



Импульсные оптическое и рентгеновское излучения фракталов: обзор гипотез. Часть 2. Микропробой фракталов на метаматериалах

П. П. Мальцев
ИСВЧПЭ РАН, Москва, Россия

В статье рассмотрены свойства метаматериалов, проведен анализ публикаций, которые указывают на возможность низкотемпературной эмиссии различных полупроводниковых и полимерных материалов при размерах нанозерен или острый 20–30 нм. Показано, что для изготовления источника высокоэнергетических затравочных быстрых электронов и реализации пробоя на убегающих электронах достаточно использовать нить длиной 30–50 м с фракталами наноструктур (нанокапель) алюминия с размером 10–30 нм.

Ключевые слова: фракталы из наноразмерных капель алюминия, полимерные нити из волокна ароматического полиамида, плазма, надповерхностное высокопроводящее состояние

Статья получена: 11.06.2024

Статья принята: 11.07.2024

СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ [7]

В 1962 году В. Г. Веселаго системно описал гипотезу о необычных свойствах «левых» веществ («Left-handed media»). В работе [7], в частности, показано, что такие вещества имеют отрицательные диэлектрическую ϵ_m и магнитную μ_m проницаемости,

Pulsed Optical and X-ray Radiation of Fractals: Review of Hypotheses. Part II. Micro-Breakdown of Fractals made of Metamaterials

P. P. Maltsev
Institute of Microwave Frequencies of the RAS, Moscow, Russia

In the continuation of the review, the properties of metamaterials are considered, and an analysis of publications that indicate the possibility of low-field emission of various semiconductor and polymer materials at the size of nanogrooves or points 20–30 nm is carried out. We will show that for the manufacture of a source of high-energy seed fast electrons and the realization of breakdown on escaping electrons, it is sufficient to use a thread 30–50 m long with fractals of aluminum nanostructures (nanodrops) with a size of 10–30 nm.

Keywords: fractals from the nano-sized aluminum droplets, polymer filaments made of aromatic polyamide fiber, plasma, off-surface highly conductive condition

Article received: 11.06.2024

Article accepted: 11.07.2024

PROPERTIES OF METAMATERIALS [7]

In 1962, V. G. Veselago systematically described the hypothesis about the unusual properties of “left-handed” media. In [7], in particular, it is shown that such media have negative dielectric ϵ_m and magnetic μ_m permeability, and should also have a negative refractive index n .

A metamaterial is a composite material whose properties are determined not so much by the properties of its constituent elements, but by an artificially developed periodic structure of macroscopic elements with the arbitrary dimensions and shape. An artificial peri-



а также должны обладать отрицательным показателем преломления n .

Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. Искусственная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемость исходного материала [7, 8].

Таким образом, метаматериалы представляют собой искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. Приставка «мета» переводится с греческого как «вне», что позволяет трактовать термин «метаматериалы» как структуры, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их компонентов.

Наиболее известным примером естественной ENG-среды (ϵ_m – отрицательной), которая может быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты возбуждения ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется согласно формуле

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2,$$

где ω_p – параметр, именуемый радиальной плазменной частотой (радиальной частотой собственных колебаний плазмы) и зависящий от плотности, величины заряда и массы носителей зарядов.

Ниже плазменной частоты диэлектрическая проницаемость отрицательна и электромагнитные волны не могут распространяться из-за потери средой прозрачности. При $\omega > \omega_p$ величина $\epsilon_m > 0$ и электромагнитные волны могут проходить через ионизированную среду. Известным примером электромагнитной плазмы является ионосфера Земли, от которой излучение низкой частоты отражается (при $\epsilon(\omega) < 0$), а высокочастотные электромагнитные волны проходят с малым поглощением.

В числе искусственных сред SNG (single negative, моноотрицательные) с отрицательной ϵ_m (ENG, ϵ_m – отрицательной) одной из первых была описана система из тонких металлических проводов, расположенных параллельно. О такой среде – искусственном диэлектрике для микроволновых при-

одичной структуры модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемость исходного материала [7, 8].

Thus, the metamaterials are artificially generated and specially structured media with the electromagnetic properties that are difficult to achieve technologically or that do not occur in nature. The prefix “meta” is translated from Greek as “beyond” that allows us to interpret the term “metamaterials” as the structures which efficient electromagnetic properties go beyond the properties of constituent components.

The most famous example of a natural ENG medium (ϵ_m is negative) that can be either transparent or opaque to the electromagnetic waves depending on the excitation frequency ω , is plasma, the dielectric constant of which is determined according to the following formula in the absence of an external magnetic field:

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2,$$

where ω_p is a parameter called the radial plasma frequency (radial frequency of plasma natural oscillations) that depends on the density, charge magnitude and mass of charge carriers.

Below the plasma frequency, the dielectric constant is negative and the electromagnetic waves cannot propagate due to the loss of transparency in the medium. At $\omega > \omega_p$ the value $\epsilon_m > 0$ and electromagnetic waves can pass through the ionized medium. A well-known example of electromagnetic plasma is the Earth's ionosphere, from which the low-frequency radiation is reflected (at $\epsilon(\omega) < 0$), and the high-frequency electromagnetic waves pass with little absorption.

Among the artificial SNG media (single negative) with negative ϵ_m (ENG, ϵ_m is negative), a system of thin metal wires arranged in parallel was one of the first to describe. Such a medium (as an artificial dielectric for microwave applications) was indicated in the work of John Brown back in 1953. He obtained the relation for the plasma frequency of a given metamaterial.

It was later confirmed by Walter Rothman who in 1961 demonstrated the possible application of multiple thin conductors to simulate plasma, since their efficient dielectric constant was expressed by the same formula. In particular, for a metastructure based on the aluminum conductors with a radius $r = 1 \mu\text{m}$ and an interval between them $a = 5 \text{ mm}$, the radial plasma frequency is approximately 8.2 GHz (Fig. 6a).

The seminal work [7] contained a theoretical description of the medium properties with simultaneously negative values of ϵ_m and μ_m , as well as a study of the solution of Maxwell's equations for this case. When

менений – сообщалось в работе Джона Брауна еще в 1953 году. Он получил соотношение для плазменной частоты данного метаматериала.

Позднее оно было подтверждено Уолтером Ротманом, который в 1961 году продемонстрировал возможность использования множества тонких проводников для моделирования плазмы, поскольку их эффективная диэлектрическая проницаемость выражается той же самой формулой. В частности, для метаструктуры на основе алюминиевых проводников с радиусом $r=1$ мкм и интервалом между ними $a=5$ мм радиальная плазменная частота составляет примерно 8,2 ГГц (рис. 6 а).

Основополагающая работа [7] содержала теоретическое описание свойств среды с одновременно отрицательными ϵ_m и μ_m , а также исследование решения уравнений Максвелла для этого случая. При интерпретации уравнений Максвелла В.Г. Веселаго впервые использовал в качестве индекса преломления n выражение для ϵ_m , $\mu_m < 0$, что явилось довольно неожиданным логическим приемом. Отмечая гипотетичность соответствующей среды, В.Г. Веселаго указал на бесспорный факт, что ее существование не исключается уравнениями Максвелла, и теоретически проанализировал процесс распространения электромагнитных волн в подобных средах.

Отметим, что волна, распространяясь в среде, имеет две скорости – фазовую V_ϕ и групповую V_{gr} . Фазовая скорость – это скорость движения фазы волны, например максимума или минимума колебательного процесса, а групповая скорость – это скорость, с которой движется огибающая импульса. Они не обязательно должны быть одинаковы и направлены в одну сторону.

Поток энергии, переносимый электромагнитной волной, определяется вектором Умова – Пойнтинга S , а, следовательно, и V_{gr} всегда образуют с векторами электромагнитной волны E и H правую тройку векторов. Таким образом, для «правых» сред фазовая и групповая скорости всегда направлены в одну сторону, а для «левых» сред вектора V_{gr} и V_ϕ – в разные стороны, то есть это среды с отрицательной групповой скоростью.

Для «левых» сред волновой вектор излучения k будет направлен по траектории частицы v , а конус излучения будет направлен назад по отношению к движению частицы, т.е к источнику.

Начало 2000 годов было богато событиями в области создания метаматериалов с отрицательным коэффициентом преломления электромагнитных волн. Эффект отрицательного преломления обусловлен одновременно отрицательными

interpreting the Maxwell's equations, V. G. Veselago was the first to use the expression for ϵ_m , $\mu_m < 0$ as the refractive index n that was a rather unexpected logical method. While noting the hypothetical nature of the relevant medium, V. G. Veselago pointed out the

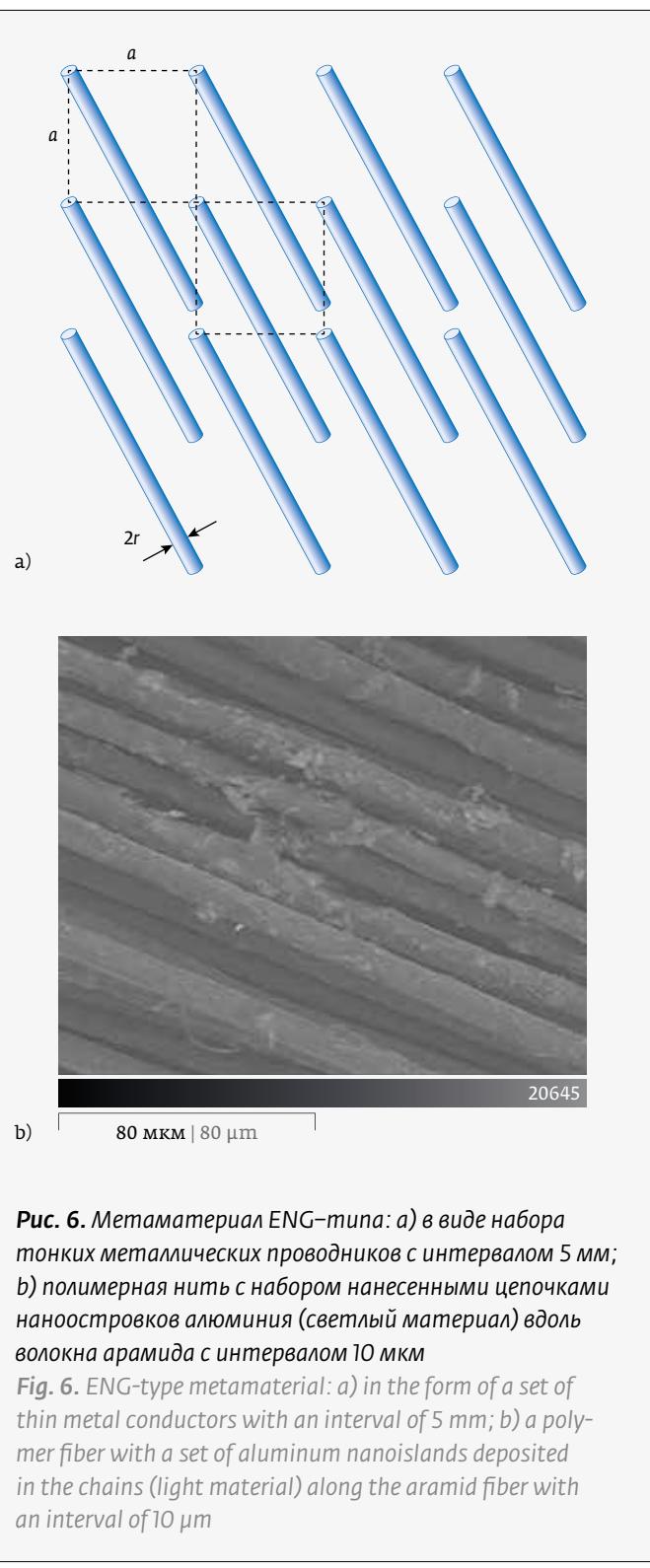


Рис. 6. Метаматериал ENG-типа: а) в виде набора тонких металлических проводников с интервалом 5 мм; б) полимерная нить с набором нанесенными цепочками наноструктур алюминия (светлый материал) вдоль волокна арамида с интервалом 10 мкм

Fig. 6. ENG-type metamaterial: a) in the form of a set of thin metal conductors with an interval of 5 mm; b) a polymer fiber with a set of aluminum nanoislands deposited in the chains (light material) along the aramid fiber with an interval of 10 μ m

значениями диэлектрической и магнитной проницаемости ($\epsilon_m < 0$ и $\mu_m < 0$). Такие материалы часто называют бинегативными средами (DNG, double negative). До недавнего времени этот класс материалов был представлен только искусственными конструкциями, однако, в 2006 году было установлено, что кристаллы $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ имеют отрицательный коэффициент преломления электромагнитных волн примерно на частоте 150 ГГц.

К пониманию физики сред DNG современная наука подходила исподволь. Судя по доступным публикациям, пальму первенства в практической постановке вопроса о существовании волн с отрицательной групповой скоростью следует отдать английскому физику Артуру Шустеру (1851–1934). Вывод о том, что отрицательная групповая скорость возможна из-за аномальной дисперсии волн, подтвердил в 1905 году Фон Лауз (Max Theodor Felix von Laue, 1879–1960). В том же году Поклингтон в небольшой заметке еще раз показал, что в определенной среде, где возможна обратная волна, активизированный источник колебаний формирует волну с групповой скоростью, направленной от источника, в то время как ее фазовая скорость ориентирована ему навстречу.

Отметим следствия, которые вытекают из того обстоятельства, что в левых веществах фазовая скорость противоположна потоку энергии. Прежде всего, в левых веществах будет наблюдаться обращенные: эффект Доплера и излучение Чerenкова – Вавилова!

Например, изменение частоты колебаний вследствие движения источника или приемника называется эффектом Доплера. Пусть приемник излучения **B** движется со скоростью V относительно излучателя **A**, который излучает частоту. В этом случае для частоты, воспринимаемой приемником вследствие доплеровского сдвига, можно записать выражение:

$$\omega = \omega_0 (1 + p(V/V_{\text{rp}})).$$

В «левой» среде ($p = -1$) приемник будет догонять точки волны, соответствующие какой-либо определенной фазе. При этом в формуле скорости V и V_{rp} направлены в разные стороны. Поэтому из-за эффекта Доплера в «правой» среде приближающийся к нам объект кажется более «синим», а в «левой» среде будет казаться более «красным».

Можно предположить, что это и наблюдается при пробое на убегающих электронах в высотных разрядах «Красных эльфов» (рис. 1 и рис. 4, см. П. П. Мальцев. Импульсные оптическое

indisputable fact that its existence is not excluded by the Maxwell's equations, and theoretically analyzed the propagation process of electromagnetic waves in such media.

It should be noted that while propagating in the medium, the wave has two velocities, namely phase velocity V_{ph} and group velocity V_{gr} . The phase velocity is the wave phase speed, for example, the maximum or minimum of the oscillatory process, and the group velocity is the speed at which the pulse envelope moves. They do not have to be identical and directed to the same side.

The energy flow carried by an electromagnetic wave is determined by the Umov-Poynting vector S , and, consequently, V_{gr} always generates a right-hand triple of vectors with the electromagnetic wave vectors E and H . Thus, for the “right-handed” media the phase and group velocities are always directed to the same side, and for the “left-handed” media the vectors V_{gr} and V_{ph} are located in different directions, that is, these are the media with negative group velocity.

For the “left-handed” media, the wave vector of radiation k will be directed along the motion path of the particle v , and the radiation cone will be directed back in relation to the particle motion, i. e., towards the source.

The beginning of the 2000s was rich in events in the field of metamaterial development with a negative refractive index of electromagnetic waves. The effect of negative refraction is due to the simultaneously negative values of dielectric and magnetic permeability ($\epsilon_m < 0$ and $\mu_m < 0$). Such materials are often called the double negative media (DNG). Until recently, this class of materials was represented only by the artificial structures. However, in 2006 it was found that the $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{Mn}_3$ crystals have a negative refractive index of electromagnetic waves at approximately 150 GHz.

Modern science has approached understanding the DNG media physics gradually. As judged by the available publications, the garland of the practical statement of a question related to the existence of waves with the negative group velocity should be given to Arthur Schuster, an English physicist (1851–1934). The conclusion that the negative group velocity is possible due to anomalous wave dispersion was confirmed in 1905 by Max Theodor Felix von Laue (1879–1960). In the same year, Pocklington once again showed in a short note that in a certain medium where a backward wave is possible, an activated source of oscillations generates a wave with a group velocity directed away from the source, while its phase velocity is oriented towards it.



и рентгеновское излучения фракталов: обзор гипотез. Часть 1. Микропробой на убегающих электронах. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.5.358.374) под действием проникающих космических частиц через «левую» метасреду в виде фракталов.

НИЗКОПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ НАНОТОЧЕК

Приведем анализ публикаций, которые указывают на возможность низкополевой эмиссии различных полупроводниковых и полимерных материалов при размерах нанозерен или острый 20–30 нм.

В работе [9] показано, что при положительном смещении на зонде (отрицательный потенциал на полупроводнике) осуществлялась эмиссия электронов из выступов на поверхности полупроводника, являющихся по своей природе нанообъектами (размер остряя выступа для эмиссии мог достигать 10–20 нм).

Эмиссия электронов из полупроводника происходит с участием (одного или нескольких) квантованных уровней энергии электронов в приповерхностной зоне материала – в частях выступов шероховатой поверхности, обращенных к зонду.

Очевидно, положение основного пика определяется величиной ширины запрещенной зоны полупроводника и положением уровня Ферми, а также возможным начальным искривлением зон вблизи поверхности, соответствующим режиму обогащения поверхности полупроводника электронами. Оценка линейных размеров таких квантовых точек оказывается в интервале от 10 до 20 нм, что вполне согласуется с аналитическими оценками для InSb.

Квантовая точка, образованная частью выступа шероховатой поверхности полупроводника, выполняет функцию своеобразного «фильтра» для эмиссионного потока электронов из полупроводника в вакуум и далее к зонду туннельного микроскопа.

В работе [10] показано, что полученные малые значения барьеров для эмиссии из микрозерен InSb и InAs позволяют говорить о ее низкополевом характере.

Наблюдаемые для них ВАХ свидетельствуют об ограничении тока зарядом, локализованным в приповерхностном слое полупроводника.

Спецификой InSb и InAs являются очень малые значения эффективной массы m (легкие электроны, $m \approx 0,01m_0$) и энергии ϵ ($<0,2$ эВ) электронов. Это приводит к сравнительно большим значениям длины волны де Броиля для элек-

Let us note the consequences of the fact that in the left-handed media the phase velocity is opposite to the flow of energy. First of all, in the left-handed media the reversed effects will be observed: the Doppler effect and Cherenkov-Vavilov radiation!

For example, any change in the oscillation frequency due to the movement of a source or receiver is called the Doppler effect. Let the radiation receiver **B** moves with the speed V relative to the emitter **A** that emits the frequency. In this case, for the frequency perceived by the receiver due to the Doppler shift, the following expression can be obtained:

$$\omega = \omega_0 (1 + p(V/V_{gr})).$$

In the “left-handed” medium ($p = -1$), the receiver will catch up with the wave points relevant to a specific phase. Moreover, in the formula, the velocities V and V_{gr} move in various directions. Therefore, due to the Doppler effect, in the “right-handed” medium an object approaching us will become more “blue”, while in the “left-handed” medium it will appear more “red”.

It can be assumed that this phenomenon is observed during the runaway breakdown in the high-altitude discharges of the Red Sprites (Fig. 1 and Fig. 4) under the influence of penetrating cosmic particles through the “left-handed” metamedium in the form of fractals.

LOW-FIELD EMISSION OF NANODOTS

Let us provide an analysis of publications that indicate the possible low-field emission of various semiconductor and polymer materials with the nanograin or nanotip dimensions of 20–30 nm.

It was shown in [9] that in the case of a positive bias on the probe (negative potential on the semiconductor), the electrons were emitted from protrusions on the semiconductor surface being the nanoobjects in nature (the protrusion tip size for emission could reach 10–20 nm).

The emission of electrons from a semiconductor occurs with the participation of (one or more) quantized electron energy levels in the near-surface area of the material, namely in the parts of the rough surface protrusions facing the probe.

Obviously, the main peak position is determined by the forbidden band gap of the semiconductor and the Fermi level position, as well as by the possible initial distortion of bands near the surface relevant to the electron enhancement mode of the semiconductor surface. The estimated linear dimensions of such quantum dots turn out to be in the range from 10 to

трана – $\lambda = h(2m \epsilon)^{-1/2}$ – до 30 нм (для других полупроводников – порядка одного нанометра).

Зона действия приповерхностных локализованных состояний эмиссии должна примерно соответствовать размеру λ . Площадь эмиссионной поверхности зерна по условиям эксперимента $\approx 3 \text{ мкм}^2$. Тогда объем размещения локализованных состояний в микрозерне $v \approx 10^{-13} \text{ см}^{-3}$, концентрация локализованных центров эмиссии $NS/v = (10^{17}-10^{18}) \text{ см}^{-3}$, средние расстояния между центрами – $(NS/v)^{-3} \approx (10-30) \text{ нм}$.

В работе [11] продемонстрировано отступление от формулы Фаулера-Нордгейма для тока автоэмиссии из наночастиц при анализе экспериментальных данных острийных автокатодов из углеродных нанотрубок. Отмечено, что для получения при эксперименте тока величина напряжения должна быть, по крайней мере, в 10 раз больше, т. е. наблюдается не автоэлектронная эмиссия для изготовленных острийных автоэмиссионных катодов с уменьшенной высотой до субмикронных размеров, а так называемая низкополевая.

Предполагается, что одна из причин появления низкополевой эмиссии связана с уменьшением плотности электронных состояний наночастицы из-за размерного квантования спектра. Это приведет к контактной разности потенциалов между наночастицей и массивной подложкой. Заряд наночастицы тогда создаст у поверхности подложки вблизи места сочленения наночастицы с массивным основанием поле, достаточное для туннелирования электронов из него в наночастицу по вакууму. Внешнее напряжение только изменит траекторию движения эмитированных электронов.

Другая возможная модель заключается в деформации поверхностного слоя внешними электрическими силами. Деформации в таком случае могут быть усилены рычагами, составленными из наночастиц.

В работе [12] продемонстрированы возможности электростатических методов АСМ с проводящим зондом для исследования электрических характеристик поверхности полимерных материалов и изменения граничных условий на границе раздела полимер-металл.

Уменьшение толщины диэлектрической полимерной пленки приводит к ситуации, когда заряды, сосредоточенные вблизи границ контакта с металлическими электродами, начнут взаимодействовать между собой, приводя при этом к изменению формы потенциального барьера.

20 nm that is quite consistent with the analytical estimates for InSb.

The quantum dot, formed by the protruded part on the rough semiconductor surface acts as a kind of “filter” for the emission electron flow from the semiconductor into the vacuum and further to the tunnel microscope probe.

It was shown in [10] that the obtained low values of barriers for emission from the InSb and InAs micrograins suggest its low-field nature.

The current-voltage curves observed in relation to them indicate that the current is limited by the charge localized in the near-surface layer of the semiconductor.

A specific feature of InSb and InAs is the very small values of the effective mass m (light electrons, $m \approx 0.01m_0$) and energy ϵ (<0.2 eV) of electrons. This fact leads to the relatively large values of the de Broglie wavelength for the electron – $\lambda = h(2m \epsilon)^{-1/2}$ up to 30 nm (for other semiconductors it is about one nanometer).

The action area of the near-surface localized emission states should approximately correspond to the size λ . According to the experimental conditions, the emission surface area of the grain is $\approx 3 \text{ } \mu\text{m}^2$. In this case, the volume of localized states in the micrograin is $v \approx 10^{-13} \text{ cm}^{-3}$, the concentration of localized emission centers is $NS/v = (10^{17}-10^{18}) \text{ cm}^{-3}$, the average distances between the centers are $(NS/v)^{-3} \approx (10-30) \text{ nm}$.

In [11], a deviation from the Fowler-Nordheim formula for the field emission current from the nanoparticles was demonstrated when analyzing experimental data of the pointed field cathodes made of carbon nanotubes. It is noted that in order to obtain a current value during an experiment, the voltage must be at least 10 times greater, i. e. we observe not the field emission for the produced pointed field emission cathodes with a height reduced to the submicron dimensions, but the so-called low-field emission.

One of the reasons for the low-field emission is supposed to be a decrease in the electronic state density of the nanoparticle due to the size quantization of the spectrum. This will lead to a contact potential difference between the nanoparticle and the bulk substrate. The nanoparticle charge will then develop a field at the substrate surface near the nanoparticle junction with the bulk substrate that is sufficient for the electron tunneling into the nanoparticle through the vacuum. The external voltage will only change the motion path of the emitted electrons.

Another possible model is the surface layer deformation by the external electrical forces. Deformations



В работе [12] отмечено, что тонкие пленки полиариленфталидов (полимеры с широкой запрещенной зоной) с субмикронной толщиной становятся проводником тока с высокой электропроводностью, сопоставимой с проводимостью некоторых металлов, не в результате процедуры допирования, а при выполнении двух критических условий:

- толщина пленок такого материала должна быть меньше определенной критической (наноразмерной),
- наличие инициирующего относительно малого внешнего воздействия или электрического поля.

Таким образом, размеры 20–30 нм (нанозерен, наноострий, наношероховатостей и наноостровков) являются одним из условий возникновения низкополевой эмиссии из различных полупроводниковых и полимерных материалов при наличии напряжения смещения и импульсного воздействия напряжения.

НИЗКОПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ФРАКТАЛОВ

Рассмотрим результаты исследования фракталов из цепочек нерегулярных наноостровков (нанокапель) алюминия размером 30–1000 нм, нанесенных на полимерную нить арамида из волокон углеродных бензольных колец [13–15].

Наноостровки (нанокапли) алюминия нанесли на нить арамида (араматический полиамид – типа «русар»), которая намотана на барабан и обрабатывалась в вакуумной установке магнетронного напыления алюминия на технологической установке «МИР-2» в ООО «НИИ «Эластомерных материалов и изделий».

Для создания экспериментальных образцов использована полимерная нить длиной 30 м и диаметром 1000 мкм, которая плотно намотана 137 витками на цилиндр (бобина-барабан) радиусом 3,5 см и длиной 13,7 см [13] для нанесения алюминия.

В процессе металлизации установлены режимы в вакуумной камере:

- скорость вращения бобины-барабана ≈5 оборотов в минуту;
- время напыления бобины-барабана с нитью ≈1–30 минут;
- сила тока в магнетроне 2,5 А.

Нить представляет собой ароматический полимер – арамид, в котором 85% амидных связей прикреплены непосредственно к двум бензольным кольцам. Ароматическое кольцо из углерода – бензол (C_6H_6) обозначается в виде шести-

угольника в шестиугольной системе координат.

The paper [12] demonstrated the capabilities of electrostatic AFM methods with a conducting probe for studying electrical specifications of the surface of polymer materials and changing the boundary conditions at the polymer-metal interface.

The thickness reduction of the dielectric polymer film leads to a situation when the charges concentrated near the boundaries of contact with metal electrodes begin to interact with each other while leading to a change in the shape of the potential barrier.

It was noted in [12] that the thin films of polyarylene naphthalides (polymers with a wide forbidden band) with a submicron thickness become a current-carrying conductor with high electrical conductivity, comparable to the conductivity of some metals, not as a result of the doping procedure, but when two critical conditions are met:

- the thickness of films made of such material must be less than a certain critical (nano-sized) thickness;
- the availability of an initiating relatively small external influence or electric field.

Thus, the dimensions of 20–30 nm (nanograins, nanotips, nanoroughnesses and nanoislands) are one of the conditions for low-field emission occurrence in various semiconductor and polymer materials in the presence of bias voltage and pulsed voltage.

LOW-FIELD EMISSION OF FRACTALS

Let us consider the study results of fractals made of the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) with the dimensions of 30–1000 nm deposited on an aramid polymer thread made of the fibers of carbon benzene rings [13–15].

The aluminum nanoislands (nanodroplets) were applied to an aramid thread (aromatic polyamide of the Rusar type) that was wound on a drum and processed in a vacuum installation for magnetron aluminum sputtering at the MIR-2 process unit in the Research Institute of Elastomeric Materials and Products LLC.

To obtain the experimental samples, a polymer thread with a length of 30 m and a diameter of 1000 μ m is used. It is tightly wound with 137 turns on a cylinder (reel-drum) with a radius of 3.5 cm and a length of 13.7 cm [13] for the aluminum application.

During the metallization process, the following modes are set in the vacuum chamber:

- rotation speed of the reel-drum: ≈5 rpm;

угольника с вписанной окружностью (внешний диаметр 0,28 нм), подчеркивая тем самым отсутствие фиксированных двойных связей и наличие единого электронного облака, охватывающего все шесть атомов углеродного цикла. Цепочки из двух бензольных колец выстраиваются в волокно через соединение из хлора, а переплетение из нескольких волокон образует арамида (рис. 6, б). Следует отметить, что радиус атома алюминия: 0,143 нм (диаметр 0,286 нм).

Затем исследовались свойства образцов нитей длиной 1 см.

Фотографии полимерных нитей с цепочками нерегулярных наноостровков (нанокапель) алюминия с размером 30–1000 нм (рис. 6б и рис. 7) 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» [13, 14].

Исходя из анализа изображений (рис. 7), полученных в электронном микроскопе, можно считать, что полимерная нить из волокон арамида (из углеродных бензольных колец) с цепочками нерегулярных наноостровков (нанокапель) алюминия не имеет регулярной топологии и может быть отнесена к природоподобным фракталам (алюминий обозначен – красным цветом на рис. 7а и белым цветом на рис. 7б).

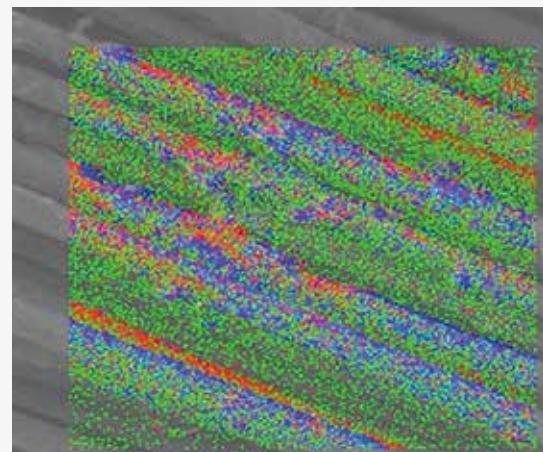
Следует отметить, что в математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющих метрическую размерность, отличную от топологической, поэтому их следует отличать от прочих геометрических фигур, ограниченных конечным числом звеньев.

Природные объекты (квазифракталы) отличаются от идеальных абстрактных фракталов неполнотой и неточностью повторений структуры.

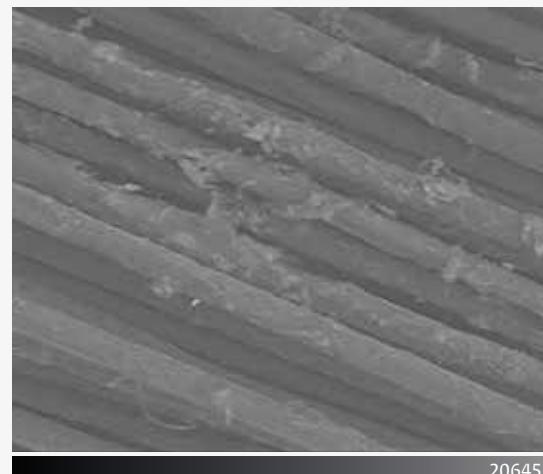
Исследование электрических характеристик полимерных нитей проводилось после формирования индивидуальных контактов к полимерным нитям с цепочками нерегулярных наноостровков (нанокапель) алюминия снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов на характеристографе Л2-56. Кроме ВАХ с помощью характеристографа Л2-56 оценивалось и сопротивление образца по наклону зависимости тока от напряжения. Для оценки емкости использовался измеритель LCR hewlett packard 4284A.

- spraying time for the reel-drum with the thread: \approx 1–30 minutes;
- current strength in the magnetron: 2.5 A.

The thread is an aromatic polyamide (aramid), where 85% of the amide bonds are attached directly to two benzene rings. The aromatic carbon ring,



a)



b)

Рис. 7. Поверхность полимерной нити из волокон арамида с нерегулярными цепочками наноостровков алюминия: а) изображения карты RGB, представляющей собой наложение карт – Al (красный), C (синий), Cl (зеленый); б) изображения картины во вторичных электронах – Al (белый цвет)

Fig. 7. The surface of a polymer thread made of aramid fibers with the irregular chains of aluminum nanoislands: a) images of an RGB map with an overlay of Al (red), C (blue), Cl (green) maps; b) images of the secondary electrons – Al (white)

При измерении ВАХ на образцов с длиной 10 см и 1 см появления тока при изменении напряжения до 12 В не наблюдалось. Экспериментально установлено, что полимерная нить из волокон арамида с цепочками нерегулярных наноструктур алюминия при малых постоянных напряжениях является изолятором [13-15].

При плавной подаче высокого напряжения величиной до 1,6 кВ (в течение 1 сек) на полимерную нить с наноструктурой металлизацией алюминием пробой отсутствует.

При подаче импульсного высокого напряжения на нить ситуация изменяется – происходит электрический разряд и формируется надповерхностное высокопроводящее состояние над полимерной нитью из волокон арамида с цепочками нерегулярных наноструктур алюминия, возможно, в появившейся плазме. Экспериментально установлено, что при подаче импульса напряжения 1,6 кВ на электроды, присоединенные к полимерной нити длиной 1 см, возникает электрический разряд.

На рис. 7а видны наноструктуры (нанокапли) алюминия с размером 30–1000 нм, которые могут объединять несколько десятков – сотен углеродных бензольных колец и создавать структуры алюминий/углерод. В какой-то части такой структуры может образоваться «наноточка», в которой и формируются условия к возникновению низкополевой эмиссии электронов из бензольных колец при импульсной подаче напряжения на полимерную нить.

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 на сантиметр, а для иголок составит 10 кВ на сантиметр [3].

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т.е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. При нормальных условиях, т.е. при давлении 0,1 МПа и температуре 20 °C, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3,2 МВ/м. Развитие пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой газа. Если в однородном поле напряженность поля постоянна, то в резко неоднородном

namely benzene (C_6H_6), is designated as a hexagon with an inscribed circle (its outer diameter is 0.28 nm), thereby emphasizing the absence of fixed double bonds and availability of a single electron cloud covering all six atoms of the carbon cycle. The chains of two benzene rings line up in a fiber through a chlorine compound, and the interweaving of several fibers generates aramid (Fig. 6, b). It should be noted that the radius of an aluminum atom is 0.143 nm (its diameter is 0.286 nm).

Thereupon, the properties of thread samples with the length of 1 cm have been studied.

The photographs of polymer threads with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) with the dimensions of 30–1000 nm (Fig. 6b and Fig. 7) are made by the scanning electron microscope CAMSCAN-S4 with the energy-dispersive and wavelength-dispersive attachments: Oxford INCA Energy 350 and INCA Wave 700 (Cambridge, England) at the High Technology Center of the Synchrotron Shared Use Center of the Federal State Unitary Enterprise “Lukin Research Institute of Physical Problems” of the National Research Center “Kurchatov Institute” [13, 14].

Based on the analysis of images in Fig. 7, obtained by an electron microscope, it can be considered that the polymer thread made of aramid fibers (from carbon benzene rings) with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) does not have a regular topology and can be classified as the nature-like fractals (aluminum is indicated in red in Fig. 7a and in white in Fig. 7b).

It should be noted that in mathematics, the fractals are considered as the sets of points in the Euclidean space that have a metric dimension that is different from the topological one, therefore, they should be distinguished from other geometric figures limited by a finite number of links.

The natural objects (quasi-fractals) differ from the ideal abstract fractals due to the incompleteness and imprecision of structure repetitions.

The study of the electrical specifications of polymer threads was performed after formation of the indium contacts to the polymer threads with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanoproplets); the current-voltage characteristics (CVC) of the samples were taken by a L2-56 curve tracer. In addition to the CVC, the sample resistance was also assessed using the L2-56 curve tracer by the slope of the current-voltage dependence curve. A Hewlett Packard 4284A LCR meter was used to estimate the capacitance.

When measuring the CVC of samples with a length of 10 cm and 1 cm, no current occurred when the volt-

поле изменяется на несколько порядков вдоль силовой линии [3].

В работах [14, 16] приведены фотографии конусообразного разряда вдоль полимерной нити длиной 30 м с цепочками нерегулярных наноструктур (нанокапель) алюминия (рис. 8а), которая аналогична приведенной в работе [2] форме оптического излучения микропробоя на убегающих электронах высотного разряда (рис. 8б), а не на форму обычной зигзагообразной электрической молнии над Землей.

Эксперимент и фотография электрического разряда в направлении распространения электромагнитной волны вдоль полимерной нити из волокон арамида с наноструктурами алюминия (длина нити 30 м; напряжение электрического поля $E=30$ кВ/м) были сделаны на высоковольтном стенде Всероссийского электротехнического института [16]. При эксперименте установлено, что при электрическом пробое на воздухе полимерные нити с наноструктурой металлизацией алюминием не перегорают.

Можно предположить, что возникновение низкополевой эмиссии электронов на длинных волокнах соединений углеродных бензольных колец при импульсном воздействии напряжения через наноструктуры (нанокапли) алюминия (при импульсном воздействии) приводит к созданию плазмы и формированию надповерхностного высопроводящего состояния (НПВПС), которое облегчает появлению высокогенеретических электронов приложенном высоком электрическом напряжении, способных заменить затравочные космические лучи.

Следует отметить, при формировании над поверхностью нити высопроводящего состояния (НПВПС) в виде плазмы сохраняет ее и она не перегорает [13–15]. Это состояние аналогично явлению аномального роста проводимости при $E>E_c$, которое в работах [1, 2] было названо «быстрым переносом заряда» при МПУЭ в высотных разрядах.

Экспериментально установлено, что пробой нити из волокон арамида с нерегулярными цепочками наноструктур алюминия в комнатных условиях составляет 1,6 кВ/см [13–15], которое даже меньше, чем необходимое для пробоя на убегающих электронах – 2,16 кВ/см [2]. Меньшее напряжение пробоя возможно повлияло на уменьшить длины экспоненциального нарастания лавины убегающих электронов с теоретической длины 50 м [2] до 30 м при давлении 1 атм [15, 16]. Для справки, при давлении 1 атм пороговое поле для обычного пробоя составляет 23–30 кВ/см [2, 3].

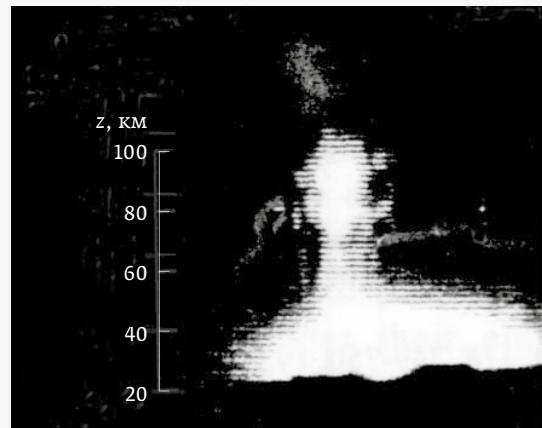
age was changed to 12 V. It has been experimentally established that at the low constant voltages a polymer thread made of aramid fibers with the chains of irregular aluminum nanoislands is an insulator [13–15].

When a high voltage of up to 1.6 kV is smoothly applied (for 1 second) to a polymer thread with the nanoisland metallization by aluminum, there is no breakdown.

When a pulsed high voltage is applied to the thread, the situation is changed: an electrical discharge occurs and an off-surface highly conductive state is obtained



a)



b)

Рис. 8. Электрический разряд: а) в направлении распространения электромагнитной волны вдоль полимерной нити из волокон арамида с наноструктурами алюминия (длина нити 30 м; напряжение электрического поля $E=30$ кВ/м); б) пример разряда «Спрайт» [2]

Fig. 8. Electric discharge: a) in the direction of an electromagnetic wave propagation along a polymer thread made of aramid fibers with the aluminum nanoislands (thread length 30 m; electric field voltage $E=30$ kV/m); b) example of a sprite discharge [2]

В работах [13–15] показано, что нити из волокон арамида с наноостровками алюминия размером 10–1000 нм могут обладать свойствами метаматериалов и оценка значения плазменной частоты для исследуемого метаматериала составляет 1–10 ТГц.

Можно предположить, что сформированные метаматериалы из фракталов из наноостровков алюминия нити из волокон арамида являются источником высокоэнергетических затравочных быстрых электронов для реализации пробоя на убегающих электронах в лабораторных условиях при длине нити 30 м и напряженности электрического поля 30 кВ/м.

ВЫВОДЫ ПО ЧАСТИ 2

Гипотетически можно предположить, что при подаче импульсного высокого напряжения полимерная нить из волокон арамида, состоящей из бензольных колец углерода, с цепочками нерегулярных наноостровков (нанокапель) алюминия (размером 10–100 нм) происходит микропробой фрактала через плазму, образованную при низкоПолевой эмиссии электронов, с формированием надповерхностного высокопроводящего состояния (НПВПС) над полимерной нитью.

Экспериментально установлено, что микропробой фрактала с нерегулярными цепочками наноостровков алюминия на нитях из волокон арамида равен 1,6 кВ/см (в комнатных условиях), который по величине меньше, чем расчетное значение для микропробоя на убегающих электронах, равное 2,16 кВ/см. Таким образом, для изготовления источника высокоэнергетических затравочных быстрых электронов и реализации пробоя на убегающих электронах достаточно использовать нить с фракталами наноостровков (нанокапель) алюминия длиной 30–50 м.

Фронт волны распространения высотных разрядов в виде конуса, направленного к источнику космических излучений, возможно осуществить только на фракталах из метаматериалов (имеющих отрицательные диэлектрическую и магнитную постоянные), например, нанокапель алюминия на поверхности полимерных нитей из волокон углеродных бензольных колец. Оценка значения плазменной частоты для разработанного метаматериала составляет 1–10 ТГц.

Фотография конусообразного микропробоя фрактала из наноостровков (нанокапель) алюминия вдоль полимерной нитью длиной 30 м аналогична по форме оптическому излучению микропробоя на убегающих электронах высотного разряда.

above a polymer thread made of aramid fibers with the chains of irregular aluminum nanoislands, possibly in the resulting plasma. It has been experimentally established that when a voltage pulse of 1.6 kV is applied to the electrodes connected to a polymer thread with the length of 1 cm, an electrical discharge occurs.

Fig. 7a shows the aluminum nanoislands (nanodroplets) with the dimensions of 30–1000 nm that can unite several tens to hundreds of carbon benzene rings and develop the aluminum/carbon structures. In some part of such a structure, a “nanodot” can be formed, in which the conditions will be developed for the occurrence of low-field emission of electrons from the benzene rings when a pulsed voltage is applied to the polymer thread.

It should be noted that the distance “broken” by a spark in the air depends on the electric field strength at the electrode surface and their shape. For the spheres which radius is much larger than the discharge gap, it is considered equal to 30 kV per centimeter, and for the needles it will be 10 kV per centimeter [3].

The electrical strength of a gas strongly depends on its density (i. e., on pressure if the temperature is constant). In the case of small changes in gas temperature and pressure, the breakdown voltage is proportional to the gas density. Under the normal conditions, i. e. at a pressure of 0.1 MPa and at a temperature of 20 °C, the electrical strength of air at a distance between the electrodes of 1 cm is approximately 3.2 MV/m. The breakdown development depends on the homogeneity degree of the electric field in which the gas is broken down. If in a homogeneous field the field strength is constant, then in a significantly inhomogeneous field it is changed by several orders of magnitude along the field line [3].

The papers [14, 16] show the photographs of a cone-shaped discharge along a polymer thread with the length of 30 m and the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) (Fig. 8a) that is similar to the optical radiation of micro runaway breakdown of a high-altitude discharge given in [2] (Fig. 8b), and not to the shape of the ordinary zigzag electric lightning over the Earth.

An experiment and photograph of an electric discharge in the direction of an electromagnetic wave propagation along a polymer thread made of aramid fibers with the aluminum nanoislands (thread length 30 m; electric field voltage $E=30$ kV/m) were performed and made at a high-voltage stand of the All-Russian Electrotechnical Institute [16]. The experiment established that during the electrical breakdown in air, the

Кроме того, наблюдаемые в верхних слоях атмосферы высотные разряды отличаются по цвету оптического свечения на разной высоте из-за разного типа фракталов, в которых происходит МПУЭ: «Красные эльфы» («Red Sprite») происходят в метасреде, а «Синие джеты» («Blue Jet») в обычной среде. В результате, МПУЭ отличаются направлениям конуса свечения по отношению к потоку затравочных космических частиц при МПУЭ, т. е. эффект Допплера будет «обращенным» для «Красных эльфов» на фракталах из метаматериалов.

Следует подчеркнуть, что однозначная связь высотных разрядов с мощными импульсами оптического и рентгеновского излучений является в настоящий момент лишь гипотезой, хотя и весьма правдоподобной. Данные о прямых и одновременных наблюдениях оптического и рентгеновского излучений высотных разрядов пока отсутствуют.

Использование разработанных фракталов с цепочками нерегулярных наноостровков (нано-капель) алюминия на полимерной нити из волокон арамида (на основе ароматических колец углерода – бензол) позволяет провести исследования одновременно оптического и рентгеновского излучений в лабораторных условиях на поверхности Земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

REFERENCES

1. Gurevich A V, Milikh G A, Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*. 1992; 165(5–6): 463–468. DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-p.
2. Gurevich A. V., Zybun K. P. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms. *Phys. Usp.* 2001;44: 1119–1140. DOI: 10.1070/PU2001v04n11ABEH000939
- Гуревич А. В., Зыбун К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы. *Успехи физических наук*. 2001; 171(11):1177–1199.
3. Physical quantities: Handbook / [A. P. Babichev, etc.]; Edited by I. S. Grigoriev, E. Z. Meilikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1231 p.
4. Bragin I. V., Chebotarev A. S., Elizavetov E. P., Istyakov I. V., Mikhailov V. F. Space-based radiometric equipment for measuring the parameters of high-altitude lightning discharges – alphas and jets. *Proceedings of the Russian universities. Radioelectronics*. 2012; 2: 75–78.
- Брагин И. В., Чеботарев А. С., Елизаветов Е. П., Истяков И. В., Михайлов В. Ф. Радиометрическая аппаратура космического базирования для измерения параметров высотных грозовых разрядов – альфов и джетов. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2012; 2:75–78.
5. Blokhin M. A. X-ray radiation. *Physical encyclopedia*: [in 5 volumes] / Ch. ed. A. M. Prokhorov. – Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1994; 4: 375–377.
6. Grechukhin D. P. Gamma radiation. *Physical encyclopedia*: [in 5 volumes] / Ch. ed. A. M. Prokhorov. – Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1994; 4: 377–379.

polymer threads with nanoisland metallization by aluminum do not burn out.

It can be assumed that the occurrence of low-field electron emission on the long fibers of carbon benzene ring compounds under the pulsed voltage through the aluminum nanoislands (nanoproplets) leads to the plasma development and formation of an off-surface high-conducting state (OSHCS) that facilitates the occurrence of high-energy electrons at an applied high electrical voltage, capable of replacing the seed cosmic rays.

It should be noted that the formation of an off-surface high-conducting state (OSHCS) above the thread surface in the form of plasma preserves it, therefore, it does not burn out [13–15]. This state is similar to the anomalous increase in conductivity at $E > E_c$ that was called the “fast charge transfer” during the MRB in the high-altitude discharges in the papers [1, 2].

It has been experimentally established that the breakdown of a thread made of aramid fibers with the irregular chains of aluminum nanoislands under the room conditions is 1.6 kV/cm [13–15] that is even less than that required for the runaway breakdown (2.16 kV/cm) [2]. The lower breakdown voltage may influence the reduction of the exponential growth length of the runaway electron avalanche from a theoretical length of 50 m [2] to 30 m at a pressure of 1 atm [15, 16]. For reference, at a pressure of 1 atm, the threshold field for an ordinary breakdown is 23–30 kV/cm [2, 3].

The papers [13–15] show that the threads made of aramid fibers with the aluminum nanoislands with the dimensions of 10–1000 nm can have the properties of metamaterials and the plasma frequency value for the metamaterial under study is estimated at the level of 1–10 THz.

It can be assumed that the metamaterials based on the fractals of aluminum nanoislands are a source of high-energy seed fast electrons for the implementation of runaway breakdown in the laboratory conditions at the thread length of 30 m and an electric field strength of 30 kV/m.

CONCLUSIONS: PART 2.

Hypothetically, it can be assumed that when a pulsed high voltage is applied to the polymer thread made of aramid fibers, consisting of benzene carbon rings, with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) (its dimensions are 10–100 nm), a fractal microbreakdown through plasma formed by the low-field electron emission occurs, with the generation of an off-surface high-conducting state (OSHCS) over the polymer thread.



7. **Veselago V. G.** The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Usp.* 1968;10:509–514. DOI: 10.1070/PU1968v01n04ABEH003699
Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . *Успехи физических наук.* 1967; 92(7):517–526. DOI: 10.3367/UFNr.0092.196707d.0517.
8. **Dement'ev A.N., Zhukov A.O., Il'kov V.K., Skrynskij V.R.** *Metamaterialy v radioelektronike: ot issledovanij k razrabotkam.* /Pod red. P. P. Mal'cev. – M.: Tekhnosfera. 2023. – 248s.
Дементьев А. Н., Жуков А. О., Ильков В. К., Скрынский В. Р. *Метаматериалы в радиоэлектронике: от исследований к разработкам.* /Под ред. П. П. Мальцев. – М.: Техносфера. 2023. – 248с.
9. **Gluhovskoj E. G., Zhukov N. D.** Protekanie toka v avtoemissionnom nanokontakte metall–poluprovodnik. *Prikladnaya fizika.* 2015; 3:5–9.
Глуховской Е. Г., Жуков Н. Д. Протекание тока в автоэмиссионном наноконтакте металла–полупроводник. *Прикладная физика.* 2015; 3:5–9.
10. **Mihajlov A. I., Kabanov V. F., Zhukov N. D.** Osobennosti avtoelektronnoj emissii iz submikronnyh vystupov sherochovatoj poverhnosti antimonida indiya. *Pis'ma v ZHTF.* 2015; 41(12):8–14.
Михайлов А. И., Кабанов В. Ф., Жуков Н. Д. Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимонида индия. *Письма в ЖТФ.* 2015; 41(12):8–14.
11. **Stecenko B. V.** Otstuplenie ot formuly Faulera–Nordgeima dlya toka avtoemissii iz nanochastic. *Zurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2011; 81(4):152–154.
Стенченко Б. В. Отступление от формулы Фаулер–Нордгейма для тока автоэмиссии из наночастиц. *Журнал технической физики.* 2011;81(4):152–154.
12. **Gadiev R. M., Lachinov A. N., Kornilov V. M. et al.** Anomal'no vysokaya provodimost' vdol' interfejsa dvuh polimernykh dielektrikov. *Pis'ma v ZHETF.* 2009;90(11): 821–825.
Гадиев Р. М., Лачинов А. Н., Корнилов В. М. и др. Аномально высокая проводимость вдоль интерфейса двух полимерных диэлектриков. *Письма в ЖЭТФ.* 2009;90(11): 821–825.
13. **Maltsev P. P., Ganzha A. A., Pavlov V.Yu., Mikhalev A. O., Kozlitin A. I.** Formation of Polymer Threads with Nanoscale Aluminum Formations. *Nanobiotechnology Reports.* 2022; 17(7): S15–S17. Pleiades Publishing, Ltd., 2022.
14. **Maltsev P. P., Ganzha A. A., Pavlov V.Yu., Mikhalev A. O., Kozlitin A. I.** Formation of Polymer Threads with a Nanosized Aluminum Topology. *Russian Microelectronics.* 2023; 52(4): 312–316. Pleiades Publishing, Ltd., 2023.
15. **Mal'cev P.P., Ganzha A. A., Pavlov V.YU., Mihalev A. O., Kozlitin A. I., Sarajkin V. V.** Ocenka znachenij radial'noj plazmennoj chastoty dlya polimernoj niti s nanoostrovkami alyuminija. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika.* 2024; 26(1.): 25–32.
Мальцев П. П., Ганжа А. А., Павлов В. Ю., Михалев А. О., Козлитин А. И., Сарайкин В. В. Оценка значений радиальной плазменной частоты для полимерной нити с наноструктурами алюминия. *Нано- и микросистемная техника.* 2024; 26(1.): 25–32.
16. **Ganzha A. A.** Issledovaniya atmosfernogo elektrichestva s pomoshch'yu kvantovo–strukturnyh nitej. Materialy XVIII Vserossijskoj Otkrytoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». 16–20 noyabrya. 2020. IKI RAN. 2020. S. 145. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
Ганжа А. А. Исследования атмосферного электричества с помощью квантово–структурных нитей. Материалы XVIII Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН. 2020. С. 145. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.

АВТОР

Мальцев Петр Павлович, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва, Россия.

AUTHOR

Maltsev Petr P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, Russia.

It has been experimentally established that the micro breakdown of a fractal with the irregular chains of aluminum nanoislands on the aramid fiber threads is 1.6 kV/cm (under the room conditions) that is less than the estimated value for the micro runaway breakdown equal to 2.16 kV/cm. Thus, to produce a source of high-energy seed fast electrons and implement the runaway breakdown, it is sufficient to use a thread with the fractals of aluminum nanoislands (nanodroplets) with the length of 30–50 m.

The wave front of the high-altitude discharge propagation in the form of a cone directed to the source of cosmic radiation can only be implemented on the fractals made of metamaterials (having negative dielectric and magnetic constants), for example, the aluminum nanodroplets on the surface of polymer threads made of fibers of carbon benzene rings. The estimated value of the plasma frequency for the developed metamaterial is 1–10 THz.

The photograph of a cone-shaped micro breakdown of a fractal made of aluminum nanoislands (nanodroplets) along a polymer thread with the length of 30 m is similar in shape to the optical radiation of a micro runaway breakdown of a high-altitude discharge.

In addition, the high-altitude discharges observed in the upper atmosphere differ in the optical glow color at various altitudes due to the different types of fractals in which the MRB occurs: Red Sprites occur in the meta-medium, and Blue Jets are developed in the ordinary medium. As a result, the MRB differ in the luminescence cone direction in relation to the flow of seed cosmic particles during the MRB, i. e. the Doppler effect will be «reversed» for the Red Sprites on the metamaterial fractals.

It should be emphasized that currently the unambiguous connection of high-altitude discharges with the powerful gamma radiation pulses is only a hypothesis, although a very plausible one. Any findings about the direct and simultaneous observations of optical and gamma radiation of the high-altitude discharges are not yet available.

The use of developed fractals with the chains of irregular aluminum nanoislands (nanodroplets) on a polymer thread made of aramid fibers (based on the aromatic carbon rings – benzene) makes it possible to study simultaneously optical and X-ray radiation in the laboratory conditions on the Earth's surface.

FINANCING OF THE STUDY

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



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А. Н. Дементьев, А.О. Жуков,
В.К. Ильков, В.Р. Скрынский

Метаматериалы в радиоэлектронике: от исследований к разработкам

Под ред. П.П. Мальцева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 248 с.
ISBN: 978-5-94836-674-6

Цена 975 руб.

В книге представлен обзор результатов разработок и исследований метаматериалов в радиоэлектронике, который сведен в следующие разделы:

- функциональные элементы СВЧ систем;
- метаматериалы в антенной технике;
- методы улучшения цифровой антенной решетки;
- разработка электрически малых антенн с применением метаматериала;
- дilemma «невидимости» и метаматериалы;
- радиопоглощающие системы на основе метаматериалов;
- инновационный стелс-метаматериал.

Обзор представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и магистров, студентов и бакалавров, специализирующихся в области радиоэлектроники и микросистемной техники.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru