

УДК 621.3.029.6

## **Исследование управляемого сверхвысокочастотного жидкокристаллического фазовращателя**

**А.М. Сержантов, К.В. Лемберг\***

*Сибирский федеральный университет,  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79<sup>1</sup>*

Received 5.04.2011, received in revised form 12.04.2011, accepted 19.04.2011

---

*Теоретически и экспериментально исследована конструкция микрополоскового электрически управляемого жидкокристаллического фазовращателя на основе структуры фотонного кристалла. Получено аналитическое выражение, связывающее основные параметры устройства: величину управляемого сдвига фазы, относительную ширину полосы пропускания, анизотропию диэлектрической проницаемости используемого жидкого кристалла и количество резонаторов. Показано хорошее согласие рассчитанных характеристик с результатами численного анализа конструкции в квазистатическом приближении. Приведены данные экспериментального исследования девятирезонаторного фазовращателя на нерегулярной микрополосковой структуре, в которой активный слой нематического жидкого кристалла расположен между экраном и подложкой из кварца. Показана перспективность использования разработанного устройства в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.*

*Ключевые слова: фазовращатель, жидкий кристалл, микрополосковый фильтр, резонансная структура, фотонный кристалл.*

---

### **Введение**

Перестраиваемые фазовращатели являются важнейшими элементами фазированных антенных решеток радиолокационных станций, они используются также в современных системах связи, в различной измерительной и специальной радиоаппаратуре. Ранее была предложена [1] и позже исследована [2] резонансная конструкция микрополоскового электрически управляемого жидкокристаллического фазовращателя. Фактически такой фазовращатель представляет собой микрополосковый фильтр, в котором в качестве подложки используется жидкий кристалл (ЖК). Благодаря наличию анизотропии диэлектрической проницаемости у ЖК в такой конструкции появляется возможность управления фазой электромагнитных СВЧ-колебаний путем изменения напряжения, прикладываемого между микрополосковыми проводниками и экраном. При этом размеры резонансной конструкции получаются существенно меньшими, чем у фазовращателя с той же величиной управляемого фазового сдвига, но выполненного в виде микрополосковой линии передачи, заполненной ЖК. Фазовращатель резонансной кон-

---

\* Corresponding author E-mail address: konstl@rambler.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

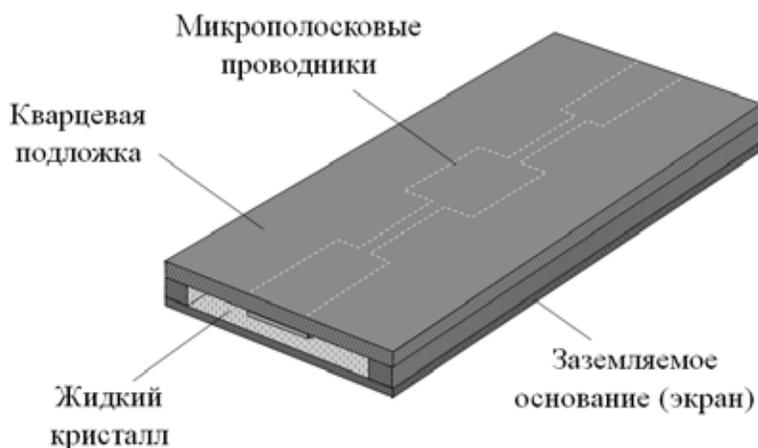


Рис. 1. Конструкция и топология проводников пятирезонаторного фазовращателя

струкции может иметь центральную частоту полосы пропускания от единиц до десятков и теоретически до сотен гигагерц, так как анизотропия ЖК сохраняется и в оптическом диапазоне частот. На рис. 1 показана конструкция фазовращателя, состоящего из пяти резонаторов.

Подложкой фазовращателя служит жидкий кристалл, который удерживается силами поверхностного натяжения между верхним нерегулярным проводником и нижним – экраном. Таковую конструкцию несложно реализовать, изготовив, например, нерегулярный полосковый проводник на подложке из кварца. Вход и выход фазовращателя подключаются к внешним линиям передачи с волновым сопротивлением 50 Ом.

### Результаты теоретических исследований

Как показали проведенные ранее исследования [2], в резонансной конструкции фазовращателя величина управляемого фазового сдвига зависит, в первую очередь, от следующих параметров: относительной ширины полосы пропускания устройства, количества резонаторов в нем и анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК. Однако, полученные результаты носили качественный характер, а систематических исследований резонансной конструкции не проводилось. В связи с этим важным является получение аналитической зависимости величины управляемого фазового сдвига резонансного фазовращателя от его основных конструктивных и электрических параметров.

Введем следующие обозначения: величина управляемого фазового сдвига –  $\Delta\varphi$ , количество резонаторов в фазовращателе –  $n$ , ширина полосы рабочих частот фазовращателя –  $\delta f$ , ширина полосы пропускания устройства –  $\Delta f$ , значения продольной и поперечной компонент действительной части диэлектрической проницаемости ЖК –  $\varepsilon_{\parallel}$  и  $\varepsilon_{\perp}$ , анизотропия диэлектрической проницаемости –  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ , среднее значение диэлектрической проницаемости ЖК –  $\varepsilon = (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})/2$ .

Получим выражение, связывающее относительную ширину полосы пропускания фильтра  $\Delta f/f_0$  с относительной шириной полосы рабочих частот устройства  $\delta f/f_0$ . Предположим, что при среднем значении диэлектрической проницаемости ЖК устройство имеет центральную

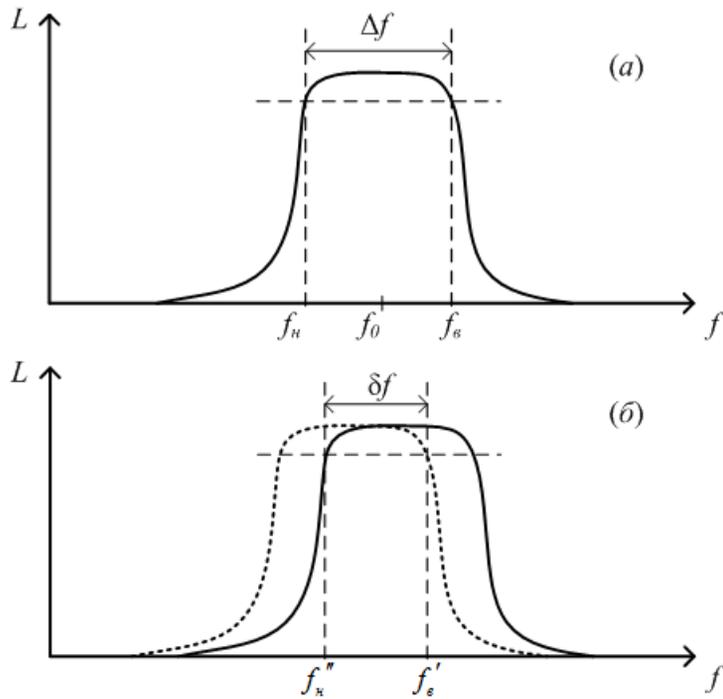


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика устройства при среднем значении диэлектрической проницаемости ЖК (а) и предельных значениях  $\epsilon$  (б)

частоту полосы пропускания  $f_0$  и абсолютную ширину полосы пропускания  $\Delta f$  по уровню -3 дБ (рис. 2а). Тогда при изменении диэлектрической проницаемости ЖК под действием управляющего поля, будет происходить сдвиг полосы пропускания на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), однако при этом существует область рабочих частот устройства  $\delta f$ , в пределах которой прямые потери прошедшего сигнала остаются минимальными и почти постоянными, в то время как фаза прошедшего сигнала существенно изменяется (рис. 2б).

Пусть под действием управляющего поля диэлектрическая проницаемость ЖК приняла максимально возможное значение  $\epsilon_{\parallel} = \epsilon + \frac{\Delta\epsilon}{2}$ , тогда центральная частота полосы пропускания

станет равной  $f_0' = f_0 \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\epsilon_{\parallel}}}$ , а верхняя и нижняя частоты полосы пропускания  $f_e'$  и  $f_n'$ , соот-

ветственно. В отсутствие управляющего поля диэлектрическая проницаемость ЖК уменьша-

ется до  $\epsilon_{\perp} = \epsilon - \frac{\Delta\epsilon}{2}$ . При этом центральная частота становится равной  $f_0'' = f_0 \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\epsilon_{\perp}}}$ , а верхняя

и нижняя граничные частоты  $f_e''$  и  $f_n''$  соответственно (рис. 2б). Следует отметить, что при перестройке из-за изменения коэффициентов связи между резонаторами меняется и ширина полосы пропускания устройства, однако это изменение мало (несколько процентов), и им в первом приближении можно пренебречь.

Запишем выражение для ширины полосы рабочих частот фазовращателя:

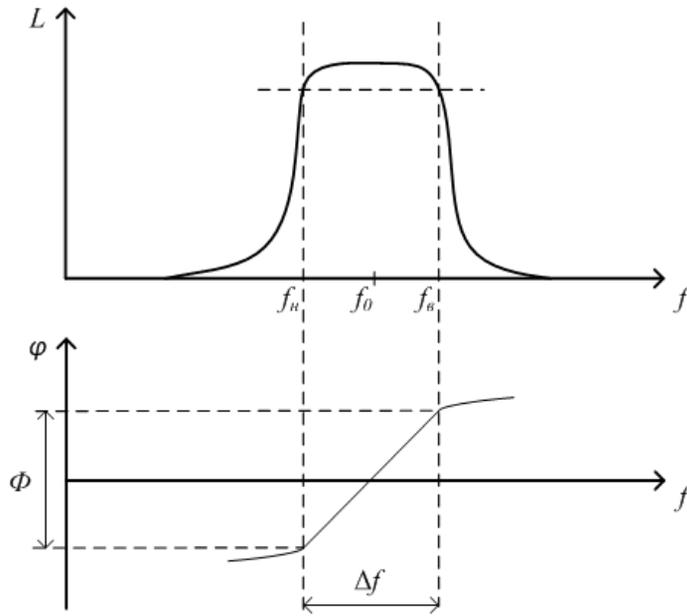


Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики полосового фильтра

$$\delta f = f_n' - f_n'' = \left( f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) - \left( f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) = f_0' - f_0'' + \Delta f \quad (1)$$

Подставляя выражения для  $f_0'$  и  $f_0''$ , получим:

$$\delta f = f_0 \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} - f_0 \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} + \Delta f. \quad (2)$$

Разделив на  $f_0$ , перейдем к относительным величинам:

$$\delta f / f_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} + \Delta f / f_0. \quad (3)$$

Данная формула позволяет при известной анизотропии ЖК и заданной относительной ширине полосы рабочих частот фазовращателя  $\delta f / f_0$  найти необходимую относительную ширину полосы пропускания устройства как фильтра  $\Delta f / f_0$ .

Будем считать, что в полосе пропускания  $\Delta f$  устройства фаза изменяется линейно (что верно в первом приближении для оптимально настроенной конструкции) на величину  $\Phi$  (рис. 3).

Тогда зависимость набега фазы от частоты будет в общем случае описываться формулой

$$\varphi(f) = k(f - f_0) + d\varphi, \text{ где } f_0 \text{ и } d\varphi - \text{ константы, а коэффициент пропорциональности } k = \frac{\Phi}{\Delta f}.$$

При изменении центральной частоты от  $f_0''$  до  $f_0'$  разность набега фазы в рабочей полосе частот составит  $\Delta\varphi = k(f_0'' - f_0')$ . Подставляя выражения для  $k$ ,  $f_0''$  и  $f_0'$ , получим:

$$\Delta\varphi = \frac{\Phi}{\Delta f / f_0} \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} \right). \quad (4)$$

Выражая  $\Delta f/f_0$  через  $\delta f/f_0$  с помощью формулы (3) и подставляя это значение в (4), получим:

$$\Delta\varphi = \frac{\Phi}{\delta f/f_0 - \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} \right)} \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} \right). \quad (5)$$

Вводя обозначение  $\delta\varepsilon = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\perp}}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_{\parallel}}}$  и подставляя значения для  $\varepsilon_{\perp}$  и  $\varepsilon_{\parallel}$ , получим:

$$\delta\varepsilon = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon - \Delta\varepsilon/2}} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon + \Delta\varepsilon/2}}. \quad (6)$$

При этом следует учитывать, что  $\varepsilon$  и  $\Delta\varepsilon$  – это среднее значение и анизотропия эффективной диэлектрической проницаемости ЖК подложки. Величину изменения фазы  $\Phi$  в полосе пропускания устройства  $\Delta f$  при числе резонаторов  $n > 1$  можно представить в виде  $\Phi(n) = 0.7 \times (n-1) \times 180^\circ$  [3].

Подставляя (6) в (5), окончательно получаем:

$$\Delta\varphi = \frac{\Phi}{\frac{\delta f/f_0}{\delta\varepsilon} + 1}. \quad (7)$$

Таким образом, формула (7) описывает зависимость величины управляемого фазового сдвига в рабочей полосе частот от количества резонаторов фазовращателя, относительной ширины полосы рабочих частот и величины анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК.

Для проверки результатов были построены зависимости величины управляемого фазового сдвига от относительной ширины полосы рабочих частот исследуемого фазовращателя (рис. 4).

Кривые были рассчитаны в квазистатическом приближении в программе *Microwave Office* и по полученной формуле (7). Расчет проводили с количеством резонаторов  $n=5$  и  $n=9$  при анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК  $\Delta\varepsilon=0,4$  и среднем значении диэлектрической проницаемости  $\varepsilon=3$ .

Зависимости, рассчитанные в квазистатическом приближении, состоят из двух участков. Это связано с тем, что относительная ширина первой полосы пропускания фазовращателя зависит от разности волновых сопротивлений микрополосковых линий, образующих его полуволновые отрезки (чем она больше, тем меньше ширина полосы), и для реализуемых на практике минимальных ширин полосковых проводников (100 мкм) не может быть достаточно мала. Известно, что абсолютные ширины первой и последующих полос пропускания фильтров на основе структуры фотонного кристалла одинаковы, а их центральные частоты кратны центральной частоте первой полосы пропускания  $f_0$  [5]. Поэтому относительная ширина полос пропускания с увеличением их номера  $N$  становится меньше и составляет  $\Delta f/(Nf_0)$ . В связи с этим малые значения относительной ширины полосы рабочих частот исследуемого фазовращателя были реализованы на частотах второй полосы пропускания. Как видно из рис. 4, кривые, рассчитанные по полученной формуле (7) и в квазистатическом приближении, находятся в хорошем соответствии друг с другом, что позволяет сделать вывод об адекватности использованных приближений.

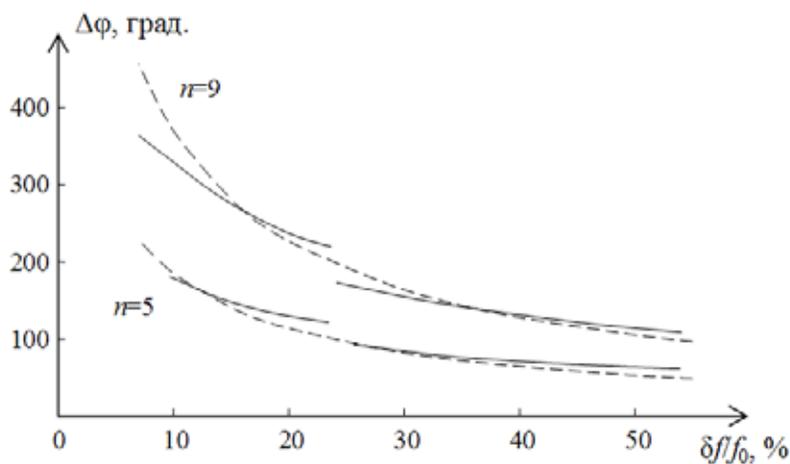


Рис. 4. Зависимость величины управляемого фазового сдвига от относительной ширины полосы рабочих частот резонансного фазовращателя (сплошные линии – расчет в программе *Microwave Office*, штриховые линии – расчет по полученной формуле)

Проведенные исследования показали, что исследуемую конструкцию фазовращателя целесообразно использовать при относительных рабочих полосах частот сигнала менее 20 %. В этом случае ее размеры, при прочих равных условиях, получаются существенно меньшими, чем у фазовращателя на основе согласованной линии передачи, заполненной ЖК.

#### Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальной проверки работоспособности исследуемой конструкции был синтезирован и изготовлен девятизвенный фазовращатель для реальной жидкокристаллической смеси с толщиной слоя 0,5 мм, у которой диэлектрическая проницаемость при переориентации молекул изменяется в пределах 2,7 – 3. Устройство настраивали на вторую полосу пропускания с тем, чтобы увеличить управляемый сдвиг фазы, а для уменьшения размеров конструкции в ее топологии проводников на подвешенной кварцевой подложке толщиной 0,3 мм использовали дополнительные скачки ширины. Рабочая полоса частот устройства составляла  $\delta f/f_0=10\%$  и имела центральную частоту  $f_0 \approx 26$  ГГц. После изготовления макета фазовращателя размеры топологии его проводников определяли на цифровом измерительном микроскопе, а затем именно эти размеры подставляли в программу анализа для объективного сравнения результатов расчета с экспериментом. На рис. 5а представлены рассчитанные и измеренные амплитудно-частотные характеристики изготовленного макета, а на рис. 5б показаны частотные зависимости управляемого сдвига фазы. Для переориентации молекул ЖК использовали внешнее магнитное поле напряженностью 3 кЭ, однако в этой же конструкции можно осуществить и электрическое управление фазой электромагнитных волн, если подавать напряжение смещения между микрополосковыми проводниками и корпусом устройства. На рис. 5в показана фотография изготовленного макета фазовращателя.

Измеренная величина управляемого фазового сдвига в центре рабочей полосы частот составила 225°, что хорошо согласуется с величиной, вычисленной по полученной формуле (7) с учетом диэлектрических потерь ЖК. Видно не только достаточно хорошее согласие теории и

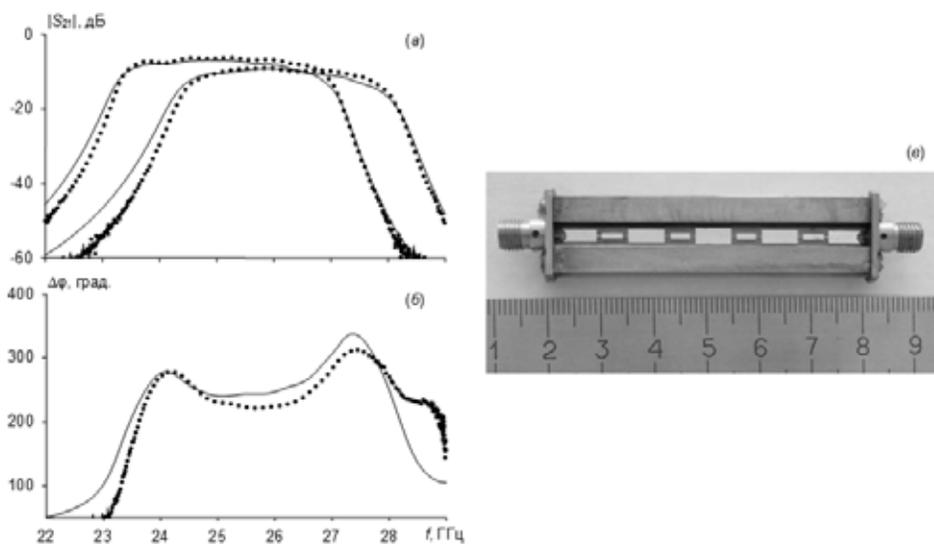


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики (а), зависимость максимальной величины управляемого фазового сдвига от частоты (б) и фотография (в) исследованного фазовращателя (линии – расчет, точки – эксперимент)

эксперимента, но и сравнительно большой управляемый сдвиг фазы в устройстве при высокой степени его миниатюрности. Фактор качества устройства, определяемый как отношение максимальной величины управляемого фазового сдвига к средним потерям [4] и используемый для объективного сравнения различных конструкций фазовращателей, составил 30 град/дБ. Важно отметить, что характеристики имеющегося в наличии ЖК сравнительно невысоки – анизотропия диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon=0,3$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta\approx 0,02$ . При использовании ЖК с лучшими характеристиками [6] в исследуемой конструкции можно получить существенно больший управляемый фазовый сдвиг при меньших потерях в рабочей полосе частот.

### Заключение

В работе теоретически и экспериментально исследована конструкция микрополоскового электрически управляемого жидкокристаллического фазовращателя. Получено аналитическое выражение, связывающее величину управляемого фазового сдвига с основными конструктивными и электрическими параметрами фазовращателя. Проведенные исследования резонансной конструкции управляемого жидкокристаллического фазовращателя показали ее высокую эффективность и возможность использования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Важной особенностью рассмотренной конструкции является то, что она также выполняет функцию полосно-пропускающего фильтра. В некоторых случаях это может значительно упростить схемы различных приборов, так как исключается необходимость использования в них дополнительных частотно-селективных устройств.

*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.*

*Статья подготовлена и публикуется при поддержке Программы развития Сибирского федерального университета.*

### Список литературы

1. Беляев, Б.А., Волошин, А.С., Лексиков, А.А., Шабанов, В.Ф. Управляемый фазовращатель // Патент России № 2257648. БИ № 21. 2005.
2. Лемберг, К.В., Сержантов, А.М. Электрически управляемый микрополосковый жидкокристаллический фазовращатель // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных статей. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. С. 111-114.
3. Лемберг, К.В., Сержантов, А.М. Исследование величины управляемого фазового сдвига в конструкции микрополоскового жидкокристаллического фазовращателя // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных статей. Красноярск: ИПК СФУ, 2010. С. 137-141.
4. Vendik, O.G., Vendik I.B., Nikol'ski M.A. Comparison of MMIC phase shifters using figure of merit as the main characteristic // Proceedings of the 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2004. Vol. 1. P. 333-335.
5. Беляев, Б.А., Сержантов, А.М. Исследование коэффициентов связи резонаторов в микрополосковой модели одномерной сверхрешетки // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 8. С. 910-917.
6. Muller, S., Goelden, F. Passive phase shifter for W-Band applications using liquid crystals // Proceedings of the 36th European Microwave Conference. 2006. P. 306-309.

## Investigation of the Microwave Controllable Liquid Crystal Phase Shifter

**Aleksey M. Serzhantov and Konstantin V. Lemberg**  
*Siberian Federal University*  
*79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

---

*The design of the controllable microstrip liquid crystal phase shifter based on the photonic crystal structure is theoretically and experimentally investigated. An analytical expression relating the main parameters of the device: the controlled phase shift, the fractional bandwidth, the anisotropy of the used liquid crystal permittivity and the number of resonators is obtained. Good agreement between the calculated characteristics and the results of the numerical analysis obtained in the quasistatic approximation is shown. The results of the experimental investigation of the nine-resonator phase shifter are presented. The phase shifter is based on an irregular microstrip structure in which the nematic liquid crystal active layer is located between the screen and quartz suspended substrate. The prospects of using the developed device in the centimeter and millimeter wavelengths are shown.*

*Keywords: phase shifter, liquid crystal, microstrip filter, resonant structure, photonic crystal.*

---