

ОБЪЕМНЫЙ РАЗРЯД ЕМКОСТНОГО ТИПА В SF₆

*Е.П.Бельков, П.Н.Дашук, Г.Л.Спичкин,
Е.К.Чистов, С.Л.Кулаков*

Основной особенностью элегаза и элегазовых смесей является существенно нелинейная зависимость частот ионизации и прилипания от напряженности электрического поля в области порогового значения E_i , при котором осуществляется ионизационно-прилипательное равновесие. Именно при напряженности электрического поля $E \approx E_i$ происходит поддержание тока и ввод энергии в объемный разряд в квазистационарной фазе; изменение (отклонение) в локальной области разрядного промежутка напряженности электрического поля от E_i лишь на 10% ведет к изменению плотности тока разряда в данной области почти в 2 раза за время $\sim 10^{-9}$ с, что может приводить к развитию неустойчивости. Вследствие высоких сечений фотопоглощения в ВУФ и УФ спектральных диапазонах и быстрого тушения возбужденных атомов на молекулах электроотрицательных газов равномерная фотоионизация газа во всем газовом объеме затруднена. Экспериментальные данные исследований объемного разряда в электроотрицательных газовых средах показывают, что зарождение неустойчивостей, приводящих к контрагированию разряда, чаще всего происходит в приэлектродных областях [1,2], поэтому очевидна необходимость изменения каким-либо образом условий на границах "плазма-электрод".

Перспективным способом стабилизации объемного разряда представляется покрытие электродов диэлектрическими барьерами. Целью настоящей работы являлось определение экспериментальным и расчетным путем ряда электрофизических характеристик емкостного разряда, в частности в SF₆, позволяющих судить о роли покрытий на электродах в процессе стабилизации разряда.

Экспериментальные исследования по формированию разряда проводились в SF₆ в диапазоне давлений 5–25 кПа. Электроды камеры покрывались барьерами, выполненными из титаносодержащей керамики, расстояние между барьерами $D = 0.5-2.8$ см. Объемный разряд возбуждался импульсом напряжения униполярной формы при разряде конденсатора емкостью 5500 пФ, заряженного до напряжения 30–45 кВ. Скорость нарастания напряжения на электродах

объемного разряда $5 \cdot 10^{12} \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$, волновое сопротивление разрядного контура 9.3 Ом.

Поперечная структура разряда регистрировалась электронно-оптическим преобразователем. Оптические исследования показали, что в первые несколько наносекунд после пробоя промежутка разряд представляет собой совокупность отдельных диффузных каналов, далее происходит резкое увеличение их числа и взаимное перекрытие. Однородная структура емкостного разряда сохраняется в течение всей длительности протекания тока $\sim 10^{-7}$ с. Осциллографические исследования показали, что разряд формируется на фронте импульса напряжения с коэффициентом перенапряжения, меняющимся с давлением газовой среды в пределах 2–20. Спад напряжения на разрядном промежутке до величины $\sim E; D$ происходит за время не более 1 нс. Нарастание тока объемного разряда вызывает увеличение падения напряжения на разрядном промежутке, которое при тех же плотностях тока значительно превосходит падение напряжения на разряде между металлическими электродами. Так как в газах с сильно выраженными электроотрицательными свойствами падение напряжения на столбе зависит практически только от давления, то эта разница в падениях напряжения на разряде должна быть отнесена к катодному слою. Например, при давлении 10 кПа и плотности тока $100 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ падение напряжения на катодном слое емкостного разряда 5–15 кВ (рис. 1) и примерно на порядок превосходит ту же величину при разряде между металлическими электродами. Применение объемного разряда с чисто диэлектрическими барьерами в прикладных целях, например для возбуждения импульсных газовых лазеров, несмотря на удовлетворительный удельный энерговыход в разряд $\sim 0.1 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3}$ и на ряд преимуществ таких схем (простота, отсутствие необходимости в предыонизации, высокая однородность возбуждения среды), не является достаточно эффективным, так как из-за потерь энергии в катодном слое и энергии, необходимой для зарядки емкости барьеров (рис. 2) коэффициент передачи энергии из накопителя в столб объемного разряда емкостного типа обычно не превышает $\sim 30\%$. Устранение этого существенного недостатка возможно при использовании барьеров на основе титаната бария, легированного редкоземельными полупроводниковыми элементами [3]. Такие керамические барьеры обладают относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx (2 - 4) \cdot 10^3$ и удельным объемным сопротивлением $\rho = 10^1 - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Эксперимент показал, что как и для барьеров, выполненных из чистого бария, в данном случае катодные и анодные пятна вблизи по-

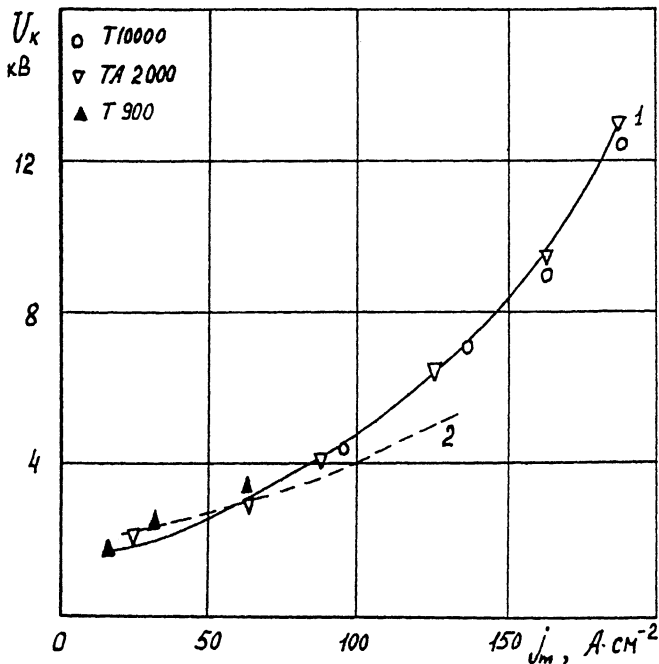


Рис. 1. Зависимость падения напряжения на катодном слое от плотности тока в SF_6 . $P = 10^4$ Па, $D = 1$ см, 1 — эксперимент, 2 — расчет при $\gamma = 10^{-5}$.

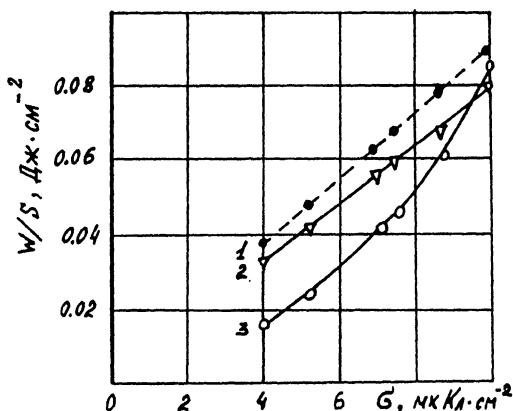


Рис. 2. Зависимости энерговыделений в столб заряда (1), в катодном слое (2) и энергии, переданной в емкость барьеров (3), отнесенные к единице площади разрядного промежутка, от величины протекшего заряда.

Газ — SF_6 , $P = 10^4$ Па, $D = 1$ см, $S = 7.5$ см².

верхности полупроводниковых керамических барьеров отсутствуют, а высокая однородность разряда сохраняется в течение всей длительности протекания разрядного тока ~ 0.15 мкс.

Вследствие незначительного активного сопротивления полупроводниковых керамических барьеров потери в них невелики — 10–15% от энергозапаса разрядного контура. Катодное падение напряжения на разряде с такими барьерами в период основного энерговыделения не превышает 1 кВ. Все это позволяет иметь коэффициент передачи энергии из накопителя в столб разряда на уровне 60–85%, что в 2–3 раза выше коэффициента передачи в разряде с чисто диэлектрическими барьерами при аналогичных условиях эксперимента.

Благодаря высокой пропускной способности таких барьеров по току ($j=10^2-10^3$ А·см⁻²) в период ввода основной доли энергии в разряд до момента контрагирования удается вложить энергию, в 2–5 раз превышающую энергокладды в разряд между металлическими электродами и составляющую 0.2 – 0.3 Дж·см⁻³ при давлении SF₆ 10–15 кПа.

Высокие значения удельных энергокладов и КПД схем возбуждения обуславливают эффективное использование объемного разряда, стабилизированного полупроводниковыми керамическими барьерами, в устройствах возбуждения импульсных газовых лазеров; при использовании таких барьеров получены весьма высокие характеристики SF₆-H₂ лазера: энергия генерации 0.3–0.5 Дж при КПД лазера 2–3% [3].

Данные, полученные в ходе экспериментов, в частности, по возбуждению разряда с чисто диэлектрическими барьерами в SF₆, сравнивались с результатами расчетов по одномерной модели, которая объединяла уравнения электрической цепи, уравнения баланса для электронов, положительных и отрицательных ионов и уравнение непрерывности тока в разрядном промежутке. Расчеты показали, что напряжение на катодном слое и его характерный размер существенно зависят от граничных условий на диэлектрике, покрывающих катод. В качестве граничных условий использовались соотношения для ион-электронной эмиссии — кинетической или потенциальной с коэффициентом $\gamma = 0-10^{-2}$ [4]. Наилучшее соответствие с экспериментальными результатами достигается в расчетах с коэффициентом потенциальной эмиссии $\gamma = 10^{-5}$, при этом ток столба замыкается ионным током в катодном слое (рис. 3). Режим пробоя катодного слоя, рассматриваемый в работе [5], не реализуется (плотность электронов в катодном слое $\sim 10^{14}$ м⁻³). Характерный размер катодного слоя 0.05–0.1 мм, напряженность

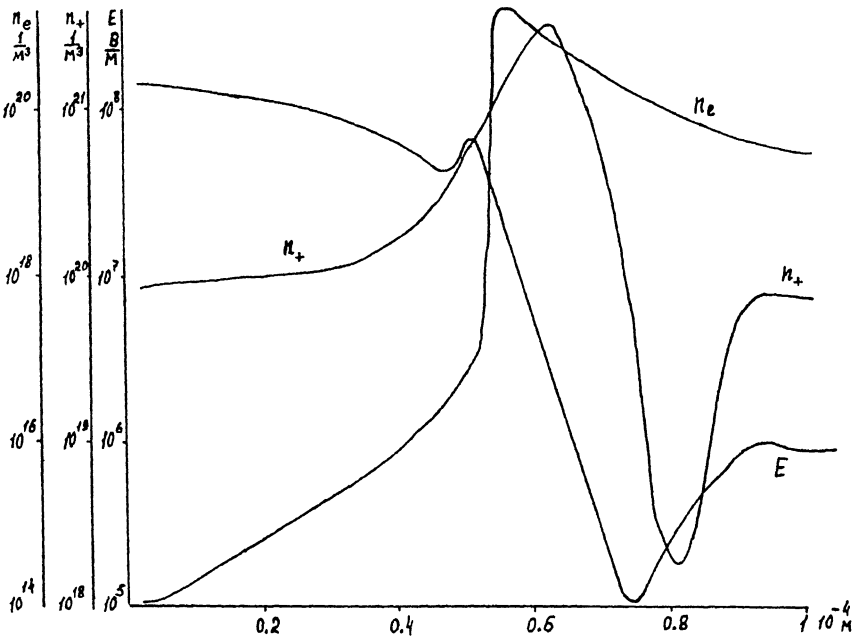


Рис. 3. Параметры плазмы в катодном слое.

n_e — концентрация электронов и положительных ионов, E — напряженность поля в катодном слое, $P = 10^4$ Па, $t = 30$ нс, $j = 128$ А · см⁻², $\gamma = 10^{-5}$.

поля в катодном слое до 10^8 В/м ($P = 10^4$ Па), время формирования катодного слоя 2–3 нс.

Таким образом, к стабилизирующим факторам, присущим разряду емкостного типа, кроме очевидных (отсутствие катодных и анодных пятен вблизи поверхности раздела “плазма-диэлектрик” и ограничения тока разряда емкостью барьеров), может быть также отнесено ограничение тока разряда активным сопротивлением катодного слоя, включенным последовательно с сопротивлением столба разряда, а также поток ускоренных до энергии в несколько кэВ электронов и сопутствующее ему мягкое рентгеновское излучение, обеспечивающие дополнительную интенсивную ионизацию газа в столбе объемного разряда в течение всего импульса разрядного тока. По-видимому, совокупность указанных факторов и определяет высокую однородность разряда емкостного типа, что позволяет надеяться при соответствующем поиске оптимальных материалов барьеров, обладающих повышенной пропускной способностью по току, на его эффективное применение в целом ряде электрофизических устройств.

Список литературы

- [1] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэлектронные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. С. 225.
- [2] *Спичкин Г.Л.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 10. С. 1923-1932.
- [3] *Бельков Е.П., Бурцев В.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 5. С. 278-281.
- [4] *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. С. 578.
- [5] *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н.* // Физика плазмы. 1987. Т. 13. В. 4. С. 471-479.

Санкт-Петербургский
государственный технический
университет

Поступило в Редакцию
17 августа 1993 г.
