

- [1] Молчанов В. А., Сошка В. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 5. С. 963.  
 [2] Eckstein W., Verbeek H., Datz S. // Appl. Phys. Lett. 1975. Vol. 27. P. 527—528.  
 [3] Balashova L. L., Dodonov A. I., Firsov O. B. et al. // Rad. Eff. 1983. Vol. 77. P. 67—77.  
 [4] Битенский П. С., Парилус Э. С. // Поверхность. 1985. № 2. С. 25—37.

Тбилисский университет

Поступило в Редакцию  
1 февраля 1991 г.

04

Журнал технической физики, т. 61, в. 12, 1991

© 1991 г.

## САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМНЫЙ РАЗРЯД В ГЕЛИЙ-КАДМИЕВОЙ СМЕСИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

К. А. Гарусов, Ю. Н. Новоселов, Ю. С. Сурков

Для возбуждения лазеров на парах металлов широко применяются самостоятельные разряды низкого давления [1, 2]. Повышение давления рабочей среды позволяет существенно увеличить энергетические параметры генерируемого излучения (см., например, [3]), а кроме того, реализовать рекомбинационный механизм накачки [4, 5]. В связи с этим представляет интерес изучение объемных разрядов в смесях паров металла с газами высокого давления. В настоящей работе исследуются характеристики самостоятельного разряда в плотной HeCd смеси, в которой при возбуждении электронным пучком осуществлена лазерная генерация на ряде переходов иона кадмия [6]. Целью проводимых исследований являлось определение режимов объемного горения разряда с высоким уровнем энерговыклада и получение соответствующих спектров люминесценции паров кадмия.

### Экспериментальная установка

Конструктивное исполнение разрядной камеры поясняется рис. 1, на котором приведены ее разрез и схема электрического питания разряда. Корпус 1 разрядной камеры, выполненный из нержавеющей стали толщиной 1.5 мм, представляет собой цилиндр, заглушенный с торцов охлаждаемыми водой фланцами. На фланцах расположены смотровые окна, штуцера для откачки и напуска газа, высоковольтные разъемы для питания системы предыонизации. Камера в зоне разряда нагревалась с помощью внешнего нагревателя 2 до температуры 300—500 °С, контролируемой терморпарой типа ТПП. В корпус камеры врезан отвод 3, на котором размещен проходной изолятор 4. На нем закреплены катододержатель 5, накопительная батарея конденсаторов С и тригатронный разрядник Р. Емкость батареи С изменялась от 3.3 до 4.7 нФ, ее зарядное напряжение  $U_0 = 3—12$  кВ. Проходной изолятор охлаждался проточной водой, подаваемой в каналы 6—8. Причем для обеспечения электрической развязки катододержателя от земли при импульсном разряде батареи С подвод воды в канал 6 осуществлялся через свернутый в виде соленоида гибкий диэлектрический шланг. Токоввод, соединяющий охлаждаемый катододержатель 5 и нагреваемый катод 9, изготовлен из двух стальных полос толщиной 1.0 мм.

Давление гелия, напускаемого в холодную камеру, во всех опытах составляло 1 атм. Пары кадмия создавались при испарении расположенных внутри камеры кусочков металла. Для предотвращения попадания паров на проходной изолятор в отводе 3 устанавливались керамические экраны 10.

Разрядный промежуток длиной 1 см образован электродами 9, 11. Исполни-

зовались круглые электроды с диаметром плоской части 1,2 см. Предыонизация межэлектродного зазора осуществлялась импульсным барьерным разрядом с поверхности кварцевых трубок 12, внутри которых размещался высоковольтный электрод 13. Для повышения интенсивности барьерного разряда кварцевые трубки охвачены заземленным электродом 14 с продольной прорезью, на краях которой происходило усиление поля. Питание барьерного разряда осуществлялось импульсами напряжения 20—60 кВ, 100 нс, поступающих от кабельного генератора по каналам I, II. Запуск разрядника P осуществлялся импульсами 20 кВ, 20 нс по каналу III от другого кабельного генератора. Синхронизация моментов срабатывания разрядника и системы предыонизации обеспечивалась генератором импульсов ГИ-1.

Индуктивность разрядного контура, измеренная в опыте короткого замыкания, составляла 320 нГн. Регистрация импульсов напряжения и тока разряда осуществлялась с делителя напряжения  $R_1R_2$  и низкоомного шунта  $R_3$  осциллографом С8-14. При определении напряжения на разряде учитывалось изменяющееся во времени падение напряжения на индуктивности разрядного контура. Интегральное свечение промежутка снималось на пленку РФ-3 фотоаппаратом «Зенит», спектры люминесценции разряда в диапазоне длин волн 250—650 нм фиксировались спектрографом ИСП-30. Относительная интенсивность спектральных линий определялась фотометрированием.

### Режимы объемного горения разряда

Объемный разряд в HeCd смеси формировался при любых сочетаниях параметров  $C$ ,  $U_0$  и температуры среды  $T$ , перечисленных выше. Однако было замечено, что наличие паров кадмия в разрядном объеме снижает требования к интенсивности источника предыонизации, задаваемой напряжением горения вспомогательного разряда. В HeCd смеси минимальное импульсное напряжение, подаваемое на барьерный разряд, при котором еще происходило формирование объемного разряда в основном промежутке, было существенно ниже, чем в чистом гелии. Так, в смеси минимальное напряжение равно 25 кВ, а в гелии — 40 кВ. Это свидетельствует об эффективном появлении на стадии формирования иницирующих электронов в результате фотоионизации металлической примеси, обладающей существенно меньшим потенциалом ионизации, чем гелий. Определенную роль в формировании объемного разряда, вероятно, играет процесс пеннинговской ионизации атомов кадмия возбужденными атомами гелия в развивающихся электронных лавинах [7]. Влияние временной задержки между импульсом предыонизации и моментом подачи напряжения на зазор в диапазоне  $10^{-8}$ — $10^{-5}$  с не обнаружено.

Анализ осциллограмм тока и напряжения разряда, а также визуальные наблюдения свечения в межэлектродном промежутке позволили выявить характерные особенности объемного горения разряда. На рис. 2 представлены зависимости плотности тока разряда  $j$  и напряжения на делителе  $U$  от времени и соответствующие фотографии свечения зазора при различных температурах. Здесь емкость  $C=4.7$  нФ, зарядное напряжение  $U_0=4$  кВ. В связи с большой индуктивностью разрядного контура время горения разряда составляет сотни наносекунд.

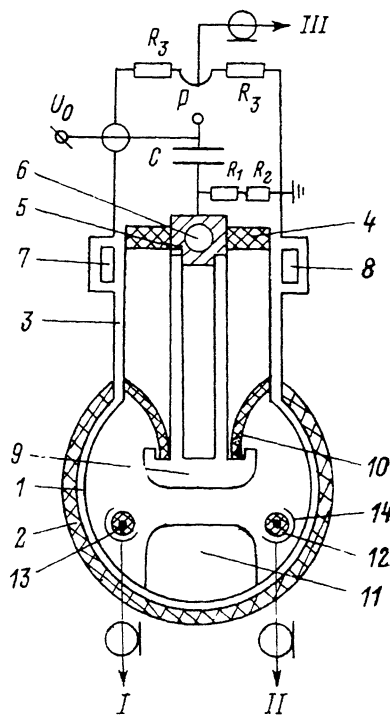


Рис. 1. Схема установки для исследования разряда.

При температуре среды 320 °С, соответствующей парциальному давлению шаров кадмия 0.1 Тор, в промежутке наблюдается равномерное свечение разряда, плотность тока не превышает 12 А/см<sup>2</sup>, а длительность объемной стадии составляет более 1.4 мкс и обусловлена полным разрядом накопительной емкости (рис. 2, а). Увеличение температуры среды до 340 °С вызывает появление на катоде яркого плазменного образования, к которому привязан диффузный

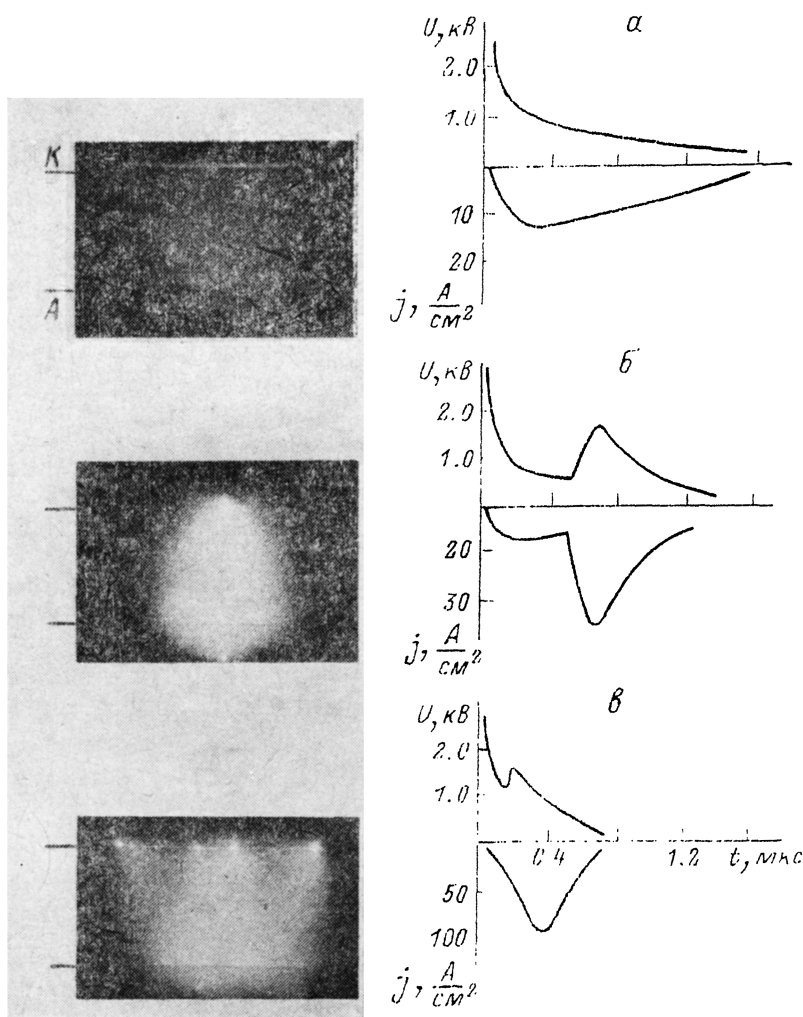


Рис. 2. Плотность тока разряда  $j(t)$ , напряжение  $U(t)$  и интегральное свечение промежутка.  $T, ^\circ\text{C}$ : а — 320, б — 340, в — 370.

столб (рис. 2, б). Появление катодного пятна и диффузного канала сопровождается быстрым нарастанием плотности тока и соответствующим выбросом в осциллограмме напряжения, обусловленным падением напряжения на индуктивности электрической цепи. Дальнейшее повышение температуры приводит к возникновению новых катодных пятен и формированию большого числа диффузных каналов (рис. 2, в). Плотность тока возрастает до 100 А/см<sup>2</sup> и время разряда накопительной емкости сокращается. Подобная динамика разряда наблюдается и при фиксированной температуре среды, но при увеличении напряжения  $U_0$ .

Таким образом, в горении объемного разряда в HeCd смеси можно выделить два режима: слаботочный, при котором отсутствуют неоднородности в столбе, и сильноточный с катодными пятнами и диффузными каналами. Характерным для разряда является то, что в отличие от молекулярных газов здесь при воз-

никновении катодного пятна не происходит формирования искрового канала [8], а рост плотности тока обеспечивается наличием большого числа перекрывающихся диффузных каналов. Аналогичный тип разряда ранее наблюдался в Ar и смесях Ar—SF<sub>6</sub> при иницировании электронным пучком [9, 10] или ультрафиолетовым излучением [11].

Сильноточный режим горения разряда в плотной HeCd смеси позволяет реализовать на объемной стадии высокие значения удельной выкладываемой энергии. Так, при  $C=33$  нФ и  $U_0=10$  кВ реализуется колебательный режим разряда с максимальной плотностью тока 2.5 А/см<sup>2</sup>, с длительностью объемного горения до 2 мкс и удельным энерговыделом свыше 1.0 Дж/см<sup>3</sup>. Подобные характеристики разряда получены и в Ar [9-11].

В HeCd смеси высокого давления, так же как и в Ar, после возникновения катодного пятна не происходит развития контрагированного канала. Это обусловлено малой величиной напряженности электрического поля вблизи катодного пятна. В сильноточной стадии разряда напряженность поля в промежутке не превышает 1 кВ/см. В этих условиях увеличение поля вблизи неоднородности на катоде не вызывает заметного роста интенсивности ударной ионизации. Схожесть динамики зажигания, временных и энергетических характеристик разряда в Ar и HeCd смеси позволяет заметить, что сильноточный диффузный разряд характерен для атомарных газов и их смесей.

На рис. 3 приведены зависимости сопротивления разряда  $R$  от времени при различных значениях зарядного напряжения и  $C=14$  нФ,  $T=460$  °С. Кривая 1 соответствует режиму горения с 1—2 катодными пятнами. С ростом  $U_0$  число катодных пятен увеличивается, соответственно растет количество диффузных каналов, однако величина сопротивления  $R(t)$  изменяется незначительно (кривые 2—4). Оценки, проведенные для условий рис. 3 при концентрации электронов  $\sim 10^{15}$ — $10^{16}$  см<sup>-3</sup>, показывают, что проводимость разряда близка к спицевой. Для зависимости 4 установившееся значение проводимости равно  $4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , величина спицевой проводимости 5.8—6.5  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ .

Спектры излучения паров кадмия в объемном разряде фиксировались при трех значениях температур среды  $T$ : 320, 380 и 460 °С. Они содержат большое число ионных и атомарных линий, в основном тех же, что и в [12], где исследовалась люминесценция паров кадмия при возбуждении плотной HeCd среды продуктами ядерной реакции  $\text{He}^3(n, p)^3\text{T}$ . Авторами [12] получено монотонное возрастание интенсивности ионных линий (кроме бейтлеровских) с ростом температуры в интервале 320—450 °С. В наших опытах при повышении  $T$  было замечено снижение интенсивности ионных линий, а также атомарных линий, отвечающих переходам из высоковозбужденных состояний. При изменении режима горения разряда от слаботочного к сильноточному спад интенсивности ионных линий выражен наиболее резко.

Переходы из высоковозбужденных уровней атома кадмия, таких как  $10s$ ,  $9s$ ,  $8d$ , сопровождаются ярковыраженными комбинационными полосами. С повышением температуры интенсивность этих полос, как и соответствующих линий, снижается. При фиксированной температуре наблюдается снижение интенсивности переходов  $n^3S-5p^3P$  и  $n^3D-5p^3P$  с ростом квантового числа  $n$ .

По относительным интенсивностям линий спектра в предположении локального термодинамического равновесия была оценена температура электронов. Для  $T=320, 380$  и  $460$  °С она оказалась равной 1.4, 0.9 и 0.6 эВ соответственно.

Уменьшение температуры электронов с ростом концентрации кадмия в разряде свидетельствует об обеднении функции распределения электронов по энергиям энергетичными электронами. Это подтверждается поведением интенсивности свечения ионных линий кадмия, механизм заселения верхних уровней которых обусловлен как возбуждением электронным ударом, так и столкновением

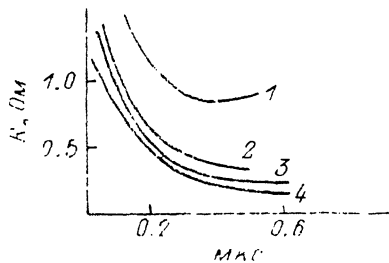


Рис. 3. Зависимость сопротивления объемного разряда от времени.

$U_0$ , кВ: 1 — 4, 2 — 6, 3 — 7, 4 — 8.

с ионами или метастабильными гелия. В сильноточном режиме разряда интенсивность ионных линий, на которых получена лазерная генерация [6], ниже, чем в слаботочном. Это связано с уменьшением эффективности процесса перезарядки ионов гелия на атомах кадмия и пеннинговской ионизации кадмия, являющихся основными каналами заселения верхних лазерных уровней CdII [2, 6]. Использование для накачки ионного HeCd лазера сильноточного разряда высокого давления не может привести к существенному увеличению энергетических характеристик лазера, поскольку в этом режиме низка температура электронов.

Таким образом, в работе обнаружены два режима устойчивого объемного горения самостоятельного разряда в плотной гелий-кадмиевой среде. Показано, что переход в сильноточный режим обусловлен возникновением катодных пятен и последующим заполнением межэлектродного зазора диффузными каналами, проводимость которых близка к спицевой. Такой переход сопровождается снижением температуры электронов и уменьшением интенсивности ионных линий кадмия. Сопоставление характеристик сильноточного разряда в Ag и HeCd смеси свидетельствует об общности процессов их формирования.

### Список литературы

- [1] Солдатов А. Н., Соломонов В. И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 151 с.
- [2] Иванов И. Г., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
- [3] Артемьев А. Ю., Бабейко Ю. А., Бахтин О. М. и др. // Квантовая электрон. 1980. Т. 7. № 9. С. 1948—1954.
- [4] Butler M. S., Piper J. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42. N 12. P. 1008—1010.
- [5] Butler M. S., Piper J. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 9. P. 823—825.
- [6] Горюнов Ф. Г., Держиев В. И., Жидков А. Г. и др. // Квантовая электрон. 1989. Т. 16. № 10. С. 2039—2046.
- [7] Кралин В. В., Фирсов К. Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 11. С. 89—92.
- [8] Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 255 с.
- [9] Бычков Ю. И., Королев Ю. Д., Месяц Г. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 21. С. 1121—1125.
- [10] Бычков Ю. И., Королев Ю. Д., Месяц Г. А. и др. // Изв. вузов. Физика. 1978. № 7. С. 72—81.
- [11] Козырев А. В., Королев Ю. Д., Месяц Г. А. и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 4817—4822.
- [12] Копай-Гора А. П., Мавлютов А. А., Мелькевич А. И., Саламата Б. С. // ЖТФ. 1989. Т. 67. Вып. 3. С. 526—532.

Институт электрофизики  
Екатеринбург

Поступило в Редакцию  
28 января 1991 г.

09

Журнал технической физики, т. 67, в. 12, 1991

© 1991 г.

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ В СПИНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ. I

Л. С. Корниенко, С. Д. Петрова, Р. М. Умарходжаев

Необходимость анализа воздействия флуктуаций в спиновом генераторе обусловлена тем, что шумы являются одним из факторов, определяющих точностные характеристики приборов квантовой магнитометрии и гиromетрии, основой которых является спиновый генератор.

Анализ технических флуктуаций в спиновом генераторе (СГ) с оптической накачкой, выполненный в работе [1], показал, что выбором коэффициента пере-