

Волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода

В. Г. Кошкидько[✉], Я. О. Гальцов, Д. А. Портных

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

✉ kvg59@mail.ru

Аннотация

Введение. Волноводно-щелевые антенны широко применяются в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн из-за множества достоинств, среди которых высокие направленные свойства, компактные размеры, плоская форма, удобство подведения питания и высокая эффективность. Вместе с этим наблюдается стремление к уменьшению размеров СВЧ-устройств, их миниатюризации и повышению степени интеграции. Одним из вариантов решения этой задачи является переход к устройствам на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide – SIW).

Цель работы. Разработка модели волноводно-щелевой антенны, построенной на основе SIW-волновода, с характеристиками, аналогичными антенне, выполненной по традиционной технологии на основе полого металлического волновода.

Материалы и методы. Построение модели исследуемой структуры, электромагнитное моделирование и анализ ее направленных свойств проведены в САПР Ansys HFSS. Для определения координат продольных щелей на широкой стенке SIW-волновода использован энергетический метод. Для автоматизации операций по созданию и удалению однотипных объектов при построении модели разработаны макросы на языке Visual Basic Scripting Edition. Для печатного исполнения SIW-волновода использован СВЧ-материал Arlon AD300C. Проектирование антенны на основе SIW-волновода выполнялось поэтапно: сначала была разработана эталонная модель на основе полого металлического волновода, затем переходная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком, и итоговая модель на основе SIW.

Результаты. На каждом этапе контролировалась диаграмма направленности. В итоге смоделирована антенна на основе SIW-волновода с направленными свойствами, полностью совпадающими со свойствами антенны на основе эталонного полого металлического волновода.

Заключение. На основе моделирования в САПР Ansys HFSS разработана и протестирована волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода с требуемыми характеристиками. Антенна позволит использовать одно из главных преимуществ SIW-технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, SIW, моделирование, САПР, HFSS

Для цитирования: Кошкидько В. Г., Гальцов Я. О., Портных Д. А. Волноводно-щелевая антенна на основе SIW-волновода // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 70–80. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-70-80

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; принята к публикации после рецензирования 25.05.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

A Substrate Integrated Waveguide Slotted Antenna

Vladimir G. Koshkid'ko[✉], Yaroslav O. Galtsov, Dmitry A. Portnykh

Southern Federal University, Rostov-on-don, Russia

✉ kvg59@mail.ru

Abstract

Introduction. Slotted waveguide antenna arrays are widely used across centimeter- and millimeter-wavelength ranges due to numerous advantages, including their good directional properties, compact dimensions, flat shape, convenience of power supply, and high efficiency. At the same time, the current trend toward miniaturization of electronic devices and their integration requires new solutions, such as the development of devices based on waveguides integrated into the substrate (Substrate Integrated Waveguide – SIW).

Aim. To simulate a SIW-based slotted antenna with characteristics similar to those of a conventional antenna array based on a hollow metal waveguide.

Materials and methods. The Ansys HFSS software was used to simulate the structure under study and to carry out electromagnetic modeling and analysis of its directional properties. The energy method was used to determine the coordinates of longitudinal slots on the wide wall of the SIW waveguide. Macros were developed in the Visual Basic Scripting Edition language to automate routine operations for creating and deleting objects of the same type when constructing a model. The Arlon AD300C microwave material was used to manufacture a printed version of the SIW waveguide.

Results. The process of developing a SIW slotted antenna was carried out in the following stages: construction of a reference model based on a hollow metal waveguide followed by creating a transition model based on a waveguide completely filled with a dielectric and the final SIW-based model. At each stage, the radiation pattern was monitored to obtain the directional properties of the SIW slotted antenna with characteristics identical to those of an antenna based on the reference hollow metal waveguide.

Conclusion. A SIW slotted antenna with the required characteristics was simulated and tested in the Ansys HFSS environment. Such an antenna employs one of the main advantages of the SIW technology, i.e., the possibility of integrating all components on a single substrate, including antenna arrays, passive components, and active elements. This approach provides the basis for reducing the size of microwave devices and their miniaturization.

Keywords: waveguide slotted antenna, SIW, modeling, CAD, HFSS

For citation: Koshkid'ko V. G., Galtsov Ya. O., Portnykh D. A. A Substrate Integrated Waveguide Slotted Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 70–80. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-70-80

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 03.03.2023; accepted 25.05.2023; published online 28.09.2023

Введение. Волноводно-щелевые антенны (ВЩА) много лет остаются одним из основных типов антенн для систем радиолокации. Их преимуществами являются отличные направленные свойства, позволяющие получить диаграмму направленности (ДН) с необходимыми параметрами, простая схема возбуждения, малые габариты и масса, простая форма без лишних выступов, высокая эффективность.

Обычно ВЩА изготавливаются на основе полноразмерных полых металлических волноводов и применяются в основном в системах радиолокации. При использовании их в качестве бортовых устройств наиболее остро стоит проблема

уменьшения габаритов и массы, миниатюризации и повышения степени их интегрирования.

Одним из вариантов решения этой задачи является переход к устройствам на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide – SIW). SIW-технология позволяет интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации [1].

Постановка задачи. Необходимо спроектировать SIW ВЩА со следующими параметрами:

– рабочая частота $f_0 = 10$ ГГц;

- ширина главного лепестка ДН в Н-плоскости $2\theta_{0.5}^H = 3^\circ$;
- уровень боковых лепестков (УБЛ) в Н-плоскости -20 дБ;
- максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА ($\theta_{\max} = 90^\circ$);
- поляризация – вертикальная.

На проектируемую ВЩА накладываются дополнительные условия:

1) SIW-волновод должен иметь частотный диапазон, совпадающий с диапазоном полого металлического волновода стандартного сечения 23×10 мм;

2) для печатного исполнения SIW-волновода необходимо использовать СВЧ-материал Arlon AD300C с толщиной подложки $h = 1.524$ мм, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 2.97$.

Антенна на основе SIW-волновода проектировалась поэтапно: сначала разрабатывалась эталонная модель на основе полого металлического волновода, затем переходная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком, и итоговая модель на основе SIW.

Эталонная модель волноводно-щелевой антенны на основе полого волновода. Эталонная модель необходима для сравнения полученных на последующих этапах проектирования результатов с параметрами этой модели как с эталонными.

Эталонная модель построена на основе полого металлического волновода с идеально проводящими стенками стандартного сечения с размерами $a \times b = 23 \times 10$ мм².

С одной стороны волновод возбуждается

волноводным портом с основным типом волны H_{10} , расположенным на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра первой щели, а с другой – закорочен металлизированным короткозамыкателем, расположенным на расстоянии $\lambda_B/4$ от центра последней щели (рис. 1).

Длина волны в волноводе

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - [\lambda_0/(2a)]^2}} = 39.57 \text{ мм},$$

где $\lambda_0 = c/f_0 = 30$ мм – длина волны в свободном пространстве для заданной частоты.

Для обеспечения вертикальной поляризации излучаемого поля щели длиной $l_{\text{щ}} = \lambda_0/2$ расположены продольно на широкой стенке волновода в шахматном порядке. Для получения направления излучения по нормали к широкой стенке волновода ($\theta_{\max} = 90^\circ$) щели размещены с шагом $d_{\text{щ}} = \lambda_B/2$, что обеспечивает их синфазное возбуждение.

Необходимый уровень бокового излучения обеспечивает распределение поля $f(z)$ вида "косинус в квадрате на пьедестале" [2]. Требуемое распределение поля $f(z)$ реализуется за счет смещения щелей на расстояния x_n от средней линии широкой стенки волновода.

Количество щелей N , необходимое для обеспечения заданной ширины ДН в Н-плоскости, определяется из приближенной формулы [3]

$$2\theta_{0.5}^H = \frac{57.4\lambda_0}{Nd}. \quad (1)$$

С учетом заявленных параметров из (1) по-

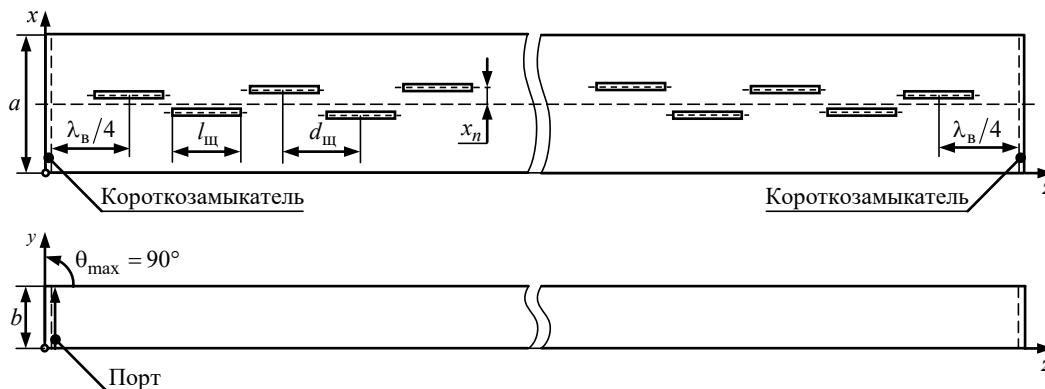


Рис. 1. Эталонная модель ВЩА на основе полого прямоугольного волновода

Fig. 1. Reference Model of the Waveguide Slotted Antenna based on a Hollow Rectangular Waveguide

лучим необходимое число щелей $N = 29$.

Для определения координат продольных щелей на широкой стенке волновода использован энергетический метод, теория которого изложена в [2], а практическое применение к проектированию ВЦА на основе полого металлического волновода описано в [3–5].

При возбуждении с одного из концов нормированная входная проводимость ВЦА $g_{вх} = 1$, а эквивалентная нормированная проводимость n -й щели определяется по формуле [2]

$$g_n = g_{вх} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{m=1}^N f^2(z_m)}, \quad (2)$$

где $n = 1 \dots N$ – номер щели.

Каждая щель может быть построена по двум координатам: x_n – сдвигу относительно средней линии и z_n – отступу от короткозамыкателя.

Сдвиг n -й щели относительно средней линии широкой стенки волновода рассчитывается по формуле [4, 6]

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos\left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B}\right)^2}}. \quad (3)$$

Положение центра n -й щели вдоль оси z относительно короткозамыкателя может быть определено как

$$z_n = (2n - 1)(\lambda_B/4). \quad (4)$$

Координаты щелей x_n , z_n рассчитывались в пакете компьютерной алгебры Mathcad с использованием (3) и (4). Полученные массивы координат щелей x_n , z_n из Mathcad экспортированы в текстовые файлы, а из этих промежуточных файлов импортированы в интегрированный графический редактор Ansys HFSS 3D Modeler с помощью макроса на языке VBScript. После этого был использован макрос [4], позволяющий в автоматическом режиме "вырезать" поочередно все щели на широкой стенке прямоугольного волновода по заданным координатам.

Полученная в результате моделирования

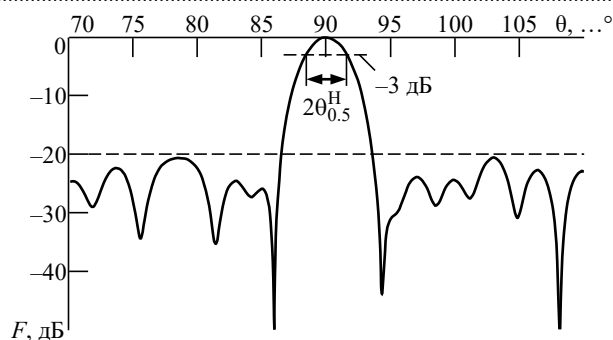


Рис. 2. Диаграмма направленности ВЦА на основе полого волновода в H-плоскости

Fig. 2. Radiation Pattern of the Waveguide Slotted Antenna based on a Hollow Waveguide in the H-plane

ДН ВЦА в H-плоскости $F(\theta)$ представлена на рис. 2 (штриховыми линиями обозначены заданный УБЛ (-20 дБ) и уровень для определения ширины главного лепестка по половинной мощности $\theta_{0.5}^H$ (-3 дБ)). Из графика видно, что требованиям технического задания удовлетворяет как полученный УБЛ (не превышает заданный уровень -20 дБ), так и ширина главного лепестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.56 - 88.4 = 3.16^\circ$. Эта ДН принята за эталонную для сравнения с ней ДН, полученных на последующих этапах.

Модель волноводно-щелевой антенны, построенной на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком. В задании на проектирование указано, что для печатного исполнения SIW-волновода необходимо использовать СВЧ-материал Arlon AD300C, имеющий $\epsilon = 2.97$ и толщину подложки $h = 1.524$ мм. Поэтому для исследования влияния диэлектрического заполнения на параметры антенны разработана промежуточная модель на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком.

При переходе от полого прямоугольного волновода (рис. 3, а) к волноводу с диэлектрическим заполнением (рис. 3, б) необходимо выбрать размеры волновода, заполненного диэлектриком, так, чтобы диапазон рабочих частот остался неизменным. Высоту полого прямоугольного волновода b можно заменить на толщину подложки h , поскольку размер узкой стенки волновода не влияет на распространение основного типа волны H_{10} . Напротив, от

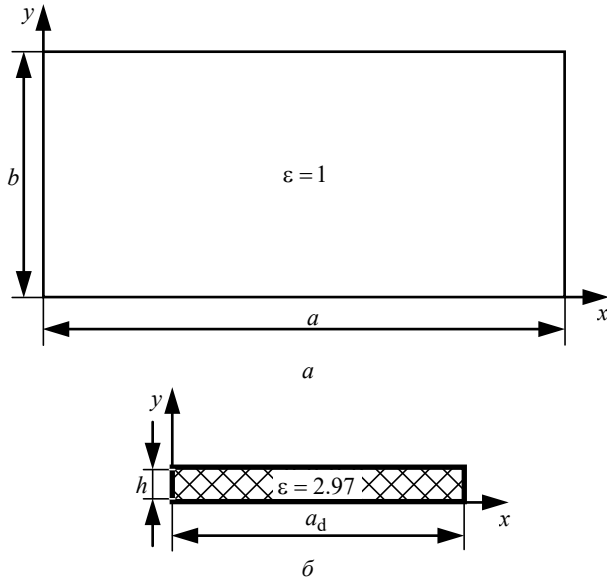


Рис. 3. Поперечное сечение полого эталонного прямоугольного волновода (а) и прямоугольного волновода, полностью заполненного диэлектриком (б)
 Fig. 3. Cross Section of the Hollow Reference Rectangular Waveguide (a) and the Rectangular Waveguide Completely Filled with a Dielectric (б)

размера широкой стенки волновода a_d диапазон рабочих частот зависит, поэтому для сохранения его неизменным по сравнению с полым прямоугольным волноводом необходимо, чтобы выполнялось условие

$$a_d = a/\sqrt{\epsilon}. \quad (5)$$

Для заданных параметров $a_d = 13.346$ мм. От этого размера зависит длина волны в волноводе:

$$\lambda_B = \frac{\lambda_\epsilon}{\sqrt{1 - [\lambda_\epsilon / (2a_d)]^2}}, \quad (6)$$

где $\lambda_\epsilon = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon}$ – длина волны в диэлектрике.

Таким образом диэлектрическое заполнение волновода приводит к уменьшению размера его широкой стенки с 23 до 13.346 мм, что влечет за собой уменьшение длины волны в волноводе с 39.57 до 22.96 мм.

Уменьшение длины волны в волноводе по сравнению с полым прямоугольным волноводом приводит к уменьшению шага между щелями:

$$d_{щ} = \lambda_B / 2 = 11.48 \text{ мм}, \quad (7)$$

что вызывает увеличение их количества:

$$N = \frac{57.4\lambda_0}{20_{0.5}^H d_{щ}} = 51. \quad (8)$$

Длина щелей на стенке волновода, полностью заполненного диэлектриком, связана с длиной волны в свободном пространстве λ_0 и относительной диэлектрической проницаемостью подложки ϵ соотношением [7]

$$l_{щ} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2(\epsilon + 1)}}. \quad (9)$$

В модели заполненного диэлектриком волновода короткозамыкатели и возбуждение приняты аналогичными этим элементам полого волновода. В связи с изменением размеров заново определены координаты щелей (2)–(4) с подстановкой в (3) вместо значений a и b значений a_d и h соответственно. Параметры щелей волновода определены по (5)–(9). Как и для полого волновода, для размещения в модели волновода щелей на широкой стенке был использован скрипт, разработанный ранее [4]. Полученная модель аналогична модели ВЦА на основе полого прямоугольного волновода (см. рис. 1); отличие состоит в наличии диэлектрического заполнения (рис. 3, б) и в том, что параметры этой модели рассчитываются по (5)–(9).

В результате моделирования в САПР Ansys HFSS получена ДН заполненного диэлектриком волновода в Н-плоскости (рис. 4). Полученная ДН, как и ДН полого волновода, в области боковых лепестков не превышает уровней, установленных техническим заданием (–20 дБ). Требованиям технического задания удовлетворяет также и ширина главного ле-

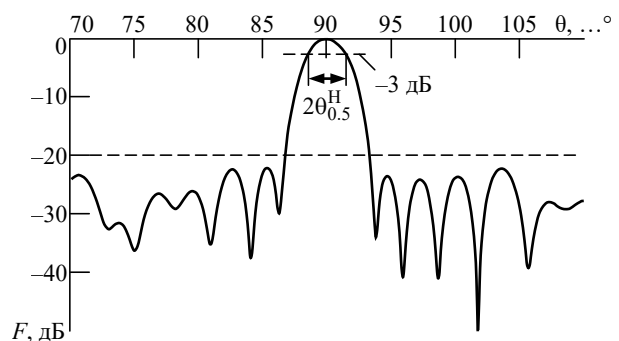


Рис. 4. Диаграмма направленности модели ВЦА на основе заполненного диэлектриком волновода в Н-плоскости

Fig. 4. Radiation Pattern of the Simulated Waveguide Slotted Antenna based on a Dielectric-Filled Waveguide in the H-plane

пестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.52 - 88.52 = 3.0^\circ$.

Модель волноводно-щелевой антенны, построенной на основе SIW-технологии. Прямоугольный волновод в неизменном виде не может быть интегрирован в печатную плату, поскольку технологически невозможно внедрить в диэлектрическую подложку сплошные металлические боковые стенки. В SIW-волноводе эти стенки могут быть реализованы путем плотного размещения рядов металлических штырей или металлизированных сквозных отверстий, соединяющих верхнюю и нижнюю металлические пластины подложки. Конфигурация применяемой SIW-структуры представлена на рис. 5.

При формировании модели SIW-волновода его ширина w (расстояние между центрами рядов металлизированных отверстий по оси x) не может быть использована непосредственно из-за усложнения структуры электромагнитного поля в области переходных отверстий, вызванного круглой формой, электрической проводимостью боковых стенок отверстий или штырей и наличием промежутков между ними. Поэтому, чтобы применить теорию волноводов к SIW, в расчетах используется не ширина волновода w , а его эффективная ширина $w_{\text{эф}}$ (рис. 5).

Замена сплошных стенок прямоугольного волновода на периодические металлизированные межслойные отверстия ведет к тому, что виртуальные боковые стенки SIW-волновода будут располагаться не по оси расположения межслойных отверстий, а несколько сдвинуты внутрь по оси x . Расстояние между виртуальными боковыми стенками равно эффективной ширине $w_{\text{эф}}$.

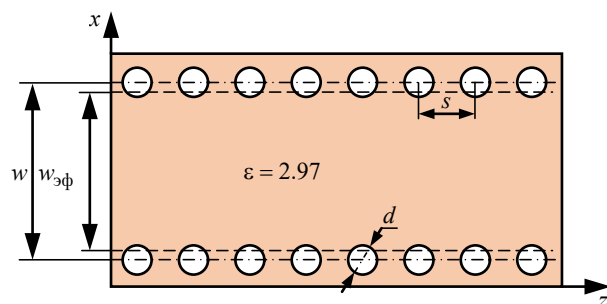


Рис. 5. Конфигурация моделируемой SIW-структуры

Fig. 5. Configuration of the Simulated SIW Structure

Для того чтобы SIW-волновод имел такой же частотный диапазон, как и эквивалентный прямоугольный волновод, необходимо принять $w_{\text{эф}} = a_d$ (5).

Расстояние по оси z между центрами отверстий равно s , а их диаметр – d .

Отношение диаметра межслойных металлизированных отверстий d к ширине волновода w определяет потери в SIW, поэтому рекомендуется выбирать $d/w < 0.2$ [8]. Кроме этого одновременно должно выполняться условие $d < 0.2\lambda_v$ [8].

Соотношение s/d влияет на долю "вытекающего" из SIW поля, в связи с чем это соотношение рекомендуется принимать как $s/d < 2$ [8].

Таким образом, имея выбранные значения геометрических размеров s , d и рассчитанное значение $w_{\text{эф}}$, для построения модели необходимо знать ширину SIW-волновода.

Существует несколько формул, связывающих значения w и $w_{\text{эф}}$, дающих разную точность.

Наиболее простая формула [9] дает точность в пределах $\pm 5\%$:

$$w = w_{\text{эф}} + d^2 / (0.95s). \quad (10)$$

Более точная формула [9]

$$w_{\text{эф}} = w - 1.08d^2/s + 0.1d^2/w. \quad (11)$$

Наиболее точные результаты (в пределах $\pm 1\%$), как показано в [10], дает выражение

$$w_{\text{эф}} = w \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{s}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}} \right), \quad (12)$$

где

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{w/s - 1.0684};$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{w/s - 1.2010};$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{w/s + 0.2152}.$$

Ширина SIW-волновода w определяется решением уравнений (11) и (12) относительно этой переменной.

При использовании (10) и (11) неточность вычисления значения w приводила к отклонению максимума излучения на $0.5...1^\circ$, что при заданной ширине ДН в 3° является существенной погрешностью. Поэтому для определения ширины SIW-волновода w использована (12), как дающая наиболее высокую точность вычисления.

В отличие от двух ранее рассмотренных моделей в модели ВЩА на основе SIW использовано возбуждение не с помощью волноводного порта с основным типом волны H_{10} , а с помощью реальной линии питания. Из-за удобства реализации ВЩА на печатной плате вместе с остальными СВЧ-узлами наиболее подходящим способом подачи энергии выступает микрополосковая линия (МПЛ) с сопротивлением 50 Ом . Для согласования большой разницы между шириной SIW-волновода w и шириной линии передачи обычно используются специальные переходы.

Наиболее подходящим для рассматриваемой модели является конусообразный микрополосковый переход [11], достоинством которого в отличие от аналогичных относительно дорогостоящих объемных компонентов является возможность изготовления на одной подложке с рассматриваемым SIW-волноводом.

Микрополосковый переход (рис. 6) состоит из конусообразного четвертьволнового трансформатора длиной L_t , который узкой стороной подсоединен к прямоугольной МПЛ шириной w_L , а широкой стороной, имеющей размер W_t , подключается непосредственно к верхней металлической стенке SIW.

Длина L_t микрополоскового перехода определяется соотношением [12]

$$L_t = n\lambda_\varepsilon/4. \quad (13)$$

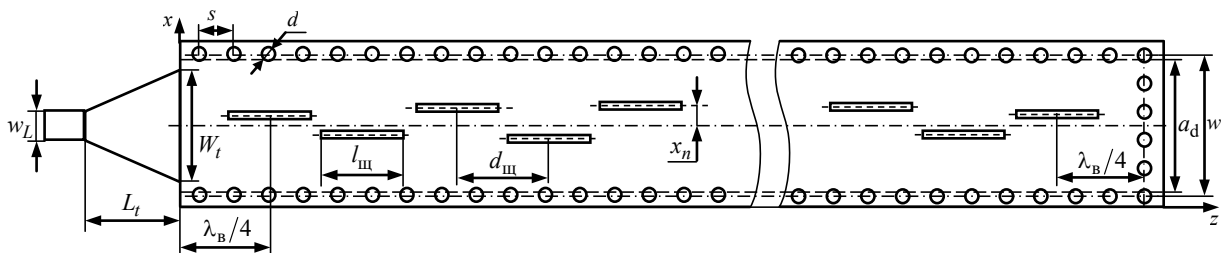


Рис. 7. Модель ВЩА на основе SIW-волновода

Fig. 7. Simulated Waveguide Slotted Antenna

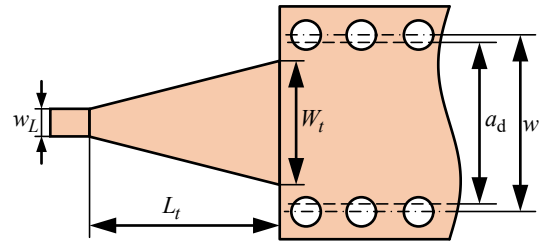


Рис. 6. Конусообразный микрополосковый переход

Fig. 6. Tapered Microstrip Junction

Ширина МПЛ с сопротивлением 50 Ом находится как формула [13]

$$w_L = \frac{h}{r} - \frac{2h}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\pi}{r} - 2 \ln 2 \right) + 1 \right] = 3.258 \text{ мм}, \quad (14)$$

где $r = 50\sqrt{\varepsilon}/(120\pi)$.

Простота структуры микрополоскового перехода позволяет определить оптимальные ширину и длину конусообразного трансформатора для согласования импедансов SIW и МПЛ в процессе моделирования. Известно аналитическое выражение, позволяющее определить ширину трансформатора в месте его подсоединения к SIW в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки ε и толщины h [14, 15]:

$$W_t = \frac{1}{\frac{4.38}{a_d} \exp \left(-0.627 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right)}, \quad (15)$$

$$\text{где } \varepsilon_e = \frac{\varepsilon}{\frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+12h/w_L}}}.$$

Модель ВЩА на основе SIW-волновода представлена на рис. 7. Для расчета параметров (эффективной ширины a_d , длины волны в волноводe λ_B , длины щелей $l_{\text{ш}}$, шага между щелями $d_{\text{ш}}$) использованы те же выражения (8)–(12), что и для модели на основе волновода, полностью заполненного диэлектриком. Как и для этого волновода в предыдущем случае, для размещения щелей на

широкой стенке волновода и построения рядов металлических штырей были использованы скрипты на языке VBScript. Для расчета размеров микрополоскового перехода (длина L_t , ширина МПЛ w_L , ширина трансформатора W_t) использованы выражения (13)–(15).

В результате моделирования в САПР Ansys HFSS получена ДН в Н-плоскости SIW-волновода (рис. 8). ДН удовлетворяет требованиям технического задания по ширине главного лепестка по половинной мощности $2\theta_{0.5}^H = 91.5 - 88.48 = 3.02^\circ$ и по УБЛ (-20 дБ).

Необходимо отметить, что конструкция антенны является симметричной: щели расположены симметрично относительно середины длинной стороны, а короткозамыкатели установлены одинаково слева и справа. В связи с этим следует ожидать, что ДН будут симметричны относительно угла максимума 90° . Однако ДН на рис. 2, 4 и 8 демонстрируют существенную разницу в области боковых лепестков слева и справа от этого угла.

Объясняется эта несимметричность двумя причинами. Во-первых, питание к антенне подводится несимметрично: с одного из концов волновода. В результате щели, попарно симметричные относительно середины антенны, оказываются на разном расстоянии от точки питания, что определяет разные условия их возбуждения за счет амплитудно-фазового распределения поля по полотну антенны. Во-вторых, координаты расположения щелей рассчитаны приближенным энергетическим методом, который не учитывает их взаимного влияния, от которого также зависит точность вос-

произведения заданного распределения поля, определяющего вид ДН и ее симметричность.

Следует учесть, что указанная несимметричность наблюдается на уровнях менее -20 дБ, которые для технического задания на разработку антенны являются нерабочими. Добиваться симметричности ДН на этих уровнях вряд ли целесообразно, поскольку главные требования технического задания по УБЛ и ширине ДН выполнены.

На заключительном этапе моделирования исследовано влияние на ДН технологических погрешностей при изготовлении антенны. Объектом исследования выбрана погрешность изготовления ширины SIW-волновода w (расстояние между центрами рядов металлизированных отверстий) в пределах позиционного допуска на отклонение осей отверстий. Выбор этого параметра связан с тем, что от ширины SIW-волновода w напрямую зависит эффективная ширина $w_{эф}$, которая влияет на длину волны в волноводе λ_B .

Согласно ГОСТ Р 53429–2009 при типовых для СВЧ-устройств классах точности 4 и 5 допуск на отклонение осей отверстий составляет от 0.05 до 0.1 мм в зависимости от размеров платы. Поскольку расчетное значение ширины SIW-волновода, полученное по (12), составляет $w = 14.01$ мм, расчет ДН был выполнен для $w = 14.01 + 0.05$ мм и $w = 14.01 + 0.1$ мм.

Результаты моделирования показаны на рис. 9. Из них следует, что при расчетном значении ширины SIW-волновода $w = 14.01$ мм максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЩА ($\theta_{max} = 90^\circ$). При отклонении ширины SIW-волновода w на 0.05 мм максимум ДН

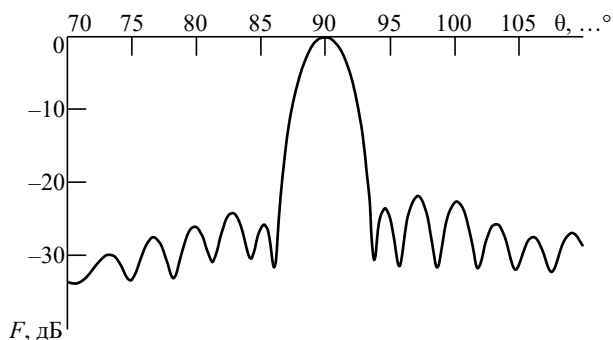


Рис. 8. Диаграмма направленности ВЩА на основе SIW-волновода в Н-плоскости

Fig. 8. Radiation Pattern of the Simulated Waveguide Slotted Antenna in the H-plane

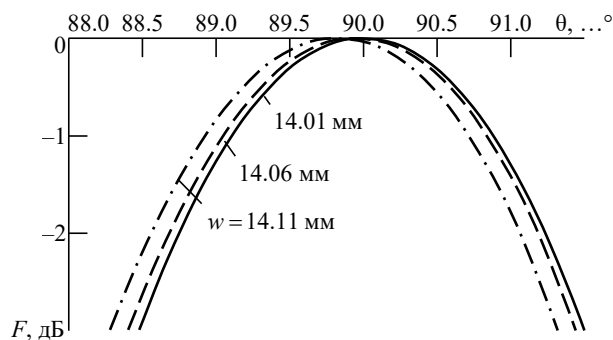


Рис. 9. Смещение максимума ДН SIW-волновода в Н-плоскости при изменении его ширины

Fig. 9. Shift of the Maximum of the SIW-waveguide Radiation Pattern in the H-plane with a Change in its Width

смещается на 0.05° ($\theta_{\max} = 89.95^\circ$), а при отклонении на 0.1 мм – на 0.17° ($\theta_{\max} = 89.83^\circ$). Несмотря на то что полученные смещения максимума ДН не являются значительными, их необходимо учитывать при наличии жестких требований на изменения этого параметра.

Заключение. Целью представленной в настоящей статье работы была разработка ВЩА на основе SIW-волновода, направленные свойства и частотный диапазон которого не должны отличаться от аналогичных характеристик антенны на основе полого прямоугольного волновода стандартного сечения. Сравнение ДН антенны на основе SIW-волновода с ДН указанной антенны (рис. 10) подтверждает идентичность характеристик этих антенн в направлении максимума излучения, а УБЛ для обеих моделей соответствует техническому заданию и не превышает -20 дБ.

Таким образом, разработанная и протестированная на основе моделирования в САПР

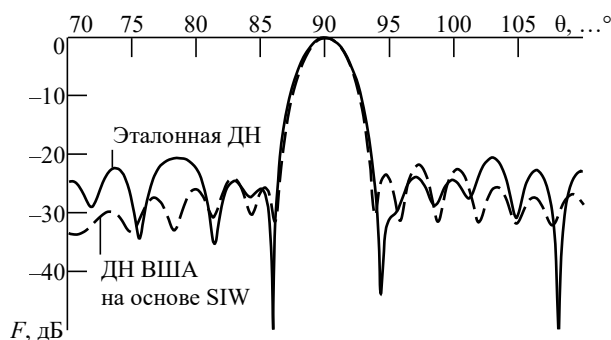


Рис. 10. Сравнение ДН в H-плоскости ВЩА на основе SIW и эталонной ВЩА

Fig. 10. Comparison of the Radiation Patterns of the SIW-based Slotted Antenna and the Reference Waveguide Slotted Antenna in the H-plane

Ansyes HFSS ВЩА на основе SIW-волновода полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Такая антенна позволит использовать одно из главных преимуществ SIW-технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что неизбежно приведет к уменьшению размеров СВЧ-устройств и их миниатюризации.

Список литературы

1. Kurudere S., Erturk V. B. Design of substrate integrated waveguide based bandpass filters and power dividers: Master's Thesis / The Department of Electrical and Electronics Engineering and the Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University. Ankara, 2013. 110 p. URL: <http://hdl.handle.net/11693/15873> (дата обращения 03.03.23)
2. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов. М.: Сов. радио, 1972. 320 с.
3. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24
4. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17
5. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквивалентной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20.
6. Семенихин А. И., Кошкидько В. Г., Климов А. В. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad. Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. 80 с.
7. Moitra S., Mukhopadhyay A. K., Bhattacharjee A. K. Ku-Band Substrate Integrated Waveguide (SIW) Slot Array Antenna for Next Generation Networks // Global J. of Computer Science and Technology. 2013. Vol. 13, № 5. P. 11–16.
8. Deslandes D., Wu Ke. Single-Substrate Integration Technique of Planar Circuits and Waveguide Filters // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2003. Vol. MTT-51, iss. 2. P. 593–596. doi: 10.1109/TMTT.2002.807820
9. Xu F., Wu K. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2005. Vol. MTT-53, iss. 1. P. 66–73. doi: 10.1109/TMTT.2004.839303
10. Simulation and experiment on SIW slot array antennas / L. Yan, W. Hong, G. Hua, J. Chen, K. Wu, T. J. Cui // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2004. Vol. 14, iss. 9. P. 446–448. doi: 10.1109/lmwc.2004.832081
11. Deslandes D. Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions // 2010 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Anaheim, USA, 23–28 May 2010. P. 704–707. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517884
12. Logarithmic Slots Antennas Using Substrate Integrated Waveguide / J. Kachhia, A. Patel, A. Vala, R. Patel, K. Mahant // Intern. J. of Microwave Science and Technology. 2015. № 2. Article ID 629797. doi: 10.1155/2015/629797

13. Hilberg W. Strengere berechnung des wellenwiderstandes von parallelen streifenleitungen und lin vergleich mit naherungen // AEÜ. 1971. Bt. 54, № 4. P. 200–205.

14. Djerafi T., Doghri A., Wu K. Substrate Integrated Waveguide Antennas // Handbook of Antenna Technologies. Ed. by Z. Chen. Springer Science+Business

Media Singapore, 2015. 60 p. doi: 10.1007/978-981-4560-75-7_57-1

15. Останков А. В., Хрипунов Е. Г. Рупорная SIW-антенна со специальным копланарным переходом и диэлектрической линзой для питания планарной антенны вытекающей волны // Радиостроение. 2020. № 2. С. 1–26. doi: 10.36027/rdeng.0220.0000163

Информация об авторах

Кошкидько Владимир Георгиевич – кандидат технических наук (1988), доцент (1993) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследования в области электромагнетизма и прикладной электродинамики (рассеяние электромагнитных волн импедансными структурами; импедансные, щелевые и микрополосковые электродинамические структуры; микрополосковые антенны; антенны с реактивными нагрузками).

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Гальцов Ярослав Олегович – бакалавр наук (2022), магистрант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Сфера научных интересов – исследование антенных структур и иных устройств в интегральном исполнении; способы миниатюризации систем.

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: galcov-111yaroslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0195-7547>

Портных Дмитрий Александрович – бакалавр наук (2021), магистрант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Сфера научных интересов – исследование многослойных СВЧ-структур; интегрированные в подложку волноводы; многоэлементные антенные решетки.

Адрес: Южный федеральный университет, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

E-mail: portnuhd@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0460-6248>

References

1. Kurudere Sinan, Erturk Vakur B. Design of Substrate Integrated Waveguide Based Bandpass Filters and Power Dividers. Ankara, The Department of Electrical and Electronics Engineering and the Graduate School of Engineering and Science of Bilkent University, 2013, 110 p. Available at: <http://hdl.handle.net/11693/15873> (accessed 03.03.23)

2. Voskresenskiy D. I. *Antenny i ustroystva SVCH. Raschet i proyektirovaniye antenykh resh-etok i ikh izluchayushchikh elementov* [Antennas and Microwave Devices. Calculation and Design of Antenna Arrays and Their Radiating Elements]. Moscow, Sovetskoye radio, 1972, p. 320. (In Russ.)

3. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15–24 (In Russ.)

4. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS.

Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17 (In Russ.)

5. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Development of a Linear Equivalent Slotted Waveguide Antenna Array and Analysis of its Directional Properties. Journal Antennas. 2018, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.)

6. Semenikhin A. I., Koshkid'ko V. G., Klimov A. V. *Proyektirovaniye zerkal'nykh anten s pomoshch'yu paketa Mathcad* [Designing Reflector Antennas Using the Mathcad Package], *Taganrog, Izdatel'stvo Yuzhnogo federal'nogo universiteta*, 2016, 80 p. (In Russ.)

7. Moitra S., Mukhopadhyay A. K., Bhattacharjee A. K. Ku-Band Substrate Integrated Wave-guide (SIW. Slot Array Antenna for Next Generation Networks. Global Journal of Computer Science and Technology. 2013, vol. 13, no. 5, pp. 11–16.

8. Deslandes D., Wu Ke. Single-Substrate Integration Technique of Planar Circuits and Wave-guide Filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003, vol. 51, no. 2, pp. 593–596. doi: 10.1109/TMTT.2002.807820

9. Xu Feng, Wu Ke. Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Wave-guide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2005, vol. 53, no. 1, pp. 66–73. doi: 10.1109/TMTT.2004.839303

10. Li Yan, Wei Hong, Guang Hua, Jixin Chen, Ke Wu, Tie Jun Cui. Simulation and Experiment on SIW Slot Array Antennas. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2004, vol. 14, pp. 446–448. doi:10.1109/lmwc.2004.832081

11. Deslandes D. Design Equations for Tapered Mi-Crostrip-to-Substrate Integrated Waveguide Transitions. 2010 IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Anaheim, USA, 23–28 May 2010, pp. 704–707. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517884

12. Kachhia J., Patel A., Vala A., Patel R., Mahant K. Logarithmic Slots Antennas Using Substrate Integrated

Waveguide. *Intern. J. of Microwave Science and Technology*. 2015, no. 2, article ID 629797. doi: 10.1155/2015/629797

13. Hilberg W. Strenge Berechnung Des Wellen-Widerstandes Von Parallelen Streifenleitungen Und Lin Vergleich Mit Naherungen. *AEÜ*. 1971, Bt. 54, no. 4, pp. 200–205.

14. Djerafi Tarek, Doghri Ali, Wu Ke. Substrate Integrated Waveguide Antennas. *Handbook of Antenna Technologies*. Springer Science + Business Media Singapore, 2015, pp. 1–60.

15. Ostankov A. V., Khripunov Ye. G. Horn SIW Antenna with a Special Coplanar Junction and a Dielectric Lens for Powering the Planar Antenna of the Outflow Wave. *Radiostroyeniye* [Radioengineering]. 2020, no. 2, pp. 1–26. doi: 10.36027/rdeng.0220.0000163

Information about the authors

Vladimir G. Koshkid'ko, Cand. of Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University in Taganrog, Russia. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2008). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: electromagnetics and applied electrodynamics; electromagnetic waves scattering by impedance structures; impedance, slot and microstrip electromagnetic structures; microstrip antennas; reactive loaded antennas.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Yaroslav O. Galtsov, Master's degree student of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University in Taganrog, Russia. Area of expertise: research of antenna structures and other devices in integrated design; methods of miniaturization of systems.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: galcov-111yaroslav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0195-7547>

Dmitry A. Portnykh, Master of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University in Taganrog. Area of expertise: research of multilayer microwave structures; waveguides integrated into the substrate; multi-element antenna arrays.

Address: Southern Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-don 344006, Russia

E-mail: portnuhd@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0460-6248>
