# ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **BY** (11) **13747**

(13) **U**

(45) **2025.07.05**

(51) МПК

***H 01Q 17/00*** (2006.01)


## (54) ДВУХУРОВНЕВЫЙ МНОГОСЛОЙНЫЙ ЭКРАН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА


(21) Номер заявки: u 20250002

(22) 2025.01.09



(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (BY)

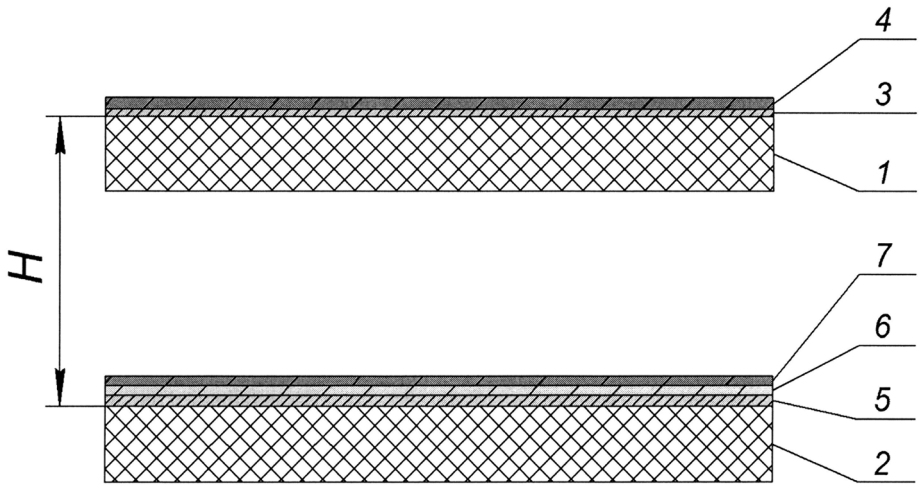
(72) Авторы: Гладинов Антон Дмитриевич; Бойправ Ольга Владимировна; Богуш Вадим Анатольевич (BY)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (BY)



(57)

Двухуровневый многослойный экран электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, содержащий уровень в виде полимерной подложки с последовательно нанесенными на нее электронно-лучевым методом слоем из алюминия толщиной 50-150 нм и слоем из магнитного сплава системы Fe-Ni толщиной 100-150 нм с содержанием никеля 44-50 мас. %, **отличающийся** тем, что дополнительно содержит расположенный от вышеупомянутого уровня на расстоянии $(0,5\text{-}1,0)\cdot\lambda_{min}$, где $\lambda_{min}$ - минимальная длина волны в рабочем диапазоне частот такого экрана, уровень в виде полимерной подложки с последовательно нанесенными на нее электронно-лучевым методом слоем из алюминия толщиной 100-200 нм, слоем из меди толщиной 100-150 нм и слоем из сплава системы Fe-Ni толщиной 100-150 нм с содержанием никеля 44-50 мас. %.



(56)

1. RU 23414, 2021.
2. RU 21686, 2018.



BY 13747 U 2025.07.05

3. НАРУШКО, Е. О. и др. Влияние режимов формирования на структуру тонких покрытий, используемых в многослойных экранах ЭМИ. Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. ФТИ НАН Беларуси. Минск, 2019, с. 59-66.

4. RU 2646439, 2018.

5. ЗЕЛЕНИН В. А. и др. Формирование пленок сплавов систем Cr-Ni, Cr-Ni-Si и Fe-Ni методами сублимации и испарения для изделий электронной техники = Formation of Films of Alloys of Cr-Ni, Cr-Ni-Si and Fe-Ni Systems by Sublimation and Evaporation Methods for Electronic Products. Доклады БГУИР. 2023, т. 21, № 5, с. 5-12.

---

Полезная модель относится к устройствам для снижения энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона и может быть использована для обеспечения защиты радиоэлектронного оборудования, а также биологических объектов от ЭМИ СВЧ-диапазона естественного и антропогенного происхождения.

Известен многослойный экран ЭМИ [1], в структуру которого входят слой из немагнитного материала (медь) или благородных металлов (золото, серебро), а также слой из магнитного материала (сплава железо-никель). Недостатком такого экрана является то, что его применимость ограничена низко- и среднечастотными диапазонами длин волн ЭМИ (до 1,0 МГц).

Известен экран ЭМИ [2], в структуру которого входят последовательно нанесенные на стеклянную подложку методом электронно-лучевого испарения в вакууме слои из диоксида циркония, никеля и золота. Преимуществами данного экрана являются воспроизводимость и стабильность его защитных свойств ввиду того, что входящие в его структуру слои из никеля и золота разделены между собой и защищены от внешних воздействий слоями из диоксида циркония. Недостатком данного экрана является то, что он характеризуется узкой рабочей полосой частот, что обусловлено как невысокой электропроводностью входящих в его структуру тонких слоев золота, так и невысокой относительной магнитной проницаемостью слоя из никеля. При осаждении пленок золота малой толщины (до 25 нм) формируются кластерно-островковые пленки с высоким поверхностным сопротивлением (сотни Ом/кв) [3, стр. 61]. И только при толщинах выше 30 нм происходит коалесценция (слияние) островков золота в сплошную пленку, что приводит к снижению их поверхностного сопротивления (до долей Ом/кв). При осаждении слоя из никеля, имеющего гранецентрированную кристаллографическую решетку, происходит образование сплошной пленки с кристаллической структурой, что снижает величину относительной магнитной проницаемости указанного слоя до величин порядка $10^3$. Вследствие этого экран ЭМИ [2] эффективно экранирует ЭМИ только в среднечастотном диапазоне длин волн.

Известен также многослойный экран ЭМИ [4], в структуру которого входят нанесенные на подложку последовательно чередующиеся магнитные и немагнитные слои из электропроводящих материалов суммарной толщиной 300,0-500,0 мкм, при этом магнитные слои выполнены из сплава никель-железо, а немагнитные слои - из меди. Толщина магнитных слоев - 1-6 мкм, немагнитных слоев - 0,1-1,0 мкм. Общее количество магнитных и немагнитных слоев - 100-900. Рабочий диапазон частот рассматриваемого экрана - от 10 Гц до 10 кГц. По сравнению с вышепредставленными экранами рассматриваемый экран характеризуется высокой эффективностью экранирования ЭМИ, обусловленной тем, что в его структуру входит большое количество слоев. Недостатком рассматриваемого экрана являются высокие временные затраты, необходимые для его изготовления.

Наиболее близким к заявляемой полезной модели является многослойный тонкопленочный экран ЭМИ [3], в структуру которого входят последовательно нанесенные электронно-лучевым методом на подложку из поликарбоната слой из меди толщиной 100 нм и

слой из магнитного сплава $Ni_{80}Fe_{20}$ толщиной 300 нм [3, стр. 63]. Преимуществом рассматриваемого экрана ЭМИ по сравнению с экраном [4] являются невысокие временные затраты, необходимые для его изготовления. Обозначенное преимущество обусловлено тем, что при изготовлении рассматриваемого экрана ЭМИ слои из меди и сплава $Ni_{80}Fe_{20}$ наносятся на подложку с использованием электронно-лучевого метода в одном цикле без разгерметизации вакуумной камеры. Недостатком рассматриваемого экрана ЭМИ является его низкая эффективность экранирования ЭМИ в СВЧ-диапазоне длин волн, что обусловлено малой толщиной входящих в его структуру слоев.

Задачей предлагаемой полезной модели является повышение эффективности экранирования ЭМИ в СВЧ-диапазоне, характерной для многослойного экрана ЭМИ.

Указанная задача решается тем, что многослойный экран ЭМИ выполнен двухуровневым, первый уровень которого представляет собой полимерную подложку с последовательно нанесенными на нее электронно-лучевым методом слоем из алюминия толщиной 50-150 нм и слоем из магнитного сплава системы железо-никель (Fe-Ni) толщиной 100-150 нм с содержанием никеля 44-50 мас. %, а второй уровень представляет собой полимерную подложку с последовательно нанесенными на нее электронно-лучевым методом слоем из алюминия толщиной 100-200 нм, слоем из меди толщиной 100-150 нм и слоем из магнитного сплава системы Fe-Ni толщиной 100-150 нм с содержанием никеля 44-50 мас. %. Расстояние между первым и вторым уровнями многослойного экрана ЭМИ составляет $(0,5\text{-}1,0)\cdot\lambda_{min}$, где $\lambda_{min}$ - минимальная длина волны в рабочем диапазоне частот такого экрана.

Сущность полезной модели поясняется фигурой, на которой схематически изображено расположение подложки первого уровня 1 и подложки второго уровня 2, выполненных из полимерного материала, с нанесенными на подложку первого уровня 1 слоями из алюминия 3 и из сплава железо-никель 4, а также с нанесенными на подложку второго уровня 2 слоем из алюминия 5 и слоями из меди 6 и сплава системы Fe-Ni 7.

Выбор алюминия в качестве материала электропроводящего слоя первого уровня обусловлен тем, что значения коэффициента передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне у такого материала ниже, чем у других электропроводящих материалов, широко применяемых в настоящее время при изготовлении экранов ЭМИ. Толщина слоя из алюминия должна быть не менее 50 нм вследствие большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) полимерных материалов (более $30\cdot10^{-6}$ $K^{-1}$) и сплавов Fe-Ni ($\sim 15\cdot10^{-6}$ $K^{-1}$). ТКЛР алюминия, равный $23,5\cdot10^{-6}$ $K^{-1}$, имеет промежуточное значение между ТКЛР полимерных материалов и ТКЛР сплава системы Fe-Ni, но при толщинах менее 50 нм он недостаточно пластичен, чтобы компенсировать возникающие в слоях термические напряжения. При толщине слоя из алюминия выше 150 нм снижается коэффициент пропускания ЭМИ первого уровня экрана ЭМИ.

Сплав системы Fe-Ni с содержанием никеля 44-50 мас. % является азеотропным [5]. При содержании никеля в сплаве Fe-Ni менее 40 мас. % и более 55 мас. % отклонения содержания никеля и железа в покрытии от исходного содержания в сплаве системы Fe-Ni превышают 5 мас. %. Это приводит к разбросу значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне экранов ЭМИ, содержащих слои из сплава указанной системы. При нанесении на подложку электронно-лучевым методом слоя из сплава системы Fe-Ni с содержанием никеля 44-50 мас. % можно обеспечить его конгруэнтное испарение, при котором элементный состав пара соответствует составу исходного испаряемого сплава, что позволяет стабилизировать значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне экранов ЭМИ, содержащих слои из сплава указанной системы.

Поскольку для повышения коэффициента отражения ЭМИ второго уровня двухуровневого многослойного экрана ЭМИ использованы слои из меди и сплава железо-никель азеотропного состава толщиной от 100,0 до 150,0 нм каждый, то для снижения уровня остаточных температурных напряжений в многослойной системе толщина барьерного

слоя из алюминия должна составлять от 100,0 до 200,0 нм. При толщине слоя из алюминия меньше 100,0 нм возникающие в многослойной системе термические напряжения могут привести к локальным отслоениям от подложки слоев из меди и сплава Fe-Ni. При толщине слоя из алюминия 200 нм проблема адгезионной прочности слоев полностью отсутствует, и нет необходимости в нанесении более толстого слоя.

Для повышения коэффициента отражения ЭМИ второго уровня многослойного экрана ЭМИ минимальная толщина входящих в его структуру слоев меди и сплава железо-никель должна составлять не менее 100 нм каждый.

В табл. 1 представлены результаты измерений значений коэффициентов отражения ($S_{11}$) и передачи ($S_{21}$) ЭМИ первого и второго уровней двухуровневого многослойного экрана ЭМИ.

Таблица 1

**Значения $S_{11}$ и $S_{21}$ уровней двухуровневого многослойного экрана ЭМИ**

| Уровень экрана | Параметр | Значение параметра в диапазоне частот, дБ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 2,0-5,0 ГГц | 6,0-9,0 ГГц | 10,0-13,0 ГГц | 14,0-17,0 ГГц |
| Первый | $S_{11}$ | -2,0 | -5,6 | -4,4 | -3,6 |
| | $S_{21}$ | -6,8 | -11,0 | -15,8 | -8,5 |
| Второй | $S_{11}$ | -16,8 | -16,7 | -15,9 | -19,0 |
| | $S_{21}$ | -41,0 | -28,0 | -28,7 | -22,8 |

В табл. 2 представлены результаты измерений значений $S_{11}$ и $S_{21}$ двухуровневого многослойного экрана ЭМИ.

Таблица 2

**Значения $S_{11}$ и $S_{21}$ двухуровневого многослойного экрана ЭМИ**

| Расстояние между уровнями H, мм | Параметр | Значение параметра в диапазоне частот, дБ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $H/L_{min}$ | 2,0-5,0 | $H/L_{min}$ | 5,0-10.0 | $H/L_{min}$ | 10,0-17,0 |
| 8 | $S_{11}$ | 0,13 | -17,1 | 0,27 | -18,1 | 0,45 | -18,8 |
| | $S_{21}$ | | -42,2 | | -34,7 | | -32,3 |
| 12 | $S_{11}$ | 0,20 | -17,1 | 0,4 | -18,3 | **0,68** | **-11,8** |
| | $S_{21}$ | | -42,2 | | -35,5 | | **-52,7** |
| 16 | $S_{11}$ | 0,27 | -17,1 | **0,53** | **-11,9** | **0,91** | **-13,4** |
| | $S_{21}$ | | -42,2 | | **-53,3** | | **-51,3** |
| 20 | $S_{11}$ | 0,33 | -17,1 | **0,67** | **-13,2** | 1,13 | -17,5 |
| | $S_{21}$ | | -42,2 | | **-51,4** | | -38,3 |
| 30 | $S_{11}$ | **0,50** | **-19,3** | **1,0** | **-14,1** | 1,7 | -18,5 |
| | $S_{21}$ | | **-51,3** | | **-50,4** | | -35,8 |
| 40 | $S_{11}$ | **0,67** | **-10,8** | 1,33 | -20,2 | 2,27 | -20,2 |
| | $S_{21}$ | | **-49,1** | | -35,6 | | -31,1 |

Примечание: жирным контуром в таблице выделены ячейки, в которых представлены значения $S_{11}$ и $S_{21}$ многослойного экрана ЭМИ, в котором расстояние между первым и вторым уровнями составляет $(0,5\text{-}1,0)\cdot\lambda_{min}$.

Принцип действия двухуровневого многослойного экрана ЭМИ основан на следующем. При взаимодействии ЭМИ с двухуровневым многослойным экраном СВЧ-диапазона в его слоях возникают вихревые токи, которые препятствуют проникновению ЭМИ

вглубь экрана. Толщина скин-слоя (δ), в котором возникают вихревые токи, определяется зависимостью [6]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{f\sigma\mu}},$$

где f - частота поля;

σ - электрическая проводимость слоя;

μ - относительная магнитная проницаемость слоя из магнитного материала.

Двухуровневый многослойный экран ЭМИ СВЧ-диапазона по сравнению с аналогом характеризуется более высокой эффективностью экранирования за счет того, что содержит большее количество слоев.

Национальный центр интеллектуальной собственности.
220034, г. Минск, ул. Козлова, 20.