

УДК 621.396.962.2

ВОЛНОВОДЫ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.А. Аветисян, М.Ц. Айвазян

Национальный политехнический университет Армении

Рассмотрены наиболее употребляемые типы волноводов, которые нашли применение в терагерцовом диапазоне. Приводятся основные электрические характеристики металлических, диэлектрических и металлодиэлектрических волноводов. Рассмотрены их конструктивные особенности. Показаны области применения каждого волновода. Проведено сравнение электрических и механических характеристик каждого волновода, предложены оптимальные решения. Известно, что важнейшими характеристиками волноводов являются: равномерная частотная и линейная фазовая характеристики, погонные потери и максимальный уровень передаваемой мощности. В терагерцовом диапазоне широкому применению металлических волноводов препятствуют два существенных фактора: во-первых, изготовление одномодовых металлических волноводов невозможно в связи с микроскопическими размерами самих волноводов; расчетные значения погонных потерь в таких волноводах из-за скин-эффекта превышают все допустимые нормы; во-вторых, применение сверхразмерного металлического волновода ограничено многоволновостью. Основным средством борьбы с многоволновостью является наличие самофильтрации. Металлические волноводы указанным свойством не обладают. Диэлектрические волноводы относятся к классу волноводов открытого типа. Основным недостатком волноводов открытого типа является наличие радиационных потерь. Это свойство играет решающую роль и не позволяет создавать функциональные элементы для реализации схем различного назначения терагерцового диапазона. В настоящей статье теоретически и экспериментально показано, что наилучшими электрическими характеристиками обладают металлодиэлектрические волноводы. Этот волновод относится к классу сверхразмерных волноводов. Наличие диэлектрического покрытия на стенках волновода, с одной стороны, приводит к существенному уменьшению продольных токов на металлических стенках волновода, с другой - обеспечивает самофильтрацию высших типов волн, которые могут возникнуть на неоднородностях. Эти свойства металлодиэлектрического волновода позволяют создавать практически все волноводные элементы, на основе которых возможна реализация высокочастотных схем различного назначения.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, волновод класса "полый диэлектрический канал", погонные потери, самофильтрация, рабочая мода, высшие типы волн.

Введение. Терагерцовый (ТГц) диапазон находится между микроволновой и оптической областями электромагнитного спектра [1,2]. Изучение миллиметровых и субмиллиметровых (часто именно так и принято называть терагерцовую область) волн требует создания в этой области эффективных направляющих систем. Требования, предъявляемые к ним, следующие:

равномерные частотные и линейные фазовые характеристики, минимальные затухания на единицу длины и максимальное значение передаваемой мощности. Активное изучение терагерцового спектра на основе лабораторных испытаний началось лишь в середине 1980-х годов. При этом главная сложность была связана с техническими препятствиями, обусловленными в основном отсутствием приемлемых приемников [3]. Поскольку этот спектр находится между технологически развитыми микроволновым и инфракрасным (ИК) спектрами, то в терагерцовом диапазоне успешно применяются уже имеющийся в двух указанных областях опыт и технологии. Терагерцовые импульсы охватывают большую частотную область: $0,1 \dots 10 \text{ ТГц}$ (или в длинах волн – $0,003 \dots 3 \text{ мм}$).

Металлические волноводы. Металлические волноводы (рис. 1) были первыми, которые исследовались экспериментально: использовалось распространение терагерцовых импульсов оптическими методами. В 1999 г. Макгоуэн и другие показали, что круглые волноводы дают очень низкие потери ($\alpha = 0,7 \text{ см}^{-1}$ на частоте 1 ТГц) [3], обладают только омическими потерями, обусловленными металлическим корпусом круглого волновода.

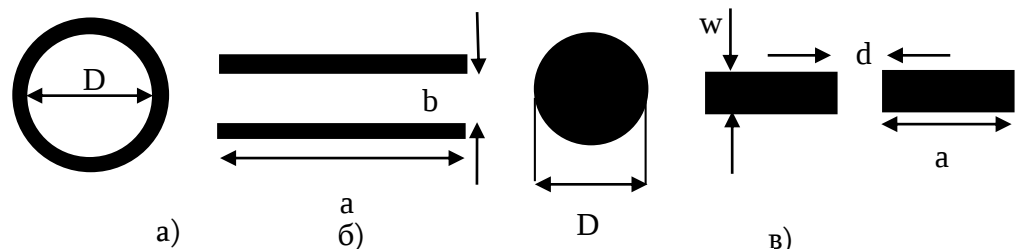


Рис. 1. Металлические волноводы: а – круглый волновод диаметром D ; б – плоский волновод: a – длина, b – ширина; в – металлический слот диаметром D : d – длина между трещинами, w – ширина и a – длина

Механизм распространения волн в металлических волноводах с круглым поперечным сечением (ТЕ) или (ТМ) связан с наличием металлической стенки, что дает большие потери, обусловленные проводимостью металла в терагерцовой области (скин-эффект). Распространяющаяся мода в металлических волноводах имеет дисперсию высокого уровня. В плоском волноводе распространяющаяся мода (ТЕМ) также находится между стенками, но в одном направлении имеет меньшее постоянное затухание. Кроме указанного преимущества, имеет место также недисперсионное распространение. В микрополосковой линии потери

экспоненциально падают, поскольку маршрутом управления служит (TM_{01}) режим. В данном случае волна направляется волноводом и рассеивается в среде (воздух); в результате распространение терагерцовых импульсов происходит с достаточно низкими потерями и отсутствием дисперсии. В плоском металлическом волноводе терагерцовые импульсы также распространяются в воздухе, однако более ограниченно, и по сравнению с металлическими линиями, в этих волноводах почти отсутствует дисперсия [1]. Результат ведет к относительно большим для плоского волновода потерям, т.е. в металлических волноводах существует компенсация между ограничением распространения импульсов и затуханием. Как будет отмечено далее, такой компенсацией являются диэлектрические волноводы.

Диэлектрические волноводы. Для терагерцовой области еще одним классом неплоских волноводов являются диэлектрические волноводы (рис. 2). Эти волноводы можно назвать волокном, если они гибкие и имеют круглое поперечное сечение. Они, в основном, используются в области высоких частот, таких как ИК или оптическая область, где металлические волноводы становятся диссипативными. Диэлектрические волноводы имеют также радиационные потери и потери на поглощение [4]. Несмотря на то, что силиконы с некоторой проводимостью имеют крайне малые затухания ($\alpha < 0,7 \text{ см}^{-1}$ при частотах менее $2,5 \text{ ТГц}$), это условие не дает возможности для создания волноводных функциональных элементов разного назначения. Выбор материала и структуры волновода имеет очень важное значение с точки зрения не только затухания, но и дисперсии.

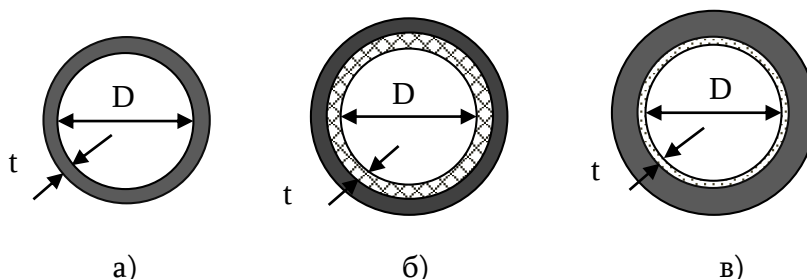


Рис 2. Диэлектрические волноводы: а – полый одиночный волновод, где D – диаметр и t – толщина стенки волновода, б – металлический волновод с диэлектрическим внутренним покрытием с диаметром D и диэлектрическим слоем с толщиной t ; в – металлический волновод с тонким слоем диэлектрика

Для волноводов этого класса волна в основном распространяется в полой части волновода, и лишь небольшая часть энергии волны распространяется по

диэлектрику, что приводит к низким потерям поглощения. Несмотря на указанное выше преимущество, как правило, диэлектрические волноводы имеют так называемое резонансное окно или запретную зону. Таким образом, они лишь обеспечивают малые потери и дисперсию в довольно узкой области [4]. Еще один общий недостаток диэлектрических волноводов – это размеры порядка миллиметров, а увеличение диаметра волновода приводит к появлению и росту потерь и поглощения.

Металлодиэлектрические волноводы. (МДВ). В настоящей работе обоснован выбор сверхразмерного прямоугольного металлодиэлектрического волновода в качестве направляющей системы для создания функциональных элементов и линий передачи больших мощностей в терагерцовом диапазоне [5]. Поперечные размеры этого волновода $2a$ и $2b$ (см. рис. 3) намного больше длины распространяющейся в ней волны.

Собственные волны МДВ прямоугольного (квадратного) сечения представляются в виде так называемых продольных электрических LE_{mn} ($E_x=0$) либо продольных магнитных LM_{mn} ($H_x=0$) волн. Компоненты поля волны LM_{mn} во внутреннем канале волновода записываются в виде [5]

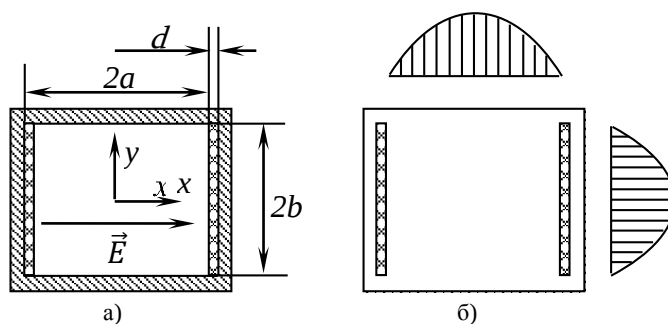


Рис. 3. Металлодиэлектрический волновод: а – размеры волновода; б – распределение поля в поперечном сечении волновода

$$H_x = 0,$$

$$H_y = A \frac{(ka)^2}{a^2} \left[\sin \frac{\pi m}{2} \left(\frac{x}{a} + 1 \right) + \frac{\pi m \epsilon \operatorname{ctg} (kd \sqrt{\epsilon - 1}) x}{2ka \sqrt{\epsilon - 1}} \cos \frac{\pi m}{2} \left(\frac{x}{a} + 1 \right) \right] \sin \frac{\pi n}{2} \left(\frac{y}{b} + 1 \right) e^{-jhz},$$

$$H_z = -jA \frac{(\pi n)(ka)}{2ab} \sin \frac{\pi m}{2} \left(\frac{x}{a} + 1 \right) \cos \frac{\pi n}{2} \left(\frac{y}{b} + 1 \right) e^{-jhz},$$

$$E_x = H_y,$$

$$E_y = 0,$$

$$E_z = -jA \frac{(\pi m)(ka)}{2a^2} \cos \frac{\pi m}{2} \left(\frac{x}{a} + 1 \right) \sin \frac{\pi n}{2} \left(\frac{y}{b} + 1 \right) e^{-jhz}; \quad (1)$$

в диэлектрике :

$$H_x = 0,$$

$$H_y = (-1)^m A \frac{ka}{2a^2} \frac{\pi m \epsilon \cos(k[x - (a + d)]\sqrt{\epsilon - 1})}{\sqrt{\epsilon - 1} \sin(kd \sqrt{\epsilon - 1})} \sin \frac{\pi n}{2} \left(\frac{y}{b} + 1 \right) e^{-jhz},$$

$$H_z = 0,$$

$$E_x = H_y / \epsilon,$$

$$E_y = 0,$$

$$E_z = j(-1)^m A \frac{(\pi m)(ka)}{2a^2} \frac{\sin(k[x - (a + d)]\sqrt{\epsilon - 1})}{\sin(kd \sqrt{\epsilon - 1})} \sin \frac{\pi n}{2} \left(\frac{y}{b} + 1 \right) e^{-jhz}, \quad (2)$$

где A – амплитудный коэффициент; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; h , α_x и α_y –

продольные и поперечные волновые числа соответственно [5].

Компонента E_y моды LM_{mn} весьма мала (порядка $1/(ka)^2$), и ее практически можно считать равной нулю. Индексы m и n определяют число вариаций поля этой компоненты во внутреннем канале вдоль осей x и y , а также позволяют классифицировать волны как LM_{mn} [3].

Затухание мод в МДВ со слоями диэлектрика на двух противоположных стенках вычисляется как мнимая часть постоянной распространения $h = h' - jh''$:

$$h'' = -\frac{(\alpha_x^0)^2}{(ka)k} \chi + \frac{(\alpha_y^0)^2}{2(kb)k} \sqrt{\frac{f}{\sigma}}, \quad (3)$$

где комплексная величина χ записывается в виде $\chi = \chi_1 + j\chi'_1$, причем

$$\chi_1 = - \frac{2h''_e d \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\sqrt{\varepsilon}-1} \left(1 - \frac{\sin 2kd\sqrt{\varepsilon'-1}}{2kd\sqrt{\varepsilon'-1}} \right) + \sqrt{\varepsilon'-1} \sqrt{\frac{f}{\sigma}}}{\sqrt{\varepsilon'-1} (1 + \cos 2kd\sqrt{\varepsilon'-1})}, \quad (4)$$

$$\chi'_1 = \frac{tgkd\sqrt{\varepsilon'-1}}{\sqrt{\varepsilon'-1}}.$$

Здесь ε' – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости нанесенного на стенки волновода материала; h''_e – затухание плоской волны в диэлектрике $h''_e = k\sqrt{\varepsilon}tg\delta/2$; $tg\delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике; f – частота; σ – удельная проводимость металла.

Из формулы (3) видно, что с укорочением длины волны затухание LM – мод уменьшается. Так, если одновременно уменьшать длину волны и толщину диэлектрического слоя так, чтобы величина $kd\sqrt{\varepsilon-1}$ оставалась постоянной, то затухание из-за потерь в диэлектрике падает как λ^2 , а из-за потерь в металле – как $\lambda^{3/2}$.

Из (1) и (2) следует что мощность P_2 , переносимая в области, занятой диэлектриком, мала по сравнению с мощностью P_1 , передаваемой по внутреннему каналу. Выражение для отношения мощностей, переносимой по диэлектрику и внутреннему каналу волновода, получим подстановкой значений компонент поля из (1) и (2). Опуская промежуточные вычисления для LM_{mn} – мод, окончательно получим

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(\pi m)^2}{(2ka)} \frac{d}{a} \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \frac{1 + \frac{\sin(2kd\sqrt{\varepsilon-1})}{2kd\sqrt{\varepsilon-1}}}{(\varepsilon-1)(1 - \cos(2kd\sqrt{\varepsilon-1}))}. \quad (5)$$

Если толщина диэлектрического слоя МДВ выбрана равной $d = \lambda/4\sqrt{\varepsilon-1}$, что соответствует ее антирезонансной толщине, то легко показать, что для МДВ с размерами поперечного сечения 10 x 10 мм, на стенки которого нанесен фторопласт-4 ($\varepsilon=2,07$), мощность, передаваемая по диэлектрику, не превышает 1% от мощности, передаваемой по пустому каналу волновода. Уровень передаваемой мощности по пустому каналу МДВ соизмерим с мощностью, передаваемой по металлическому волноводу, если размеры поперечных сечений обоих волноводов совпадают.

Экспериментальные результаты. Расчетные зависимости затухания моды LM_{11} от длины волны в медном волноводу квадратного сечения со слоями диэлектрика антирезонансной толщины на двух противоположных стенках, а

также мод LM_{31} и LM_{51} приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, существуют узкие резонансные области, в которых потери рабочей моды МДВ резко возрастают. Пунктирная линия соответствует одновременному уменьшению длины волны и толщины диэлектрического слоя с тем, чтобы величина $kd\sqrt{\varepsilon-1}$ оставалась постоянной, при этом $d = \lambda / 4\sqrt{\varepsilon-1}$. На рис. 4 черными квадратиками показаны результаты измеренных значений затухания в МДВ с размерами поперечного сечения 10×10 мм на частотах 150 и 180 ГГц. Ошибка измерения составляет 20%.

Приведенные экспериментальные результаты хорошо совпадают с расчетными, что указывает на перспективность применения МДВ в терагерцовом диапазоне. Увеличенный размер поперечного сечения позволяет передавать по волноводу значительные мощности [6,7].

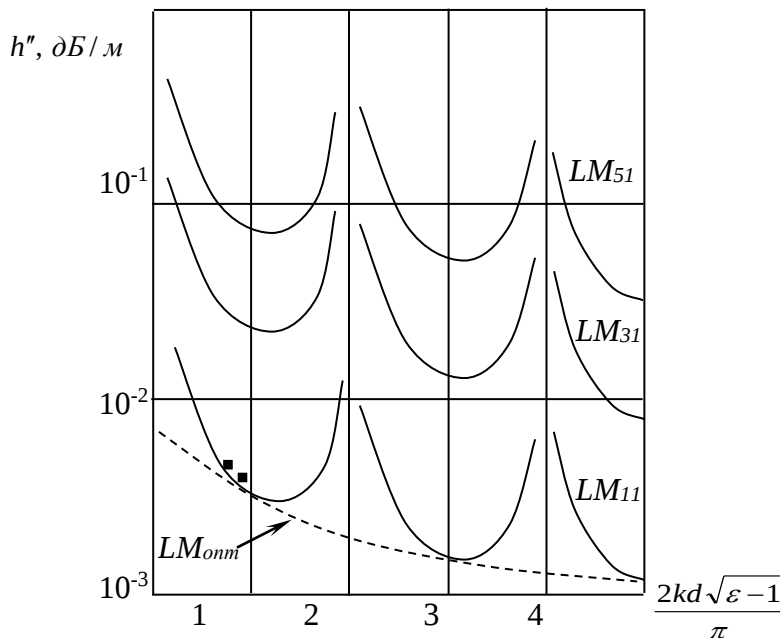


Рис. 4. Расчетные зависимости затухания мод LM_{11} , LM_{31} и LM_{51} от λ в волноводов квадратного сечения со слоями диэлектрика на двух стенках: $a = b = 5$ мм, материал диэлектрика фторопласт-4, $\varepsilon = 2,07$, $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4}$, $d = 480$ мкм

Закключение. Таким образом, металлодиэлектрические волноводы благодаря своим замечательным свойствам, таким как линейно поляризованная рабочая мода, ее малый уровень потерь, наличие самофилтрации и возможность передачи по МДВ больших мощностей, весьма перспективны для освоения терагерцового диапазона.

Լիտերատուրա

1. **Шаров Г.А.** Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 639 с.
2. Квaziоптические антенно-фидерные системы / Под ред. **Г.И. Хлопова.** – Харьков: ИПП “Контраст”, 2013. – 408 с.
3. Terahertz dielectric waveguides / **S. Afshar, T. Monro, D. Abbott, et al** // Advances in Optics and Photonics. – 2013. - № 5. – P. 169–215.
4. **Каценеленбаум Б.З.** Высокочастотная электродинамика. – М.: Наука, 1966. – 240 с.
5. **Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А.** Прямоугольные волноводы класса “полый диэлектрический канал” // Радиотехника и электроника. - 1978.- Т.23, № 10. – С. 2060 - 2068.
6. Complete set of waveguide elements for 120-180 GHz band / **M.Ts. Ayvazyan, Yu.N. Kazantsev, R.M. Martirossian, et al** // Proceedings of the 16-th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. - Lausanne, 1991. – P. 642 -643.
7. **Ayvazyan M.Ts., Kazantsev Yu.N.** Hollow dielectric channel in terahertz range // Proceedings of the International conference “The Technique of Microwave and THz Waves and its Application in Biomedical and Radar Technologies and in Remote Sensing”. – Ashtarak – Aghveran, Armenia, 2010. – P. 22 – 25.

*Поступила в редакцию 30.03.2016.
Принята к опубликованию 20.05.2016.*

ՏԵՐԱՀԵՐՑԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԱԼԻՔԱՏԱՐՆԵՐ

Հ.Ա. Ավետիսյան, Մ.Ց. Այվազյան

Դիտակված են տերահերցային տիրույթում առավել հաճախ օգտագործվող ալիքատարների տեսակները: Ներկայացված են մետաղական, դիէլեկտրիկ և մետաղադիէլեկտրիկ ալիքատարների հիմնական էլեկտրական բնութագրերը: Ցույց է տրված յուրաքանչյուր ալիքատարի կիրառման բնագավառը: Կատարվել է յուրաքանչյուր ալիքատարի էլեկտրական և մեխանիկական բնութագրերի համեմատական վերլուծություն, և առաջարկվել օպտիմալ լուծում: Ինչպես հայտնի է, ալիքատարների կարևորագույն բնութագրերն են հավասարաչափ հաճախային և զծային փուլային բնութագրերը, զծամետրային կորուստներն ու փոխանցվող հզորության առավելագույն մակարդակը: Տերահերցային տիրույթում մետաղական ալիքատարների լայնորեն կիրառմանը խոչընդոտում է երկու զգալի գործոն: Նախ՝ մետաղական միամող ալիքատարի պատրաստումն անհնար է նրա միկրոսկոպիկ չափերի պատճառով: Գծամետրային կորուստների հաշվարկային արժեքներն այդպիսի ալիքատարներում գերազանցում են թույլատրելի նորմերը՝ սկին-էֆեկտի պատճառով: Երկրորդ, մետաղական մեծ չափսերի ալիքատարի կիրառումը սահմանափակվում է բազմալիքությամբ: Բազմալիքության դեմ պայքարի հիմնական միջոցը ինքնազտման առկայությունն է: Սակայն մետաղական ալիքատարներն այդ հատկությամբ օժտված չեն: Դիէլեկտրիկ ալիքատարները բաց տիպի են: Բաց տիպի ալիքատարների հիմնական թերությունը ռադիացիոն կորուստների առկայությունն է: Այս հատկությունը որոշիչ դեր է խաղում և թույլ չի տալիս ստեղծել ֆունկցիոնալ տարրեր՝ տերահերցային տիրույթում տարբեր նշանակության սխեմաների

իրականացման համար: Աշխատանքում տեսականորեն և փորձնականորեն ցույց է տրված, որ տերահերցային տիրույթում լավագույն էլեկտրական բնութագրերն ապահովում են մետաղադիէլեկտրիկ ալիքատարները: Վերջիններս պատկանում են գերմեծ ալիքա-տարների դասին: Ալիքատարի պատերին դիէլեկտրիկ ծածկույթի առկայությունը, մի կողմից՝ հանգեցնում է ալիքատարի մետաղական պատերին երկայնական հոսանքների զգալի փոքրացմանը, իսկ մյուս կողմից՝ ապահովում է բարձր կարգի ալիքների ինքնազտումը, որոնք կարող են առաջանալ անհամասեռություններում: Մետաղա-դիէլեկտրիկ ալիքատարների այս հատկությունները թույլ են տալիս, ըստ էության, ստեղծել ալիքատարային բոլոր տարրերը, որոնց հիման վրա հնարավոր է իրագործել տարբեր նշանակության բարձրահաճախային սխեմաներ:

Առանցքային բաներ. տերահերցային տիրույթ, ալիքատար, "սնամեջ դիէլեկտրիկական ուղի" ալիքատարի դաս, գծամետրային կորուստներ, ինքնազտում, աշխատանքային մոդ, բարձր կարգի ալիքներ:

WAVEGUIDES USED IN THE TERAHERTZ RANGE

H.A. Avetisyan, M.Ts. Ayvazyan

Waveguide types mostly used in the terahertz range are considered. The main electrical characteristics of dielectrical, metal and metal-dielectric waveguides are studied. The sphere of usage of each waveguide is shown. The comparative analysis of electrical and mechanical characteristics of each waveguide is carried out. The optimal solution is considered. As it is known, the most important characteristics of waveguides are uniform frequency and linear phase characteristics, the pursuit of loss and the maximum transmit power level. Two main factors obstruct to the wide application of the metallic waveguides in the terahertz range. Firstly, the production of a metallic single-mode waveguide is impossible because of its microscopic size. The values of loss in this type of waveguides exceed the acceptable norms because of the skin-effect. Secondly, the use of the oversized metallic waveguide is limited to multiwavelength. The main means of overcoming the multiwavelength is self-filtering. But metallic waveguides do not have the mentioned property. Dielectric waveguides belong to the open-type class. The main drawback of the open-type waveguide is the presence of radiation losses. This property is crucial and can not create the functional elements for the implementation of schemes for different purposes in the terahertz range. In this paper, it is theoretically and experimentally shown that metal-dielectric waveguides have the best electrical characteristics. This waveguide belongs to the oversized waveguides. The dielectric cover on the walls of the waveguide, on the one hand, leads to a considerable reduction of longitudinal currents on the metal walls of the waveguide, on the other hand, provides self-filtering of higher types of waves that can occur on the non-uniformities. These properties of the metal-dielectric waveguide allow to create virtually all the waveguide elements on which it is possible to implement high-frequency circuits for various applications.

Keywords: terahertz range, the waveguide of "hollow dielectric channel" class, losses, self-filtering, working mode, higher types of waves.