. P. 23–37.
- [8] *Грановский В.Л.* Электрический ток. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
- [9] *Арамян А.Р., Галечян Г.А., Мкртчян А.Р.* // Акустич. журнал. 1991. Т. 37. В. 2. С. 213–231.
- [10] *Арамян А.Р., Галечян Г.А., Мкртчян А.Р.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 1. С. 12–15.
- [11] *Галечян Г.А.* // УФН. 1995. Т. 165. № 12. С. 1357–1379.
- [12] *Елецкий А.В., Смирнов Б.М.* // УФН. 1982. Т. 136. № 1. С. 25–57.
- [13] *Borst W.L., Zipf E.C.* // Phys. Rev. 1971. V. 4. N 1. P. 153–160.
- [14] *Frend R.S.J.* // Chem. Phys. 1971. V. 54. N 12. P. 3125–3127.