

О МЕХАНИЗМЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ Н-ГЕКСАНА В МИКРОННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

В. Ф. Климкин

Введение

Зависимости пробивной напряженности от расстояния между электродами имеют практическое значение. Наблюдается увеличение электрической прочности жидкостей, наиболее резко проявляющееся в зазорах $\lesssim 50$ мкм [1]. Данный факт неоднократно привлекался для поддержки модели пробоя, основанной на эмиссии электронов из катода и образовании лавины электронов в жидкости за счет ударной ионизации. С позиций электронного механизма повышение пробивной напряженности определяется тем, что фактор усиления лавины αd , где α — коэффициент ионизации, d — длина промежутка, должен достигать определенной величины, как при стримерном пробое в газах [2].

Высокоскоростные оптические исследования электрического пробоя н-гексана в квазиоднородном поле показали, что электрический разряд имеет сложный характер и развивается или с катода, или с анода в зависимости от напряженности поля [3]. Установлено влияние длины разрядного промежутка на границы механизмов пробоя [4]. Развитие этих исследований является важным для выяснения механизма увеличения электрической прочности жидкостей в микронных промежутках.

В данной работе приводятся результаты оптических и статистических исследований импульсного электрического пробоя н-гексана в промежутках длиной 10–150 мкм.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка, методика измерений и условия эксперимента аналогичны описанным в [4]. Контроль за длиной разрядного промежутка осуществлялся по анализу картины дифракции Фраунгофера с помощью автоматизированной системы на базе микроЭВМ “Электроника-60”.

На рис. 1 представлены зависимости времени запаздывания пробоя в н-гексане от напряженности поля при различных расстояниях между электродами. Каждая точка получена в результате усреднения 100–150 измерений. Черточки показывают выборочное стандартное отклонение. Горизонтальные штриховые линии справа соответствуют квазистатическому пробивному полю. Анализ результатов показывает, что характер вольт-секундных характеристик определяется существованием и конкуренцией различных механизмов пробоя. Изменение их границ в зависимости от расстояния между электродами показано в таблице. В переходной области пробой осуществляется разрядами и с катода, и с анода. При меньших напряженностях поля пробой осуществляется разрядами с катода, при больших — разрядами с анода. Из результатов исследований следует, что увеличение пробивного поля (квазистатического) при уменьшении расстояния между электродами происходит в условиях

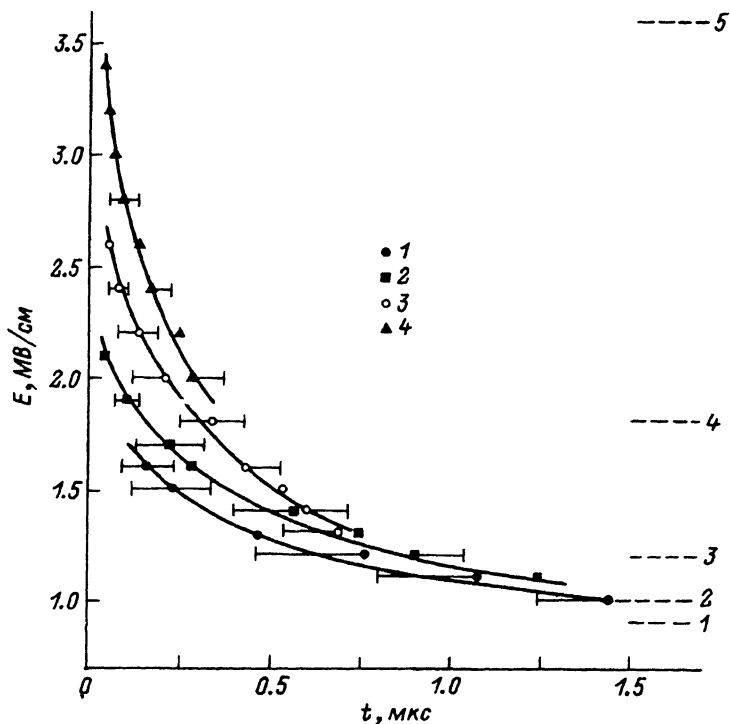


Рис. 1. Зависимость времени запаздывания пробоя в н-гексане от напряженности поля при различных расстояниях между электродами. 1 — 150, 2 — 100, 3 — 50, 4 — 25 мкм.

“пузырькового” механизма пробоя с катода. При этом основные ионизационные процессы, приводящие к развитию электрического разряда, протекают в парогазовой фазе. Таким образом, ударная ионизация в самой жидкости не может быть привлечена для объяснения этого факта.

d , мкм	β	Пробой с катода		Пробой с анода		Переходная область, $\frac{MB}{CM}$
		E , $\frac{MB}{CM}$	$E_{кр}$, $10^2 \frac{MB}{CM}$	E , $\frac{MB}{CM}$	$E_{кр}$, $10^2 \frac{MB}{CM}$	
12	42			3.6	1.5	
25	65	1.8	1.17	2.1	1.4	2.1–3.0
50	90	1.2	1.08	1.7	1.5	1.7–2.3
100	110	1.0	1.1	1.4	1.5	1.4–1.7
150	135	0.9	1.2	1.1	1.5	1.1–1.3

Смещение границ механизмов пробоя в сторону более высоких напряженностей поля (меньших длительностей воздействия напряжения) с уменьшением межэлектродного расстояния приводит к различному характеру влияния внешнего давления на электрический разряд. На рис. 2 приведены зависимости среднего времени запаздывания пробоя

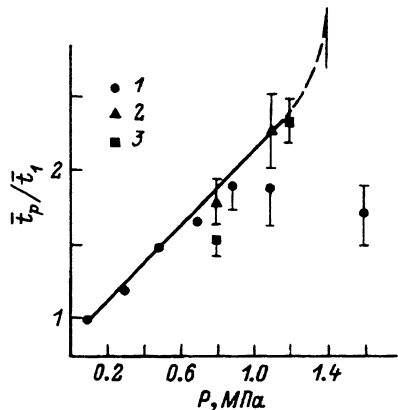


Рис. 2. Зависимость относительного времени запаздывания пробоя в *n*-гексане от внешнего давления.

\bar{t}_1 — среднее время запаздывания пробоя при атмосферном давлении.

E , мВ/см: 1 — 2.1, 2 — 2.3, 3 — 3.1;

d , мкм: 1 — 100, 2 — 50, 3 — 25;

\bar{t} , нс: 1,3 — 50, 2 — 80.

в *N*-гексане от давления при различных расстояниях между электродами в наносекундном диапазоне. Как установлено ранее [5], зависимость 1 на рис. 2 обусловлена существованием и конкуренцией двух различных механизмов пробоя с анода, один из которых содержит начальную “пузырьковую” стадию, а второй не содержит. Данные (2,3) рис. 2 соответствуют преимущественно первому механизму пробоя с анода и характеризуются более сильной зависимостью, так как пробой перестает формироваться при давлении ~ 1.4 МПа. Сильное влияние давления подтверждает важную роль “пузырьковой” стадии при возникновении электрического разряда в этих условиях. Таким образом, реализация того или иного механизма пробоя *n*-гексана в квазиоднородном поле определяется напряженностью поля (длительностью воздействия напряжения), расстоянием между электродами, внешним давлением [6].

Анализ результатов

Важную роль в механизме зарождения электрического разряда играют процессы на границе раздела металлический электрод–жидкость. Воздействие импульсного разряда приводит к эрозии электродов, которая сопровождается формированием микрорельефа поверхности. Адсорбированный газ, диэлектрические (полупроводниковые) микровключения и пленки влияют на свойства поверхности. В условиях кондиционированных электродов микровыступы на поверхности электродов могут играть превалирующую роль. Они вызывают локальное увеличение напряженности поля. Коэффициент усиления поля β определяется отношением электрического поля на вершине выступа к его среднему (макроскопически определенному) значению E . Одним из способов нахождения коэффициента β является определение зависимости электронного тока холодной эмиссии от напряженности поля. Автоэлектронный ток описывается известной формулой Фаулера–Нордгейма

$$I = A(\beta E)^2 \exp(-B/\beta E),$$

где A и B — постоянные, зависящие от работы выхода электрона из металла.

Зависимость $\ln(I/E^2)$ от $1/E$ является линейной. Задавая работу выхода, из наклона прямой можно определить коэффициент усиления поля

на микроострие. Несмотря на некоторую неоднозначность, связанную с неопределенностью работы выхода, данный способ распространен в вакуумных промежутках. В жидкостях ввиду малой скорости носителей заряда и более сильного влияния эмиссионного пространственного заряда его применение ограничено. В [7] представлены результаты измерения коэффициента усиления поля на поверхности катода для вакуумного промежутка в диапазоне межэлектродных расстояний $\sim 0.003\text{--}2.5$ мм. Электроды готовились обычным способом (механическая полировка, промывка в дистиллированной воде и спирте) и не подвергались предварительной термической обработке. Перед проведением измерений они тренировались последовательными пробоями. Исходя из общности процессов, приводящих к образованию микроострий, слабому влиянию на их геометрию амплитуды тока, материала электродов [8], и используя данные о зависимости коэффициента усиления поля β от расстояния между электродами [7], можно попытаться оценить в первом грубом приближении критическое поле, соответствующее возникновению различных механизмов пробоя в наших условиях. Эти данные приведены также в таблице. Здесь $E_{\text{кр}} = \beta(d) \cdot E$. Увеличение коэффициента усиления поля β с увеличением длины промежутка может быть обусловлено увеличением неоднородности поля (изменением макрогеометрии) [8]. Оказывается, что критическое поле (микроскопическое) не зависит от расстояния между электродами и составляет $1.1\text{--}1.2 \cdot 10^2$ и $1.4\text{--}1.5 \cdot 10^2$ МВ/см для механизмов пробоя с катода и с анода соответственно. При таких напряженностях протекают процессы, связанные с эмиссией электронов из катода в жидкость [9] и ионизацией атомов вблизи анода (эмиссией электронов из жидкости) [10] за счет туннельного перехода, что и не может быть определяющим при иницировании электрического разряда. Для холодной эмиссии электронов в н-гексан необходимы напряженности поля $\gtrsim 30$ МВ/см [11]. Причем для ионизации требуются более высокие напряженности, чем для эмиссии из металла. Интенсивность процесса может быть значительно увеличена за счет снижения работы выхода электрона из металла в жидкость под действием электрического поля. Работа выхода уменьшается на величину

$$\Delta\varphi = (e^3 E / 4\pi\epsilon\epsilon_0)^{1/2},$$

которая для $E \sim 10^2$ МВ/см и н-гексана ($\epsilon = 1.8$) составляет 2.7 эВ. Заметим, что для н-гексана и типичных металлических электродов работа выхода равна примерно 4.5 эВ [11]. Критическое поле, соответствующее возникновению однородного разряда с анода [4], несколько больше и составляет $\sim 2.1 \cdot 10^2$ МВ/см.

Следует отметить, что среднее пробивное поле для зазора 12 мкм ~ 3.6 МВ/см (штриховая линия 5 на рис. 1). При этом время запаздывания пробоя < 10 нс, что находится за пределами разрешения автоматизированной измерительной системы. Оценки критического поля позволяют предположить, что пробой в этих условиях осуществляется разрядом с анода. Однако это требует уточнения.

Оценки показывают также, что данные рис. 2 (2,3) соответствуют примерно одинаковому локальному электрическому полю. По-видимому, именно поэтому пробой не формируется при одинаковых внешних давлениях.

Таким образом, увеличение импульсной электрической прочности н-гексана при уменьшении расстояния между электродами может быть связано с уменьшением локального электрического поля вблизи поверхности электродов, влияющего на инициирование электрического разряда.

Сделанные оценки носят качественный характер. Это связано с неопределенностью состояния поверхности электродов в наших условиях. Примыкающий к поверхности электрический дипольный слой (слой Гельмгольца) [12] и пленки, образуемые в результате электрополимеризации жидкости [1], могут привести к изменению потенциального барьера у электрода. Тем не менее полученные результаты позволяют дать простое и наглядное объяснение смещению границ механизмов пробоя в область более высоких средних напряженностей поля и переходу от механизма пробоя с анода к механизму пробоя с катода (E постоянно) при уменьшении расстояния между электродами [4]. Различный механизм инициирования электрического разряда с катода и с анода позволяет объяснить полярный эффект в квазиоднородном поле.

Список литературы

- [1] Као К.С., Higham J.B. // J. Electrochem. Soc. 1961. Vol. 108. N 6. P. 40-46.
- [2] Мик Дж., Крегс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 605 с.
- [3] Климкин В.Ф. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 2041-2043.
- [4] Климкин В.Ф. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 8. С. 80-83.
- [5] Климкин В.Ф. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 161-163.
- [6] Бородин В.П., Климкин В.Ф. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 9. С. 802-805.
- [7] Tsuruta K. // IEEE Trans. Electr. Insul. 1987. Vol. 22. N 1. P. 77-79.
- [8] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 265 с.
- [9] Halpern B., Gomer R. // J. Chem. Phys. 1969. Vol. 51. N 3. P. 1031-1047.
- [10] Halpern B., Gomer R. // J. Chem. Phys. 1969. Vol. 51. N 3. P. 1048-1056.
- [11] Dotoku K., Yamada H., Sakamoto S. // J. Chem. Phys. 1978. Vol. 69. N 3. P. 1121-1125.
- [12] Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 488 с.

Новосибирский университет

Поступило в Редакцию
30 июля 1992 г.