

МОЩНЫЙ САМОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОДОЛЬНЫЙ РАЗРЯД МУЛЬТИАТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

П.А.Бохан, Д.Э.Закревский

*Институт физики полупроводников СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 25 мая 1995 г.

Осуществлен и исследован мощный импульсно–периодический продольный разряд мультиатмосферного давления в смесях гелия с парами металлов. Показано, что пар металла как контролирующая ионизацию примесь (КИП–вещество) обеспечивает функционирование однородного разряда в трубке большого диаметра (~3 см) по крайней мере до давления смеси 5 атм и погонной мощности возбуждения ~25 кВт/м. Полученный разряд применен для накачки мощных ионных лазеров на парах металлов.

1. В связи с открытием лазеров в последние 25–30 лет физика газовых разрядов претерпевает бурное развитие по широкому фронту направлений. Имеется в виду, с одной стороны, развитие физики мощных (десятки и сотни киловатт) непрерывных разрядов, применяемых для накачки ионных лазеров и функционирующих при низких давлениях газа (менее 100 Па) [1,2], с другой, – исследования физики разрядов высокого давления (более 1 атм) с большим энерговкладом в одиночном импульсе ($E \geq 1$ Дж/см²) [3–6]. Считается, что проблема создания мощных лазеров высокого давления является, скорее, проблемой организации разрядов, чем поиска рабочей среды [7].

В данном сообщении мы приводим результаты по наблюдению и изучению разряда еще одного типа — мощного импульсно–периодического продольного разряда мультиатмосферного давления, пригодного для возбуждения лазеров. Наиболее интересным и перспективным свойством такого разряда является его внутренняя способность сохранять объемный (неконтрагированный) характер

в трубках большого диаметра при высоких давлениях и больших погонных мощностях накачки. В какой-то мере данный разряд объединяет достоинства разрядов, функционирующих при существенно различных условиях [1,2] и [3-6].

2. Импульсно-периодический разряд с большой средней мощностью в основном используется для накачки лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов, средняя мощность генерации которых достигает сотен ватт при эффективности $1\div 3\%$ [8-10]. Сохранение условий для возбуждения генерации при увеличении средней погонной мощности накачки достигается в них за счет ускорения процессов рекомбинации в межимпульсном интервале путем введения молекулярных примесей, например водорода [11], развития внутренней поверхности трубы [9] или использования соединений металлов с электроотрицательными газами [8,10].

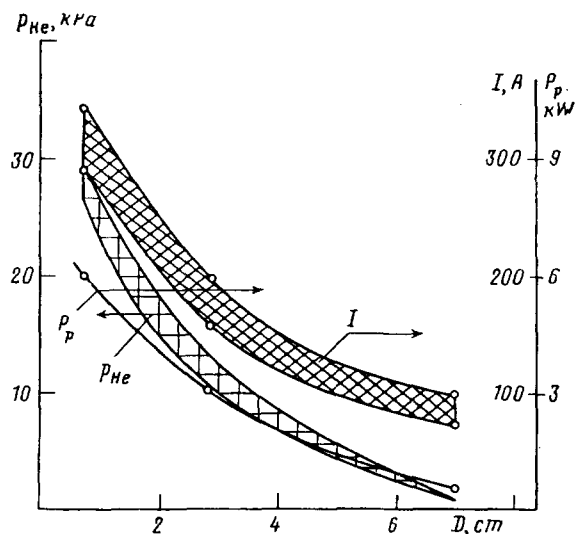


Рис.1 Зависимости предельных для функционирования объемного разряда в гелии: давления газа p_{He} , погонной мощности P_p , амплитуды тока I от диаметра трубы D

Как непрерывный, так и импульсно-периодический продольный разряд подвержен контракции при росте любого характерного параметра, например, диаметра трубок d , давления газа p_{He} , погонной мощности накачки P , амплитуды тока I в импульсном или среднего тока в непрерывном режиме и т.д. На рис.1 приведены полученные в данной работе результаты, которые дают представление о резком сужении области существования объемного неконтрагированного разряда в гелии при увеличении диаметра трубки. Основной причиной, приводящей к контракции продольного разряда, является ионизационно-перегревная неустойчивость [11].

3. Кардинальное изменение свойств импульсно-периодического разряда должно вызывать введение легкоионизируемой примеси. В уточнение обычно используемого [13-15] мы понимаем под этим термином примесь с существенно меньшим потенциалом ионизации, чем основной газ. Например, в смеси гелия со стронцием (рабочая среда рекомбинационного лазера He-Sr⁺) или с европием (рабочая среда столкновительного лазера He-Eu⁺) потенциалы ионизации компонент смеси различаются более чем в 4 раза. Оптимальное рабочее давление паров металла в этих лазерах составляет ~ 10 Па при да-

влении гелия ~ 1 атм. В этих условиях действие ионизационно-перегревной неустойчивости может быть полностью нейтрализовано.

Механизм подавления заключается в следующем. Любое локальное изменение концентрации электронов N_e происходит за счет ионизации атомов металлов. Тем самым характер радиального распределения плотности электронов определяется распределением атомов пара металла. При достижении $N_e \sim N_a$ (N_a – исходная концентрация атомов металла) дальнейший рост тока через газоразрядную трубку может осуществляться только за счет расширения разряда на все поперечное сечение или за счет многократной ионизации атомов металла. Потенциал уже двухкратной ионизации значительно выше, чем однократной (для стронция, соответственно, 11 эВ и 5,7 эВ), а функция распределения электронов по энергиям при высоких давлениях сильно обеднена быстрыми электронами [16]. Поэтому можно предполагать, что рост тока через трубку будет происходить не за счет нелинейного роста концентрации электронов в узком проводящем канале (контрагирование разряда), а наоборот, за счет расширения разряда на те области, где N_e понижена. Таким образом, разряд самостабилизируется, противодействуя развитию ионизационно-перегревной неустойчивости. Априори ясно, что действие рассматриваемого механизма расконтрагирования должно сохраняться при любых разумных значениях диаметра трубки, давления основного газа и тока разряда.

4. Эксперименты проводились со смесью He–Eu в трубке из окиси бериллия диаметром 2,7 см с цилиндрическими электродами из танталовой фольги, прилегающими к внутренней стенке трубки. Межэлектродное расстояние составляло 15 см. Трубка заключалась в металлический кожух, заполняемый азотом до несколько более высокого давления, чем рабочее. Эта предосторожность позволяла проводить эксперименты при давлении смеси до ~ 10 атм и температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$. Возбуждение проводилось при разряде емкости $C = 16,3$ нФ через трубку и тиратрон при частотах следования импульсов накачки $1 \div 10$ кГц.

Контроль однородности разряда по сечению трубки проводился: 1) визуально, 2) измерением распределения по сечению трубки интенсивности спонтанного излучения (интегрального и отдельных линий), 3) измерением поперечного распределения мощности генерации лазерного излучения на линии $\lambda = 1,0019$ мкм иона европия. Эксперименты велись в основном при условиях, когда мощность генерации лазера была максимальна. Диапазон исследованных давлений гелия – от порогового для генерации $p_{\text{He}} \approx 0,3$ атм до $p_{\text{He}} \approx 5$ атм. В этих условиях неконтрагированный разряд осуществляется только при введении в трубку пара металла. Характер разряда заметно различается при давлении до $1,2 \div 1,3$ атм и выше этого. При $p_{\text{He}} \leq 1,3$ атм объемный разряд существует как при пониженных давлениях паров европия (вплоть до порогового для возникновения генерации, $p_{\text{Eu}} \sim 1$ Па), так и при повышенных (до исчезновения генерации и выше). При $p_{\text{He}} > 1,3$ атм пороговая для поддержания объемного разряда концентрация атомов европия начинает быстро возрастать. Растет также и оптимальное для генерации давление паров Eu (рис.2), а также напряжение, необходимое для поддержания разряда.

В отличие от разрядов до атмосферного давления [17] обнаружилось, что пороговым для сохранения разряда объемным является не только давление паров металла, но и частота следования импульсов накачки F . В частности,

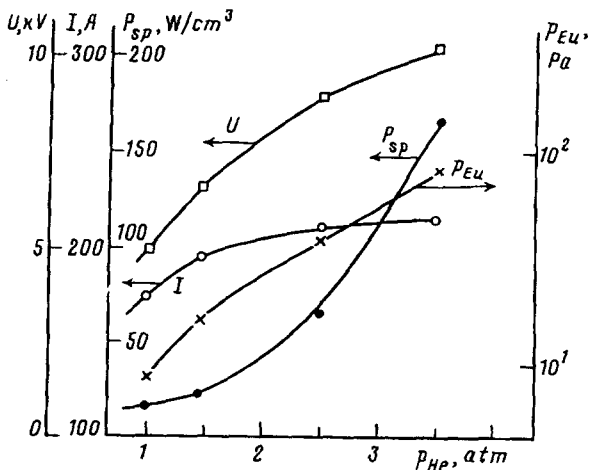


Рис.2. Зависимости удельной мощности квазинепрерывной генерации лазера P_{sp} , оптимального давления паров европия p_{He} , импульсных напряжения U , тока I от давления гелия p_{He} .

при $p_{He} \approx 3,5$ атм разряд становится неустойчивым и появляются признаки контрагирования при $F \leq 1$ кГц. С увеличением p_{He} совместный рост частоты, напряжения и тока (рис. 2) приводит к неизбежному увеличению вкладываемой погонной мощности (до ~ 25 кВт/м) и перегреву трубки. В используемой конструкции перегрев вызывает рост давления паров европия выше оптимального и срыв генерации при $p_{He} > 5$ атм. Однако объемный характер разряда при этом сохраняется.

5. Проведенные эксперименты показывают, что предположение о возможности самостабилизации разряда мультиатмосферного давления, сформулированное в п.3, справедливо. Таким образом, фактически мы можем рассматривать такой разряд как происходящий в пару металла пониженного давления, и в этом смысле он аналогичен мощным разрядам типа [1,2] в однокомпонентных газах.

Разряды высокого давления типа приведенного в [4–6], в том числе и с так называемой легкоионизируемой примесью [13–15], весьма чувствительны к форме электродов, уровню средней и импульсной мощности накачки и т.д. В отличие от них, несколько неожиданным оказалось, что разряд с КИП-веществом является принципиально мощным, то есть он самостабилизируется только при высоком уровне средней и импульсной мощности возбуждения. Мы считаем, что в условиях, когда не принято никаких мер по организации однородного электрического поля на электродах, необходимость использования большой мощности накачки (другими словами, высокой частоты следования импульсов) диктуется тем, что для сохранения разряда объемным дополнительно необходима существенно неполная рекомбинация плазмы в межимпульсном интервале. Этим он противоположен импульсно-периодическому разряду, рассмотренному в п.2. Мы связываем это с тем, что остаточная N_e (фактически это плотность электронов предыонизации в терминах [3–6]) должна превышать уровень, необходимый для быстрого перекрытия электронных лавин на стадии развития разряда [18].

6. Исследованный разряд, сохраняя свой объемный характер при давлении много выше атмосферного и больших мощностях накачки, также является "хорошим" (well-behaved [3]) и по более строгому критерию, а именно, по

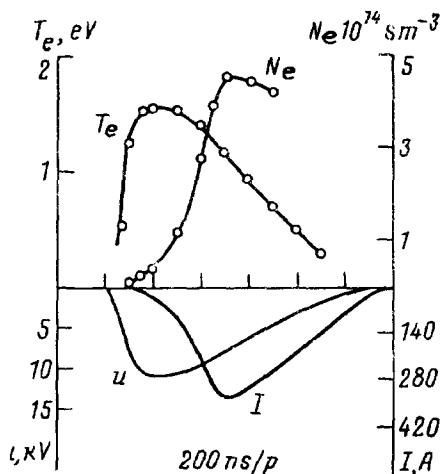


Рис.3. Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока, временные зависимости электронной плотности N_e и температуры T_e при $p_{He} \approx 3,5$ атм

пригодности для возбуждения генерации на ионных переходах атомов металла. На рис.2 демонстрируется быстрый рост удельной мощности квазинепрерывной генерации He-Eu⁺-лазера от давления гелия. На рис.3 показаны временные зависимости основных параметров импульса возбуждения и генерации при $p_{He}=3,5$ атм. Из рисунков видно, что условия для возбуждения квазинепрерывной генерации сохраняются в широком диапазоне изменения давления гелия.

Совокупность перечисленных особенностей разряда, резко отличающих его от других, позволяет предложить для него отдельное название. По своей физической сущности это разряд с контролирующей ионизацию примесью, или по аббревиатуре, КИП-разряд. В английском варианте идентичные по звучанию термины KEEP-discharge и KEEP-admixture также правильно выражают сущность процесса самостабилизации разряда.

1. Г.Н.Алферов, В.И.Донин, Б.Я.Юршин, Письма в ЖЭТФ **18**, 629 (1973).
2. S.A.Babin, V.I.Donin, and A.E.Kuklin, J. Phys. D: Appl. Phys. **24**, 7 (1991).
3. K.V.Perrsson, J. Appl. Phys. **36**, 3086 (1965).
4. Н.Г. Басов, Э.М. Беленов, В.А. Даниличев и др., Письма в ЖЭТФ **14**, 421 (1971).
5. А.Р. Сорокин, Письма в ЖТФ **11**, 1378 (1985).
6. Г.А. Месяц, Ю.Д. Королев, УФН **148**, 101 (1986).
7. Ю.П.Райзер, Физика газового разряда, М.: Наука, 1987.
8. В.Ф.Елаев, Г.Д.Лях, В.П.Пеленков, Оптика атмосферы **2**, 1228 (1989).
9. J.J.Chang, C.D.Boley, M.W.Martinez et al., Proceeding of SPIE **2118**, 2 (1994).
10. D.R. Jones, A.Maitland, and C.E.Little, IEEE J. of Quantum Electr. **30**, 2385 (1994).
11. П.А.Бохан, В.И.Силантьев, В.И. Соломонов, Квант. Электр. **7**, 1264 (1980).
12. G.Ecker, W. Kröll, and O. Zöller, Phys.Fluids **7**, 2001 (1964).
13. A.A.Kruthoff, and F.M.Penning, Physica **4**, 430 (1937).
14. K.L.Schriever, Appl. Phys. Lett. **20**, 354 (1972).
15. V.V.Apollonov, G.G.Baitsur, A.V.Ermashenko et al., JOSA **B8**, 220 (1991).
16. J.J.Lowke, A.V. Phelps, and B.W. Irvin, J. Appl. Phys., **44**, 4664 (1973).
17. Л.М.Букшпун, Е.Л.Латуш, М.Ф.Сэм, Квант. Электр. **9**, 1762 (1988).
18. В.Н.Карнюшин, А.М.Малов, Р.И. Солоухин, Квант. Электр. **5**, 575 (1978).