

О МЕХАНИЗМЕ ИМПУЛЬСНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СМЕСИ ГЕЛИЙ—КСЕНОН

I. ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ В СМЕСИ ГЕЛИЙ — КСЕНОН

В. Ф. Москаленко, Е. П. Остапченко и В. А. Черников

Рассмотрен механизм генерации в смеси гелий—ксенон в период формирования импульсного разряда.

При формировании импульсного разряда в смеси гелий—ксенон в длинных разрядных трубках он последовательно проходит по крайней мере три фазы развития: несамостоятельный разряд, волна ионизации и сильноточный разряд [1]. При этом несамостоятельный разряд определяется остаточными электронами в послесвечении, волна ионизации сопровождается быстрым (со скоростью 10^8 — 10^9 см/сек.) прохождением процессов прямой электронной ионизации и возбуждения вдоль трубки и образованием положительного пространственного заряда. Вслед за этим развивается сильноточный разряд, возникновению которого предшествует нейтрализация пространственного заряда.

Путем тщательной взаимной корреляции временных характеристик импульсного разряда и его индуцированного и спонтанного излучений можно получить определенное представление о механизме импульсной генерации в смеси гелий—ксенон. Результаты этих исследований излагаются в данной работе.

Исследования проводились на установке, блок-схема которой описана в работе [2]. В работе использовались активные элементы длиной 1000 мм, диаметром 20 мм, наполнявшиеся ксеноном при давлении 0,5, 1 и 10 мм рт. ст. и смесью гелий—ксенон с соотношением компонентов 200 : 1 при общем давлении 60—70 мм рт. ст. Возбуждение, так же как и в работах [1, 2], осуществлялось импульсами отрицательной полярности с помощью внутренних или внешних электродов. Частота повторения импульсов составляла 300—5000 гц, длительность — 0,2÷0,3 мксек., амплитуда напряжения — 24 кв. Генерация осуществлялась на известных атомных переходах ксенона $5p^55d$ — $5p^56p$.

На рис. 1 и 2 представлены осциллограммы импульсов тока и генерации на линии с длиной волны 3,51 мкм (переход $5d [7/2]_3^0$ — $6p [5/2]_2$), полученные при различных амплитудах импульса напряжения как с внутренними, так и с внешними электродами. Для других линий генерации осциллограммы носят аналогичный характер.

При низких напряжениях (рис. 1, а и 2, а) возникает импульс генерации, которому соответствует на осциллограмме импульс тока несамостоятельного разряда. С ростом напряжения амплитуды тока и генерации возрастают. В момент, когда появляется импульс тока волны ионизации, возникает второй, слабый импульс генерации (рис. 1, б, 2, б). С дальнейшим ростом напряжения вместе с передвижением к началу развертки и нарастанием импульса тока волны ионизации в том же направлении продвигается

и возрастает по амплитуде второй импульс генерации, постепенно сливаясь с первым или выравниваясь с ним по амплитуде (рис. 1, *в-г*, 2, *в-д*).

Как видно из осциллограмм на рис. 1, *а-б* и 2, *а-г*, импульсы генерации, соответствующие несамостоятельному разряду и волне ионизации, достигают своего максимума раньше, чем оканчиваются эти фазы разряда, т. е. генерация носит как бы «самоограниченный» характер. При шнуровании разряда, когда возникает сильноточная плазменная фаза разряда, генерация происходит только в отрезок времени, соответствующий току несамостоятельного разряда и волне ионизации (рис. 1, *д* и 2, *е*). Т. е. в смеси гелий—ксенон при больших давлениях и диаметрах активного элемента импульсная генерация может осуществляться только при начальных стадиях формирования импульсного разряда.

«Самоограничение» импульсов генерации во времени связано с изменением во времени заселенностей либо верхнего, либо нижнего уровней. Чтобы установить, какой из этих уровней ответствен за длительность импульса генерации, целесообразно рассмотреть осциллограммы импульсов индуцированного излучения, полученных на линиях 2.026 и 3.68 мкм (соответственно переходы $5d[3/2]_1 - 6p[3/2]_1$, $5d[5/2]_1 - 6p[3/2]_2$), и спонтанного излучения с их нижнего уровня (рис. 3).

Усиление на линиях 2.026 и 3.68 мкм, измеренное методом зондирования излучением вспомогательного лазера, составляло не менее 60 и 20 дБ/м. При таких усилениях заселенность нижнего уровня, как показали измерения [3], обычно более чем на порядок величины меньше заселенности верхнего уровня.

В этих условиях реабсорбция спонтанного излучения на переходах $6p^5 6p - 6p^5 6s$, оцененная по изменению интенсивности излучения при удвоении длины столба разряда [4], практически не изменяла соотношения заселенностей и поэтому в дальнейшем не рассматривалась.

Осциллограммам, приведенным на рис. 3, соответствует импульс тока волны ионизации. Из осциллограмм излучения хорошо видно, что импульс генерации возникает и достигает своего максимума раньше, чем импульс спонтанного излучения. Если учесть, что генерация возникает лишь после достижения пороговой инверсии заселенностей, то окажется очевидным, что возбуждение верхних уровней происходит быстрее нижних. Таким образом, если в непрерывном режиме генерации инверсия заселенностей образуется благодаря различному времени жизни уровней $5p^5 5d$ и $5p^5 6p$ при одинаковой скорости их заселения прямым электронным ударом [3], то в импульсном режиме генерации инверсия заселенностей образуется за счет различной скорости прямого электронного возбуждения этих уровней в течение длительности начальных фаз импульсного разряда. Из рис. 3 видно также, что в момент времени, соответствующий максимуму импульса

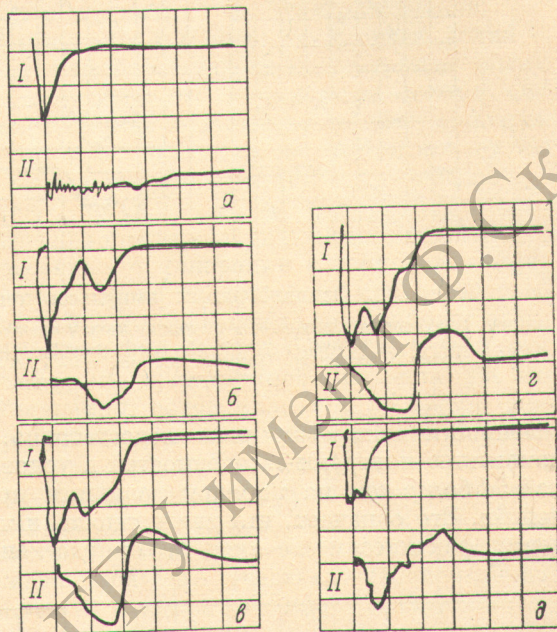


Рис. 1. Осциллограммы импульсов генерации (I) и тока (II).

Внешние электроды (расстояние между электродами 1 м), смесь гелий—ксенон: 200 : 1, давление 70 мм рт. ст., длительность импульса напряжения 2 мксек., развертка 1 мксек./см. Напряжение, кв: *а* — 17, *б* — 18, *в* — 20, *г* — 21.5, *д* — 22, шнур.

спонтанного излучения, его амплитуда приблизительно в два-три раза превышает амплитуду спонтанного излучения, соответствующую по времени максимуму индуцированного излучения. Последующий спад индуцированного и спонтанного излучения происходит почти одновременно. Поскольку амплитуда спонтанного излучения в наших условиях приблизительно пропорциональна заселенности $6p$ -уровней, то изменение этой за-

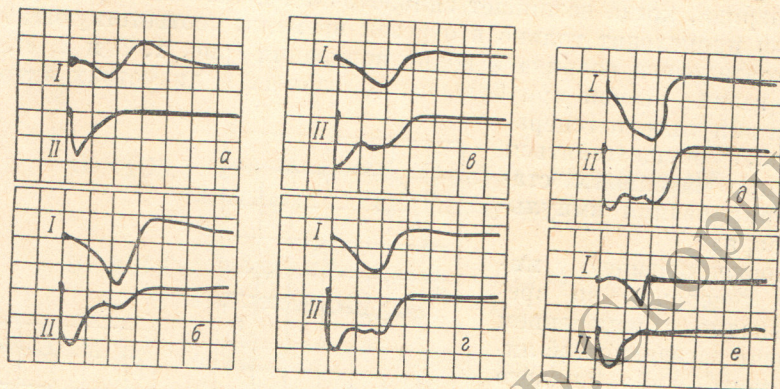


Рис. 2. Осциллограммы импульсов генерации (II) и тока (I).

Внутренние электроды (расстояние между электродами 1 м), смесь гелий—ксенон: 200 : 1, давление 70 мм рт. ст., длительность импульса напряжения 2 мксек., развертка 1 мксек/см. Напряжение, кв: а — 7, б — 8, е — 9.8, з — 10, д — 10.5, е — 11, штур.

селенности в два-три раза недостаточно, чтобы привести к заметному изменению инверсии заселенностей в условиях, когда заселенность уровней $5d$ более чем на порядок величины превосходит заселенность уровней $6p$. Это означает, что длительность импульса индуцированного излучения фактически не зависит от заселенности нижнего уровня, т. е.

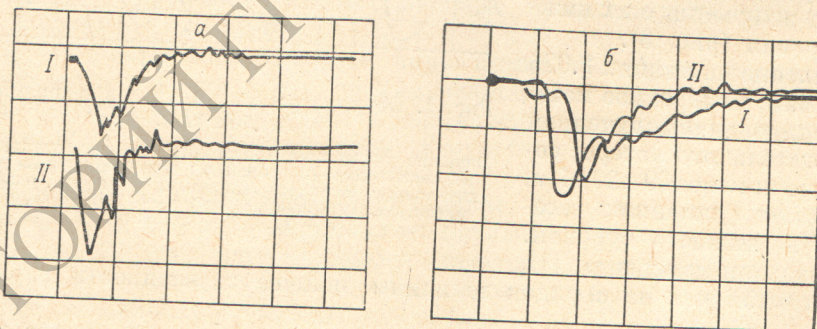


Рис. 3. Осциллограммы импульсов спонтанного излучения (I) и генерации (II).

Смесь гелий—ксенон: 200 : 1, давление 70 мм рт. ст., развертка 0.2 мксек./см. а — импульс генерации (II); $\lambda = 3.68$ мкм, $5d [3/2]_2 - 6p [3/2]_1$; импульс спонтанного излучения (I), $\lambda = 8231, 6 \text{ \AA}$, $6p [3/2]_2 - 6s [3/2]_2$; б — импульс генерации (II), $\lambda = 2.026$ мкм, $5d [3/2]_1 - 6p [3/2]_1$; импульс спонтанного излучения (I), $\lambda = 9162 \text{ \AA}$, $6p [3/2]_1 - 6s [3/2]_1$.

в столбе разряда должны иметь место процессы, ограничивающие во времени заселенность верхних $5d$ -уровней ксенона, определяемую эффективностью возбуждения.

Одним из возможных процессов, способных повлиять на изменение во времени скорости возбуждения уровней $5p^5d$, может явиться релаксация распределения электронов по энергиям при переходе от нестационарного распределения к стационарному. В пользу такого вывода косвенно свидетельствуют результаты исследования функции распределения электронов по энергиям вблизи оксидного катода, показавшие, что число быстрых

электронов зависит от расстояния до катода [5]. За счет неупругих соударений в течение определенного времени происходит сокращение числа быстрых электронов до величины, соответствующей стационарным условиям разряда. При этом уменьшается и скорость возбуждения уровней $5p^55d$, что приводит к исчезновению инверсии заселенностей. Помимо этого возрастает число медленных электронов, соударения с которыми также должны приводить к уменьшению заселенности уровней $5p^55d$ и исчезновению инверсии заселенностей, что подтверждается увеличением спонтанного излучения и тока разряда при срыве генерации [2].

Селективность возбуждения уровней $5p^55d$ относительно нижних уровней $5p^66r$ связана, вероятно, с различным характером зависимости сечений прямого возбуждения этих уровней от энергии электронов.

Рассмотренные особенности импульсной генерации в смеси гелий—ксенон позволяют сделать вывод, что наблюдавшаяся генерация носит явно нестационарный характер, определяемый начальными фазами импульсного разряда. В этот период одной из главных причин образования сильной инверсии заселенностей может оказаться релаксация энергии электронов за счет неупругих соударений при переходе от нестационарного их распределения по энергиям к стационарному. При этом скорость возбуждения верхних уровней выше скорости возбуждения нижних.

Следует отметить еще одну особенность генерации в период формирования импульсного разряда, которая может проявляться при определенных условиях. При наличии нескольких фаз развития разряда более поздние из них могут развиваться, не дожидаясь, когда окончится предыдущая фаза. Это может привести к тому, что длина столба разряда, на которой происходит импульсная генерация, осуществляемая во время ранней фазы разряда, будет ограничиваться развивающейся следом поздней фазой разряда, условия в которой неблагоприятны для генерации. Вследствие этого длительность импульса генерации должна определяться временем прохождения фазы разряда вдоль трубки, при этом генерация может происходить не одновременно по всей длине активного элемента, а на последовательно «перемещающихся» его участках. Причем более «ранние» участки активного элемента, где уже развилась неблагоприятная для генерации фаза разряда, могут оказаться поглощающими, что может стать причиной асимметрии излучения. Возможно, что этими процессами и объясняется отчасти асимметричность импульсного «сверхизлучения», о которой сообщалось, например, в работах [6, 7]. В работе [7], в частности, указывалось, что область усиления локализуется на конце столба разряда длиной всего 20 см, при общей длине разряда 126 см.

Литература

- [1] В. Ф. Москаленко, Е. П. Остапченко, В. А. Черников. Электронная техника, сер. 3. Газоразрядные приборы, в 4, 20, 1970.
- [2] И. Н. Кальвина, В. Ф. Москаленко, Е. П. Остапченко, В. А. Черников. Ж. прикл. спектр., 12, 828, 1970.
- [3] В. Ф. Москаленко, Е. П. Остапченко, В. И. Пугнин. Опт. и спектр., 23, 177, 1967.
- [4] С. Э. Фриш. Оптические спектры атомов. ГИФМЛ, М.—Л., 1963.
- [5] В. Л. Грановский. Электрический ток в газе, т. 1. ГИТТЛ, М.—Л., 1952.
- [6] В. А. Толкачев. Ж. прикл. спектр., 8, 746, 1968.
- [7] В. С. Егоров, Г. А. Шухтин. Опт. и спектр., 26, 515, 1969.

Поступило в Редакцию 10 марта 1971 г.