

## РЕЗЮМЕТА

### на рецензираните публикации на български и английски език

на научните трудове на гл. ас. д-р Мариана Атанасова  
представени за участие в конкурса за доцент по ПН „Информатика и компютърни науки  
(Информатика)“, обявен в ДВ, бр.32 от 16.04.2021 г.

1. **B1.** M. Atanasova, E. Benova, G. Degrez, J. van der Mullen, Modelling of Argon Cold Atmospheric Plasmas for Biomedical Applications, Journal of Physics: Conference Series, vol: 982, 2018, article number: 12006, ISSN (print): 1742-6588, ISSN (online): 1742-6596, doi:10.1088/1742-6596/982/1/012006

**Abstract.** Plasmas for biomedical applications are one of the newest fields of plasma utilization. Especially high is the interest toward plasma usage in medicine. Promising results are achieved in blood coagulation, wound healing, treatment of some forms of cancer, diabetic complications, etc. However, the investigations of the biomedical applications from biological and medical viewpoint are much more advanced than the studies on the dynamics of the plasma. In this work we aim to address some specific challenges in the field of plasma modelling, arising from biomedical applications – what are the plasma reactive species' and electrical fields' spatial distributions as well as their production mechanisms; what are the fluxes and energies of the various components of the plasma delivers to the treated surfaces; what is the gas flow pattern? The focus is on two devices, namely the capacitive coupled plasma jet and the microwave surface wave sustained discharge. The devices are representatives of the so called cold atmospheric plasmas (CAPs). These are discharges characterized by low gas temperature – less than 40°C at the point of application – and nonequilibrium chemistry.

**Резюме.** Биомедицинските приложения са една от най-новите области на приложение на плазмите. Особено голям е интересът към прилагането на плазмено третиране в медицината. Обещаващи резултати са постигнати в кръвосъсирването, заздравяването на рани, лечението на някои форми на рак, диабетни усложнения и др. Обаче, биологичните и медицински изследванията свързани с плазмените приложения са много по-напреднали отколкото проучванията върху случващото се в плазмата. В тази работа се стремим да разгледаме някои специфични предизвикателства в областта на моделирането на плазми, произтичащи от биомедицинските приложения, като например какви са пространствените разпределения на активните частици и електрическите полета, както и какви са техните механизми на възникване; какви са потоците и енергиите на различните компоненти на плазмата при достигането на третираните повърхности; какво е разпределението на газовия поток. Спрели сме се върху две устройства, а именно капацитивно свързан плазмен душ и микровълнов факел поддържан от повърхнинна вълна. Устройствата са представители на така наречените студени атмосферни плазми (САП). Това са разряди, характеризиращи се с ниска температура на газа, по-ниска от 40°C в точката на приложение, и неравновесна химия.

2. **B2.** E. Benova, P. Marinova, M. Atanasova, T. Petrova, Surface-wave-sustained argon plasma kinetics from intermediate to atmospheric pressure, J. Phys. D Appl. Phys., vol: 51, issue: 47, 2018, article number: 474004, ISSN (print): 0022-3727, ISSN (online): 1361-6463, doi:10.1088/1361-6463/aae34d

**Abstract.** Surface-wave-sustained discharges (SWDs) can operate across a wide range of discharge conditions. From low to atmospheric pressure, plasma sustained by travelling electromagnetic wave is strongly non-equilibrium: the electron energy distribution function (EEDF) is non-Maxwellian; the gas temperature  $T_g$  (the translational temperature of the heavy particles) is much lower than the electron temperature  $T_e$ , i.e.  $T_g \ll T_e$ . In this paper, kinetic models of surface-wave-sustained argon plasma based on the Boltzmann equation and its momenta are presented for various discharge conditions (intermediate and high gas pressure and various discharge tube radii). The difference between

the models is in the energy level diagrams and the elementary processes taken into account for the various conditions. The models give the EEDF, transport and rate coefficients, mean electron energy, electron–neutral collision frequency for momentum transfer, mean power required to sustain an electron–ion pair in the discharge, and densities of considered atomic and molecular species as a function of the electron density  $n_e$ . Since the surface-wave plasma is spatially inhomogeneous, all these plasma characteristics change along the plasma column in the axial direction as the wave power absorbed by the electrons and electron density change. The goal is to compare the results obtained from the models with the experimental data and to determine their applicability depending on the SWD conditions.

**Резюме.** Повърхнинно-вълновите разрядите (ПВР), могат да работят в широк диапазон от разрядни условия. От ниско до атмосферно налягане, обаче, плазмата, поддържана от бягаща електромагнитна вълна, е силно неравновесна: функцията на разпределение на електроните по енергии (ФРЕЕ) не е максвелова; температурата на газа  $T_g$  (температурата на трансляционно движение на тежките частици) е много по-ниска от температурата на електроните  $T_e$ , т.е.  $T_g \ll T_e$ . В тази статия са представени кинетични модели, базирани на уравнението на Болцман и неговите моменти, на аргонова плазма поддържана от повърхнинна вълна при различни условия на работа (средно и високо налягане на газа и различни радиуси на разрядната тръба). Разликата в моделите е в диаграмите на енергийните нива и елементарните процеси, взети предвид за различните условия. Моделите дават ФРЕЕ, транспортни и скоростни коефициенти, средна енергия на електроните, честота на ударите с предаване на импулс между електрони и неутралаи, средна мощност необходима за поддържане на електрон–йонна двойка в разряда и плътности на разглежданите атомни и молекулни формирвания като функция на електронната плътност  $n_e$ . Тъй като повърхнинно-вълновата плазмата е пространствено нехомогенна, всички тези характеристики на плазмата се променят по протежение на плазмената колона в аксиална посока, поради това, че се променя мощността на вълната, погълната от електроните и електронната плътност. Целта е да се сравнят получените от моделите резултати с експерименталните данни и да се определи приложимостта на моделите при различни условия на ПВР.

3. **B3.** E. Benova, M. Atanasova, T. Bogdanov, P. Marinova, F. Krcma, V. Mazankova, L. Dostal, Microwave plasma torch at water surface, Plasma Medicine, vol: 6, issue: 1, 2016, pages: 59-65, ISSN (print): 19475764, ISSN (online): 1947-5772 doi: 10.1615/PlasmaMed.2016015862

**Abstract.** An argon plasma torch sustained by a 2.45 GHz electromagnetic wave can be in contact with a water surface or can penetrate inside the water, depending on the wave power. The propagation of the electromagnetic wave sustaining the discharge in water is problematic because the water relative dielectric permittivity greatly depends on the wave frequency and the temperature and varies between 6 and 86. At a wave frequency of 2.45 GHz and room temperature (20 °C) the dielectric permittivity is 80, which leads to the very fast decay of the electromagnetic wave. We have studied both theoretically and experimentally the plasma properties and the electrodynamics of the wave propagation when the gas discharge is in contact with water. Depending on the wave power and the gas flow, it is possible to produce plasma at a low (room) liquid temperature. Because of this, many radicals and chemically active particles can be produced even at low temperature. Depending on the operating conditions, this kind of discharges can have various applications in sterilization, surface energy change, and surface treatment, among others, including temperature-sensitive materials and liquids treatment.

**Резюме.** Аргоновият плазмен факел, поддържан от 2.45 GHz електромагнитна вълна, в зависимост от мощността на вълната, може да контактува с водната повърхност или да прониква във водата. Разпространението на електромагнитната вълна, поддържаща разряда, е проблемно във вода, тъй като относителната диелектрична проникваемост на водата силно зависи от честотата на вълната и температурата и варира между 6 и 86. При честота на вълната от 2.45 GHz и стайна температура (20 °C) диелектричната проникваемост е 80, което води до много бързо затихване на електромагнитната вълна. Изследвани са, както теоретично, така и експериментално, плазмените свойства и електродинамиката на разпространението на вълната за случаи, в които газовият разряд е в контакт с вода. В зависимост от мощността на вълната и газовия поток е възможно да се създаде плазма при ниска (стайна) температура на течността. При това много радикали и химически активни частици могат да се получат дори при ниска температура. В зависимост от експлоатационните условия, този вид разряди намират

разнообразни приложения, при стерилизация, промяна на повърхностната енергия и повърхностна обработка, включително на чувствителни на температура материали и течности.

4. **G1.** M. Atanasova, A. Sobota, W. Brok, G. Degrez, J. J. A. M. van der Mullen, Driving frequency dependence of capacitively coupled plasmas in atmospheric argon, *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol: 45, issue: 33, 2012, article number: 335201, ISSN (print): 0022-3727, ISSN (online): 1361-6463, doi: 10.1088/0022-3727/45/33/335201

**Abstract.** The role of the driving field frequency  $f_d$  of a cool atmospheric plasma (CAP) is investigated for values around  $f_d^* = 13.56$  MHz using a two-dimensional fluid numerical model applied to a parallel plate configuration. It is found that keeping the voltage constant the current amplitude roughly scales with  $f_d^2$ ; a tendency that can be understood using a RC circuit model of the plasma-sheath configuration. Moreover, it is seen that the electron density increases faster than the density of the excited species. This implies that plasma heating will increase relatively more than plasma reactivity so that the basic feature of the CAP, to be cool and reactive, will weaken for increasing  $f_d$ -values.

**Резюме.** Изследвана е ролята на честотата  $f_d$  на поддържащото поле на студена атмосферна плазма (САП) за стойности около  $f_d^* = 13,56$  MHz, като е използван двумерен числен флуиден модел, приложен за паралелна конфигурация на плочите, създаващи разряда. Установено е, че при поддържане на постоянно напрежение, амплитудата на тока се мащабира приблизително с  $f_d^2$ , тенденция, която може да се разбере с помощта на модел на RC верига на плазмения прикатоден слой. Освен това се вижда, че електронната плътност се увеличава по-бързо от плътността на възбудените частици. Това предполага, че нагряването на плазмата се увеличава относително по-бързо от реактивността на плазмата, което от своя страна означава, че основните характеристики на САП, да бъде студена и реактивна, отслабват с увеличаване стойността на  $f_d$ .

5. **G2.** M. Atanasova, E. Carbone, D. Mihailova, J. van Dijk, J J A M van der Mullen, E. Benova, G. Degrez, Two-Dimensional Modeling of the Active Species Flow Generated by an Atmospheric Plasma Jet, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol: 39, issue: 11, 2011, pages: 2348-2349, ISSN (print): 0093-3813, ISSN (online): 1939-9375, doi: 10.1109/TPS.2011.2147807

**Abstract.** A proper description of the flux of active species generated by cold atmospheric-pressure (AP) plasma jets is of crucial importance for plasma applications. To that end, a 2-D fluid model has been constructed to investigate the effect of the coupling between the plasma kinetics and plasma flow. It is shown that pure-argon cold AP RF plasma jets are not only controlled by diffusion losses but also by convective transport of argon molecular ions  $Ar_2^+$ .

**Резюме.** Правилното описание на потока от активни частици, генерирани от студени плазмените струи при атмосферно налягане (АН), е от решаващо значение за плазмените приложения. За тази цел е конструиран 2-D флуиден модел за да се изследва ефекта от взаимовръзката между плазмената кинетика и плазмения поток. Показано е, че студените радиочестотни (RF) плазмени струи при АН в чист аргон са управлявани не само от дифузионни загуби, но и от конвективното движение на молекулните йони на аргона  $Ar_2^+$ .

6. **G3.** E. Benova, M. Pencheva, The main properties of microwave Argon plasma at atmospheric pressure, *J. Phys.: Conference Series*, vol: 207, 2010, article number: 12023, ISSN (print): 1742-6588, ISSN (online): 1742-6596, doi: 10.1088/1742-6596/207/1/012023

**Abstract.** Plasma torch sustained by surface wave at atmospheric pressure is theoretically studied by means of 1D model. A steady-state Boltzmann equation in an effective field approximation coupled with a collisional-radiative model for high-pressure argon discharge is numerically solved together with Maxwell's equations for an azimuthally symmetric TM surface wave. The axial dependences of the electrons, excited atoms, atomic and molecular ions densities as well as the electron temperature, the mean power per electron and the effective electron-neutral collision frequency are determined. A strong dependence of the plasma properties on the discharge conditions and the gas temperature is obtained.

**Резюме.** Плазмен факел, поддържан от повърхнинна вълна при атмосферно налягане, е изследван теоретично с помощта на едномерен (1D) модел. Стационарното уравнение на Болцман в ефективно полето, в съчетание с ударно-радиационен модел на разряд в аргон при високо налягане, е решено числено заедно с уравненията на Максвел за азимутално симетрична повърхнинна напречна (TM) вълна. Определени се аксиалните зависимости на плътностите на електроните, възбудените атоми, атомните и молекулните йони, както и на електронната температура, средната мощност за електрон и ефективната честота на удари между електрони и неутрала. Получена е силна зависимост на свойствата на плазмата от условията на разряда и температурата на газа.

7. **G4.** M. Pencheva, E. Benova, I. Zhelyazkov, Surface wave propagation characteristics in atmospheric pressure plasma column, J. Phys.: Conference Series, vol: 63, 2007, article number: 12023, ISSN (print): 1742-6588, ISSN (online): 1742-6596, doi: 10.1088/1742-6596/63/1/012023

**Abstract.** In the typical experiments of surface wave sustained plasma columns at atmospheric pressure the ratio of collision to wave frequency ( $\nu/\omega$ ) is much greater than unity. Therefore, one might expect that the usual analysis of the wave dispersion relation, performed under the assumption  $\nu/\omega = 0$ , cannot give adequate description of the wave propagation characteristics. In order to study these characteristics, we have analyzed the wave dispersion relationship for arbitrary  $\nu/\omega$ . Our analysis includes phase and wave dispersion curves, attenuation coefficient, and wave phase and group velocities. The numerical results show that a turning back point appears in the phase diagram, after which a region of backward wave propagation exists. The experimentally observed plasma column is only in a region where wave propagation coefficient is higher than the attenuation coefficient. At the plasma column end the electron density is much higher than that corresponding to the turning back point and the resonance.

**Резюме.** В типичните експерименти с плазмени разряди поддържани от повърхнинни вълни при атмосферно налягане съотношението на честотата на удари между частиците към честотата на вълната ( $\nu/\omega$ ) е много по-голямо от единица. Следователно може да се очаква, че обичайният подход за анализ на дисперсионната зависимост на вълната, валиден в предположението  $\nu/\omega = 0$ , няма да даде адекватно описание на характеристиките на разпространение на вълната. За да изследваме тези характеристики, анализирахме дисперсионната зависимост на вълната за произволно съотношение  $\nu/\omega$ . Анализът включва фазови и дисперсионни вълнови криви, коефициент на затихване и фазова и групова скорости на вълната. Числените резултати показват, че във фазовата диаграма се появява точка на обръщане, след която съществува зона на разпространение на обратна вълна. Експериментално наблюдаваната плазмена колона е само в регион, където коефициентът на разпространение на вълната е по-висок от коефициента на затихване. В края на плазмената колона електронната плътност е много по-висока от тази, съответстваща на точките на обръщане и на резонанс.

8. **G5.** M. Pencheva, Ts. Petrova, E. Benova, I. Zhelyazkov, Modelling of microwave sustained capillary plasma column at atmospheric pressure, J. Phys.: Conference Series, vol: 44, 2006,

pages: 110-115, ISSN (print): 17426588, ISSN (online): 1742-6596, doi: 10.1088/1742-6596/44/1/013

**Abstract.** In this work we present a model of argon microwave sustained discharge at high pressure (1 atm), which includes two self-consistently linked parts – electrodynamic and kinetic ones. The model is based on a steady-state Boltzmann equation in an effective field approximation coupled with a collisional-radiative model for high-pressure argon discharge numerically solved together with Maxwell's equation for an azimuthally symmetric TM surface wave and wave energy balance equation. It is applied for the purpose of theoretical description of the discharge in a stationary state. The phase diagram, the electron energy distribution function as well as the dependences of the electron and heavy particles densities and the mean input power per electron on the electron number density and wave number are presented.

**Резюме.** В тази работа представяме модел на аргонов микровълнов разряд при високо налягане (1 atm), който включва две самосъгласувано свързани части - електродинамична и кинетична. Моделът се основава на стационарното уравнение на Болцман в ефективно полето, в съчетание с ударно-радиационен модел за аргонов разряд при високо налягане, числено решено в комбинация с уравнението на Максвел за азимутално симетрична ТМ повърхнинна вълна и уравнението за енергийния баланс на вълната. Моделът е приложен с цел теоретично описание на разряд в стационарно състояние. Представени са фазовата диаграма, функцията на разпределение на електроните по енергии, както и зависимостите на плътностите на електроните и тежките частици и средната приложена мощност на електрон от плътността на електроните и вълновото число.

9. **G6.** M. Pencheva, G. Petrov, Ts. Petrova, E. Benova, A collisional-radiative model of an argon surface-wave-sustained plasma at atmospheric pressure, *Vacuum*, vol: 76, issue: 2-3, 2004, pages: 409-412, ISSN (print): 0042207X, doi: 10.1016/j.vacuum.2004.07.048

**Abstract.** A collisional-radiative model of argon plasma column at atmospheric pressure sustained in capillary tube by high-frequency electromagnetic wave is presented. The model is based on simultaneously solving the electron Boltzmann equation, the set of particle balance equations for electrons and heavy particles, and the electron energy balance equation. Six blocks of excited levels are included in the model. The electron energy distribution function (EEDF), the mean energy, the axial electric field, the mean absorbed power per electron, the ion densities, the densities of excited atoms are obtained as functions of the electron number density. The model predicts that the excited levels are not in local thermodynamic equilibrium, which is in agreement with the experimental data.

**Резюме.** Представен е ударно-радиационен модел на аргонова плазма при атмосферно налягане, поддържана в капилярната тръба от високочестотна електромагнитна вълна. Моделът се основава на едновременното решаване на уравнение на Болцман за електроните, уравненията за баланс на електроните и тежките частици и уравнението за баланс на енергията на електроните. В модела са включени шест блока от възбудени нива. Функцията за разпределение на електроните по енергии (ФРЕЕ), средната енергия на електроните, аксиалното електрично поле, средната абсорбирана мощност на електрон, плътността на йоните и на възбудените атоми са получени като функции на плътността на електроните. Моделът прогнозира, че възбудените нива не са в локално термодинамично равновесие, което е в съгласие с експерименталните данни.