

Д. И. Кулешов, И. В. Щербатко, М. С. Яновский

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ФОРМОЙ СУБВОЛНОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: igor_scherbatko@yahoo.com*

Характеристики дисперсии эффективных коэффициентов преломления и показателя двойного лучепреломления густых (субволновых) диэлектрических решеток (ДР) исследованы методом связанных мод. В качестве примера рассчитаны широкополосные четверть- и полуволновые дифференциальные фазовые секции на основе ДР в диапазоне волн 1,7...2,55 мм. Ил. 6. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, двулучепреломление, диэлектрическая решетка, фазовая секция.

Терагерцевый (ТГц) диапазон находит многочисленные научно-технические применения, среди которых диагностика термоядерной плазмы, радиотелескопия, радиоспектроскопия, радиосвязь, радиодефектоскопия, радиотомография, радиометрия, радиоконтроль багажа и почты и др. Ожидается, что прогресс техники ТГц диапазона приведет к значительному увеличению скорости передачи данных (до 100 Гб/с) как внутри помещений, так и в космическом пространстве [1, 2].

Техника ТГц частот в настоящее время развивается, в частности, путем разработки новых квазиоптических линий передачи и квазиоптической элементной базы [3–7]. Важными устройствами измерительной техники являются дифференциальные 90° и 180° фазовые секции, которые используются в качестве компенсаторов, элементов поляризационных фазовращателей, поляризационных сдвигателей частоты и др. Такие фазовые секции обычно выполняются на основе анизотропных диэлектрических материалов (кристаллов), имеющих достаточный коэффициент двойного лучепреломления. При этом главным недостатком фазовых секций является их узкополосность.

Известно, что субволновые (период решетки меньше длины волны) диэлектрические решетки (ДР) обладают значительным двойным лучепреломлением, так как эффективный показатель преломления оказывается различным для волн, поляризованных параллельно и ортогонально ламелям решетки. Данный эффект получил название «двойного лучепреломления формы» [10]. Пример ДР и ее параметры показаны на рис. 1. Кроме того, в некоторых случаях применение субволновых ДР позволяет значительно увеличить широкополосность фазовых секций как для миллиметровых волн [8], так и для оптического диапазона [9]. Борн и Вольф приводят выражения для оценки двулучепреломления, обус-

ловленного формой ламеллярной диэлектрической решетки для квазистатического режима (период решетки намного меньше длины волны) [10]. Но для построения широкополосных фазовых секций наибольший интерес представляют решетки с периодом, сравнимым с длиной волны, для которых квазистатическое приближение не работает. В нашей работе рассмотрена задача создания широкополосных фазовых секций с использованием эффекта двулучепреломления, обусловленного формой ламеллярных субволновых ДР для общего случая.

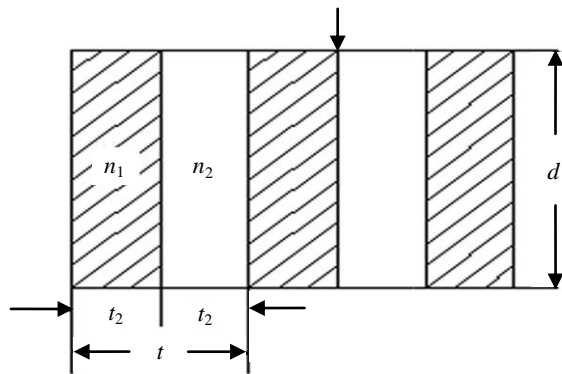


Рис. 1. Одномерная ДР: t – период решетки; t_1, t_2 – толщины ламелей; n_1, n_2 – коэффициенты преломления; d – толщина слоя решетки; $\zeta = t_1/t$ (при $n_1 > n_2$)

Для искусственного диэлектрика, каким является субволновая решетка, эффект двулучепреломления формы является аномально большим по сравнению с двойным лучепреломлением в естественных анизотропных кристаллах. Кроме этого, субволновые решетки с двойным лучепреломлением формы обладают значительной дисперсией, т. е. зависимостью эффективных показателей преломления от частоты излучения. Благодаря такой дисперсии при соответствующем выборе параметров решетки можно получить фазовую секцию с меньшим изменением дифферен-

циального сдвига фаз в широком диапазоне длин волн, чем, например, в случае применения монокристалла кварца. Для случая, не соответствующего квазистатическому, параметры двойного лучепреломления формы сложным образом зависят от материала и геометрии решетки. Эти параметры определяются для каждой конкретной субволновой ДР индивидуально либо при помощи приближенных аналитических методов (например, методом аналитической теории эффективной среды [11]), либо путем численного решения волнового уравнения для электромагнитных полей в решетке.

Основными характеристиками субволновой ламеллярной ДР являются ее эффективные коэффициенты преломления n_p и n_s как функции частоты для волн, поляризованных, соответственно, параллельно и ортогонально относительно направления ламелей решетки. Показатель двойного лучепреломления Δn рассчитывается по формуле

$$\Delta n = n_p - n_s. \quad (1)$$

1. Описание метода расчета. Метод связанных мод (МСМ), или *rigorous coupled wave analysis (RCWA)*, достаточно хорошо зарекомендовал себя для определения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн в многослойных одно- и двупериодических слоистых структурах. Он базируется на строгом решении уравнений Максвелла для дифракции электромагнитных волн на диэлектрических периодических структурах. Суть метода заключается в применении метода матрицы передачи для слоистых структур к представлению поля в виде суперпозиции флор-мод (или так называемых пространственных мод дифракции). Это прямой, не итеративный метод определения комплексных коэффициентов прохождения и отражения, обеспечивающий сходимость к решению с заданной точностью. Точность метода определяется главным образом количеством порядков дифракционных мод [12].

Первоначально МСМ был разработан для исследования голографических решеток. Затем он был развит для моделирования характеристик многослойных периодических структур. Интенсивное использование обычного МСМ показало, что в некоторых случаях (глубокие ДР с сильным затуханием поля внутри ламелей) метод является неустойчивым для ТМ-поляризации. Ключевым моментом в численной реализации метода является нахождение собственных значений (постоянных распространения) и собственных векторов комплексной матрицы передачи. Неустойчивость метода связана с трудностями определения этих величин с достаточной точностью, если матрица плохо обусловлена. Было показано, что затухаю-

щие поля, возникающие в случае полного внутреннего отражения или в диэлектрике с потерями, приводят к плохой обусловленности матрицы передачи. Обращение такой матрицы приводит к возникновению матриц с диагональными элементами, которые из-за недостаточной разрядности компьютеров не могут быть представлены с необходимой точностью.

Для преодоления проблемы неустойчивости МСМ была предложена улучшенная методика решения дифракционной задачи [13]. Суть метода заключается в факторизации матрицы передачи, т. е. в выделении из нее экспоненциального множителя, что приводит к значительному улучшению стабильности метода. В данной работе, используя подход, предложенный в работе [13], мы реализовали упрощенную схему устойчивого алгоритма, а именно, метод определения коэффициента отражения от ДР. Это позволило значительно ускорить алгоритм из-за уменьшения порядка матриц.

Для компьютерного моделирования мы выбрали метод определения эффективного коэффициента преломления ДР для нормального падения волны на нее. При определенных значениях толщины слоя, длины волны и коэффициента преломления возникают резонансы в слое диэлектрика, при этом коэффициент отражения от слоя имеет минимум, а резонансная толщина слоя кратна полуволне в диэлектрике и определяется по формуле

$$d_r = \frac{m\lambda_0}{2n}, \quad (2)$$

где d_r – толщина слоя при резонансе; m – целое число; n – эффективный коэффициент преломления; λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

В случае измерений с решетками при малых значениях числа m расчет по формуле (2) дает большую погрешность значения n вследствие влияния неоднородностей на лицевых поверхностях слоя решетки из-за краевых эффектов. Чтобы улучшить точность определения показателей преломления, следует исключить участки слоя решетки, прилегающие к верхней и нижней поверхности. Для этого, взяв разность координат двух слоев с толщинами, которые отличаются на полволны, получаем для резонансной полуволновой толщины среднего слоя формулы:

$$d_r = d_{r(m+1)} - d_{rm} = \frac{\lambda_0}{2n}, \quad (3a)$$

или

$$d' = d'_{r(m+1)} - d'_{rm} = \frac{1}{2n}, \quad (3б)$$

где $d' = \frac{d}{\lambda_0}$ – безразмерная толщина слоя; m – четное целое число.

Для компьютерного моделирования коэффициента отражения от субволновой ДР мы использовали МСМ. Для расчета характеристики эффективного показателя двойного лучепреломления Δn по формуле (1) необходимо рассчитать характеристики эффективных коэффициентов преломления n_p и n_s . Алгоритм устойчивого МСМ был реализован на языке *Matlab* и запускался на обычном персональном компьютере. По введенным в программу исходным данным ζ , ε , массиву значений $(t/\lambda_0)_i$ алгоритм рассчитывает значения d'_m , d'_{m+1} и d' для p и s поляризации падающей плоской волны. Исходные данные для расчетов выбраны следующие: $\zeta = 0,7$; $\varepsilon = 3,8$ (плавленый кварц); $(t/\lambda_0)_i$ берем в интервале $0,24 \dots 0,5$. В расчетах при дискретных значениях $(t/\lambda_0)_i$ вычисляются r_p и r_s при изменении d/λ_0 .

Зависимости r_p и r_s имеют острые минимумы, которые соответствуют резонансным значениям d/λ_0 . На рис. 2 представлены примеры таких кривых.

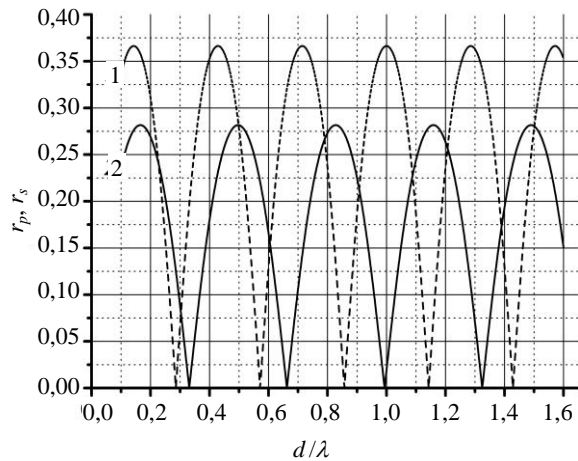


Рис. 2. Пример полученной зависимости коэффициентов отражения r_p (кривая 1) и r_s (кривая 2) от d/λ_0

Расстояние между минимумами коэффициентов отражения в зависимости от d/λ_0 варьируется заметно для начальных 2–3 полувольт, что связано с краевыми эффектами. Численные значения величин d'_m и d'_{m+1} обычно определяются для $m = 4$, затем по формуле (3б) вычисляются n_p и n_s , а выражение (1) определяет величину Δn .

Результаты расчета характеристик выбранных субволновых решеток представлены на графиках рис. 3 и 4, из которых видно, что в интервале $t/\lambda_0 = 0,25 \dots 0,5$, т. е. при двукратном перекрытии по длине волны, характери-

стики n_p , n_s и Δn имеют дисперсию, причем $n_p = 1,74 \dots 1,79$, $n_s = 1,48 \dots 1,62$, $\Delta n = 0,16 \dots 0,26$.

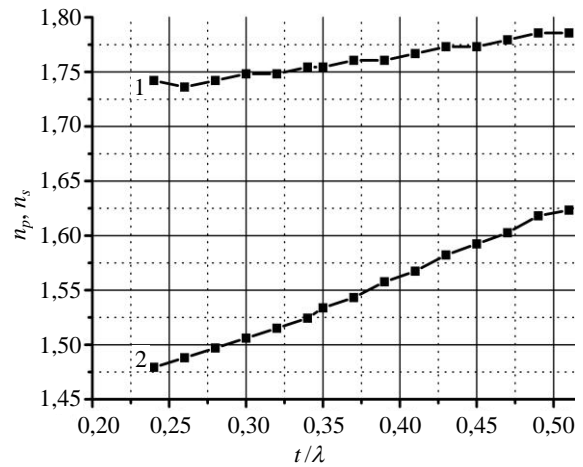


Рис. 3. Зависимость эффективных коэффициентов преломления n_p (кривая 1) и n_s (кривая 2) решетки с $\zeta = 0,7$ и $\varepsilon = 3,8$ от t/λ_0

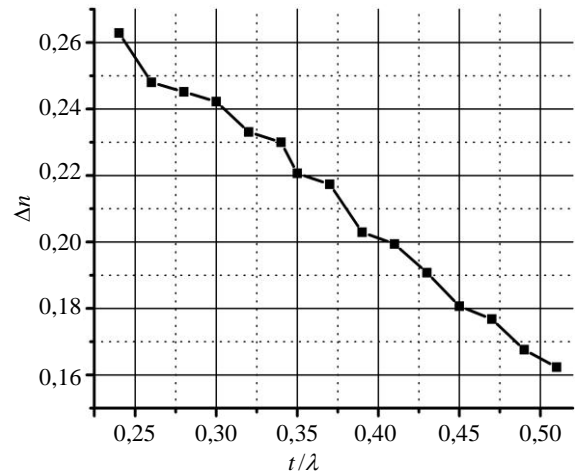


Рис. 4. Зависимость эффективного показателя двулучепреломления Δn решетки с $\zeta = 0,7$ и $\varepsilon = 3,8$ от t/λ_0

Следует отметить, что все расчетные данные нормированы на длину волны, и поэтому они могут быть использованы в любом диапазоне частот. Полученные данные используются для расчета широкополосных фазовых секций.

2. Расчет широкополосных фазовых секций. Результаты расчета 90° фазовой секции на основе субволновой ламеллярной ДР приведены как демонстрация метода. При расчете характеристик и параметров широкополосных фазовых секций используется характеристика эффективного показателя двулучепреломления решеток Δn в зависимости от t/λ_0 .

Обычно для определения дифференциального сдвига фаз фазовых секций $\Delta\varphi^\circ$ используется выражение

$$\Delta\varphi^\circ = 360 \frac{d}{\lambda_0} \Delta n, \quad (4)$$

где d – толщина слоя решетки фазовой секции.

Однако для расчета характеристики дифференциального сдвига фаз в фазовой секции с решеткой формула (4) неудобна, так как Δn не постоянная величина, а зависящая от длины волны λ_0 . Чтобы использовать формулу (4), желательно предварительно рассчитать зависимость Δn от λ_0 при конкретном значении периода решетки t .

Поэтому для расчета дифференциального сдвига фаз мы используем более удобную, видоизмененную формулу

$$\Delta\varphi^\circ = 360 \frac{d}{t} \frac{t}{\lambda_0} \Delta n, \quad (5)$$

которая содержит также безразмерные величины d/t и t/λ_0 , а характеристика Δn в функции t/λ_0 рассчитана нами ранее и представлена на рис. 4.

Характеристика 90° фазовой секции рассчитана с безразмерными параметрами при помощи формулы (5) и данных рис. 4. Эта характеристика представлена на рис. 5 для коэффициента заполнения решетки $\zeta = 0,7$, диэлектрической проницаемости материала ламелей $\varepsilon = 3,8$, отношения толщины слоя решетки к периоду решетки $d/t = 3,25$. Характеристика, показанная на рис. 5, может быть использована в любом диапазоне волн, так как она построена как функция безразмерной переменной величины t/λ_0 и для безразмерного параметра решетки d/t .

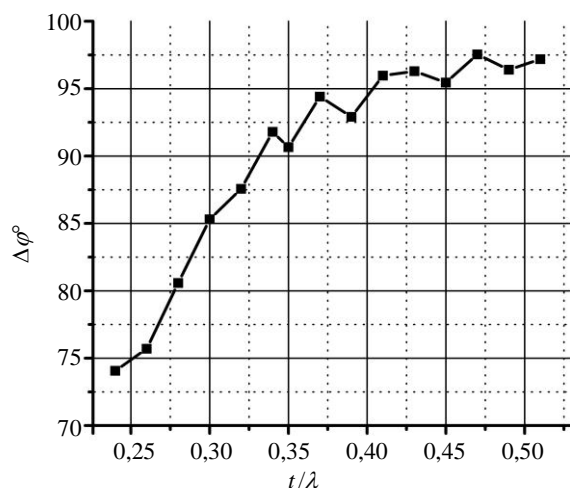


Рис. 5. Зависимость дифференциального сдвига фаз 90° -секции от t/λ_0 с $\zeta = 0,7$; $\varepsilon = 3,8$; $d/t = 3,25$

Мы выбрали рабочий диапазон длин волн 1,7...2,55 мм (диапазон частот 0,176...0,118 ТГц),

т. е. с перекрытием по частотам, равным 1,5. Характеристики дифференциального сдвига фаз $\Delta\varphi^\circ$ от длины волны λ_0 для 90° фазовой секции рассчитаны с использованием графика рис. 5. Целью является получение характеристики, у которой в заданном широком диапазоне волн изменение значения $\Delta\varphi^\circ$ будет минимальным.

Пользуясь графиком рис. 5, выбирается интервал значений t/λ_0 с перекрытием 1,5, в котором имеются одинаковые \pm -отклонения значения $\Delta\varphi^\circ$ от 90° . Мы выбрали интервал абсцисс от $(t/\lambda_0)_{\text{мин}} = 0,3$ до $(t/\lambda_0)_{\text{макс}} = 0,45$, в котором $\Delta\varphi^\circ = 90^\circ \pm 5^\circ$, что вполне приемлемо. Далее для расчета $\Delta\varphi^\circ$ как функции λ_0 необходимо определить значение периода решетки t и толщины d . Ввиду равенства перекрытия выбранного интервала абсцисс t/λ_0 и заданного интервала длин волн справедливо соотношение

$$\left(\frac{t}{\lambda_0}\right)_{\text{макс}} = \frac{t}{\lambda_{0\text{мин}}}. \quad (6)$$

Полагая $(t/\lambda_0)_{\text{макс}} = 0,45$ и $\lambda_{0\text{мин}} = 1,7$ мм, получаем $t = 0,76$ мм, а так как $d/t = 3,25$, то $d = 2,47$ мм.

Результаты расчета $\Delta\varphi^\circ$ как функции λ_0 (при $t = 0,76$ мм; $\zeta = 0,7$; $\varepsilon = 3,8$ и $d = 2,47$ мм) представлены на графике рис. 6. При длине волны 1,7 мм дифференциальный сдвиг фаз составляет 95° , а на волне 2,55 мм $\Delta\varphi^\circ$ составляет 85° .

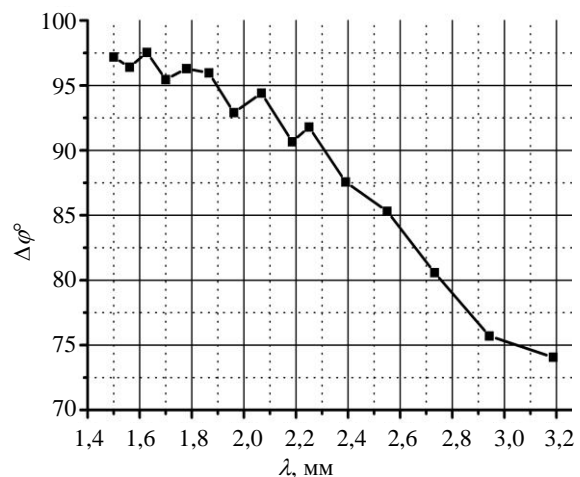


Рис. 6. Характеристика 90° фазовой секции с $\zeta = 0,7$; $\varepsilon = 3,8$; $d = 2,47$ мм; $t = 0,76$ мм

Итак, при использовании ламеллярной ДР рассчитана широкополосная фазовая секция с $\Delta\varphi^\circ = 90^\circ \pm 5^\circ$ в диапазоне длин волн 1,7...2,55 мм. Соответственно, полуволновая фазовая секция имеет $\Delta\varphi^\circ = 180^\circ \pm 10^\circ$. Используя

такие широкополосные фазовые секции, можно создать широкополосный фазовращатель с погрешностью $\pm 1^\circ$ и широкополосный сдвигатель частоты с уровнем подавления боковых компонентов частотного спектра на уровне 40 дБ.

Выводы. Приведены результаты изучения двулучепреломления, обусловленного формой ламеллярных ДР. При помощи МСМ получены эффективные коэффициенты преломления (n_p , n_s) и показатель двойного лучепреломления (Δn) субволновых решеток в широком диапазоне длин волн. В качестве примера рассчитана решетка из плавленого кварца с коэффициентом заполнения 0,7. В ТГц диапазоне при перекрытии 1,5 на волнах (1,7...2,55 мм) показана возможность создания широкополосных фазовых секций:

- четвертьволновой с $\Delta\varphi = 90^\circ \pm 5^\circ$;
- полуволновой с $\Delta\varphi = 180^\circ \pm 10^\circ$.

1. Kraemer R. Ultra high speed wireless communication in the 250–300 GHz / R. Kraemer // Proc. 17th Int. Conf. on Microwaves, radar and wireless communications. – Wroclaw, 2008. – 3. – P. 731–734.
2. Koch M. Terahertz Technology / M. Koch // Optics and Photonics News. – 2007. – 18, N 3. – P. 21–25.
3. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / А. Я. Усиков, Э. А. Канер, И. Д. Трутьев и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1986. – 366 с.
4. Goldsmith P. F. Quasioptical Systems / P. F. Goldsmith. – New-York: Chapman, 1997. – 412 p.
5. Siegel P. H. Terahertz technology / P. H. Siegel // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. – 2002. – 50, N 3. – P. 910–928.
6. Костенко А. А. Квазиоптика: исторические предпосылки и современные тенденции развития / А. А. Костенко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – 5, № 3. – С. 222–246.
7. Квазиоптические радиоизмерительные устройства ближнего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе металлodieлектрического волновода квадратного сечения / В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Е. М. Кулешов, М. С. Яновский // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 3. – С. 589–594.
8. Pat. USA. Wideband Circular Polarizer / Sh. Shindo, R. Watanabe. – N 4156213; 1979 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.freepatentsonline.com/4156213.html](http://www.freepatentsonline.com/4156213.html). – Загл. с экрана.

9. Kikuta H. Achromatic quarter – wave plates using the dispersion of form birefringence / H. Kikuta, Ya. Ohira, K. Iwata // Appl. Opt. – 1997. – 36, N 7. – P. 1566–1572.
10. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
11. Haggans C. W. Effective-medium theory of zeroth-order lamellar gratings in conical mountings / C. W. Haggans, L. Li, R. K. Kostuk // J. Opt. Soc. Am. A. – 1993. – 10, N 10. – P. 2217–2225.
12. Moharam M. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction / M. Moharam, T. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. – 1981. – 71, N 7. – P. 811–818.
13. Stable Implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance approach / M. Moharam, D. Pommet, E. Grann, T. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. – 1995. – A-12, N 5. – P. 1077–1086.

D. I. Kuleshov, I. V. Scherbatko, M. S. Yanovskiy

FORM BIREFRINGENCE CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC SUBWAVELENGTH GRATINGS IN TERAHERTZ REGION

Stable Rigorous Coupled Wave Analysis method employed for modeling of refraction and birefringence effective coefficients for dielectric subwavelength grids. As an example, the broadband quarter- and half-wave differential phase sections were calculated on the basis of dielectric grating in the range of 1,7...2,55 mm wavelength.

Key words: THz range, form birefringence, dielectric gratings, phases section.

Д. І. Кулешов, І. В. Щербатко, М. С. Яновський

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВІЙНОГО ПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ, ЩО ОБУМОВЛЕНЕ ФОРМОЮ СУБХВИЛЬОВИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕШТОК У ТЕРАГЕРЦЕВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

Характеристики дисперсії ефективних коефіцієнтів заломлення та показника подвійного променезаломлення густих (субхвильових) діелектричних решіток (ДР) досліджені методом зв'язаних мод. Як приклад розраховані широкосмугові чверть- і півхвильові диференціальні фазові секції на основі ДР в діапазоні хвиль 1,7...2,55 мм.

Ключові слова: терагерцевий діапазон, подвійне променезаломлення, діелектрична решітка, фазова секція.

Рукопись поступила 19.03.10 г.