РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 78–89

_____ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 621.383 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.78.89

Метрологический комплекс регистрации и измерения терагерцевого излучения на основе пленочных структур Сг-слюда-Al-VO_x и Cr-слюда-VO_x

А.С.Олейник, д.т.н., профессор, anatoly.semenovich@gmail.com Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация

> В. П. Мещанов, д. т. н., профессор, nika373@bk.ru ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов, Российская Федерация

Аннотация. Получены зависимости коэффициента поглощения пленок нихрома и хрома на уровне 0,5 в частотных диапазонах 102-110 ГГц, 206,6-223,6 ГГц и 102-116,6 ГГц, 206-226,6 ГГц. Указанные пленки используются в качестве поглотителя пленочных структур Сг-слюда-Al-VO_x и Сг-слюда-VO_x, в которых Al-VO_x выполняет функции термохромного слоя, а VO_x служит термочувствительным слоем, так как при нагреве VO_x одновременно скачкообразно изменяет свои оптические параметры и сопротивление. Структура Cr-слюда-Al-VO_x используется в качестве экрана метрологического комплекса (МК), на котором по цветовому рельефу изображения проводят экспрессный визуальный анализ пространственного распределения мощности (энергии) миллиметрового излучения. При выполнении поглотителя и термохромного слоев в виде пикселей размером 50×50 мкм² пространственное разрешение поля экрана составляет не менее 10 мм⁻¹, яркостный и цветовой контраст изображения — не менее 9,7 (три градации по яркости и цвету), постоянная времени экрана радиовизора — 2.1×10^{-8} с. На длинах волн 2,99-2,56 и 1,45-1,34 мм, при постоянном излучении обнаруживаемый поток энергии (первая градация яркости экрана), приходящийся на пиксель, составляет 15,5 × 10⁻³ Вт; в диапазоне длительности импульса 1-2,1 × 10⁻⁸ с он линейно изменяется от 15,5 × 10⁻³ до 22,3 × 10⁻⁷ Дж. Структура Сг-слюда-VO_x применяется в качестве приемной площадки многоэлементного приемника миллиметрового излучения. Разработан второй блок МК, включающий многоэлементный приемник, сопряженный с двухкоординатным приводом, интерфейс измерительной системы с программным обеспечением и персональный компьютер. МК формирует графически в виде 3D-профиля и в цифровом виде картину изображения объекта наблюдения в миллиметровом диапазоне на экране ноутбука. Обнаружительная способность измерительного канала МК в указанных частотных диапазонах составляет $1,83 \times 10^8$ см $\cdot \Gamma \mu^{/2} \cdot B \tau^{-1}$, а постоянная времени — $\sim 8,5 \cdot 10^{-8}$ с.

Ключевые слова: пленочные структуры, Cr-слюда-Al-VO_x, и Cr-слюда-VO_x, плазмонный резонанс, векторный анализатор цепей, миллиметровое излучение, радиовизор, анализатор излучения

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2020, том 7, выпуск 2, с. 78–89

_ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, _ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

Metrological Complex for Recording and Measuring Terahertz Radiation Based on Cr-mica-Al- VO_x and Cr-mica- VO_x Film Structures

A.S. Oleynik, Dr. Sci. (Engineering), Prof., anatoly.semenovich@gmail.com Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

V. P. Meshanov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., nika373@bk.ru

Joint Stock Company SPE "NIKA-Microwaves", Saratov, Russian Federation

Abstract. The dependence of the absorption coefficient of nichrome and chromium films at the level of 0.5 in the frequency ranges 102-110 GHz, 206.6-223.6 GHz and 102-116,6 GHz, 206-226,6 GHz was obtained. These films are used as an absorber of CR-mica-Al-VO_x and Cr-mica-VO_x film structures, in which Al-VO_x serves as a thermochromic layer, and VO_x serves as a thermosensitive layer, since when heated, VO_x simultaneously abruptly changes its optical parameters and resistance. The Crmica-Al-VO_x structure is used as a screen of the metrological complex (MC), on which an express visual analysis of the spatial distribution of power (energy) of millimeter radiation is performed based on the color relief of the image. When performing the absorber and thermochromic layers in the form of pixels with a size of $50 \times 50 \text{ mm}^2$, the spatial resolution of the screen field is not less than 10 mm⁻¹, the brightness and color contrast of the image is not less than 9.7 (three gradations in brightness and color), the time constant of the radiovisor screen is 2.1×10^{-8} s. At wavelengths of 2.99–2.56 and 1.45–1.34 mm, with constant radiation, the detectable energy flux (the first gradation of screen brightness) per pixel is 15.5×10^{-3} W, in the pulse duration range of 1–2, 1×10^{-8} s, it changes linearly from 15.5×10^{-3} to 22.3×10^{-7} J. The Cr-mica-VO_x structure is used as a receiving platform for a multi-element millimeter radiation receiver. A second MC has been developed that includes a multi-element receiver coupled to a two-coordinate drive, a measurement system interface with software, and a personal computer. The MC graphically generates a 3D profile and digitally generates a picture of the image of the observation object in the millimeter range on the laptop screen. The detection capacity of the MK measuring channel in the specified frequency ranges is 1.83×10^8 cm \cdot Hz1/2 \cdot W⁻¹, and the time constant is $\sim 8.5 \cdot 10^{-8}$ s.

Keywords: film structures, Cr-mica-Al-VO_x and Cr-mica-VO_x, plasmon resonance, vector chain analyzer, millimeter radiation, radiovisor, radiation analyzer

Введение

Анализ открытых источников научно-технической информации [1–4], отражающих направления развития радиоэлектронных систем военного назначения, показывает, что уже на протяжении последних двух десятилетий в ведущих зарубежных странах широкое применение находят коротковолновые части миллиметровых и длинноволновая часть субмиллиметровых радиоволн (соответственно длины волн 2,15–1,3 мм и 0,96–0,88 мм).

Согласно данным работы [5] окна прозрачности атмосферы Земли отвечают частотам 0,4, 0,65, 0,85 и 1,5 ТГц (затухание в атмосфере соответственно составляет 2, 5, 7, 13 дБ при давлении 1 мм рт.ст.). Частичная прозрачность атмосферы все же позволяет использовать на заданных расстояниях системы с повышенной безопасностью при передаче информации на терагерцевых частотах (скрытность передачи обеспечивается сильным затуханием излучения вне целевого объекта). Результаты современного состояния и тенденций развития приемников терагерцевого и ИК-излучения, созданных на основе широкого спектра чувствительных материалов и структур, обладающих особенностями многоэлементного исполнения различного типа архитектуры (например, регистрация терагерцевого излучения возможна с помощью неохлаждаемых многоканальных детекторов на основе HgCdTe), представлены в работе [6].

Целью данной работы является создание метрологического комплекса (МК) на основе пленочных структур металл-диэлектрик — термохромный слой и металл-диэлектрик — термочувствительный слой, обеспечивающего:

- экспрессную индикацию распределения уровней плотности мощности (энергии) терагерцевого излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц по яркостной и цветовой картине 2D-изображения сечения пучка;
- измерение величины мощности (энергии) терагерцевого излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц и формирование измеряемой информации в виде 3D-профиля в графическом и цифровом виде.

Чтобы обеспечить способность указанных пленочных структур изменять свое состояние с изменением интенсивности радиоизлучения, они должны удовлетворять следующим научно-техническим требованиям: обладать высокой степенью поглощения падающего электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1–10,0 ТГц и минимально возможной теплоемкостью.

В указанных структурах роль поглотителя терагерцевого излучения выполняет металл-диэлектрик, термохромным слоем является $Al-VO_r$, а термочувствительным слоем служит VO_x. Это стало возможным на том основании, что при нагреве пленок VO_x до температуры фазового перехода полупроводник-металл (ФППМ) они скачкообразно, за 10-11 с, изменяют оптические и электрические характеристики. Для усиления изменения оптических свойств пленки VO_x изготавливаются на алюминиевом зеркале, при этом относительные изменения показателя преломления *n* при ФППМ для Al–VO_{*x*} составляет $\Delta n/n \ge 0,2$. Изменения величины удельного поверхностного сопротивления в пленках VO_r при ФППМ достигает двух порядков величины.

Существуют селективные и широкополосные поглотители терагерцевого излучения.

Селективный поглотитель представляет собой однослойную частотно-избирательную поверхность (ЧИП) емкостного типа, помещенную на слой диэлектрика, с толщиной меньше длины волны, с обратной металлизацией. На резонансной частоте при облучении поглотителя плоской электромагнитной волной имеет место эффект максимизации значения (удвоения) поверхностного электрического поля и зануление магнитного. Отсюда вытекает возможность достижения близкого к 100% поглощению падающей электромагнитной волны [7].

Работа широкополосных поглотителей основана на явлении поверхностного плазмонного резонанса, которое значительно расширяет возможность обнаружения регистрируемого излучения. Падающая электромагнитная волна воздействует на электрон проводимости металлической пленки, возбуждая в ней переменный ток, который порождает переменное электромагнитное поле. На границе между металлической пленкой и воздухом распространяется поверхностная волна и возникают условия плазмонного резонанса, при котором колебания электронов в проводящем слое поддерживаются внешним



Рис. 1. Коэффициент поглощения пленок Cr на слюдяных подложках в диапазоне частот 75–260 ГГц с величиной удельного поверхностного сопротивления 256 Ом

электромагнитным полем. При совпадении частоты внешнего поля с частотой локализованного поверхностного плазмона возникает резонанс, приводящий к резкому усилению поля на поверхности частицы и увеличению сечения поглощения [8]. В зависимости от задачи регистрации высокополосного или широкополосного сигнала используются селективные и неселективные поглотители.

Пленочные металлопоглотители ТГц-диапазона

Пленки хрома изготавливали методом термовакуумного напыления, контроль толщины пленок проводили резистивным методом, при котором каждой толщине соответствует определенная величина удельного поверхностного сопротивления. Калибровку резистивного метода проводили с помощью лазерного профилометра OLS 4000 Olimpus Lext. Для каждого металла фиксировали отрезок времени напыления, за который достигается определенная величина удельного поверхностного сопротивления, соответствующая толщине пленки 40 нм. Оценку толщины пленок менее 40 нм проводили путем сравнения времен табулированного и текущего времен напыления при заданной скорости испарения навески. С помощью метода векторного анализа электрических цепей проводилось измерение коэффициента поглощения пленочных слоев из хрома в миллиметровом диапазоне длин волн [9]. Установка состоит из векторного анализатора электрических цепей R&S ZVA-40 фирмы Rohde & Schwarz с измерительными каналами в диапазоне 75–260 ГГц, которые состоят из конверторов с соответствующими волноводно-лучеводными трактами.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов поглощения структуры нихром-слюда и хромслюда от частоты. Толщина пленки хром ~10 нм соответствует 256 Ом, при этом коэффициент поглощения в частотных диапазонах 100-117 ГГц и 205-223 ГГц находится на уровне 0,5.

Пленочные структуры Сг-слюда-Аl-VO_x и Сг-слюда-VO_x

Чтобы обеспечить способность указанных пленочных структур эффективно изменять свое состояние с изменением интенсивности радиоизлучения, отношение рабочих длин волн λ в диапазоне 2,99– 1,31 мм к толщине слюдяной подложки d должно удовлетворять соотношению $\lambda/d = 74-32$. Уменьшение d до 40 мкм обеспечивает уменьшение теплоемкости структуры и соответственно увеличение ее чувствительности и быстродействию.

Цветность, равноконтрастный график МКО [11]		Контраст		Цветовой переход по методу ISCC-NBS [11]	
до ФП	после ФП	яркостный	цветовой	до ФП	после ФП
$U_0 = 0,158$ $V_0 = 0,296$	$\begin{array}{l} U_{\rm \varphi}=0,139\\ V_{\rm \varphi}=0,251 \end{array}$	2,8	9,7	Сине-зеленый	Синий

Таблица 1. Светотехнические параметры среды Al-VO_x

А. Оптические свойства АІ-VO_r

Экспериментально установлено, что стимулы, характеризующие цветовой тон, насыщенность цвета и яркость пленочной структуры Al-VO_r, имеют экстремальные значения в зависимости от толщины оксидного слоя на основе фазы VO₂. Технологический процесс изготовления двухстадийный: термовакуумным способом на диэлектрическую подложку напыляют слой Al, а на него наносят слой V толщиной d, затем производят окисление на воздухе при 480 °С структуры Al-V до формирования оксидного слоя ванадия толщиной 2d; в итоге формируется структура Al-VO $_x$ [10].

На рис. 2 приведена зависимость спектрального коэффициента отражения среды Al-VO_x с толщинами слоев 100-100 нм при температурах ФППМ [10].

В табл. 1 приведены данные цветового и яркостного контрастов и цветовые переходы среды



(1 — до и 2 — после ФППМ)

Al-VO_x (100-100) нм до и после $\Phi\Pi\Pi M$, рассчитанные по методу работы [11].

На рис. З приведена зависимость коэффициента контраста пленочной структуры Al-VO_r (100-100) нм на слюдяной подложке от температуры нагрева и на основании экспериментальных данных [12] приведены величины энергетической экспозиции, соответствующие определенной величине яркостного контраста. Технологический процесс обеспечивает изготовление пленочной структуры $Al-VO_x$ с заданной зависимостью яркостного контраста от температуры. На длинах волн 2,99-2,56 и 1,45-1,34 мм пленочные структуры Crслюда-Al-VO_x и Cr-слюда-VO_x обеспечивают поглощение 50% падающего на них излучения, причем 0,178 мВт/мм² плотности излучения вызывает нагрев структуры на 1 °С.

При этом 1-я, 2-я и 3-я градации яркости экрана радиовизора связаны с его нагревом до 58, 61 и 68 °С, при этом изменение коэффициента контраста экрана соответственно составляет 0,2, 0,4 и 0,6.



Рис. 2. Зависимость спектрального коэффициента от- Рис. 3. Зависимость яркостного контраста среды Al-VO_x ражения сред Al-VO_r с толщинами слоев 100-100 нм (100-100) нм от температуры, вызывающей 1-ю, 2-ю, 3-ю градации яркости изображения

Мощность потока непрерывного излучения, вызывающая указанные градации яркости экрана площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ относительно температур 58, 61 и 68 °C, соответственно составляет 6,2 мВт, 6,9 мВт, 8,1 мВт. Температура термостатирования 54 °C соответствует середине петли гистерезиса экрана радиовизора. Нагрев экрана относительно температуры термостатирования на 3,5, 7 и 13,5 °C вызывает 1-ю, 2-ю и 3-ю градации яркости изображения соответственно, при этом мощность потока излучения составляет 0,62 мВт, 1,24 мВт и 2,4 мВт. Структура Al–VO_x обладает одновременно

цветовым контрастом изображения (три градации цветности), что достаточно для цветового кодирования отражаемой информации, а угол обзора равен 130° [11].

Электрические свойства слоя VO_r

На рис. 4 приведена зависимость удельного поверхностного сопротивления термочувствительного слоя на основе пленки VO_x толщиной 60 нм от температуры [13].



Рис. 4. Зависимость удельного поверхностного сопротивления пленки VO_x толщиной 60 нм от температуры

В диапазонах температур (20–45) °С и (45– 69) °С прямую ветвь термического гистерезиса пленки VO_x можно представить с небольшой погрешностью в виде двух отрезков прямых AB и BC(кусочно-линейная аппроксимация характеристики) [14]. При этом величина температурного коэффициента сопротивления β , согласно [15], равна

$$\beta = \Delta R / R \cdot \Delta T,$$

где R — сопротивление пленки VO_x, ΔT — температурный диапазон. На участке AB $\beta_1 = 1,4$ %/°С, на участке BC $\beta_2 = 4$ %/°С, что обусловливает разную чувствительность приемника. При нагреве слоя VO_x в диапазоне (20–45) °С значение β_1 равно $\beta_1 = 1,4$ %/°С, а в диапазоне (45–69) °С величина β_2 составляет $\beta_2 = 4$ %/°С. В режиме термостатирования ($T_{\rm cr} = 45$ °С) реализуется режим внутренней памяти приемника. Технологический процесс изготовления обеспечивает формирование пленки VO_x с высокой воспроизводимостью зависимости удельного поверхностного сопротивления от температуры.

Эксплуатационные параметры структуры Cr-слюда-Al-VO_r

Экран радиовизора представляет собой слюдяную подложку, покрытую с облучаемой стороны поглощающим слоем из Cr или сплава нихрома, а с лицевой стороны — термохромным слоем на основе Al-VO_x. Толщина слюдяной подложки h (мкм) должна составлять не менее 40 мкм, при этом сохраняется достаточная жесткость подложки. Чтобы увеличить быстродействие радиовизора, поглощающий и термохромный слои выполняются в виде отдельных пикселей, которые заполняют площадь экрана. Поглощающий и термохромный пиксели расположены друг против друга по разные стороны диэлектрической подложки. Расстояние между пикселями на плоскости подложки равно размеру указанных пикселей, что исключает взаимное тепловое влияние пикселей друг на друга.

Быстродействие радиовизора зависит от эффективной теплоемкости структуры при заданной величине теплопотерь [15]:

$$C_{\mathrm{э}\phi\phi} = C_{\mathrm{Al-VO}_x} + C_{\mathrm{слюда}} + C_{\mathrm{Cr}}$$

Материал подложки пленочных слоев	Плотность γ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности k, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость с _р , Дж/кг·К	Коэффициент температуропроводности <i>А</i> , м ² /с
Слюда	$2,8\cdot 10^3$	0,238	879	$9,6 \cdot 10^{-6}$
Al	$2,7\cdot 10^3$	210	900	$8,6 \cdot 10^{-5}$
VO ₂	$4,3\cdot 10^3$	9,7	706	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Cr	$7,1 \cdot 10^{3}$	67	837	$1,12 \cdot 10^{-5}$
NiCr	$8,34\cdot 10^3$	15,3	418,6	$4,\!38\cdot10^{-6}$
Ni	$8,9 \cdot 10^{3}$	90,9	440	$2,32 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. Теплофизические коэффициенты структуры Cr-слюда-Al-VO_x

где $C_{\text{Al-VO}_x}$ — теплоемкость регистрирующих пикселей; $C_{\text{слюда}}$ — теплоемкость подложки; C_{Cr} — теплоемкость пикселя из хрома (Cr).

Теплоемкости слоев рассчитывались по формуле:

$$C = S \cdot h \cdot \rho \cdot C_{\rm VII}$$

где S — облучаемая площадь, м²; h — толщина слоя, м; ρ — плотность слоя, кг/м³; $C_{\rm yg}$ — удельная теплоемкость слоя, Дж/кг·К.

Постоянная времени устройств была рассчитана по методике работы [15]:

$$\tau = C_{\mathrm{s}\phi\phi}/\chi,$$

где $C_{\rm эф\phi}$ — теплоемкость единицы поверхности пленочной структуры; $\chi = \chi_0 + 4\varepsilon\sigma T^3$. Здесь χ — константа охлаждения, представляющая собой потери тепла с единицы поверхности структуры, χ_0 — потери тепла за счет теплопроводности, $4\varepsilon\sigma T^3$ — потери тепла за счет излучения; $\varepsilon = 0.5$ коэффициент излучения структуры, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ BT/(м²·K⁴) = 11,45 BT/(м²·K). В табл. 2 приведены теплофизические параметры пленочных слоев экрана радиовизора [16].

При размерах поглощающих и термочувствительных пикселей пленочной структуры $50 \times 50 \text{ мкm}^2$ и $100 \times 100 \text{ мкm}^2$ постоянная времени составляет $2,1\cdot10^{-8}$ с и $0,68\cdot10^{-5}$ с соответственно, при этом сохраняется слитность отображаемой информации, а разрешающая способность экрана от 10 мм⁻¹ до 5 мм⁻¹.

Пленочный поглотитель из Cr толщиной ${\sim}10$ нм, расположенный на слюдяной подложке

толщиной $4 \cdot 10^{-5}$ мкм, обеспечивает тепловой поток, под действием которого подложка и расположенный на ее обратной стороне термохромный слой из Al-VO_x с совокупной толщиной ~200 нм нагревается от 20 до 45 °C.

Источник теплоты можно считать поверхностным. Для оценки величины энергетической экспозиции в зависимости от длительности импульса излучения, вызывающей изменение цвета экрана радиовизора, использовали соотношение [17]:

$$T(z,t) = (2g \cdot \sqrt{at}/\lambda) \cdot \operatorname{ierfc}[z/2/\sqrt{at}],$$

где g — плотность потолка теплоты, Br/m^2 ; a — коэффициент температуропроводности, m^2/c ; t — время нагрева, c; λ — коэффициент теплопроводности, $Br/(M \cdot K)$; ierfc(x) — интегральная функция от функции ошибок Гаусса; z — толщина подложки, м.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные значения нагрева на 1 °С структур Сгслюда–Al–VO_x и Сг–слюда–VO_x на длинах волн 1,31–1,45 и 2,56–2,99 мм в зависимости от длительности импульса излучения. Так как подавляющий вклад в теплоемкость указанных структур вносит слюдяная подложка толщиной 40 мкм, их энергетическая чувствительность одинакова. Разница между расчетными и экспериментальными данными составляет ~20%, что вполне допустимо для диапазона миллиметрового излучения.

При размерах пикселей экрана радиовизора $50 \times 50 \text{ мкm}^2$ и $100 \times 100 \text{ мкm}^2$ поток излучения, вызывающий 1-ю, 2-ю и 3-ю градации яркости изображения каждого пикселя, составляет соответственно 16, 17,8, 20 мкВт и 64, 71, 80 мкВт. В диапа-

зонах длительности импульса излучения $(1-2,1) \times \times 10^{-8}$ с и $(1-8,59) \cdot 10^{-8}$ с для указанных пикселей экрана радиовизора энергия излучения, вызывающая 3-ю градацию яркости изображения, соответственно составляет $2 \cdot 10^{-5} - 2,9 \cdot 10^{-9}$ Дж и $8 \cdot 10^{-5} - 11,5 \cdot 10^{-9}$ Дж.

Эксплуатационные параметры структуры Cr-слюда-VO_x

Основными фундаментальными шумами теплового приемника являются джонсоновские шумы [15]:

$$U_T^2 = 4kTR = 1,88 \cdot 10^{-15} \text{ Bt},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж ·К⁻¹ — постоянная Больцмана; T = 22 °С — температура термочувствительного слоя; $R = 1,16 \cdot 10^5$ Ом — величина сопротивления термочувствительного слоя.

Схема измерения приемника осуществляет подключение каждого пикселя в мостовую схему, которая питается от источника стабилизированного постоянного тока напряжением 9 В. В исходном состоянии мост сбалансирован. Параметры мостовой схемы R_k — сопротивление компенсационного элемента: R_k = 1,16 \cdot 10⁵ Ом; R_1 — сопротивление измеряемого пикселя при нагреве его на 1 °С, R_1 = = 1,14 \cdot 10⁵ Ом; R_2 , R_4 — сопротивления подстроечных элементов, $R_2 = R_4 = 9 \cdot 10^4$ Ом; $V_0 = 9$ В.



Рис. 5. Нагрев экрана радиовизора на 1 °С в зависимости от длительности импульса излучения

При нагреве на 1 °С измерительного пикселя мост разбалансируется. Напряжение разбалансировки с вывода моста можно определить как [18]:

$$V_c = V_0 \left(\frac{R_k}{R_k + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = 0,045 \text{ B}.$$

Параметры вольтовой чувствительности, порог чувствительности и обнаружительную способность теплового приемника определяли согласно работе [19].

Вольтовая чувствительность приемника определяется согласно выражению

$$S_u = V_c/F$$
, B/Bt,

где $V_{\rm c}$ — напряжение разбаланса моста, V; F = 17,8 мВт/см² — мощность источника излучения, обеспечивающего нагрев слоя VO_x размером 1 × × 1 см² на 1 °C относительно комнатной температуры. Для длин волн регистрируемого излучения (2,99–2,56) и (1,44–1,34) мм, $S_u = 2,52$ В/Вт.

Пороговая чувствительность приемника на длинах волн (2,99–2,56) и (1,44–1,34) мм:

$$\Phi_{\pi} = \sqrt{U_T^2} / S_u =$$

= $\sqrt{1, 8 \cdot 10^{-15}} / 2,52 = 1,725 \cdot 10^{-8} \text{ Bt}.$

Удельная обнаружительная способность приемника определяется по формуле

$$D = rac{S_{
m np} \sqrt{\Delta f}}{\Phi_{
m n}} = 1,83 \cdot 10^8 \ {
m cm} \cdot {\Gamma \mu^{1/2} {
m Br}^{-1}},$$

где $S_{\rm np}$ — площадь приемника 1 см²; Δf — полоса пропускания 10 Гц; $\Phi_{\rm n}$ — пороговая чувствительность приемника, Вт.

Первый блок МК

Радиовизор с экраном на основе структуры металл-диэлектрик — термохромный слой обеспечивает высокую степень поглощения падающего излучения, а также обеспечивает изменение интенсивности цветовой окраски экрана радиовизора в зависимости от величины падающей мощности

излучения. Первый блок МК обеспечивает визуализацию поперечного сечения падающего излучения в соответствующем цвете в зависимости от мощности излучения.

В работе [20] разработано устройство визуализации инфракрасного и терагерцевого излучений, которое содержит плоский корпус с расположенной в нем опорной рамкой в виде двух диэлектрических колец. Корпус включает два окна для регистрации излучения и закреплен на держателе со стойкой. Между диэлектрическими кольцами размещен инфракрасный ТГц-конвертер, представляющий собой диэлектрическую подложку с нанесенной двухслойной пленочной структурой Al-VO_r, которую опоясывает с зазором пленочный нагреватель. На противоположной стороне диэлектрической подложки, под пленочной структурой Al-VO_x, расположена сетка из алюминия толщиной не более 100 нм с квадратными отверстиями. Длина стороны сетки прямо пропорциональна длине волны излучения, распространяющегося в диэлектрической подложке. На свободной части поверхности диэлектрической подложки расположен термодатчик. Технический результат заключается в расширении динамического диапазона устройства (при падении излучений со стороны слоя Al-VO_x — на длинах волн 0,3-3,5 мкм и 5,0-10,6 мкм, а со стороны сетки — на длинах волн 1140-1690 мкм и 9,0-14,5 мкм).

На рис. 6 показан продольный разрез разработанного радиовизора миллиметрового излучения (*a*) и общий вид конструкции устройства (*б*) [21]. Структура (металл-диэлектрик — термохромный слой) на слюдяной подложке 5 марки CT-1 размером $60 \times 60 \times 0,04$ мм была размещена внутри опорной рамки 4, состоящей из двух диэлектрических колец. Рамка 4 находится внутри плоского цилиндрического корпуса 1 с прозрачными для видимого и регистрируемого излучения окнами 3, выполненными из слюдяных подложек марки CT-1. Корпус совмещен со стойкой 9.

На рис. 7 представлены фотографии визуализации поперечного сечения магнетрона импульсного действия с рабочей длиной волны 2 мм в магнитоэкранированном исполнении с волноводным выводом излучения. Радиовизор помещался на расстоянии 2 см от выхода рупорного перехода магнетрона



Рис. 6. Конструкция устройства (а — поперечный разрез, б — общий вид): 1 — цилиндрический корпус, 2 — крышка, 3 — прозрачные окна, 4 — опорная рамка, 5 — слюдяная подложка, 6 — пленочный поглотитель, 7 — термохромный слой, 8 — держатель, 9 — стойка, 10 — массив пикселей

с рабочей длиной волны 2 мм. Время экспозиции составляло от 0,5 до 5 с.

Второй блок МК

Второй блок МК терагерцевого излучения включает: многоэлементный неохлаждаемый тепловой приемник, интерфейс измерительной системы с необходимым программным обеспечением и персональный компьютер.

Приемник снабжен двухкоординатным приводом, обеспечивающим формирование 2D-изображения объекта наблюдения. Интерфейс измерительной системы обеспечивает передачу полученных данных в память персонального компьютера.

Разработанный многоэлементный приемник, выполненный в малогабаритном металлостеклянном корпусе, описан в работах [22, 23]. Измерительные каналы приемника сделаны из поглощающих и термочувствительных пикселей, расположенных друг против друга по разные стороны диэлектрической подложки.



Рис. 7. Фотографии экрана визуализатора под воздействием излучения магнетрона с рабочей длиной волны 2 мм

При размерах поглощающего и термочувствительного пикселей $0,15\times0,15~\text{мm}^2$ постоянная времени приемника равна $1,93\times10^{-7}$ с.

Регистрация терагерцевого излучения также может производиться с помощью других приемников терагерцевого излучения, созданных на основе широкого спектра чувствительных материалов и структур, например неохлаждаемых многоканальных детекторов на основе HgCdTe [6].

Разработан интерфейс измерительной системы, который обеспечивает детальное исследование энергетических параметров пучка терагерцевого излучения. Интерфейс измерительной системы регистрирует излучение и передает данные в компьютер. Программа обработки измерительной информации обеспечивает преобразование числовых значений напряжений с измерительных каналов приемника в вертикальный рельеф значений столбцов по поверхности приемной площадки приемника и их цветовую кодировку.

Экспрессный контроль распределения плотности энергии (мощности) по сечению радиолуча включает следующие этапы [24]:

- интерфейс измерительной системы последовательно преобразует изменение сопротивлений измерительных каналов приемника в соответствующие значения напряжений и выводит их на экране монитора в виде столбцов разной высоты и чисел оцифровки;
- программа обработки информации обеспечивает цветовую кодировку каждого столбца на

экране монитора в соответствии с энергией (мощностью) излучения.

В итоге устройство визуализации и измерения миллиметрового излучения на экране монитора выводит измерительную информацию в виде 3D-профиля (вертикального рельефа столбцов разной высоты и окраски на плоскости приемной площадки приемника) с параллельной оцифровкой столбцов.

Измерительная информация на экране монитора отличается высокой яркостью и контрастностью цветопередачи изображения.

Заключение

В предлагаемом метрологическом комплексе используются два блока пассивного метода радиовидения. Экран радиовизора первого блока, лицевая сторона которого покрыта поглощающим слоем, а обратная — термохромным, реализует экспрессный визуальный контроль за распределением плотности мощности потока излучения по цветовой картине экрана (3 градации яркости и цветности изображения). При размерах экрана от 50×50 мм² до $90 \times 90 \text{ мм}^2$ он обладает равномерной зоной чувствительностью и может эксплуатироваться как в помещении, так и при высоком уровне внешней освещенности. Быстродействие и пространственное разрешение экрана зависит от размеров пикселей канала визуализации. Экран радиовизора, выполненный в виде описанных пикселей,

обладает рекордной чувствительностью и быстродействием, обеспечивающим экспрессный контроль объектов наблюдения. Во втором блоке метрологического комплекса используются многоэлементные тепловые приемники, обеспечивающие измерение распределения плотности мощности по сечению и потоку излучения. Устройство измерительной системы преобразует измерительную информацию в виде 3D-профиля графической цветовой и цифровой картины изображения на экране монитора. Число измерительных каналов в приемниках обеспечивает соответствующее разрешение, а скорость опроса каналов приемника определяет скорость ввода информации на экран монитора.

Список литературы

- Изюмов Д.Б., Кондратюк Е.Л. Зарубежный опыт использования терагерцевого частотного диапазона при соблюдении образцов вооружения, военной и специальной техники // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 1(22). С. 153–168.
- Быстров Р.П., Гуляев Ю.В., Гвоздев А.Е., Немцов А.В., Шеремет И.Б. Тенденции развития радиоэлектронных систем военного назначения. М.: Типография 3 ЦНИИ Минобороны РФ. 2012. 312 с.
- Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ВИНИТИ РАН, 2010, № 3–8.
- 4. Program controls for advanced research projects of the United States Department of defense (DARPA) for the period from 2000 to 2017 (for example, Defense Advanced research Projects Agency. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2018 President's Budget Submission. February 2017).
- Ермолаев Д. М., Таланов А. А., Романюк В. А. Перспективы применения терагерцевых частот в космических системах // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 46–52.
- 6. *Rogalski A*. Infrared and Terahertz Detectors. Third Edition. CRC Press, 2019. 1044 p.
- 7. Кузнецов С.А., Аржанников А.В. Электродинамическая оптимизация ультратонких резонансных по-

глотителей для болометрических детекторов субмиллиметрового диапазона // Вестн. Новосиб. гос. ун-та, 2015, т. 10, вып. 4. С. 5–20.

- 8. Лагарьков А.Н., Кисель В.Н. Метаматериалы: Фундаментальные исследования и перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология, 2018, № 1. С. 10–20.
- Хибель М. Основы векторного анализа цепей / Пер. с англ. С. М. Смольского; под ред. У. Филипп. М.: ИД МЭИ, 2009. 500 с.
- Патент № 2321035 Российской Федерации, МПК G02F01/00. Преобразователь изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра: № 2006124292/28: заявл. 06.07.2006: опубл. 27.03.2008 / А.С. Олейник. Бюлл. № 9.
- Олейник А.С. Отображение и запоминание оптической информации на пленках диоксида ванадия: монография / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратов, Саратовский гос. технический ун-т, 2006. 202 с.
- Олейник А. С., Медведев М.А., Еремин В.П. и др. Устройство визуализации инфракрасного и миллиметрового излучений // Российские нанотехнологии, 2018, т. 13, № 7–8. С. 66–74. ISSN 1992-7223.
- Патент № 2623573 Российской Федерации, МПК С23С14/24, С23С14/08, С23С14/58, Н01С17/10. Способ изготовления пленочного материала на основе смеси фаз VO_x, где x = 1,5-2,02: № 2016117223: заявл. 29.04.2016: опубл. 27.06.2017 / А.С. Олейник. Бюлл. № 18.
- Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособ. для техн. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.
- 15. *Марков М.Н.* Приемники инфракрасного излучения. М.: Наука, 1968. 168 с.
- 16. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- 17. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
- Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособ. / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
- 19. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные

устройства. Термины и определения. Введен Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 25 апреля 1983 года № 2043. Дата введения 01.07.84.

- Патент № 2638381 Российской Федерации, МПК G01J5/20. Устройство визуализации инфракрасного и терагерцевого излучения: № 2016129851: заявл. 20.07.2016: опубл. 13.12.2017 / А.С. Олейник, М.А. Медведев. Бюлл. № 35.
- Патент № 2687992 Российской Федерации, МПК G01J1/02, G01J3/02. Устройство визуализации инфракрасного и миллиметрового излучения: № 2018117856: заявл. 14.05.2018: опубл. 14.05.2019 / А.С. Олейник, М.А. Медведев,

В. П. Еремин, Н. А. Коплевацкий, В. П. Мещанов. Бюлл. № 14.

- 22. Олейник А.С., Потапов А.А. Селективный многоэлементный приемник миллиметрового излучения с резонансным метапоглотителем // Радиотехника, 2019, т. 83, № 8 (12). С. 54–59. ISSN 0033-8486.
- Патент № 2701187 Российской Федерации, МПК G01J3/20. Приемник терагерцевого излучения на основе пленки VO_x: № 2019107281: заявл. 14.03.2019: опубл. 25.09.2019 / А.С. Олейник, М.А. Медведев, В.П. Мещанов, Н.А. Коплевацкий. Бюлл. № 27.
- 24. Олейник А.С., Салихов Р.Н. Анализатор параметров непрерывного и импульсного лазерного излучения на основе пленки VO_x // Датчики и системы, 2018, № 1 (221). С. 52–56. ISSN 1992-7185.