



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01Q 17/008 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024128240, 24.09.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.09.2024

Дата регистрации:
25.02.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.09.2024

(45) Опубликовано: 25.02.2025 Бюл. № 6

Адрес для переписки:

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
ИПФ РАН, патентная группа

(72) Автор(ы):

Землянуха Петр Михайлович (RU),
Минеев Кирилл Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В.
Гапонова-Грехова Российской академии
наук" (ИПФ РАН) (RU)

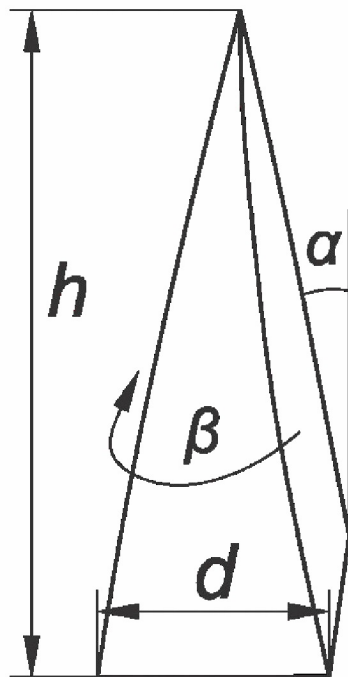
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: K.G. Kjelgard, D.T. Wisland, T.S.
Lande "3D Printed Wideband Microwave
Absorbers using Composite Graphite/PLA
Filament", 2018 48th European Microwave
Conference (EuMC), Madrid, Spain, 2018, pp.
859-862. WO 202390517 A1, 25.05.2023. US
11549977 B1, 10.01.2023. [https://web.archive.org/
web/20221221050719/https://www.thingiverse.com/
thing:5695703](https://web.archive.org/web/20221221050719/https://www.thingiverse.com/thing:5695703) (см. прод.)

(54) Микроволновый поглотитель

(57) Реферат:

Изобретение относится к поглотителям электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн. Поглощающая структура, представляющая собой массив четырехгранных пирамидальных элементов, изготовлена методом 3D печати из композитного полимера с высокой удельной электрической проводимостью. Пирамидальные элементы расположены концентрическими рядами, причем количество пирамидальных элементов в каждом ряду определяется натуральным числом, при этом каждый единичный пирамидальный элемент, заполненный гироидной структурой, представляет собой деформированную кручением на угол не

более 30° четырехгранную пирамиду с четырехугольным основанием со сторонами порядка рабочей длины волны и толщиной стенок порядка скин-слоя, а высоты пирамидальных элементов в одном ряду заданы в соответствии со случайным распределением в пределах 10% относительно номинальной высоты, составляющей порядка нескольких единиц рабочих длин волн. Технический результат - создание поглощающей структуры в частотном диапазоне от 75 до 300 ГГц с коэффициентом отражения по мощности не хуже -30 дБ. 2 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг.1

(56) (продолжение):

21.12.2022. CN 117818166 A, 05.04.2024. JP 2003241761 A, 29.08.2003. JP2005217384 A, 11.08.2005. Панкин Павел Сергеевич СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ http://kirensky.ru/zdoc/ref_pankin.pdf, 2018 (стр. 10). US 20200253096 A1, 06.08.2020. CN 221572440 A, 20.08.2024.

RU 2 8 3 5 4 7 4 C 1

RU 2 8 3 5 4 7 4 C 1

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(51) Int. Cl.
H01Q 17/00 (2006.01)
H05K 9/00 (2006.01)
G01R 29/08 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC
H01Q 17/008 (2024.08)(21)(22) Application: **2024128240, 24.09.2024**(24) Effective date for property rights:
24.09.2024Registration date:
25.02.2025

Priority:

(22) Date of filing: **24.09.2024**(45) Date of publication: **25.02.2025** Bull. № 6

Mail address:

**603950, g. Nizhnij Novgorod, ul. Ulyanova, 46, IPF
RAN, patentnaya gruppa**

(72) Inventor(s):

**Zemlianukha Petr Mikhailovich (RU),
Mineev Kirill Vladimirovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov
Institute of Applied Physics of the Russian
Academy of Sciences (IAP RAS) (RU)**(54) **MICROWAVE ABSORBER**

(57) Abstract:

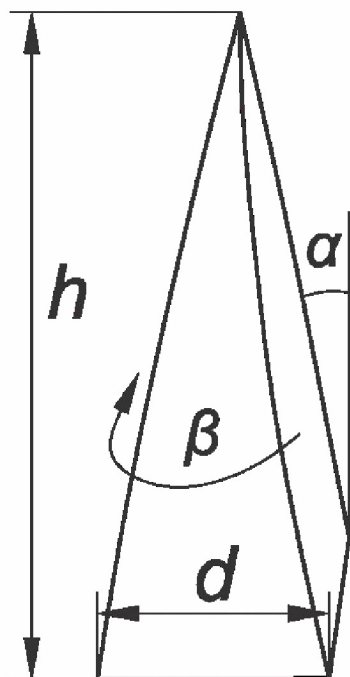
FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to millimetre-wave electromagnetic radiation absorbers. Absorbing structure, which is an array of tetrahedral pyramidal elements, is made by 3D printing from a composite polymer with high specific electrical conductivity. Pyramidal elements are arranged in concentric rows, wherein the number of pyramidal elements in each row is determined by a natural number, wherein each single pyramidal element filled with a gyroid structure is deformed by torsion at an angle of not more than 30°

tetrahedral pyramid with quadrangular base with sides of the order of working wavelength and thickness of walls of the order of skin layer, and the heights of the pyramidal elements in one row are set in accordance with a random distribution within 10 % relative to the nominal height, which is on the order of several units of operating wavelengths.

EFFECT: creation of an absorbing structure in the frequency range from 75 to 300 GHz with a power reflection coefficient of not less than -30 dB.

3 cl, 5 dwg



Фиг.1

Изобретение относится к антенной технике, в частности, к поглотителям электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн, и может быть использовано как для локализации зоны зондирования и снижения нежелательных переотражений вне ее пределов, так и в качестве согласованной нагрузки.

- 5 В области сантиметровых и длинных миллиметровых волн электромагнитного спектра известны широкодиапазонные поглотители шиповидной, клиновидной или пирамидальной формы, применяемые в измерительных стендах и безэховых камерах: поглотитель электромагнитных волн (ПМ RU 109334 «Поглотитель электромагнитных волн», МПК H01Q 17/00, публ. 10.10.2011 г.) с радиопоглощающим заполнителем в
10 виде сферических гранул пенополистирола, покрытых токопроводящей пленкой; поглотитель электромагнитных волн с закругленными ребрами пирамидальной части (RU 2359374, «Поглотитель электромагнитных волн», МПК H01Q 17/00, публ. 20.06.2009 г.), заполненный сухой смесью на основе целлюлозных материалов и углеродного волокна, работающие в частотном диапазоне от 1 до 15 ГГц при коэффициенте
15 отражения по мощности в пределах от -20 до -50 дБ; сверхширокодиапазонный поглотитель электромагнитных волн (RU 2453953 «Сверхширокодиапазонный поглотитель электромагнитных волн для безэховых камер и экранированных помещений», МПК H01Q 17/00, публ. 20.06.2012 г.), представляющий собой трехслойную конструкцию, состоящую из диэлектрического материала, магнитного материала и
20 металлической подложки, работающий в частотном диапазоне от 30 МГц до 37,5 ГГц при коэффициенте отражения по мощности в пределах от -12 до -40 дБ, и т.п.

- Необходимость пропорционального уменьшения габаритных размеров вследствие сокращения рабочих длин волн у перечисленных выше поглотителей, включая
25 всевозможные вариации геометрии и радиопоглощающего заполнителя, не только усложняет технологию изготовления, но и не гарантирует возможности их применения в области коротких миллиметровых волн (от 75 до 300 ГГц) при сохранении значений коэффициента отражения на уровне показателей проектного сантиметрового диапазона.

- Известен поглотитель электромагнитных волн (RU 2340054 «Поглотитель электромагнитных волн», МПК H01Q 17/00, публ. 27.11.2008 г.), представляющий собой
30 диэлектрический корпус в виде четырехгранной пирамиды, выполненный из микроффокартона, заполненный геометрическими фигурами (ленты, полосы и т.п.) из листовых токопроводящих материалов на основе бумаги или ткани, обеспечивающими многократное переотражение электромагнитных волн по мере проникновения в поглощающую структуру. В описании изобретения приведены
35 параметры поглотителей только в частотном диапазоне от 0,6 до 5 ГГц.

- Работоспособность в диапазоне коротких миллиметровых волн не исследовалась. Основным недостатком указанного изобретения является технологическая сложность изготовления корпуса и радиопоглощающего заполнителя с последующей склейкой между собой. Данное изобретение является аналогом к заявленному поглотителю.

- 40 В работе (Y. Arbaoui et al. «Full 3-D Printed Microwave Termination: A Simple and Low-Cost Solution», IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 1, pp.271-278, Jan. 2016) приведены исследования диэлектрических свойств поглотителей в частотном диапазоне от 8 до 12 ГГц, изготовленных методом 3D печати из разных полимеров. Обоснована экономическая эффективность использования 3D печати для
45 изготовления согласованных нагрузок по сравнению с традиционными производственными методами.

Существует вариант поглотителя (Matthew Petroff, John Appel, Karwan Rostem, Charles L. Bennett, Joseph Eimer, Tobias Marriage, Joshua Ramirez, Edward J. Wollack «A 3D-printed

broadband millimeter wave absorber», Rev. Sci. Instrum. 1 February 2019; 90 (2): 024701), являющийся аналогом к заявленному изобретению, изготовленный методом 3D печати из ударопрочного полистирола с графитовым наполнением, работоспособный в частотном диапазоне от 30 до 230 ГГц. Конструкция поглотителя представляет собой
 5 полую клиновидную структуру, реализованную по закону кривой Гильберта. Согласно измерениям, усредненное значение коэффициента отражения по мощности в указанном частотном диапазоне находится на уровне -25 дБ. Недостатком такой конструкции поглотителя являются поперечные размеры элементарной ячейки кривой Гильберта, ограничивающие вариативность исполнения поглотителя на масштабах,
 10 соответствующих нескольким длинам волн.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к заявленному техническому решению является известный поглотитель из массива пирамидальных элементов, изготовленных методом 3D печати из композитного PLA пластика с графитовым наполнением (K.G. Kjelgard, D.T. Wisland, T.S. Lande «3D Printed
 15 Wideband Microwave Absorbers using Composite Graphite/PLA Filament», 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain, 2018, pp. 859-862). Согласно измерениям, коэффициент отражения по мощности на частоте 4 ГГц у такого поглотителя составляет -25 дБ. Рассмотренный поглотитель из массива пирамидальных элементов, изготовленный методом 3D печати, выбран в качестве прототипа заявленного
 20 изобретения.

Перечисленные выше аналоги и прототип обладают рядом характерных признаков, совокупность которых необходима, но недостаточна для локализации зоны зондирования с поперечными размерами в несколько длин волн при коэффициенте отражения по мощности не хуже -30 дБ в частотном диапазоне от 75 до 300 ГГц.

Задачей, на решение которой направлено предложенное изобретение, является
 25 создание поглощающей структуры в частотном диапазоне от 75 до 300 ГГц с коэффициентом отражения по мощности не хуже -30 дБ.

Технический результат достигается тем, что предлагаемое изобретение, как и устройство-прототип, представляет собой поглощающую структуру из массива
 30 четырехгранных пирамидальных элементов, изготовленную методом 3D печати из композитного полимера с высокой удельной электрической проводимостью. Новым является то, что пирамидальные элементы расположены концентрическими рядами, причем количество пирамидальных элементов в каждом ряду определяется натуральным числом. При этом каждый единичный пирамидальный элемент, заполненный гироидной
 35 структурой, представляет собой деформированную кручением на угол не более 30° четырехгранную пирамиду с четырехугольным основанием со сторонами порядка рабочей длины волны и толщиной стенок порядка скин-слоя. Высоты пирамидальных элементов в одном ряду заданы в соответствии со случайным распределением в пределах 10% относительно номинальной высоты, составляющей порядка нескольких единиц
 40 рабочих длин волн.

В частном случае первый ряд образован одним пирамидальным элементом, высота которого совпадает с осью симметрии поглощающей структуры.

В другом частном случае первый ряд образован несколькими пирамидальными элементами, стороны оснований которых, обращенные к центру симметрии
 45 поглощающей структуры, образуют круговое отверстие.

Микроволновый поглотитель поясняется следующими фигурами.

Фиг. 1 - единичный пирамидальный элемент.

Фиг. 2 - расположение пирамидального элемента в концентрическом ряду.

Фиг. 3 - модель микроволнового поглотителя в виде сплошной структуры.

Фиг. 4 - модель микроволнового поглотителя в виде структуры со сквозным центральным отверстием.

Фиг. 5 - фото образца разработанного микроволнового поглотителя.

Микроволновый поглотитель представляет собой поглощающую структуру из массива четырехгранных пирамидальных элементов, расположенных концентрическими рядам. На фиг. 1 представлен эскиз единичного пирамидального элемента, на фиг. 2 расположение единичного пирамидального элемента в концентрическом ряду. Пирамидальный элемент характеризуется следующими параметрами:

h - высота пирамидального элемента,
 α - угол наклона граней,
 β - угол кручения,
 d - средняя линия в основании пирамидального элемента,
 r - радиус середины концентрического ряда.

Для описания алгоритма расчета введем обозначения: R - радиус внутренней круговой области, r_i - радиус середины i -го концентрического ряда поглощающей структуры, N_i - количество пирамидальных элементов в i -м концентрическом ряду, λ - рабочая длина волны в свободном пространстве, h_0 - номинальная высота пирамидального элемента, α - угол наклона граней, $\beta_{\max}$ - предельный угол кручения пирамидального элемента, $d_{i,j}$ - средняя линия в основании единичного j -го пирамидального элемента из N_i пирамидальных элементов в i -м концентрическом ряду.

Начальное значение средней линии в основании единичного пирамидального элемента d_0 и номинальная высота h_0 связаны с рабочей длиной волны в свободном пространстве и в частном случае были выбраны следующие соотношения $d_0 = (1 \div 3)\lambda$, $h_0 = (4 \div 8)\lambda$.

Внутренняя круговая область может представлять собой сквозное отверстие, и радиус R будет являться радиусом выреза, величина которого устанавливается независимо, или внутренняя круговая область может являться частью поглощающей структуры,

тогда радиус $R = \frac{d_0}{2}$ будет радиусом описанной окружности основания единичного пирамидального элемента, высота которого совпадает с осью симметрии поглощающей структуры.

Для первого концентрического ряда радиус его середины, являющийся радиусом вписанной окружности в правильный N -многоугольник (r на фиг. 2), определяется как

$r_1 = R + \frac{d_0}{2}$. Количество пирамидальных элементов в концентрическом ряду

рассчитывается из уравнения

$$N_i = \text{round} \left\{ \frac{\pi}{\arctg \left(\frac{d_0}{2r_i} \right)} \right\}.$$

Математическая функция $\text{round}\{\}$ означает округление до целого значения.

Значение средней линии в основании единичного j -го пирамидального элемента из N_i пирамидальных элементов в i -м концентрическом ряду уточняется согласно условию размещения целого количества пирамидальных элементов и является одинаковым для

любого j -го пирамидального элемента в конкретном i -м концентрическом ряду

$$d_{i,j} = d_i = 2r_i \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{N_i} \right).$$

- 5 Радиусы середин последующих концентрических рядов находится из условия $r_i = r_{i-1} + d_{i-1}$.

- Угол наклона граней определяется как $\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{d_0}{2h_0} \right)$, а предельный угол кручения
10 пирамидального элемента $\beta_{\max}$ не превышает 30° и выбирается максимальным исходя из технологических особенностей конкретного композитного полимера, используемого при изготовлении микроволнового поглотителя методом 3D печати.

- Закон формирования параметров для каждого j -го единичного пирамидального
15 элемента в i -м концентрическом ряду является случайным при следующих ограничениях: высота j -го единичного пирамидального элемента должна находиться в пределах $h_j = (0,9 \div 1,1)h_0$, а угол кручения $\beta_j = 0 \div \beta_{\max}$.

Угол поворота последующего концентрического ряда относительно предыдущего вокруг центральной оси определяется как:

$$20 \quad \varphi_i = \varphi_{i-1} + (-1)^i \frac{N_i - N_{i-1}}{N_i N_{i-1}} \cdot 360^\circ.$$

Для первого концентрического ряда принимается $\varphi_1 = 0^\circ$.

- В качестве примера на фиг. 4 представлена модель микроволнового поглотителя с
5 концентрическими рядами и центральным вырезом диаметром в 8 длин волн, а на
25 фиг. 3 - модель микроволнового поглотителя аналогичных габаритных размеров, но без центрального выреза. В обеих моделях номинальная высота соответствует 6 длинам волн.

- Микроволновый поглотитель работает следующим образом. Электромагнитное
излучение от любого источника можно представить в виде суперпозиции плоских
30 монохроматических электромагнитных волн. Плоская электромагнитная волна при нормальном падении на заявляемый микроволновый поглотитель облучает внутреннюю область с круговым вырезом без каких либо препятствий, в то время как при падении на внешнюю поглощающую структуру, содержащую концентрические ряды
35 пирамидальных элементов, изготовленные методом 3D печати из композитного полимера, частично отражается от границы раздела двух сред воздух композитный полимер и частично проникает в толщу композитного полимера в виде преломленной волны. При использовании микроволнового поглотителя в качестве согласованной нагрузки во внутренней области круговой вырез отсутствует, т.е. вся поверхность
40 микроволнового поглотителя является поглощающей структурой.

- По сравнению с обычными диэлектриками композитный полимер обладает высокой
удельной проводимостью порядка 10 См/м , его комплексная диэлектрическая
проницаемость имеет большую мнимую часть, вследствие чего прошедшее
электромагнитное излучение поглощается в толще композитного полимера и
45 рассеивается в виде тепловых потерь. Благодаря четырехгранной геометрии единичного пирамидального элемента первичное отражение происходит в направлении соседнего пирамидального элемента, и исходная электромагнитная волна претерпевает
многократные переотражения, теряя энергию с каждым последующим отражением за
счет проникновения части энергии в толщу композитного полимера и тепловых потерь.

Для устранения интерференционных максимумов в отраженной в направлении на источник излучения электромагнитной волне высоты пирамидальных элементов выбираются случайным образом в пределах 10% от номинальной высоты.

Дополнительное снижение отражения электромагнитных волн от поглощающей структуры достигается за счет увеличения диффузного рассеяния посредством расширения области дифракции на единичном пирамидальном элементе в результате его деформации кручением на угол до 30° . Толщина стенок пирамидальных элементов выбирается порядка толщины скин-слоя ($\sim 0,5$ мм на частоте 150 ГГц), внутреннее заполнение объема пирамидальных элементов выполняется гироидной структурой.

Прошедшая через стенки часть электромагнитного излучения поглощается за счет переотражения внутри пирамидальных элементов на поверхностях гироидной структуры, что позволяет многократно рассеивать энергию электромагнитной волны по всему объему поглощающей структуры. В то же время, гироидная структура является минимальной поверхностью, что обеспечивает меньший расход материала композитного полимера в процессе 3D печати по сравнению со сплошным заполнением.

Были проведены измерения коэффициента отражения S_{11} от поглощающей структуры резонансным способом в частотном диапазоне от 100 до 200 ГГц на измерительной установке на основе резонаторов Фабри - Перо. В качестве исследуемого образца использовалась поглощающая структура на фиг. 5, изготовленная методом 3D печати из композитного полимера U3 ABS CONDUCTIVE 2M в соответствии с моделью из фиг. 3. Номинальная высота $h=15$ мм, величина средней линии в основании $d=5$ мм. Внешний диаметр микроволнового поглотителя составлял 75 мм. Согласно измерениям коэффициент отражения в указанном частотном диапазоне находится в пределах $S_u = -(30 \div 35)$ дБ.

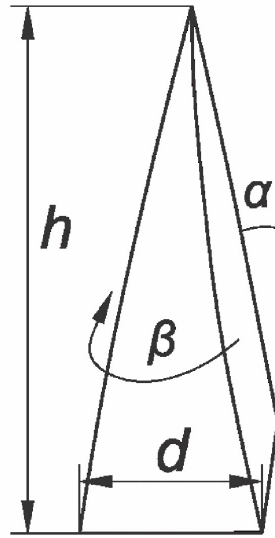
(57) Формула изобретения

1. Поглощающая микроволны структура, представляющая собой массив четырехгранных пирамидальных элементов, изготовленная методом 3D печати из композитного полимера с высокой удельной электрической проводимостью, отличающаяся тем, что пирамидальные элементы расположены концентрическими рядами, причем количество пирамидальных элементов в каждом ряду определяется натуральным числом, при этом каждый единичный пирамидальный элемент, заполненный гироидной структурой, представляет собой деформированную кручением на угол не более 30° четырехгранную пирамиду с четырехугольным основанием со сторонами порядка рабочей длины волны и толщиной стенок порядка скин-слоя, а высоты пирамидальных элементов в одном ряде заданы в соответствии со случайным распределением в пределах 10% относительно номинальной высоты, составляющей порядка нескольких единиц рабочих длин волн.

2. Поглощающая микроволны структура по п. 1, отличающаяся тем, что первый ряд образован одним пирамидальным элементом, высота которого совпадает с осью симметрии поглощающей структуры.

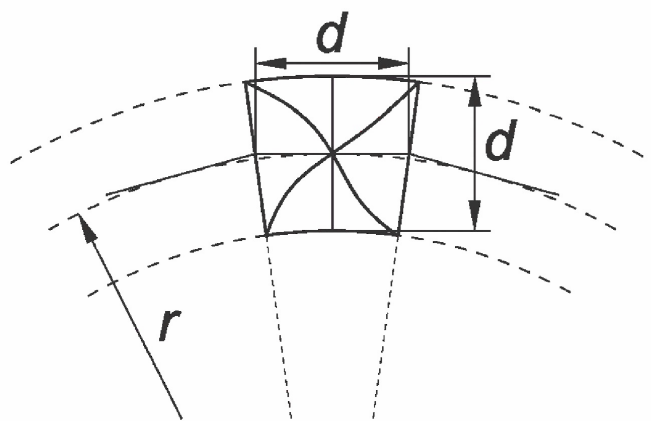
3. Поглощающая микроволны структура по п. 1, отличающаяся тем, что первый ряд образован несколькими пирамидальными элементами, стороны оснований которых, обращенные к центру симметрии поглощающей структуры, образуют круговое отверстие.

1

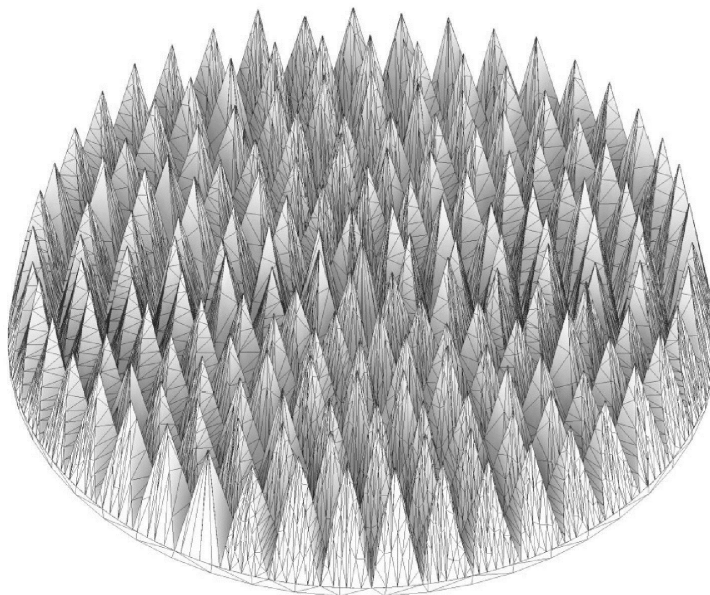


Фиг.1

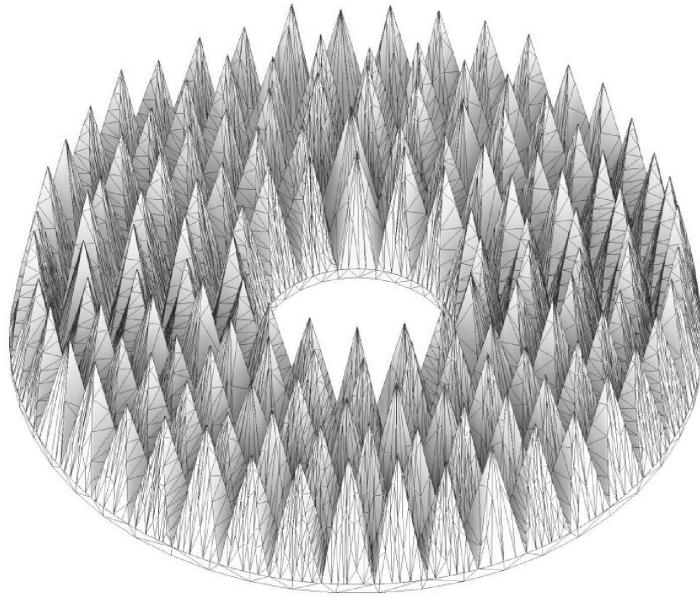
2



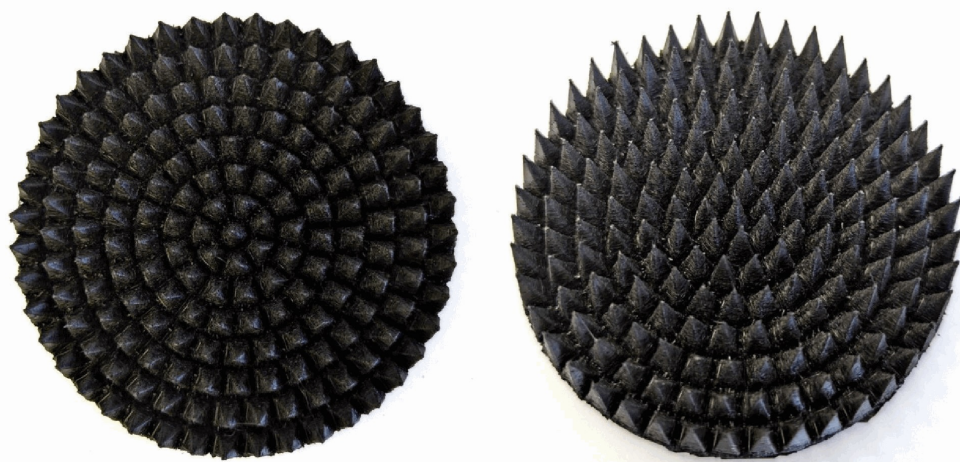
Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5