

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.

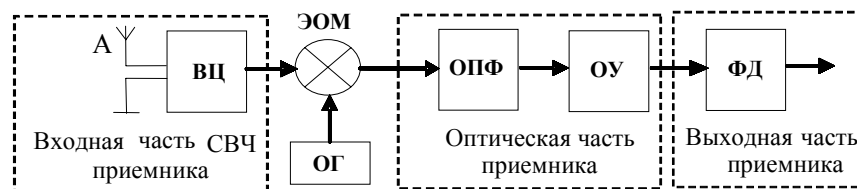


Рис.1. СВЧ - оптический супергетеродинный приемник: А-антенна, ВЦ - входная цепь, ЭОМ - электрооптический модулятор, ОГ- оптический гетеродин, ОПФ- оптический полосовой фильтр, ОУ- оптический усилитель, ФД- фотодетектор

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].

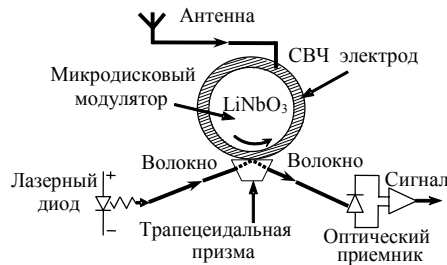


Рис.2. СВЧ- оптический LiNbO₃ микро- дисковый приемник

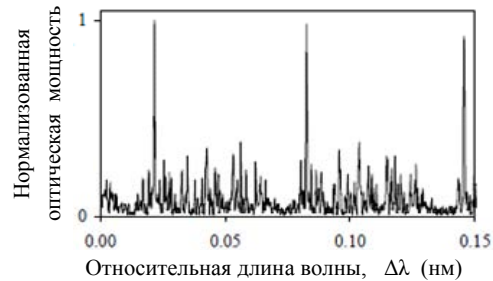


Рис.3. Оптический спектр микродискового ре-зонатора (диаметр диска $D = 5,85$ мм, толщина $h = 0,7$ мм, длина волны $\lambda_0 = 1,55$ мкм) [3,5]

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.

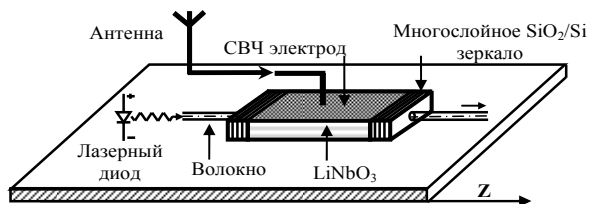


Рис.4. Электрооптический модулятор на основе микрорезонатора Фабри-Перо с многослойными зеркалами

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 SiO_2 и обеспечивает большой контраст диэлектрических проницаемостей. Система из трех пар Si/SiO_2 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.

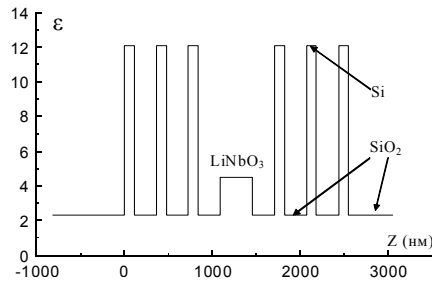


Рис.5. Распределение диэлектрической проницаемости вдоль микрорезонатора Ф-П, оптические волноводы с обеих сторон микрорезонатора:

$$\varepsilon_{\text{Si}} = 12,1, \varepsilon_{\text{SiO}_2} = 2,33, \varepsilon_{\text{LiNbO}_3} = 4,5$$

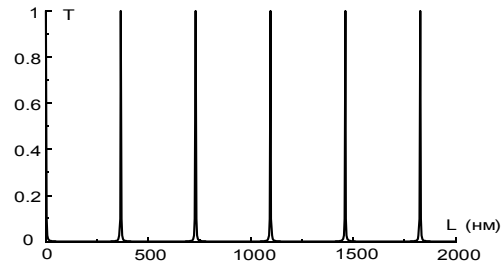


Рис.6 Зависимость коэффициента прохождения T микрорезонатора Ф-П с зеркалами из трех пар четвертьволновых слоев Si/SiO_2 от длины слоя LiNbO_3 : $\lambda_0 = 1,55 \text{ мкм}$

Спектр оптической энергии, проходящей через микрорезонатор от длины слоя LiNbO_3 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.

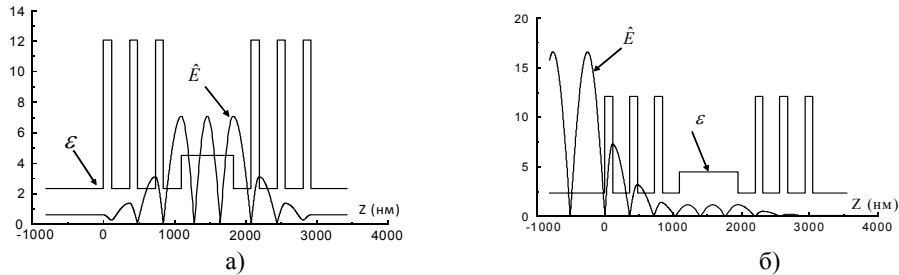


Рис.7. Распределения амплитуды электрической компоненты электромагнитной волны $\hat{E}$ вдоль микрорезонатора Ф-П: а- в точке полной прозрачности ($T=1$, $L=730 \text{ нм}$); б- в точке полного отражения ($T=0$, $L=900 \text{ нм}$). Толщины слоев зеркала: $L_{\text{Si}} = 111 \text{ нм}$, $L_{\text{SiO}_2} = 253 \text{ нм}$, $\lambda_0 = 1,55 \text{ мкм}$

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 $\text{ССД} - 7,78 \text{ ГГц}$. 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].

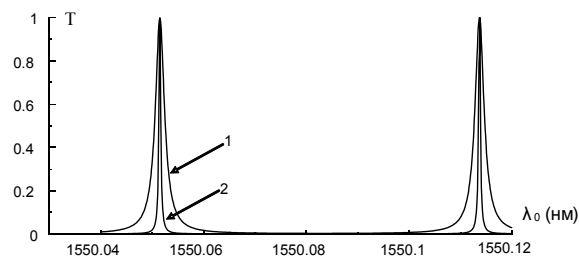


Рис. 8. Спектральная зависимость коэффициента прохождения T от длины волны падающего излучения. Кривая 1 - для случая двух пар Si/SiO_2 в зеркалах структуры, кривая 2 - для случая трех пар Si/SiO_2 в зеркалах структуры. $L=9,106 \text{ мкм}$

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.

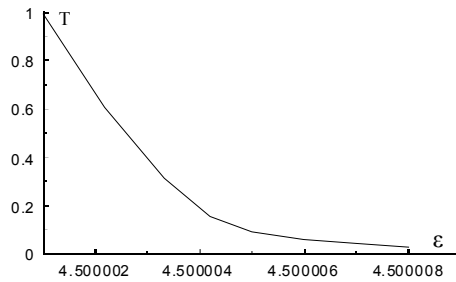


Рис. 9. Зависимость коэффициента прохождения T от изменения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{LiNbO}_3}$ при фиксированной длине волны $\lambda_0 = 1550,0515 \text{ нм}$

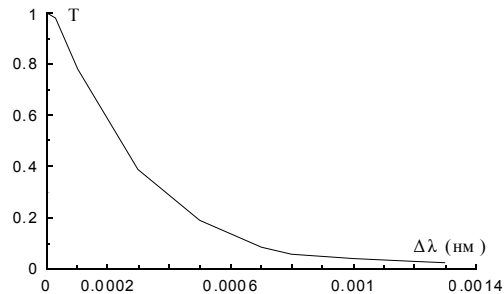


Рис. 10. Зависимость коэффициента прохождения T от смещения пика максимального прохождения вправо при изменении $\varepsilon_{\text{LiNbO}_3}$. $T=1$ при $\lambda_0 = 1550,0515 \text{ нм}$

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].

Закключение. 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. ԲԱԴԴԱՍՐԻԱՆ, Թ.Մ. ԿՆՅԱԶՅԱՆ

**ՖԱԲՐԻ-ՊԵՐՈՒ ՄԻԿՐՈՌԵԶՈՆԱՏՈՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԷԼԵԿՏՐՈՊԵՐՄԵՆՏԱԿԱՆ
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 դեկավարել 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.