

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.01.078>

УДК 535.515:621.3.072.7 О. С. КОСЯК, В. И. БЕЗБОРОДОВ, И. К. КУЗЬМИЧЕВ

PACS numbers: 42.25.Lc,  
42.25.Bs, 42.70.Mр, 77.84.-sИнститут радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: oleg.kosiak@gmail.com

## ВРАЩАТЕЛЬ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЛИПСОМЕТРА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

Предмет и цель работы: *Исследуется возможность создания широкополосного вращателя плоскости поляризации для длинноволновой части терагерцевого диапазона.*

Методы и методология: *Для достижения поставленной цели были использованы результаты работы, в которой методом поляризационных матриц рассеяния рассмотрены перестраиваемые и широкополосные дифференциальные фазовые секции, состоящие из нескольких двулучепреломляющих элементов.*

Результаты: *Показано, что применение широкополосных дифференциальных фазовых секций позволяет значительно расширить рабочую полосу частот вращателя плоскости поляризации.*

Заключение: *Экспериментальное исследование подтвердило возможность создания широкополосного вращателя плоскости поляризации. В качестве двулучепреломляющих элементов были применены искусственные диэлектрики, обладающие так называемым двулучепреломлением формы.*

Ключевые слова: *квазиоптика, терагерцевый диапазон, вращатель плоскости поляризации, дифференциальная фазовая секция, двулучепреломление*

### 1. Введение

В настоящее время идет процесс интенсивного освоения терагерцевого диапазона волн от 0.1 до 10 ТГц. Для передачи электромагнитных волн в этом диапазоне, как правило, используются квазиоптические линии передачи, в которых электромагнитное излучение распространяется в виде волновых пучков. Уникальные функциональные возможности квазиоптической техники позволяют широко использовать поляризационные принципы и методы в радиотехнических измерениях. Учет поляризации сигнала значительно повышает информативность и точность измерений по сравнению с измерениями при помощи волноводной радиоизмерительной аппаратурой. Все более широкое внимание исследователей привлекает эллипсометрия – высокочувствительный и точный метод исследования поверхностей и границ раздела различных сред (твердых, жидких, газообразных), основанный на изучении изменения состояния поляризации света после его взаимодействия с поверхностью границ раздела этих сред. Важными преимуществами эллипсометрии являются высокая чувствительность, неразрушающий и невозмущающий характер измерений, возможность изучения кинетики быстропротекающих явлений

и измерений при различных физических условиях (температуре, давлении, в агрессивной среде). Основные области применения эллипсометрии: нанотехнология, физика и химия поверхности и тонких пленок, оптика, кристаллофизика, электрохимия, сенсорные устройства для экологии, биология и медицина.

Классическая схема эллипсометра, работающего на фиксированной частоте, [1] представлена на рис. 1. Модулированное по амплитуде линейно поляризованное излучение от генератора 1 через волноводно-лучеводный переход 2 и аттенуатор 3 подается на вращатель плоскости поляризации (ВПП) 7. При помощи ВПП 7 устанавли-

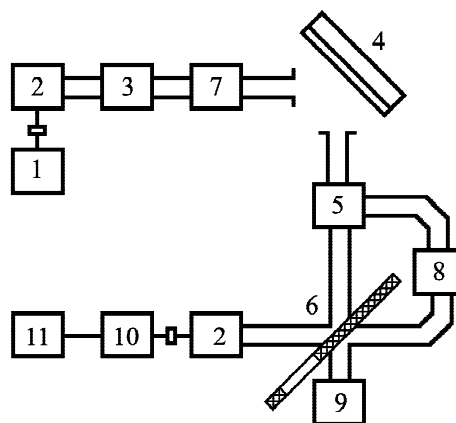


Рис. 1. Схема эллипсометра

вадается необходимый угол ориентации плоскости поляризации электромагнитной волны, которая далее направляется на исследуемый образец 4. Отраженная от образца эллиптически поляризованная волна поступает на поляризационный делитель 5, который выделяет ортогональные компоненты, поляризованные параллельно и перпендикулярно плоскости падения электромагнитной волны на исследуемый образец, и направляет их в разные каналы. В результате обе компоненты поступают на коммутатор 6, причем плоскость поляризации одной из них поворачивается ВПП 8 на угол  $90^\circ$ . Выделенные компоненты сигнала с частотой переключения коммутатора 6 поочередно подаются через волноводно-лучеводный переход 2 на детекторную секцию 10 или на согласованную нагрузку 9. После детектирования ортогональные компоненты сигнала поступают в блок обработки 11, где происходит их сравнение. Так как эллипсометрия измеряет отношение (или разницу) двух величин, а не абсолютные значения каждой, – это очень точный и воспроизводимый метод.

Информативность измерений может быть значительно повышена путем их проведения в полосе частот. В настоящее время в длинноволновой части терагерцевого диапазона существуют панорамные измерители коэффициентов отражения и передачи, например, векторный анализатор цепей Elmika R2204R, осуществляющий девиацию частоты в диапазоне  $f = 0.11 \div 0.17$  ТГц, или скалярный анализатор цепей Elmika P2-139 – в диапазоне  $f = 0.175 \div 0.225$  ТГц. В то же время разработка широкополосного ВПП является актуальной задачей.

## 2. Теоретическое обоснование

При построении эллипсометра терагерцевого диапазона в качестве ВПП может быть использована полуволновая дифференциальная фазовая секция (ДФС). Действительно, если на такое устройство падает линейно поляризованная волна, плоскость поляризации которой составляет угол  $\varphi$  с плоскостью анизотропии, плоскость поляризации волны на выходе ДФС поворачивается на угол  $\theta = 2\varphi$ . Поворот плоскости поляризации  $\theta$  связан с поворотом полуволновой секции соотношением  $\theta = 2\varphi$  только в том случае, если ДФС

обеспечивает номинальный дифференциальный сдвиг фаз  $180^\circ$ . Однако в полосе частот этот сдвиг может отличаться от номинального, в результате чего наряду с сигналом основной поляризации  $E_{main}$  на выходе ДФС появляется паразитный сигнал  $E_{spurious}$  ортогональной поляризации. В общем случае сигнал на выходе становится эллиптически поляризованным, что приводит к поляризационным потерям сигнала и угловой ошибке поворота плоскости поляризации.

В работе [2] методом поляризационных матриц рассеяния нами была показана возможность создания широкополосной полуволновой ДФС, состоящей из трех одинаковых двулучепреломляющих элементов (ДЭ), создающих на центральной частоте диапазона  $f_0$  дифференциальный сдвиг фаз  $\Delta_{oi} = 180^\circ$ . При этом плоскости анизотропии крайних ДЭ совпадают и повернуты на угол  $\psi$  относительно плоскости анизотропии среднего ДЭ (рис. 2). Эффективная плоскость анизотропии результирующей ДФС, условно изображенная на рис. 2 пунктиром, составляет угол  $\psi/2$  с плоскостью анизотропии крайних ДЭ.

Ширина рабочей полосы частот ДФС зависит от угла  $\psi$ . Было показано [2], что при выборе значения  $\psi = 60^\circ$  рабочая полоса частот такой полуволновой ДФС значительно превышает рабочую полосу обычной, состоящей из одного ДЭ, полуволновой ДФС. Уменьшение этого угла приводит к дальнейшему расширению рабочей полосы частот. Однако при этом на центральной

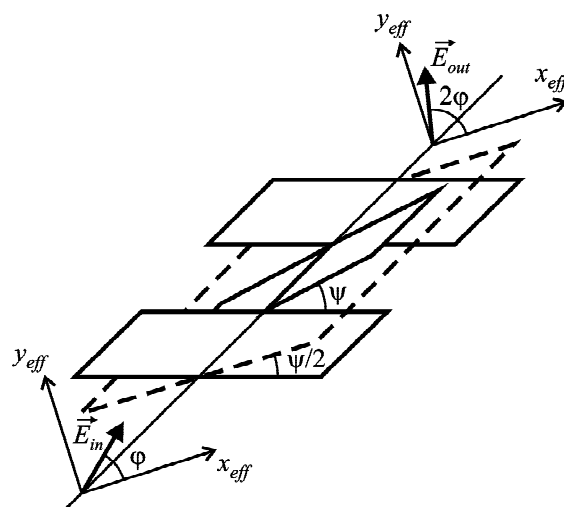


Рис. 2. Схема широкополосной полуволновой ДФС

частоте диапазона на выходе секции появляется синфазный основному паразитный сигнал ортогональной поляризации. На рис. 3 приведены зависимости нормированных амплитуд основной  $E_{main}$  и паразитной  $E_{spurious}$  составляющих сигнала от относительной частоты  $f/f_0$  для обычной полуволновой ДФС (кривая 1) и для широкополосной полуволновой ДФС при значениях  $\psi = 60^\circ$  и  $\psi = 58^\circ$  (кривые 2 и 3 соответственно). Здесь рассмотрен случай поворота плоскости поляризации на  $90^\circ$ , когда амплитуда паразитной составляющей максимальна. Присутствие паразитной составляющей приводит к ошибке установки угла плоскости поляризации  $\Delta\theta$ , максимальное значение которой свя-

зано с углом разворота  $\psi$  простым выражением  $\Delta\theta = 180^\circ - 3\psi$ . Таким образом, при конструировании ВПП приходится искать компромисс между шириной рабочей полосы частот и величиной угловой ошибки поворота плоскости поляризации.

При выборе угла  $\psi = 60^\circ$  на центральной частоте паразитная составляющая сигнала отсутствует, достигая значения 0.1 (-20 дБ) на краях рабочей полосы частот с коэффициентом перекрытия  $f_{max}/f_{min} \approx 1.5$ . При выборе угла  $\psi = 58^\circ$  при том же уровне паразитной составляющей сигнала коэффициент перекрытия рабочих частот составляет  $f_{max}/f_{min} \approx 1.9$ .

### 3. Расчет двулучепреломляющего элемента

ДЭ в рассматриваемой ДФС могут иметь различную природу двулучепреломления. В настоящей работе в качестве ДЭ применен искусственный диэлектрик, представляющий собой многослойный набор чередующихся диэлектрических пластин с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1, \epsilon_2$  и толщиной  $t_1, t_2$  (рис. 4). Такой искусственный диэлектрик обладает так называемым двулучепреломлением формы [3], т. е. различием эффективных показателей преломления для волн поляризованных параллельно ( $n_p$ ) и ортогонально ( $n_s$ ) пластинам. Преимуществом такой структуры является возможность получения необходимых электрических параметров ДЭ путем изменения его конструктивных параметров. Детальный анализ таких структур для работы в длинноволновой части терагерцевого диапазона частот был проведен нами при помощи метода интегральных функционалов в работе [4]. Во избежание влияния высших дифракционных гармоник период такой структуры  $t_1 + t_2$  должен быть меньше самой короткой длины волны выбранного рабочего диапазона.

Рассмотрим один из возможных алгоритмов нахождения конструктивных параметров ДЭ для создания на их основе широкополосного ВПП в длинноволновой части терагерцевого диапазона. Конструктивные параметры и материалы структуры выбираются исходя из требований к затуханию, вносимому ДЭ, и степени согласования ДЭ с трактом.

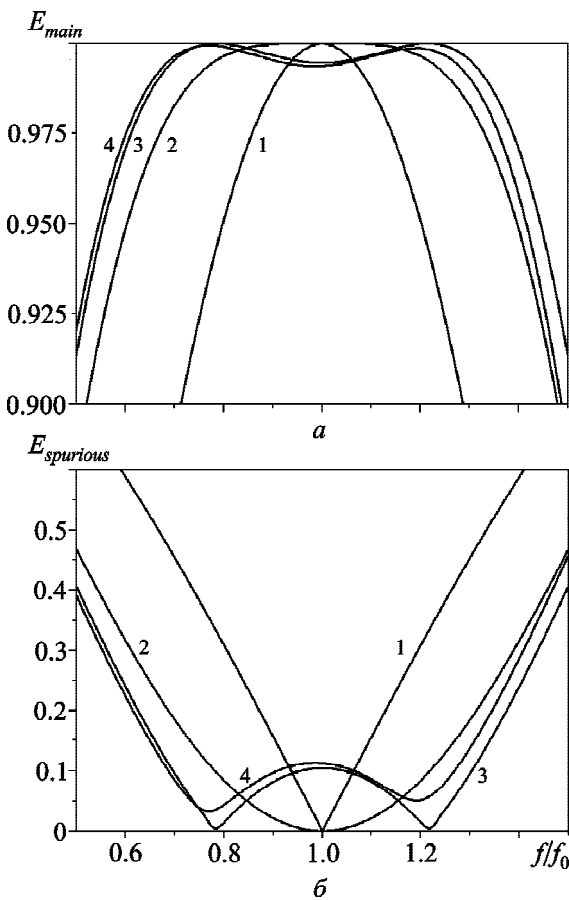


Рис. 3. Частотные зависимости основной (а) и паразитной (б) составляющих сигнала на выходе обычной полуволновой ДФС (кривые 1), на выходе широкополосной полуволновой ДФС, состоящей из трех идентичных ДЭ ( $\Delta_{0i} = 180^\circ$ ), при  $\psi = 60^\circ$  (кривые 2),  $\psi = 58^\circ$  (кривые 3) и на выходе широкополосной полуволновой ДФС, состоящей из трех неидентичных ДЭ ( $\Delta_{01} = \Delta_{03} = 185^\circ, \Delta_{02} = 180^\circ$ ), при  $\psi = 58^\circ$  (кривые 4)

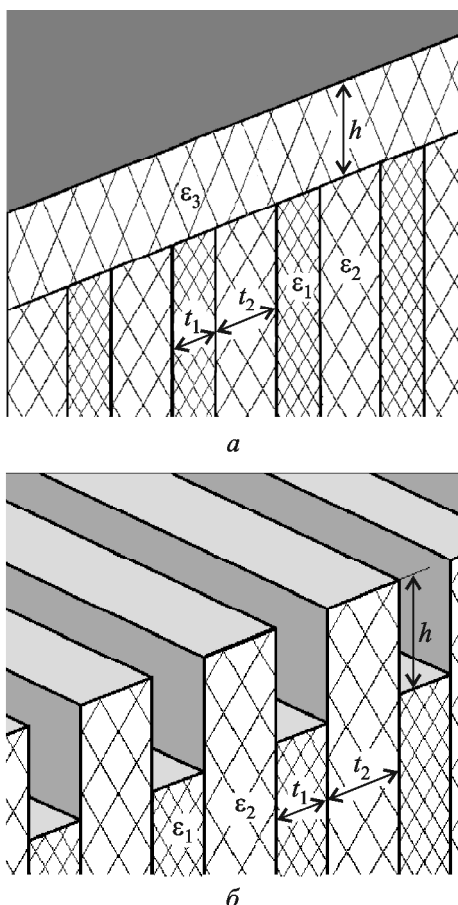


Рис. 4. Двулучепреломляющая структура и способы ее согласования с квазиоптическим трактом при помощи четвертьволнового слоя диэлектрика (а) или гребенчатой формы поверхности структуры (б)

Затухание в ДЭ, обладающем свойством двулучепреломления формы, определяется, с одной стороны, тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\text{tg} \delta$ ) материалов, из которых он изготовлен, а с другой – его размером вдоль оси лучевода. Как показано в работе [4], осевой размер ДЭ, создающего дифференциальный сдвиг фаз  $180^\circ$ , при  $(t_1 + t_2) \ll \lambda$  обратно пропорционален показателю двулучепреломления, равному разности показателей преломления структуры для волн, поляризованных параллельно и ортогонально плоскости анизотропии,  $\Delta n = n_p - n_s$ , и определяется выражением:  $L = \lambda / (2\Delta n)$ .

Показатель двулучепреломления  $\Delta n$  тем больше, чем больше разность диэлектрических проницаемостей применяемых диэлектриков  $\epsilon_1, \epsilon_2$ . При  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  зависимость показателя двулучепреломления от коэффициента заполнения структуры

диэлектриком с  $\epsilon_1$ ,  $F = t_1 / (t_1 + t_2)$ , имеет пологий максимум в области  $F \approx 0.6$ . Мы остановили свой выбор на комбинации широко распространенных материалов: слюды ( $\epsilon_1 = 6.9, \text{tg} \delta_1 \approx 10^{-3}$ ) и тефлона ( $\epsilon_2 = 2.07, \text{tg} \delta_2 \approx 10^{-4}$ ).

Зависимости показателей преломления  $n_p, n_s$  и показателя двулучепреломления  $\Delta n$  структуры “слюда–тефлон” от коэффициента заполнения слюдой  $F$  при  $(t_1 + t_2) / \lambda = 0.2$  приведены на рис. 5.

С точки зрения обеспечения минимальной осевой длины ДЭ следует выбирать коэффициент заполнения  $F = 0.6$ . Однако коэффициент заполнения такой структуры определяется также способом ее согласования с квазиоптическим трактом. В работе [5] нами были рассмотрены некоторые способы такого согласования. Один из них заключается в нанесении на поверхность двулучепреломляющей структуры четвертьволнового согласующего слоя изотропного диэлектрика (рис. 4, а). Поскольку показатели преломления структуры  $n_p, n_s$  отличаются, эффективная диэлектрическая проницаемость согласующего слоя  $\tilde{\epsilon}$  должна быть равна  $\tilde{\epsilon} = n_{av} = \sqrt{n_s n_p}$ . На рис. 5 показано графическое определение коэффициента заполнения  $F$  при согласовании двулучепреломляющей структуры четвертьволновыми слоями из тефлона и полистирола ( $\epsilon_{pol} = 2.5, \text{tg} \delta \approx 10^{-3}$ ). Значения коэффициента заполнения  $F$  соответствуют точкам пересечения кривой  $n_{av}$  и линий диэлектрической проницаемости тефлона  $\epsilon_{teflon}$  и полистирола  $\epsilon_{pol}$  и равны соответственно 0.6 и 0.93. При таких значениях

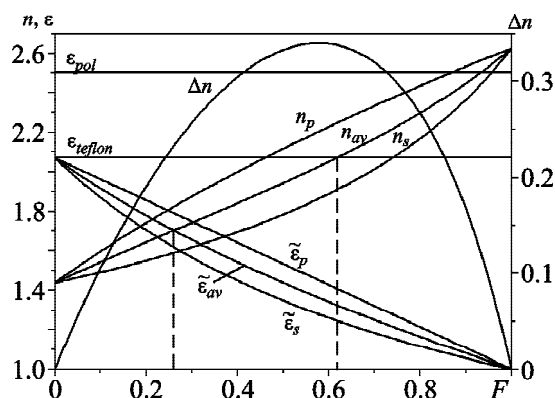


Рис. 5. Зависимости показателей преломления  $n_p, n_s, \Delta n$  структуры “слюда–тефлон”, диэлектрических проницаемостей полистирола  $\epsilon_{pol}$ , тефлона  $\epsilon_{teflon}$  и искусственно согласующего слоя  $\tilde{\epsilon}_p, \tilde{\epsilon}_s$ , а также  $n_{av} = \sqrt{n_s n_p}$  и  $\tilde{\epsilon}_{av} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_s \tilde{\epsilon}_p}$  от коэффициента заполнения  $F$

коэффициента заполнения показатель двулучепреломления  $\Delta n$  структуры “слюда–тефлон” равен 0.34 и 0.126 соответственно. Осевой размер ДЭ для работы в полосе с центральной частотой  $f_0 = 0.15$  ТГц при этом равен соответственно  $\approx 3$  и  $\approx 9$  мм. С точки зрения обеспечения минимального затухания использование тефлона в качестве согласующего слоя предпочтительнее. Частотные зависимости коэффициента отражения по полю  $R$  волн, поляризованных параллельно ( $n_p$ ) и ортогонально ( $n_s$ ) плоскости анизотропии, от полубесконечной двулучепреломляющей структуры “слюда–тефлон”, согласованной с помощью четвертьволнового согласующего слоя из тефлона, приведены на рис. 6 (кривые  $1p$  и  $1s$  соответственно).

Второй способ согласования заключается в использовании гребенчатой формы поверхности двулучепреломляющей структуры, когда пластинки из одного диэлектрика выступают на заданную высоту  $h$  над пластинками из другого диэлектрика (рис. 4, б). Выступающие пластинки образуют двулучепреломляющую структуру “диэлектрик–воздух”, имеющую диэлектрические проницаемости  $\tilde{\epsilon}_p$  и  $\tilde{\epsilon}_s$  соответственно для волн, поляризованных параллельно и ортогонально плоскости анизотропии. В работе [4] было показано, что более эффективное согласование происходит, когда над поверхностью структуры выступают пластинки из диэлектрика с меньшей диэлектрической проницаемостью, – в данном случае пластинки из тефлона. На рис. 5 значение коэффициента заполнения  $F$  структуры при ее согласовании с помощью анизотропного искусственного

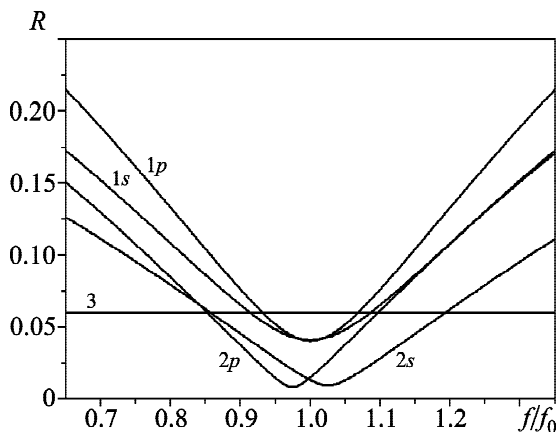


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения по полю

диэлектрика “тефлон–воздух” соответствует точке пересечения кривых  $\tilde{\epsilon}_{av} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_s \tilde{\epsilon}_p}$  и  $n_{av}$  и равно 0.26. При таком коэффициенте заполнения показатель двулучепреломления  $\Delta n = 0.23$ , а осевой размер ДЭ для работы в полосе с центральной частотой  $f_0 = 0.15$  ТГц равен 4.35 мм.

Частотные зависимости коэффициента отражения  $R$  волн, поляризованных параллельно и ортогонально плоскости анизотропии, от полубесконечной двулучепреломляющей структуры “слюда–тефлон”, согласованной при помощи гребенчатой формы поверхности, приведены на рис. 6 (кривые  $2p$  и  $2s$ ). Анализ показывает, что в частотном диапазоне  $f/f_0 = 0.65 \div 1.35$  рассмотренный способ обеспечивает более эффективное согласование, чем в случае применения четвертьволнового согласующего слоя изотропного диэлектрика.

На основании проведенного выше анализа для широкополосной полуволновой ДФС был выбран ДЭ в виде двулучепреломляющей структуры “слюда–тефлон” с коэффициентом заполнения слюдой  $F = 0.26$ , согласованный с квазиоптическим трактом при помощи гребенчатой формы поверхности структуры, в которой пластины из тефлона выступают на высоту  $h = \lambda_0 / (4\sqrt{\tilde{\epsilon}_{av}})$ .

#### 4. Широкополосный ВПП для 2 мм диапазона длин волн

Для работы в полосе с центральной частотой  $f_0 = 0.15$  ТГц период структуры  $t_1 + t_2$  выбран равным 0.4 мм ( $0.2\lambda_0$ ), осевая длина —  $L = 4.35$  мм, высота согласующего слоя —  $h = 0.38$  мм. Согласующий слой был выполнен только на внешних поверхностях крайних ДЭ, поскольку коэффициент отражения от среднего ДЭ для угла  $\psi \approx 60^\circ$  составляет  $R = 0.06$  (линия 3 на рис. 6). В средней части частотного диапазона это значение несколько выше значений  $R$  для крайних ДЭ, согласованных обоими способами, а на краях диапазона — ниже.

Внешний вид ДЭ представлен на рис. 7, а.

Следует отметить, что при согласовании за счет выбора гребенчатой формы поверхности структуры происходит увеличение дифференциального сдвига фаз, создаваемого крайними ДЭ. Это увеличение определяется формулой  $\zeta = 2\pi h (\sqrt{\tilde{\epsilon}_p} - \sqrt{\tilde{\epsilon}_s}) / \lambda$  и на центральной частоте

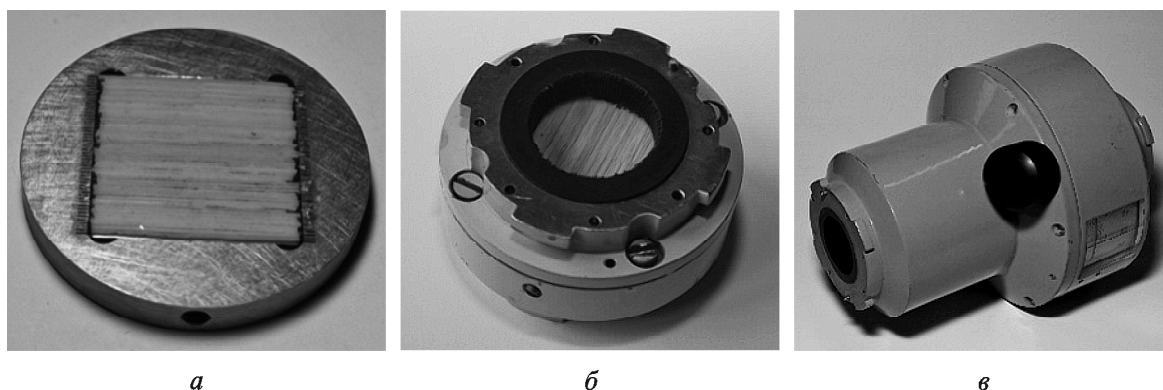


Рис. 7. Внешний вид ДЭ (а); внешний вид широкополосного ВПП, позволяющего поворачивать плоскость поляризации на  $90^\circ$ , (б); внешний вид прецизионного широкополосного ВПП (в)

составляет  $\approx 5^\circ$ . Частотные зависимости основной и паразитной составляющих сигнала на выходе широкополосной ДФС для этого случая приведены на рис. 3, а, б (кривые 3). Наличие анизотропного согласующего слоя на крайних ДЭ приводит к незначительному ухудшению частотных характеристик основной и паразитной составляющих сигнала и небольшому смещению рабочей полосы ДФС в область низких частот.

Для изображенного на рис. 1 ВПП 8, который используется в схеме коммутатора, максимальный уровень ортогональной паразитной составляющей сигнала, не вносящий значительной погрешности в работу эллипсометра, может достигать  $-20$  дБ. Такой уровень паразитного сигнала на центральной частоте имеет место при угле разворота ДЭ, образующих ВПП,  $\psi = 58^\circ$ . При этом относительная полоса рабочих частот имеет коэффициент перекрытия  $f_{\max}/f_{\min} \approx 1.72$ . Внешний вид выполненного на базе полого диэлектрического волновода [6] диаметром 20 мм широкополосного ВПП, осуществляющего поворот плоскости поляризации на фиксированный угол  $90^\circ$ , представлен на рис. 7, б.

Для ВПП 7 (рис. 1), устанавливающего необходимый угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны, такой уровень ортогональной паразитной составляющей сигнала неприемлем. При уровне ортогональной паразитной составляющей  $-20$  дБ максимальная ошибка установки угла поворота плоскости поляризации  $\Delta\theta$  составляет около  $6^\circ$ . Для того чтобы сохранить ширину рабочей полосы и уменьшить уровень паразитного сигнала на выходе широкополосной ДФС устанавливается линейный поляризатор в виде одномер-

ной проволочной решетки, вращающийся вокруг оси лучевода с удвоенной скоростью по отношению к скорости вращения плоскости анизотропии ДФС. Решетка, выполненная из вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм с шагом 40 мкм, обеспечивает поляризационную развязку в диапазоне  $f = 0.1 \div 0.2$  ТГц около 35 дБ. Внешний вид прецизионного широкополосного ВПП для поворота плоскости поляризации на угол от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  представлен на рис. 7, в.

## 5. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование широкополосных ВПП было проведено в частотном диапазоне  $f = 0.11 \div 0.225$  ТГц с помощью панорамных измерителей Elmika R2204R ( $f = 0.11 \div 0.17$  ТГц) и Elmika P2-139 ( $f = 0.175 \div 0.225$  ТГц). При этом измерялись коэффициенты передачи  $K$  основной и паразитной ортогональных составляющих на выходе ВПП при повороте плоскости поляризации на  $90^\circ$ . Результаты измерений представлены на рис. 8.

Затухание основной составляющей сигнала, включающее омические и поляризационные потери в диапазоне  $f = 0.11 \div 0.19$  ТГц, не превышает 1 дБ, плавно увеличиваясь до 1.5 дБ в диапазоне  $f = 0.19 \div 0.225$  ТГц. Уровень паразитной составляющей на выходе ВПП без поляризующей решетки не превышает  $-20$  дБ в полосе частот  $f = 0.11 \div 0.19$  ТГц. Уровень паразитной составляющей при наличии поляризующей решетки был ниже потенциала установки ( $-40$  дБ для Elmika R2204R и  $-35$  дБ для Elmika P2-139) во всем частотном диапазоне.

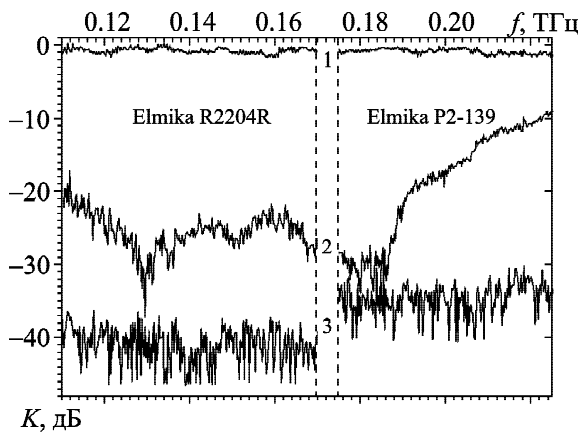


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента передачи основной составляющей сигнала (кривая 1) и коэффициентов передачи паразитной составляющей сигнала на выходе ВПП без дополнительной поляризующей решетки (кривая 2) и при наличии поляризующей решетки (кривая 3)

## 6. Выводы

В результате проведенной работы был разработан и реализован широкополосный вращатель плоскости поляризации, работающий в диапазоне  $f = 0.11 \div 0.225$  ТГц, равном суммарной девиации частот панорамных измерителей Elmika R2204R ( $f = 0.11 \div 0.17$  ТГц) и Elmika P2-139 ( $f = 0.175 \div 0.225$  ТГц). Данные, полученные в результате исследования, позволяют сделать вывод о возможности использования разработанного ВПП в эллипсометрических измерительных системах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоволновая эллипсометрия / Конев В. А., Кулешов Е. М., Пунько Н. Н. / Под ред. И. С. Ковалева. – Минск: Наука и техника, 1985. – 104 с.
2. Косяк О. С., Безбородов В. И., Кулешов Е. М., Нестеров П. К. Перестраиваемые и широкополосные дифференциальные фазовые секции в терагерцевом диапазоне частот // Радиофизика и радиоастрономия. – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 318–329.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина под ред. Г. П. Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
4. Безбородов В. И., Косяк О. С., Кулешов Е. М., Ячин В. В. Дифференциальные фазовые секции на основе двулучепреломления формы в терагерцевом диапазоне частот // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5(19), № 3. – С. 92–97.
5. Безбородов В. И., Косяк О. С., Кулешов Е. М., Ячин В. В. Согласование структур с двулучепреломлением формы со свободным пространством в терагерцевом диапазоне частот // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), № 2. – С. 83–89.

6. Кулешов Е. М. Глава 8. Измерения в субмиллиметровом диапазоне радиоволн / Радиоэлектроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 140–157.

## REFERENCES

1. KONEV, V. A., KULESHOV, YE. M. and PUNKO, N. N., 1985. *Radio-wave ellipsometry*. Minsk, USSR: Nauka i Tekhnika Publ. (in Russian).
2. KOSIAK, O. S., BEZBORODOV, V. I., KULESHOV, YE. M. and NESTEROV, P. K., 2016. Tunable and Broadband Differential Phase Sections in Terahertz Frequency Range. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 4, pp. 318–329 (in Russian).
3. BORN, M. and WOLF, E., 1968. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press.
4. BEZBORODOV, V. I., KOSIAK, O. S., KULESHOV, YE. M. and YACHIN, V. V., 2015. Differential Phase Sections Based on Form Birefringence in the Terahertz Frequency Range. *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 74, is. 8, pp. 735–744. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i8.70
5. BEZBORODOV, V. I., KOSIAK, O. S., KULESHOV, YE. M. and YACHIN, V. V., 2015. Form Birefringent Structures Matching to Free Space in the Terahertz Frequency Range. *Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 74, is. 19, pp. 1767–1776. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i19.90
6. KULESHOV, YE. M., 1986. Chapter 8. Measurements in submillimeter wavelength band. In: A. Y. USIKOV, ed. *Electronics and Radio Physics of Millimeter and Submillimeter Waves*. Kyiv: Naukova Dumka Publ., pp. 140–157 (in Russian).

O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, and I. K. Kuz'michev

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

## POLARIZATION ROTATOR FOR BROADBAND THZ ELLIPSOMETER

*Purpose:* The possibility of creating a broadband polarization rotator for the long-wave terahertz range is studied.

*Design/methodology/approach:* To achieve the purpose set the results of the work done have been used where tunable and broadband differential phase sections consisting of several birefringent elements were considered using the method of polarization scattering matrix.

*Findings:* It is shown that the use of the broadband differential phase sections can significantly extend the operating frequency range of the polarization rotator.

*Conclusions:* The experimental study confirmed the possibility of creating a broadband polarization rotator. Artificial dielectrics which have a so-called form birefringence property were applied as the birefringent elements.

*Key words:* quasioptics, terahertz range, polarization rotator, differential phase section, birefringence

О. С. Косяк, В. І. Безбородов, І. К. Кузьмичов

Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України,  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

ОБЕРТАЧ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ  
ДЛЯ ШИРОКОСМУГОВОГО ЕЛІПСОМЕТРА  
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНА

*Предмет і мета роботи:* Досліджується можливість створення широкосмугового обертача площини поляризації для довгохвильової частини терагерцевого діапазону.

*Методи та методологія:* Для досягнення поставленої мети були використані результати роботи, в якій методом поляризаційних матриць розсіяння розглянуто перестроювані і широкосмугові диференціальні фазові секції,

що складаються з декількох елементів з подвійним променезаломленням.

*Результати:* Показано, що застосування широкосмугових диференціальних фазових секцій дозволяє значно розширити робочу смугу частот обертача площини поляризації.

*Висновок:* Експериментальне дослідження підтвердило можливість створення широкосмугового обертача площини поляризації. В якості елементів з подвійним променезаломленням були застосовані штучні діелектрики, що мають так зване подвійне променезаломлення форми.

*Ключові слова:* квазіоптика, терагерцевий діапазон, обертач площини поляризації, диференціальна фазова секція, подвійне променезаломлення

*Статья поступила в редакцию 20.02.2017*