

ТЕХНОЛОГИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА НА МАГНИТНО СТИМУЛИРАН БАРИЕ-РЕН РАЗРЯД

TECHNOLOGICAL CHARACTERISTIC OF MAGNETOSTIMULATED DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТОСТИМУЛИРОВАННОГО БАРИЕРНОГО РАЗРЯДА

Assoc. Prof. Ph. D. Dineff P., Ph. D. Gospodinova D.
Faculty of Electrical engineering – Technical university of Sofia, Bulgaria

Abstract: *An important factor in the utility of magnetron plasma sources for sputtering at low pressures and other vacuum applications is their drift-induced uniformity over large distances. The usual configuration in planar magnetron sputtering plasma sources is a long, oval racetrack in which the plasma undergoes E/B drift around the racetrack. This drift ensures uniformity of the negative glow plasma in the direction perpendicular to the electric and magnetic fields. In the high-pressure (atmospheric) dielectric barrier and hybrid corona-dielectric barrier non-equilibrium plasma sources this technology is not usable yet. Two new innovative methods of magnetic stimulation are demonstrated. The first of them is characterized by crossed or co-linear electric and magnetic fields, and the second – by a parallel-plate or co-planar dielectric barrier plasma source with at least one silicone electrical steel powered electrode. Surface density of real power increasing and discharge state changing with the voltage variation are investigated.*

Keywords: SURFACE ENGINEERING, MAGNETOSTIMULATED DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE, TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS, MAGNETRON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE, PLASMA SURFACE MODIFICATION

1. Въведение

Във време, когато технологиите вече не се развиват паралелно, когато всички технологии са от значение за всяка индустрия и влияят върху нейното развитие, не е реалистично да се очаква, че някога ще бъде обособена индустрия, чийто краен продукт ще бъде определен от плазмените технологии. През последните петдесет години плазмените технологии оказват съществено влияние върху развитието на традиционни индустриални области, като машиностроенето, електрониката (микроелектрониката), химичната, текстилната и печатарската индустрии, индустрията на опаковките, биоматериалите, производството на осветителни тела, но плазмена индустрия няма, и няма да има. Ако се говори за електротехнология, като самостоятелно обособена област на общата технология на материалите, то трябва да се признае, че повече от 80 % от всички индустриални приложения се отнасят изключително до плазмени технологични процеси и методи. Електротехнологията също така няма своя индустрия, въпреки, че има свой обект на изучаване, свои инструменти и постигнати уникални резултати.

2. Неравновесни плазмени технологии

Плазмените технологии се свързват с още една много бързо развиваща се технологична област - *технологиите на повърхността*, които се занимават с управление на повърхностните свойства на твърдите тела, като им придават устойчивост спрямо влиянието на околната среда и/или променят техните функционални свойства (механични, химични, електрически, технологични) чрез почистване, активиране, изграждане на повърхностни структури, разяждане (ецване), нанасяне на покрития.

Повечето от материалите, включително металите и сплавите, керамиката, полимерите и полимерните материали, композиционните материали, могат да бъдат защитени или променени чрез различни по вид и природа покрития. И равновесните, и неравновесните, плазмени технологии обогатяват и стимулират развитието на тази голяма група от технологии, които обслужват химичната индустрия, производството на пластмасови изделия и продукти, текстилната индустрия, опаковките, автомобилната индустрия, космическите технологии, биоматериалите, печатарската индустрия, фармацевцията, строителството. Приложението на плазмените технологии, и особено на неравновесната плазма, трябва да се търси в индустриални области,

които могат да претърпят положително развитие и сериозно разширяване на приложението в близко бъдеще.

Неравновесните плазмени технологии се разглеждат изключително като технологии на повърхността поради това, че очакваната от тях промяна се осъществява в много тънък повърхностен слой - $5 \div 10$ nm. Те могат да почистят повърхността и да я подготвят за възприемането на следващи технологични процеси, като лепене, печатане, боядисване, каширане, ламиниране. Но това могат да бъдат и довършващи технологични процеси, които придават различни функционални свойства – мокреши се (и немокреши се), антистатични, биологично незамърсяващи се и биологично активни повърхности. С помощта на различни по природа и по фазово състояние (пáри, аерозоли) прекурсори се изграждат различни защитни и функционални покрития. Свързването на неравновесните плазмени технологии с порести среди, чиито свойства зависят много от повърхността, представлява възможно направление за приложение, което предлага не само предизвикателства, но и положителни резултати. Обработването на повърхността на различни по природа дисперсни добавки (неутрални и усилващи) с развита повърхност отваря пътя на тези технологии, както към пластмасите и каучука, така и към композиционните материали. Бъдещето на неравновесните плазмени технологии е свързано с нанотехнологиите и новите материали на тяхна основа – електрическите разряди и плазмата представляват привлекателен инструмент в технологията на наноструктурите.

3. Условия за получаване на неравновесна плазма при високо налягане

Студената плазма (англ. *cold plasma*), характеризираща се с две силно различаващи се температури – на леката и на тежката компоненти, се явява едновременно и неравновесна (англ. *non-equilibrium plasma, non-LTE plasma*) плазма, защото причината за нейната неизотермичност се крие във влошеното ударно взаимодействие между двете компоненти, което води до прегряване на леката компонента, получаваща своята енергия директно от електрическото поле. Напротив, термичната плазма (англ. *thermal plasma*), която най-често се получава при атмосферно налягане, е изотермична и се намира при условия максимално близки до т. нар. локално термодинамично равновесие (англ. *local thermodynamic equilibrium, LTE*).

Студената плазма е неравновесна плазма, при която концентрацията на частици не е функция единствено на темпера-

турата, т. е. тя не се намира в LTE. За пръв път този въпрос се третира от Dravin (1971).

Неизотермичността на студената плазма се дължи на нейната неравновесност, която се проявява при ниски налягания поради силното разреждане на въздуха, и при атмосферно налягане поради динамиката на процеса. Водеща се явява неравновесността на студената плазма, която по един естествен начин се проявява при ниски налягания. Създаването на неравновесни условия при атмосферно налягане обаче остава много трудно поради изразения колективен характер на поведение на леката и тежката компоненти на плазмата при високи скорости, твърде малката дължина на свободния пробег и голямата честота на ударните взаимодействия.

Отклонението от LTE се оценява чрез относителната разлика в температурите на тежката T_g и леката T_e компоненти на плазмата по следната формула – критерий на Finkelnburg и Maecker (1956):

$$(1) \quad FM = \frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{m_g}{4 m_e} \frac{W_E^2}{W_K^2} = \frac{m_g}{4 m_e} \frac{(\lambda_e e E)^2}{\left(\frac{3}{2} k T_e\right)^2},$$

където $W_E = \lambda_e e E$ е енергията, която един електрон получава, изминавайки предоставения му свободен пробег λ_e по направление на електрическото поле E ; $W_K = 3/2 k T_e$ – средната стойност на кинетичната енергия на топлинното движение на електроните.

Отклонението от LTE е предопределено от голямата разлика, съществуваща между масата на електрона m_e и масата на тежките частици m_g ($m_g = m_i \cong m_n$). Масата на най-лекия еднозаряден йон (протона) е по-голяма от масата на електрона повече от 1836 пъти. Съществено отклонение от LTE няма да има само ако енергията придобита от електрическото поле W_E е пренебрежимо малка спрямо кинетичната енергия на електрона W_K , уравн. 1.

Отклонението от LTE е толкова по-голямо, колкото енергията, получена от електрическото поле, е по-голяма от енергията на хаотичното топлинно движение. В този случай, насоченото движение (или редът) доминира над топлинното движение (хаоса). От уравн. 1 става ясно, че неравновесната въздушна плазма съществува при голям среден свободен пробег λ_e на електроните (ниско налягане или плътност на електроните), големи стойности на електрическото поле E и малка енергия на топлинното движение. Така например, стационарен дифузен неравновесен DC електрически разряд се получава при електронна концентрация $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (2 000 K), докато равновесната електронна концентрация при тези условия е с шест порядъка по ниска - $n_e = 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$.

След като J. Roth (2001) поставя в центъра на вниманието нетермичната технологична плазма, то R. Barker (2005) прави следващата стъпка – въвежда понятието неравновесна технологична плазма, което отразява причината за нетермичния характер на студената плазма. В тази работа ние употребяваме полученото разпространение в българския език понятие студена плазма. Концепцията за студената плазма включва нейната неравновесност и нетермичност.

FM- критерият може да бъде модифициран като се отчете зависимостта на средната дължина на свободния пробег на електрона λ_e от концентрацията на частици n (или от налягането $p = n k T$) и сечението на ударно взаимодействие на електрона σ_e :

$$(2) \quad FM = \frac{T_e - T_g}{T_e} = a \frac{m_g}{m_e} \left(\frac{e}{\sigma_e}\right)^2 \left(\frac{1}{k T_e}\right)^2 \left(\frac{E}{n}\right)^2$$

или при постоянна температура $T = T_0 = const$:

$$(3) \quad FM = \frac{T_e - T_g}{T_e} = a \frac{m_g}{m_e} \left(\frac{T_g}{T_e}\right)^2 \left(\frac{e}{\sigma_e}\right)^2 \left(\frac{E}{p}\right)^2.$$

При постоянно налягане ($p = const$: при атмосферно налягане $p = p_0$):

$$(4) \quad FM = \frac{T_e - T_g}{T_e} = a \frac{m_g}{m_e} \left(\frac{T_g}{T_e}\right)^2 \left(\frac{e}{p_0}\right)^2 \left(\frac{E}{\sigma_e}\right)^2,$$

или приведенният интензитет (E/σ_e) определя изцяло степента на неравновесност на разряда при тези условия ($T = T_0 = const$; $p = p_0 = const$).

Направеният анализ води до формулирането на три различаващи се подхода за подбуждане или запалване на неравновесен електрически разряд при атмосферно (или високо) налягане, които произтичат от FM- критерия и определят високия относителен интензитет на променливото електрическо поле, уравн. 2, 3 и 4:

- чрез локално увеличаване интензитета на електрическото поле E в непосредствена близост до електрода с малка кривина – коронен разряд;

- чрез тотално увеличаване интензитета на електрическото поле E в резултат от използването на диелектрическа бариера с висока диелектрична проникваемост – бариерен разряд;

- чрез комбинираното увеличаване на интензитета на електрическото поле E – асиметричен или коронен бариерен разряд.

4. Магнитно стимулиран бариерен разряд

Подвижността на електроните (англ. *electron mobility*), предизвикана от действието на електрическото поле E се дефинира чрез дрейфовата им скорост u : $\mu_e = u/E$. За електроните е съществено това, че поради малката им маса те отдават незначителна част от енергията си при еластични ударни взаимодействия, което определя появата на насочено движение даже в слаби електрически полета, като средната им кинетическа енергия превишава значително енергията на тежката компонента. Подвижността на електроните зависи от приведенния интензитет на електрическото поле E/n и от вида на газа.

Подвижността на електроните μ_e е свързана с коефициента на топлинна дифузия D_e чрез формулата на Einstein:

$$(5) \quad \frac{e D_e}{\mu_e} = \left(\frac{2}{3}\right) \zeta_c,$$

където ζ_c е характеристичната енергия на електроните, която е близка до средната им енергия, и в слаби електрически полета точно съвпада с нея (максвелово разпределение по скорости – класическа плазма): $\zeta_c = (3/2) k T_e$.

Студената плазма е квазиинертна класическа плазма, което означава, че характеристичната енергия на електроните е равна на средната им енергия. FM- критерият може да бъде представен в този случай по следния начин:

$$(6) \quad FM = \frac{T_e - T_g}{T_e} = b \frac{m_g}{m_e} \left(\frac{1}{\sigma_e}\right)^2 \left(\frac{\mu_e}{D_e}\right)^2 \left(\frac{E}{n}\right)^2,$$

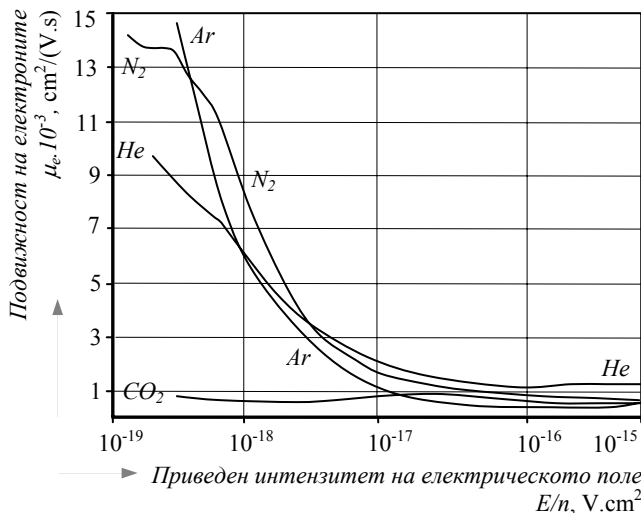
или увеличената подвижност на електроните спрямо тяхната дифузия увеличава в значителна степен неравновесността на разряда.

Подвижността на електроните зависи от приведенния интензитет на електрическото поле E/n и газа, в който се развива електрически разряд. Приведеният интензитет E/n заема стойност 10^{-15} V cm^2 при 10 kV/cm ($U = 10 \text{ kV}$, $d = 1 \text{ cm}$) и концентрация на частици $2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ($1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), на която отговаря подвижност на електрона под $0.001 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$, фиг. 1.

Внасянето на бариерния разряд във външно постоянно магнитно поле добавя ново силово въздействие върху електроните и увеличава тяхната подвижност. Независимо от направлението на външното магнитно поле – надлъжно или напречно (магнетронен ефект), то се явява инструмент за увеличаване на неравновесността на атмосферния бариерен разряд. В този смисъл се възприема представата за магнитна стимулация на разряда при високи налягания.

Въпреки подробното описание на магнетронния ефект, неговото практическо използване, [1–5], както и магнитното

стимулиране на бариерните разряди остава неизвестна и неизползвана възможност за управление на тяхната неравновесност.



Фиг. 1. Изменение на подвижността на електроните μ_e в зависимост от приведената стойност на електрическото поле E/n .

5. Влияние на собственото магнитно поле

Изследвания върху получаването на хомогенен атмосферен бариерен разряд определят условията за получаването му така:

- съществуват, или се появяват, множество електрони, които стават начало на паралелно развиващи се електронни лавини – лавинен стадий на разряда;
- преходът към стримерна форма на разряда се осъществява при достигане на критична стойност на т. нар. критерий на Meek ($\alpha \cdot d \geq 20$, $n_e \geq 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $E_0 = 26 \text{ kV/cm}$);
- електрическото взаимодействие между две съседни движещи се лавини затруднява прехода към стримерна форма на развитие на разряда, което означава генерално това, че взаимодействието между паралелно развиващите се лавини отнема към по-висок критичен интензитет прехода към стримерната форма на разряда, [1, 4 и 5].

Формираните представи за развитието на бариерния разряд се изграждат изключително върху електростатичното взаимодействие между обемни заряди, диелектричната бариера и електродите. Ако се отчете динамиката на развитие на микроразрядите, на лавинния и на стримерния стадий, то може да се предполага, че електромагнитните взаимодействия също така трябва да оказват съществено влияние върху формите и развитието на бариерния разряд. Времетраенето на лавинния стадий е около 10 ns, докато времетраенето на катодно насочения стример е около 1 ns, при живот на микроразряда до 40 ns. Плътноста на тока може да достигне до $0.1 \div 1.0 \text{ kA/cm}^2$ при $n = 10^{14} \div 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Максималният ток достига до 0.1 A, [1, 3 и 5].

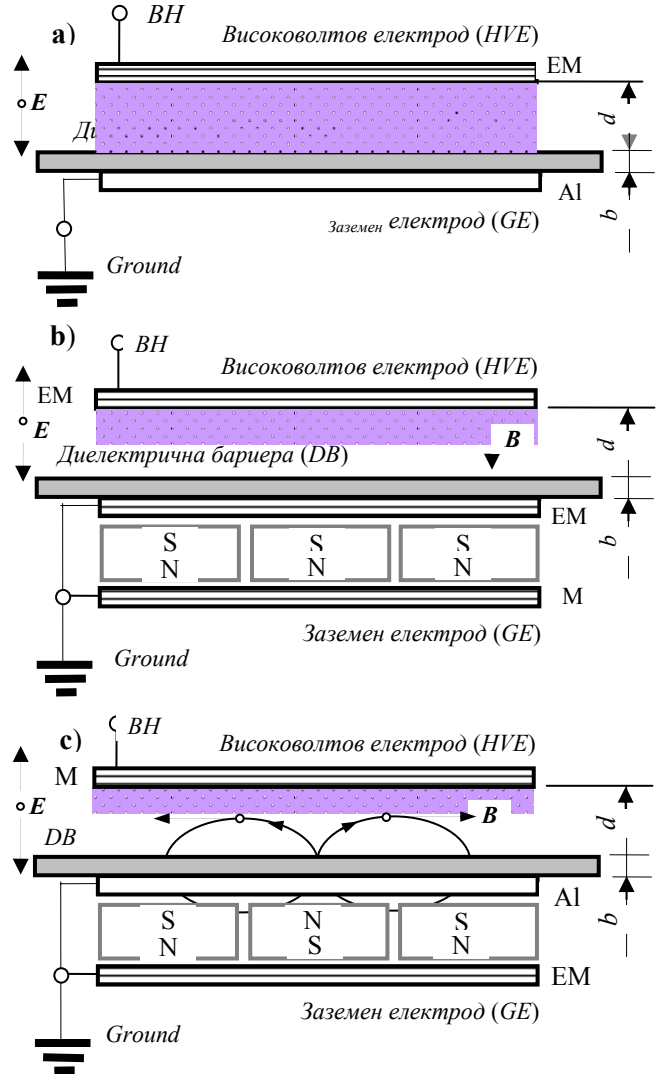
Тази наша теза е проверена тук чрез внасянето на феромагнитен електрод в областта на развитие на бариерния разряд и доказване на неговата работоспособност, [8, 9].

6. Експериментални изследвания

Изследванията се провеждат върху плоско-паралелна (копланарна) електродна система чрез външната характеристика на атмосферния бариерен разряд (средна стойност на тока – ефективна стойност на пада на напрежението върху електродната система), снета при дискретно изменение на въздушната (работната) междина d : 1, 3, 6, 9, 12 и 15 mm.

Разработени са четири варианта на копланарна електродна система: *първият*, с два алуминиеви електрода (Al), (Al-Al); *вторият*, с един феромагнитен електрод (EM) и един алуминиев електрод (Al), (Fe-Al), фиг. 2a; *третият*, с феромагнитни електроди (EM) и външно постоянно магнитно поле, насочено аксиално на електрическото поле, (S-S-S), фиг. 2b; *четвъртият*, с един феромагнитен електрод (EM) и външно постоянно

магнитно поле, насочено радиално спрямо електрическото поле, (S-N-S), фиг. 2c.



Фиг. 2. Атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд в копланарна електродна система с една стъклена бариера при постоянна геометрия на електродната система: **a** – електродна система с един феромагнитен електрод-магнитопровод (EM) от студено валцувана електротехническа стомана с дебелина $d = 4 \times 0.35 \text{ mm}$; **b** – електродната система с добавена триполюсна магнитна система от вида S-S-S; **c** – електродната система с добавена триполюсна магнитна система от вида S-N-S.

Al – алуминиев електрод; EM – феромагнитен електрод-магнитопровод; M – феромагнитен магнитопровод

Всички феромагнитни магнитопроводи (M) и електроди (EM) се изработват от студено валцувана електротехническа неориентирана стомана М 250-35А (БДС EN 10106:2007) с параметри : 1.5 T, 50 Hz, 2.5 W/kg. Набират се от четири ламели изрязани от студено валцуваната електротехническа стомана с обща дебелина $\delta = 4 \times l = 4 \times 0.35 = 1.4 \text{ mm}$, в съответствие с предшествващи скринингови изследвания, [8, 9].

Диелектричната бариера е изработена от лист алкално стъкло с дебелина $b = 3 \text{ mm} = \text{const}$. Разположена е асиметрично в близост до единия от електродите, фиг. 2.

Разработените електродни системи, които се различават от базовата копланарна система, състояща се от два алуминиеви електрода, позволяват да бъдат разкрити следните влияния върху външната характеристика на бариерния разряд:

- да се установи експериментално влиянието на феромагнитна среда (единия от двата електрода) върху различните стадии на развитие на бариерния разряд;

- да се установи характера на влиянието на външно магнитно поле, насочено по два характерни начина спрямо електрическото поле, и се потвърди издигнатата въз основа на теоретични предпоставки хипотеза.

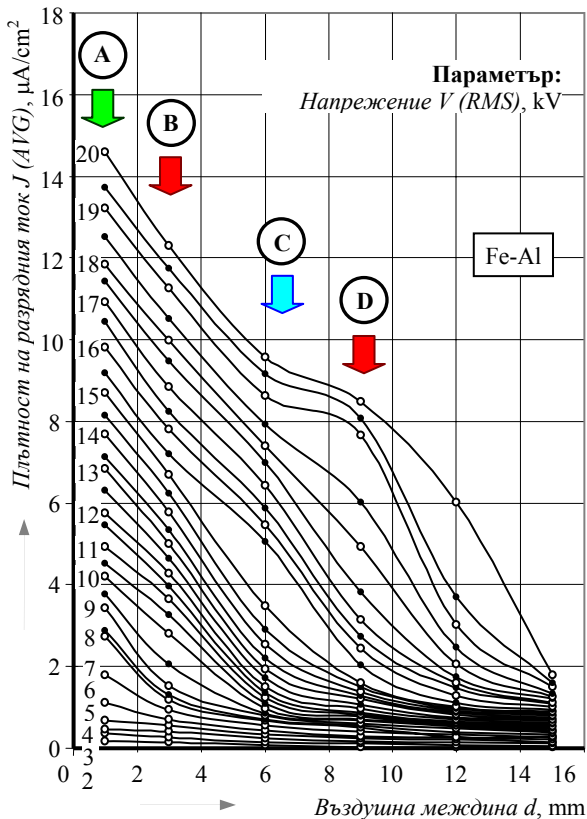
Средната стойност на плътността на тока (A/G) се измерва директно при захранване на електродната система с напрежение с индустриална честота (50 Hz), а при известна активна площ на електродите ($S_E = 14\ 600\ \text{cm}^2$) се изчислява съответната плътност на тока. Повърхнинната плътност на активната мощност p_S се изчислява по известната методика на Динев-Господинова, [6].

Активната мощност се възприема като мярка не само на елементарните процесите в плазмата (дисоциация, йонизация, рекомбинация), но и на всички химични промени, протичащи с обмен на електрони вътре в обема на разряда и върху повърхността на потопените в плазмата заготовки. В този смисъл, зависимостта на повърхнинната плътност на мощността p_S от приложеното напрежение U върху електродната система се разглежда като основна технологична характеристика, [6].

4. Експериментални резултати и дискусия

Външните характеристики на бариерния разряд (в координатна система „плътност на тока – напрежение“), за трите изследвани случая на магнитно стимулиране, са представени на фиг. 3, 4 и 5.

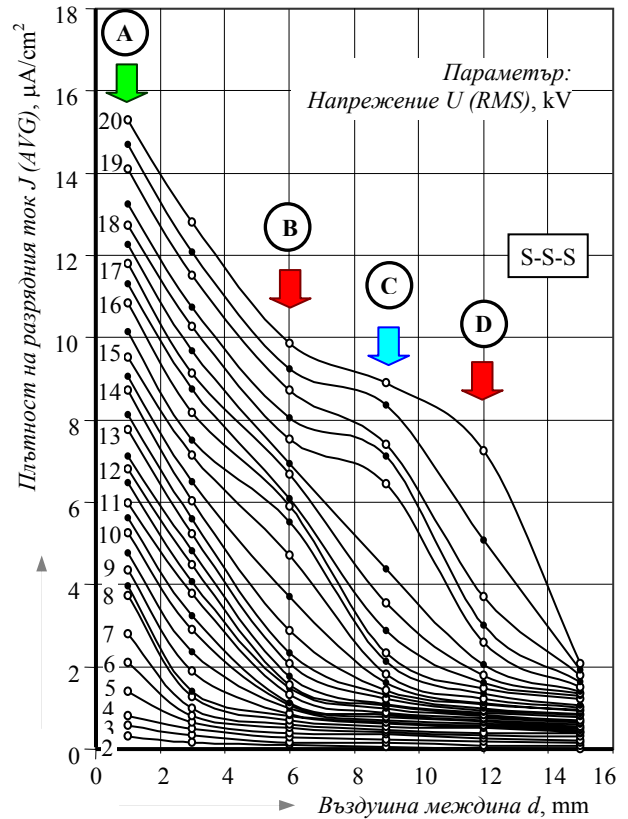
Технологичните характеристики на магнитно стимулирания бариерен разряд, също така за трите изследвани случая, са представени, съответно на фиг. 6b и фиг. 7. Представена е още, за сравнение, и технологичната характеристика на бариерен разряд, който гори в ко-планарна електродна система между два алуминиеви електрода без магнитна стимулация, фиг. 6a.



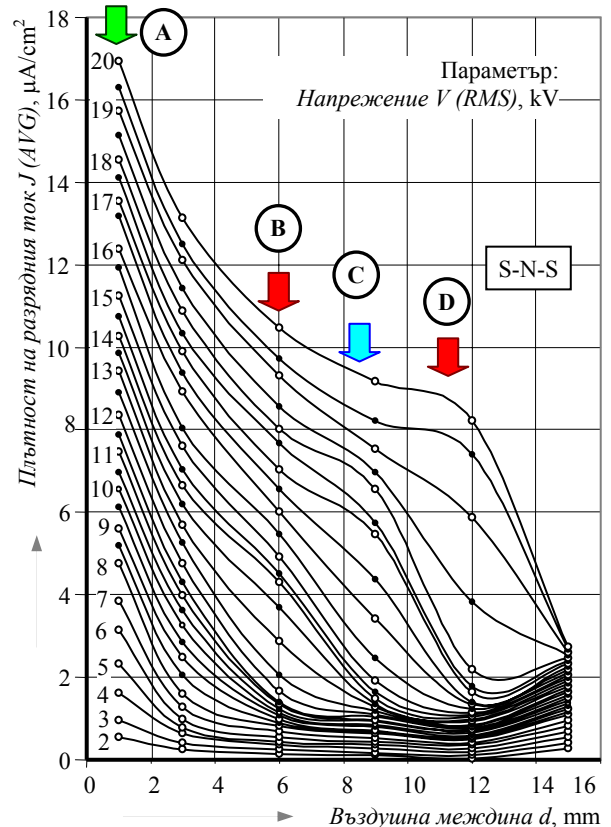
Фиг. 3. Външна характеристика на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд в ко-планарна електродна система Fe-Al, съгласно фиг. 2a.

Едно сравнение между двата вида характеристики - външната и технологичната, от гледна точка на етапите, през които преминава бариерния разряд при изменение на въздушната междина d , на произведението ($p \cdot d$) и на характера на горене на разряда, позволява да бъдат разкрити предимствата

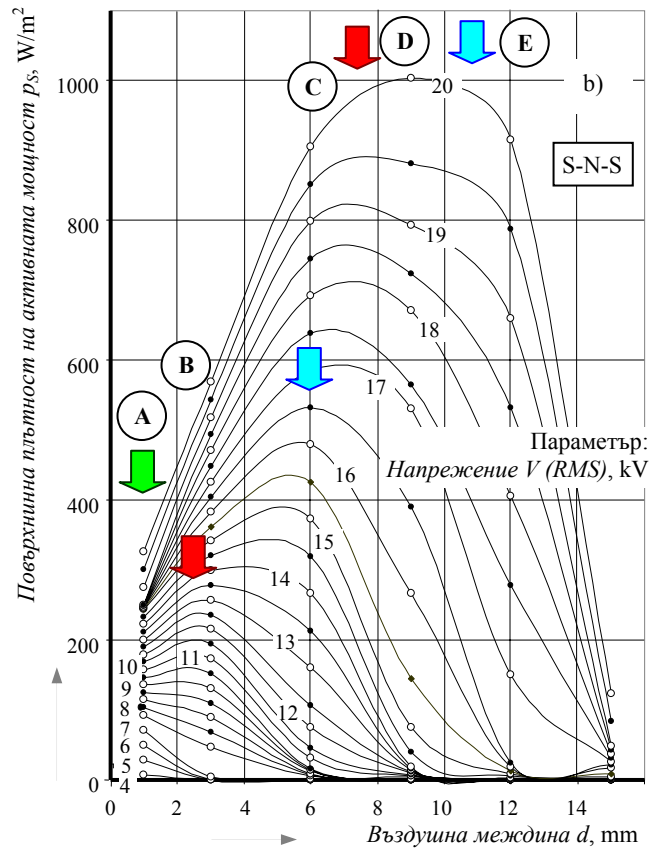
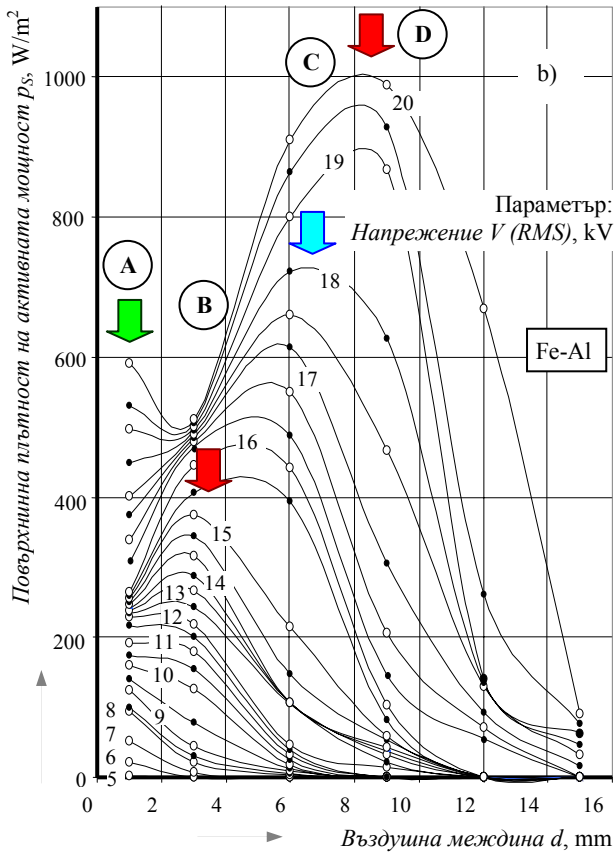
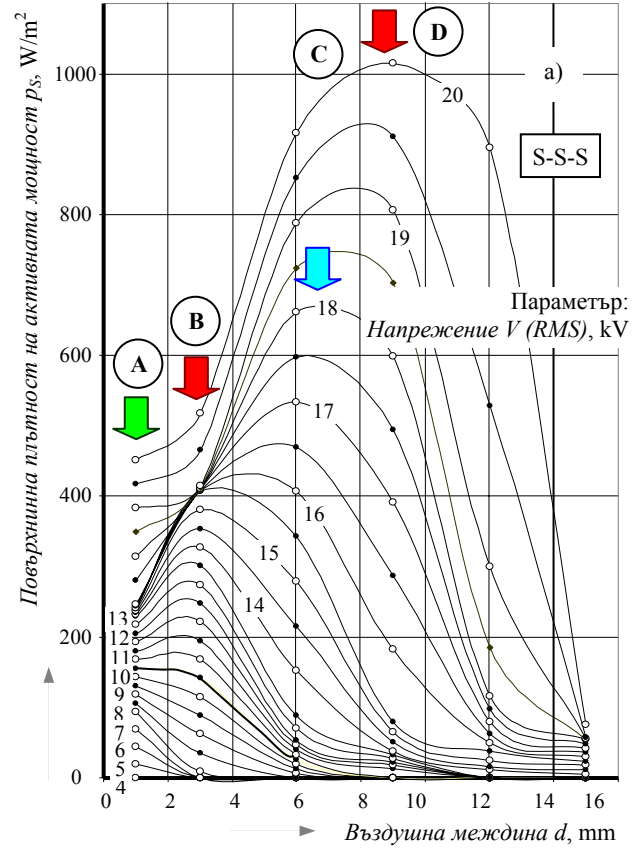
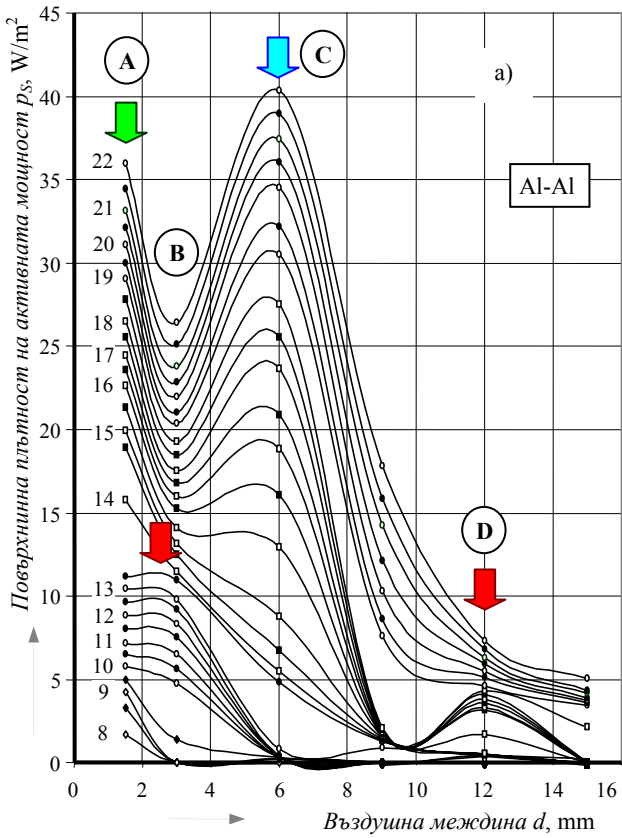
на технологичните характеристики, които представят по-добре бариерния разряд.



Фиг. 4. Външна характеристика на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд в ко-планарна електродна система с полюсна конфигурация от вида S-S-S, съгласно фиг. 2b.



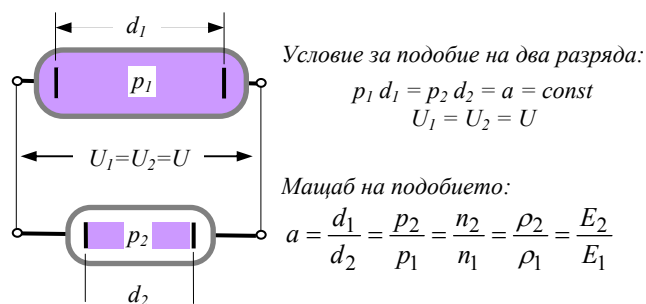
Фиг. 5. Външна характеристика на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд в копланарна електродна система с полюсна конфигурация от вида S-N-S, съгласно фиг. 2c.



Фиг. 6. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен бариерен разряд в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера b : a – с немагнитни (алуминиеви) електроди; b – с феромагнитен електрод, намиращ се в пряк контакт с разряда.

Фиг. 7. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера b : a – с конфигурация на полюсите S-S-S; b – с конфигурация на полюсите S-N-S.

Могат да бъдат сравнени по отделно фиг. 3 с фиг. 6b; фиг. 4 с фиг. 7a и фиг. 5 с фиг. 7b.



Фиг. 8. Подобие на два електрически разряда, които се запалват при едно и също напрежение.

Изменението на разстоянието d , при постоянно налягане (p_0) и температура (T_0), нарушава подобие на бариерните разряди – те не са подобни и се запалват и горят по различен начин – технологичната характеристика показва различните стадии, през които преминават тези силно различаващи се разряди. Нещо повече, ясно се отличават различните механизми на горене – първият максимум на p_S при междини около $1 \div 1.5 \text{ mm}$ се определя от лавинния характер на разряда и може да се приеме като квазихомогенна форма на горене на разряда; вторият и другите максимуми се определят от последователната поява на катодно насочени (анодни) стримери и на анодно насочени (катодни) стримери. Трудността за идентифициране, както и появата на повече характерни максимуми, може да се свърже с разделното участие на процеси, свързани с дисоцирането и йонизирането на кислорода и азота.

Идентификацията на максимумите на p_S върху базовата технологична характеристика, е следната, фиг. 6а: **A** – лавинна форма на разряда; **B** и **C** – стримерни форми (анодни стримери) на горене на разряда, съответно за O_2 и N_2 ; **D** – стримерна форма (катодни стримери), съответно за O_2 – отсъства такава форма за N_2 .

Феромагнитният електрод (ЕМ) влияе съществено върху лавинната форма на разряда (**A**) като рязко увеличава повърхнинната плътност на активната мощност p_S от 5 W/m^2 на 159 W/m^2 , фиг. 6б. Добавянето на външно магнитно поле не добавя съществено изменение към тази промяна, независимо от нейното направление, съответно 140 W/m^2 (аксиално) и 145 W/m^2 (радиално), фиг. 6а и б. Критичната област на прехода към стримерна форма остава между 9.5 и 10 kV , като само при случая на радиално поле тя слиза към 8 kV , фиг. 7б.

Стримерните форми на бариерния разряд (максимумите **B**, **C**, **D**), обаче, се влияят съществено, както от феромагнитния електрод, фиг. 6б, така и от действието на външното постоянно магнитно поле, фиг. 7. Във всички случаи специфичната мощност p_S нараства по различен начин за различните максимуми, но при всички случаи повече от десет пъти. Някои от максимумите се разширяват по оста на напрежението, а в един от случаите – при конфигурация на магнитните полюси S-N-S – се появява втория от максимумите (**D**) при напрежения под 20 kV , определящи преминаването към анодно насочени стримери, свързани с поведението на N_2 , фиг. 7б.

4. Заключение

Експерименталните изследвания върху магнитното стимулиране на атмосферен бариерен разряд, който се запалва и гори в плоско-паралелна електродна система, чрез използването на феромагнитен електрод от изотропна студено валцувана електротехническа ламарина и на постоянно магнитно поле, насочено по различен начин спрямо електрическото поле на разряда, позволяват да бъдат формулирани следните основни изводи:

- технологичната характеристика на атмосферния бариерен разряд носи интегрално информация за всички елементарни процеси, които протичат с обмен на електрони вътре в обема на разряда и върху повърхностите, потопени в него;

- технологичната характеристика позволява още да бъде разкрит приноса на различните форми на горене на бариерния

разряд (лавинна, стримерна), в зависимост от приложеното напрежение и размера на въздушната междина, върху повърхнинната плътност на активната мощност и върху структурата на разряда – технологичната характеристика трябва да се представи в координати на повърхнинната плътност на активната мощност и размера на въздушната междина, при постоянна стойност на приложеното напрежение върху електродите;

- използването на феромагнитен електрод, намиращ се в непосредствен контакт с разряда, влияе съществено преди всичко върху нарастването на повърхнинната плътност на мощността и освен това върху хомогенността и структурата на атмосферния бариерен разряд;

- външното постоянно магнитно поле, създадено от две характерни полюсни конфигурации, образувани от постоянни магнити (стронциев ферит), влияе съществено върху стойността на повърхнинната плътност на активната мощност, като променя преди всичко формата и разположението на характерните максимуми по координатната ос на размера на въздушната междина;

- влиянието на външното постоянно магнитно поле е значително по-силно изразено при максимумите, отговарящи на появата на различни по природа стримери – анодни и катодни, (кислородни или азотни), т.е. при по-големите въздушни междини;

- магнитната стимулация на атмосферния бариерен разряд представлява нов инструмент за ефективно увеличаване на неговата неравновесност при високи налягания.

Благодарности

Тази работа е реализирана при изключителната финансова подкрепа на Националния фонд за научни изследвания към Министерството на образованието, младежта и науката чрез изследователския проект ДО-02-11 ЕФ/2009.

Литература

1. Roth, J. Industrial Plasma Engineering: Application of non-thermal plasma processing. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001.
2. Kögelschatz, U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Plenum Publishing Corporation, March 2003, Vol. 23, No. 1, pp. 1÷46.
3. Becker, K., U. Kögelschatz, K. Schoenbach, R. Barker (Eds). Non-equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2005.
4. Shishoo, R. (Ed.). Plasma Technologies for Textile. Cambridge: Woodhead, 2007.
5. Fridman, A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008.
6. Dineff, P., D. Gospodinova. The Surface Density of the Power as a basic Parameter of the Plasma-chemical Modification of Materials in a Barrier Electrical Discharge. X. International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems "ELMA '02". Sofia, Bulgaria, September 13÷14, 2002. Proceedings of Papers, 2002, Vol. I, pp. 304÷310.
7. Dineff, P., D. Gospodinova. Magnetron Dielectric Barrier Air Discharge at Low Frequency. XLII. International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies "ICEST '07", Bitola, Macedonia, June 24÷27, 2007. Proceedings of Papers, 2007, Vol. 2, PO III, pp. 811÷814.
8. Динев, П., Д. Господинова. Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд във вакуум. XXV. Юбилейна научна конференция с международно участие „МТФ 2007“, 14÷16 септември 2007, Созопол, България. Сборник с доклади, 2007, том 1, стр. 238÷244.
9. Динев, П., Д. Господинова. Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд при атмосферно налягане. XXV. Юбилейна научна конференция с международно участие „МТФ '07“, 14÷16 септември 2007, Созопол, България. Сборник с доклади, 2007, том 1, стр. 232÷237.