

03

© 1991 г.

## НЕРЕГУЛЯРНЫЕ СТРАТЫ В НЕОНЕ

## I. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Ю. Б. Голубовский, В. И. Колобов, В. О. Нежучаев, И. Э. Сулейменов

Экспериментально исследован характер стратификации газового разряда при промежуточных давлениях. Показано, что при этих давлениях регулярные страты способны переходить в нерегулярные. Исследованы условия, при которых происходят такие переходы, а также свойства нерегулярных страт.

## Введение

Разряд в инертных газах стратифицирован в широком диапазоне давлений и токов [1]. В последнее время достигнут определенный прогресс в понимании механизма стратификации при различных разрядных условиях. При низких давлениях  $pR \leq 1$  Тор·см и небольших токах  $i/R < 10$  мА/см существует несколько типов страт ( $p$ -,  $r$ -,  $s$ -страты). Количественное сопоставление результатов линейной кинетической теории с экспериментами в неоне проводилось в работе [2]. Стратификация обусловлена кинетическими резонансными эффектами на функции распределения электронов и кинетикой ступенчатой ионизации. При низких давлениях и токах  $i/R \geq 10$  мА/см существует один тип страт, описание которых проводится в рамках гидродинамики с учетом нелинейной зависимости ионизации от концентрации электронов и диффузионной составляющей электронного тока. Построению нелинейной теории страт в рамках гидродинамики посвящены работы [3, 4]. Экспериментальное и теоретическое исследование модуляционной неустойчивости страт в этой области выполнено в работе [5].

При средних давлениях страты в контрагированном столбе представляют собой существенно двумерные образования, распространяющиеся в виде перетяжек токового шнура [6]. Линейная двумерная теория таких страт построена в [7].

В промежуточной области давлений  $10 < pR < 60$  Тор·см систематических исследований страт не проводилось. В работе [8] измерены частоты и скорости волн в коротких разрядных трубках.

Представляет интерес исследование страт в этих условиях, поскольку механизм стратификации в данной области давлений должен отличаться от известных. Оказывается, что характер страт в рассматриваемом диапазоне давлений существенно зависит от длины разрядной трубки. В длинных трубках при малых токах страты, как правило, нерегулярны. Этим, в частности, они отличаются от страт при низких давлениях, которые обычно регулярны. Возникновение нерегулярности страт при низких давлениях может быть связано с нелинейным взаимодействием мод, выделяемых разрядным промежутком как резонатором [9-11], либо с нелинейным взаимодействием различных типов страт ( $p$ -,  $s$ -страт) [12]. Возможны также переходы от регулярных страт к стохастическим при модуляции напряжения на разрядном промежутке внешним сигналом различной частоты [11, 13, 14]. Исследование нерегулярных страт может представлять интерес с точки зрения общего подхода к описанию возникновения стохастичности в системах с распределенными параметрами.

Целью данной работы является систематическое исследование страт в неоне в диапазоне давлений  $10 < pR < 60$  Тор·см. Первая часть работы посвящена экспериментальному исследованию нерегулярных страт в указанном диапазоне давлений.

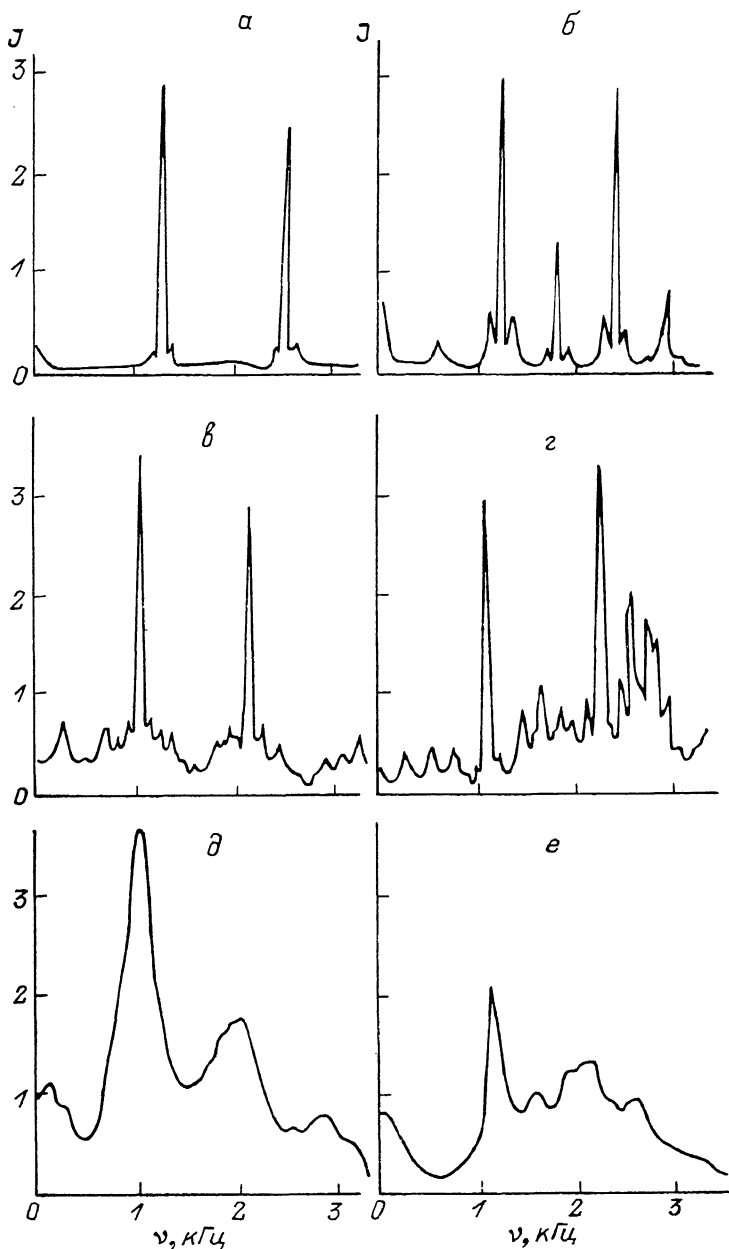


Рис. 1. К процессу стохастизации страт при уменьшении тока. Для а и б  $i=35$ , в и г — 25, д и е — 15 мА.

1. Эксперименты проводились в цилиндрической разрядной трубке радиуса  $R=1.4$  см при варьируемом межэлектродном расстоянии  $L=5-40$  см в диапазоне давлений  $10 < pR < 60$  Тор·см и токов  $5 \leq i \leq 150$  мА. Исследовались радиочастотные спектры потенциала изолированного зонда и интегрального свечения плазмы при регистрации поперек оси разряда (в дальнейшем спектры по электрическому и оптическому каналам). Спектры снимались при помощи спектроанализатора СК-24 в полосах частот от 0 до 4 кГц и от 0 до 20 кГц с рав-

решением от 30 до 150 Гц. Как правило, спектры по электрическому каналу менее регулярны, чем спектры по оптическому. Это связано с тем, что по электрическому каналу наряду с колебаниями поля регистрируются колебания потенциала плазмы как целого. Последние не связаны с изменениями напряженности электрического поля и не вызывают изменений в спектрах по оптическому каналу.

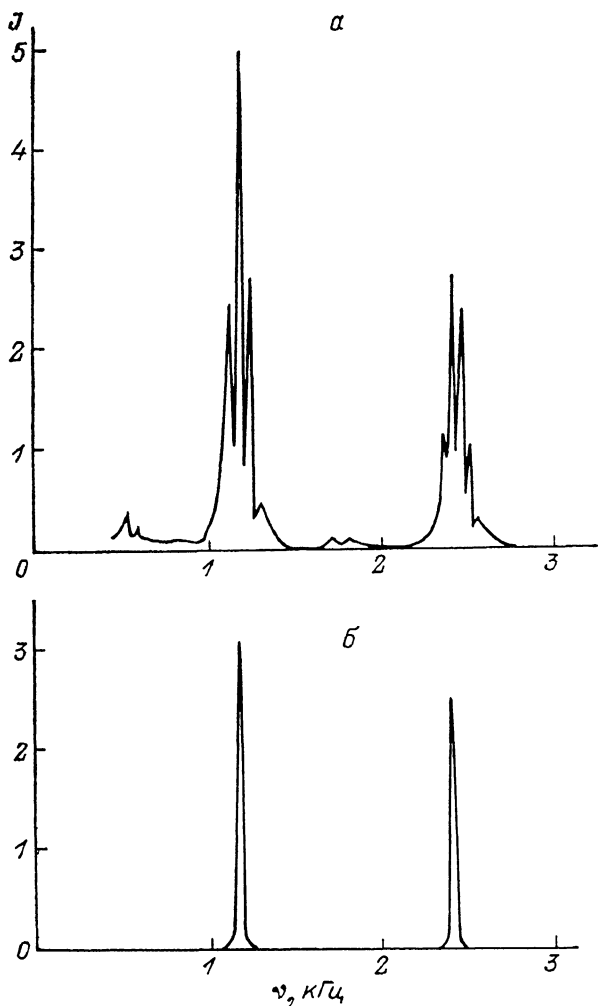


Рис. 2. Сопоставление радиочастотных спектров квазипериодического (а) и регулярного (б) колебаний.

$pR=25$  Тор·см,  $i=8$  мА.

Если при низких давлениях  $pR < 5$  Тор·см в диффузном разряде и при средних давлениях  $pR > 50$  Тор·см в контрагированном разряде страты преимущественно регулярны, то в исследуемом диапазоне давлений страты могут быть как регулярными, так и существенно нерегулярными. При уменьшении разрядного тока наблюдается переход от регулярных страт к нерегулярным, причем с ростом давления граница регулярности смещается в область больших токов. На рис. 1 приведены последовательности спектров по оптическому (а, в, д) и электрическому (б, г, е) каналам, иллюстрирующие рассматриваемый переход при  $pR=27$  Тор·см,  $L=36$  см. При токах  $i > 30$  мА страты регулярны. При уменьшении тока в спектрах появляются комбинационные частоты, а затем происходит существенное уширение пиков, соответствующих основной и кратным гармоникам. При дальнейшем уменьшении тока максимумы, соответствующие

кратным гармоникам, постепенно сглаживаются и исчезают. Граница перехода от регулярных страт к нерегулярным не является ярко выраженной и составляет несколько мА. В переходной области существуют различные квазипериодические режимы, самопроизвольно переходящие друг в друга.

Характер страт зависит от длины разрядного промежутка  $L$ . С уменьшением  $L$  граница области, в которой могут реализоваться регулярные страты, смещается в область больших давлений и малых токов. При малых  $L \leq 10$  см существенную роль играют самопроизвольно возникающие колебания напряжения на разряде. Взаимодействие этих колебаний с электрическим полем бегущей волны приводит к сложной зависимости характера страт от разрядных условий, длины разрядного промежутка, величины балластного сопротивления. Наблю-

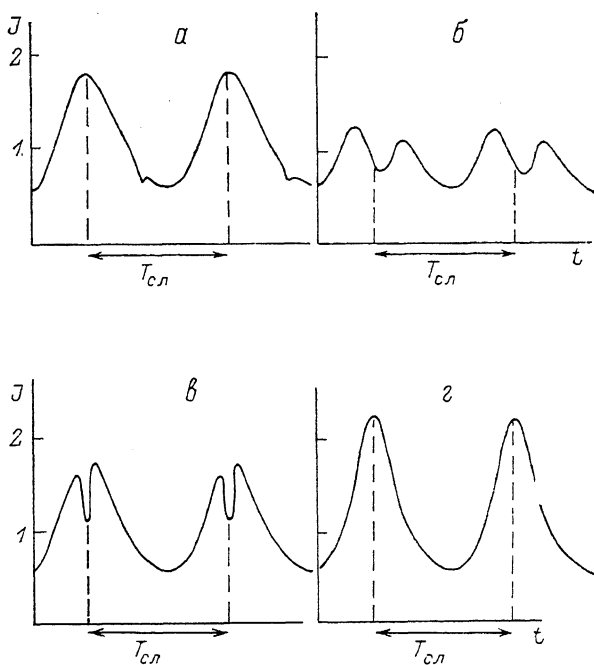


Рис. 3. Влияние модуляции разрядного тока на профили свечения плазмы.

$pR=45$  Тор·см,  $i=40$  мА,  $T_{02}=820$  мкс.

даются явления гистерезисного типа, когда регулярность страт зависит от направления перемещения анода. При малых  $L$  переход от одного колебательного режима к другому может быть вызван незначительным изменением любого из перечисленных выше параметров. Можно реализовать режим, когда полный цикл колебания содержит до 25 страт. Сопоставление спектра квазипериодического режима с кратностью 13 со спектром периодического колебания приведено на рис. 2. Такие квазипериодические режимы, как правило, нестабильны и легко превращаются в нерегулярные.

2. Рассмотрим влияние модуляции тока и напряжения на стратификацию разряда. Отметим, что модуляция разрядного тока способна вызывать расконтрагирование шнура при давлениях выше критического, а также принудительное контрагирование разряда при давлениях ниже критического  $p_{кр}$ . При модуляции разрядного тока имеет место эффект «визуализации» бегущих страт, когда наблюдается расслоение столба на светлые и темные участки, видимые глазом. На рис. 3 приведены осциллограммы интегральной интенсивности свечения плазмы, снятые в светлых (а, г) и темных (б, в) участках. Кривые а, б получены при модуляции тока кратковременным импульсом отрицательной полярности, кривые в, г — при модуляции синусоидальным сигналом. Из рис. 3 видно, что наибольшие изменения интенсивности свечения происходят, когда импульс попадает в максимум свечения страты. При попадании импульса в минимум изменения свечения минимальны. Усреднение во времени и дает видимую глазом кар-

тину расслоения разряда на светлые и темные участки. Синусоидальная модуляция отличается от импульсной большей длительностью действия модулирующего колебания. Поэтому картина визуализации при синусоидальной модуляции выражена более ярко. В этом случае возможна также следующая особенность. Когда минимум модулирующего колебания приходится на максимум интенсивности свечения, последний приобретает характерный «провал». Можно считать, что в этой фазе страты происходит «удвоение» частоты, так как в спектре такого колебания максимальную величину будет иметь вторая гармоника. Рассмотренный эффект имеет место при наложении на разряд внешней модуляции. Однако при малых величинах балластного сопротивления модуляция тока может развиваться самопроизвольно. Этот эффект можно назвать автомодуляцией разряда по току. Возможна также автомодуляция разряда по напряжению, возникаю-

щая, когда на длине разряда укладывается не целое число волн. При этом напряжение на разряде будет изменяться во времени, а величина этого изменения не превосходит половины падения напряжения на длине страты. Такая обратная связь наиболее существенна при малых  $L$ . При больших значениях балластного сопротивления происходит автомодуляция по напряжению, при малых — автомодуляция по току. Рис. 4 иллюстрирует влияние автомодуляции по напря-

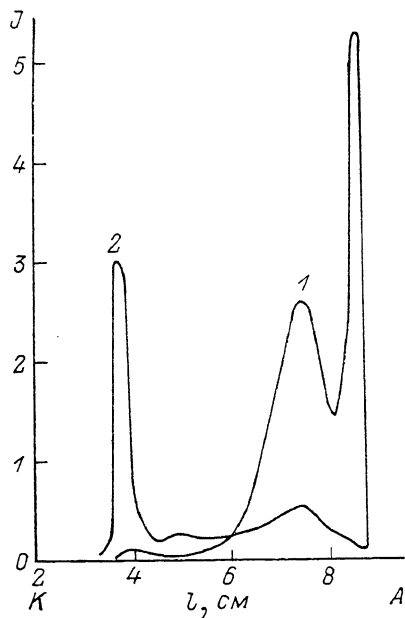


Рис. 4. Пространственные зависимости первой (1) и второй (2) гармоник интенсивности свечения плазмы, иллюстрирующие эффект автомодуляции разряда по напряжению  $i=15$  мА.

жению на профиль свечения страты в различных точках разрядной трубки. На рисунке показана амплитуда первой и второй гармоник оптического канала в зависимости от расстояния до анода. Видно, что в тех точках, где колебания волны и напряжения на разряде синфазны, происходит усиление первой гармоники, а в тех, где эти величины противофазны, — усиление второй. Происходит «удвоение» частоты, аналогичное рассмотренному выше для случая синусоидальной модуляции по току.

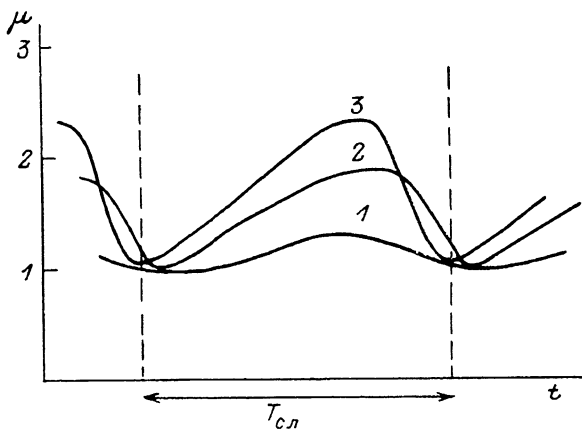


Рис. 5. Профили полуширины интегрального свечения плазмы при различных токах. 1 — 20, 2 — 60, 3 — 100 мА;  $\varphi R=40$  Тор·см.

жению на профиль свечения страты в различных точках разрядной трубки. На рисунке показана амплитуда первой и второй гармоник оптического канала в зависимости от расстояния до анода. Видно, что в тех точках, где колебания волны и напряжения на разряде синфазны, происходит усиление первой гармоники, а в тех, где эти величины противофазны, — усиление второй. Происходит «удвоение» частоты, аналогичное рассмотренному выше для случая синусоидальной модуляции по току.

Известно, что модуляция тока или напряжения разряда влияет на характер страт [15, 16]. Если частота модуляции близка к основной частоте нерегулярных страт, то модуляция приводит к стабилизации нерегулярных страт. Диапазон частот, в котором происходит захват, возрастает с ростом мощности модулирующего колебания. Для прямоугольного сигнала он значительно уже, чем для синусоидального. Однако, как это видно из рис. 3, при модуляции прямоугольными сигналами искажение оптических характеристик происходит только в момент действия импульса. Это позволяет исследовать оптические характеристики в условиях естественных нерегулярных страт. С использованием подобного метода стабилизации получены зависимости полуширины радиального распределения  $S$  интенсивности интегрального излучения плазмы от фазы страты, приведенные на рис. 5. Видно, что страты при малых токах являются одномерными: полуширина интенсивности свечения практически постоянна. Напротив, при больших токах относительные радиальные распределения свечения существенно зависят от фазы страты. Таким образом, по мере увеличения тока происходит переход от одномерных страт к двумерным. При этих же значениях тока происходит и оптическая контракция — сжатие свечения к оси разряда. Максимумы свечения линейчатого излучения и тормозного континуума в двумерных стратах практически совпадают, что указывает на аналогию этих волн со стратами в контрагированном токовом шнуре при средних давлениях. Отличие состоит в различной ширине токового шнура, которая определяется различными механизмами гибели заряженных частиц: либо объемной рекомбинацией, либо гибелью на стенке разрядной трубки.

Таким образом, исследование страт в диапазоне давлений  $10 < pR < 60$  Тор·см показало, что в зависимости от тока существуют два типа волн. При больших токах наблюдаются двумерные регулярные волны, механизм раскачки которых связан со сжатием зоны ионизации и колебаниями радиальных распределений концентрации плазмы. При малых токах имеют место одномерные, как правило, нерегулярные страты. Механизм раскачки этих волн обсуждается во второй части данной работы.

#### Список литературы

- [1] Пекарек Л. // УФН. 1968. Т. 94. № 3. С. 463—500.
- [2] Цендин Л. Д. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 635—649.
- [3] Горелик М. С., Цендин Л. Д. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 4. С. 760—766.
- [4] Кернер Б. С., Осипов В. В. // РиЭ. 1983. Т. 28. № 1. С. 132—142.
- [5] Ohe K., Hashimoto M. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. N 3. P. 822—826. Ibid. Vol. 58. N 8. P. 822—826.
- [6] Голубовский Ю. Б., Некучаев В. О. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 5. С. 858—867. Там же. 1983. Т. 53. Вып. 3. С. 474—487. Там же. Вып. 8. С. 1470—1473.
- [7] Голубовский Ю. Б., Колобов В. И., Цендин Л. Д. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 54—58.
- [8] Coulter J. R. M. // J. Electron. Control. 1960. Vol. 9. N 1. P. 41—61.
- [9] Kraza J., Perkin R. M., Pekarek L. // J. Phys. D. 1974. Vol. 7. N 8. P. 2541—2544.
- [10] Kraza J., Perkin R. M., Pekarek L. // J. Phys. D. 1975. Vol. 8. N 2. P. 161—164.
- [11] Мелехин Г. В., Морозов Д. А., Степанов В. А. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 37—43.
- [12] Grabec I. // Beitr. Plasmaphys. 1972. Bd 12. N 2. S. 55—65.
- [13] Albrecht B., Deutsch H., Leveh R. W. et al. // Proc. ICPIG. XIX. Belgrade, 1989. P. 722—723.
- [14] Александров Е. П., Ланда П. С., Швилкин Б. Н. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 1. С. 120—123.
- [15] Зайцев А. А., Ильинский В. В., Савченко И. А. // РиЭ. 1978. Т. 23. № 4. С. 866—868.
- [16] Ohe K., Takeda S. // Beitr. Plasmaphys. 1974. Bd 14. N 2. S. 55—63.

Ленинградский  
государственный университет

Поступило в Редакцию  
14 июня 1990 г.  
В окончательной редакции  
16 ноября 1990 г.