



Взаимодействие электромагнитного излучения с металлическими фрактальными кластерами

Часть 1

П. П. Мальцев

МЦАИ РАН, Москва, Россия

Приведены результаты исследований по влиянию размеров nanoостровков алюминия с длиной l при формировании фрактальных кластеров на полимерных нитях из волокон бензолных колец углерода на условия возникновения эффекта «высокопроводящего надповерхностного состояния» при пробое с величиной напряженности электрического поля 1,6 кВ/см. Проведен расчет толщины слоя при скин-эффекте в полимерных нитях с металлическими фрактальными кластерами для электромагнитного излучения с длиной волны λ и выполнении условия $l \ll \lambda$.

Ключевые слова: металлические фрактальные кластеры, наноразмерные капли алюминия, полимерные нити, плазма, надповерхностное высокопроводящее состояние, локализация фотонов

Статья поступила: 16.01.2025

Статья принята: 03.02.2025

СКИН-ЭФФЕКТ В ПОЛИМЕРНЫХ НИТЯХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ФРАКТАЛЬНЫМИ КЛАСТЕРАМИ

Следует отметить, что Джон Пендри в 1999 году предложил подход к описанию конкретных искусственно созданных материалов, основанный на том, что если композитный материал, состоящий из дискретных рассеивающих элементов, размер которых l много меньше длины волны излучения λ , то с точки зрения электродинамики можно рас-

Interaction of Electromagnetic Radiation with the Metal Fractal Clusters

Part 1

P. P. Maltsev

Inter-agency Center of Analytical Studies of the RAS, Moscow, Russia

This paper provides the results of studies on the influence of the aluminum nanoisland dimensions with a length l during the fractal cluster formation on the polymer threads using the carbon benzene ring fibers on the conditions for the occurrence of “highly conductive off-surface state” during breakdown with an electric field strength of 1.6 kV/cm. The layer thickness was calculated in the case of the skin-effect in polymer threads with the metal fractal clusters for electromagnetic radiation with a wavelength λ and fulfillment of condition $l \ll \lambda$.

Key words: metal fractal clusters, nanoscale aluminum droplets, polymer threads, plasma, off-surface highly conductive state, photon localization

Article received: 16.01.2025

Article accepted: 03.02.2025

SKIN-EFFECT IN THE POLYMER THREADS WITH THE METAL FRACTAL CLUSTERS

It should be noted that in 1999 John Pendry proposed an approach to describing the specific artificially created materials based on the fact that if a composite material consists of discrete scattering elements which size l is much smaller than the radiation wavelength λ , then electrostatically it can be considered as continuous within a limited frequency band, provided that $l \ll \lambda$.

In other words, a physical medium will be continuous in the electromagnetic sense if its properties can be described by the average parameters changing on a scale much larger than the dimensions of the components forming the material. Consequently, there is also an inverse problem: for a higher frequency of elec-

смагивать его как непрерывный в ограниченной полосе частот при условии $l \ll \lambda$.

Другими словами, физическая среда будет непрерывной в электромагнитном смысле, если ее свойства могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе намного большем, чем размеры компонентов, образующих материал. Следовательно, существует и обратная задача – для более высокой частоты электромагнитного излучения размеры элементов l композита должны быть более мелкими, вплоть до наноразмерных.

МИКРОПРОБОЙ ФРАКТАЛОВ ИЗ НАНООСТРОВКОВ АЛЮМИНИЯ РАЗМЕРОМ 100–1000 нм

Рассмотрим более детально свойства фрактальных кластеров для различных размеров наностроек из алюминия на полимерных нитях из волокон бензолных колец углерод, которые ранее обсуждались в [1–4].

Фотографии фрагментов полимерной нити с наностройками алюминия (белый цвет) приведены на рис. 1 при различном увеличении: а) 1 мкм; б) 10 мкм; в) 100 мкм, д) 1000 мкм, которые сделаны на растровом электронном микроскопе CAMSCAN-S4 с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками: Oxford INCA Energy 350 и INCA Wave 700 (Cambridge, Англия) в Центре высоких технологий ЦКП «Синхротрон» ФГУП Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [1–4].

На рис. 1а при увеличении 1 мкм хорошо видны наностройки алюминия (белого цвета) различного размера, которые можно сгруппировать в две характерные группы: первая состоит из образований вытянутой формы длиной 100–1000 нм; вторая – из шарообразной формы с диаметром 10–30 нм. Размеры наностроек алюминия могут иметь различные влияния на условия возникновения пробоя (разряда) над поверхностью полимерной нити «Русар».

tromagnetic radiation, the dimensions of elements l of the composite material must be smaller down to the nanoscale ones.

MICRO-BREAKDOWN OF FRACTALS MADE OF ALUMINUM NANOISLANDS WITH THE DIMENSIONS OF 100–1000 nm

Let us consider in more detail the properties of fractal clusters for various sizes of aluminum nanoislands on the polymer threads made of benzene ring carbon fibers that have been previously discussed in [1–4].

The photographs of the polymer thread fragments with aluminum nanoislands (white color) are shown in Fig. 1 at different magnifications: a) 1 μm ; b) 10 μm ; c) 100 μm , d) 1000 μm . The photographs were made by the CAMSCAN-S4 scanning electron microscope with the energy-dispersive and wave-dispersive attachments: Oxford INCA Energy 350 and INCA Wave 700 (Cambridge, England) at the High Technology Center of the Synchrotron Shared Research Facility of the Federal State Unitary Enterprise “Lukin Research Institute for Physical Problems of the National Research Center “Kurchatov Institute” [1–4].

In Fig. 1a (at a magnification of 1 μm), the aluminum nanoislands (white) of various sizes are clearly visible. They can be classified into two typical groups: the first one consists of elongated formations with the length

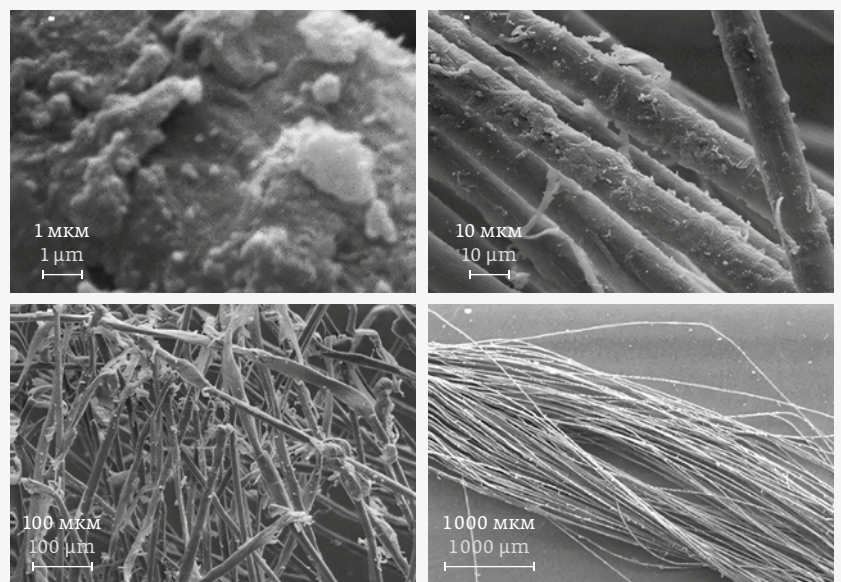


Рис. 1. Фрагменты полимерной нити с наностройками алюминия (белый цвет) с различным увеличением: а) 1 мкм; б) 10 мкм; в) 100 мкм; д) 1000 мкм
Fig. 1. Fragments of a polymer thread with aluminum nanoislands (white) with various magnifications: a) 1 μm ; b) 10 μm ; c) 100 μm ; d) 1000 μm .

Следует отметить, что расстояние, «пробиваемое» искрой в воздухе, зависит от напряженности электрического поля у поверхности электродов и их формы. Для сфер, радиус которых много больше разрядного промежутка, она считается равной 30 кВ/см, а для иголок с наноостриями составит 10 кВ/см [5].

Рассмотрим структуру нити заполненную вдоль полимерных волокон проводящими цепочками нерегулярных наноостровков алюминия с размерами 100–1000 нм и, допустим, с аналогичными размерами промежутков между ними. Такое геометрическое построение, может быть, будет являться причиной сильного снижения пробивного напряжения полимерной нити. Для исследований создадим образец с размерами наноостровков алюминия 100–1000 нм и определим значение величины напряжения при возникновении разряда (рис. 2).

Для эксперимента в качестве подложек для массива наноостровков алюминия использовались под-

of 100–1000 nm; the second one consists of spherical formations with a diameter of 10–30 nm. The sizes of aluminum nanoformations can have various effects on the conditions for a breakdown (discharge) over the Rusar polymer thread surface.

It should be noted that the distance broken down by a spark in the air depends on the electric field intensity at the surface of the electrodes and their shape. For the spheres which radius is much larger than the discharge gap, it is considered to be equal to 30 kV/cm, and for the needles with nanotips it will be 10 kV/cm [5].

Let us consider the thread structure filled along the polymer fibers with the conducting chains of irregular aluminum nanoislands with the dimensions of 100–1000 nm and similar gaps between them. Such a geometric structure may be the reason for a strong decrease in the breakdown voltage of the polymer thread. For research, we will prepare a sample with the aluminum nanoisland dimensions of 100–1000 nm and determine the voltage value when a discharge occurs (Fig. 2).

For an experiment, the sapphire substrates being the high-quality insulators, were used as the substrates for the array of aluminum nanoislands. When preparing a sample with an array of aluminum nanoislands on a sapphire substrate, the electron-beam lithography processes were used, including application of an electron-beam resist, pattern exposure, resist development, thin film application processes in a vacuum. Deposition of the bonding sites and aluminum nanoislands required an additional development of the remaining electron-beam resist in oxygen plasma and the surface cleaning.

After formation of the bonding sites (Fig. 3) using the electron beam lithography, the arrays of aluminum nanoislands with a thickness of up to 50 nm were generated in the gap (Fig. 4).

Then, the sampled structures with aluminum nanoislands on the rectangular sapphire substrates and an aluminum nanoisland array length of 1 cm between the bonding sites on both sides were studied. The size of the aluminum nanoisland was 122.7 nm, and the distance between the nanoislands was 64.49 nm (Fig. 4). The aluminum nanoislands on the sample were located in groups including from one to four nanoislands lengthwise (dark circles), with the several rows formed from them. The SEM image of the nanoisland array on the prepared sample is shown in Fig. 4.

The current-voltage characteristics (CVC) of samples with a set of aluminum nanoislands generated on a sapphire substrate were measured using the Curve Tracer IWATSU CS-3200 setup. It was shown that when increasing the constant voltage to 25 V, there is no cur-

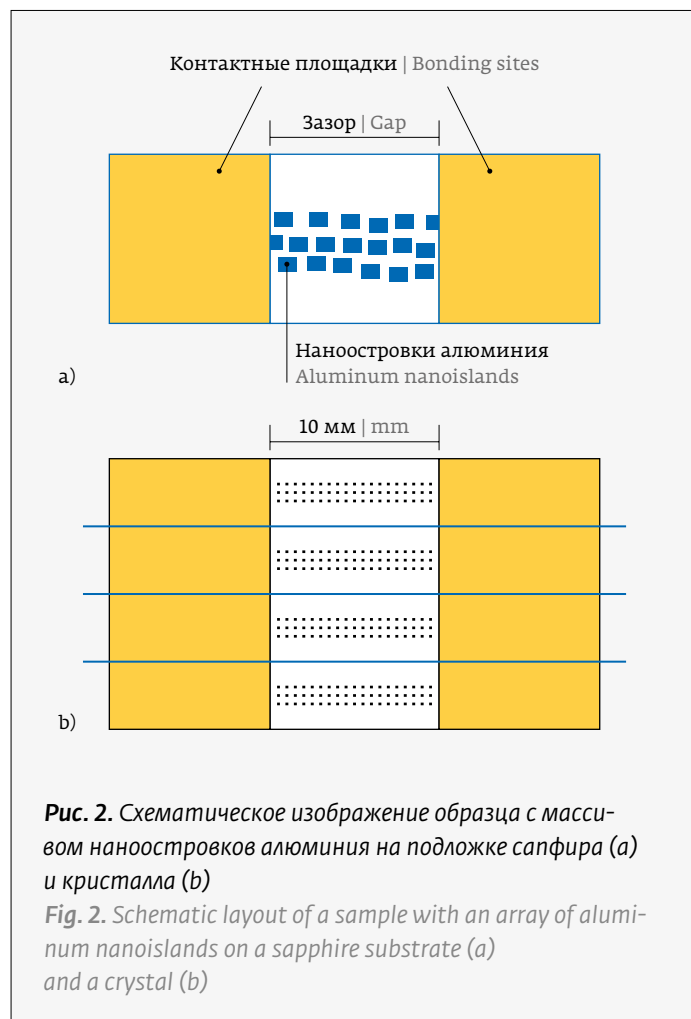


Рис. 2. Схематическое изображение образца с массивом наноостровков алюминия на подложке сапфира (а) и кристалла (б)

Fig. 2. Schematic layout of a sample with an array of aluminum nanoislands on a sapphire substrate (а) and a crystal (б)

ложки сапфира, являющегося хорошим изолятором. При изготовлении образца с массивом наноструктур алюминия на подложке сапфира использовались процессы электронно-лучевой литографии, включающие операции нанесения электронного резиста, экспонирование рисунка, проявления резиста, процессы нанесения тонких пленок в вакууме, а для осаждения контактных площадок и наноструктур алюминия – допоявка в кислородной плазме остатков электронного резиста и очистки поверхности.

После формирования контактных площадок (рис. 3) с помощью электронно-лучевой литографии в зазоре формируются массивы наноструктур алюминия с толщиной до 50 нм (рис. 4).

Затем были проведены исследования образцов структур с наноструктурами алюминия на подложках сапфира прямоугольной формы и длиной массива наноструктур алюминия 1 см между контактными площадками с двух сторон. Размер наноструктуры алюминия 122,7 нм, а расстояния между наноструктурами – 64,49 нм (рис. 4). Наноструктуры алюминия на образце расположены группами, в которые входило в длину от одного до четырех наноструктур (темные круги), а также из них формировалось несколько рядов. SEM-изображение массива наноструктур на изготовленном образце приведена на рис. 4.

Измерение вольтамперной характеристики (ВАХ) образцов с набором наноструктур алюминия, сформированных на подложке сапфира, проводились на установке Curve Tracer IWATSU CS-3200 и показали, что для ВАХ при увеличении постоянного напряжения до 25 В ток отсутствует, т.е. наноструктурный алюминиевый массив на подложке сапфира не проводит ток и композитная структура является изолятором.

Далее образцы испытывались на пробой импульсом напряжения на разработанной установке. Контакты на образце с каждой стороны были разделены на две половины (образец 1 и образец 2). Для обеспечения пробоя приходилось уменьшать расстояние между электродами на поверхности образцов (зазор между электродами) и затем проводился пересчет на 1 см. В результате исследований определено, что разряд в наноструктурном алюминиевом массиве на подложке сапфира происходит при напряжении 8–12 кВ/см, что соответствует известному пробойу иглы с наноразмерным радиусом закругления при 10 кВ/см, т.е. «искровому» разряду [5].

Таким образом, наноструктуры алюминия с размером 100–1000 нм при напряжении 1,6 кВ/см не могут сформировать условия для возникновения

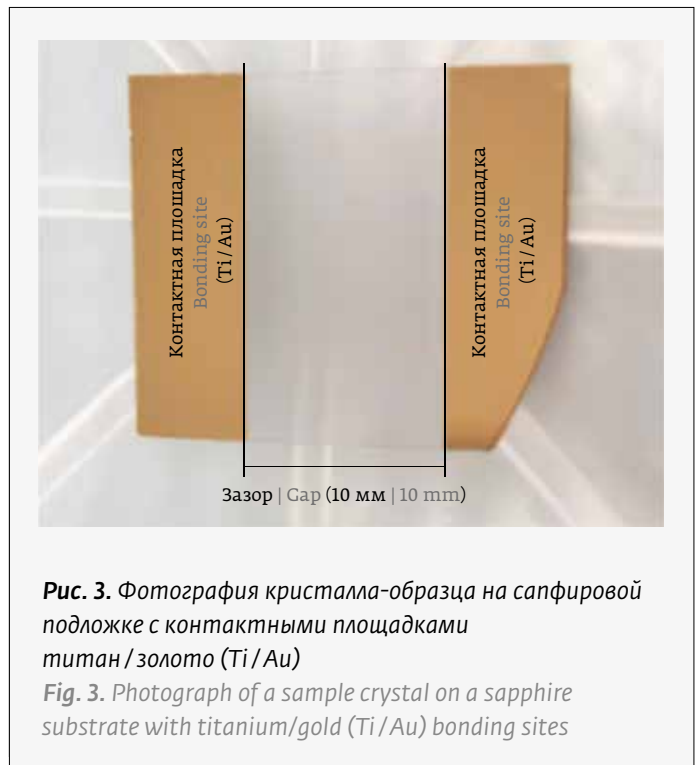


Рис. 3. Фотография кристалла-образца на сапфировой подложке с контактными площадками титан / золото (Ti/Au)

Fig. 3. Photograph of a sample crystal on a sapphire substrate with titanium/gold (Ti/Au) bonding sites

rent in terms of the CVC, i. e. the nanoisland aluminum array on the sapphire substrate does not conduct current and the composite structure is an insulator.

Then, the samples were subject to the breakdown test by a voltage pulse on the developed setup. The sample

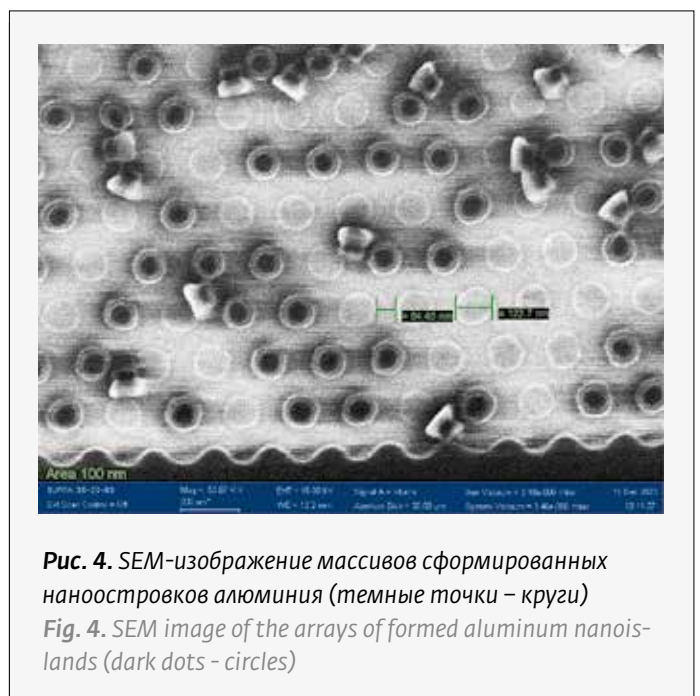


Рис. 4. SEM-изображение массивов сформированных наноструктур алюминия (темные точки – круги)

Fig. 4. SEM image of the arrays of formed aluminum nanoislands (dark dots - circles)

низкополевой эмиссии электронов, обнаруженные для фрактальных кластеров из алюминия на полимерной нити «Русар».

МИКРОПРОБОЙ ФРАКТАЛОВ ИЗ НАНООСТРОВКОВ АЛЮМИНИЯ РАЗМЕРОМ 10–30 нм

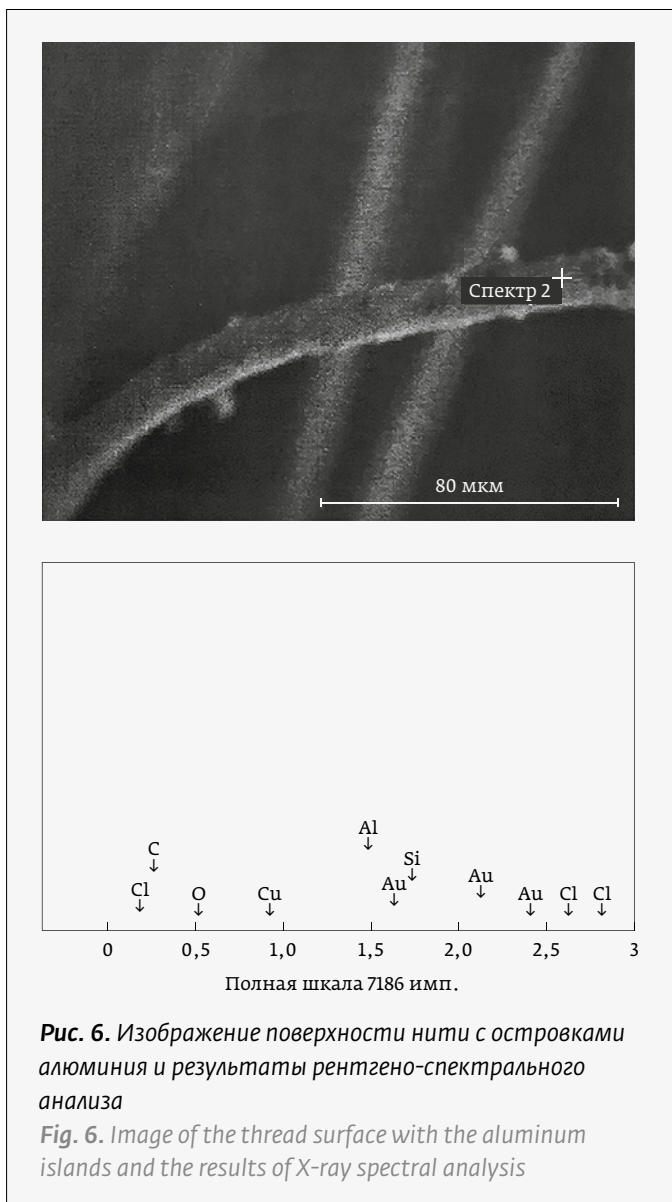
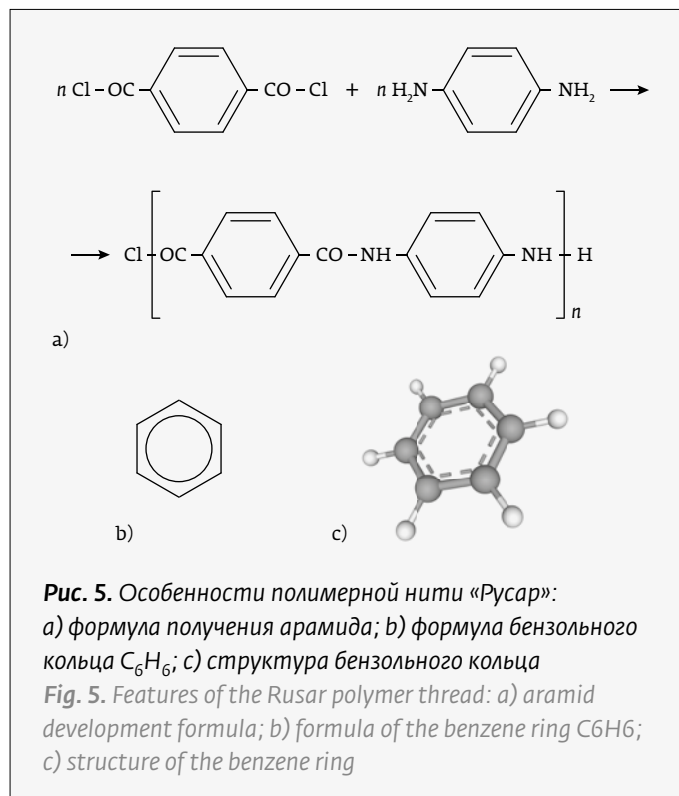
Можно предположить, что микропробой полимерных нитей связан с низкополевой эмиссией электронов при импульсном воздействии с длительностью 1–2 мс на полимерную нить из углеродных бензольных колец и происходит через наноструктуры шарообразной формы (наноклапты, сферы) алюминия (рис. 1а).

Рассмотрим особенности полимерной нити «Русар», на которой формируются фрактальные кластеры из наноклапты алюминия. Полимерная нить диаметром ≈ 1 мм сплетена из волокон ароматического полиамида диаметром ≈ 10 мкм – арамида (английское название: aramid, aromatic polyamide). Арамид представляют в виде длинной цепочки синтетического полиамида, в которой 85% амидных связей прикреплены непосредственно к двум ароматическим кольцам из углерода – бензола (C_6H_6) (рис. 5а).

Современное представление об электронной природе связей в бензоле основывается на гипотезе Лай-

pins were divided into two halves on each side (sample No.1 and sample No.2). To ensure breakdown, it was necessary to reduce the distance between the electrodes on the sample surface (the gap between the electrodes) and then recalculate it by 1 cm. As a result of the studies, it was determined that the discharge in the nanoisland aluminum array on the sapphire substrate occurred at a voltage of 8–12 kV/cm that corresponded to the known breakdown of a needle with a nanosized curvature radius at 10 kV/cm, i. e., a spark discharge [5].

Thus, the aluminum nanoislands with a size of 100–1000 nm at a voltage of 1.6 kV/cm cannot provide the conditions for the low-field electron emission discovered for the aluminum fractal clusters on the Rusar polymer thread.



нуса Полинга, который предложил изображать молекулу бензола в виде шестиугольника с вписанной окружностью (рис. 5b), подчеркивая тем самым отсутствие фиксированных двойных связей и наличие единого электронного облака, охватывающего все шесть атомов углеродного цикла (рис. 5c). Сторона шестиугольника бензола примерно равна $\approx 0,14$ нм или $0,154$ нм, толщина кольца примерно равна половине стороны шестиугольника, т.е. $\approx 0,07$ нм, внешний диаметр бензольного кольца примерно равен $\approx 0,28$ нм, а внутренний $\approx 0,21$ нм. Следует отметить, что диаметр атома алюминия равен $0,286$ нм, а площадь сечения атома по диаметру – $0,064$ нм².

На рис. 6 приведены фотографии анализа состава поверхности полимерной нити с наноструктурами алюминия и в таблице 1 показано, что основу полимерных нитей составляют углерод и кислород, а на поверхности проявляются отдельные включения алюминия (светлые включения). Измерения проводились в ЦКП «Синхротрон» ФГУП Научно-исследовательский институт Физических Проблем им. Ф.В. Лукина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

На рис. 1а видны шарообразные наноструктуры (наноклапты, сферы) алюминия с размерами 10–30 нм, которые могут объединять несколько сотен углеродных бензольных колец и создавать наноразмерные структуры алюминий/бензольное кольцо углерода. В какой-то части такой структуры может образоваться «наноточка» на поверхности полимерной нити.

Приведем пример образования сферических наноструктур при смачивании жидкостью твердой поверхности для формирования сферических капель (рис. 7). Пример А – краевой угол больше 90° и, как следствие, плохое смачивание (капля имеет почти шарообразную, сферическую форму) и слабое взаимодействие с твердой поверхностью приводят к уменьшению площади контакта жидкости с ней; В и С – краевой угол меньше $\theta < 90^\circ$, тогда капли жидкости приобретают менискообразную форму (наблюдается лучшее взаимодействие с твердой поверхностью, площадь контакта жидкости больше, чем в примере А); S – краевой угол $\theta = 0^\circ$ (по сути его нет), полное смачивание ведет к растеканию жидкости по твердой поверхности, площадь контакта жидкости с твердой поверхностью в данном случае максимальна. Процесс растекания жидкости является предельным случаем смачивания.

Для нахождения площади поверхности сферы («наноклапты») алюминия используем формулу: $S = 4\pi R^2$, где S – площадь поверхности сферы; π – кон-

Таблица 1. Состав элементов на поверхности полимерной нити с наноструктурами алюминия

Table 1. Composition of elements on the polymer thread surface with the aluminum nanoislands

Элемент Element	Весовая доля Mass fraction	Атомная доля Atomic fraction
C	66,43	76,36
O	19,68	16,98
Al	7,25	3,71
Si	5,19	2,55
Cl	0,49	0,19
Cu	0,95	0,21

MICRO-BREAKDOWN OF FRACTALS MADE OF ALUMINUM NANOISLANDS WITH THE DIMENSIONS OF 10–30 nm

It can be assumed that the micro-breakdown of polymer threads is related to the low-field emission of electrons during the impulse action with a duration of 1–2 ms on a polymer thread made of carbon benzene rings that occurs through the spherical aluminum nanoislands (nanodroplets, spheres) (Fig. 1a).

Let us consider the features of the Rusar polymer thread, on which the fractal clusters of aluminum nanodroplets are generated. The polymer thread with a diameter of ≈ 1 mm is made of aromatic polyamide fibers with a diameter of ≈ 10 μm , namely aramid (aromatic polyamide). Aramid is represented as a long chain of synthetic polyamide where 85% of the amide bonds are attached directly to two aromatic rings of carbon and benzene (C_6H_6) (Fig. 5a).

The modern concept of the electronic nature of bonds in benzene is based on the hypothesis of Linus Pauling who proposed to depict the benzene molecule as a hexagon with an inscribed circle (Fig. 5b), thereby emphasizing the absence of fixed double bonds and

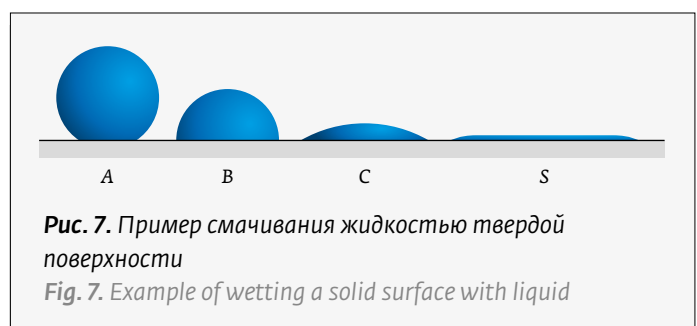


Рис. 7. Пример смачивания жидкостью твердой поверхности

Fig. 7. Example of wetting a solid surface with liquid



станта равная 3,14; R – радиус сферы. Для сферической «наноклапел» алюминия с диаметром 30 нм (радиус $R_{нк}=15$ нм) площадь поверхности будет равна: $S_{нк}=4\pi R_{нк}^2=2826,0$ нм².

Если площадь соприкосновения с поверхностью волокна из бензолных колец углерода в условиях несмачиваемости составит один процент от общей площади «наноклапел» ($S_{сопр}=28,26$ нм²), то для нее радиус соприкосновения вычисляется из площади круга, занимаемого сферой на поверхности, $S_{сопр}=\pi r_{сопр}^2$ и составит примерно $r_{сопр}=3$ нм. На такой площади соприкосновения могут поместиться, например, несколько сотен атомов алюминия для формирования «нанозонда» для нескольких сотен бензолных колец углерода и создания «наноточки» на плоскости. Если через «наноклапел» алюминия будет приложено импульсное высоковольтное напряжение длительностью 1–3 мс к такой «наноточке», то это может привести к формированию условий для возникновения низковольтной эмиссии электронов из бензольного кольца углерода.

Наноклапел алюминия выполняют роль нанозондов для подведения импульса напряжения к бензольным кольцам из углерода и формированию, предположительно, «наноточек» на плоскости, которые способствуют формированию условий для низковольтной эмиссии электронов из полимерных нитей при подаче напряжения 1,6 кВ на образец длиной 1 см и созданию плазмы. В результате возникает эффект «высокопроводящего надповерхностного состояния» (ВПНПС) над полимерной нитью «Русар». Данная композитная структура на полимерной нити может обладать свойствами метаматериала [6–8].

Таким образом, можно считать, ответственными за образование низковольтной электронной эмиссии являются фракталы, сформированные из сферических наноклапель алюминия с размером $l=2R=10-30$ нм и в конечном счете создающие плазму и эффект надповерхностного высокопроводящего состояния для электромагнитного излучения с длиной волны λ при условии, что $l=2R \ll \lambda$.

СКИН-ЭФФЕКТ НА ФРАКТАЛАХ ИЗ НАНООСТРОВКОВ АЛЮМИНИЯ

Важно отметить, что «цепочки» наностроек алюминия на полимерной нити представляют собой непрерывные «нанопроводники» для сверхвысоко-частотных электромагнитных волн, но для постоянного напряжения полимерная нить – это диэлектрик, так как взаимодействия наностроек алюминия не происходит. В работах [1–4] приве-

the presence of a single electron cloud covering all six atoms of the carbon cycle (Fig. 5c). The side of the benzene hexagon is approximately ≈ 0.14 nm or 0.154 nm, the ring thickness is approximately equal to half the side of the hexagon, i.e. ≈ 0.07 nm, the outer diameter of the benzene ring is approximately ≈ 0.28 nm, and the inner diameter is about ≈ 0.21 nm. It should be noted that the aluminum atom diameter is 0.286 nm, and the cross-sectional area along the diameter is 0.064 nm².

Fig. 6 shows the photographs of the surface composition analysis of a polymer thread with aluminum nanoislands. Table 1 demonstrates that the basis of the polymer threads is carbon and oxygen, and the individual aluminum inclusions (light inclusions) appear on the surface. The measurements were performed at the Synchrotron Shared Research Facility of the Federal State Unitary Enterprise “Lukin Research Institute for Physical Problems of the National Research Center “Kurchatov Institute”.

In Fig. 1a, the spherical aluminum nanoislands (nanodroplets, spheres) with the dimensions of 10–30 nm are visible. They can combine several hundred carbon benzene rings and develop the nanosized aluminum/carbon benzene ring structures. In some part of such a structure, a “nanopoint” can be formed on the polymer thread surface.

Let us give an example of the generated spherical nanoformations when a solid surface is wetted with a liquid to develop the spherical droplets (Fig. 7), where A is the contact angle much greater than 90° . As a consequence, there is poor wetting (the droplet has an almost spherical shape and weak interaction with the solid surface, therefore, there is a decrease in the liquid contact area with it). B and C are the contact angles less than $\theta < 90^\circ$, the liquid droplets obtain a meniscus shape (better interaction with the solid surface, the contact area of the liquid is greater than in the example A). S is the contact angle $\theta = 0^\circ$ (essentially it does not exist) with the complete wetting, when the liquid spreads over the solid surface, the contact area of the liquid with the solid surface in this case is the largest. The liquid spreading process is the limiting case of wetting.

To determine the surface area of an aluminum sphere (“nanodrop”), we use the following formula: $S=4\pi R^2$, where S is the surface area of the sphere; π is a constant equal to 3.14; R is the radius of the sphere. For an aluminum spherical “nanodrop” with a diameter of 30 nm (radius $R_{нк}=15$ nm), the surface area will be equal to: $S_{нк}=4\pi R_{нк}^2=2826.0$ нм².

If the contact area with the surface of a fiber made of carbene benzene rings under non-wettability con-

дены фотография таких композиционных материалов, которые можно отнести к метаматериалам с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Для полимерных нитей с наноструктурами алюминия в виде фрактальных кластеров плазменная частота равна примерно 1-10 ТГц.

Если возникает низкополевая эмиссия электронов из шарообразных нанокластеров алюминия с радиусом R и происходит формирование плазмы над поверхностью полимерной нити, то электромагнитное излучение с длиной волны λ может распространяться через наноструктуры алюминия с размером много меньше, чем длина волны, т.е. $l=2R \ll \lambda$. Например, для частоты 10 ТГц = 10^{13} Гц длина волны составит примерно 30 мкм, а размер наноструктуры для обеспечения электромагнитной непрерывности может быть в 100 раз меньше, т.е. 300 нм. На рис. 1а видно, что основные размеры наноструктур алюминия находятся в диапазоне 10-1000 нм, поэтому частоты выше плазменной частоты такой композиционной структуры (1-10 ТГц) будут свободно распространяться по наноструктурам алюминия.

Интересно отметить, что для длины волны 30 нм минимальные размеры компонентов будут равны 0,3 нм, которые практически равны размеру атома алюминия или диаметру бензольного кольца углерода, а частота в этом случае достигает 10^{16} Гц, которая соответствует границе рентгеновского и гамма излучений.

Рассмотрим возможность формирования на фрактальных кластерах скин-эффекта или поверхностного эффекта, связанного с уменьшением амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате этого эффекта, например, переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое.

Механизм возникновения скин-эффекта (рис. 8а) связан с формированием электромагнитных колебаний в резонансной системе и возникновением переменного тока в проводнике, которое порождает переменное вихревое магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны к оси проводника. За счет электромагнитной индукции переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, вызывающее протекание вихревого тока Фуко, причем на поверхности проводника вихревой ток направлен по направлению тока проводника, а внутри проводника – противоположно. Это явление снижает ток в сердцевине проводника и увеличивает поверхностный ток.

ditions is one percent of the total area of the “nanodroplet” ($s_{\text{cont}}=28.26 \text{ nm}^2$), then its contact radius is based on the area of the circle occupied by the sphere on the surface, $s_{\text{cont}}=\pi r_{\text{cont}}^2$ and will be approximately $r_{\text{cont}}=3 \text{ nm}$. For example, several hundred aluminum atoms can be placed on such a contact area to generate a “nanoprobe” for several hundred carbon benzene rings and develop a “nanopoint” on the plane. If a high-voltage impulse with a duration of 1-3 ms is applied to such a “nanopoint”, then it can lead to the formation of conditions for the low-field emission of electrons from the carbon benzene ring.

The aluminum nanodroplets play the role of nanoprobe for applying a voltage impulse to the carbon benzene rings and presumable generation of “nanopoints” on the plane that contribute to the formation of conditions for the low-field emission of electrons from the polymer threads when a voltage of 1.6 kV is applied to the sample with the length of 1 cm and development of plasma. This results in the effect of “highly conductive off-surface state” (HCOSS) over the Rusar polymer thread. This composite structure on a polymer thread can have the properties of a metamaterial [6-8].

Thus, it can be considered that the fractals made of the spherical aluminum nanodroplets with a size of $l=2R=10-30 \text{ nm}$ are responsible for the formation of low-field electron emission. Ultimately, they develop plasma and the effect of off-surface highly-conductive state for electromagnetic radiation with the wavelength λ , provided that $l=2R\lambda$.

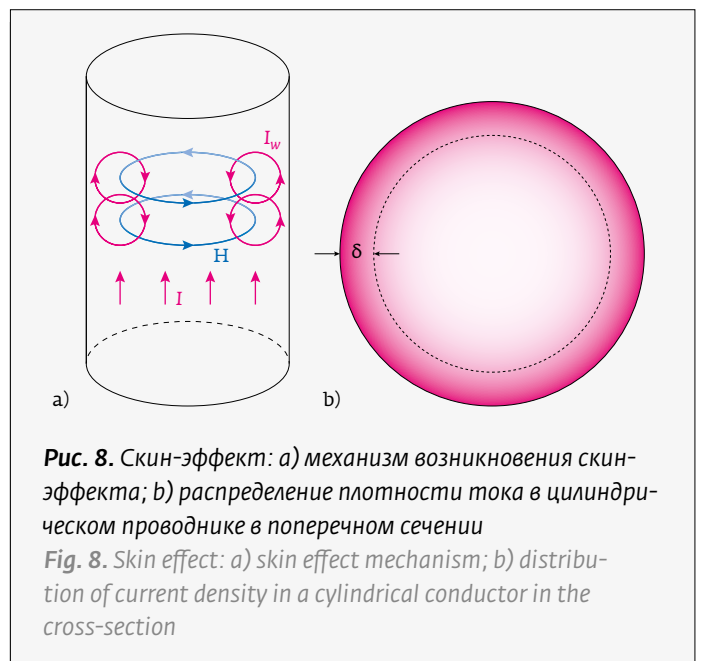


Рис. 8. Скин-эффект: а) механизм возникновения скин-эффекта; б) распределение плотности тока в цилиндрическом проводнике в поперечном сечении

Fig. 8. Skin effect: а) skin effect mechanism; б) distribution of current density in a cylindrical conductor in the cross-section

Распределение плотности тока в цилиндрическом проводнике в поперечном сечении показано на рис. 8б. Для переменного тока плотность тока экспоненциально убывает от поверхности вглубь проводника. Толщина скин-слоя определяется как глубина от поверхности, на которой плотность тока уменьшается до $1/e$ (около 37%) от значения на поверхности. Эта толщина зависит от частоты тока и электрических и магнитных свойств проводника. Иллюстрация механизма возникновения скин-эффекта приведена на рис. 9.

Распределение тока внутри проводника имеет экспоненциальный характер, поэтому в первом приближении можно считать, что электрический ток имеет относительно равномерную зависи-

SKIN-EFFECT ON THE FRACTALS MADE OF ALUMINUM NANOSISLANDS

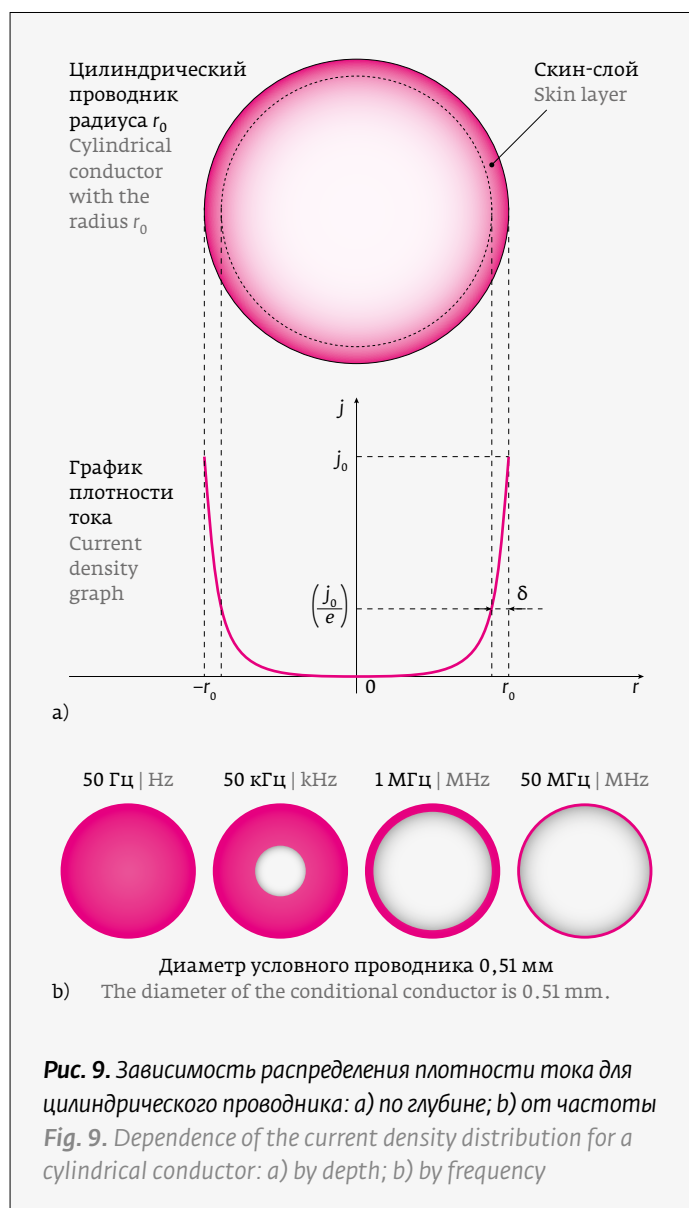
It is important to note that the chains of aluminum nanoislands on a polymer thread are the continuous “nanoconductors” for ultra-high-frequency electromagnetic waves. However, for a constant voltage the polymer thread is a dielectric material, since there is no interaction of aluminum nanoislands. The papers [1-4] provide photographs of such composite materials that can be classified as the metamaterials with negative dielectric constant. For the polymer threads with aluminum nanoislands in the form of fractal clusters, the plasma frequency is approximately 1-10 THz.

If the low-field emission of electrons occurs on the basis of spherical aluminum nanodroplets with the radius R and the plasma is generated above the polymer thread surface, then the electromagnetic radiation with a wavelength λ can propagate through the aluminum nanoislands with a size much smaller than the wavelength, i. e. $l=2R\lambda$. For example, for a frequency of 10 THz= 10^{13} Hz, the wavelength will be approximately 30 μm , and the nanoisland size to ensure electromagnetic continuity can be 100 times smaller, i. e. 300 nm. In Fig. 1a, it is evident that the main dimensions of aluminum nanoislands are in the range of 10-1000 nm, therefore, the frequencies above the plasma frequency of such a composite structure (1-10 THz) will freely propagate through the aluminum nanoislands.

It is interesting to note that for a wavelength of 30 nm, the minimum dimensions of the components will be 0.3 nm that is almost equal to the size of an aluminum atom or the diameter of a carbon benzene ring. The frequency in this case reaches 10^{16} Hz that corresponds to the boundary of X-ray and gamma radiation.

Let us consider the possibility of a skin-effect (or surface effect) on the fractal clusters related to a decrease in the amplitude of electromagnetic waves as they penetrate deep into the conducting medium. As a result of this effect, for example, the high-frequency alternating current flowing through a conductor is distributed not uniformly across the cross-section, but predominantly in the surface layer.

The skin effect mechanism (Fig. 8a) is associated with the development of electromagnetic oscillations in a resonance system and occurrence of alternating current in the conductor that generates an alternating vorticity magnetic field, the lines of force in which are perpendicular to the conductor axis. Due to the electromagnetic induction, the alternating magnetic field generates a vortex electric field, causing the flow of Foucault eddy current. Moreover, on the conductor surface, the eddy current moves in the direction of the



FLAMN-25

24 ————— 27 ИЮНЯ
Санкт-Петербург, Россия

ОТКРЫТА РЕГИСТРАЦИЯ

О симпозиуме:

Международная конференция в области лазерных технологий, на которой обсуждают новейшие разработки в мире лазерных технологий, вопросы взаимодействия лазерного излучения с веществом, проблемы образования в области лазеров и фотоники, внедрение искусственного интеллекта в индустрию.

Международный симпозиум FLAMN проходит с 1996 г. года как продолжение двух конференций — «Лазерные технологии» и «Нерезонансное взаимодействие лазерного излучения с веществом», начавшихся в середине 60-х годов 20 века. Симпозиум FLAMN-25 посвящён 60-му юбилею научной школы лазерных технологий в Университете ИТМО, которая за это время претерпела ряд естественных трансформаций и на сегодняшний день является Институтом лазерных технологий – одним из старейших факультетов в Университете ИТМО.

Председатель симпозиума и научный руководитель Института лазерных технологий ИТМО Вадим Вейко:

«Наука не может развиваться без обмена информацией. Если ученый занимается исследованиями и при этом не публикуется и не рассказывает о полученных результатах, никакого вклада в прогресс человечества он не внесет. А если мы обмениваемся информацией только внутри страны, мы ограничиваем себя, поэтому важно поддерживать связь с мировым сообществом».

Научные направления симпозиума:

Лазерные микро- и нанотехнологии
Взаимодействие лазерного излучения с веществом.

Основные тематики:

- Фундаментальные основы процессов взаимодействия света и вещества
- Взаимодействие ультракоротких лазерных импульсов с веществом и технологии на основе этих процессов
- Лазерно-индуцированная микроплазма и связанные с ней технологии (LIFT, LIPAA, LIMP и т.д.)
- Лазерная функционализация поверхности различных материалов: физические основы и применения
- Нанопластика и наноразмерные системы
- Биомедицинские лазерные технологии
- Источники света и оптические решения для лазерных технологий
- Промышленные лазерные технологии: автоматизация и применение машинного обучения
- Лазерные и оптические подходы в искусстве
- Образование в области лазеров / фотоники

Регистрация: до 23 марта 2025 года

Язык: английский

Организаторы: Институт лазерных технологий ИТМО, ИОФ РАН

E-mail: flamn@itmo.ru

TG: t.me/flamn_confere

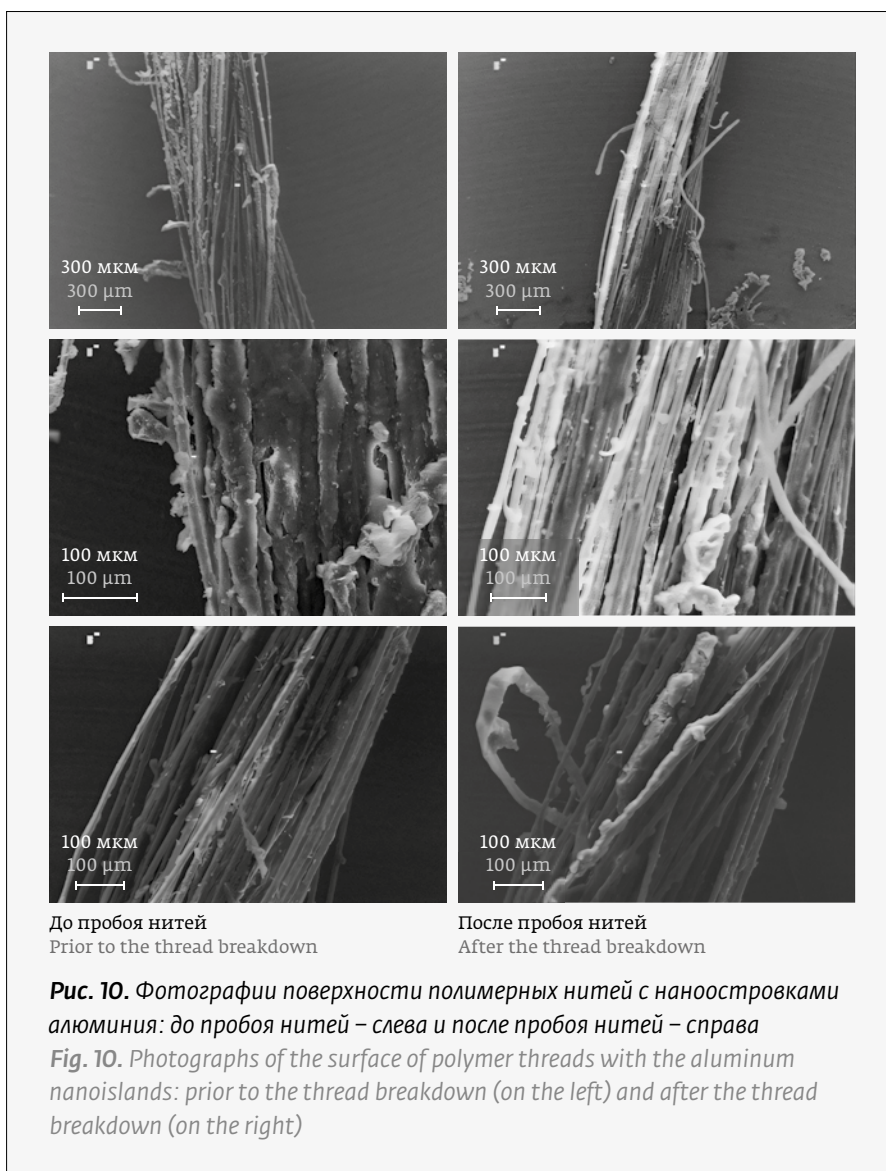
мость только в поверхностном слое, называемом скин-слоем, а в остальном сечении настолько мал, что им можно пренебречь. Следовательно, в образцах полимерных нитей сверхвысокочастотная электромагнитная волна терагерцевого диапазона распространяется над поверхностью арамида через nanoостровки алюминия.

Например, толщина (глубина) скин-слоя для образцов полимерной нити диаметром 1 мм из волокон арамида с цепочками нерегулярных nanoостровок алюминия на частоте 5 ТГц составит $\delta=40$ нм и соответствует толщине nanoостровок алюминия.

Установлено, что в экспериментах у полимерных нитей длиной 1 см при импульсе напряжения 1,6 кВ с длительностью 1–3 мс происходил пробой, но после нескольких подключений высокого напряжения (от 3 до 5 раз) и появления пробоя при следующих подключениях пробой уже отсутствовал. На фотографиях поверхности полимерных нитей после пробоя (рис. 10) видны оплавленные nanoостровки алюминия, а шарообразные наноклапты алюминия растеклись полностью, т.е. исчезли, что привело к прекращению низковольтной эмиссии электронов и отсутствию надповерхностного высокопроводящего состояния в виде плазмы.

При эксперименте установлено, что при электрическом пробое на воздухе полимерные нити с nanoостровковой металлизацией алюминием не перегорают. Слегка обугливаются концы полимерной нити, прикрепленные к электродам, на которые подается напряжение для осуществления электрического пробоя.

Следует отметить, что плазма представляет собой ионизированный газ, одно из четырех классических агрегатных состояний вещества, и содержит свободные электроны и положительные и отрицательные ионы. Поскольку заряженные частицы в плазме обладают подвижностью, плазма обладает способностью проводить электрический ток. В ста-



До пробоя нитей
Prior to the thread breakdown

После пробоя нитей
After the thread breakdown

Рис. 10. Фотографии поверхности полимерных нитей с nanoостровками алюминия: до пробоя нитей – слева и после пробоя нитей – справа
Fig. 10. Photographs of the surface of polymer threads with the aluminum nanoislands: prior to the thread breakdown (on the left) and after the thread breakdown (on the right)

conductor current, and inside the conductor, it has an opposite direction. This phenomenon reduces the current in the conductor core and increases the surface current.

The current density distribution in a cylindrical conductor in its cross section is shown in Fig. 8b. For alternating current, the current density is decreased exponentially from the surface into the conductor. The skin layer thickness is determined as the depth from the surface at which the current density is decreased to $1/e$ (about 37%) of the surface value. This thickness depends on the current frequency and the electrical and magnetic properties of the conductor. The skin effect mechanism is shown in Fig. 9.

The current distribution inside the conductor is of exponential nature, therefore, at the first approxima-



19-я Международная выставка
вакуумного и криогенного
оборудования

1–3 апреля 2025
Москва, ЦВК «Экспоцентр»



Представьте
свою продукцию
потенциальным
заказчикам



Получите билет
по промокоду: **nanoin**
vacuumtechexpo.com

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+ 7 (495) 252 11 07
vacuumtechexpo@mvk.ru

При поддержке





ционарном случае плазма экранирует постоянное внешнее по отношению к ней электрическое поле за счет пространственного разделения зарядов.

Отметим, что искровой разряд представляет из себя нестационарную форму электрического разряда (электрического тока), происходящего в газах. Расстояние, «пробиваемое» искрой в воздухе, зависит от напряженности электрического поля у поверхности электродов и их формы. В природных условиях искровые разряды возникают в виде молний. Температура в главном канале искрового разряда может достигать значения 10 000 K [5].

Кроме того, высокая температура приводит за время импульса к расплаву частично алюминиевых наностроек, что может привести к формированию жидкометаллического эффекта Ребиндера, в основе которого лежит представление о возможности локализации электромагнитного поля в складках границы раздела фаз и компонентов жидкой эвтектической смеси, заполняющей трещины в поверхности твердого металла. Поскольку в каждой пространственной точке соседствуют три различных субстанции (однородный расплав Al, твердый Al и твердый – полимерного волокна), система складок такого интерфейса моделируется известной в топологии структурой Вады-Брауэра – поверхностью, разделяющей три различных области в каждой своей точке. При жидкометаллическом эффекте Ребиндера [9] возможно испускание локализованного света.

ВЫВОДЫ ПО ЧАСТИ 1

Можно считать, что ответственными за образование низкополевой электронной эмиссии являются металлические фрактальные кластеры, сформированные из сферических нанок капель алюминия с радиусом $R=10-30$ нм на поверхности полимерных нитей из волокон бензольных колец углерода и, в конечном счете, создающие плазму и эффект «надповерхностного высокопроводящего состояния» для электромагнитного излучения с длиной волны λ при условии, что $l=2R \ll \lambda$.

Сверхвысокочастотная электромагнитная волна терагерцевого диапазона распространяется над поверхностью полимерной нити через металлические фрактальные кластеры, сформированные из наностроек алюминия. Толщина (глубина) скин-слоя для полимерной нити диаметром 1 мм из волокон арамида с цепочками нерегулярных наностроек алюминия, например, на частоте 5 ТГц составляет $\delta=40$ нм в слое наностроек алюминия, что соответствует примерно их толщине.

tion, it can be considered that the electric current has a relatively uniform dependence only in the surface layer (that is called the skin layer), and in the remaining cross-section it is so small that it can be neglected. Consequently, in the polymer thread samples, the ultra-high-frequency electromagnetic wave of the terahertz range is propagated over the aramid surface through the aluminum nanoislands.

For example, the the skin layer thickness (depth) for the polymer thread samples with a diameter of 1 mm made of aramid fibers with the chains of irregular aluminum nanoislands at a frequency of 5 THz will be $\delta=40$ nm and corresponds to the thickness of aluminum nanoislands.

It was established that in the experiments with polymer threads with the length of 1 cm, a breakdown occurred with a voltage pulse of 1.6 kV with a duration of 1-3 ms. However, after several high voltage connections (from 3 to 5 times) and occurrence of a breakdown, the breakdown was already absent with the following connections. The photographs of the polymer thread surface after the breakdown (Fig. 10) show the melted aluminum nanoislands. The spherical aluminum nanodroplets have spread out completely, i. e. disappeared that leads to the cessation of low-field electron emission and the absence of off-surface highly-conductive state in the form of plasma.

During the experiment it was determined that in the case of electrical breakdown in air, the polymer threads with nanoisland aluminum metallization did not burn out. The ends of the polymer thread attached to the electrodes to which the voltage was applied for electrical breakdown were slightly charred.

It should be noted that plasma is an ionized gas, one of the four classical aggregate states of matter. It contains free electrons, as well as positive and negative ions. Since the charged particles in plasma are mobile, the plasma has the ability to conduct electric current. In the fixed condition, plasma screens a constant external electric field due to the spatial separation of charges.

It should be noted that a spark discharge is a non-steady form of electric discharge (electric current) occurring in the gases. The distance broken down by a spark in the air depends on the electric field strength at the surface of the electrodes and their shape. In natural conditions, the spark discharges occur in the form of lightning. The temperature in the main channel of a spark discharge can reach 10,000 K [5].

In addition, high temperature leads to the partial melting of aluminum nanoislands during the pulse that can result in development of the liquid metal



Рассмотренные в статье композитные материалы из полимерных нитей с металлическими фрактальными кластерами могут быть отнесены к метаматериалам с отрицательной диэлектрической проницаемостью [6], однако возможно создание на полимерных нитях композитов как с отрицательной магнитной проницаемостью [7], так и композитов с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями [8].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00129, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

REFERENCES

1. **P. P. Maltsev.** Pulsed Optical and X-ray Radiation of Fractals: Review of Hypotheses. Part II. Micro-Breakdown of Fractals made of Metamaterials. *Photonics Russia*. 2024;18(7):522–534. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.7.522.534
П. П. Мальцев. Импульсные оптические и рентгеновские излучения фракталов: обзор гипотез. Часть 2. Микропробой фракталов из метаматериалов. *Фотоника*. 2024;18(7):522–534.
2. **P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin.** Low-Filed Electron Emission from Fractals on Metamaterials. *Russian Microelectronics*. 2024. 53(5): 483–491.
3. **P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, A. I. Kozlitin.** Formation of Polymer Threads with a Nanosized Aluminum Topology. *Russian Microelectronics*. 2023; 52(4):312–316.
4. **P. P. Maltsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mikhalev, and A. I. Kozlitin.** Formation of Polymer Threads with Nanoscale Aluminum Formations. *Nanobiotechnology Reports*. 2022; 17(7): S15–S17.
5. **Fizicheskie velichiny: Spravochnik / [A. P. Babichev i dr.];** Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejliхова. Moskva: Energoatomizdat, 1991. 1231p.
Физические величины: Справочник / [А. П. Бабичев и др.]; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1231p.
6. **P. P. Mal'tsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mihaliev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin.** Ocenka znachenij radial'noj plazmennoj chastoty dlya polimernoj niti s nanoostrovkami alyuminiya. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2024; 26(1): 25–32.
П. П. Мальцев, А. А. Ганжа, В. Ю. Павлов, А. О. Михалев, А. И. Козлитин, В. В. Сарайкин. Оценка значений радиальной плазменной частоты для полимерной нити с наноструктурами алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. 2024; 26(1): 25–32.
7. **P. P. Mal'tsev, A. A. Ganzha, V. Yu. Pavlov, A. O. Mihaliev, A. I. Kozlitin, V. V. Sarajkin.** Vozmozhnost' predstavleniya metasolenoida, kak polimernoj niti s neregulyarnymi cepochkami nanoostrovkov alyuminiya. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2024; 26(2): 81–89.
П. П. Мальцев, А. А. Ганжа, В. Ю. Павлов, А. О. Михалев, А. И. Козлитин, В. В. Сарайкин. Возможность представления метасоленоида, как полимерной нити с нерегулярными цепочками наноструктур алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. 2024; 26(2): 81–89.
8. **V. G. Veselago.** Elektrodinamika veshchestv s odnovremennno otricatelnymi znacheniyami ϵ i μ . *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1967; 92(7): 517–526.
В. Г. Веселаго. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . *Успехи физических наук*. 1967; 92(7): 517–526.
9. **A. I. Malkin.** Zakonomernosti i mekhanizmy effekta Rebindera. *Kolloidnyj zhurnal*. 2012; 74:239–254.
А. И. Малкин. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера. *Коллоидный журнал*. 2012; 74:239–254.

АВТОР

Мальцев Петр П., д. т. н., профессор, ведущий научный сотрудник МЦАИ РАН, Москва, Россия; e-mail: p.p.maltsev@mail.ru

Rehbinder effect. This effect is based on the concept of possible localization of the electromagnetic field in the folds of the interface between the phases and components of the liquid eutectic mixture filling the cracks in the solid metal surface. Since three various substances (homogeneous Al melt, solid Al and solid polymer fiber) are adjacent at each spatial point, the fold system of such an interface is simulated by the Brauer structure well-known in topology, namely a surface separating three various regions at each of its points. With the liquid metal Rehbinder effect [9], the localized light can be emitted.

CONCLUSIONS FOR PART I

It can be assumed that the metal fractal clusters made of spherical aluminum nanodroplets with a radius of $R=10-30$ nm on the surface of polymer threads made of carbon benzene ring fibers are responsible for the generation of low-field electron emission. Ultimately, they develop plasma and the effect of “off-surface highly-conductive state” for electromagnetic radiation with a wavelength λ , provided that $l=2R \ll \lambda$.

An ultra-high-frequency electromagnetic wave of the terahertz range propagates over the polymer thread surface through the metal fractal clusters made of aluminum nanoislands. The skin layer thickness (depth) for a polymer thread with a diameter of 1 mm made of aramid fibers with the chains of irregular aluminum nanoislands, for example, at a frequency of 5 THz is $\delta=40$ nm in a layer of aluminum nanoislands that corresponds approximately to their thickness.

The composite materials made of the polymer threads with metal fractal clusters considered in the article can be classified as the metamaterials with negative dielectric constant [6]. However, it is possible to develop both the composites on the polymer threads with the negative magnetic permeability [7], as well as the composites with simultaneously negative dielectric constant and magnetic permeability [8].

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-00129, <https://rscf.ru/project/24-29-00129/>.

In the second part of the article, we will consider the Interaction of Optical Radiation with Metal Fractal Clusters.

AUTHOR

Maltsev Petr P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Inter-agency Center of Analytical Studies of the RAS, Moscow, Russia.; e-mail: p.p.maltsev@mail.ru