

УДК 621.391+621.396.677.85

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА 60 ГГц

А. А. Артеменко, А. А. Мальцев, Р. О. Масленников, А. Г. Севастьянов, В. Н. Скорин

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Рассматривается задача разработки интегрированной линзовой антенны для локальной системы радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц. Антенна представляет собой кремниевую линзу полусферической формы с цилиндрическим продолжением, на плоской поверхности которой размещён микрополосковый антенный элемент. Использование кремния (диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 11,7$) в качестве материала линзы обеспечивает максимальный диапазон углов сканирования при минимальном осевом размере линзы. Для начального расчёта параметров линзы использовались приближённые аналитические выражения, позволяющие оценить основные характеристики линзовой антенны, интегрированной с микрополосковым антенным элементом. Для дальнейшей совместной оптимизации параметров линзы и антенного элемента проводилось трёхмерное моделирование распределения электромагнитного поля. На основе его результатов были разработаны и изготовлены кремниевые полусферические линзы с цилиндрическим продолжением с радиусами 6 и 12 мм. Планарный микрополосковый антенный элемент был изготовлен по технологии LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics). Результаты моделирования и экспериментального исследования созданных прототипов показали, что разработанные линзовые антенны имеют коэффициенты направленного действия 17,6 и 23,1 дБи для линз с радиусами 6 и 12 мм соответственно. При этом достигается максимальный угол отклонения луча, равный 55° , при допустимом уменьшении коэффициента направленного действия по сравнению с несмещённым лучом не более, чем на 6 дБи. Полученные результаты показали, что разработанные интегрированные линзовые антенны могут найти применение в высокоскоростных системах радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё большее внимание уделяется разработке высокоскоростных локальных систем радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц. Неоспоримым преимуществом использования миллиметрового диапазона длин волн является возможность задействовать для передачи сигналов широкую полосу частот в несколько гигагерц, что позволяет значительно увеличить скорость передачи данных. Так, в 2012 году комитет по стандартизации Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) завершил разработку стандарта IEEE 802.11ad [1] для беспроводных локальных систем связи в свободном от лицензирования частотном диапазоне 57÷64 ГГц. При этом в нём предусмотрено несколько каналов передачи данных шириной по 2 ГГц, в каждом из которых может достигаться скорость передачи до 6,8 Гбит/с.

Однако при передаче сигнала на одно и то же расстояние и одинаковых коэффициентах усиления антенн потери излучения при распространении в свободном пространстве на частоте 60 ГГц более чем на 20 дБ превышают аналогичные потери на широко используемых сегодня частотах около 2,4 и 5 ГГц. Поэтому высокоскоростные системы радиосвязи, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, требуют применения направленных антенн с более высоким коэффициентом усиления. Кроме того, они должны обеспечивать возможность пространственного сканирования узконаправленного луча для обслуживания мобильных пользователей. В [2] было

показано, что для создания беспроводных локальных систем связи на частоте около 60 ГГц необходимо разработать антенны с коэффициентом усиления не менее 16 дБи, способные обеспечить сканирование лучом в диапазоне углов порядка $\pm 45^\circ$.

Одним из перспективных путей создания высоконаправленных сканирующих антенн миллиметрового диапазона длин волн является разработка недорогих управляемых интегрированных линзовых антенн. Такая антенна представляет собой диэлектрическую линзу эллипсоидальной или квазиэллипсоидальной формы с размещёнными на её задней (плоской) поверхности планарными антенными элементами. Эта простая конфигурация позволяет использовать фокусирующие свойства линзы для создания направленного излучения и одновременно обеспечивает возможность пространственного сканирования лучом за счёт переключения антенных элементов, находящихся на различных расстояниях от оси линзы [3].

Для изготовления линзы могут использоваться такие распространённые материалы, как кремний, плавленый кварц, фторопласт и другие. Основным требованием к материалу линзы является его малая проводимость, обеспечивающая низкий уровень потерь при распространении волны в теле линзы. Кроме того, при разработке антенн для устройств локальных систем радиосвязи предпочтительно использование материалов с большой диэлектрической проницаемостью, например кремния, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon = 11,7$. Это позволяет существенно уменьшить осевой размер линзы, что необходимо для применения таких антенн в мобильных устройствах.

Первичные антенные элементы могут быть изготовлены с помощью стандартных планарных технологий изготовления печатных плат, LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) плат, а также технологий GaAs и КМОП (комплементарная логика на транзисторах металл–оксид–полупроводник) изготовления полупроводниковых микросхем. При этом расположение антенных элементов непосредственно на поверхности линзы позволяет уменьшить возбуждение поверхностных волн, что обуславливает высокую эффективность излучения линзовых антенн [4, 5].

Целью данной работы является исследование кремниевых интегрированных линзовых антенн для локальных систем радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц. Работа построена следующим образом. В разделе 1 проведён начальный расчёт основных характеристик разрабатываемых линзовых антенн с помощью приближённых аналитических выражений. В разделе 2 приведено описание и даны результаты моделирования электромагнитного излучения первичного микрополоскового антенного элемента. В разделе 3 приведены результаты полного моделирования электромагнитного излучения рассматриваемых линзовых антенн с микрополосковым антенным элементом, расположенным на различных расстояниях от оси линзы. Раздел 4 содержит описание и результаты экспериментальных исследований разработанных кремниевых интегрированных линзовых антенн. В разделе 5 сформулированы выводы работы.

1. ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН

Интегрированные линзовые антенны для систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн интенсивно исследуются с 90-х годов [4–12]. Интерес к линзовым антеннам обусловлен их способностью обеспечить сканирование лучом за счёт переключения между различными планарными антенными элементами, размещёнными на плоской поверхности линзы на различном расстоянии от её оси (см. рис. 1).

Для того, чтобы диэлектрическая линза эллипсоидальной формы обладала фокусирующими свойствами, необходимо, чтобы её эксцентриситет был обратно пропорционален коэффициенту

преломления материала, из которого изготовлена линза [11]:

$$l = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где l — эксцентриситет, a и b — большая и малая полуоси эллипсоида вращения, ε — диэлектрическая проницаемость линзы. Эллипсоидальная линза с эксцентриситетом, удовлетворяющим условию (1), трансформирует сферический волновой фронт от первичного антенного элемента, расположенного в фокусе линзы, в плоский волновой фронт, который формирует узкий направленный луч в дальней зоне антенны.

Вследствие лёгкости изготовления широкое распространение также получили диэлектрические линзы полусферической формы с цилиндрическим продолжением (см. рис. 1). Такая линза представляет собой полусферу с радиусом R , расположенную непосредственно на цилиндрическом продолжении с длиной L . При определённых значениях параметров R и L линза полусферической формы с цилиндрическим продолжением приближается к линзе эллипсоидальной формы, сохраняя тем самым свои фокусирующие свойства. Практический метод нахождения параметров полусферической линзы с цилиндрическим продолжением, наилучшим образом приближающей заданную эллипсоидальную линзу, приведён в [11]. Показано, что радиус линзы R и длину цилиндрического продолжения L , соответствующие наилучшему приближению эллипсоидальной формы, можно найти с помощью следующих выражений:

$$R = \frac{3n^2b}{1 + 3n^2}, \quad L = b \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} - R. \quad (2)$$

Используя (2), получим, что для линзы из кремния ($n^2 \equiv \varepsilon = 11,7$) с радиусом $R = 6$ мм длина цилиндрического продолжения $L = 2,34$ мм, а для линзы из кремния с радиусом $R = 12$ мм величина $L = 4,68$ мм.

Однако для улучшения сканирующих свойств рассматриваемых антенн часто используют линзы с уменьшенной длиной цилиндрического продолжения. Такая линзовая антенна имеет меньший коэффициент направленного действия для антенного элемента, расположенного в центре задней поверхности линзы, однако обеспечивает больший диапазон углов сканирования для допустимого уменьшения коэффициента направленного действия. С этой целью используются так называемые гиперполусферические линзы, для которых параметры R и L удовлетворяют соотношению

$$L = R/n. \quad (3)$$

Для таких линз из кремния с радиусами $R = 6$ и 12 мм длина цилиндрического продолжения L , согласно выражению (3), составит соответственно $1,75$ и $3,51$ мм. Таким образом, при практической разработке интегрированной линзовой антенны имеет смысл выбирать L из диапазона значений, определяемого формулами (2) и (3), в зависимости от заданных требований к антенне.

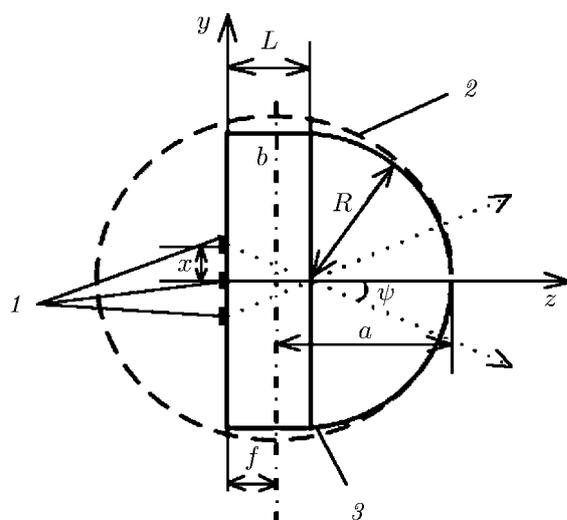


Рис. 1. Конфигурация интегрированной линзовой антенны с эллипсоидальной и соответствующей ей полусферической линзой с цилиндрическим продолжением. 1 — антенные элементы, 2 — эллипсоидальная линза, 3 — полусферическая линза с цилиндрическим продолжением

Для приближённого первоначального расчёта основных характеристик интегрированных линзовых антенн можно воспользоваться простыми аналитическими выражениями, приведёнными ниже.

Оценка коэффициента направленного действия линзовой антенны в направлении максимума излучения D_0 может быть получена из известного выражения для коэффициента направленного действия круглой апертуры с радиусом R с однородным распределением электрической компоненты поля [13]:

$$D_0 = 20 \lg(2\pi R/\lambda_0), \quad (4)$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве. Из выражения (4) получим, что для линзы с радиусом $R = 6$ мм на частоте 60 ГГц коэффициент направленного действия составляет $D_0 \approx 17,6$ дБи, а для линзы с радиусом $R = 12$ мм величина $D_0 \approx 23,6$ дБи. Линзы с этими двумя радиусами были выбраны для использования в разрабатываемых прототипах линзовых антенн с целью оценки минимального требуемого размера, позволяющего удовлетворить требованиям, предъявляемым к сканирующим направленным антеннам беспроводных систем связи частотного диапазона 60 ГГц [2].

Ширина луча по уровню -3 дБ от коэффициента направленного действия интегрированной линзовой антенны может быть оценена также по известному выражению для ширины диаграммы направленности круглой апертуры [14]:

$$\Omega = 59^\circ \frac{\lambda_0}{2R}. \quad (5)$$

Таким образом, оценка ширины луча линзы с радиусом $R = 6$ мм есть $\Omega = 24,8^\circ$, а для линзы с радиусом $R = 12$ мм величина $\Omega = 12,3^\circ$. Следует заметить, что оценки характеристик линзовых антенн по формулам (4) и (5) имеют бóльшую точность при рассмотрении линз с эллипсоидальной формой и с полусферической формой, приближённой к форме эллипсоида вращения.

Выражение для приближённого вычисления угла отклонения луча ψ линзовой антенны в зависимости от смещения x первичного антенного элемента относительно оси линзы может быть получено с помощью простых приближений геометрической оптики в следующем виде:

$$\psi = \arctg \frac{x}{L}. \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость угла отклонения луча ψ от относительного смещения первичного антенного элемента x/R для полусферических линз с цилиндрическим продолжением из различных материалов. Рассмотрены наиболее распространённые материалы: кремний ($\varepsilon = 11,7$), плавленый кварц ($\varepsilon = 3,8$), и фторопласт ($\varepsilon = 2,1$). При этом геометрические параметры полусферической линзы с цилиндрическим продолжением получены в соответствии с выражением (2). Видно, что при заданном относительном смещении x/R угол отклонения луча ψ для линз с большей диэлектрической проницаемостью имеет большее значение. Из этого следует, что при одинаковых углах сканирования площадь решётки переключаемых антенных элементов для линз с большой диэлектрической проницаемостью может быть заметно снижена.

Формулы (4)–(6) были использованы для первоначального расчёта характеристик интегрированных линзовых антенн. Для более точной оценки коэффициента направленного действия, ширины и углов отклонения луча необходимо учесть множество других физических эффектов, что приводит к значительному усложнению вычислений. К ним следует отнести реальную диаграмму направленности первичного антенного элемента, сформированную на поверхности линзы, боковое излучение линзы с внешней поверхности цилиндрического продолжения, поляризацию антенного элемента и внутренние переотражения на границе линзы со свободным пространством.

Таким образом, для получения уточнённых характеристик интегрированной линзовой антенны целесообразно проводить полное моделирование распределения электромагнитного поля. Однако, один важный вывод может быть сделан и на основе упрощённых выражений (4)–(6). Он заключается в том, что коэффициент направленного действия линзовой антенны практически полностью определяется радиусом, т. е. апертурой, линзы, в то время как угол отклонения луча и, следовательно, общий диапазон углов сканирования зависят только от смещения первичного антенного элемента относительно оси линзы и диэлектрической проницаемости материала, из которого линза изготовлена. Это позволяет разрабатывать различные интегрированные линзовые антенны с независимыми значениями коэффициента направленного действия и диапазона углов сканирования луча. Так, например, для локальных систем связи разумно выбрать линзу из материала с высокой диэлектрической проницаемостью для обеспечения больших углов сканирования и уменьшения её осевого размера. А для реализации связи типа «точка–точка» на больших расстояниях, можно обеспечить автоматическую подстройку луча в небольшом диапазоне углов с помощью линз из фторопласта с большой апертурой и излучающими элементами с относительно небольшим смещением от оси линзы.

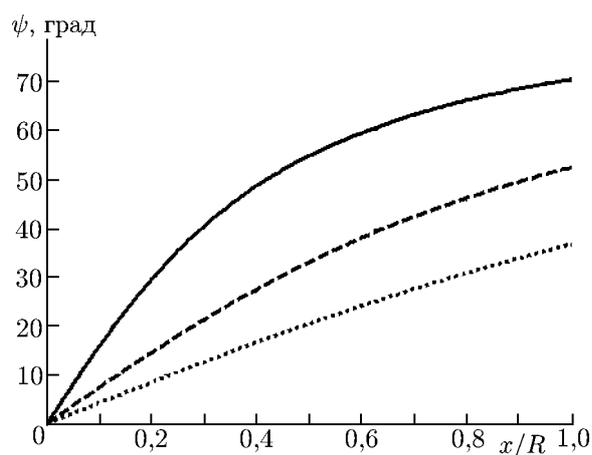


Рис. 2. Зависимость отклонения луча ψ от относительного смещения первичного антенного элемента x/R для полусферических линз с цилиндрическим продолжением из различных материалов: сплошная линия соответствует кремнию ($\varepsilon = 11,7$), штриховая — кварцу ($\varepsilon = 3,8$), пунктирная — фторопласту ($\varepsilon = 2,1$)

2. РАЗРАБОТКА МИКРОПОЛОСКОВОГО АНТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА

В качестве первичных антенных элементов в интегрированных линзовых антеннах, в общем случае, могут быть использованы диполи, монополи, щелевые антенны, различные микрополосковые антенны и т. д. Наиболее подходящими антенными элементами при этом являются те, которые обеспечивают минимальный уровень обратного лепестка диаграммы направленности. Известно, что в случае, когда антенный элемент располагается на границе диэлектрика, излучение «втягивается» в диэлектрик тем больше, чем выше его диэлектрическая проницаемость [15]. Отношение мощности излучения в диэлектрик к мощности излучения в свободное пространство в этом случае пропорционально $\varepsilon^{3/2}$. Этот эффект приводит к снижению уровней обратных лепестков диаграммы направленности для антенных элементов с диаграммами направленности, близкими к изотропным.

В данной работе в качестве первичного антенного элемента используется специальная микрополосковая антенна с возбуждением через щелевую апертуру, впервые предложенная в работе [16]. Микрополосковые антенны обладают хорошей совместимостью с различными интегральными схемами, что определяет их широкое распространение. Основными преимуществами микрополосковых антенн с возбуждением через щелевую апертуру являются широкая полоса пропускания и малый уровень обратного лепестка диаграммы направленности вследствие наличия металлизированного экрана с обратной стороны излучающего элемента. Подробное исследование микрополосковых антенн с возбуждением через щелевую апертуру в экранирующем слое

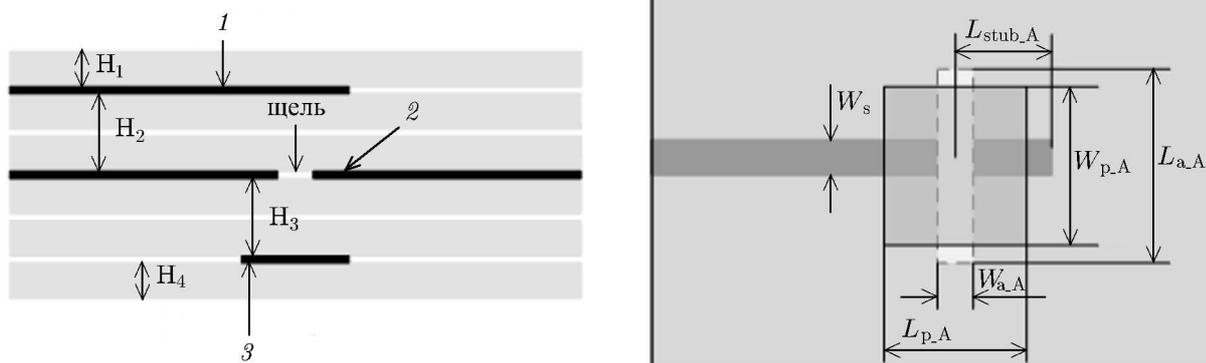


Рис. 3. Структура разработанного микрополоскового антенного элемента с возбуждением через щелевую апертуру. 1 — микрополосковая линия, 2 — экранирующий слой металлизации, 3 — излучающий элемент

металлизации проведено в работе [17].

Первоначальное моделирование микрополоскового антенного элемента для выбранных кремниевых линз проводилось в предположении, что антенный элемент размещён на поверхности бесконечного полупространства с заданной диэлектрической проницаемостью, в нашем случае равной диэлектрической проницаемости линзы $\epsilon = 11,7$. Такое приближение является общепринятым при разработке интегрированных линзовых антенн [18, 19]. Полное моделирование микрополоскового антенного элемента было выполнено с помощью программы “CST Microwave Studio”, реализующей метод конечных разностей во временной области — метод FDTD (Finite Difference Time Domain).

Для разработки и изготовления микрополоскового антенного элемента была выбрана технология LTCC (DuPont 943 Green TapeTM), позволяющая использовать несколько слоёв металлизации, разделённых керамической подложкой с толщиной 110 мкм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{LTCC} = 7,4$. Выбор данной технологии определяется тем, что значение диэлектрической проницаемости LTCC-подложки наиболее близко к диэлектрической проницаемости кремниевой линзы, что позволяет минимизировать возбуждение поверхностных волн в подложке. Последнее приводит к увеличению потерь в подложке и увеличению уровня нежелательного бокового излучения.

В структуре разработанной микрополосковой антенны с возбуждением через щелевую апертуру (см. рис. 3) используются три слоя металлизации из семи возможных. Ширина проводника микрополосковой линии передачи составляет 180 мкм при толщине металлизации 8 мкм, что обеспечивает характеристический импеданс линии 50 Ом. Излучающий элемент расположен с обратной стороны от микрополосковой линии по отношению к экранирующему слою металлизации и имеет размеры $L_{p_A} = 0,5$ мм и $W_{p_A} = 0,45$ мм. Щелевая апертура в экранирующем слое металлизации имеет размеры $L_{a_A} = 0,8$ мм и $W_{a_A} = 0,14$ мм. Согласующий шлейф микрополосковой линии имеет длину $L_{stub_A} = 0,35$ мм.

В результате проведённого с помощью “CST Microwave Studio” моделирования установлено, что полоса пропускания разработанного антенного элемента по уровню коэффициента отражения -10 дБ составляет 18,2 ГГц, или порядка 30 % от центральной частоты 60 ГГц. Следует отметить, что размещение антенного элемента на линзе определённой формы в общем случае слабо влияет на общую полосу пропускания линзовой антенны.

По результатам моделирования коэффициент направленного действия разработанного мик-

рополоскового антенного элемента при излучении в тело кремниевой линзы оказался равным 9,36 дБи, а эффективность излучения достигла 94,6%. В целом эффективность излучения интегрированной линзовой антенны определяется используемым первичным антенным элементом, величиной его смещения, а также параметрами линзы. Так, эффективность излучения линзовой антенны уменьшается при увеличении смещения первичного антенного элемента относительно оси линзы. Это объясняется появлением в некоторой зоне внутренней поверхности линзы условий для полного внутреннего отражения падающих лучей. При увеличении смещения первичного антенного элемента зона полного внутреннего отражения на внутренней поверхности линзы увеличивается, что приводит к искажению основного луча антенны, уменьшению коэффициента направленного действия и эффективности излучения.

Полученная по результатам моделирования оценка полуширины диаграммы направленности антенного элемента в теле линзы по уровню -3 дБ от максимального значения в сечениях по углу места $\varphi = 0^\circ$ и 90° составляет соответственно 41° и 34° . Это обуславливает неравномерную засветку внутренней поверхности линзы. Интенсивность излучения максимальна в направлении оси линзы и существенно спадает к её краям, что приводит к уменьшению коэффициента направленного действия линзовой антенны, но одновременно обеспечивает более низкий уровень боковых лепестков диаграммы направленности. Для оценки характеристик интегрированных линзовых антенн с учётом влияния антенного элемента было проведено полное моделирование излучения разработанных линзовых антенных систем.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН

Данный раздел посвящён моделированию излучения кремниевых полусферических линз с первичным микрополосковым антенным элементом при различных его смещениях относительно оси линзы. Моделирование проводилось с помощью “CST Microwave Studio” и учитывало физическую структуру ЛТСС-платы с микрополосковым антенным элементом.

На основании проведённого предварительного исследования характеристик интегрированных линзовых антенн для дальнейших разработок были выбраны полусферические кремниевые линзы со следующими геометрическими размерами: $R = 6$ мм, $L = 1,5$ мм и $R = 12$ мм, $L = 4$ мм. Характерное отношение длины цилиндрического продолжения к радиусу линзы при этом равно 0,25 для меньшей линзы (что близко к аналогичному отношению для гиперполусферической линзы, см. (3)) и 0,33 для большей линзы (что является промежуточным значением между этим отношением для гиперполусферы и сферической линзы, максимально приближенной к эллипсоидальной форме).

По результатам моделирования коэффициент направленного действия антенны с линзой с радиусом $R = 6$ мм составляет $D_0 = 17,6$ дБи, что совпадает с оценкой, полученной по приближённой формуле (4). Для антенны с линзой с радиусом $R = 12$ мм коэффициент направленного действия по результатам моделирования равен $D_0 = 23,1$ дБи, что незначительно (на 0,5 дБи) меньше, чем оценка по формуле (4).

Ширина луча линзовой антенны с радиусом $R = 6$ мм по результатам моделирования составляет $20,8^\circ$ и $24,7^\circ$ для сечений $\varphi = 0^\circ$ и 90° соответственно. Для линзы с радиусом $R = 12$ мм ширина луча для этих сечений равна $11,9^\circ$ и $12,1^\circ$. Полученные результаты хорошо согласуются с оценкой по формуле (5). Отличия в ширине луча в различных осевых сечениях объясняются несимметричностью диаграммы излучения антенного элемента внутри тела линзы и поляризационными эффектами, приводящими к зависимости коэффициента прохождения волны через границу линзы со свободным пространством от поляризации падающего излучения.

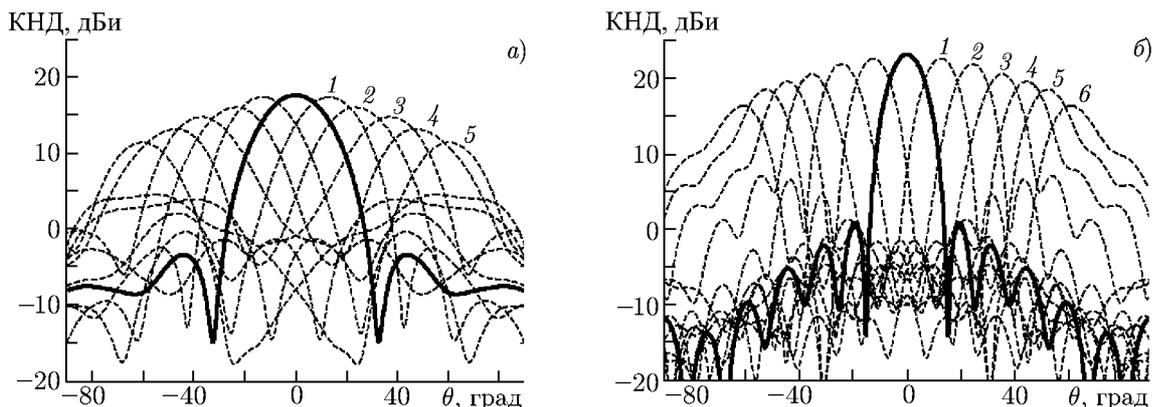


Рис. 4. Сечения диаграмм направленности в плоскости сканирования $\varphi = 90^\circ$ при различных смещениях первичного антенного элемента для кремниевых линз с радиусами $R = 6$ мм (а) и $R = 12$ мм (б), КНД — коэффициент направленного действия. Панель (а): кривая 1 отвечает $x = 0,5$ мм, 2 — $x = 1$ мм, 3 — $x = 1,5$ мм, 4 — $x = 2$ мм, 5 — $x = 2,5$ мм; панель (б): кривая 1 отвечает $x = 1$ мм, 2 — $x = 2$ мм, 3 — $x = 3$ мм, 4 — $x = 4$ мм, 5 — $x = 5$ мм, 6 — $x = 6$ мм

Нами было проведено моделирование рассматриваемых линзовых антенн со смещённым антенным элементом. Сечения диаграммы направленности в плоскости сканирования $\varphi = 90^\circ$ (плоскость yz на рис. 1) при различных величинах смещения антенных элементов для линз с радиусами $R = 6$ и 12 мм показаны на рис. 4а и б соответственно. Из приведённых диаграмм направленности видно, что коэффициент направленного действия линзовой антенны уменьшается при увеличении смещения. Также при этом происходит увеличение ширины главного луча и уровня боковых лепестков. Это налагает ограничение на общий диапазон углов сканирования интегрированных линзовых антенн. Из рис. 4 видно, что при допустимом уменьшении коэффициента направленного действия на 6 дБи относительно несмещённого луча диапазон углов сканирования для рассматриваемых линз составляет около $\pm 55^\circ$. Следует отметить, что приближённые значения угла отклонения луча, вычисленные по формуле (6), хорошо согласуются с результатами полного моделирования.

Таким образом, результаты полного моделирования показали, что линза с радиусом $R = 6$ мм при отклонении луча на 45° имеет коэффициент направленного действия около 13 дБи, что не позволяет удовлетворить требованиям, предъявляемым к антеннам систем радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц и определённым в [2]. В то же время данные требования удовлетворяются кремниевыми линзовыми антеннами с радиусом порядка $R = 12$ мм, т. к. при отклонении луча на 45° коэффициент направленного действия такой антенны составляет около 19 дБи.

Проведённый дополнительный анализ полученных результатов позволил устояновить, что радиус линзы, удовлетворяющей всем требованиям, предъявляемым к антеннам локальных систем связи миллиметрового диапазона длин волн (КНД > 16 дБи, угол сканирования $\pm 45^\circ$), должен составлять порядка $R = 9$ мм или более в зависимости от эффективности излучения линзовой антенны. Такой небольшой требуемый размер подтверждает возможность использования рассматриваемых линзовых антенн в различных устройствах локальных беспроводных систем связи на частоте около 60 ГГц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН

Для проведения экспериментального исследования интегрированных линзовых антенн были изготовлены полусферические линзы с цилиндрическим продолжением из кремния ($\epsilon = 11,7$) с геометрическими параметрами $R = 6$ мм, $L = 1,5$ мм и $R = 12$ мм, $L = 4$ мм. На рис. 5 представлена их фотография.

При экспериментальных исследованиях в качестве источника сигнала миллиметрового диапазона длин волн использовался генератор на диоде Ганна с частотой, перестраиваемой в диапазоне $55 \div 62$ ГГц, и волноводным выходным интерфейсом. Для передачи сигнала из волновода на микрополосковую линию был разработан специальный волноводно-микрополосковый переход, подробное описание которого приведено в работе [20]. Данный переход вместе с разработанным микрополосковым антенным элементом был изготовлен на одной ЛТСС-плате. При проведении эксперимента плата механически устанавливалась на плоскую поверхность линзы с заданным смещением относительно её оси. Смещение первичного антенного элемента x задавалось равным 0; 1 и 3 мм. Поворот линзовой антенны осуществлялся с помощью углового позиционера, закреплённого на фотоштативе. Для приёма и анализа сигналов использовался спектр-анализатор Agilent E4407B совместно с понижающим внешним смесителем Agilent 11970V. Таким образом проводились измерения диаграммы направленности интегрированных линзовых антенн в дальней зоне в различных сечениях.

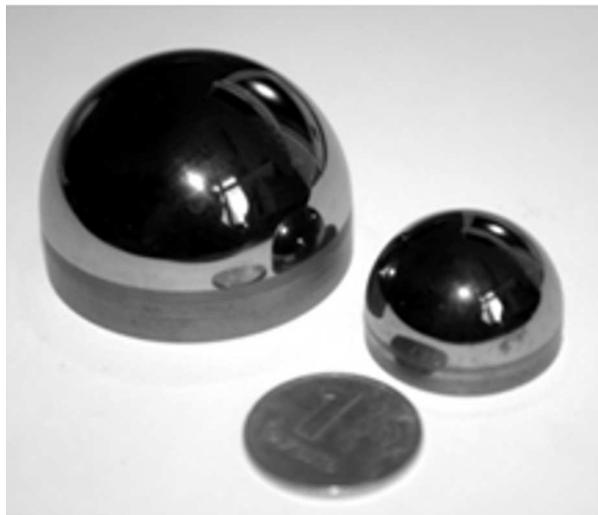


Рис. 5. Фотография изготовленных кремниевых линз

Экспериментально измеренные и полученные в результате моделирования сечения нормированных на максимум диаграммы направленности в плоскости сканирования $\varphi = 90^\circ$ при различных смещениях первичных антенных элементов для кремниевых линз с радиусами $R = 6$ и 12 мм представлены на рис. 6а и б соответственно. Следует отметить, что для линзы с радиусом $R = 6$ мм при смещении антенного элемента $x = 3$ мм диаграмма направленности имеет сильные искажения в главном луче, что обусловлено значительным отклонением луча, большим 60° . Поэтому результаты измерений для данного смещения на рис. 6а не приведены.

Из полученных результатов видно, что представленные экспериментально измеренные диаграммы направленности в области главного луча отличаются от результатов моделирования не более, чем на 0,5 дБ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведена разработка и исследованы характеристики интегрированных кремниевых линзовых антенн для локальных систем радиосвязи на частоте около 60 ГГц. Антенна состоит из полусферической линзы с цилиндрическим продолжением и микрополоскового антенного элемента, изготовленного на ЛТСС-плате, и помещённого на плоскую поверхность линзы. Расчёт интегрированных линзовых антенн выполнялся в два этапа. На первом этапе первоначаль-

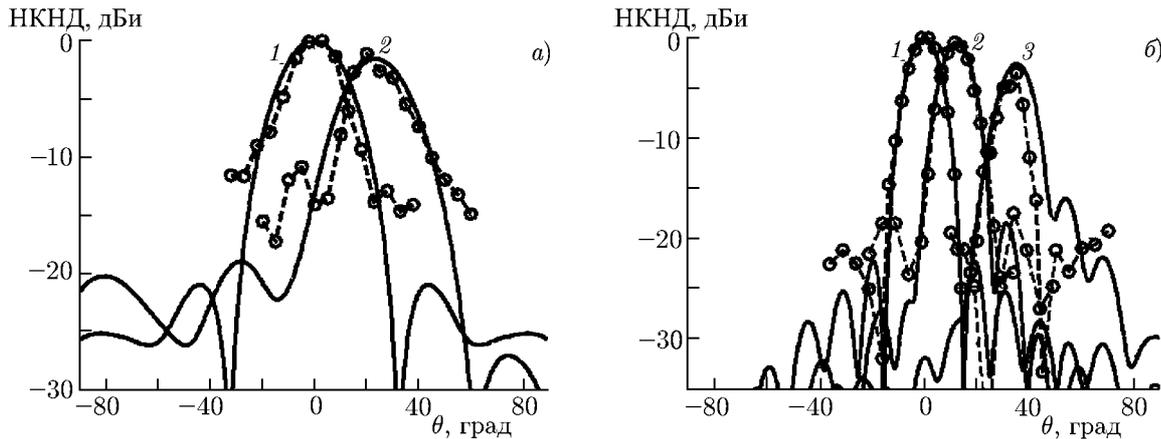


Рис. 6. Экспериментально измеренные и полученные в результате моделирования сечения нормированных диаграмм направленности (НДН) в плоскости сканирования $\varphi = 90^\circ$ при различных смещениях первичного антенного элемента для кремниевых линз с радиусами $R = 6$ мм (а) и $R = 12$ мм (б). Панель (а): кривая 1 отвечает $x = 0$ мм, 2 — $x = 1$ мм; панель (б): кривая 1 отвечает $x = 0$ мм, 2 — $x = 1$ мм, 3 — $x = 3$ мм

чальный выбор параметров и оценка основных характеристик линзы были выполнены с помощью простых приближённых выражений. В дальнейшем было проведено полное моделирование излучения линзовых антенн с учётом физической структуры первичного антенного элемента.

Для экспериментального исследования разработанных антенн были изготовлены кремниевые полусферические линзы с радиусами 6 и 12 мм и цилиндрическим продолжением. Результаты моделирования и экспериментального исследования показали, что разработанные антенны имеют коэффициент направленного действия, равный 17,6 и 23,1 дБи для меньшей и большей линз соответственно. При этом достигается максимальный угол отклонения луча, равный 55° при допустимом уменьшении коэффициента направленного действия не более, чем на 6 дБи.

Высокий коэффициент направленного действия, способность к электронному сканированию, небольшие размеры, дешевизна и простота изготовления позволяют рекомендовать интегрированные линзовые антенны для применения в будущих высокоскоростных локальных системах радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE P802.11a/D9.0. Draft standard for information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. Amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band. IEEE 802.11 Committee, 2012.
2. Maltsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A., et al. // IEEE J. Selected Areas Commun. 2009. V. 27, No. 8. P. 1488.
3. Пат. № 7683844 США, МКИ H01Q 19/06. mmWave scanning antenna / Alamouti S., Maltsev A., Chistyakov N., Artemenko A. Заявл. 16.05.2007; Опубл. 23.03.2010; НКИ 343/700.
4. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1993. V. 41. P. 1738.
5. Pasqualini D., Maci S. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2004. V. 52, No. 3. P. 840.
6. Buttgenbach T. H. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1991. V. 41. P. 1750.

7. Costa J. R., Lima E. B., Fernandes C. A. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2009. V. 57, No. 10. P. 2926.
8. Ala-Laurinaho J., Karttunen A., Saily J, et al. // Proc. 4th IEEE European Conf. Antennas Propagat. Barcelona, 2010. P. 1.
9. Godi G., Sauleau R., Thouroude D. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2005. V. 53, No. 4. P. 1278.
10. Filipovic D. F., Gauthier G. P., Raman S., Rebeiz G. M. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1997. V. 45, No. 5. P. 760.
11. Dou W. B., Sun Z. L. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1995. V. 16, No. 1L. P. 1993.
12. Nguyen N. T., Sauleau R., Pérez C. J. M. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2009. V. 57, No. 7. P. 1907.
13. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
14. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарёв Л. И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
15. Kominami M., Pozar D. M., Schaubert D. H. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1985. V. 33, No. 6. P. 600.
16. Pow D. U. // Electron. Lett. 1985. V. 21. P. 49.
17. Pozar D. M. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1986. V. 34, No. 12. P. 1439.
18. Eleftheriades G. V., Rebeiz G. M. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1993. V. 14, No. 10. P. 1925.
19. Otero P., Eleftheriades G. V., Mosig J. R. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1998. V. 46. P. 1489.
20. Артеменко А. А., Масленников Р. О., Севастьянов А. Г., Ссорин В. Н. // 19 Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», сентябрь 2009. С. 505.

Поступила в редакцию 2 апреля 2012 г.; принята в печать 30 августа 2012 г.

INVESTIGATION OF SILICON INTEGRATED LENS ANTENNAS FOR 60 GHz WLAN COMMUNICATION SYSTEMS

A. A. Artemenko, A. A. Maltsev, R. O. Maslennikov, A. G. Sevastyanov, and V. N. Ssorin

Design of integrated lens antennas for 60 GHz wireless LAN communication systems is considered. Integrated lens antenna consists of silicon extended hemispherical lens and microstrip antenna element integrated on the back plane surface of the lens. Utilization of silicon as a lens material provides maximum scanning angle range and simultaneously minimum lens axial dimension. Approximate analytical expressions that allow performing estimation of the main integrated lens antenna characteristics are used for initial calculation of the lens parameters. For further joint optimization of the lens parameters and the antenna element full 3D electromagnetic simulations are performed. Based on the simulation results silicon extended hemispherical lenses with 6 and 12 mm radiuses were fabricated. Planar microstrip antenna element was designed and fabricated using LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) technology. Simulation and experimental results of the prototypes show that designed integrated lens antennas provide boresight directivity equal to 17.6 and 23.1 dBi for 6 and 12 mm radius lenses respectively. Herewith it is achieved maximum scanning angle of 55° for 6 dB degradation of the deviated beam directivity. The results prove that designed integrated lens antennas can be used in high throughput millimeter wave wireless communication systems.