

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

04:07;12

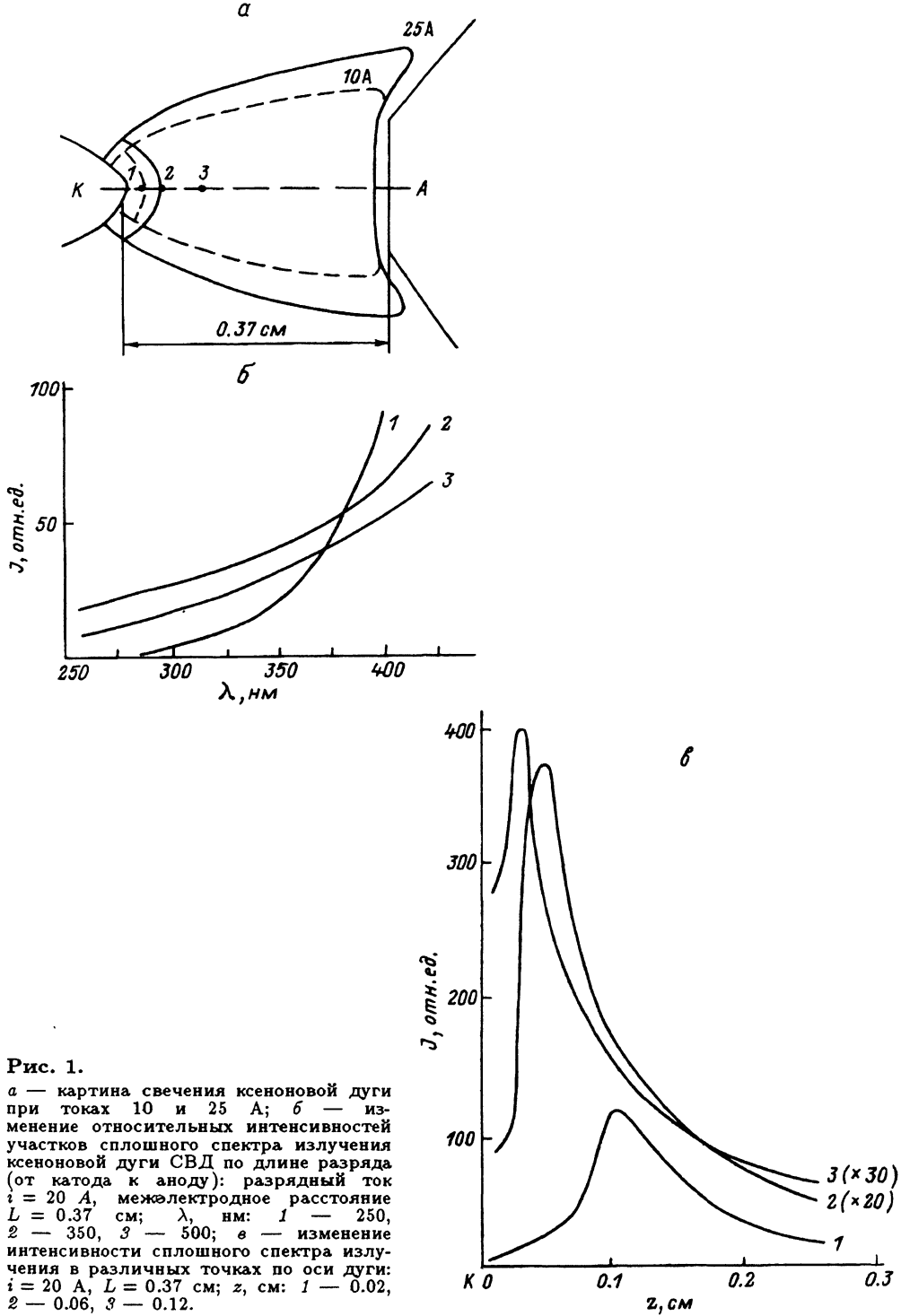
Журнал технической физики, т. 62, в. 12, 1992

© 1992 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОДУГОВОГО РАЗРЯДА  
СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В КСЕНОНЕ  
1. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ***Д.А.Дубнов, О.М.Каплий, В.М.Миленин, Н.А.Тимофеев*

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию оптических характеристик короткодугового разряда в ксеноне при сверхвысоком давлении (СВД) (давление  $\gtrsim 10$  атм) и является первой в предполагаемом цикле работ. В завершенном виде, как нам представляется, эти работы позволят дать достаточно полную картину явлений и процессов, определяющих физические свойства плазмы разряда СВД в ксеноне, и адекватно описать ее теоретически. Данные работы будут включать в себя результаты экспериментального изучения плазмы при стационарном и нестационарном (импульсно-периодическом) способах питания разряда, теоретическое описание, включающее в себя рассмотрение роли электродов, что весьма важно, поскольку данный разряд стабилизируется электродами, а не стенками, результаты исследования оптических характеристик данного разряда, так как он широко используется в качестве мощного источника излучения в широкой области спектра (включая УФ и ИК), и изучение возможности совершенствования указанных источников света. В первой работе обсуждаются результаты спектроскопических исследований плазмы и закладывается экспериментальная основа для моделирования короткодугового разряда.

Геометрия разряда и области свечения плазмы для двух различных токов приведены на рис. 1,а. Межэлектродное расстояние составляет 0.1–0.5 см и много меньше расстояния до стенок колбы (1–3 см). Разряд стабилизируется электродами, при этом катод представляет собой конус, изготовленный из торированного вольфрама, а анод —цилиндр со сферической или усеченной конусообразной рабочей поверхностью, который изготавливается из чистого или торированного (для малых мощностей) вольфрама. Вблизи катода существует яркое пятно, которое авторами ряда работ [1,2] связывается с максимальным значением температуры плазмы в этой области. Этот, казалось бы, естественный вывод влечет за собой и предположение о максимуме концентрации электронов и интенсивности ультрафиолетового и интегрального по спектру излучения в прикатодной области. Однако проведенные нами исследования



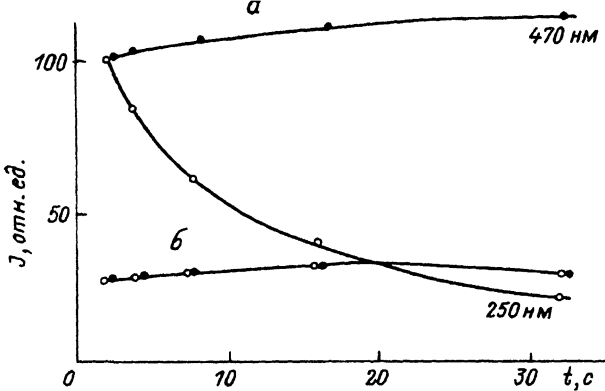


Рис. 2. Изменение приведенных относительных интенсивностей участков сплошного спектра излучения ксеноновой дуги СВД по мере развития разряда ( $i = 15$  А).

заставляют усомниться в сложившейся на сегодняшний день картине процессов, определяющих свойства плазмы вблизи катода короткодугового ксенонового разряда.

На рис. 1, в приведены результаты измерения интенсивности излучения плазмы как функции расстояния от катода разряда на нескольких длинах волн: 250, 350 и 500 нм. Измерения проводились поперек оси разряда в стандартных дуговых ксеноновых лампах сверхвысокого давления КЛэСВД мощностью 250 и 500 Вт, при этом пространственное разрешение было не хуже  $0.05 \times 0.05$  мм. Давление ксенона составляло 10 и 20 атм в нерабочем состоянии. Из рисунка видно, что с уменьшением длины волны максимум излучения смещается в сторону анода и для  $\lambda = 250$  нм он находится примерно на границе между пятном и основным телом разряда. В наших условиях в УФ и в видимой областях спектра излучение носит в основном рекомбинационно-тормозной характер [3], поэтому увеличение доли ультрафиолетового излучения должно свидетельствовать о росте температуры плазмы (заметим, что в наших условиях излучение сплошного спектра практически не поглощается в объеме разряда). Следовательно, можно утверждать, что температура плазмы в пятне разряда меньше температуры на границе пятна. Подобный вывод был сделан для короткодугового разряда в аргоне [4,5]. Этот вывод подтверждается и непосредственными измерениями спектра излучения в УФ области, результаты которых приведены на рис. 1, б. Измерения, проведенные в различных точках на оси разряда (эти точки указаны на рис. 1, а), показывают увеличение доли ультрафиолетового излучения с приближением к границе пятна, что свидетельствует и о росте температуры.

Полученное несовпадение максимумов температуры и интегральной по спектру яркости излучения плазмы может быть объяснено, с нашей точки зрения, только одним — присутствием вблизи катода легкоионизируемой добавки, снижающей температуру плазмы, увеличивающей концентрацию электронов и ионов и, таким образом, увеличивающей интенсивность рекомбинационно-тормозного излучения. В пользу такого предположения свидетельствует и развитие разряда во времени. На рис. 2 приведено изменение вблизи катода (а) и анода (б) относительных интенсивностей участков сплошного спектра излучения ксеноновой дуги СВД по мере развития разряда во времени. После зажигания дуги интенсивность у катода вблизи  $\lambda = 250$  нм уменьшается с характерным временем порядка 10 с. Интенсивность вблизи максимума излучения ( $\lambda = 470$  нм)

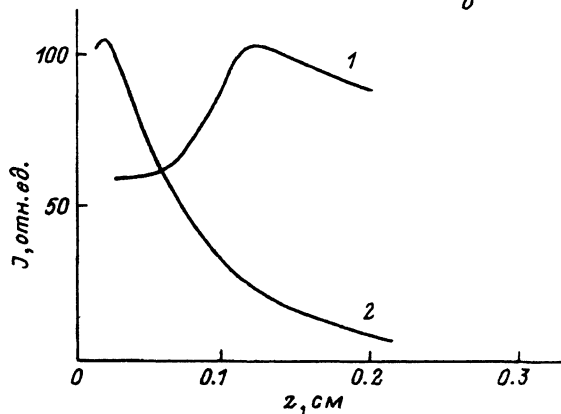
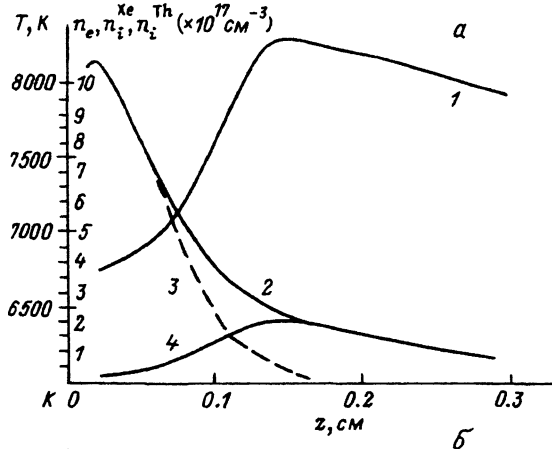


Рис. 3. Расчет изменения температуры дуги (1), концентрации электронов (2) и ионов тория (3) и ксенона (4) (а) и изменение приведенных относительных интенсивностей участков сплошного спектра вдоль оси дуги от катода к аноду (б) при  $\lambda = 250$  (1) и 550 нм (2).

и интенсивности вблизи анода изменяются во времени весьма слабо. Наблюдаемое характерное время уменьшения УФ излучения у катода совпадает по порядку величины с временем нагрева катода  $\tau_k$ , которое легко можно оценить из уравнения теплопроводности [3]  $\tau_k \sim R^2 \rho c_p / \chi$ , где  $R$  — характерные размеры катода,  $\rho$  — плотность,  $c_p$  — теплоемкость,  $\chi$  — коэффициент теплопроводности материала катода (вольфрам). По мере нагрева катода растет поток атомов, эмиттируемых катодом в разрядный промежуток, что приводит к снижению температуры плазмы и интенсивности УФ излучения.

Легкоионизируемой добавкой, влияющей на прикатодную область, могут быть атомы вольфрама (потенциал ионизации атомов вольфрама  $I^W = 7.98$  эВ [6]) и тория ( $I^{Th} = 6.1$  эВ [6]), который присутствует в материале катода. Однако потоки атомов вольфрама и тория при рабочих температурах катода (2500–2800 К) отличаются на  $\sim 4$  порядка в пользу тория [7], поэтому следует ожидать, что именно атомы тория определяют физические свойства плазмы в катодном пятне.

Качественно картина физических процессов, протекающих в прикатодной области дуги, выглядит следующим образом. По мере установления тока дуги происходит нагревание катода и соответственно увеличивается поток атомов тория в прикатодную область. Атомы тория,

диффундируя на сторону анода и попадая в область более высоких температур, практически полностью ионизируются. После этого баланс числа ионов тория в разряде определяется, с одной стороны, диффузионным разлетом ионов, а с другой стороны, дрейфом в электрическом поле, возвращающим торий на катод. При этом концентрация ионов тория уменьшается достаточно быстро и растет роль ионов основного газа (ксенона), так что вне пятна свойства разряда полностью определяются ксеноном.

Эти соображения были использованы нами при построении модели плазмы короткодугового разряда в ксеноне при СВД. Подробно моделирование разряда будет описано в последующих публикациях; здесь же мы воспользуемся лишь некоторыми результатами расчетов. На рис. 3 приведены результаты расчета изменения температуры дуги, концентрации ионов тория и ксенона, изменение относительных интенсивностей УФ и видимой части спектра вдоль оси дуги от катода к аноду. Из рисунка видно, что в прикатодной области благодаря присутствию атомов тория концентрация электронов значительно превышает концентрацию электронов в точке максимума температуры, где в основном присутствуют атомы ксенона. Указанное изменение характеристик плазмы приводит к соответствующему изменению интенсивностей, которое хорошо согласуется с тем, что получено в эксперименте.

В заключение можно сделать следующие основные выводы. Характеристики дуги СВД в ксеноне в прикатодной области определяются в существенной мере атомами примеси (тория), эмиттированной катодом. В результате этого температура плазмы вблизи катода имеет меньшее значение, чем в области, где основную роль играют атомы ксенона. Присутствие легкоионизируемой добавки приводит к росту концентрации заряженных частиц и увеличению интенсивности рекомбинационно-тормозного электрон-ионного излучения. При этом доля ультрафиолетового излучения заметно меньше той, что наблюдается в области вне прикатодного пятна. Уменьшение тока дуги и увеличение давления ксенона в лампе приводят к уменьшению области дуги, контролируемой атомами тория, — максимум температуры приближается к катоду, пятно становится ярче и уменьшается в размере. Таким образом, существование яркого прикатодного светящегося пятна связано не только с контракцией дуги у катода, но в значительной степени и с наличием большой концентрации ионов тория, эмиттированных катодом.

### Список литературы

- [1] *Гоухберг Д.А.* // Светотехника. 1957. № 6. С. 15–21.
- [2] *Рабинович Г.И., Шуманов В.С.* // Светотехника. 1973. № 6. С. 6–9.
- [3] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 590 с.
- [4] *Мечев В.С., Ерошенко Л.Е.* // ТВТ. 1972. Т. 10. № 5. С. 926–930.
- [5] *Etemadi V., Zhae C.Y., Mostaphimi J.* // J. Phys. D. 1989. Vol. 22. N 11. P. 1692–1696.
- [6] *Корлисс Ч., Бозман У.* Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М.: Мир, 1968. 562 с.
- [7] *Дэшмэн С.* Научные основы вакуумной техники. М.: ИЛ, 1950. 642 с.

С.-Петербургский  
университет

Поступило в Редакцию 9 декабря 1991 г.  
В окончательной редакции 30 апреля 1992 г.