

А.К. АГАРОНЯН, О.В. БАГДАСАРЯН, Т.М. КНЯЗЯН

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ МИКРОРЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ СВЧ-ОПТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

Проведено исследование оптических характеристик электрооптического модулятора на основе микрорезонатора Фабри-Перо, состоящего из слоя LiNbO_3 и многослойных зеркал из SiO_2/Si . Три пары четвертьволновых слоев Si/SiO_2 обеспечивают коэффициент отражения 0,998 на длине волны $\lambda_0=1,55$ мкм, что достаточно для получения необходимого узкополосного спектра пропускания микрорезонатора. Металлизация двух поперечных граней пластины LiNbO_3 позволяет наложением СВЧ поля управлять световым потоком, проходящим через пластину. Предлагаемый электрооптический модулятор имеет более простую конструкцию по сравнению с микродисковым и по своим параметрам идентичен последнему, который в настоящее время применяется в современных СВЧ-оптических приемниках.

Ключевые слова: СВЧ-оптический приемник, паразитное излучение гетеродина, электрооптический модулятор, микрорезонатор Фабри-Перо, структура $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$, численное моделирование, метод единого выражения.

В последние десятилетия системы связи СВЧ диапазона получили большое распространение как в гражданской, так и в военной сферах. Известно, что радиоприемники супергетеродинного типа обеспечивают наилучшие параметры, благодаря чему они получили широкое применение в системах связи [1]. Однако с ростом рабочей частоты супергетеродинных радиоприемников проявляется их недостаток в виде паразитного излучения гетеродина. Это излучение становится источником помех для соседних радиоустройств, и, что крайне нежелательно, по нему можно установить местонахождение радиопремника, а следовательно, и объекта специального назначения. Существуют способы уменьшения паразитного излучения гетеродина. Одним из них является применение задерживающего полосового фильтра в антенной цепи приемника. Наличие последнего приводит к уменьшению паразитного излучения, но не к его исчезновению. Уменьшение паразитного излучения возможно также за счет серьезного усложнения схемы супергетеродинного приемника [2]. Однако этот способ увеличивает габариты приемника, потребление энергии и к тому же не позволяет полностью избавиться от паразитного излучения. С целью кардинального решения этой проблемы целесообразно проводить преобразование в оптический диапазон [3,4]. В таком комбинированном приемнике, кроме

избавления от паразитного излучения гетеродина в радиодиапазоне, удастся получить необходимые чувствительность, избирательность и полосу пропускания, имея при этом малые размеры, вес и потребление энергии [3,5]. В этих приемниках радиосигнал после усилителя радиочастоты преобразовывается в оптическую область частот, после чего применяется оптический супергетеродинный прием. Фотодетектор выделяет на выходе оптической части приемника полезный сигнал. Преобразование и обработка высокочастотных радиосигналов в оптическом диапазоне облегчают задачу реализации высокочувствительных приемников и скрытность приемного устройства. Блок-схема комбинированного СВЧ – оптического приемника представлена на рис.1.

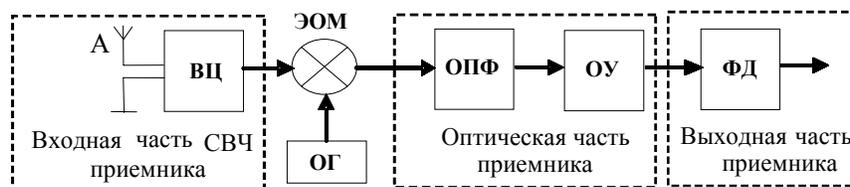


Рис.1. СВЧ - оптический супергетеродинный приемник: А-антенна, ВЦ - входная цепь, ЭОМ - электрооптический модулятор, ОГ - оптический гетеродин, ОПФ - оптический полосовой фильтр, ОУ - оптический усилитель, ФД - фотодетектор

В реализации СВЧ – оптического приемника важное место занимает электрооптический модулятор. В системах оптической связи применяются различные типы электрооптических модуляторов: двухканальные волноводные, Маха-Цендера, электроабсорбционные и др. [6]. Однако эти модуляторы не обладают резонаторными свойствами в СВЧ диапазоне, что является важным для реализации высокочувствительного и высокоизбирательного СВЧ приемника. В качестве подходящего электрооптического модулятора был предложен микродисковый резонатор на основе электрооптического кристалла LiNbO_3 [3,5,7]. Микродисковые модуляторы обеспечивают эффективное СВЧ-оптическое преобразование, т.к. являются одновременно и оптическими, и СВЧ резонаторами. Структурная схема приемника на основе электрооптического микродискового модулятора приведена на рис.2 [3,5,7].

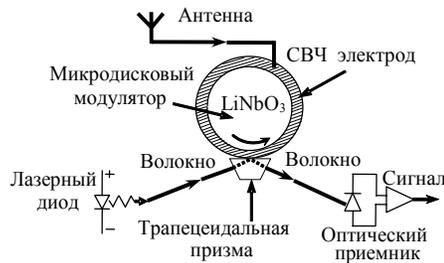


Рис.2. СВЧ- оптический LiNbO₃ микро- дисковый приемник

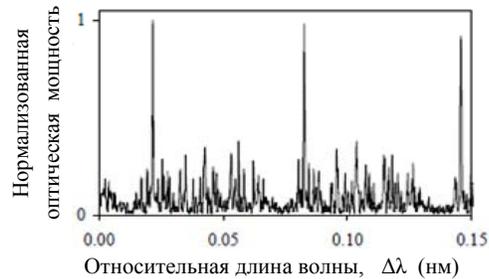


Рис.3. Оптический спектр микродискового ре-зонатора (диаметр диска $D = 5,85$ мм, толщина $h = 0,7$ мм, длина волны $\lambda_0 = 1,55$ мкм) [3,5]

Микродисковый модулятор состоит из тонкого диска LiNbO₃ (толщиной $h \leq 1$ мм) с радиусом $R = 2,9$ мм. Боковины диска оптически полированы с радиусом кривизны R_s , который обычно равен радиусу диска [5,7]. Для работы в СВЧ диапазоне резонатор имеет медные электроды, расположенные в верхней части диска в виде кольца с радиусом, равным радиусу диска, и сплошного слоя в нижней части диска. Радиочастотный сигнал подается на металлическое кольцо от микрополосковой линии, а оптические моды шепчущей галереи внутри микродиска возбуждаются с помощью одномодового лазера ($\lambda_0 \approx 1,55$ мкм). Ввод и вывод оптического излучения из микродиска осуществляются с помощью трапецеидальной призмы, которая при зазоре порядка длины волны обеспечивает необходимую степень связи с микрорезонатором. Микродисковые резонаторы обладают высокой добротностью, что обусловлено незначительными потерями в СВЧ области за счет слабого электромагнитного излучения от краев электродов и малых потерь в LiNbO₃. В оптическом диапазоне высокая добротность обусловлена малым излучением мод шепчущей галереи. Экспериментально полученный оптический спектр микродискового резонатора представлен на рис.3 [7]. Микродисковый резонатор имеет эквидистантные пики пропускания и области сильного отражения. Узость резонансных пиков пропускания обусловлена высокой добротностью микродиска, а область высокого отражения, называемая свободным спектральным диапазоном (ССД), определяется диаметром микродиска. Для приведенного микродиска добротность составляет $4 \cdot 10^6$, а ССД - $7,67$ ГГц. Резонансное взаимодействие СВЧ излучения со световой волной в микрорезонаторе происходит при условии, когда частота СВЧ волны кратна ССД [5,7]. В этом случае приложенное СВЧ поле меняет диэлектрическую проницаемость LiNbO₃ в области наибольшей интенсивности оптической волны (по периметру диска), и, как следствие, происходит

смещение резонансного пика прохождения, что приводит к модуляции интенсивности оптической волны.

Следует отметить, что конструкция микродискового модулятора является сложной в реализации: требует высококачественной полировки боковых поверхностей микродиска и точной настройки дистанции между призмой и микродиском (зазор порядка длины оптической волны) для получения необходимого коэффициента связи.

С целью избавления от прецизионной настройки и упрощения конструкции нами предлагается конструкция на основе микрорезонатора Фабри-Перо (Ф-П). Известно, что микродисковые и Ф-П оптические микрорезонаторы идентичны по оптическим характеристикам и математическому описанию, и, как следствие, выбор типа резонатора обусловлен возможностями его реализации [8]. Предлагаемый электрооптический модулятор на основе микрорезонатора Ф-П представлен на рис.4. Рабочая часть микрорезонатора выполнена на основе пластины LiNbO_3 , покрытой сверху и снизу слоем меди. Для реализации высокодобротного оптического резонатора необходимо рассчитать конструкцию и выбрать материал зеркал.

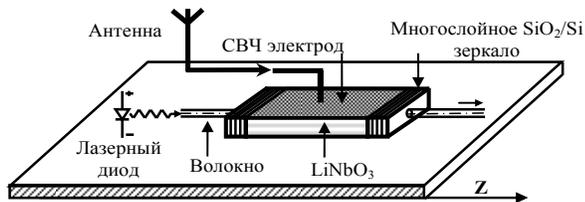


Рис.4. Электрооптический модулятор на основе микрорезонатора Фабри-Перо с многослойными зеркалами

Численное моделирование проводилось с помощью метода единого выражения (МЕВ) [9-11]. В МЕВ решение уравнения Гельмгольца в каждом слое рассматриваемой структуры представляется в виде единого выражения, а не в виде встречных волн, как в классическом подходе. Благодаря этому не требуется предварительное задание формы волны в каждом слое структуры, что делает МЕВ удобным инструментом в исследованиях оптических структур, состоящих из слоев с любыми комплексными значениями диэлектрических и магнитных проницаемостей.

Как показало численное исследование оптических характеристик микрорезонатора, применение металлических зеркал (Ag, Au) не обеспечивает коэффициент отражения выше 95%. С целью увеличения коэффициента отражения зеркал и избавления от потерь в них целесообразно перейти к многослойным диэлектрическим зеркалам. Для этого предлагаем использовать четвертьволновые слои Si/SiO_2 . Как следует из литературы, к LiNbO_3 можно надежно связать слой SiO_2 [12], а Si

совместим с SiO₂ и обеспечивает большой контраст диэлектрических проницаемостей. Система из трех пар Si/SiO₂ обеспечивает коэффициент отражения 0,998, что достаточно для получения высокой добротности, т.е. необходимой узости пиков пропускания микрорезонатора. На рис.5 приведено распределение диэлектрических проницаемостей слоев микрорезонатора.

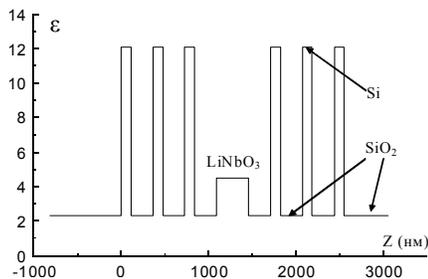


Рис.5. Распределение диэлектрической проницаемости вдоль микрорезонатора Ф-П, оптические волноводы с обеих сторон микрорезонатора:

$$\epsilon_{Si} = 12,1, \epsilon_{SiO_2} = 2,33, \epsilon_{LiNbO_3} = 4,5$$

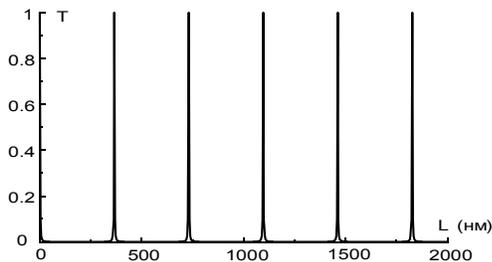


Рис.6 Зависимость коэффициента прохождения T микрорезонатора Ф-П с зеркалами из трех пар четвертьволновых слоев Si/SiO₂ от длины слоя LiNbO₃: $\lambda_0 = 1,55 \text{ мкм}$

Спектр оптической энергии, проходящей через микрорезонатор от длины слоя LiNbO₃ при фиксированной длине оптической волны, представляет собой последовательность эквидистантных пиков (рис.6). Распределения амплитуды электрической компоненты электромагнитной волны вдоль микрорезонатора Ф-П для точек максимального и минимального прохождения представлены на рис.7.

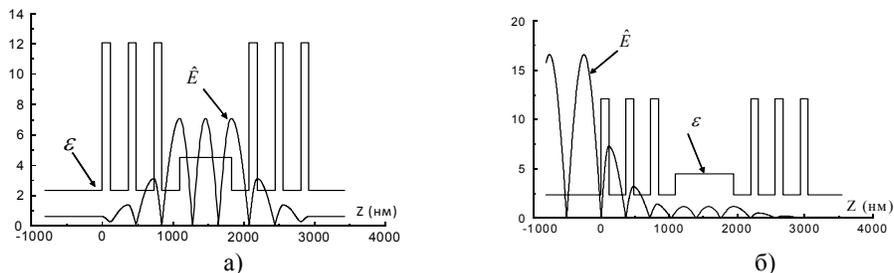


Рис.7. Распределения амплитуды электрической компоненты электромагнитной волны \hat{E} вдоль микрорезонатора Ф-П: а- в точке полной прозрачности ($T=1$, $L=730 \text{ нм}$); б- в точке полного отражения ($T=0$, $L=900 \text{ нм}$). Толщины слоев зеркала: $L_{Si} = 111 \text{ нм}$, $L_{SiO_2} = 253 \text{ нм}$, $\lambda_0 = 1,55 \text{ мкм}$

В точке полного прохождения рис.7а распределение поля симметрично относительно середины микрорезонатора Ф-П и имеет амплитуду существенно выше, чем в зеркалах и окружающей среде (SiO_2 оптический волновод). Поле вне резонатора имеет постоянную амплитуду, что характерно для однородной бегущей плоской волны. Как видно из рис.7б, в точке полного отражения ($T=0$) распределение поля в микрорезонаторе Ф-П имеет осциллирующий характер с убыванием огибающей в направлении выхода из структуры. Распределение поля перед структурой ($z<0$) соответствует стоячей волне, образованной наложением падающей и отраженной волн. С ростом длины слоя L LiNbO_3 характер распределения поля резонатора сохраняется, только в точках полного прохождения ($T=1$) имеет место увеличение числа осцилляций поля в слое LiNbO_3 .

Для получения микрорезонатора Ф-П, эквивалентного микродисковому, длина LiNbO_3 должна быть равна половине длине окружности микродиска [8]. На рис.8 приведена спектральная зависимость такого микрорезонатора Ф-П. Проведенные расчеты позволили определить добротность микрорезонатора Ф-П, которая оказалась равной $3,9 \cdot 10^6$ (в случае зеркал из трех пар Si/SiO_2) и $ССД -7,78 ГГц$. При меньшем числе пар слоев (двух пар) добротность падает до $2,7 \cdot 10^6$. Полученные значения близки к аналогичным значениям этих параметров для микродискового микрорезонатора [5,7]. В рассматриваемом электрооптическом модуляторе СВЧ сигнал изменяет величину диэлектрической проницаемости LiNbO_3 , а именно, увеличивает ее значение [5,7].

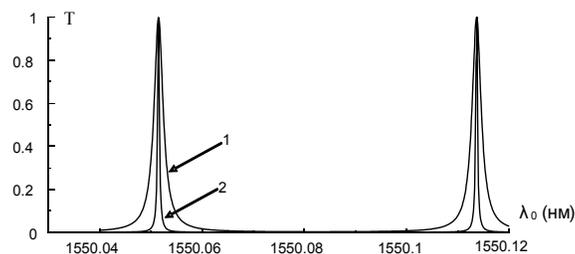


Рис. 8. Спектральная зависимость коэффициента прохождения T от длины волны падающего излучения. Кривая 1 - для случая двух пар Si/SiO_2 в зеркалах структуры, кривая 2 - для случая трех пар Si/SiO_2 в зеркалах структуры. $L=9,106$ мкм

Увеличение диэлектрической проницаемости рабочей области резонатора приводит к смещению пика прозрачности интерферометра Ф-П в сторону более длинных волн [13]. Для оценки влияния изменения $\epsilon_{\text{LiNbO}_3}$ на пропускательную характеристику микрорезонатора были проведены расчеты, результаты которых показаны на рис. 9 и 10.

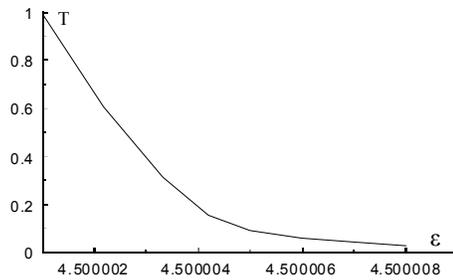


Рис. 9. Зависимость коэффициента прохождения T от изменения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{LiNbO}_3}$ при фиксированной длине волны $\lambda_0=1550,0515 \text{ нм}$

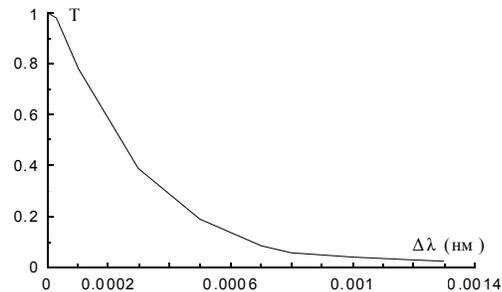


Рис. 10. Зависимость коэффициента прохождения T от смещения пика максимального прохождения вправо при изменении $\varepsilon_{\text{LiNbO}_3}$. $T=1$ при $\lambda_0=1550,0515 \text{ нм}$

Полученные зависимости позволяют оценить чувствительность электрооптического модулятора. Для передачи цифровых сигналов, предположив убывание прохождения оптического излучения до уровня 0,2, что достигается при изменении $\Delta\varepsilon \approx 3,8 \cdot 10^{-6}$, чувствительность модулятора можно определить с помощью выражения $E_{\text{СВЧ}} = 2 \Delta \lambda n_o / \lambda n_e^3 r(33)$ [3], где $n_e = 2,14$ - индекс преломления LiNbO_3 по ординарной оси, а $n_o = 2,21$ - показатель преломления LiNbO_3 по экстраординарной оси, $r(33)$ - электрооптический эффект, равный $30,8 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ для LiNbO_3 . Сдвигу максимума прохождения $\Delta\lambda = 0,0005 \text{ нм}$ соответствует $T = 0,2$. Это дает для напряженности приложенного СВЧ поля $E_{\text{СВЧ}} = 4,7 \text{ В/мм}$, что согласуется с чувствительностью микродискового модулятора [3,5].

Заклучение. С помощью МЭВ проведено численное моделирование электрооптического модулятора на основе микрорезонатора Ф-П для работы в СВЧ-оптическом приемнике. Микрорезонаторная структура, состоящая из слоя LiNbO_3 с нанесением на торцах трех пар четвертьволновых слоев Si/SiO_2 , позволяет получить оптические спектральные характеристики, идентичные характеристикам микродисковых оптических резонаторов. Последние применяются в современных СВЧ-оптических приемниках, но трудоемки в исполнении и использовании. Основываясь на полученных результатах моделирования, можно утверждать, что электрооптический модулятор на основе микрорезонатора Ф-П может быть предложен в качестве альтернативы микродисковому микрорезонатору. Электрооптический модулятор на основе микрорезонатора имеет более простую планарную конструкцию, лишен призмного элемента связи и не требует прецизионной настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сифоров В. И.** Радиоприемные устройства. -М.: Воениздат, 1976.-С. 25-57.
2. Patent 5179728 US. Spurious product and local oscillator radiation suppression system for use in superheterodyne radio receivers/ **R.A. Sowadski.**- 767736 filed on 1991.
3. **Cohen D.A., Levi A.F.J.** Microphotonic components for a mm-wave receiver// Solid-State Electronics. - 2001. - Vol. 45. - P. 495 - 505.
4. **Агаронян А.К.** Переход в оптическую область как перспективный способ избавления от паразитного излучения супергетеродинного радиоприемника// Вестник Гос. инж. ун-та Армении (Политехник): Сб. научн. и метод. ст.-Ереван, 2010.-Т.2№N 1. - С. 215-218.
5. **Hossein-Zadeh M.** Electro-optic microdisk RF-optic wireless receiver: Doctor of philosophy electrical engineering dissertation.- USC 2004. (www.usc.edu/alevi)
6. **Hunsperger R.G.** Integrated Optics: Theory and Technology. Fifth edition. - 2002.
7. **Hossein-Zadeh M., Levi A.F.J.** 14.6 - GHz LiNbO₃ Microdisk Photonic Self - Homodyne RF Receiver// IEEE Trans. Microwave Theory Tech.- 2006. - Vol. 54№N 2. - P. 821-831.
8. Fundamental Limitations of Optical Resonator Based High-Speed EO Modulators/ **I.L. Gheorma** et al. // IEEE Photonics Technology Letters. - 2002. - Vol. 14№N 6. - P. 795-797.
9. **Baghdasaryan H.V.** Method of Backward Calculation // In Photonic Devices for Telecommunications: how to model and measure/ Ed.G. Guekos.- Springer.- 1999. - P. 56-65.
10. **Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M.** Problem of plane EM wave self-action in multilayer structure: an exact solution// Opt. and Quant. Electron. - 1999.- Vol. 31, N 9/10.- P.1059-1072.
11. **Симонян Р.И., Багдасарян О.В., Князян Т.М.** Анализ оптических характеристик распределенных брегговских отражателей с учетом потерь в слоях// Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58№ N 3. - С. 555-562.
12. **Wu X. L., Gu Y., Tang N., Deng S. S., Bao X. M.** Light emissions from LiNbO₃/SiO₂/Si structures// J. Physics: Condensed Matter.-2003.-15. - L25 - L30.
13. **Born Max and Wolf Emil** Principles of optics// Seventh (expanded) edition.-UK, 2003.

ГИУА(П). Материал поступил в редакцию 07.04.2011.

Ա.Կ. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ, Հ.Վ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Թ.Մ. ԿՆՅԱԶՅԱՆ

ՖԱԲՐԻ-ՊԵՐՈՒ ՄԻԿՐՈՈՒԵԶՈՆԱՏՈՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԷԼԵԿՏՐՈՊՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂՈՒԼԱՐԱՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԳԲՀ-ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԸՆԴՈՒՆԻՉԻ ՀԱՄԱՐ

Կատարված է LiNbO_3 շերտից և Si/SiO_2 բազմաշերտ հայելիներից կազմված Ֆաբրի-Պերո միկրոռեզոնատորի հիման վրա էլեկտրաօպտիկական մոդուլարարի օպտիկական բնութագրերի հետազոտումը: Երեք զույգ Si/SiO_2 շերտերը ապահովում են 0,998 անրադարձման գործակից՝ $\lambda_0=1,55$ մկմ ալիքի երկարության դեպքում, որը բավարար է միկրոռեզոնատորի անհրաժեշտ թողարկման նեղ շերտ սպեկտր ստանալու համար: LiNbO_3 թիթեղի երկու լայնական կողմերի մետաղացումը թույլ է տալիս կիրառվող ԳԲՀ դաշտով ղեկավարել թիթեղով անցնող լուսային հոսքը: Առաջարկվող էլեկտրաօպտիկական մոդուլարարն ունի ավելի պարզ կառուցվածք, քան միկրոսկավառակայինը և իր բնութագրերով նույնական է վերջինին, որը ներկայումս կիրառվում է ժամանակակից ԳԲՀ-օպտիկական ընդունիչներում:

Առանցքային բառեր. ԳԲՀ-օպտիկական ընդունիչ, հետերոդինի մակաբուծային ճառագայթում, էլեկտրաօպտիկական մոդուլարար, միկրո-ռեզոնատոր Ֆաբրի-Պերո, $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ կառուցվածք, թվային մոդելավորում, միասնական արտահայտության մեթոդ:

A.K. AHARONYAN, H.V. BAGHDASARYAN, T.M. KNYAZYAN

NUMERICAL MODELLING OF FABRY-PEROT MICRORESONATOR BASED ELECTRO-OPTICAL MODULATOR OF MICROWAVE - OPTICAL RECEIVER

An analysis of optical characteristics of an electro-optical modulator based on Fabry-Perot microresonator consisting of LiNbO_3 layer and multilayer Si/SiO_2 mirrors is performed. The three pairs of Si/SiO_2 provide the reflection coefficient of 0.998 at the wavelength of $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, which is sufficient to obtain a narrowband transmission spectrum of the electro-optical modulator. The metallization of the two transverse facets of the LiNbO_3 plate allows to control the transmission of light flow through the plate by applying a microwave field. The parameters of the suggested electro-optical modulator are identical to that of the microdisk modulator currently used in VHF-optical receiver. The electro-optical modulator has a simpler structure than the microdisk one.

Keywords: microwave-optical receiver, heterodyne parasitic radiation, electro-optical modulator, Fabry-Perot microresonator, $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structure, numerical modelling, method of single expression.