

УДК 537.523.9:537.63

А.М. Юнусов, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, П.Х. Омарова, Ф.М.А. Аль-Харети

Электрический пробой газа в магнитном поле

Дагестанский государственный университет; Россия, 367001, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; inporao@mail.ru

В статье представлены результаты исследования влияния магнитного поля на временные характеристики электрического пробоя газа (N_2) в условиях интенсивной УФ предыонизации при давлениях, близких к атмосферному. Цель исследования – выявить механизм пробоя газа при высоких давлениях (порядка атмосферного). Разряды при высоких давлениях порядка атмосферного играют важную роль в коммутаторах больших токов, мощных источниках света, часто используются как активное вещество в мощных газовых оптических генераторах. При использовании разрядов с предыонизацией в качестве коммутаторов очень важным является возможность управлять временем ее срабатывания.

Как известно, магнитное поле при определенных условиях вызывает анизотропию ионизованного газа, что позволяет использовать магнитное поле как диагностическое средство для получения дополнительной информации о вкладе различных процессов в формирование пробоя и установлению его механизма. Исследование проводилось в импульсном магнитном поле. Магнитное поле получали разрядом батареи конденсаторов на соленоид Гельмгольца, который в небольшом объеме создает практически однородное магнитное поле. Длительность импульса магнитного поля более чем на два порядка превышала время развития пробоя, что позволяло считать магнитное поле постоянным. Как известно, время развития пробоя является одним из существенных критериев, по которому можно судить о механизме пробоя, поэтому нами исследовалось влияние магнитного поля (поперечного и продольного) на длительность формирования пробоя при давлениях 380–1140 Тор и длинах промежутка 1–3 мм. Магнитное поле не оказывает влияния на время формирования пробоя до значений $H = H_{кр}$. Величина $H_{кр}$ уменьшается с уменьшением давления. При $H > H_{кр}$ время формирования увеличивается с ростом напряженности магнитного поля. В продольном магнитном поле это связано с тормозящим действием магнитного поля на развитие дочерних лавин,двигающихся под углом к силовым линиям магнитного поля, вследствие которого задерживается образование и развитие стримера. В поперечном магнитном поле рост времени формирования пробоя связан с уменьшением коэффициента α и дрейфовой скорости электронов.

Рассмотрен возможный механизм пробоя газа при давлениях, близких к атмосферному, в условиях интенсивной УФ предыонизации, основанный на переходе группы электронных лавин в стример, в суммарном поле электродов и положительного пространственного заряда, созданного предшествующими генерациями групп электронных лавин.

Ключевые слова: *электрический пробой, магнитное поле, недонапряжение, предыонизация, временные характеристики, коэффициент ионизации.*

Введение

В 1821 г. Деви опубликовал работу, в которой описывались результаты исследования влияния магнитного поля на разряд. Влияние магнитного поля на потенциал горения изучались Витцем (1890 г.) и Паальцовым (1897 г.). Было доказано, что в поперечном магнитном поле потенциал зажигания разряда увеличивается, а в продольном магнитном поле наблюдался двойственный эффект, в зависимости от давления магнитное поле повышало или понижало потенциал горения разряда. Было замечено (Штрут

1913г.), что сильнее всего магнитное поле воздействует на заряд при низких давлениях, т.е. в левой ветви кривой Пашена. Магнитное поле, направленное параллельно оси двух цилиндров, являющихся анодом и катодом, на порядок снижало напряжение зажигания разряда.

Таундсенд (1913г.) исследовал влияние магнитного поля на коэффициент ионизации электронами и показал, что действие магнитного поля на разряд в некоторой степени эквивалентно увеличению давления газа.

В начале XX века выделилось несколько направлений, связанных с исследованием магнитного поля на прохождение тока в газе.

Первое направление связано с исследованиями прохождения тока между накаливаемым катодом и анодом в магнитном поле в разряженном газе. Эти исследования привели к созданию ряда сверхвысокочастотных электронных приборов, имеющих большое значение для современной науки и техники (магнетрон и другие).

Второе направление связано с исследованием воздействия магнитного поля на плазму газового разряда. Предпринимались попытки осуществить управляемую термоядерную реакцию. В результате изучения магнитной газодинамики появилась возможность создания плазменных источников сверхвысокой температуры. В 1968 году была впервые осуществлена квазистационарная физическая термоядерная реакция (Арцимович «Токамак 4»).

Третье направление связано с исследованием возникновения самостоятельного разряда с холодным катодом в высоком вакууме в магнитном поле. Это привело к созданию газоразрядного манометра для измерения низкого давления (10^{-14} Тор), высоковакуумного насоса.

Четвертое направление связано с исследованием самостоятельного разряда в магнитном поле с целью изучения элементарных процессов, протекающих в разряде, и механизма электрического пробоя газа.

Магнитное поле при определенных условиях ($\omega\tau \geq 1$), где ω – циклотронная частота вращения электрона, τ – среднее время столкновения электрона с атомами и молекулами газа, вызывает анизотропию ионизованного газа, что позволяет использовать магнитное поле как диагностическое средство для получения информации о вкладе различных процессов в формирование пробоя и установления его механизма.

Исследования разряда в магнитном поле позволили глубже понять механизм пробоя газов. Магнитное поле позволяет управлять спектральным распределением излучения разряда, а также существенно увеличить мощность излучения разряда [1]. Магнитное поле увеличивает энерговклад в разряд при фиксированном облучении и сокращает время формирования разряда. Исследования показали, что ускоренные электроны могут образовываться в разряде в режиме недонапряжения вблизи минимума кривой Пашена из-за усиления электрического поля положительным пространственным зарядом [2]. Продольное магнитное поле вызывает значительный спад кривых Пашена в области минимума, быстрое снижение напряжения пробоя на левой ветви и постепенное увеличение напряжения на правой ветви, что объясняется авторами высоким КПД процесса вторичной ионизации в разряде азотной плазмы [3]. При повышенном давлении (близком к атмосферному) электрический пробой характеризуется резким спадом напряжения на стадии коммутации, увеличением времени на стадии формирования, что связано с изменением механизма пробоя, образованием стримера в суммарном поле

электродов и положительного пространственного заряда, образованного генерацией групп электронных лавин [4].

Исследования влияния магнитного поля на вольт-амперные характеристики дуговых испарителей с титановым катодом [5] показали, что магнитное поле существенно влияет на характер ВАХ, меняя ее с возрастающей на падающую. При этом увеличение индукции ародного магнитного поля приводит к значительно более высоким значениям напряжения разряда, чем в расходящемся магнитном поле.

Внешнее магнитное поле оказывает влияние на форму и структуру высоковольтного разряда в газе, используемого для ионизации потока воздуха к степени ионизации 10^{-5} . Получены форма и структура разряда при различной интенсивности магнитного поля в двух случаях: в первом направлении тока разряда совпадало с силовыми линиями магнитного поля, во втором ток был направлен поперечно по отношению к магнитному полю.

В последнее время интерес к изучению газовых разрядов резко возрос. Это связано с тем, что разряды при высоких давлениях (порядка атмосферного) играют важную роль в коммутаторах больших токов, мощных источниках света, наконец, часто используются как активное вещество в мощных газовых оптических генераторах.

При использовании разрядов с предыонизацией в качестве коммутаторов появляется возможность управления временем срабатывания разряда.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния магнитного поля на временные характеристики электрического пробоя газа при давлениях, близких к атмосферному, в режиме недонапряжения при наличии интенсивной УФ предыонизации.

Измерения проводились на импульсной магнитной установке. Магнитное поле создавалось разрядом батареи конденсаторов на соленоид Гельмгольца, который в небольшом объеме создает практически однородное магнитное поле. Была использована батарея конденсаторов, состоящая из восьми конденсаторов ИМ-5-150, с рабочим напряжением 5кВ. Электрическая емкость батареи конденсаторов составляла 1200 мкФ.

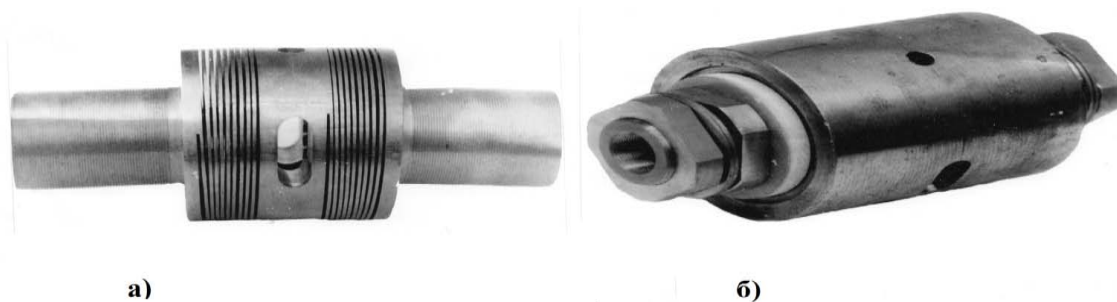


Рис. 1. Общий вид соленоида Гельмгольца

Соленоид представлял собой цельноточенную спираль из бериллиевой бронзы. При изготовлении соленоида было обращено внимание на механические напряжения: аксиальное – сжимающее катушку, и радиальное – стремящееся разорвать ее. Так как при наличии прочной поддержки предел упругости возрастает, соленоид помещался в цилиндрический кожух из нержавеющей стали, а с торцов его стягивали массивные фланцы.

Параметры соленоидов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина витка, мм	Толщина изоляции, мм	Число витков	Длительность полупериода напряженности магн. поля (мкс)	Напряженность магнитного поля, кЭ
60	20	1,5	1	16	100	200
70	40	3	2	18	150	140

Измерение напряженности магнитного поля проводилось индукционным методом. Относительная ошибка не превышала 10%.

Блок синхронизации обеспечивал пробой промежутка в момент максимума магнитного поля. Значение напряженности магнитного поля, при котором происходил пробой, фиксировалось всплеском напряжения на синусоиде изменения напряженности магнитного поля со временем.

Результаты эксперимента по влиянию продольного магнитного поля на время формирования пробоя представлены на рис. 2 и 3. На рис. 4 приведена типичная осциллограмма пробоя.

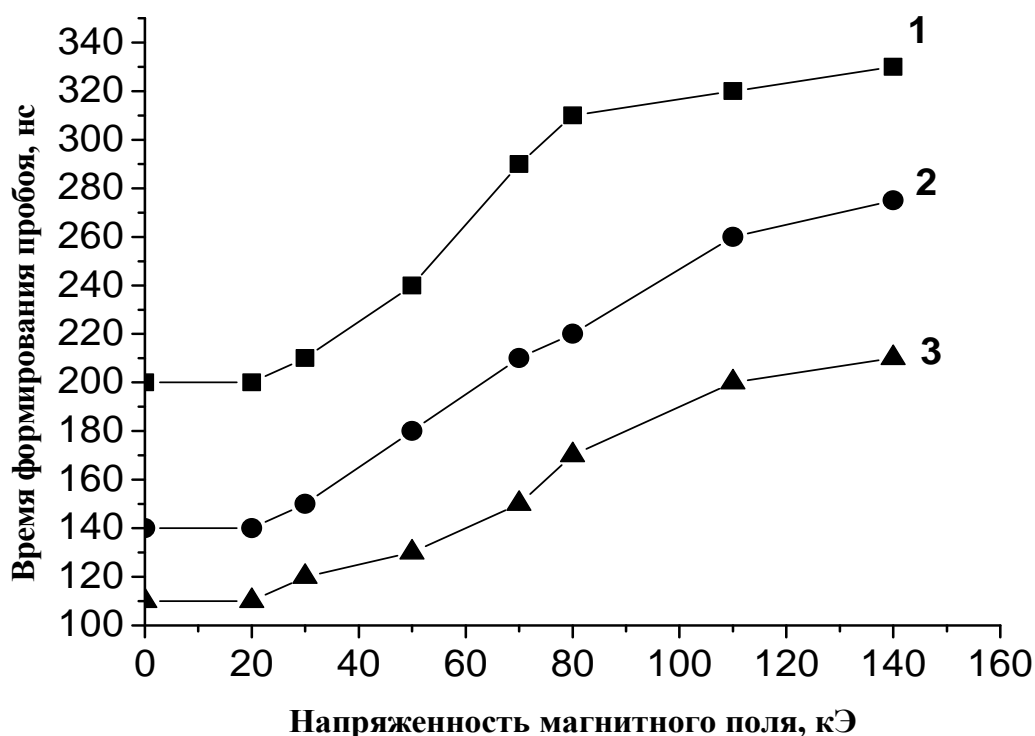


Рис.2. Зависимость времени формирования пробоя (кривые 1,2,3,) от напряженности магнитного поля, давление P=760 Торр

1. $d = 0,1 \text{ см}; U_{cm} = 4,6 \text{ кВ}; U_{np} = 4,2 \text{ кВ}, W = 8,7\%, E/p = 55 \text{ В/см Тор}, E/N = 14,3 \cdot 10^{-16} \text{ В/см}^2;$

2. $d = 0,2 \text{ см}; U_{cm} = 7,9 \text{ кВ}; U_{np} = 7,1 \text{ кВ}, W = 10,1\%, E/p = 46,7 \text{ В/см Тор}, E/N = 12,1 \cdot 10^{-16} \text{ В/см}^2;$

$3.d = 0,3\text{ см}; U_{cm} = 11,9\text{ кВ}; U_{np} = 10,8\text{ кВ}, W = 9,2\%, E/p = 47,4\text{ В/см Тор}, E/N = 12,3 \cdot 10^{-16}\text{ В/см}^2.$

Таблица 2

	Напряженность магнитного поля Н, кЭ	Время формирования пробоя, нс		
		(1 – d = 0,1 см)	(2 – d = 0,2 см)	(3 – d = 0,3 см)
1	0	200	140	110
2	20	200	140	110
3	30	210	150	120
4	50	240	180	130
5	70	290	210	150
6	80	310	220	170
7	110	320	260	200
8	140	330	275	210

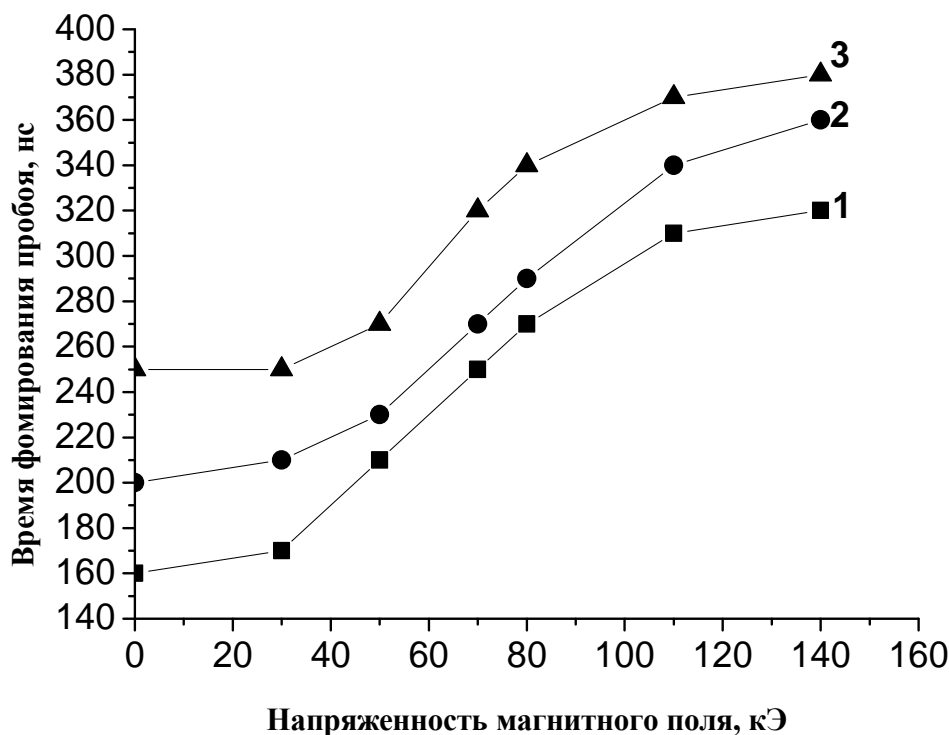


Рис.3. Зависимость времени формирования пробоя (кривые 1,2,3) от напряженности магнитного поля, длина разрядного промежутка d=0,1 см

1.p = 380 Тор; $U_{ст} = 2,9\text{ кВ}, U_{np} = 2,6\text{ кВ}, W = 10,3\%, E/p = 68\text{ В/см Тор}, E/N = 17,7 \cdot 10^{-16}\text{ В/см}^2;$

2.p = 760 Тор; $U_{ст} = 4,6\text{ кВ}, U_{np} = 4,2\text{ кВ}, W = 10,1\%, E/p = 46,7\text{ В/см Тор}, E/N = 12,1 \cdot 10^{-16}\text{ В/см}^2;$

3.p = 1140 Тор; $U_{ст} = 6,3\text{ кВ}, U_{np} = 5,9\text{ кВ}, W = 6,8\%, E/p = 51,8\text{ В/см Тор}, E/N = 13,5 \cdot 10^{-16}\text{ В/см}^2.$

Таблица 3

Напряженность маг-	Время формирования пробоя, нс
--------------------	-------------------------------

	нитного поля H , кЭ	(1 – $P = 380$ Тор)	(2 – $P = 760$ Тор)	(3 – $P = 1140$ Тор)
1	0	160	200	250
2	30	170	210	250
3	50	210	230	270
4	70	250	270	320
5	80	270	290	340
6	110	310	340	370
7	140	320	360	380

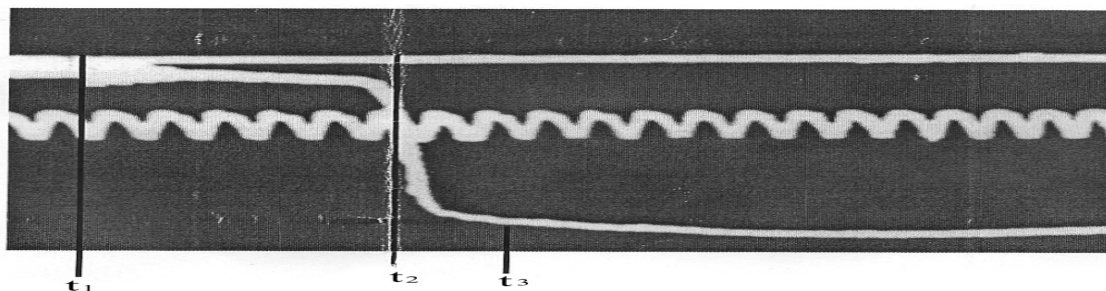


Рис. 4. Типичная оциллограмма пробоя. Частота генератора 10 МГц: t_1, t_2, t_3 – моменты времени: начало облучения, начало спада напряжения, напряжение горения квазистационарной дуги

В период времени t_2-t_1 происходит развитие большого количества электронных лавин, их генерация и накопление объемного заряда положительных ионов, возникновение и развитие стримера, распространяющегося в сторону катода. К моменту времени t_2 стример замыкает разрядный промежуток.

В период времени t_3-t_2 происходит формирование катодных пятен, движение волн (волны) ионизации, в результате чего происходит формирование высокопроводящего канала. Напряжение падает до напряжения горения квазистационарной дуги.

Время формирования пробоя вплоть до значений $H = H_{кр}$ не зависит от величины магнитного поля, что не противоречит условию заметного влияния магнитного поля на газовый разряд $r \leq \lambda$, где r – радиус ларморовой орбиты электрона, λ – длина свободного пробега. Для значения магнитного поля $H > H_{кр}$ время формирования пробоя увеличивается с ростом напряженности магнитного поля. Критическое значение магнитного поля уменьшается с уменьшением давления.

Время формирования пробоя можно рассматривать как состоящее из двух частей: времени формирования пространственного заряда из-за генерации последовательных групп электронных лавин и времени возникновения и развития стримера.

На время формирования пробоя в продольном магнитном поле могут влиять следующие факторы:

1. Наложение продольного магнитного поля, которое может привести к уменьшению коэффициента диффузии.

$$D_H = \frac{D_0}{1 + \omega^2 \tau^2},$$

где D_H – коэффициент диффузии в магнитном поле, D_0 – коэффициент диффузии без магнитного поля, ω – ларморовая частота, τ – среднее время свободного пробега.

Из-за уменьшения коэффициента диффузии радиус головки электронной лавины также будет уменьшаться [7]:

$$r_H = \left\{ \frac{3 + \omega^2 \tau^2}{3(1 + \omega^2 \tau^2)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} r_0,$$

где $r_0 = (2Dt)^{1/2}$ – радиус головки лавины при отсутствии продольного магнитного поля, что при неизменном числе заряженных частиц в головке лавины приведет к возрастанию их концентрации, а соответственно и напряженности электрического поля положительного пространственного заряда.

Вследствие этого вторая группа электронных лавин будет развиваться в усиленном поле более интенсивно, на эти лавины будет действовать магнитное поле и т.д.

Процесс возникновения положительного пространственного заряда, необходимого для пробоя, ускорится. При пониженных давлениях это подтверждается. В работах [6] и [7] изучалось влияние продольного магнитного поля на запаздывание разряда при давлениях 8,2 и 20,7 Тор и напряженности магнитного поля 700 и 1500 Э. Уменьшение времени запаздывания с увеличением напряженности магнитного поля авторами объясняется уменьшением диффузионных потерь электронов в магнитном поле.

2. Наложение продольного магнитного поля, которое может затруднить условия возникновения и развития стримера, так как продольное магнитное поле будет тормозить развитие дочерних лавин, движущихся под углом к его силовым линиям, что приведет к увеличению времени формирования пробоя. В условиях постановки эксперимента превалирует этот фактор.

Период формирования пробоя имеет такую величину, что движением положительных ионов за это время можно пренебречь, но оно больше, чем время однократного пробоя электронов через газовый промежуток, поэтому возможным механизмом пробоя в условиях постановки эксперимента является переходный механизм, который заключается в следующем.

Фотоэлектроны, вырванные с катода под действием УФ облучения, создают группу лавин, которая, дойдя до анода, оставляет положительный пространственный заряд, усиливающий поле электродов. В этом усиленном поле будут развиваться последовательные группы электронных лавин, созданные фотоэлектронами, вырванными с катода под действием фотонов, образованных предыдущими лавинами и внешним источником излучения.

Таким образом, создаются условия для почти одновременного развития близко расположенных электронных лавин в суммарном поле электродов и положительного пространственного заряда, которые и переходят в стример (стримеры). Если при развитии второй группы лавин не возник стример, то он может возникнуть при развитии третьей группы лавин. При этом в стример превращается группа лавин, у которых пространственный заряд положительных ионов в головках лавин действует как единое целое. При приближении головки положительного стримера к катоду напряженность поля вблизи него вырастает настолько, что здесь имеет место усиленная ионизация и возбуждение молекул и атомов газа, что приводит к образованию катодного пятна. На катодном пятне появляется большое количество электронов. Эти электроны создают последовательные волны отрицательного напряжения, которые во много раз увеличивают ионизацию в канале разряда, вследствие чего сопротивление канала сильно уменьшается и происходит перераспределение напряжения в цепи, содержащей искровой промежуток. При этом напряжение на промежутке падает до напряжения горения дуги.

На рис. 5 представлена зависимость времени формирования пробоя и длительности стадии коммутации от напряженности поперечного магнитного поля. Увеличение времени формирования пробоя при значениях напряженности магнитного поля $H > H_{кр}$, по нашему мнению, связано с уменьшением дрейфовой скорости электронов, а также с уменьшением первого ионизационного коэффициента Таунсенда – α . В поперечном магнитном поле коэффициент α уменьшается вследствие того, что происходит уменьшение вероятности ионизации из-за уменьшения длины свободного пробега и соответственно энергии электронов, набираемой во время свободного пробега, которая преобладает над фактором роста числа столкновений. В условиях недонапряжения ($W = 8,7\%$) это наиболее вероятно.

В поперечном магнитном поле уменьшается подвижность электронов:

$$\mu_B = \frac{\mu}{1 + \mu^2 B^2},$$

где μ_B – подвижность электронов в магнитном поле $\mu_B = \frac{1}{2} \frac{e\lambda}{mv}$ –; подвижность электронов при $B = 0$ (v – средняя тепловая скорость электронов); B – индукция магнитного поля.

В условиях постановки эксперимента $E/p = 55$ В/см Тор; можно положить $\lambda = 3,85 \cdot 10^{-4} / 760$ м и $v = 1,2 \cdot 10^6$ м/с [9]. Магнитное поле напряженностью 200 кЭ уменьшает подвижность электронов \approx на 10%.

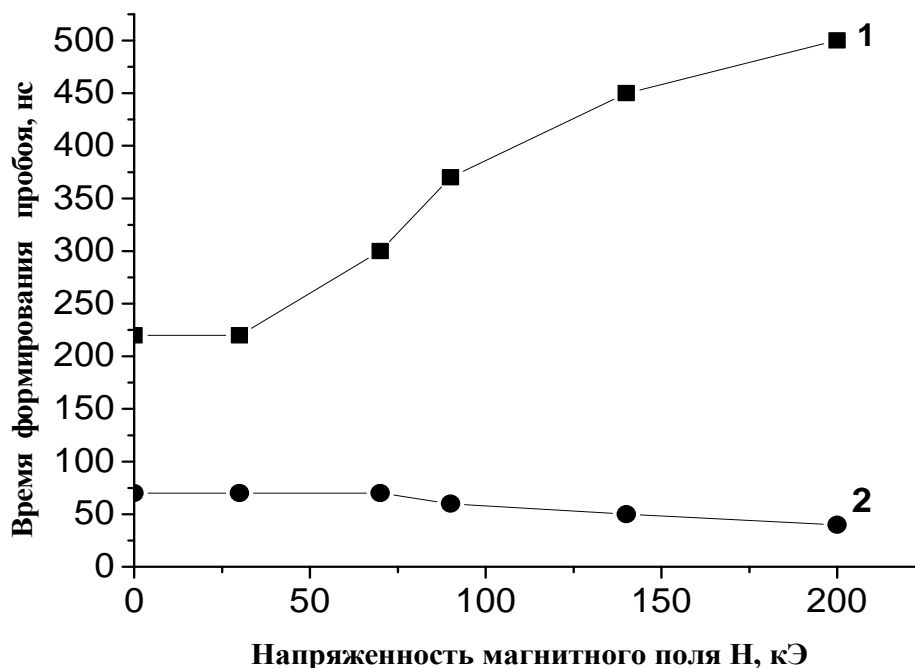


Рис.5. Время формирования пробоя (кривая 1) и длительность стадии коммутации (кривая 2) в зависимости от напряженности поперечного магнитного поля

Условия эксперимента: $U_{cm} = 4,6$ кВ, $U_{np} = 4,2$ кВ, $W = 8,7\%$, $E/p = 55$ В/см Тор, $E/N = 14 \cdot 10^{-16}$ В/см².

Таблица 4

	Напряженность магнитного поля H , кЭ	Время формирования пробоя, нс	Длительность стадии коммутации, нс
1	0	220	70
2	30	220	70
3	70	300	70
4	90	370	60
5	140	450	50
6	200	500	40

В поперечном магнитном поле сокращается время стадии коммутации, что связано с ускорением процесса формирования катодного пятна. Большую роль в формировании катодного пятна играет прохождение волны (волн) отрицательного напряжения от катода к аноду. Процессы ионизации и возбуждения в рассматриваемой стадии пробоя распределены в разрядном промежутке неравномерно. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в области катодного пятна, где существует сильное электрическое поле вследствие увеличения числа столкновений электронов с атомами и молекулами газа в направлении электрического поля, что усиливает волну отрицательного напряжения, приводящего в целом к увеличению плотности плазмы.

Выводы

1. Магнитное поле не оказывает влияния на время формирования пробоя при значениях магнитного поля $H \leq H_{кр}$. Величина $H_{кр}$ уменьшается с уменьшением давления. При $H > H_{кр}$ время формирования пробоя растет с ростом напряженности магнитного поля, что связано с тормозящим действием магнитного поля на развитие дочерних лавин,двигающихся под углом к силовым линиям магнитного поля, из-за которого задерживается образование и развитие стримера. В поперечном магнитном поле увеличения времени формирования пробоя при значениях магнитного поля $H > H_{кр}$ связано с уменьшением дрейфовой скорости электронов и коэффициента α .

2. Продольное магнитное поле не оказывает заметного влияния на длительность стадии коммутации. В поперечном магнитном поле длительность стадии коммуникации уменьшается, что связано с ускорением процесса формирования катодного пятна из-за роста коэффициента α . Сокращение времени на стадии коммутации в поперечном магнитном поле может быть использовано при конструировании генераторов высоковольтных импульсов с крутым фронтом.

3. Рассмотрен возможный механизм пробоя газа при давлениях, близких к атмосферному, в режиме недонапряжения при интенсивной УФ преионизации, основанный на переходе группы электронных лавин в стример в суммарном поле электродов и положительного пространственного заряда, созданного предшествующими генерациями групп электронных лавин.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ на проведение НИР.

Литература

1. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева А.С., Таилов К.Т. Исследование влияния поперечного магнитного поля на интенсивности излучения спектральных линий атомов гелия в плазме наносекундного разряда // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2010. – Вып. 6. – С. 42–50.
2. Юнусов А.М. Влияние магнитного поля на электрический пробой газов // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2010. – Вып. 6. – С. 15–21.
3. Sabah I. Wais, Raghad Y. Mohammed, Sedki O. Yousif. Influence of Axial magnetic field on the electrical breakdown and secondary electron emission in plan – parallel plasma discharge // World academy of science, engineering and technology international journal of mathematical, computational, Physical, Electrical and computer engineering. – 2011. – Vol. 5, №8. – P. 1226–1231.
4. Юнусов А.М. Электрический пробой газа при интенсивной УФ преионизации в поперечном магнитном поле // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2013. – Вып. 1. – С. 56–64.
5. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В. Влияние магнитного поля на вольтамперную характеристику вакуумного дугового разряда // Наука и образование МГТУ им. Баумана: Электронный журнал. – 2015. – №11. – С. 124–135.
6. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. – М.: Наука, 1964. – С. 347.
7. Sodau Nakamura and Kenie Mitani J. // Phys Soc. Japan 20. – 1965. – P. 50–59.
8. Bg. Kenie Mitani and Hurochi Kubo J. // J. of the Phys. of Japan. – 1960. – Vol. 15. – P. 25–29.
9. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1228с.

Поступила в редакцию 23 апреля 2016 г.

UDC 537.523.9:537.63

Electrical gas breakdown in a magnetic field

A.M. Yunusov, O.A. Omarov, N.O. Omarova, P.Kh. Omarova, F.M.A. Al-Harethi

Dagestan State University; Russia, 367001, Makhachkala, M. Gadzhiyev st., 43a; inporao@mail.ru

The given article presents the results of the research with the focus on the magnetic field influence on the temporary characteristics of the electrical gas breakdown (N₂) under intensive ultraviolet preionization at pressures close to atmospheric. The goal of research is to identify the gas breakdown mechanisms at high pressure (similar to atmospheric). The discharges that appear play an important role in switches of heavy current, high power radiants, and are also used as an active substance in high-power gas optical generators. It is important to control the operation time using discharge preionization as switches.

It is known that a magnetic field under certain conditions causes anisotropy of ionized gas, giving a chance to use the magnetic field as a diagnostic tool to get information about various processes contributing to the formation of breakdowns and revealing its mechanism.

The research was done in a pulsed-field accelerator. The magnetic field appeared as a result of capacitor bank discharge on Helmholtz solenoid that, on a limited state, generates almost homogeneous magnetic field. The duration pulse of the magnetic field was by more than 2 orders of magnitude

greater, giving grounds to consider the magnetic field constant. It is known that the time for the formation of breakdown is one of the most essential criteria to evaluate the mechanism of the breakdown. Thus, our goal is to reveal the influence of the magnetic field (dilatational and transverse) on the duration of breakdown formation at a pressure of 380-1140 Torr and the distance interval of 1-3 mm. The magnetic field has no effect on the breakdown formation until the value of $H=H_{np}$. The value of H_{np} decreases alongside depressurization. If $H > H_{np}$, the time of formation increases alongside the growth of magnetizing force. In a dilatational magnetic field it is connected with the inhibiting action of the magnetic field on the development of the associated avalanche, moving at an angle to magnetic flux and resulting in suspending the streamer's formation and its development. In a transverse magnetic field the reason of the time increase in breakdown formation is the result of decrease in the coefficient α and electrons' drift velocity.

Some possible mechanisms of gas breakdowns at pressure close to atmospheric under intense UV preionization, based on the transition of electron avalanches into a streamer in the total electrode field and a positive space charge created by previous generations of group electron avalanches are in the focus of research.

Keywords: *electric breakdown, the magnetic field, under-voltage, preionisation, timing, ionization coefficient.*

Received 23 April, 2016