

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЕКОВОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 4022 группы
направления подготовки 03.03.02 «Физика» института физики
Маслова Александра Павловича

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор

Е.А. Романова

Заведующий кафедрой
общей, теоретической и компьютерной физики
д.ф.-м.н., профессор

В. М. Аникин

Саратов 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Важную роль в интегральной и волоконной оптике играют кольцевые оптические резонаторы из оптических волноводов. В частности, интегрированные кольцевые микрорезонаторы недавно привлекли особое внимание из-за их компактности и пригодности для интеграции с другими компонентами. Они имеют множество применений в оптических фильтрах, линиях задержки, датчиках, лазерах, модуляторах, компенсаторах дисперсии и т.д. В дополнение к этому, нелинейные функции, зависящие от интенсивности, такие как оптическая бистабильность, в оптических микрорезонаторах имеют полностью оптическое переключение и мультиплексирование с временным разделением. Четырехволновое смешение и фотонная логика были экспериментально продемонстрированы с использованием кольцевого резонатора для усиления их эффекта. Перед демонстрацией этих нелинейных функций стационарные и динамические свойства передачи нелинейных кольцевых резонаторов были тщательно исследованы с использованием методов итерации, многолучевой интерференции и т. д. Все эти исследования были выполнены в предположении об идеальной керровской нелинейности, при которой показатель преломления мгновенно изменяется в зависимости от интенсивности света. Однако, разработанные к настоящему времени нелинейные микрокольца используют не сверхбыстрый эффект Керра, а эффект свободных носителей, вызванный двухфотонным поглощением или тепловым эффектом. Поэтому скорость переключения этих устройств невысока, так как время отклика этих двух эффектов медленное, особенно время отклика теплового эффекта порядка миллисекунд. Эти стекла (особенно система As-Se и родственная система стекла, такая как Ag-As-Se) в последние годы привлекают внимание, потому что они обладают высокой керровской нелинейностью со сверхбыстрой временной характеристикой.

На самом деле, существует несколько физических механизмов, влияющих на нелинейный показатель преломления и нелинейное поглощение материалов в зависимости от длины волны, ширины импульса и пиковой интенсивности падающего света. Более того, сверхбыстрые нелинейности сопровождаются более или менее медленными (кумулятивными) нелинейностями (т. е. тепловыми), и в этом случае изменение показателя преломления и изменение поглощения накапливаются в течение падающего импульса, поскольку время затухания больше ширины импульса. Недавно было обнаружено, что значительно более медленная нелинейность со временем отклика 15-20 мс присутствует в халькогенидных стеклах, что предположительно связано не с эффектами свободных носителей или тепловыми эффектами, а с фотоструктурными изменениями, присущими этим стеклам. Хотя очень важно исследовать влияние таких кумулятивных нелинейностей на характеристики нелинейных оптических устройств, до настоящего времени было проведено мало количественных исследований.

Элементами большинства оптических или оптоволоконных приборов являются оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо является наиболее известным примером оптического резонатора. Он представляет собой два соосных, параллельно расположенных и обращенных друг к другу зеркала, между

которыми может формироваться резонансная стоячая оптическая волна. В лазерах одно из зеркал делается обычно более пропускающим для преимущественного вывода излучения в этом направлении.

Микросферы на модах (ШГ) изготавливаются из различных материалов. В ранних работах исследовались, в первую очередь, эмиссионные характеристики капель жидкости, являющихся, по сути, диэлектрическими микросферами. Микросферы из диоксида кремния показали себя лучшими в качестве датчика из-за высокой добротности, что является результатом низких оптических потерь в диоксиде кремния. Тороидальный резонатор представляет собой полый металлический тор круглого или прямоугольного сечения, разрезанный по окружности с внутренней стороны. Края этого разреза соединяются двумя параллельными дисками, образующими вместе с тором замкнутую проводящую поверхность. В пространстве, охватываемом этой поверхностью, и возникают электромагнитные волны.

Изготовление трекового резонатора осуществляется литографическим способом. Микрорезонатор вырезается с помощью электронного луча по заданному шаблону. Трековые резонаторы обычно имеют добротность от 10^4 до 10^5 . Бутылочный резонатор представляет собой утолщение оптоволокна на конечной длине. Замедление сигнала происходит благодаря эффекту шепчущей галереи: попадая в резонатор, световая волна отражается от стенок и «закручивается». Благодаря округлой (поэтому ее называют бутылочной) форме резонатора свет может довольно долго циркулировать внутри него, что заставляет фотоны распространяться от одного конца резонатора к другому со значительно меньшей скоростью. Микропузырьки представляют класс уникальных резонаторов на модах шепчущей галереи (ШГ), в которых центр резонатора пустой и может заполняться жидкостью или газом. Стенка капилляров сделана достаточно тонкой, чтобы моды ШГ в капилляре имели значительное перекрытие с анализируемым веществом внутри пустого центра резонатора. Эти резонаторы имеют явное преимущество при доставке исследуемого вещества, особенно при использовании в сочетании с микрофлюидными системами. Добротности, достигающие значений $0.9 \cdot 10^{10}$, были продемонстрированы в воздухе, но при использовании для измерений в воде добротность падала до значений 10^5 до 10^6 .

Микродиски изготавливают литографическим способом путем влажного и сухого химического травления, аналогично тороидальным. Оплавление, шероховатость поверхности на микродисковых резонаторах имеет тенденцию ограничивать добротность, но это также делает микродиски более совместимыми с интеграцией на чипе. Например, микродиски могут быть интегрированы с микромеханическими устройствами для распознавания силовых и механических движений.

Цель данной выпускной квалификационной работы (ВКР): исследовать нелинейный набег фазы световой волны в трековом микрорезонаторе в зависимости от свойств материала и размеров микрорезонатора.

Задачи работы:

1. На основе теории оптических микрорезонаторов описать свойства световых волн в кольцевом микрорезонаторе с керровской нелинейностью.
2. Описать линейные и нелинейные оптические свойства материала резонатора (халькогенидные стекла) в области малых оптических потерь.
3. Провести расчет резонансных частот и их добротности в халькогенидном трековом микрорезонаторе из стекла разных составов (сульфид мышьяка и селенид мышьяка) с учетом оптических потерь в стекле.
4. Рассчитать нелинейный набег фазы световой волны для микрорезонаторов из стекла разных составов (сульфид мышьяка и селенид мышьяка) с учетом дисперсии нелинейного показателя преломления и оптических потерь в стекле.

Структура ВКР. Работа включает введение, шесть разделов, заключение, список использованных источников (11 наименований). Объем ВКР – 35 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются аспектные характеристики ВКР (актуальность работы, ее цель и задачи, методы исследования и т.д.).

В разделе 1 рассмотрены основные характеристики оптического микрорезонатора (резонансные частоты).

Раздел 2 посвящен добротности оптических резонаторов.

Раздел 3 содержит характеристику свойств материалов оптических резонаторов, дисперсионных свойств халькогенидных стекол.

В разделе 4 анализируются нелинейные оптические свойства материалов микрорезонатора – о нелинейную модуляцию фазы оптического излучения, многофотонное поглощение.

Раздел 5 содержит описание нелинейных оптических свойств трекового микрорезонатора и расчеты резонансных частот и добротности, нелинейного набег фазы.

В заключении приведены выводы по работе.

Расчет резонансных частот и добротности

Для кольцевого микрорезонатора из стекла двух составов – As_2S_3 или As_2Se_3 , с различным радиусом кольца ($R = 15, 20, 30$ мкм) результаты расчетов (в программе Mathematica) резонансных частот, добротности и набег фазы представлены на рисунках 1, 2, 3 (резонансные частоты), 4, 5, 6 (добротность), 7, 8 и 9 (набег фазы).

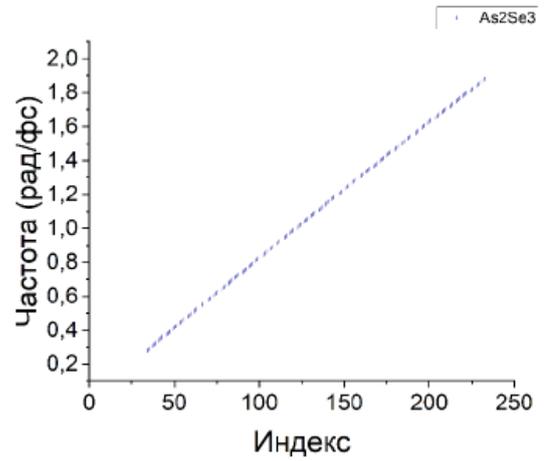
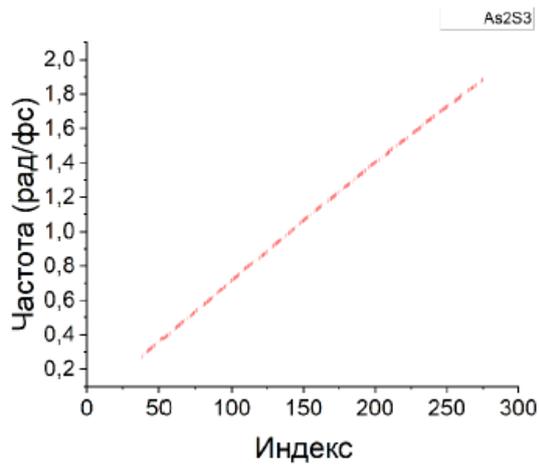


Рисунок 1. Резонансные частоты микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=15$ мкм

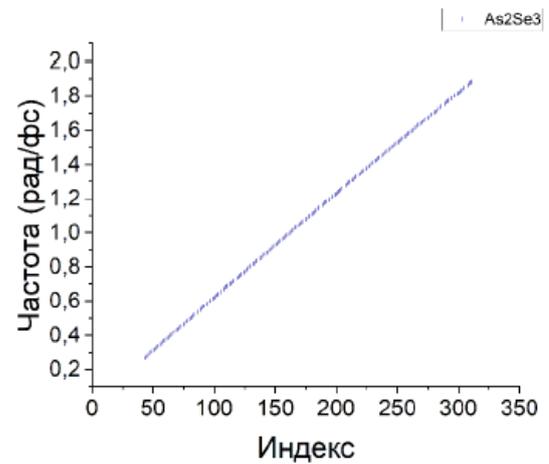
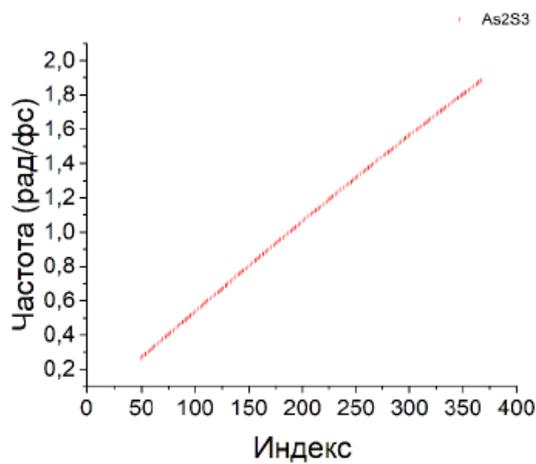


Рисунок 2. Резонансные частоты микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=20$ мкм

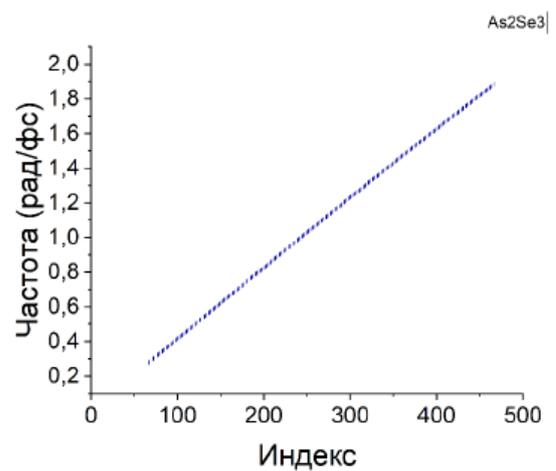
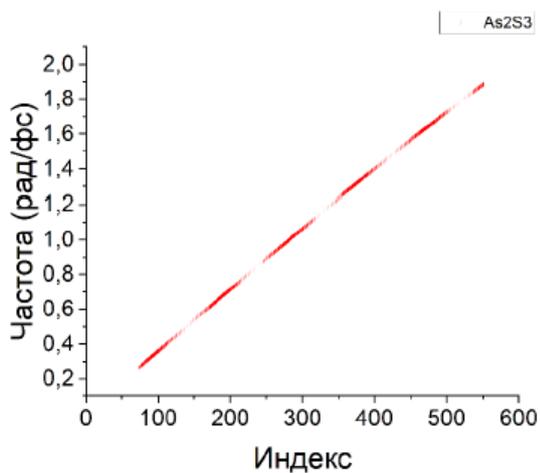


Рисунок 3. Резонансные частоты микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=30$ мкм

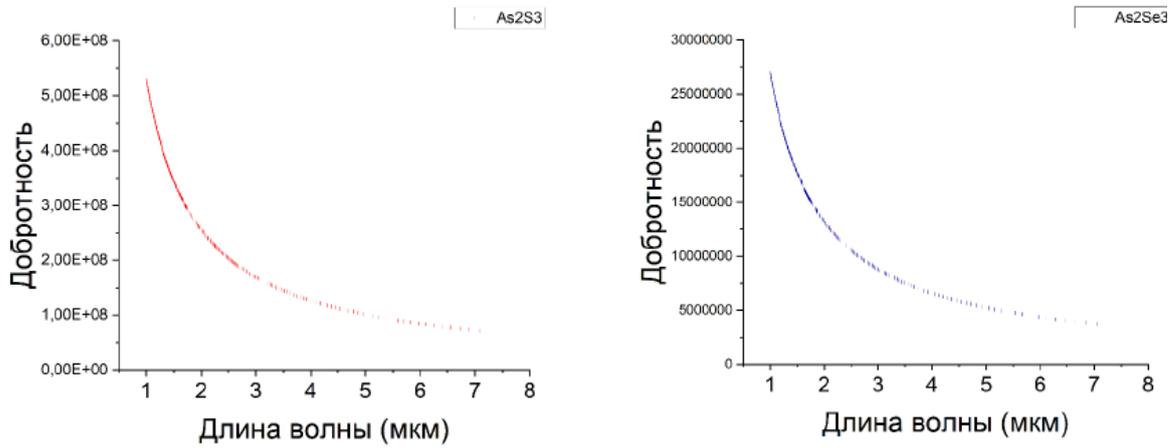


Рисунок 4. Добротность микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=15$ мкм

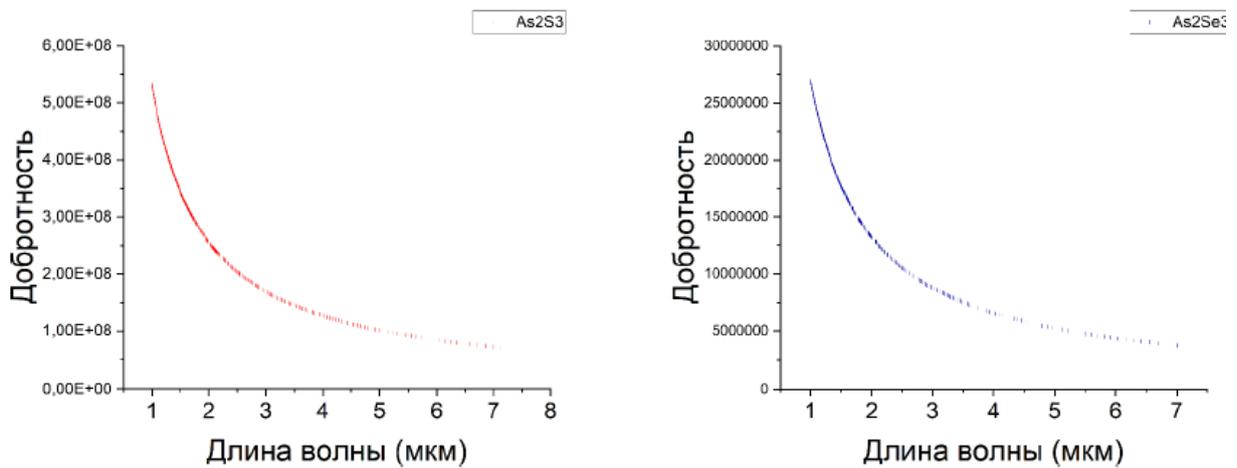


Рисунок 5. Добротность микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=20$ мкм

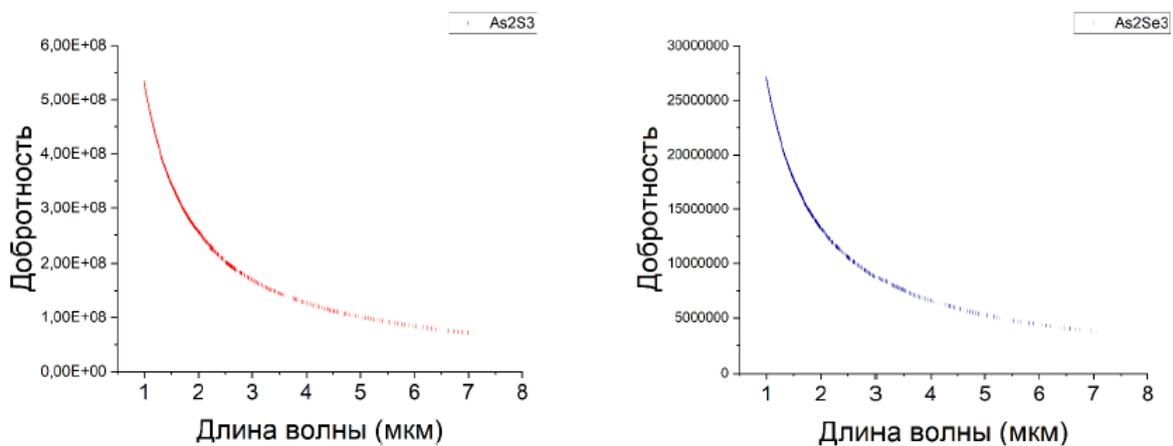


Рисунок 6. Добротность микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=30$ мкм

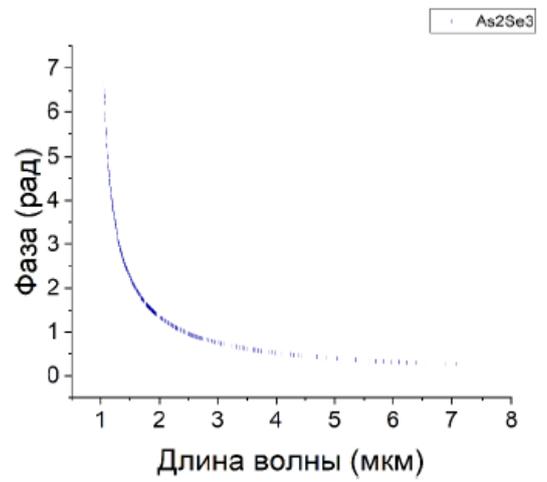
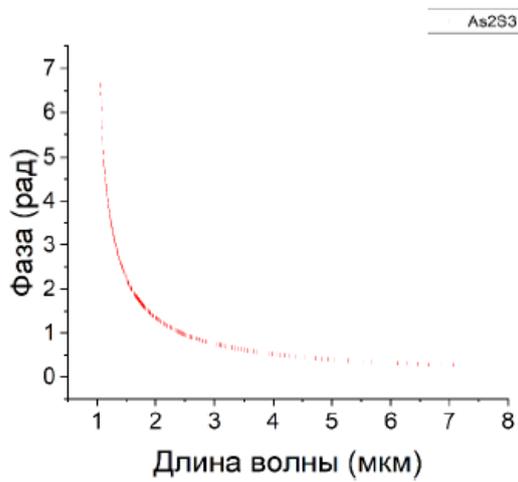


Рисунок 7. Набег фазы микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=15$ мкм

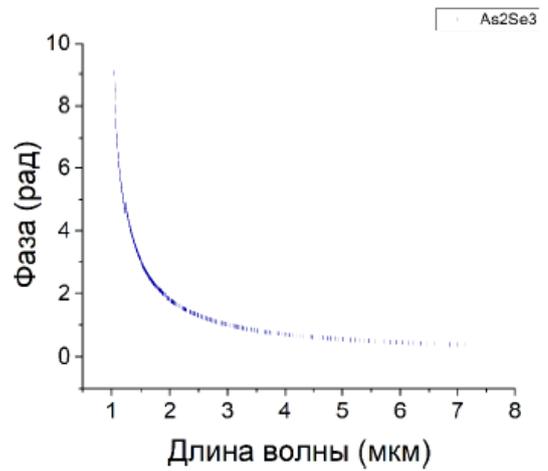
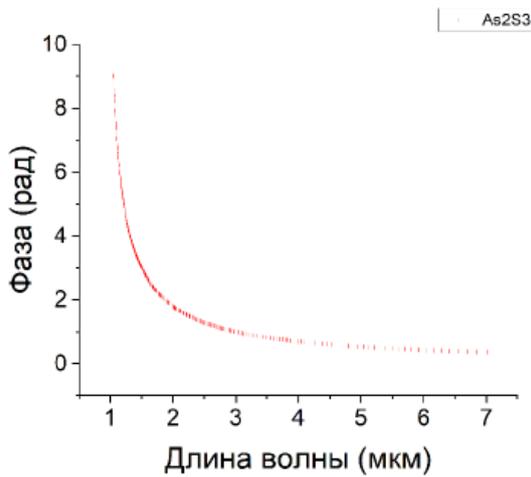


Рисунок 8. Набег фазы микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=20$ мкм

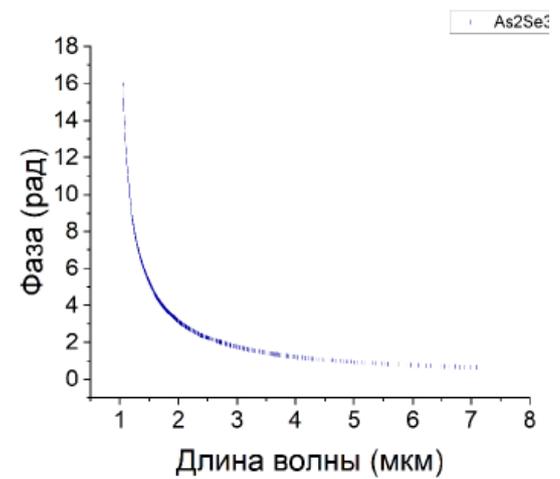
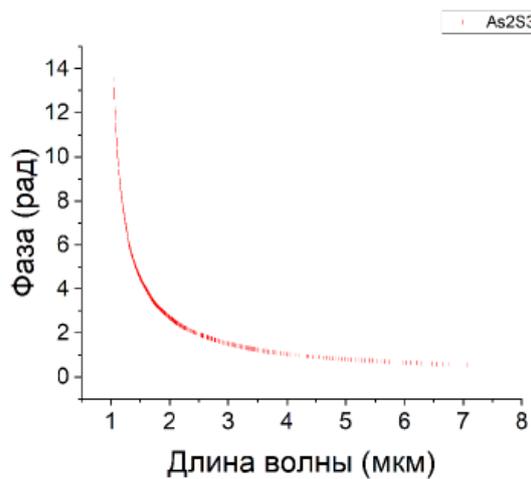


Рисунок 9. Набег фазы микрорезонатора из стекол состава As_2S_3 (слева) и As_2Se_3 (справа), $R=30$ мкм

ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе на основе теории оптических микрорезонаторов описаны свойства световых волн в кольцевом микрорезонаторе с керровской нелинейностью. Изучены линейные и нелинейные оптические свойства материала резонатора (халькогенидные стекла) в области малых оптических потерь. Проведен расчет резонансных частот и их добротности в халькогенидном трековом микрорезонаторе из стекла разных составов (сульфид мышьяка и селенид мышьяка) с учетом оптических потерь в стекле. Рассчитан нелинейный набег фазы световой волны для микрорезонаторов из стекла разных составов (сульфид мышьяка и селенид мышьяка) с учетом дисперсии нелинейного показателя преломления и оптических потерь в стекле.

Установлено, что добротность выше у микрорезонатора из сульфида мышьяка, поскольку оптические потери в этом стекле меньше. Наибольшие значения добротности имеет в ближнем ИК диапазоне и уменьшается с ростом длины волны. Нелинейный набег фазы, соответственно, падает на порядок при изменении длины волны от 1 мкм до 7 мкм. Определяющим фактором этого эффекта является спектральная зависимость квадрата показателя преломления, которая уменьшается от края полосы фундаментального поглощения стекла в сторону больших длин волн.

Список использованных источников

1. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: ФИЗМАЛИТ, 2011. 415 с.
2. Müller C. Foundations of the mathematical theory of electromagnetic waves. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1969.
3. Мамрашев А. А., Наливайко В. И., Николаев Н. А. Оптические свойства халькогенидных стекол в терагерцевой области спектра // Известия РАН, сер. физ. 2013. Т.77, № 9. С. с. 1327-1329.
4. Xia Fengnian, Sekaric Lidija and Vlasov Yurii A. Mode conversion losses in silicon-on-insulator photonic wire based racetrack resonators // OPTICS EXPRESS.2006. Vol. 14, Iss. 9. P. 3872 – 3886. DOI :<https://doi.org/10.1364/OE.14.003872>
5. Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, vorgelegt von Pascal Del'Haye aus München, München, den 23.02.2011. S.4-5.
6. Romanova E., Konyukhov A., Kuzutkina Y., Melnikov A. Dispersion tailoring in chalcogenide slot waveguides, slot arrays and bandgap structures // Proc. of: 14th International Conference on Transparent Optical Networks Networks (Coventry, UK), July 2-5, 2012. 4 pp.
7. Wang P. et al. // IEEE Photon. Technol. Lett., 2012. Vol. 24, No.13. P. 1103-1105.
8. Weber, Handbook of optical materials. CRC press, 2003.
9. Vanier F. et al. // Proc. of 2012 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, Banff, AB, 2012, 45-46.
10. Cai M., Painter O., and Vahala K. J. Observation of Critical Coupling in a Fiber Taper to a Silica-Microsphere Whispering-Gallery Mode System // Physical Review Letters. 2000. Vol. 85. P. 74–77.
11. Ogusu Kazuhiko, Oda Yosuke. Modeling of the dynamic transmission properties of chalcogenide ring resonators in the presence of fast and slow nonlinearities //OPTICS EXPRESS. 2011. Vol. 19, No. 2. P.649-659.