

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД ИЗ ВЫСОКООМНОГО КРЕМНИЯ
И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА НА ЕГО ОСНОВЕ© 2023 г. М. П. Пархоменко^а *, Д. С. Калёнов^а, И. С. Еремин^а, Н. А. Федосеев^а^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: pamikle@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

После доработки 22.09.2022 г.

Принята к публикации 25.09.2022 г.

На основе диэлектрического волновода из высокоомного кремния разработаны оптически и механически управляемые аттенуаторы и электрически управляемый фазовращатель. В полосе частот 26...37 ГГц теоретически и экспериментально определены характеристики волновода и разработанных элементов на его основе.

DOI: 10.31857/S0033849423020110, EDN: LCSTFO

При разработке и создании устройств, приборов, а также построенных на их основе радиоизмерительных систем микроволнового и миллиметрового диапазонов используются диэлектрический волновод (ДВ) и элементная база на его основе [1–4]. В настоящее время в связи с появлением мощных вычислительных программ расширяются возможности ДВ. Например, его можно использовать при создании методик контроля степени однородности электромагнитных параметров материалов.

В представленной работе ДВ миллиметрового диапазона выполнен из высокоомного кремния. Этот полупроводниковый материал примечателен тем, что имеет низкий тангенс угла потерь, а на электрофизические параметры можно воздействовать электрическим полем и светом. Все это позволяет создать линию передачи с малыми погонными потерями и эффективной элементной базой. Диэлектрический волновод из высокоомного кремния и его элементная база частично исследовались ранее [5–8]. Однако использование современного экспериментального оборудования и электродинамических вычислительных программ позволяет провести эти исследования более детально.

Волноводная секция ДВ показана на рис. 1, где кремниевый ДВ 1 с поперечными размерами $a = 1.4$, $b = 2.8$ мм размещается на подложке из пористого фторопласта 2 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1.4$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon = 5 \times 10^{-4}$). Для ввода и вывода мощности используются возбуждители 3, состоящие из участка ДВ, сошлифованного под острым углом и

вставленного в прямоугольный металлический волновод 4 сечением 7.11×3.56 мм. На рисунке также показано поперечное сечение ДВ, на котором указаны его поперечные размеры, система координат, а также вектор напряженности \vec{E} электрического поля для волны E_{11}^y .

В ДВ существует две волны низшего типа – E_{11}^y и E_{11}^x , которые не имеют частот отсечки снизу. Как показано ранее [3], для волновода формата $a/b < 1$ в качестве рабочей моды используется волна E_{11}^y , у которой вектор \vec{E} направлен вдоль оси y .

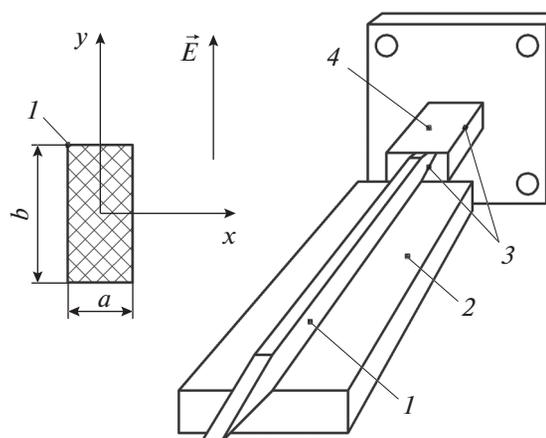


Рис. 1. Волноводная секция диэлектрического волновода: 1 – кремниевый ДВ, 2 – подложка, 3 – возбуждатель, 4 – металлический волновод.

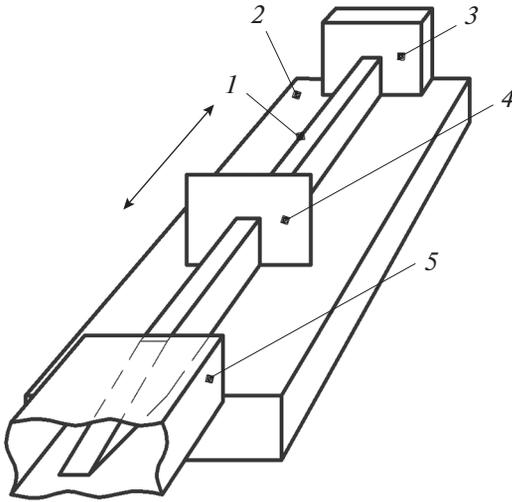


Рис. 2. Измерительная секция для определения длины волны в диэлектрическом волноводе: 1 – ДВ, 2 – подложка из пористого фторопласта, 3 – металлический отражатель, 4 – подвижной металлический экран с вырезом под сечение ДВ, 5 – волновод возбуждителя.

Эта волна по сравнению с E_{11}^x имеет меньшие погонные потери и лучшую поляризационную устойчивость.

1. ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Экспериментально дисперсионные зависимости, т.е. зависимости длины волны от частоты, в ДВ определялись с помощью разработанной нами методики [8]. Измерительная секция показана на рис. 2, где 1 – это ДВ, 2 – подложка из пористого фторопласта, 3 – металлический отражатель, 4 – подвижной металлический экран с вырезом под сечение ДВ. Волновод возбуждителя 5 связан через измерительную секцию с анализатором цепей. На экране анализатора цепей наблюдалась интерференционная картина двух волн, одна из которых отражалась от неподвижного отражателя 3, другая – от подвижного 4. С помощью частотной метки измерителя фиксировался минимум сигнала на измеряемой частоте f . При перемещении неоднородности в сторону отражателя интерференционная картина смещалась относительно частотной метки, т.е. на месте минимума появлялся максимум, затем опять минимум и т.д. Подсчитывая число минимумов p при перемещении неоднородности на расстояние l и используя соотношение $l = p \frac{\Lambda}{2}$, определяли длину волны Λ в диэлектрическом волноводе на заданной частоте f .

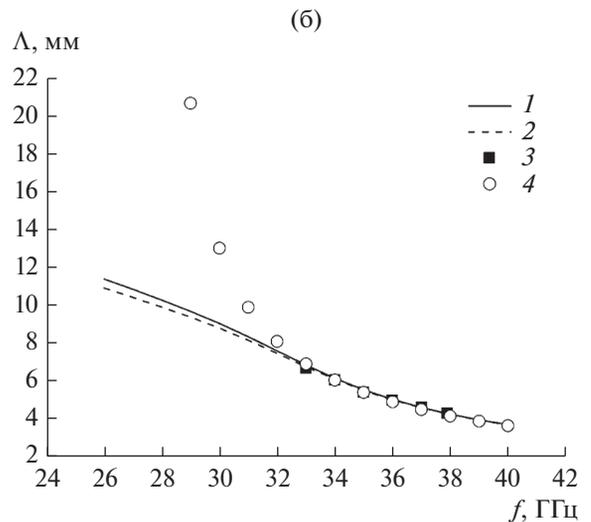
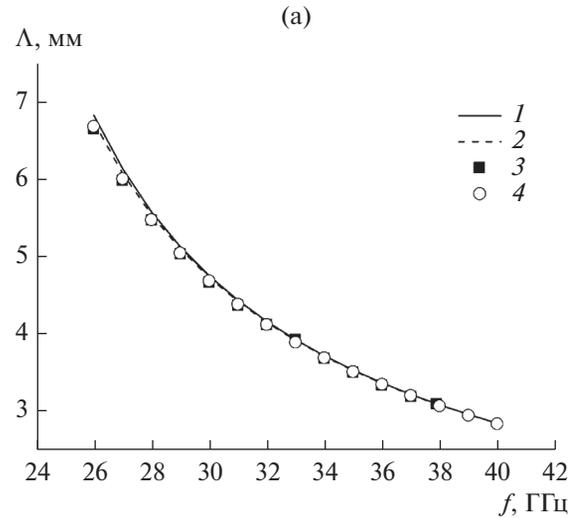


Рис. 3. Зависимости длины волны Λ от частоты f для моды E_{11}^y (а) и E_{11}^x (б): 1 – трехмерное электродинамическое моделирование без подложки, 2 – трехмерное электродинамическое моделирование с подложкой, 3 – эксперимент, 4 – приближенный метод Маркатили.

Экспериментальные дисперсионные зависимости для мод E_{11}^y и E_{11}^x показаны на рис. 3а и 3б.

Расчет дисперсионных зависимостей проводился с помощью приближенного метода Маркатили [8, 9] и электродинамического моделирования методом конечных элементов.

Результаты расчетов дисперсионных зависимостей методом Маркатили показаны на рис. 3а и 3б. Как видно из графиков, для волны E_{11}^y результаты расчетов совпадают с экспериментом, а для волны E_{11}^x заметное расхождение результатов обнаруживается на частотах ниже 32 ГГц. На этих же рисунках приводятся результаты расчетов, выполненных с помощью программного трехмерно-

го моделирования. Заметим, что влияние подложки из пористого фторопласта незначительно сказывается лишь в области низких частот. В этом случае наблюдается полное совпадение теории с экспериментом как для E_{11}^x , так и для E_{11}^y .

Определим погонные потери как потери α на единицу длины ДВ. Вначале представим экспериментальные данные этих потерь в ДВ из кремния на низших модах E_{11}^x и E_{11}^y . Измерения проводились следующим образом: вначале измеряли общие потери волноводной секции, показанной на рис. 1 (с двумя возбудителями). Они включали в себя потери на возбуждение и собственные потери в волноводе. Затем в разрыв волноводной секции вставляли дополнительный ДВ длиной 26 мм из кремния, и опять измеряли общие потери. Вычитая из второго значения измеренных общих потерь первое и деля полученную разность на длину дополнительного волновода, мы находили искомые погонные потери α . Экспериментальные зависимости погонных потерь от частоты для ДВ из кремния на модах E_{11}^x и E_{11}^y приведены в табл. 1 и показаны на рис. 4.

Для волны E_{11}^y в полосе частот 29...37 ГГц погонные потери составляют 0.09...0.12 дБ/см, а на более низких частотах они возрастают до 0.14 дБ/см.

На волне E_{11}^x эти потери существенно выше, и в диапазоне частот 30...37 ГГц они находятся в пределах 0.26...0.28 дБ/см. Проведенные расчеты для моды E_{11}^y показаны на рис. 5 (кривая 2). Расчет проводился следующим образом. Для каждой экспериментальной точки с помощью трехмерного электродинамического моделирования на-

Таблица 1. Экспериментальные значения погонных потерь α от частоты f для ДВ из кремния на E_{11}^x и E_{11}^y

f , ГГц	α , дБ/см	
	E_{11}^x	E_{11}^y
26	—	0.14
27	—	0.14
28	—	0.135
29	—	0.12
30	0.27	0.115
31	0.26	0.11
32	0.27	0.105
33	0.275	0.1
34	0.265	0.1
35	0.28	0.095
36	0.275	0.09
37	0.27	0.09

ходили значения тангенса угла потерь кремния, которые затем использовали при определении погонных потерь α . В этом случае наблюдается достаточно хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

2. ВОЗБУДИТЕЛЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Возбудители – это устройства, которые осуществляют в линиях передачи как ввод, так и вывод мощности. Представленный здесь возбудитель

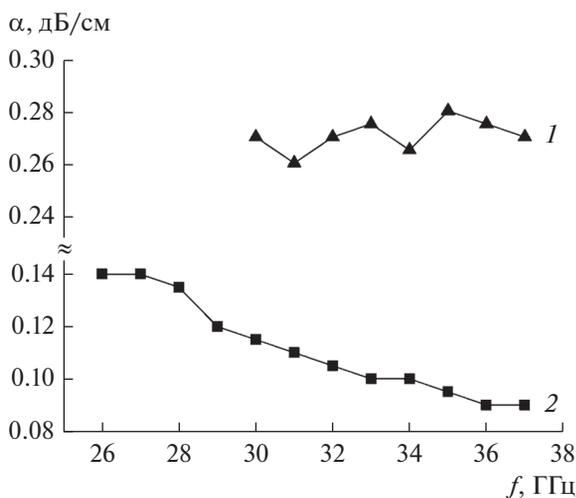


Рис. 4. Зависимости погонных потерь α от частоты f в диэлектрическом волноводе из кремния для E_{11}^x (кривая 1) и E_{11}^y (кривая 2).

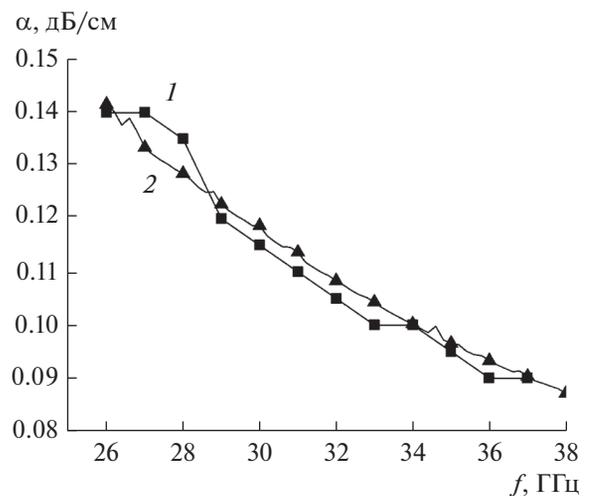


Рис. 5. Зависимость погонных потерь α от частоты f в диэлектрическом волноводе для E_{11}^y : 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Таблица 2. Экспериментальные зависимости потерь L возбудителя от частоты f в ДВ из кремния для E_{11}^x и E_{11}^y

f , ГГц	L , дБ	
	E_{11}^x	E_{11}^y
26	—	0.6
27	—	0.55
28	—	0.49
29	—	0.38
30	4.3	0.33
31	3.3	0.38
32	1.9	0.39
33	1.5	0.35
34	1.4	0.35
35	0.85	0.36
36	1.1	0.35
37	0.82	0.36

обеспечивает преобразование волны H_{10} металлического волновода в рабочую волну диэлектрического волновода. Принцип построения возбудителей заключается в следующем. Путем изменения размеров как металлического, так и диэлектрического волновода (либо одного из них) требуется получить распределение поля (амплитудное и фазовое), близкое к распределению поля рабочей моды в ДВ. В этом случае потери мощности на излучение и отражение будут минимальными, а эффективность возбуждения, определяемая как отношение мощностей возбужденной и возбуждающей волн, будет максимальной. Выполненный

строгий электродинамический расчет для возбудителя, представленного на рис. 1 (скошенный ДВ вставлен в металлический волновод), показал, что для волны E_{11}^y наилучшие результаты обеспечивает возбудитель с симметричным углом скоса 9° в плоскости E металлического волновода (т.е. изменяется размер b диэлектрического волновода, а размер a остается постоянным). Результаты эксперимента представлены в табл. 2 и достаточно хорошо согласуются с расчетами, выполненными с помощью трехмерного электродинамического моделирования. Для волны E_{11}^y в полосе частот 30...37.5 ГГц потери на возбуждение не превышают 0.4 дБ, при уменьшении частоты до 26 ГГц потери возрастают до 0.6 дБ (рис. 6). На волне E_{11}^x минимальные потери составляют 0.8 дБ на частоте 37 ГГц и возрастают до 4.3 дБ на частоте 30 ГГц. Увеличение потерь мощности на волне E_{11}^x объясняется тем, что при уменьшении частоты поля сильнее выходят за границы ДВ и металлический волновод рассеивает мощность на этих частотах.

Данные табл. 2 показывают, что потери на возбуждение для волны E_{11}^y в полосе частот 29...37 ГГц находятся в пределах 0.33...0.39 дБ и возрастают до 0.61 дБ на частоте 26 ГГц. Для волны E_{11}^x они составляют 0.82 дБ на частоте 37 ГГц и возрастают до 4.3 дБ на частоте 30 ГГц. Увеличение потерь на возбуждение для волны E_{11}^x объясняется тем, что при уменьшении частоты поля сильнее рассеиваются металлическим волноводом.

3. ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ АТТЕНЮАТОР

Прежде чем обратиться непосредственно к конструкции и параметрам оптически управляемому аттенюатору, рассмотрим кратко физические идеи, которые используются при его разработке. В основе его работы лежит явление внутреннего фотоэффекта. Ширина запрещенной зоны собственного кремния равна $\Delta\varepsilon = 1.1 \text{ эВ} = 1.8 \times 10^{-19} \text{ Дж}$, т.е. красная граница фотоэффекта составляет 1.1 мкм. При освещении ДВ из кремния светом с длиной волны меньше красной границы фотоэффекта в волноводе образуются свободные электроны, с которыми может взаимодействовать волна диэлектрического волновода. Например, для ИК-света с длиной волны $\lambda = 0.95 \text{ мкм} = 0.95 \times 10^{-6} \text{ м}$ энергия кванта равна

$$\begin{aligned} \frac{hc}{\lambda} &= 6.62 \times 10^{-34} \frac{3 \times 10^8}{0.95 \times 10^{-6}} = \\ &= \frac{6.62 \times 3}{0.95} \times 10^{-20} \text{ Дж} = 2.1 \times 10^{-19} \text{ Дж}, \end{aligned}$$

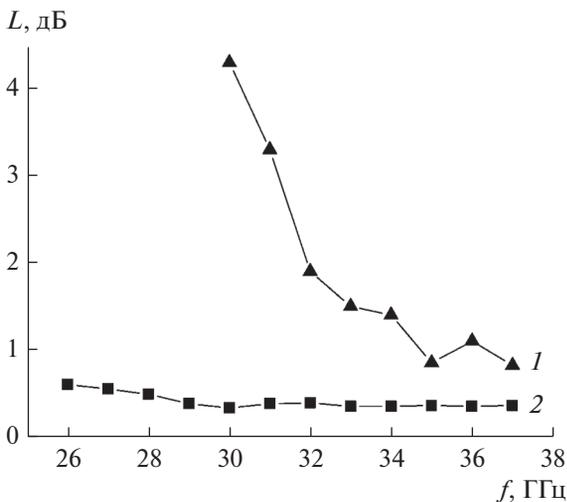


Рис. 6. Зависимость потерь L возбудителя от частоты f в ДВ из кремния для E_{11}^x (кривая 1) и E_{11}^y (кривая 2).

т.е. превышает ширину запрещенной зоны $\Delta\epsilon$ кремния, и фотоэффект имеет место.

В основе конструкции оптически управляемого аттенюатора лежит волноводная секция, показанная на рис. 1. Управление затуханием проходящей по кремниевому волноводу электромагнитной волны осуществляется с помощью линейки светодиодов 3Л119, которая размещается на расстоянии 3 мм от верхнего края кремниевых волновода. При пропускании тока через светодиоды происходит генерация ИК-излучения с длиной волны $\lambda = 0.95$ мкм, которое падает на кремниевый волновод. При освещении высокоомного кремния ИК-светом на его поверхности образуются неравновесные электроны. Электромагнитная волна, распространяющаяся по кремниевому волноводу, взаимодействует с этими свободными электронами, передает им часть своей энергии и затухает. Причем затухание электромагнитной волны определяется концентрацией свободных электронов, которая зависит от мощности ИК-излучения. В свою очередь мощность излучения зависит от тока светодиодов, т.е. все в конечном счете определяется величиной тока светодиодов. Эту картину можно описать несколько иначе. При освещении высокоомного кремния ИК-излучением его поверхностное сопротивление резко уменьшается, что и вызывает затухание распространяющейся в нем электромагнитной волны. В эксперименте ток, проходящий через светодиоды, изменялся от 0 до 300 мА.

Измерение характеристик аттенюатора производилось с помощью анализатора цепей в полосе частот 26...37.5 ГГц. Рабочей волной аттенюатора являлась мода E_{11}^y . Зависимости затухания мощности L от тока светодиодов I регистрировали на разных частотах. На рис. 7 представлены графики этих зависимостей на частотах 28 и 36 ГГц.

При токе светодиода, равном нулю, начальные потери составляют 0.6 дБ. При максимально допустимом токе светодиодов, равном 300 мА, затухание составляет 23.5 дБ на частоте 28 ГГц и 21.3 дБ на частоте 36 ГГц. Таким образом, диапазон изменения затухания превосходит уровень 20 дБ, что и требуется для большинства устройств. Отметим, что затухание можно существенно увеличить, включив дополнительные светодиоды.

И еще обратим внимание на тот факт, что при одном и том же токе светодиодов затухание на частоте 36 ГГц меньше, чем на частоте 28 ГГц, т.е. при увеличении частоты затухание уменьшается. Объяснение этого явления относительно несложно, если вспомнить, что при увеличении частоты мощность более концентрируется в середине диэлектрического волновода и величина поля на его поверхности уменьшается. А так как проводимость при освещении меняется главным образом на поверхности (а не в глубине) волновода, по-

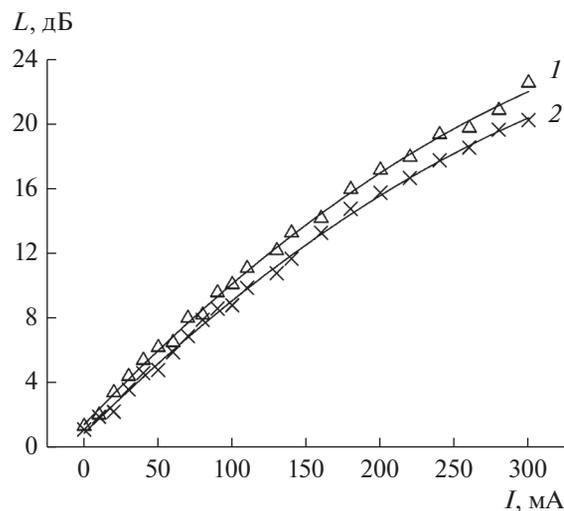


Рис. 7. Зависимости затухания мощности L от тока светодиодов I на частоте 28 (треугольники) и 36 ГГц (крестики); сплошные кривые 1 и 2 — аппроксимация.

этому и затухание будет слабей на более высоких частотах.

4. МЕХАНИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ АТТЕНЮАТОР

В диэлектрическом волноводе часть энергии распространяется за пределами волноводущей полоски. Введение в эту область поглощающего материала обеспечивает затухание электромагнитной волны, которое зависит от расстояния между волноводущей полоской и поглощающей пластиной. В практически реализованном аттенюаторе поглощающая структура состояла из платинированной слюдяной пластины, наклеенной на ферроэпоксид. В табл. 3 приведены результаты эксперимента, т.е. зависимости затухания от расстояния между волноводущей полоской и поглотителем на частотах 28 и 36 ГГц.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ ФЕРРИТОВЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

При создании электрически управляемого фазовращателя используется тот факт, что для волновода формата $a/b = 0.5$ постоянные распространения волн низшего типа разнесены настолько, что при продольном намагничивании феррита отсутствует преобразование одной волны в другую (устраняется эффект Фарадея). В практически реализованном фазовращателе в разрыв кремниевых волновода вставлялась такая же по поперечным размерам полоска из никель-цинкового феррита марки 1СЧ-4. Соленоид длиной 20 мм и диаметром 12 мм содержал 150 витков медного провода. Зависимость фазового сдвига от тока намагничи-

Таблица 3. Экспериментальные зависимости затухания L механически управляемого аттенюатора от расстояния между диэлектрическим волноводом и поглотителем на частотах 28 и 36 ГГц

Обороты микровинта	L_{28} , дБ	L_{36} , дБ
0	25.7	16.1
0.25	22.8	14.1
0.5	16.7	9.5
0.75	12.1	5.8
1	9.8	4.5
1.25	7.4	3.1
1.5	5.9	2.4
1.75	4.5	1.9
2	4.0	1.65
2.25	3.2	1.55
2.5	2.7	1.35
2.75	2.35	1.3
3	2.1	1.3
4	1.6	1.2
5	1.4	1.2
6	1.3	1.2

Таблица 4. Зависимость фазового сдвига φ от тока намагничивания I для частот 28 и 36 ГГц

φ , град	I_{28} , А	I_{36} , А
90	0.39	0.30
180	0.62	0.49
270	0.81	0.63
360	1.33	0.85
450	2.60	1.24

вания приведена в табл. 4. Фазовый сдвиг 180 град достигался при токе, проходящем через соленоид, 0.62 А на частоте 28 ГГц и 0.49 А на частоте 36 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты.

1. С помощью разработанной волноводной секции в диапазоне частот 26...37 ГГц произведе-

ны экспериментальные исследования дисперсионных зависимостей и погонных потерь кремниевого волновода. Погонные потери для волны E_{11}^y существенно меньше, чем для E_{11}^x , и она выбрана в качестве рабочей моды.

2. В полосе частот 28...36 ГГц разработана элементная база, которая включает в себя возбудитель с максимальными потерями на возбуждение 0.5 дБ, оптически управляемый аттенюатор с вносимым затуханием от 1 до 22 дБ, механически управляемый аттенюатор с вносимым затуханием от 1.2 до 25 дБ, электрически управляемый фазовращатель, обеспечивающий фазовый сдвиг от 0 до 360 град.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marcuse D. Theory of Dielectric Optical Waveguides. N.Y.: Academic Press, 1974.
2. Wolff I., Solbach K. Dielektrische Bildleitungen. Aachen: Verlag H. Wolff, 1982.
3. Knox R.M. // IEEE Trans. 1976. V. MTT-24. № 11. P. 806.
4. Вершинина Л.Н., Мериакри В.В. // РЭ. 1980. Т. 25. № 7. С. 1348.
5. Jacobs H., Chrepta M.M. // Proc. IEEE-G-MTT Int. Microwave Symp. Boulder 4–6 Jun. 1973. N.Y.: IEEE, 1973. P. 28.
6. Усанов Д.А., Вагарин А.Ю., Ушаткин Е.Ф. // Электрон. техника, сер. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 9. С. 56.
7. Мериакри В.В., Пархоменко М.П. // Электромагнитные волны и электрон. системы. 1996. Т. 1. № 1. С. 88.
8. Мериакри В.В., Пархоменко М.П., Дудоров С.Н. // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи совр. радиоэлектроники. 1999. № 9. С. 28.
9. Marcatiliy E.A.J. // BSTJ. 1969. V. 48. № 7. P. 2071.