

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.3.001

УДК 537.868.3:621.372.5

Частотные характеристики полосковых модулей формирования квазихаотических сигналов на основе объемных нелинейно-оптических кристаллов

А. А. Арутюнян^{1*}, Н. Д. Малютин^{1**}, Г. А. Малютин¹,
С. Н. Подзывалов², Н. Н. Юдин^{3,4}

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 40

²ООО «Лаборатория оптических кристаллов», Россия, 634040, г. Томск, ул. Владимира Высоцкого, 28 стр. 7

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск, 63405, пр. Ленина, 36

⁴Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

✉ *arutyunyan18@mail.ru **ndm@main.tusur.ru

Аннотация

В работе проведено экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов матрицы рассеяния полосковых модулей на основе копланарной полосковой линии с частичным диэлектрическим заполнением в виде объемных нелинейно-оптических кристаллов кварца SiO_2 , титанил-фосфата калия KTiOPO_4 (КТР), дифосфида цинка германия ZnGeP_2 , ниобата лития LiNbO_3 . Показано возникновение эффекта формирования квазихаотических колебаний в модулях, содержащих объемные кристаллы KTiOPO_4 , ZnGeP_2 , LiNbO_3 при подаче на вход ЛЧМ-сигналов с быстрым переключением направления падающей волны в тракте приема-передачи векторного анализатора цепей. Введены параметры для сравнительной характеристики материалов кристаллов. Определена полная (развернутая) фаза коэффициента передачи модулей. Проведены анализ ее физического смысла и обработка полной фазы, позволившая построить алгоритм оценки частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости кристаллов. Исследованные модули могут выполнять функцию формирователей квазихаотических сигналов СВЧ.

Ключевые слова

Нелинейно-оптические кристаллы, СВЧ, частотные характеристики, квазихаотический сигнал, формирователь, копланарная полосковая линия передачи.

Для цитирования

Арутюнян А. А., Малютин Н. Д., Малютин Г. А., Подзывалов С. Н., Юдин Н. Н. Частотные характеристики полосковых модулей формирования квазихаотических сигналов на основе объемных нелинейно-оптических кристаллов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(3):227–249. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.001.

Frequency Characteristics of Strip Modules of the Quasi-chaotic Signals Formation Based on Bulk Nonlinear Optical Crystals

A. A. Arutyunyan^{1*}, N. D. Malyutin^{1}, G. A. Malyutin¹,
S. N. Podzyvalov², N. N. Yudin^{3,4}**

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, 634050, Tomsk, Russia

²LLC «Laboratory of optical crystals», 28 building 7, Vladimir Vysotsky Str.,
634040, Tomsk, Russia

³National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, 634050,
Tomsk, Russia

⁴Institute of Atmospheric Optics named after Academician Zuev SB RAS, 1,
Academician Zueva Square, 634055, Tomsk, Russia

⁴V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences (IAO SB RAS), 1, Academician Zuev Square, 634055,
Tomsk, Russia

✉ *arutyunyan18@mail.ru; **ndm@main.tusur.ru

Abstract

In this paper the experimental study of frequency dependences of scattering matrix coefficients of strip modules based on a coplanar strip line with partial dielectric filling in the form of bulk non-linear optical crystals of quartz, potassium titanium phosphate (KTP), zinc germanium diphosphide, lithium niobate has been performed. The appearance of the effect of forming quasi-chaotic oscillations in modules containing KTiOPO_4 , ZnGeP_2 , LiNbO_3 bulk crystals when LFM signals are fed at fast switching of incident wave direction in the receiving and transmitting tract of the vector network analyzer is demonstrated. Parameters of comparative characterization of crystal materials are introduced. The complete phase of the modulus transmission coefficient is determined. The analysis of its physical sense is made, followed by processing complete phase shift, which provides the possibility to develop the algorithm of estimating the frequency dependence

of crystal's relative permittivity. The studied modules may be used as formers of quasi-chaotic microwave signals.

Keywords

Nonlinear optical crystals, microwave, frequency characteristics, quasi-chaotic signal, shaper, coplanar strip transmission line.

For citation

Arutyunyan A. A., Malyutin N. D., Malyutin G. A., Podzyvalov S. N., Yudin N. N. Frequency characteristics of strip modules of the quasi-chaotic signals formation based on bulk nonlinear optical crystals. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(3):227–249. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.001

Введение

В настоящее время возрастает интерес к созданию метаматериалов и метасред, обладающих особенными свойствами искусственного происхождения, не характерными для природных материалов. Поиски необычных свойств метаматериалов обусловлены разными целями. И это прежде всего стремление обнаружить ранее малоизученные или неизвестные физические явления в материалах, например существование вещества с одновременно отрицательными диэлектрической проницаемостью $\epsilon < 0$ и магнитной проницаемостью $\mu < 0$ [1, 2]. Важны также прикладные аспекты получения метаматериалов с разными свойствами для получения невзаимности обратного рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) [3–5], преобразования поляризации ЭМВ [6], обеспечения более высокой эффективности поглощения колебаний [7, 8] и решения других проблем современной радиоэлектроники [9].

К настоящему времени в природе не обнаружены материалы с «дважды отрицательными» $\epsilon < 0$ и $\mu < 0$ [2]. Поэтому поиск таких материалов проводится в искусственно создаваемых средах (киральных средах), называемых также метасредами. Некоторые полезные свойства таких сред удается получить в системах с пространственной модуляцией [10], а также путем создания схемных решений в виде невзаимных антенн [11, 12]. В работе [13] проведено экспериментальное исследование параметров рассеяния устройства в виде отрезка копланарной полосковой линии (КПЛ, англ. — CPL) с частичным диэлектрическим заполнением в виде объемного кристалла ниобата лития. Показано возникновение квазихаотических колебаний в СВЧ-диапазоне от 5 до 20 ГГц. Предложено использовать такое устройство в качестве формирователя квазихаотических сигналов и рассматривать как новый элемент метасреды. В [14] проведено моделирование невзаимного

обратного рассеяния СВЧ-волн кристаллами ниобата лития при возбуждении в них ультразвуковых колебаний.

Цель настоящей работы — исследование частотных характеристик модулей формирования квазихаотических сигналов на основе объемных нелинейно-оптических кристаллов кварца SiO_2 , титанил-фосфата калия KTiOPO_4 (КТП), дифосфида цинка германия ZnGeP_2 , ниобата лития LiNbO_3 , сопоставление их амплитудных и фазочастотных характеристик в широком диапазоне частот.

Исследуемые материалы и конструкция установки для измерения частотных характеристик

В ходе работы использовались различные образцы кристаллов (рис. 1): кварца (*a*); KTiOPO_4 (*b*); дифосфида цинка германия ZnGeP_2 (*c*); ниобата лития LiNbO_3 (*d* и *e*).

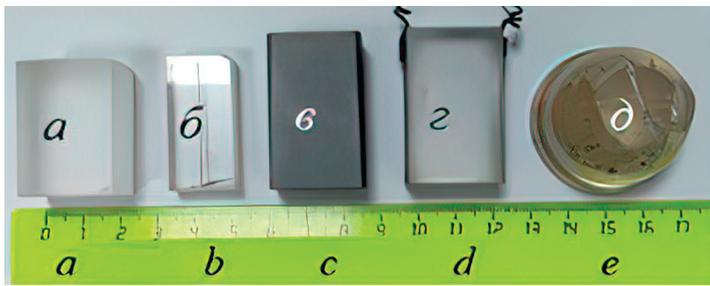


Рис. 1. Исследуемые образцы кристаллов:

a — кварц; *b* — КТП; *c* — дифосфид цинка германия; *d* — ниобат лития с нанесенными электродами; *e* — заготовка ниобата лития цилиндрической формы

Fig. 1. Samples of crystals to be studied:

a — quartz; *b* — КТП; *c* — germanium zinc diphosphide; *d* — lithium niobate with applied electrodes; *e* — cylindrical lithium niobate blank

Измерение частотных характеристик проводилось на векторном анализаторе цепей (ВАЦ) P4226 компании АО «НПФ «Микран» при идентичных условиях для всех вариантов исполнения модулей: двухпортовая калибровка, диапазон частот от 10 МГц до 25 ГГц. Схема измерения представлена на рис. 2. Модуль на основе КПЛ при помощи двух фазостабильных кабелей 2 типа КСФ26-1ЗРН-700 подключается к векторному анализатору цепей 1 типа P4226, на КПЛ устанавливаются объемные нелинейно-оптические кристаллы 3 разных видов. Фотография измерительной установки с включенным модулем с кристаллом кварца показана на рис. 3.

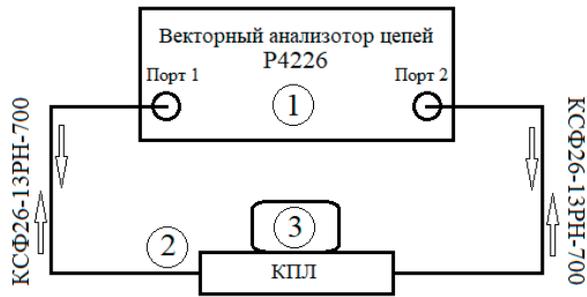


Рис. 2. Схема измерения частотных характеристик на векторном анализаторе цепей

Fig. 2. Schematic diagram for measuring frequency response on a vector network analyzer



Рис. 3. Фотография измерительной установки с включенным модулем с кристаллом кварца

Fig. 3. Photograph of measurement setup with module and quartz crystal installed

Экспериментальные результаты

Перед исследованиями частотных характеристик модулей с кристаллами было проведено измерение коэффициентов матрицы рассеяния $S_{i,j}$ ($i, j = 1, 2$) отрезка копланарной полосковой линии без кристалла. Затем устанавливался один из указанных видов кристаллов и вновь измерялись частотные зависимости $S_{i,j}$. Было установлено, что во всех измерениях с погрешностью, обеспечиваемой ВАЦ P4226, выполнялось условие $S_{11} = S_{22}$, $S_{21} = S_{12}$. На рис. 4а представлено сравнение частотных зависимостей коэффициента отражения $|S_{11}(f)|$ модуля КПЛ с воздушным заполнением, т. е. без кристалла (синий цвет) и с размещенным на ней кристаллом кварца (красный цвет). Рис. 4б показывает зависи-

мость коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ модуля в отсутствие кристалла и с кристаллом SiO_2 .

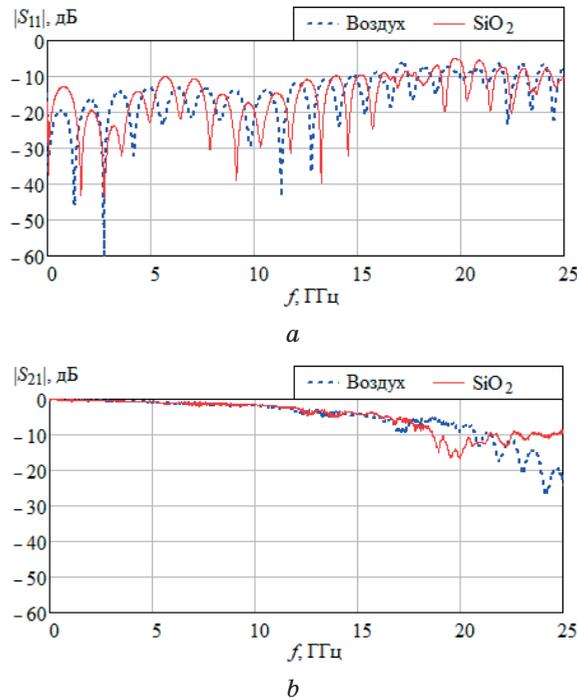


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения $|S_{11}(f)|$ (a) и коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ (b) модуля с воздушным заполнением верхней части конструкции (синий цвет) и с размещенным на КПЛ кристаллом кварца (красный цвет)

Fig. 4. Frequency dependence of reflection coefficient $|S_{11}(f)|$ (a) and transfer coefficient $|S_{21}(f)|$ (b) of module with air-filled top structure (blue) and with quartz crystal placed on the CPL (red)

На рис. 5 представлена частотная зависимость фазы коэффициента передачи $\arg[S_{21}(f)]$ модуля на основе КПЛ без кристалла и с кристаллом кварца. Из сравнения графиков рис. 4, 5 видно, что частотные характеристики $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$, $\arg[S_{21}(f)]$ существенно изменились на частотах выше 17–20 ГГц, а в целом близки к характеристикам рассогласованного отрезка линии передачи. Возрастание фазы $\arg[S_{21}(f)]$ при размещении кристалла (рис. 5), естественно, объясняется увеличением эффективной диэлектрической проницаемости полосковой структуры. На графиках коэффициентов отражения и передачи (см. рис. 4) видно, что в диапазоне до 25 ГГц не наблюдается квазихаотических колебаний, подобных тем, которые продемонстрированы в [13].

Далее был проведен эксперимент с кристаллом КТР. На рис. 6а и рис. 6б представлены зависимости коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ и фазы $\arg[S_{21}(f)]$ соответственно.

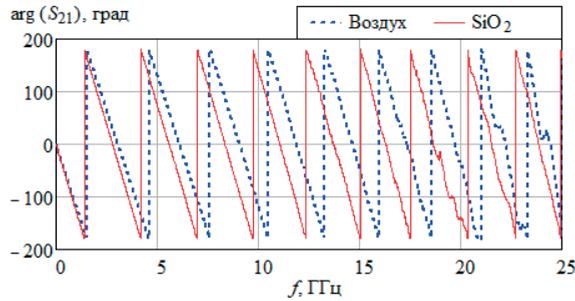
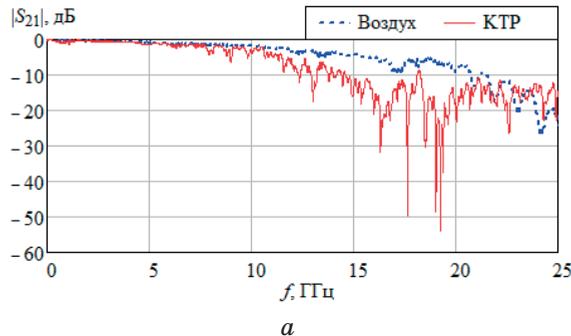
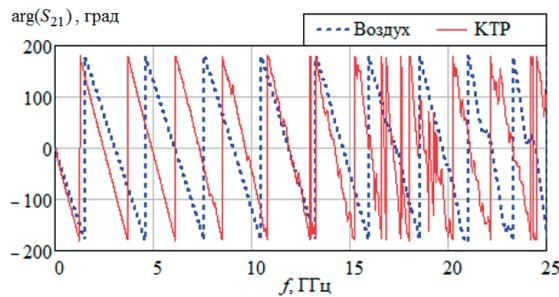


Рис. 5. Зависимость от частоты $\arg[S_{21}(f)]$ модуля без кристалла (синий цвет) и с кристаллом кварца (красный цвет)

Fig. 5. Frequency dependence $\arg[S_{21}(f)]$ of module without crystal (blue) and with quartz crystal (red)



a



б

Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ (а) и фазы $\arg[S_{21}(f)]$ (б) модуля без кристалла (синий цвет) и с кристаллом КТР (красный цвет)

Fig. 6. Frequency dependence of transmission factor $|S_{21}(f)|$ (a) and phase $\arg[S_{21}(f)]$ (b) of module without crystal (blue) and with KTP crystal (red)

Из сравнения частотных характеристик модуля на основе копланарной полосковой линии с воздушным заполнением верхней полуплоскости и модуля с кристаллом КТР (рис. 6) видно появление множества резонансов на частотах выше 15 ГГц, что можно объяснить интерференцией волн, распространяющихся в волноведущей системе копланарной полосковой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением [15], часть которого обладает анизотропными и нелинейными свойствами [16].

При замене кристалла КТР на кристалл дифосфида цинка германия ZnGeP_2 (рис. 1в) наблюдается появление большого числа резонансов $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$ с амплитудой до минус 10–20 дБ, имеющих квазихаотический характер в диапазоне от 10 до 25 ГГц (рис. 7). Рис. 8 иллюстрирует частотную зависимость $\arg[S_{21}(f)]$ модуля без кристалла и с кристаллом ZnGeP_2 . Из зависимости $\arg[S_{21}(f)]$ модуля с кристаллом ZnGeP_2 (красный цвет, сплошная

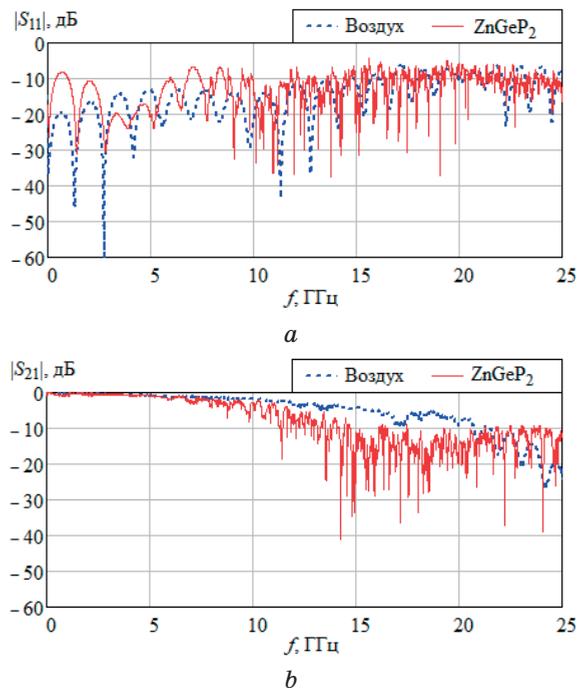


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения $|S_{11}(f)|$ (а) и коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ (б) модуля на основе КПЛ в отсутствие кристалла (синий цвет) и с кристаллом ZnGeP_2 (красный цвет)

Fig. 7. Frequency dependence of reflection coefficient $|S_{11}(f)|$ (a) and transmission factor $|S_{21}(f)|$ (b) of CPL module without crystal (blue) and with crystal (red)

линия) видно, что частотная зависимость фазы не имеет четко выраженного периода повторения начиная примерно с 10 ГГц, она изменяется хаотично, в отличие от фазы коэффициента передачи модуля без кристалла (синий цвет, пунктир). Следовательно, для модуля с кристаллом ZnGeP_2 , так же как КТР, наблюдается возникновение квазихаотических колебаний.

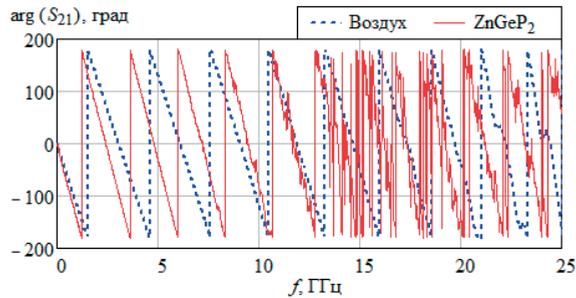


Рис. 8. Частотная зависимость фазы $\arg [S_{21}(f)]$ модуля без кристалла и с кристаллом ZnGeP_2

Fig. 8. Frequency dependence $\arg [S_{21}(f)]$ of module without and with crystal ZnGeP_2

Измерения частотных характеристик модуля с кристаллом LiNbO_3 проводились в двух вариантах исполнения — с электродами, нанесенными на боковые поверхности кристалла (рис. 1d), и образца цилиндрической формы без электродов (рис. 1e). Цель эксперимента была проверить влияние электродов на частотные характеристики без подключения электродов к устройству управления. На рис. 9 показан внешний вид измерительной установки при измерении модуля КПЛ с кристаллом ниобата лития с электродами, а на рис. 10 — графики зависимости коэффициентов отражения $|S_{11}(f)|$ модуля с кристаллом ниобата лития с электродами и без электродов.

На рис. 11 представлен график частотной зависимости коэффициентов передачи $|S_{21}(f)|$ модуля с кристаллом ниобата лития без электродов и с электродами.

Рис. 12 иллюстрирует изменение частотной зависимости $\arg [S_{21}(f)]$ модуля без электродов и с электродами.

Сравнение зависимостей $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$ и $\arg [S_{21}(f)]$ показывает существенное влияние электродов на частотные характеристики модуля формирования квазихаотического сигнала. Это, очевидно, связано с тем, что электроды находятся под «плавающим» потенциалом, наведенным в результате взаимодействия электромагнитной волны в копланарной полосковой линии и кристалле. Поскольку кристалл обладает анизотропией диэлектрических свойств, образу-

ющееся внутреннее поле в объемном кристалле приводит к образованию собственных волн с меняющимся спектром коэффициентов распространения при нанесении электродов. Как видим на рис. 12 и 13, этот спектр богаче в случае отсутствия электродов. Похожий результат был получен при измерении модуля с кристаллом, показанным на рис. 1e. На рис. 13 показаны частотные зависимости $|S_{21}(f)|$ и $\arg[S_{21}(f)]$, близкие к тем, которые характерны для модуля с кристаллом LiNbO_3 (рис. 1z), но без нанесенного электрода.



Рис. 9. Фотография измерительной установки при измерении модуля КПЛ с кристаллом ниобата лития с электродами

Fig. 9. Photo of the measuring setup when measuring the CPL module with a lithium niobate crystal with electrodes

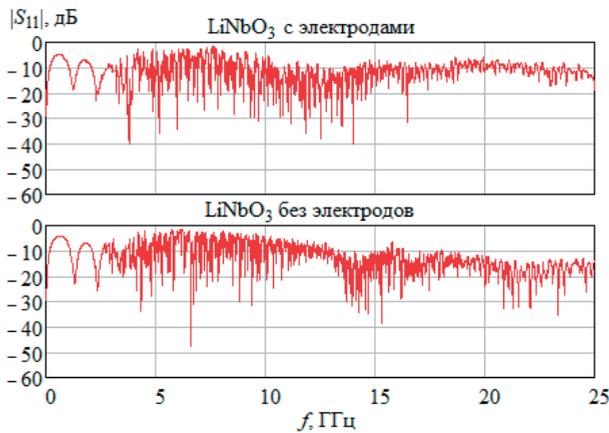


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента отражения $|S_{11}(f)|$ модуля с кристаллом ниобата лития с электродами и без электродов
Fig. 10. Frequency dependence of reflection coefficient $|S_{11}(f)|$ of module with lithium niobate crystal with electrodes and without electrodes

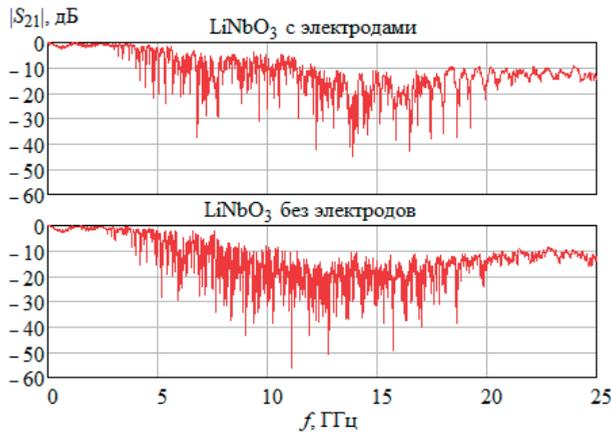


Рис. 11. Зависимость от частоты коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ модуля с кристаллом ниобата лития с электродами и без электродов
Fig. 11. Frequency dependence of transfer coefficient $|S_{21}(f)|$ of module with lithium niobate crystal with electrodes and without electrodes

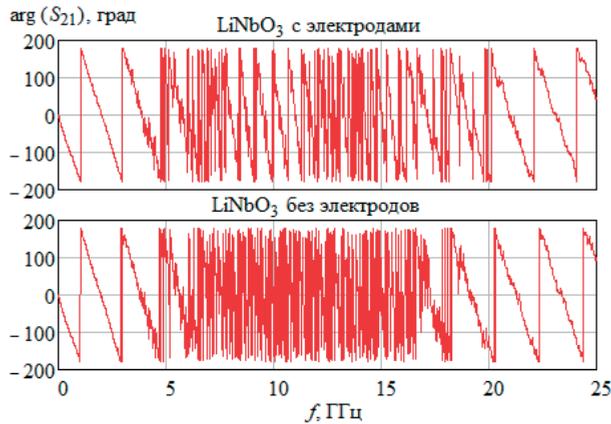


Рис. 12. Зависимость от частоты фазы коэффициента передачи $\arg[S_{21}(f)]$ модуля с кристаллом ниобата лития с электродами и без электродов
Fig. 12. Frequency dependence of phasearg $[S_{21}(f)]$ of module with lithium niobate crystal with electrodes and without electrodes

Сравнение приведенных частотных характеристик модулей с кристаллами, как отмечалось выше, на качественном уровне может основываться на увеличении или уменьшении количества максимумов/минимумов коэффициентов передачи и/или коэффициентов отражения. Их количество зависит от состава собственных (нормальных) волн с различающимися коэффициентами распространения [15]. Значительная частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости кристаллов, подоб-

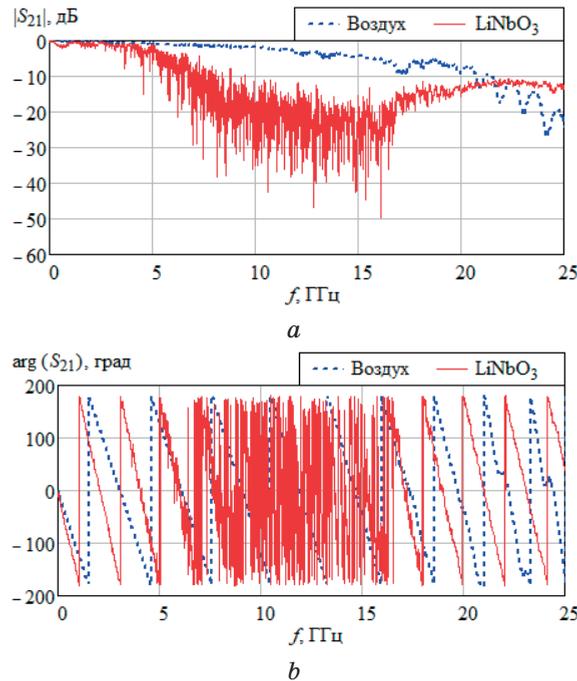


Рис. 13. Частотная зависимость коэффициента передачи $|S_{21}(f)|$ (a) и $\arg[S_{21}(f)]$ (b) модуля в отсутствие кристалла и с кристаллом LiNbO_3 (рис. 1d)

Fig. 13. Frequency dependence of transfer coefficient $|S_{21}(f)|$ (a) and $\arg[S_{21}(f)]$ (b) of module in absence of crystal and with LiNbO_3 crystal (Fig. 1e)

ных LiNbO_3 , способствует увеличению соотношения между фазовыми скоростями возбуждаемых волн в модулях, содержащих объемные кристаллы, и, следовательно, к увеличению количества волн с различающимися коэффициентами распространения. Интерференция возбуждаемых волн приводит к образованию сильной частотной зависимости коэффициентов матрицы рассеяния модулей с кристаллами. Оценка частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости кристаллов возможна через измерение так называемой полной (развернутой) фазы коэффициента передачи. Этой опцией измерения фазы снабжены практически все векторные анализаторы цепей [17]. Определение полной фазы позволяет вычислить групповое время запаздывания.

Для количественного сравнения вариантов применяемых кристаллов были измерены полные фазы коэффициентов передачи модулей с разными кристаллами. В качестве обобщенных параметров взяты следующие:

1) полная максимальная фаза $\varphi_{\text{макс}}$, град на верхней частоте диапазона $f_{\text{макс}}$;

2) групповое время запаздывания $\tau_{\text{гр}} = -\varphi_{\text{макс}} / (360 \cdot f_{\text{макс}})$, определяемое при аппроксимации полной фазы $\arg [S_{21}(f)]$ линейной функцией от частоты.

Эти параметры были взяты за основу и указаны в табл. 1.

На рис. 14 показаны частотные зависимости полной фазы коэффициентов передачи $\arg [S_{21}(f)]$ модулей формирования квази-хаотических колебаний с различными кристаллами.

Обработка экспериментальных данных

Анализ зависимостей рис. 14 показывает, что полный фазовый сдвиг модулей с кристаллами KTiOPO_4 , ZnGeP_2 и LiNbO_3 не соответствует физическому представлению полосковой структуры как линии передачи с некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} . Это предположение подтвердили измерения переходной характеристики при подаче импульса в виде функции Хевисайда. Было выяснено, что причина получения физически нереализуемого полного фазового сдвига связана с алгоритмом вычисления полного фазового сдвига, заложенного в программное обеспечение всех векторных анализаторов цепей. Если обратиться к графикам зависимости $\arg [S_{21}(f)]$ (например, рис. 12, 13b), то можно увидеть, что возникающая частотная зависимость фазы сопровождается нарушением периодичности функции $\arg [S_{21}(f)]$ вследствие интерференции возбуждаемых

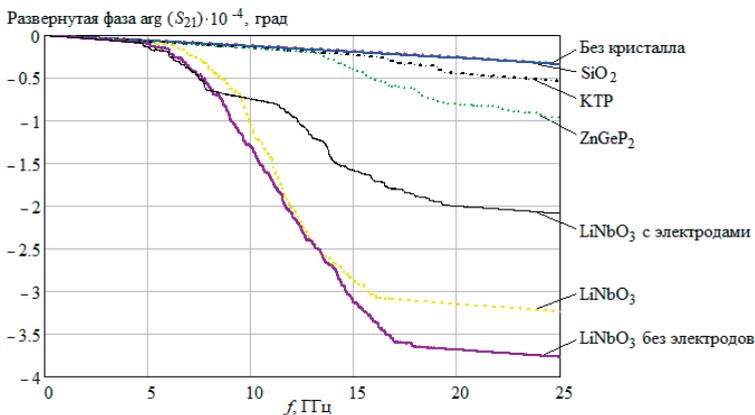


Рис. 14. Частотные зависимости полной фазы коэффициентов передачи $\arg [S_{21}(f)]$ модулей формирования квази-хаотических колебаний различного исполнения

Fig. 14. Frequency dependencies of the total phase of the transfer coefficients $\arg [S_{21}(f)]$ quasi-chaotic oscillator modules of different designs

собственных волн [15], и ее можно охарактеризовать как хаотическую. Фаза, не достигая значения -180 град, т. е. точки разрыва функции $\arg [S_{21}(f)]$, хаотично изменяется с частотой, пересекая условный ноль. В результате, согласно используемому алгоритму определения полной фазы, каждое такое пересечение сопровождается добавлением к фазовому сдвигу -360 град, которого на самом деле физически нет.

Надо отметить, что наличие интерференции сложного состава собственных волн тем не менее приводит к образованию суммарной падающей и отраженной волн, измеряемых с помощью векторного анализатора цепей на входе и выходе модуля формирования квази-хаотического сигнала. Коэффициенты распространения этих волн определяются частотно-зависимой эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} . Полосковая структура при наличии кристалла сохраняет свойства рассогласованного отрезка линии передачи с ярко выраженной зависимостью фазовой скорости от частоты. Вид частотных зависимостей $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$ и $\arg [S_{21}(f)]$ является следствием возникновения в кристалле собственных волн с отличающимися коэффициентами распространения и, следовательно, с существенно разными фазовыми скоростями падающих и отраженных волн. Возбуждение этих волн осуществляется полем копланарной линии, в которой в отсутствие кристалла распространяется квази-Т-волна с фазовой скоростью $v_{ph} = c/\sqrt{\epsilon_{eff}}$, где c — скорость света, ϵ_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость. Трансформация квази-Т-волны в собственные волны с богатым спектром полосковой структуры наблюдается вне зависимости от размеров кристаллов LiNbO_3 с закономерностью смещения резонансов в область верхних частот при уменьшении объема кристаллов. Замена материала на кварц приводила к исчезновению резонансов и вид частотных характеристик $|S_{11}(f)|$, $|S_{21}(f)|$ соответствовала рассогласованному отрезку КПЛ с увеличивающейся крутизной $\arg [S_{21}(f)]$.

Был построен алгоритм и программное обеспечение, позволяющие исключить добавление -360 град к текущему значению $\arg [S_{21}(f)]$, как физически необоснованное действие [18]. Для этого назначается частотный интервал релаксации Δf , на котором запрещается делать добавку -360 град в силу незначительности вклада интерферирующих волн в общий волновой процесс. На рис. 15 представлены графики развернутой фазы, полученные в результате обработки $\varphi_r = \arg [S_{21r}(f)]$ для модуля с ниобатом лития (кривая красного цвета). Синим цветом показан результат применения программы решения задачи вычисления полной фазы φ_p при вариации диэлектрической проницаемости кристаллов кварца и LiNbO_3 до совпадения получаемого значения φ_p и ра-

нее определенной полной фазы $\varphi_r = \arg [S_{21r}(f)]$ с помощью метода частотной релаксации. При этом полная фаза φ_p находилась по формуле

$$\varphi_p = -\frac{\omega}{c} \cdot \left[\sqrt{\varepsilon_{eff1}(f)} \cdot 2l_1 + \sqrt{\varepsilon_{eff2}(f)} \cdot l_2 \right] \cdot \frac{180}{\pi}, \text{ град} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{eff1}(f)$ — эффективная диэлектрическая проницаемость участка модуля без кристалла общей длиной $2l_1$; $\varepsilon_{eff2}(f)$ — эффективная диэлектрическая проницаемость участка модуля с кристаллом длиной l_2 ; c — скорость света.

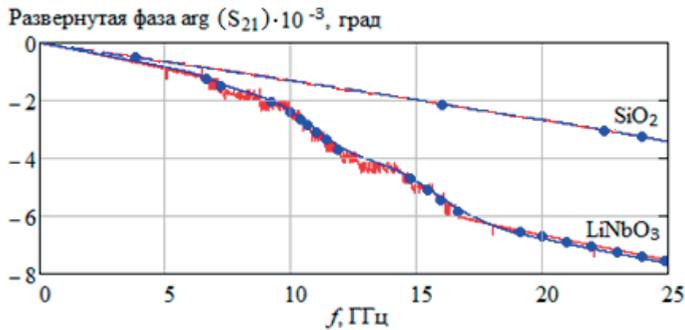


Рис. 15. Развернутая фаза для модулей с ниобатом лития и кварцем, полученная в результате обработки методом назначения частотного интервала релаксации, красная кривая для LiNbO₃, синяя кривая — результат вычисления полной фазы через нахождение эффективной диэлектрической проницаемости кристаллов по критерию совпадения φ_p и φ_r на назначаемых частотах (помечены точками)

Fig. 15. The expanded phase for modules with lithium niobate and quartz obtained by the frequency relaxation assignment method, the red curve for LiNbO₃, the blue curve is the result of the total phase calculation through finding the effective dielectric constant of the crystals according to the criteria of matching φ_p and φ_r at the assigned frequencies (marked by dots)

Алгоритм вычисления ε_{eff1} и ε_{eff2} состоит в следующей последовательности. На каждой частоте производится моделирование конечно-разностным методом [19] рассматриваемой полосковой структуры без кристалла (участок длиной $2l_1$) и с кристаллом (участок длиной l_2). При этом варьируется относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки ε_{r1} и кристалла ε_{r2} . Затем рассчитывается эффективная диэлектрическая проницаемость по формуле $\varepsilon_{eff} = \frac{C(\varepsilon)}{C(1)}$, где $C(\varepsilon)$ — емкость, полученная

по формуле $\varepsilon_{eff} = \frac{C(\varepsilon)}{C(1)}$, где $C(\varepsilon)$ — емкость, полученная

при моделировании полосковой линии с диэлектрическим заполнением с проницаемостями подложки ε_{r1} и кристалла ε_{r2} ; $C(1) = C_1 + C_2$ — емкость, полученная при моделировании полосковой линии с воздушным заполнением. В процессе вариации ε_{r1} , ε_{r2} на выбранных частотах проверяется условие $\varphi_p \approx \varphi_r$. Результаты расчета частотной зависимости $\varepsilon_{eff2}(f)$, удовлетворяющей условию $\varphi_p \approx \varphi_r$, позволяют вычислить относительную диэлектрическую проницаемости кристалла $\varepsilon_{r2}(f)$ по формуле (2)

$$\varepsilon_{r2}(f) = \frac{\varepsilon_{eff2}(f) \cdot (C_1 + C_2) - C_1 \cdot \varepsilon_{r1}}{C_2}. \quad (2)$$

Результаты вычисления $\varepsilon_{eff2}(f)$ показаны на рис. 16.

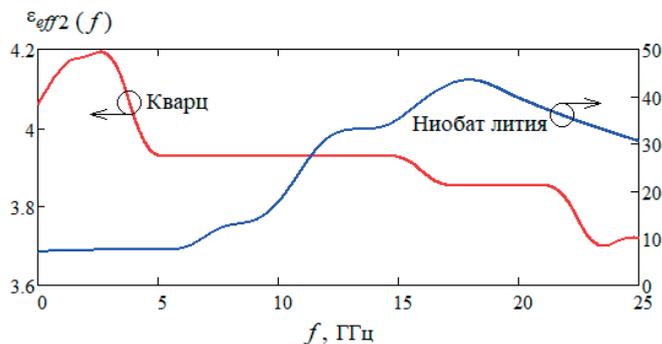


Рис. 16. Эффективная диэлектрическая проницаемость полосковой структуры с кристаллами кварца и ниобата лития в зависимости от частоты

Fig. 16. Frequency dependencies of effective dielectric permittivity of a strip structure with quartz and lithium niobate crystals

На представленном графике рис. 16 видно, что эффективная диэлектрическая проницаемость полосковой структуры с кварцем находится в диапазоне $\varepsilon_{eff2}(f) = 3,5 \dots 4,2$, а с ниобатом лития $\varepsilon_{eff2}(f)$ достигает 4,3. Частотная зависимость $\varepsilon_{r2}(f)$ показана на рис. 17.

В табл. 1 представлены значения φ_{\max} и $\tau_{гр}$ на частоте $f_{\max} = 25$ ГГц, а также диэлектрических проницаемостей, полученных в результате расчета на основе измерений для всех использованных образцов кристаллов на частоте $f_0 = 20$ ГГц.

Следует отметить, что параметры φ_{\max} и $\tau_{гр}$, определенные при линейной аппроксимации $\arg[S_{21}(f)]$, позволяют сравнивать разные конструкции модулей формирования квазихаотических колебаний. Однако при проектировании устройств аналогичного типа следует учитывать, что ввиду нелинейности кристаллов мо-

гут быть более сложные зависимости амплитудных и фазовых характеристик устройств, содержащих в качестве диэлектрика объемные кристаллы. Проведение экспериментальных исследований, подобных представленным, позволяет оценить возможности конструкций и материалов кристаллов более достоверно. Существование эффекта формирования квазихаотических колебаний в устройствах на основе полосковых структур, содержащих объемные нелинейные кристаллы, в связи с практическим использованием этого явления делает актуальной задачу более детального анализа волновых свойств. Тем не менее полученные в предыдущих подразделах результаты позволяют экспериментальным путем с использованием предложенных простых моделей проводить оценку параметров модулей и кристаллов в их составе.

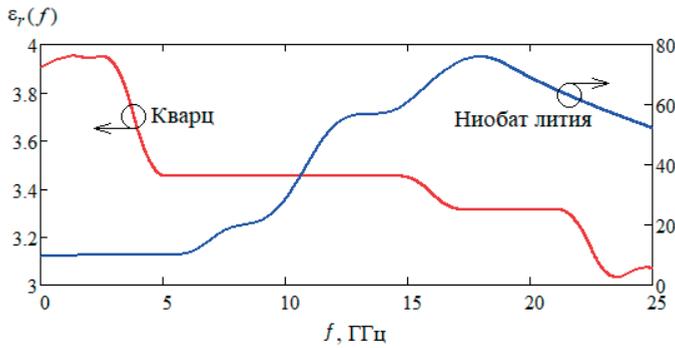
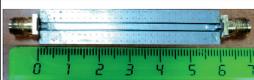


Рис. 17. Частотная зависимость относительных диэлектрических проницаемостей кристаллов

Fig. 17. Frequency dependence of the relative permittivity of crystals

Таблица 1. Параметры исследованных образцов модулей с разными кристаллами
Table 1. Parameters of the investigated sample modules with different crystals

№	Обозначение по рис. 14	Внешний вид	$\varphi_{\text{макс}}$, град ($f_{\text{макс}} = 25 \text{ ГГц}$)	$\tau_{\text{гр}}$, нс	$\varepsilon_{\text{eff}2}(f)$ ($f_0 = 20 \text{ ГГц}$)	$\varepsilon_{r2}(f)$ ($f_0 = 20 \text{ ГГц}$)
1	Без кристалла		-3397.9	0.3775	3.1311	1
2	SiO ₂		-3432.7	0.3814	3.3122	3.8521

Окончание табл. 1

№	Обозначение по рис. 14	Внешний вид	$\varphi_{\text{макс}},$ град ($f_{\text{макс}} =$ 25 ГГц)	$\tau_{\text{гр}},$ нс	$\varepsilon_{\text{эфф}}(f)$ ($f_0 =$ 20 ГГц)	$\varepsilon_2(f)$ ($f_0 =$ 20 ГГц)
3	КТР		-5308.7	0.5899	12.301	18.805
4	ZnGeP ₂		-9652.0	1.072	12.331	18.86
5	LiNbO ₃		-32360.0	3.596	40.422	70.367
6	LiNbO ₃ без электродов		-37699.0	4.189	50.173	88.248
7	LiNbO ₃ с электродами		-20834.0	2.315	84.766	151.68

Заключение

Таким образом, показано существование эффекта формирования квазихаотических колебаний в устройствах на основе полосковых структур, содержащих объемные нелинейно-оптические кристаллы. Проведено экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов матрицы рассеяния полосковых модулей на основе копланарной полосковой линии, содержащих кристаллы кварца SiO₂, титанил-фосфата калия KTiOPO₄ (КТР), дифосфида цинка германия ZnGeP₂, ниобата лития LiNbO₃. Измерения проводились при подаче на вход устройств ЛЧМ-сигнала. При этом для определения коэффициентов отражения от входа и выхода использовался режим быстрого переключения направления падающей волны в тракте приема-передачи векторного анализатора цепей. Введены параметры для сравнительной характеристики материалов кристаллов. Определена полная (развернутая) фаза коэффициента передачи модулей, сделан анализ ее физического смысла и проведена обработка полной фазы, позволившая построить алгоритм оценки частотной зависимости

эффективной и относительной диэлектрической проницаемости кристаллов. Исследованные модули могут выполнять функцию формирователей квазихаотических сигналов СВЧ, применяемых в системах на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации [20].

Благодарности

Публикация выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014.

Acknowledgements

The study was made with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project No. FEWM-2023-0014.

Список литературы

1. Веселаго В. Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления. *Успехи физических наук*. 2003;173(7):790–794. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200307m.0790
2. Фисанов В. В. О знаке показателя преломления для метаматериалов. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2021; 64(8):163–167.
3. Сычев А. Н., Малютин Н. Д. Современные устройства, антенны и отражатели с невязанными свойствами (обзор). *Журнал радиоэлектроники*. 2020;(11):7. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>
4. Лоцилов А. Г., Малютин Н. Д., Семенов Э. В., Сычев А. Н., Суторихин В. А., Тренкаль Е. И., и др. *Невзаимное обратное рассеяние электромагнитных волн: обзор методов исследования, экспериментальная техника обнаружения, обработка результатов измерений*. Томск: В-Спектр; 2021. 156 с. ISBN 978-5-91191-470-7
5. Sutorikhin V. A., Malyutin N. D., Pozdnyakov V. S. Nonreciprocal backscattering of millimeter waves by lithium niobate crystals when ultrasonic vibrations are excited in them. *Technical Physics Letters*. 2022;48(8):50–53. DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53200.19034
6. Semchenko I. V., Kravchenko A. Yu., Samofalov A. L., Khakhomov S. A. A metamaterial based on planar spirals as a electromagnetic waves polarization converter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*. 2022;58(1):110–119.
7. Dudarev A. V., Klygach D. S., Vakhitov M. G., Dudarev S. V., Dudarev N. V. A broadband metamaterial absorber constructed of square metalized segments. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2022;7(4):480–489. DOI: 10.47475/2500-0101-2022-17407
8. Хахомов С. А., Самофалов А. Л., Никитюк Ю. В., Семченко И. В., Аушев И. Ю. Оптимизация параметров поглощающих метаматериала-

лов на основе П-образных элементов. *Проблемы физики, математики и техники*. 2022;3(52):56–60.

9. Ермолов П.П., Папуловская Н. В. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: взгляд в будущее (обзор 32-й международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”). *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;4(6):462–495.

10. Taravati S., Kishk A. A. Space-time modulation: Principles and applications. *IEEE Microwave Magazine*. 2020;4(21):30–56.

11. Zang J.W., Wang X. T., Alvarez-Melcon A., Gomez-Diaz J.S. Nonreciprocal Yagi-Uda filtering antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019;18(12):2661–2665. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2947847.

12. Ramaccia D., Sounas D. L., Alu A., Bilotti F., Toscano A. Nonreciprocity in antenna radiation induced by space-time varying metamaterial cloaks. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):1968–1972. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2870688.

13. Arutyunyan A. A., Malyutin G. A. Experimental Research of the Scattering Parameters of the Module Based on a Coplanar Strip Line Segment With a Lithium Niobate Crystal and its Possible Use. *2022 IEEE 23rd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. 2022. Pp. 168–171. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855037.

14. Arutyunyan A.A., Malyutin N. D., Pozdnyakov V. S., Serebrennikov L.Ya. A New Reflective-type Element for Metasurface Based on a Bulk Lithium Niobate Crystal. *2022 IEEE 23rd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. 2022. Pp. 157–163. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855043.

15. Sychev A.N., Malyutin N. D., Trenkal E. I., Malyutin G. A. Special aspects in interference of in-phase and anti-phase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(2). P. 22023. DOI 10.1088/1742–6596/1679/2/022023.

16. Poplavko Y. *Electronic Materials: Principles and Applied Science*. Elsevier; 2018. 707 p.

17. Векторные анализаторы цепей P4M-18, P4213, P4226, P4226A. *Руководство по применению*. URL: <http://download.micran.ru/diis/p4/Docs/xVNA.pdf> (дата обращения: 31.07.2023).

18. Малютин Г. А. Модули на основе копланарной линии для измерения СВЧ параметров объемных электрооптических кристаллов, заполняющих верхнюю полуплоскость полосковой структуры. В: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо’2022): материалы 32 Международной конференции. Севастополь, Россия*. 2022;(4):125–126.

19. Fusco F. *Microwave circuits. Analysis and computer-aided Design*. The Queen’s University of Belfast; 1990. 288 p.

20. Гуляев Ю.В., Беляев Р.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кальянов Э.В., и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2018;10(2):279–312. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.279.

References

1. Veselago V. G. Electrodynamics of materials with negative index of refraction. *Physics–Uspekhi*. 2003;46(7):764–768. DOI: 10.1070/PU2003v046n07ABEH001614
2. Fisanov V. V. On the sign of the refractive index for metamaterials. *Russian Physics Journal*. 2021;64(8):1560–1565.
3. Sychev A.N., Malyutin N. D. Modern devices, antennas and reflectors with nonreciprocal properties (Review). *Zhurnal Radioelektroniki — Journal of Radio Electronics* 2020;(11):7. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.2>
4. Loschilov A.G., Malyutin N. D., Semenov E. V., Sychev A. N., Sutorikhin V. A., Trenkal E. I., et al. *Nevzaimnoye obratnoye rasseyaniye elektromagnitnykh voln: obzor metodov issledovaniya, eksperimental'naya tekhnika obnaruzheniya, obrabotka rezul'tatov izmereniy*. Tomsk: V-Spectr; 2021. 156 c. (In Russ.) ISBN 978-5-91191-470-7.
5. Sutorikhin V.A., Malyutin N. D., Pozdnyakov V. S. Nonreciprocal backscattering of millimeter waves by lithium niobate crystals when ultrasonic vibrations are excited in them. *Technical Physics Letters*. 2022;48(8):50–53. DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53200.19034
6. Semchenko I.V., Kravchenko A.Yu., Samofalov A. L., Khakhomov S. A. A metamaterial based on planar spirals as a electromagnetic waves polarization converter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*. 2022;58(1):110–119.
7. Dudarev A.V., Klygach D. S., Vakhitov M. G., Dudarev S. V., Dudarev N. V. A broadband metamaterial absorber constructed of square metalized segments. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2022;7(4):480–489. DOI: 10.47475/2500-0101-2022-17407
8. Khakhomov S.A., Samofalov A. L., Nikityuk Y. V., Semchenko I. V., Aushev I. Y. Optimization of parameters of absorbing metamaterials based on П-shaped elements. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 2022;3(52):56–60. (In Russ.)
9. Yermolov P.P., Papulovskaya N. V. Microwave and Telecommunication Technology: Future Outlook (review of the 32rd International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”). *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;4(6):462–495. (In Russ.)
10. Taravati S., Kishk A. A. Space-time modulation: Principles and applications. *IEEE Microwave Magazine*. 2020;4(21):30–56.

11. Zang J.W., Wang X.T., Alvarez-Melcon A., Gomez-Diaz J.S. Nonreciprocal Yagi-Uda filtering antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019;18(12):2661–2665. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2947847.

12. Ramaccia D., Sounas D.L., Alu A., Bilotti F., Toscano A. Nonreciprocity in antenna radiation induced by space-time varying metamaterial cloaks. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):1968–1972. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2870688.

13. Arutyunyan A. A., Malyutin G. A. Experimental Research of the Scattering Parameters of the Module Based on a Coplanar Strip Line Segment With a Lithium Niobate Crystal and its Possible Use. *2022 IEEE 23rd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. 2022. Pp. 168–171. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855037.

14. Arutyunyan A.A., Malyutin N. D., Pozdnyakov V. S., Serebrennikov L.Ya. A New Reflective-type Element for Metasurface Based on a Bulk Lithium Niobate Crystal. *2022 IEEE 23rd International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. 2022. Pp. 157–163. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855043.

15. Sychev A.N., Malyutin N. D., Trenkal E. I., Malyutin G. A. Special aspects in interference of in-phase and anti-phase waves with unequal phase velocities in coupled lines under pulse impact. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(2). P. 22023. DOI 10.1088/1742–6596/1679/2/022023.

16. Poplavko Y. *Electronic Materials: Principles and Applied Science*. Elsevier; 2018. 707 p.

17. *Vektornyye analizatory tsepei R4M-18, R4213, R4226, R4226A. Rukovodstvo po primeneniyu [Vector circuit analysers R4M-18, R4213, R4226, R4226A. Application manual]*. URL: <http://download.micran.ru/diis/p4/Docs/xVNA.pdf> (accessed 14.05.2023). (In Rus.).

18. Malyutin G. A. Moduli na osnove koplanarnoy linii dlya izmereniya SVCh parametrov ob'yemnykh elektroopticheskikh kristallov, zapolnyayushchikh verkhnyuyu poluploskost' poloskovoy struktury. In: *Proceedings of the 32nd International Conference Sevastopol, Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*. 2022;(4):125–126.

19. Fusco F. *Microwave circuits. Analysis and computer-aided Design*. The Queen's University of Belfast; 1990. 288 p.

20. Gulyaev Y.V., Belyaev R. V., Vorontsov G. M., Zalogin N. N., Kalinin V. I., Kal'yanov E.V., et al. Dynamic-chaos information technologies for data transmission, storage, and protection. *Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*. 218:10(2):279–312. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.279

Информация об авторах

Арутюнян Артуш Арсенович, аспирант кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск, Россия.

Малютин Николай Дмитриевич, профессор, доктор технических наук, директор НИИ Систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск, Россия.

Малютин Георгий Александрович, магистрант кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск, Россия.

Подзывалов Сергей Николаевич, заместитель директора по инновациям ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия.

Юдин Николай Николаевич, директор НОЦ ОФТ Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия.

Information about the authors

Artush A. Arutyunyan, Postgraduate student, Department of Design of Components and Parts of Radioelectronic Equipment (KUDR), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia.

Nikolay D. Malyutin, Professor, Doctor of Technical Sciences, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia.

Georgiy A. Malyutin, Master's Student, Department of Design of Components and Parts of Radioelectronic Equipment (KUDR), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia.

Sergey N. Podzyvalov, Deputy Director of Innovations, Laboratory of Optical Crystals Ltd, Tomsk, Russia.

Nikolay N. Yudin, Director of Research and Education Centre OFT, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Поступила / Received: 28.04.2023

Принята в печать / Accepted: 21.07.2023