

# Разработка оптического микрокольцевого резонатора

В.В. Витько, О.А. Крылова, А.А. Ершов, А. Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Работа посвящена разработке оптического микрокольцевого резонатора из GaAs/AlGaAs. Проведено численное моделирование дисперсионных характеристик и распределений электромагнитных полей в поперечных сечениях микроволноводов из GaAs/AlGaAs, а также уровня потерь на распространение в них. Исследовано влияние геометрических размеров элементов связи различных конфигураций на величину коэффициента связи по мощности. Рассчитаны передаточные характеристики микрокольцевых резонаторов с различными элементами связи, проведена оценка их нагруженной добротности.

**Ключевые слова:** микрокольцевой резонатор, полупроводники группы A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, арсенид галлия, полосковый волновод

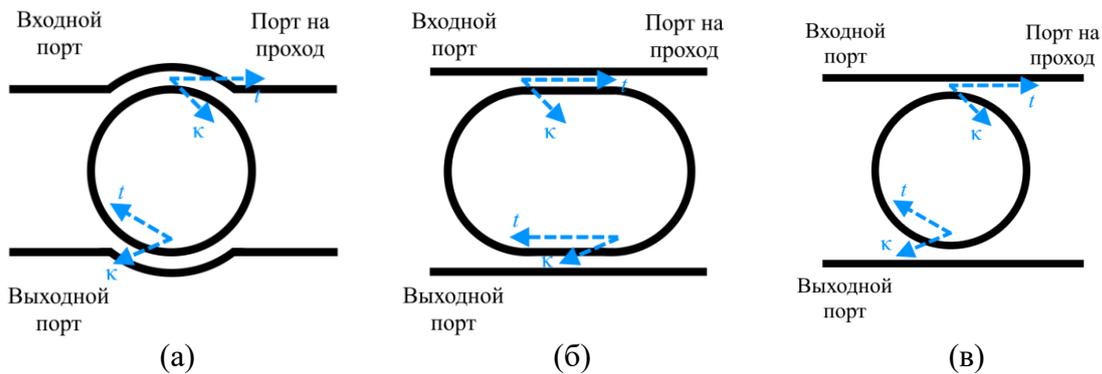
## 1. Введение

В настоящее время интерес научного сообщества к интегральной радиофотонике стремительно растет. Он обусловлен рядом преимуществ, включая возможность широкополосной обработки сигналов благодаря переносу на оптическую несущую, а также минимизацию потерь при передаче сигнала за счет применения волоконно-оптических линий связи со сверхнизкими потерями [1]. Важным аспектом при разработке новых радиофотонных устройств, а также фотонных интегральных схем (ФИС) является выбор материальной платформы, определяющей функциональные характеристики, производительность и габариты элементов. В настоящее время хорошо изученной и внедренной на производстве технологической платформой для создания ФИС является платформа кремний-на-изоляторе. Преимущества этой платформы заключаются в высоком контрасте показателей преломления между сердцевинной и оболочкой волновода, а также совместимости с существующей КМОП-оптоэлектронной технологией [2, 3]. Однако, существенные ограничения кремния, связанные с его непрямой запрещенной зоной и двухфотонным поглощением в телекоммуникационном диапазоне частот (187.5-214 ТГц, что соответствует длинам волн 1.4–1.6 мкм), постепенно привели к пределу применимости этой платформы в области радиофотоники, в основном из-за невозможности монолитной интеграции активных и пассивных компонентов на единой подложке [1]. Полупроводники группы A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> обладают ключевым для интегральной радиофотоники параметром – прямой запрещенной зоной, что позволяет создавать, наравне с пассивными компонентами ФИС, устройства генерации и фотодетектирования, а также интегрировать их на один чип. Среди них особого внимания заслуживает арсенид галлия (GaAs), который обладает широким окном прозрачности (от 0.87 мкм до 19 мкм), высоким показателем преломления  $n = 3.4$  на центральной длине волны 1.55 мкм, а также высокими значениями нелинейных характеристик для реализации активных устройств [4, 5]. А сочетание GaAs и AlGaAs позволяет управлять контрастом показателей преломления между материалами при помощи варьирования процента алюминия в составе AlGaAs [6]. На сегодняшний день технология GaAs/AlGaAs позволяет реализовать различные фотонные устройства и элементы ФИС. Перспективными являются разработки в области создания оптических микрокольцевых резонаторов (МКР) [7, 8].

Целью данной работы является разработка оптического МКР из GaAs/AlGaAs. Для достижения поставленной цели были проведены исследования влияния параметров полоскового микроволновода на дисперсионные характеристики и уровень потерь на распространение в нем, влияние геометрических размеров и конфигурации элемента связи и геометрических размеров МКР на его рабочие характеристики.

## 2. Моделирование

При помощи коммерческого программного обеспечения было проведено моделирование спектра оптического излучения в полосковых микроволноводах со следующими параметрами: GaAs микроволноводы толщиной 0.32 мкм и ширинами от 0.3 до 1.5 мкм располагались на пьедестале из  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  толщиной от 0.1 до 1 мкм; на поверхности волновода из GaAs был сформирован слой  $SiO_2$  толщиной 0.1 мкм; коэффициенты преломления слоев GaAs,  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  и  $SiO_2$  на длине волны 1.55 мкм были равны 3.37, 3.05 и 1.44, соответственно. Моделирование показало границы реализации одномодового режима работы и минимизации уровня потерь на распространение. Наличие пьедестала позволяет локализовать поле внутри волноведущей структуры и снижает требования для создания волноводов такого типа. Так волновод шириной 0.5 мкм на пьедестале 0.5 мкм реализует одномодовый режим работы и обладает потерями 1.56 дБ/см. Рассчитанный волновод лег в основу МКР с различными элементами связи. Было проведено исследование влияния геометрии элемента связи на коэффициент связи по мощности и передаточные характеристики МКР. Исследуемые конфигурации МКР представлены на рис. 1.



**Рисунок 1.** Конфигурации МКР с различными геометриями элементов связи: (а) изогнутый и (б) прямой элементы связи, а также (в) элемент связи с минимальной областью переизлучения.

Так, при ширине зазора 0.5 мкм для различных элементов связи коэффициент связи по мощности составил 0.3%, 0.23% и 0.097% для изогнутого, прямого элементов связи и элемента связи с минимальной областью переизлучения, соответственно. Представленные элементы связи позволяют создать МКР, работающий в режиме «недосвязи». Данный режим позволяет реализовать сверхвысокую добротность.

В работе для сравнения был промоделирован МКР радиуса 5 мкм. Радиус кольца выбирался таким образом, чтобы резонансная частота спектра соответствовала частоте 193.414 ТГц. При этом область свободной дисперсии составляла 2.4 ТГц, а групповой коэффициент преломления 3.98. Нагруженные добротности исследуемых МКР составили 35000 для изогнутого элемента связи, 26500 для прямого и 40500 для случая минимальной области переизлучения. Сравнение результатов показало, что разработанный МКР с изогнутыми элементами связи позволяет сохранить сравнительно высокую нагруженную добротность порядка 35000 при значительно увеличенной ширине зазора элемента связи до 0.5 мкм. При этом уровень потерь на

передаточной характеристике на резонансной частоте составляет -0.5 дБ.

### 3. Заключение

Проведено исследование влияния геометрических параметров микроволноводов на их дисперсионные характеристики, а также на уровень потерь на распространение. Показано, что пьедестал позволяет локализовать поле в волноводе и разрешить противоречие между реализацией одномодового волновода с низким уровнем потерь и обеспечением затухающей моды вне волновода для создания элемента связи. Так волновод шириной 0.5 мкм на пьедестале 0.5 мкм обладает потерями 1.56 дБ/см. Исследование разных конфигураций элементов связи показало, что максимальный коэффициент связи для ширины зазора 0.5 мкм достигает 0.3% при секторе переизлучения 45 градусов. Численное моделирование передаточных характеристик микрокольцевых резонаторов длиной кольца 5 мкм показало, что применение элемента связи с изогнутой областью связи сектором 45° и шириной зазора 0.5 мкм обеспечивает компромисс между габаритами устройства и высокой добротностью, которая на рабочей длине волны 1.55 мкм составила 35000 при уровне потерь -0.5 дБ.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант номер **FSEE-2025-0014**).

#### Список литературы

1. Marpaung, D. et al. Integrated microwave photonics // *Nature Photon.* – 2019. – V. 13, № 2. – P. 80–90.
2. Vermeulen N. et al. Post-2000 nonlinear optical materials and measurements: data tables and best practices // *Journal of Physics: Photonics.* – 2023. – V. 5, № 3. – P. 035001.
3. Maram R. et al. Recent Trends and Advances of Silicon-Based Integrated Microwave Photonics// *Photonics.* – 2019. – V. 6, № 1. – P. 13.
4. Vyas K. et al. Group III-V semiconductors as promising nonlinear integrated photonic platforms// *Advances in Physics: X.* – 2022. – V. 7, № 1. – P. 2097020.
5. Mobini E. et al. AlGaAs Nonlinear Integrated Photonics// *Micromachines.* – 2022. – V. 13, № 7. – P. 991.
6. Adachi S. GaAs, AlAs, and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As@B: Material parameters for use in research and device applications// *Journal of Applied Physics.* – 1985. – V. 58, № 3. – P. R1–R29.
7. Chang L. et al. Strong frequency conversion in heterogeneously integrated GaAs resonators// *Applied Photonics.* – 2019. – V. 4, № 3. – P. 036103.
8. Sharma U. et al. Non-linear switching of GaAs-AlGaAs MRR based Half subtractor using 2-to-4 line Decoder// *2024 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology.* Jamshedpur, India: IEEE. – 2024. – P. 630–635.