

# Сегнетоэлектрический фазовращатель на карбиде кремния

К. Е. Карымсаков

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

kamakar2003@mail.ru

С. П. Зубко

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

spzubko@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе представлена модель и результаты моделирования характеристик сегнетоэлектрического фазовращателя на карбиде кремния, дающего на частоте 12.2–13.2 ГГц сдвиг фазы  $174 \pm 3$  градуса. Сегнетоэлектрик используется в качестве управляющего элемента. Карбид кремния был выбран для эффективного отвода тепла.

**Ключевые слова:** фазовращатель, карбид кремния, сегнетоэлектрик

## I. ВВЕДЕНИЕ

Фазовращатель представляет собой устройство, сдвигающее фазу входного сигнала. СВЧ-фазовращатели являются важнейшими компонентами фазированных антенных решеток, которые находят широкое применение в радиолокационных системах и средствах связи. В настоящее время продолжается интенсивное развитие и исследование новых методов, нацеленных на усовершенствование управления фазовыми характеристиками СВЧ-сигналов, чтобы удовлетворить возрастающие требования к расширению частотного диапазона и увеличению радиуса действия таких систем [1].

Перспективными материалами для создания управляемых фазовращателей выступают сегнетоэлектрики, которые обеспечивают высокую управляемость фазового сдвига. Сегнетоэлектрики обладают уникальными физическими свойствами, такими как высокая диэлектрическая проницаемость и нелинейность, радиационная стойкость.

Фазовращатели, основанные на сегнетоэлектрических материалах, обеспечивают высокую скорость перестройки фазового сдвига и характеризуются малым потреблением энергии в цепях питания. Кроме того, они выделяются своей простотой в производстве и экономической целесообразностью [2].

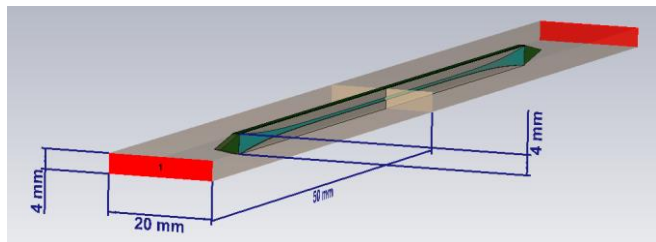


Рис. 1. Модель фазовращателя

Фазовращатели на основе сегнетоэлектриков могут быть реализованы различными способами [3]. В данной работе предложено реализовать фазовращатель в виде отрезка щелевой линии передачи, помещенной в прямоугольный волновод.

## II. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ

В щелевой линии из-за большой концентрации поля, возникает локальный перегрев, который может существенно повлиять на эффективность и надежность работы устройства. Данный фактор может вызвать изменения в свойствах сегнетоэлектрика, включая электрические, механические и термические. Как следствие, это может привести к снижению функциональных характеристик устройства и, в некоторых случаях, к его поломке или деградации. Помимо этого, из-за большой концентрации поля и малой ширины зазора может произойти электрический пробой.

Таким образом, необходимо учитывать не только электрические характеристики, но и термическую устойчивость всех материалов, участвующих в конструкции. Одним из важнейших требований к подложке является ее высокая теплопроводность, обеспечивающая эффективный отвод тепла от активной области, где концентрируются поля, что поможет избежать перегрева сегнетоэлектрика и сохранить стабильность его характеристик. В этом контексте рекомендуется использование современных методов для улучшения теплоотвода, таких как применение специализированных теплоотводящих материалов или конструктивных решений, способствующих более равномерному распределению температуры. Из этого следует, что правильное управление температурным режимом в щелевой линии может значительно повысить общую эффективность и долговечность устройств на основе сегнетоэлектриков.

Для выбора наиболее подходящего материала подложки был произведен сравнительный анализ свойств материалов, широко используемых в электронных устройствах в качестве диэлектрической подложки [4]. В табл. 1 приведены коэффициенты теплопроводности разных материалов.

ТАБЛИЦА I.

| Материал                          | Коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Оксид магния                      | 60                                                                        |
| Поликор                           | 25                                                                        |
| Титанат бария (монокристалл)      | 6                                                                         |
| Титанат бария (керамика)          | 2                                                                         |
| Карбид кремния, альфа-модификация | 490                                                                       |
| Монокристаллический сапфир        | 25                                                                        |

Из данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что карбид кремния обладает наибольшим коэффициентом теплопроводности среди рассмотренных материалов. В качестве сегнетоэлектрического материала был использован титанат бария – стронция  $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ . При комнатной температуре ( $T=300$  К) данный материал находится в параэлектрическом состоянии, характеризующемся более низкими потерями по сравнению с сегнетоэлектрическим состоянием.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Для моделирования использовалось программное обеспечение, осуществляющее 3D электродинамическое моделирование высокочастотных устройств. На рис. 1 представлена модель разработанного фазовращателя, представляющего собой щелевую линию, помещенную в прямоугольный волновод с воздушным заполнением. В моделировании использовался одномодовый режим волновода. Размеры волновода приведены на рис. 1.

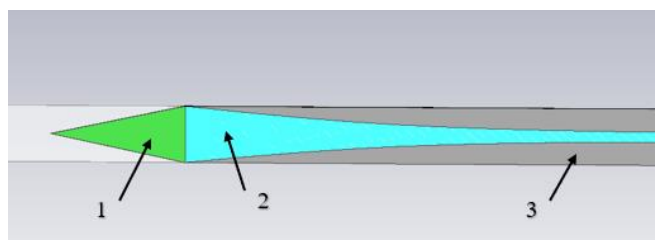


Рис. 2. Топология фазовращателя на щелевой линии

На рис. 2 представлен проходной фазовращатель, сконструированный на отрезке щелевой линии передачи. Для преобразования электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе, в щелевую моду и наоборот был использован плавный переход. На топологии: 1 – подложка из карбида кремния, 2 – пленка сегнетоэлектрика, 3 – электроды. Толщина подложки составляет 1 миллиметр, толщина пленки сегнетоэлектрика 1 микронметр.

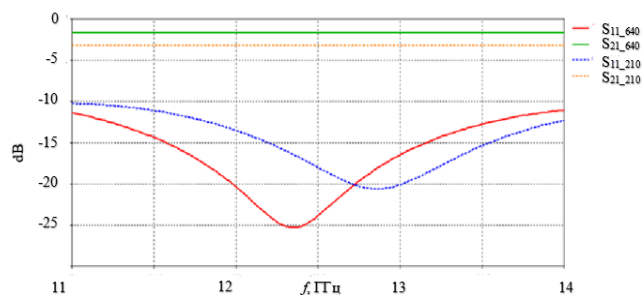


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи и отражения от частоты

Рис. 3 и 4 иллюстрируют результаты электродинамического моделирования фазовращателя. При

моделировании учитывались потери в металлизации и во всех диэлектрических слоях фазовращателя. На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента передачи и коэффициента отражения при двух разных значениях диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика: 640 и 210. Данное изменение относительной диэлектрической проницаемости достигается путем приложения напряжения на электроды щелевой линии. Как видно из графиков, вносимое затухание в рабочей полосе фазовращателя не превышает 3 дБ при относительной диэлектрической проницаемости равной 210 и 2 дБ при 640.

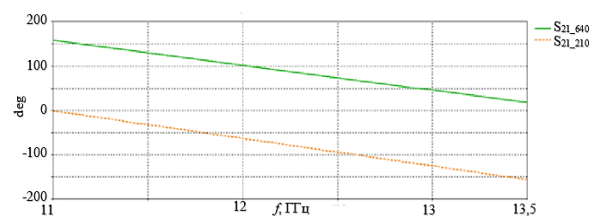


Рис. 4. ФЧХ фазовращателя

На рис. 4 представлена фазочастотная характеристика фазовращателя. В полосе частот 12.2–13.2 ГГц фазовращатель сдвигает фазу на  $174 \pm 3$  градуса. Относительная ширина полосы пропускания составляет около 8 %.

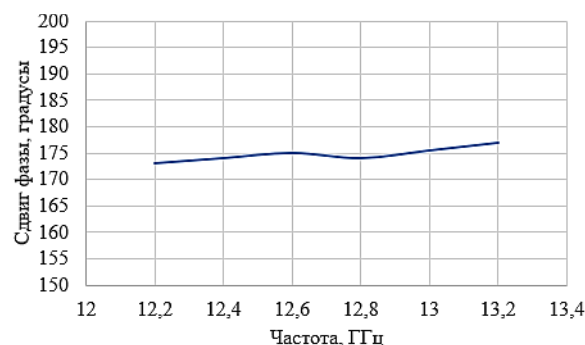


Рис. 5. Зависимость сдвига фазы от частоты

Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика осуществляется через подачу напряжения на электроды. Питая электроды через так называемую щель, которая представляет собой отверстие, вырезанное в теле волновода. Чтобы исключить потери на излучение через щель, саму щель необходимо вырезать на средней линии широкой стенки волновода [5].

Также была произведена оценка среднего уровня мощности в щелевой линии. Исходные данные приведены в табл. 2. Из-за температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика нельзя допустить сильного перегрева пленки. Было установлено, что при перегреве на 20 К устройство выдает фазовую ошибку  $\pm 10$  градусов [6].

ТАБЛИЦА II.

| Параметр                           | Величина |
|------------------------------------|----------|
| Рабочая частота                    | 3 ГГц    |
| СВЧ напряжение на конденсаторе     | 30 В     |
| Диэлектрическая проницаемость BST  | 640      |
| Тангенс диэлектрических потерь BST | 0,02     |
| Допустимый перегрев                | 20 К     |

В результате проведенного расчета было установлено, что полная мощность, выделяющаяся в активной зоне системы, приблизительно равняется 0.5 Вт. При этом температура сегнетоэлектрической пленки увеличилась на 15 К. Следует отметить, что по сравнению с карбидом кремния другие исследуемые материалы показали значительно менее эффективные результаты. Уровень перегрева для этих материалов составил 30 К и более, что указывает на более низкую теплопроводность и менее эффективный теплоотвод по сравнению с карбидом кремния.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенной работы является разработанная модель фазовращателя, основанного на карбиде кремния с интеграцией сегнетоэлектрических материалов, построенная на отрезке щелевой линии. Разработанный фазовращатель обеспечивает фазовый сдвиг  $(174 \pm 3)^\circ$  в диапазоне частот от 12.2 до 13.2 ГГц. Предложенная конструкция позволяет значительно расширить частотный диапазон применения фазовращателей в области сверхвысоких частот (СВЧ) и решить проблемы, связанные с перегревом элементов устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха Машинное проектирование СВЧ устройств. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
- [2] Феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с совместным электрическим и магнитным управлением / А.Б. Устинов, П.И. Колков, А.А. Никитин, Б.А. Калинин, Ю.К. Фетисов, G. Srinivasan // Журнал технической физики. 2010, вып. №6. С. 75-79.
- [3] Cornelius J. Verver, Wolfgang J.R. Hoefer Quarter-Wave Matching of Waveguide-to-Finline Transitions // Transactions on microwave theory and techniques. 1984, NO. 12. P. 1645-1648.
- [4] Авров Д.Д., Александрова О.А., Лебедев А.О., Мараева Е.В., Таиров Ю.М., Фадеев А.Ю. Технология материалов микроэлектроники: от минерального сырья к монокристаллу: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 146 с.
- [5] Исследование параметров щелей в стенках волновода / сост.: Ю.Ю. Бобков, Д.В. Гололобов, И.Н. Кижлай, В.Б. Кирильчук, А.В. Кухарев, О.А. Юрцев. Минск.: Изд-во БГУИР, 2011. 23 с.
- [6] Чернодубов Д.А., Инюшкин А.В. Теплопроводность SiC: расчет изотопического эффекта из первых принципов // Физика твердого тела. 2023, вып. №6. С. 1077-1081.