

Исследование оптического элемента памяти на кремниевом микро-кольцевом резонаторе с зарядовой нелинейностью

И.А. Рябцев¹, А.А. Никитин¹, А.А. Никитин¹, А.В. Кондрашов¹, А.А. Семенов¹, Д.А. Конкин^{2,3}, А.А. Кокотов^{2,4}, Л.И. Бабак², Ф.И. Шеерман², А.Б. Устинов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники «ТУСУР»

³Томский политехнический университет

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

Аннотация: Настоящая работа посвящена исследованию нелинейного пассивного микрокольцевого резонатора, изготовленного по технологии кремний-на-изоляторе. Исследуемый резонатор демонстрирует эффект дисперсионной бистабильности, обусловленный зарядовой нелинейностью, при непрерывной накачке. Показано, что резонатор переключается между двумя стабильными состояниями при изменении мощности входного сигнала. Такое поведение резонатора использовано для реализации элемента памяти. В ходе работы показано, что минимальная длительность импульса, обеспечивающая работу элемента памяти, составляет 260 нс.

Ключевые слова: микро-кольцевые резонаторы, бистабильность, запоминающие устройства

1. Введение

За последнее десятилетие наблюдается значительный прогресс в разработке фотонных интегральных схем, что обеспечивает новые возможности для создания полностью оптических элементов памяти [1]. В основе принципа работы таких устройств лежит явление оптической бистабильности. Бистабильность оптических систем проявляется в переключении между двумя устойчивыми состояниями при изменении внешнего воздействия. В настоящее время технология кремний-на-изоляторе (КНИ) является ключевой платформой для изготовления активных и пассивных фотонных интегральных схем. КНИ-структуры обладают следующими преимуществами: низкие потери на распространение; высокая степень интеграции; совместимость с КМОП-технологией [2].

В телекоммуникационном диапазоне длин волн дисперсионная бистабильность в кремнии возникает в результате двухфотонного поглощения и проявляется в виде двух конкурирующих нелинейных эффектов: быстрой зарядовой нелинейности, вызванной генерацией свободных носителей, и медленного термо-оптического эффекта [3]. Ключевым элементом, обеспечивающим понижение порогов нелинейных эффектов, является микро-кольцевой резонатор (МКР) [4]. В ранних работах, посвященных изучению нелинейных кремниевых МКР [5, 6] было показано, что зарядовая нелинейность в таких структурах наблюдается только в импульсном режиме, в то время как при постоянной накачке доминирует медленный термо-оптический эффект. Для преодоления этого ограничения были предложены конструкции активных элементов памяти на основе МКР [7] и фотонных кристаллов [8]. В то же время сохраняется интерес к разработке полностью пассивных элементов памяти, которые в отличие от активных схем не требуют внешнего дополнительного питания. Недавние исследования, представленные в работах [3, 9] показали, что существует возможность создания элемента памяти на кремниевом МКР с зарядовой нелинейностью.

В настоящей работе посвящена изучению зарядовой бистабильности в микро-

кольцевых резонаторах на КНИ. Предложена конструкция элемента памяти на основе исследуемого МКР и исследованы его характеристики.

2. Описание структуры МКР и результаты исследований

Исследуемый МКР изготовлен по технологии IHP SG25PIC [10]. Толщина изолирующего и покрывного слоев SiO_2 составляет 2 мкм и 14 мкм соответственно. Ширина и высота кремниевых волноводов составляет 500 нм и 220 нм соответственно. Диаметр кольца – 256 мкм, а расстояние между МКР и прямыми входным и выходным волноводами – 250 нм. Экспериментальная установка показана на рис. 1. В качестве источника излучения используется перестраиваемый лазер. Эрбиевый волоконный усилитель используется для расширения динамического диапазона. Для формирования оптического управляющего сигнала используется двухпортовый генератор видео сигналов и электро-оптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера. Контроллер поляризации применяется для регулирования поляризации излучения и повышения эффективности ввода. Ввод и вывод излучения в МКР производится посредством оптических волокон через брэгговские преобразователи. Линейные вносимые потери на ввод-вывод составляют 12,5 дБ. Выходной сигнал разделяется в соотношении 4:1 на два канала. Первый канал подключен к оптическому анализатору спектра для визуализации амплитудно-частотной характеристики резонатора. Второй канал подключен к фотодетектору и осциллографу для измерения временных характеристик.

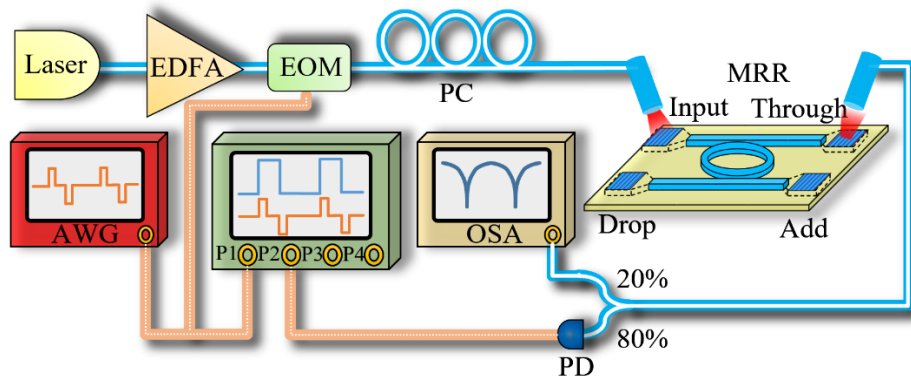


Рисунок 1. Схематическое изображение экспериментальной установки

На первом этапе экспериментального исследования были получены линейные характеристики МКР, показанные на рисунке 2 синей сплошной линией. Для обеспечения линейного режима работы на входной порт МКР подавался постоянный входной сигнал малой оптической мощности -10 дБм. Исследования проводились в окрестности резонансной частоты 191,81 ТГц. В результате экспериментальных исследований были получены следующие значения нагруженной добротности и расстояния между резонансными частотами: 45000 и 88,8 ГГц соответственно. На следующем этапе были измерены нелинейные амплитудно-частотные характеристики МКР. В эксперименте входная мощность плавно увеличивалась. В результате наблюдался нелинейный сдвиг резонансной частоты в область высоких частот, который при превышении порогового значения мощности 3,6 дБм приводил к появлению эффекта бистабильности. Последующее увеличение входной мощности сопровождалось расширением бистабильного диапазона. На рисунке 2 показаны передаточные характеристики в нелинейном режиме при входной мощности 15,9 дБм. Как видно, передаточные характеристики имеют вид петли гистерезиса. Сдвиг резонансной частоты относительно линейного режима составил 17 ГГц, а ширина петли гистерезиса 10 ГГц. Красной и черной сплошными линиями показаны

экспериментальные характеристики полученные при изменении частоты лазера вниз и вверх, соответственно. Из рисунка 2 видно, что с увеличением мощности резонансная частота сдвигается вверх, а уровень коэффициента передачи изменяется в результате нелинейного затухания. Как было показано в работе [3] коэффициент зарядовой нелинейности исследуемого МКР составляет 2.69 ГГц/мВт, в то время как нелинейный термо-оптический коэффициент равен -0.79 ГГц/мВт. Это свидетельствует о доминирующей роли нелинейности, обусловленной генерацией свободных носителей, что наблюдается экспериментально.

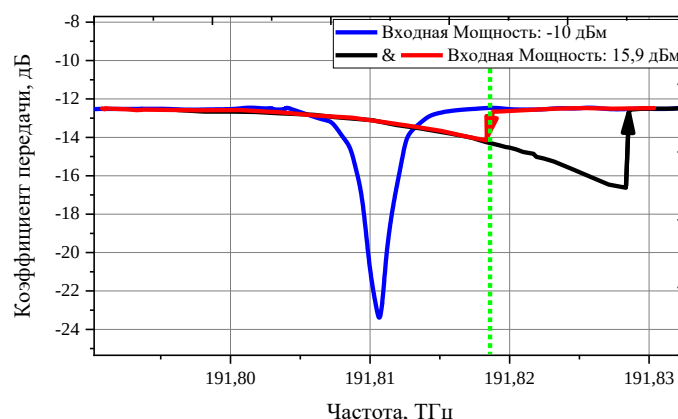


Рисунок 2. Линеарная и нелинейная передаточные характеристики исследуемого МКР

На рисунке 3 показана характеристика выходной мощности при различных уровнях накачки. Для нормировки результатов измерений использовались входная и выходная мощности соответственно. Измерения производились на частоте 191,818 ТГц, которая показана на рисунке 2 зеленой пунктирной линией. Как видно из рисунка 3, полученная зависимость характеризуется петлей гистерезиса шириной 0,44 о.е. Стрелками на рисунке показаны направления движения по петле при изменении входной мощности. При превышении уровня входной мощности 0,71 о.е. наблюдалось переключение выходной мощности в нижнее устойчивое состояние, которое сохраняется до тех пор, пока входная мощность не опустится ниже уровня 0,27 о.е. Такое поведение системы является необходимым для создания элемента памяти.

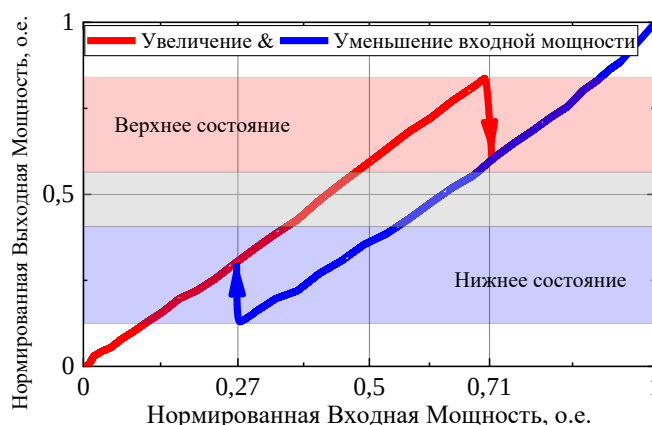


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности от уровня накачки

Рассмотрим подробнее принцип работы МКР в качестве элемента памяти. На рис. 4(а) показана осциллограмма входного оптического сигнала, используемого для переключения МКР между двумя состояниями. Длительности положительного и

отрицательного импульсов составляли 600 нс при частоте 100 кГц. На рисунке 4(б) показан временной отклик выходного сигнала с МКР. Как видно из рисунков 4(а) и 4(б) положительный входной импульс приводит к переключению МКР в низкое состояние («0»), а отрицательный импульс вызывает обратное переключение.

На заключительном этапе были проведены исследования с целью определения минимальной длительности импульса, обеспечивающей стабильное переключение МКР между состояниями. На рис. 4(в) представлены осциллограммы положительного входного оптического импульса различной длительности. Отклики МКР на входные импульсы показаны на рисунке 4(г). Как видно из этого рисунка, входные импульсы длительностью 260 нс и более вызывают переключение МКР. В то же время импульс длительностью 190 нс не приводит к переключению МКР, то есть после окончания импульса резонатор сохраняет предыдущее состояние (см. красную линию на рис. 4(г)).

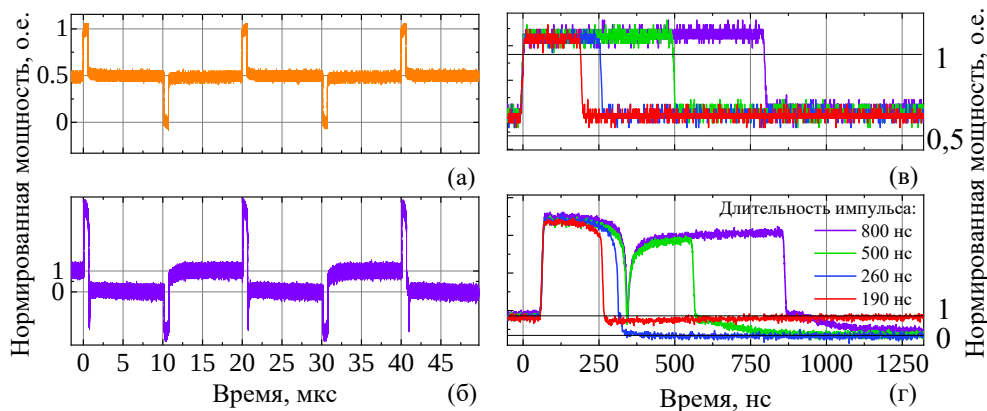


Рисунок 4. Осциллограммы входного (а, в) и выходного (б, г) оптических сигналов

3. Заключение

В настоящей работе были экспериментально продемонстрированы передаточные характеристики микро-кольцевых при различных уровнях входной мощности. Увеличение входной мощности до 15,9 дБм приводит к сдвигу резонансной частоты вверх на 17 ГГц, что обусловлено генерацией свободных носителей в результате двух-фотонного поглощения. Полученная нелинейная передаточная характеристика имеет вид бистабильной петли гистерезиса. Отдельное внимание уделено измерению зависимости выходной мощности МКР от входной мощности для частоты внутри диапазона бистабильности. В результате показано, что увеличение мощности выше 0,71 о.е. приводит к переключению резонатора из верхнего в нижнее стабильное состояние. Для обратного перехода необходимо уменьшение мощности входного сигнала до 0,27 о.е. Такое поведение резонансной системы позволяет реализовать запоминающее устройство, что было продемонстрировано экспериментально. Показано, что последовательность положительных и отрицательных импульсов переключает МКР между устойчивым низким и высоким уровнями соответственно. Отдельное внимание уделено исследованию минимальной длительности импульса для переключения. Показано, что минимальная длительность составляет 260 нс.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).

Список литературы

1. Alexoudi T., Kanellos G. T., Pleros N. Optical RAM and integrated optical memories: a survey //Light: Science & Applications. – 2020. – Vol. 9. – №. 1. – pp. 1-16.

2. Wang J., Long Y. On-chip silicon photonic signaling and processing: a review //Science Bulletin. – 2018. – Vol. 63. – №. 19. – pp. 1267-1310.
3. Nikitin A. A. et al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. – 2021. – Vol. 480. – pp. 126456.
4. Nikitin A. A. et al. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities //Results in Physics. – 2020. – Vol. 18. – pp. 103279.
5. Xu Q., Lipson M. Carrier-induced optical bistability in silicon ring resonators //Optics letters. – 2006. – Vol. 31. – №. 3. – pp. 341-343.
6. Almeida V. R., Lipson M. Optical bistability on a silicon chip //Optics letters. – 2004. – Vol. 29. – №. 20. – pp. 2387-2389.
7. Notomi M. et al. Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities //Optics Express. – 2005. – Vol. 13. – №. 7. – pp. 2678-2687.
8. Chen C. H. et al. All-optical memory based on injection-locking bistability in photonic crystal lasers //Optics Express. – 2011. – Vol. 19. – №. 4. – pp. 3387-3395.
9. Nikitin A. A. et al. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications //Optics Communications. – 2022. – Vol. 511. – pp. 127929.
10. IHP – Innovations for High Performance Microelectronics, 2020, <https://www.ihp-microelectronics.com/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmos-technologies.html> (Последнее обращение 16 Мая 2021)