УДК 537.874.2

ПРОФИЛЬ ГОФРИРОВКИ ДЛЯ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Е. В. Копосова*, Л. В. Лубяко

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассматривается и систематизируется режим разделения двух ортогонально поляризованных *E*и *H*-волн с помощью металлической отражающей дифракционной решётки, при падении на которую вся энергия волны одной поляризации направляется в зеркальный, а другой поляризации — в минус первый порядок дифракции (при этом используется режим автоколлимации). Исследуются условия существования такого режима в простейших случаях (обобщение подхода [1, 2] на случай синусоидальной поверхности), а также возможность построения более сложных профилей гофрировки (отличных от синусоидального), для которых указанный режим обладает определёнными преимуществами, например, реализуется в более широкой полосе частот. Приводятся примеры таких профилей. Исследования проводятся на основе численного решения задачи о дифракции плоской электромагнитной волны на идеально проводящей гофрированной поверхности методом интегрального уравнения с помощью авторской компьютерной программы, визуализируюшей результаты.

введение

В коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн используются квазиоптические аналоги волноводных элементов (ответвители, фильтры и т. д.), что позволяет снизить потери при передаче энергии и повысить электропрочность сверхвысокочастотного (СВЧ) тракта. Это особенно важно для применения элементов в радиолокации [3, 4] и в системах электронноциклотронно- го нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза нового поколения [5–7], где мощность излучения может превышать мегаватный уровень. Представляется привлекательным создавать устройства с использованием металлических отражательных дифракционных решёток, отвечающих требованиям электропрочности. За последние годы на базе таких решёток были разработаны и испытаны диплексеры [8, 9], позволяющие суммировать на общей нагрузке излучение двух разночастотных гиротронов и при необходимости быстро коммутировать суммарное излучение между двумя нагрузками, а также дуплексеры [1, 2], обеспечивающие работу локационного устройства на одну антенну за счёт поляризационного различия излучаемого и принимаемого сигналов.

Такие решётки могут использоваться как анализаторы поляризации падающего излучения или в качестве элементов связи в резонаторном диплексере [8]. В этом случае коэффициент связи можно подбирать с помощью варьирования поляризации падающего излучения, а быстрое изменение поляризации превращает такой диплексер в коммутатор каналов.

В данной работе рассматриваются и систематизируются режимы разделения двух ортогонально поляризованных E- и H-волн с помощью решётки, которая всю энергию волны с одной поляризацией направляет в зеркальный порядок, а другой поляризации — в (-1)-й порядок дифракции. Для (-1)-го порядка при этом используется режим автоколлимации. Простейший вариант такого режима для синусоидальной поверхности был использован в работах [1, 2]. В настоящей статье исследуется обобщение этого режима, т.е. условия существования такого режима в различных конфигурациях, а также его особенности в зависимости от профиля гофрировки. Демонстрируется также возможность построить профили гофрировки, позволяющие достичь требуемых

^{*} ev koposova@mail.ru

характеристик рассматриваемого режима, т.е. его проявления в необходимом диапазоне параметров. Например, можно обеспечить более широкую частотную полосу режима при нужном угле падения (возможность настройки угла падения и отражения важна при конструировании конкретных приборов).

Исследования проводятся на основании численного решения задачи о дифракции плоской электромагнитной волны на идеально проводящей гофрированной поверхности методом интегрального уравнения [10–15], посредством авторской компьютерной программы [16, 17] с визуальным представлением результатов. Последнее помогает увидеть и понять сложные закономерности рассеяния волн периодическими поверхностями с разными профилями гофрировки, почувствовать тенденцию эволюции рассматриваемых режимов в зависимости от параметров и, в совокупности с качественными физическими соображениями, сделать выводы о путях нахождения параметров профилей гофрировки для реализации режима с желаемыми характеристиками.

1. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЖИМА РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЙ

Существует бесконечное множество поверхностей, способных разделять поляризацию. Простейшие из них (синусоида, равнобедренный треугольник, симметричный прямоугольник) определяются только двумя параметрами — периодом и глубиной. При этом в каждом конкретном режиме разделения поляризаций для такой двухпараметрической поверхности существуют свои локальные параметры $a = A_0/\lambda$, где $A_0 = h/2$ — амплитуда гофрировки поверхности, или половина глубины гофрировки, $\kappa = d/\lambda$ — дифракционный параметр, являющийся отношением периода структуры к длине волны, а также частотная полоса, на определённом уровне коэффициента отражения, например 0,9. Поиск профиля гофрировки осуществляется оптимизацией параметров [18].

Если профиль гофрировки отличается от простейшего, требуется, кроме глубины и периода, вводить другие параметры её описания. Профиль гофрировки можно разложить в ряд Фурье с учётом необходимого количества гармоник [18], но более практично воспользоваться параметрами q_d и q_q по аналогии с работами [17] и [19], характеризующими наклон стенок и ширину плоского дна гофрировки. Профили, для описания формы которых достаточно этих двух параметров, будем относить к классу двухпараметрических профилей.

Кратко поясним параметры q_d и q_q на примере исходного синусоидального профиля гофрировки. Максимум синусоиды — вершину гофрировки — поместим в начало периода (начало отсчёта). Тогда середина периода совпадёт с минимумом синусоиды — дном гофрировки. Теперь разрежем синусоиду вертикальными линиями, проходящими через её вершину и дно, сожмём по горизонтали в $1/q_d$ раз. Параметр $q_d \in [0;1]$ будем условно называть параметром «сжатия». Он же характеризует наклон стенок профиля. Оставшуюся свободной после сжатия синусоиды часть периода гофрировки дополним двумя горизонтальными отрезками. Отрезки вставляются в разрезы в вершине и дне гофрировки. Параметром «несимметрии» $q_q \in [0;1]$ назовём отношение длины вставленного отрезка на дне гофрировки к суммарной длине вставок на дне и в вершине гофрировки. Введённый параметр q_q характеризует ширину плоского дна гофрировки. Если в качестве исходного профиля взять не синусоиду, а треугольник, то в результате описанных действий получится трапециевидная гофрировка. Из-за наличия углов треугольный и трапециевидный профили при расчёте раскладываются в ряд Фурье с учётом, по крайней мере, 25 гармоник.

Построим для *H*- и *E*-поляризованных волн диаграммы зависимости коэффициентов отражения (по мощности) в (-1)-й порядок дифракции в режиме автоколлимации [17] на плоскости

Профиль гофрировки	Параметры гофрировки	$\left R_{-1, H}\right ^2$	$\left R_{-1,E}\right ^2$	$\left(\left R_{-1, H} ight ^2 - \left R_{-1, E} ight ^2 + 1 ight) / 2$	d/λ	A_0/λ	$ heta_{i},$ гра- дусы	$\Delta \omega_{0,9}/\omega_0, \\ \%$
	трапеция $q_q = 0.5$				1,085	0,383	27,44	0,5
	$q_d = 0,1$				1,295 1,415	0,225 0,368	22,75 20,69	15 10
	трапеция							
	$q_q = 0.5$ $q_d = 0.5$				1,100	0,287	26,90	22
	трапеция $q_d=1,0$				1,055	0,363	28,29	28
	синусоида $q_d = 1,0$				1,076	0,318	27,69	25

Таблица 1

вышеуказанных параметров κ и a в представляющих практический интерес пределах двухволновой зоны $0.5 < \kappa < 1.5$ (абсцисса) и глубин, не превышающих двух длин волн, т.е. 0 < a < 1 (ордината). Коэффициент отражения будем характеризовать оттенками серого от белого (ноль) до чёрного (единица). Однако экстремальные значения коэффициентов отражения для чёткости восприятия будем выделять на диаграммах противоположным оттенком. Так, максимумы коэффициентов $|R_{-1,H}|^2 = 1$ и $|R_{-1,E}|^2 = 1$, соответствующие полному автоколлимационному отражению и отличающиеся от единицы не более чем на $5 \cdot 10^{-3}$, отметим светлым оттенком на чёрном фоне, а минимумы $|R_{-1,H}|^2 = 0$, $|R_{-1,E}|^2 = 0$, соответствующие полному зеркальному отражению, и отличающиеся от нуля не более чем на $5 \cdot 10^{-3}$, отметим тёмным оттенком на белом фоне.

Построим также диаграмму сводной зависимости, представляющую собой половину разности коэффициентов отражения волн с E- и H-поляризациями с добавкой, обеспечивающей представление в том же интервале оттенков: $(|R_{-1,H}|^2 - |R_{-1,E}|^2)/2 + 1/2$. Эта сводная диаграмма демонстрирует параметры локализации режимов разделения поляризации. Возможны два типа таких режимов. Первый тип соответствует полному отражению волны с H-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией — в зеркальный. Такой режим будет отображаться на диаграмме светлым пятном на чёрном фоне. Второй тип соответствует обратной ситуации: полному отражению волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с E-поляризацией в минус первый порядок дифракции, а волны с H-поляризацией — в зеркальный. Такой режим будет отображаться на диаграмме тёмным пятном на белом фоне.

Результаты будем представлять в виде табл. 1, содержащей в столбцах профиль гофрировки на периоде при модельной глубине, равной периоду, параметры профиля, вышеописанные диа-

граммы, параметры локализации искомых режимов по дифракционному параметру $\kappa = d/\lambda$, безразмерной глубине $a = 2A_0/\lambda$ и углу θ_i , если таковые имеются, и их полосу частот. В качестве полосы частот условно примем относительный интервал частот $\Delta\omega_{0,9}$ вблизи рабочей частоты ω_0 , в котором разделение поляризаций происходит с контрастом более 0,9. Под контрастом будем понимать величины $(|R_{-1,H}|^2 - |R_{-1,E}|^2 + 1)/2$ и $(|R_{-1,E}|^2 - |R_{-1,H}|^2 + 1)/2$ соответственно для режимов разделения поляризаций первого и второго типов. При наличии нескольких мест локализации искомых режимов в таблицах приводим только режимы, в которых амплитуда A_0 гофрировки не превышает длину волны λ в порядке возрастания дифракционного параметра d/λ .

В случае простейших профилей — близкого к прямоугольному, в виде трапеции и треугольника, а также синусоидального — закономерности достаточно наглядны.

Режимы полного автоколлимационного отражения в случае профилей, обладающих осевой симметрией, представляют собой, согласно [12, 17], семейство непрерывных линий. Их перемежают также непрерывные линии полного зеркального отражения. Пересечения линий $|R_{-1,H}|^2 = 1$ с $|R_{-1,E}|^2 = 0$, а также $|R_{-1,E}|^2 = 1$ с $|R_{-1,H}|^2 = 0$ соответствуют режимам полного разделения поляризаций первого и второго типов соответственно.

Поведение линий полного автоколлимационного и полного зеркального отражений для разных профилей гофрировки неодинаково. В основном оно определяется характеризующим крутизну наклона стенок параметром q_d , меняющимся от малых значений (среди которых есть резонансные) до единицы. Этим же параметром определяется и широкополосность режимов разделения поляризаций.

При крутых стенках, когда $q_d = 0,1$ (профиль, близкий к прямоугольному) для волны с Hполяризацией чётко видны почти вертикальные по переменной A_0/λ резонансные области возникновения волн в канавках с ростом параметра d/λ , разрывающие практически горизонтальные зоны полных автоколлимационного и зеркального отражений, расположенные с интервалом в $\lambda/4$ по вертикали. При этом происходит скачок линий зон с предыдущей на следующую. Линии для волн с E-поляризацией в случае крутых стенок расположены только в резонансной области больших значениях $d/\lambda \ge 1$. Режимы полного разделения поляризаций сосредоточены вблизи линий возникновения волн в плоскости параметров d/λ и A_0/λ и не могут быть широкополосными ввиду резких изменений коэффициентов отражения в этой области.

В случае трапециевидной гофрировки, когда параметр $q_d = 0,5$, режимы полного автоколлимационного и зеркального отражений существенно сглажены: резкие резонансы отсутствуют, однако пересечение линий полного автоколлимационного и зеркального отражений волн с *E*- и *H*-поляризациями возможно лишь в области достаточно резкого изменения коэффициентов отражения, что даёт среднюю полосу режима разделения поляризаций второго типа, несмотря на существенное смещение режима к центру интервала по переменной d/λ .

Для профилей гофрировки в виде синусоиды и треугольника кривые постоянных коэффициентов отражения идут достаточно плавно, а для волн с *E*-поляризацией занимают практически всю область по переменной d/λ . Именно плавность линий и достаточный интервал между ними дают возможность получить достаточно широкополосные режимы разделения поляризаций второго типа вблизи середины интервала d/λ . Рабочая область этого режима расположена в центральной части диапазона по углу θ_i , что может оказаться практически удобным. Именно этот режим для синусоидальной гофрировки был использован в работе [2]. Однако при этом треугольная гофрировка облает явным преимуществом по отношению к синусоидальной в смысле широкополосности режима.

Полосы режима разделения поляризаций, превышающие аналогичную полосу для синусоидальной гофрировки (включая её саму), выделены в таблице жирным шрифтом.

Для выбранного простейшего профиля гофрировки режим разделения поляризаций на иссле-

Таблица 2

Профиль гофрировки	Параметры гофрировки	$\left R_{-1,H}\right ^2$	$\left R_{-1,E}\right ^2$	$\frac{\left(\left R_{-1, H}\right ^{2} - \left R_{-1, E}\right ^{2} + 1\right)/2}{\left R_{-1, E}\right ^{2} + 1\right)/2}$	d/λ	A_0/λ	$ heta_{i}$, гра- дусы	$\Delta \omega_{0,9}/\omega_0, \ \%$
	синусоида $q_d = 0,5$ $q_q = 0$				0,540	0,100	67,81	57
	синусоида $q_d = 0,5$				1,346	0,289	21,81	13
	$q_q = 0,3$				1,150	0,221	15,01	
	синусоида $q_d = 0,5$			22.0	1,010	0,288	29,67	19
	$q_q = 0,6$				1,440 1,450	0,200 0,385	20,32	13 15
\backslash	синусоида	2///2 📕			0,735	0,305	42,86	18
	$\begin{array}{c c} q_d = 0,5 \\ q_q = 1,0 \end{array}$	\mathbb{Z}			1,005	0,402 0,285	29,84	16 5
		-				,_00		Ŭ

дуемой плоскости параметров *a* и κ представляется точкой как результатом пересечения соответствующих линий, а не линией, которая указывала бы на возможность его перестройки. При потребности изменить рабочий угол и подстроить его под конкретную конфигурацию (например, для использования в устройстве, подобном диплексеру [8, 20] с углом падения $\theta_i = 35,264^\circ$), т. е. сдвинуть точку локализации режима разделения поляризаций, необходимо изменять профиль, усложнять его, вводя дополнительные параметры.

Проиллюстрируем с помощью табл. 2 эволюцию режимов разделения поляризаций при изменении ширины канавки профиля q_q при фиксированном среднем наклоне стенок. Стенки канавки будем описывать синусоидой, занимающей половину периода, чему соответствует значение $q_d = 0.5$.

Из табл. 2 видно, что при достаточно узкой канавке типа щели, когда $q_q = 0$, линии полных автоколлимационного и зеркального отражений для волн с *H*-поляризацией расположены на ключевых четвертьволновых точках по глубине $2A_0$ и идут параллельно абсциссе d/λ независимо от дифракционного параметра d/λ и угла θ_i практически во всём их диапазоне за исключением его краёв. Это говорит о существовании одной электромагнитной моды в канавке. Волны с *E*-поляризацией начинают проникать в канавку только при высоких частотах и малых углах падения θ_i . При низких частотах, малых значениях дифракционного параметра d/λ и больших углах θ_i , близких к скользящим, зависимость коэффициентов отражения от дифракционного параметра и, как следствие, угла для волн с *E*-поляризацией очень слабая, а их величины близки к нулю. Зависимости коэффициентов отражения для волн с *H*-поляризацией при этих условиях, напротив, резкие.

При этих медленных зависимостях коэффициентов отражения для волн с *E*-поляризацией от параметров и резких зависимостях аналогичных величин для волн с *H*-поляризацией, при

близких к скользящим углах падения реализуется режим почти полного разделения поляризаций ¹ первого типа. Он возможен в нескольких зонах полного автоколлимационного отражения, однако практический интерес может представлять только первая из них при малых амплитудах гофрировки. В силу проявления режима на низких частотах его полоса на рассматриваемом уровне оказывается широкой ². Такой режим наблюдается в той или иной мере практически при любом профиле. Хотя рассматриваемый режим разделения поляризаций может не представлять технологического интереса, само его существование демонстрирует возможность (посредством усложнения профиля гофрировки) переместить его в более пригодную с точки зрения практического интереса область параметров. Это будет рассмотрено ниже.

С увеличением ширины канавки в ней, сначала на высоких частотах, а впоследствии и во всём рассматриваемом частотном диапазоне, начинают распространяться дополнительные волны, что видоизменяет линии полных автоколлимационного и зеркального отражений. Для волн с H-поляризацией эти линии постоянного коэффициента отражения с уширением канавки становятся сначала зигзагообразными с резким переходом с предыдущей на последующую в местах возникновения волн, а затем, при дальнейшем расширении канавки, становятся похожими на прямые, идущие под углом к оси абсцисс d/λ . Волны с E-поляризацией всё более проникают в канавку с её расширением, заполняя область малых дифракционных параметров d/λ и низких частот и образуя при максимально широкой канавке линии полных автоколлимационного и зеркального отражений, параллельные оси абсцисс d/λ в середине частотного диапазона (структура, напоминающая линии для волн с H-поляризацией при узкой канавке).

Режим второго типа осуществляется в первой зоне полного автоколлимационного отражения для E-поляризованных волн и зоне полного зеркального отражения для H-поляризованных волн, которая расположена при бо́льших глубинах гофрировки, чем первая зона полного автоколлимационного отражения для волн с H-поляризациией. Режим разделения поляризаций зарождается совместно с возникновением волн в канавке при больших дифракционных параметрах и в области малых углов падения при достаточно узкой канавке с параметром $q_q = 0,3$. С расширением канавки режим сдвигается в сторону меньших дифракционных параметров d/λ и бо́льших углов θ_i , проходит середину диапазона параметров d/λ и θ_i при $q_q = 0,6$ и смещается достаточно близко к его краю при $q_q = 1$.

Полосовые свойства этого режима являются умеренными на всём протяжении возможной перестройки ширины канавки, т. к. зависимости коэффициентов отражения достаточно быстроменяющиеся. Следует отметить, что для его осуществления в случае геометрии, используемой в диплексере при $\theta_i = 35,264^{\circ}$ [20, 21], требуется взять для канавки параметр $q_q \sim 0,8$. Однако при необходимости расширить полосу частот этого режима потребуется изменить профиль гофрировки путём введения дополнительных параметров.

2. РЕЖИМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЙ НА СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЯХ ГОФРИРОВКИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Как уже говорилось в предыдущем пункте, где были рассмотрены простейшие профили гофрировки, двухпараметрические профили не обеспечивают достаточно широкой полосы частот

¹ В данном случае речь идёт о практической реализации режима разделения поляризаций, без точного зануления потока волны с E-поляризацией в (-1)-й порядок дифракции, коэффициент отражения по мощности в который составляет $0,1\div0,2$ %.

 $^{^2}$ Формально, обладая шириной по уровню 0,9, сильно превосходящей соответствующую ширину для синусоидальной гофрировки, полоса частот оказывается «однобокой», при этом коэффициент отражения $|R_{-1,H}|^2 \leq 0,93$ на протяжении её существенной части.

режимов разделения поляризаций, а параметры их локализации не всегда удобны для использования в конкретных приборах. Поэтому встаёт вопрос об исследовании режимов разделения поляризаций при введении в описание профиля гофрировки третьего параметра.

Рассмотрим профиль с широкой канавкой $(q_q = 1)$, приведённый последним в предыдущем разделе. На диаграмме для волны с *H*-поляризацией для него первая линия полного автоколлимационного отражения, начинаясь с малых величин дифракционного параметра, идёт под большим углом к оси абсцисс, оставляя всю среднюю область слабо зависящей от параметров и характеризующейся небольшими значениями коэффициента отражения. Со стороны же больших дифракционных параметров наблюдается «отрезанный» резонансной областью возникновения волн кусок первой зоны полного зеркального отражения. Если в профиль гофрировки ввести элемент, который восстановил бы первую зону полного зеркального отражения до середины области, она оказалась бы схожей с первой линией полного автоколлимационного отражения для волн с *E*-поляризацией, откуда следует наличие и возможность настройки широкополосных режимов разделения поляризации второго типа.

Таким элементом может явиться перегородка посередине канавки, которая описывается дополнительной синусоидой, вставленной на относительной части $(1 - q_d) q_q$ от периода, с амплитудой \tilde{A} относительно амплитуды основной синусоиды. Эта перегородка качественно влияет на зависимости коэффициента отражения для волн с *H*-поляризацией и почти не оказывает влияния на аналогичные зависимости для волн с *E*-поляризацией, просто несколько поднимая их минимум.

С ростом амплитуды перегородки рассматриваемая зона полного зеркального отражения для волн с H-поляризацией вытягивается к центру диаграммы и опускается в сторону малых глубин профиля, зона же полного автоколлимационного отражения для волн с E-поляризацией, не меняясь по форме, незначительно поднимается вверх. Существуют две близкие точки их пересечения, обеспечивающие некоторую перестройку режима в пределах $1,15 < d/\lambda < 1,35$, а при некоторой амплитуде перегородки происходит их касание. В этом случае имеется некоторая протяжённая область в виде линии, на которой выполняется почти полное разделение поляризаций второго типа. Точному выполнению режима соответствует точка.

Полосовые свойства режима рассмотренного профиля гофрировки существенно превосходят свойства синусоидального профиля при прочих близких условиях ³. Однако данный режим может существовать лишь в центральной области диаграммы, его нельзя настроить для использования при больших углах падения. Это связано с работой на пологом экстремуме линии полного автоколлимационного отражения для волн с *E*-поляризацией, которая не может иметь минимум при $d/\lambda < 1$.

Поэтому встаёт вопрос о нахождении и исследовании другого широкополосного режима, который мог бы функционировать при больших углах. Вернёмся к профилю гофрировки в виде узких канавок (щелей), рассмотренному в предыдущем разделе.

Благодаря медленным зависимостям близких к нулю коэффициентов отражения для волн с *E*-поляризацией от параметров при почти скользящих углах падения при работе на полном автоколлимационном отражении для волн с *H*-поляризацией осуществляется режим почти полного разделения поляризаций первого типа. Подберём дополнительный параметр для профиля гофрировки, позволяющий расширить зону медленных зависимостей коэффициентов отражения для волн с *E*-поляризацией на всю область диаграммы, качественно не меняя при этом зависимости коэффициентов отражения для волн с *H*-поляризацией (позволяющие по своей форме иметь от-

³ Полоса столь широка, что захватывает своей частью область возникновения следующей распространяющейся волны и имеет соответствующую неровность в этом месте (это видно на рис. 3 ниже). Отсюда двойное толкование её ширины в табл. 3

Профиль гофрировки	Параметры гофрировки	$\left R_{-1, H} ight ^2$	$\left R_{-1,E}\right ^2$	$ig(ig R_{-1, \ H} ig ^2 - ig R_{-1, \ E} ig ^2 + 1 ig) / 2$	d/λ	A_0/λ	$ heta_{ m i},$ гра- дусы	$\Delta \omega_{0,9}/\omega_0, \\ \%$
	синусоида $q_d = 0,5$ $q_q = 1$ $ ilde{A} = 0,3$				0,198	0,285	24,67	46 (40)

Таблица 4

Профиль гофрировки	Параметры гофрировки	$\left R_{-1, H}\right ^2$	$\left R_{-1,E}\right ^2$	$(R_{-1,H} ^2 - R_{-1,E} ^2 + 1)/2$	d/λ	A_0/λ	$ heta_{ m i},$ гра- дусы	$\Delta \omega_{0,9}/\omega_0, \ \%$
\bigwedge	синусоида $\widetilde{A} \!=\! 0,\! 3$ $q_q \!=\! 1$ $q_d \!=\! 0,\! 4$				0,935	0,175	32,33	38

носительно широкополосные режимы) и сдвинуть тем самым рабочую точку в сторону меньших углов.

Эту роль может сыграть дополнительная канавка, описываемая синусоидой, вставленной сверху в «широкий зуб» на плоской относительной части $(1 - q_d) q_q$ периода с амплитудой \tilde{A} относительно амплитуды основной синусоиды. Интерференционное взаимодействие волн основной и дополнительной канавок даёт ещё одну зону полного зеркального отражения для волн с E-поляризацией в виде толстой линии, напоминающей параболу.

Положение этой линии на диаграмме зависит от наклона стенок и ширины основной канавки, но в большей степени от глубины дополнительной канавки. При этом существует её практически горизонтальное положение при малых амплитудах, покрывающее всю первую линию полного автоколлимационного отражения для волн с *H*-поляризацией. Это даёт возможность настроить режим разделения поляризаций практически на любой угол падения, начиная со скользящих углов до угла, соответствующего центру диапазона изменения дифракционного параметра.

В отличие от режима на узких щелях, рассмотренного в предыдущем разделе, данный режим является теоретически полным, т. к. происходит от точного пересечения двух линий: линии полного зеркального отражения для волн с *E*-поляризацией и линии полного автоколлимационного отражения для волн с *H*-поляризацией.

Коэффициенты отражения для волн с E-поляризацией близки к единице при отражении в зеркальный порядок и к нулю — в минус первый порядок в очень большом диапазоне исследуемых параметров. В результате очень медленных зависимостей зона полного зеркального отражения для волн с E-поляризацией имеет большую толщину. Это означает, что практически в любой точке обращения коэффициента отражения для волн с H-поляризацией в минус первый порядок в единицу искомый режим будет наблюдаться с достаточной степенью точности. Но точно он выполняется только в одной точке. Графически трудно определить на толстой зоне линию точного зануления коэффициентов отражения для точного определения точки пересечения. Однако это легко сделать по скачку фазы на π .

2014

Профиль гофрировки	Параметры гофрировки	Фаза коэффициента отражения для волны с <i>Е</i> -поляризацией	Та же фаза в сечении	d/λ	A_0/λ	$ heta_{i}$, гра- дусы	$\Delta \omega_{0,9}/\omega_0, \ \%$
	синусоида $q_d = 0,4$ $q_q = 1$ $\widetilde{A} = 0,28$			0,866	0,175	35,26	38

Таблица 5

Иллюстрацией к этому служит диаграмма для фаз, претерпевающих скачки на π в точке точного обращения в ноль коэффициента отражения, построенная на месте диаграммы коэффициента отражения (в строке табл. 5, описывающей профиль, подстроенный под желаемый угол $\theta_i = 35,264^\circ$, используемый в диплексере) в той же шкале оттенков в интервале от $-\pi$ до π . В соседней ячейке на месте диаграммы, демонстрирующей режимы разделения поляризаций, приведён график фазы в сечении, указанном на диаграмме. На нём чётко виден скачок на π в отличие от остальных скачков на 2π . Именно эта линия скачков фаз может быть использована вместо зоны полного зеркального отражения для волн с *E*-поляризацией для графического нахождения точки пересечения с линией полного автоколлимационного отражения для волн с *H*-поляризацией.

Рассмотренный режим является перестраиваемым в широком диапазоне κ и a при больших углах (при $d/\lambda < 1$) и достаточно широкополосным.

Очевидно, что рассмотренные профили гофрировки с перегородкой в канавке и ямкой в зубе обладают большим преимуществом перед простейшим синусоидальным профилем в плане существования широкополосных режимов разделения поляризаций с возможностью настройки практически во всём диапазоне $0.5 < \kappa < 1.5$.

3. ПРИМЕРЫ РАЗДЕЛЯЮЩИХ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ГОФРИРОВКИ С ИХ РАБОЧИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

На рис. 1 приведены рассмотренные в данной работе примеры пяти профилей, превосходящих синусоидальный профиль по широкополосности режимов (включая сам синусоидальный для сравнения), в масштабе длины волны.

Это синусоидальный, треугольный и сложный профили с перегородкой в канавке снизу, осуществляющие режим разделения поляризаций второго типа, а также сложный профиль с прогибом зуба сверху с вариантом его подстройки под геометрию диплексера, осуществляющий режим разделения поляризаций первого типа.

На рис. 2 приведены графики коэффициентов отражения *H*- и *E*-поляризованных волн в зависимости от нормированной на рабочую частоты при падении под рабочим углом (для каждого конкретного варианта он свой, как указано в таблицах) на поверхности, гофрированные каждым из пяти профилей, представленных на рис. 1. Условие автоколлимации выполняется только в рабочей точке, на других частотах происходит отстройка по углу согласно дисперсии решётки.



Рис. 1. Примеры профилей гофрировки в масштабе длины волны, превосходящих синусоидальный профиль по широкополосности режимов: 1 — синусоидальный, 2 — треугольный, 3 — с перегородкой снизу (режим второго типа: E в -1, H в 0), 4, 5 — с прогибом сверху (режим первого типа: Hв -1, E в 0)

На рис. 3 представлены частотные полосы режима разделения *E*- и *H*-поляризованных волн вблизи рабочих точек при использовании профилей гофрировки, изображённых на рис. 1, в сравнении с синусоидальным профилем.

Наиболее широкая полоса по уровню 0,9 из рассмотренных профилей оказалась у профиля гофрировки с перегородкой в канавке, затем идёт профиль с прогибом зуба и, наконец, треугольный профиль, полоса которого незначительно превосходит полосу синусоидального профиля.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе систематизированы режимы полного разделения поляризаций и разработана методика их поиска и настройки на нужные параметры рассеяния. Путём анализа показано, что подбором профиля можно несколько расширить частотную полосу решётки. Построены профили гофрировки, обладающие большей широкополосностью по сравнению



Рис. 2. Коэффициенты отражения по мощности *E*- (пунктир) и *H*-поляризованных (сплошные линии) волн вблизи рабочих точек режимов полного разделения поляризаций при дифракции на вышерассмотренных профилях



Рис. 3. Частотные полосы режима разделения *E*и *H*-поляризованных волн вблизи рабочих точек при использовании вышеуказанных профилей

163

с ранее использованным синусоидальным профилем. Построен профиль гофрировки для работы при заданном геометрией предполагаемого для использования угле падения.

Работа выполнена при поддержке Centre of Excellence, Netherlands (грант 047.018.002) и РФФИ (гранты 11–02–00554-а и 13–02–00611).

Авторы выражают благодарность В.И. Белоусову, С.Н. Власову и М.И. Петелину за внимание к работе, конструктивные рекомендации и ценные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hirshfield J. L., Kolchin P., Kuzikov S., Petelin M. // Digest 25th Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Beijing, 2000. P. 405.
- 2. Щегольков Д.Ю., Петелин М.И., Кузиков С.В. // Радиотехника XXI век: Научнотехнический журнал. 2010. № 4. С. 52.
- 3. Manheimer W., Fliflet A., Germain K. S., et al. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No. 3. P. 1103.
- 4. Usoff J. M. // Proc. IEEE Radar Conference, Boston, 2007. P. 17.
- 5. Kasparek W., Petelin M. I., Erckmann V., et al. // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 52. P. 281.
- 6. Bruschi A., Erckmann V., Kasparek W., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, No. 6. High-Power Microwave Generation. P. 1427.
- 7. Petelin M., Erckmann V., Hirshfield J.L., et al. // IEEE MTT Trans. 2009. V. 56, No. 5. P. 835.
- Кошуринов Ю. И., Павельев В. Г., Петелин М. И. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 16. С. 73.
- 9. Erckmann V., Kasparek W., Koshurinov Y., et al. // Fusion Sci. Technol. 2009. V. 55, No. 1. P. 23.
- Electromagnetic theory of gratings / Ed. by R. Petit. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980.
- 11. Вайнштейн Л.А., Суков А.И. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 19, № 8. С. 1472.
- 12. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решётки. Киев: Наукова думка, 1986.
- 13. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
- 14. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966. 240 с.
- 15. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции. М.: Наука, 1982. 273 с.
- 16. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 5-6. С. 482.
- 17. Власов С. Н., Копосова Е. В., Лапшина А. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 5. С. 391.
- 18. Копосова Е. В., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 9. С. 1178.
- 19. Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 269.
- 20. Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // Журн. техн. физ. 2012. Т. 82, № 7. С. 92.
- Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 6. С. 440.

Поступила в редакцию 4 июля 2013 г.; принята в печать 23 октября 2013 г.

CORRUGATION PROFILE FOR THE QUASIOPTICAL POLARIZATION SEPARATOR

E. V. Koposova and L. V. Lubyako

We consider and classify the regime of separation of two orthogonally polarized E and H waves by using a reflecting metal diffraction grating, which sends all the energy of an incident wave with

Е. В. Копосова, Л. В. Лубяко

164

one polarization into the reflecting order of diffraction, and that of an incident wave with the other polarization, into the minus first order of diffraction (in this case, the autocollimation regime is used). The conditions of existence of such a regime are studied in the simplest cases (generalization of the approach presented in [1, 2] for the case of a sinusoidal surface), as well as the possibility to construct more complex (non-sinusoidal) corrugation profiles, for which the specified regime has certain advantages, e.g., a wider bandwidth of its realization. Examples of such profiles are presented. The studies are performed on the basis of numerical solving of the problem about diffraction of a plane electromagnetic wave on a perfectly conducting corrugated surface by the integral-equation method using the authoring computer visualization code.