

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АТТЕНУАТОРЫ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Е. М. Кулешов, М. С. Яновский

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kiseliiov@ire.kharkov.ua*

Рассмотрены ограничения, возникающие при создании квазиоптических поляризационных аттенуаторов в терагерцевом диапазоне частот, связанные со снижением качества решеточных поляризаторов. На основании сравнения различных вариантов построения таких аттенуаторов сделан вывод о преимуществах аттенуаторов с проходными H -поляризаторами. Приведены результаты испытания таких аттенуаторов на основе полого диэлектрического и металлодиэлектрического волноводов. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, квазиоптика, поляризационные аттенуаторы.

В коротковолновом участке миллиметрового диапазона и в длинноволновом участке субмиллиметрового диапазона волн нашли применение прямоотсчетные поляризационные аттенуаторы [1, 2] для квазиоптических линий передачи, прежде всего, для полого диэлектрического лучевода (ПДЛ) [3] и металло-диэлектрического волновода (МДВ) [4]. Квазиоптические аттенуаторы (АТ) содержат по три последовательно включенных в тракт поляризатора на основе частопериодных проволочных решеток, при этом используются как проходные поляризаторы H (H -поляризаторы), так и отражающие (E -поляризаторы).

H -поляризатор характеризуется двумя коэффициентами передачи: \dot{T}_E - для прошедшей волны, поляризованной в азимутальной плоскости, параллельной проволочкам, и \dot{T}_H - для ортогонально поляризованной волны. Для идеального H -поляризатора $\left| \dot{T}_E \right| = T_E = 0$ и $\left| \dot{T}_H \right| = T_H = 1$.

E -поляризатор характеризуется двумя коэффициентами отражения: \dot{R}_E - для отраженной волны, поляризованной в азимутальной плоскости, параллельной проволочкам, и \dot{R}_H - для ортогонально поляризованной волны. Для идеального E -поляризатора $\left| \dot{R}_H \right| = R_H = 0$ и $\left| \dot{R}_E \right| = R_E = 1$.

В АТ средний поляризатор поворачивается относительно неподвижных крайних. Если угол поворота плоскости анизотропии среднего поляризатора θ , в тракт АТ с идеальными поляризаторами вводится ослабление электромагнитной волны по полю в $\sec^2 \theta$ раз, и шкала АТ рассчитывается в соответствии с формулой

$$A = 40 \lg \sec \theta, \text{ дБ.} \quad (1)$$

Если же решетка поляризатора установлена в диагональной плоскости H -разветвления лучеводов и поворачивается вокруг оси, перпендикулярной ее плоскости, связь между углом поворота плоскости анизотропии, углом поворота решетки ψ и углом падения φ волны на решетку дается формулой $\operatorname{tg} \theta = \sec \varphi \operatorname{tg} \psi$. При этом формула для расчета ослабления аттенуатора $A(\psi)$ принимает вид

$$A = 20 \lg 1 + \sec^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \psi, \text{ дБ.} \quad (2)$$

Основным ограничением при создании поляризационных АТ терагерцевого диапазона является снижение качества поляризаторов, обуславливающее основную погрешность АТ, по мере повышения частоты электромагнитной волны. Решетки для таких поляризаторов обычно осуществляются путем намотки параллельных проволоч на жесткие каркасы и дальнейшего их закрепления путем гальванического прорастивания либо иным способом закрепления. Однако при переходе в терагерцевый диапазон становится технологически затруднительным изготовление густых решеток проходных поляризаторов, для которых параметр $k = l/\lambda$, где l - период решетки; λ - длина волны, остается достаточно малым и при этом модуль коэффициента T_E достаточно близок к нулю, модуль T_H достаточно близок к единице, а также решеток отражающих поляризаторов, для которых соответственно модуль коэффициента R_E достаточно близок к единице, а модуль R_H достаточно близок к нулю.

Ниже будут рассмотрены ограничения в осуществлении АТ терагерцевого диапазона, обусловленные применением реальных поляризаторов. Это ограничения значений максимального ослабления АТ, а также наибольшего ослабления, отсчитываемого по его расчетной шкале, возрастание основной погрешности АТ при больших значениях ослабления, а также уровня побочного, ортогонально поляризованного сигнала на выходе АТ.

В работе [1] было показано, что минимальная основная погрешность аттенюатора с поворотным H -поляризатором, а также наибольшее значение его расчетного ослабления достигаются с частопериодными решетками, для которых отношение диаметра провода d к шагу l составляет $s = d/l \approx 0,25 \div 0,3$. При этом сдвиг фазы δ между прошедшими сквозь поворотную решетку H -поляризованным компонентом с амплитудой $T_H^2 \cos \theta$ и E -поляризованным компонентом с амплитудой $T_H T_E \sin \theta$ составляет $\pi/2$ [5-7]. Соответственно со сдвигом фазы $\pi/2$ на выходе аттенюатора оказываются поляризованные в одной плоскости полезный сигнал $T_H^3 \cos \theta$ и сигнал ошибки $T_H^2 T_E \sin \theta$. Этим достигается достаточно малое значение основной составляющей относительной погрешности аттенюатора, обусловленной проницаемостью решетки для E -поляризованной волны. Эта погрешность составляет $0,5 T_E^2 \text{tg}^4 \theta$, и таким образом оказывается возможным расширение интервала вводимых ослаблений (увеличение максимального расчетного ослабления аттенюатора). Аналогичные результаты получаются и в аттенюаторах с поворотным E -поляризатором.

Заметим, что для решеток с $k \sim 0,1$ сдвиг фазы между указанными компонентами выходного сигнала аттенюатора остается достаточно близким к $\pi/2$ и в более широком интервале значений s решетки - при $0,15 < s < 0,4$, что иллюстрируется зависимостью δ от s , представленной на рис. 1, где заштрихованная область соответствует $k \leq 0,1$ [5, 6].

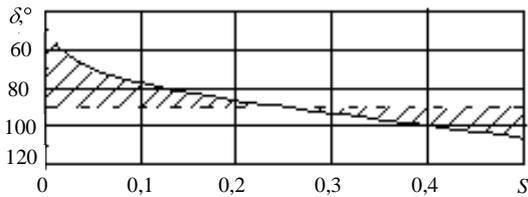


Рис. 1. Зависимость δ от s

Рассмотрим работу поляризационных аттенюаторов, в которых применяются H - и E -поляризаторы в различных сочетаниях, причем неподвижные поляризаторы в каждом случае однотипны. Для анализа работы аттенюаторов выберем прямоугольную систему координат с осью z , направленной вдоль оси приборов (вдоль направления распространения волны), и осью x , совпадающей с плоскостью поляризации линейно-поляризованного колебания на входе. При этом поляризационные матрицы рассеяния проходных (H) и отражающих (E) поляризаторов в

собственных базисах, совпадающих с выбранной системой координат, имеют соответственно следующий вид:

$$\hat{S}_H = \begin{pmatrix} T_H & 0 \\ 0 & jT_E \end{pmatrix}, \hat{S}_E = \begin{pmatrix} -R_E & 0 \\ 0 & jR_H \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Поляризационная матрица рассеяния аттенюатора $\hat{S}(\theta)$ получается путем перемножения соответствующих поляризационных матриц рассеяния поляризаторов и матриц поворота. При подаче на вход линейно-поляризованного колебания единичной амплитуды $\vec{E}_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ волна на выходе аттенюатора

$$\vec{E}_{\text{вых}}(\theta) = \hat{S} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x(\theta) \\ E_y(\theta) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

При этом основные параметры аттенюатора определяются следующим образом:

- начальное поляризационное ослабление (без учета омических и диффракционных потерь в тракте)

$$A_{\text{нач}} = -20 \lg |E_x(0^\circ)|; \quad (5)$$

- максимальное вводимое ослабление

$$A_{\text{max}} = -20 \lg |E_x(90^\circ)|; \quad (6)$$

- погрешность аттенюатора (отклонение ослабления от расчетного значения, отсчитываемого по шкале аттенюатора) для сигнала рабочей поляризации, принимаемого поляризационно-избирательным приемником

$$\Delta A = -20 \lg |E_x(\theta)| - A; \quad (7)$$

- отношение в децибелах сигналов рабочей (полезной) и ортогональной (побочной) поляризации на выходах аттенюатора

$$B = 20 \lg \frac{|E_y(\theta)|}{|E_x(\theta)|}; \quad (8)$$

- погрешность аттенюатора для полного выходного сигнала, принимаемого поляризационно неизбирательным приемником

$$\Delta A_{\text{непол.}} = -10 \lg |E_x(\theta)|^2 + |E_y(\theta)|^2 - A. \quad (9)$$

Необходимость учета погрешности АТ при использовании поляризационно неизбирательного приемника здесь обусловлена тем, что в терагерцевом диапазоне частот помимо использования поляризационно-избирательных приемников (например, с кристаллическими детекторами) широко используются также поляризационно неизбирательные оптико-акустические приемники электромагнитного излучения.

Результаты рассмотрения аттенуаторов различных видов сведены в таблице. В строке 1 таблицы схематически представлен вид АТ, а в строках 2-6 результаты расчета параметров этих

АТ по формулам (5)-(9) в предположении, что решетки всех поляризаторов идентичны и для них выполняется соотношения $T_E \ll T_H$ и $R_E \gg R_H$.

Результаты рассмотрения аттенуаторов различных видов

№	Параметр	Вид аттенуатора			
		1	2	3	4
1					
2	$A_{нач},$ дБ	$-20\lg T_H^3$	$-20\lg R_E^2 T_H$	$-20\lg T_H^2 R_E$	$-20\lg R_E^3$
3	$A_{макс},$ дБ	$-20\lg T_E$	$-20\lg T_E$	$-20\lg R_H$	$-20\lg R_H$
4	$\Delta A,$ дБ	$-10\lg(1+T_E^2 \text{tg}^4 \theta)$	$-10\lg(1+T_E^2 \text{tg}^4 \theta)$	$-10\lg(1+R_H^2 \text{tg}^4 \theta)$	$-10\lg(1+R_H^2 \text{tg}^4 \theta)$
5	$B,$ дБ	$20\lg T_E -$ $-10\lg(\text{ctg}^2 \theta +$ $+T_E^2 \text{tg}^2 \theta)$	$20\lg R_H -$ $-10\lg(\text{ctg}^2 \theta +$ $+T_E^2 \text{tg}^2 \theta)$	$20\lg T_E -$ $-10\lg(\text{ctg}^2 \theta +$ $+R_H^2 \text{tg}^2 \theta)$	$20\lg R_H -$ $-10\lg(\text{ctg}^2 \theta +$ $+R_H^2 \text{tg}^2 \theta)$
6	$\Delta A_{непол},$ дБ	$-10\lg \left(\frac{1+T_E^2 \text{tg}^4 \theta +}{+T_E^2 \text{tg}^2 \theta} \right)$	$-10\lg \left(\frac{1+T_E^2 \text{tg}^4 \theta +}{+R_H^2 \text{tg}^2 \theta} \right)$	$-10\lg \left(\frac{1+R_H^2 \text{tg}^4 \theta +}{+T_E^2 \text{tg}^2 \theta} \right)$	$-10\lg \left(\frac{1+R_H^2 \text{tg}^4 \theta +}{+R_H^2 \text{tg}^2 \theta} \right)$

Как видно из таблицы, лишь начальное поляризационное ослабление зависит от R_E и T_H . Вклад ослабления решеток в начальное ослабление АТ незначителен. В терагерцевом диапазоне существенно больший вклад в начальное ослабление дает затухание в поляризаторах, выполненных на основе ПДЛ, либо в прямоугольных разветвлениях поляризаторов, выполненных на основе МДВ.

Все остальные параметры зависят только от R_H и T_E , причем максимальное вводимое ослабление $A_{макс}$ и погрешность для основной поляризации ΔA определяются поляризующими свойствами среднего поворотного поляризатора, а отношение сигналов рабочей и ортогональной поляризации B и погрешность при приеме поляризационно неизбирательным приемником $\Delta A_{непол}$ - как свойствами поворотного, так и неподвижных поляризаторов. В связи с этим представляет интерес сопоставить эффективности H - и E -поляризаторов, или другими словами выяснить, как зависит отношение R_H / T_E от параметров k и s применяемой решетки.

Анализ результатов расчета R_H и T_E решеток в широком интервале значений k и s , проведенный по формулам работ [5], [7], показал, что для применяемых в терагерцевом диапазоне решеток с

$k=0,01 \div 0,2$ и $s=0,1 \div 0,4$ отношение R_H / T_E существенно зависит от s и практически не зависит от k . Результаты анализа представлены на рис. 2 в виде зависимости отношения R_H / T_E решеток от s при двух углах φ падения волны на решетку -0° и 45° . При этом угол $\varphi=45^\circ$ взят для случая расположения проволок решеток перпендикулярно плоскости падения волны (при расположении проволок в плоскости падения волны на решетку случай $\varphi=45^\circ$, по-видимому, существенно не отличается от случая $\varphi=0^\circ$).

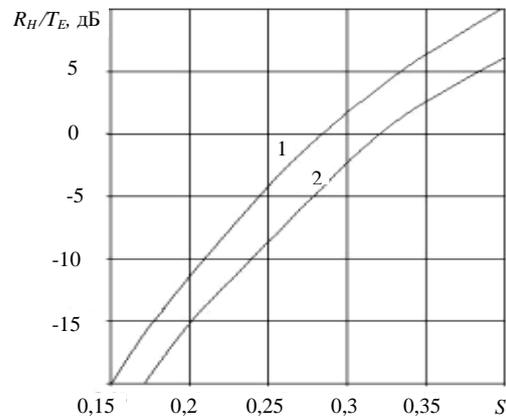


Рис. 2. Зависимость отношения R_H / T_E от s : кривая 1 для $\varphi=0^\circ$; кривая 2 для $\varphi=45^\circ$

Для $\varphi = 45^\circ$ и решеток с $s \sim 0,3$ схемное построение аттенуаторов не влияет на их параметры. При использовании решеток с $s > 0,32-0,33$ большее значение максимального ослабления и меньшая погрешность для основной поляризации реализуются с H -поляризаторами, а при использовании решеток с $s < 0,32-0,33$ - с E -поляризаторами.

Для рекомендуемых к применению и реализуемых в терагерцевом диапазоне решеток с $s \sim 0,25$ преимущество E -поляризаторов невелико, и более предпочтительным является использование H -поляризаторов, включение которых в тракт не приводит к изменению направления пучка и к связанными с таким изменением возможными угловыми ошибками прибора.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости основной составляющей погрешности АТ для ослабления сигнала рабочей поляризации на частоте 0,89 ТГц, принимаемого поляризационно-избирательным приемником, при использовании в H -поляризаторах решеток трех типов: 20x5 мкм; 40x10 мкм; 80x20 мкм (соответственно кривые 1, 2, 3).

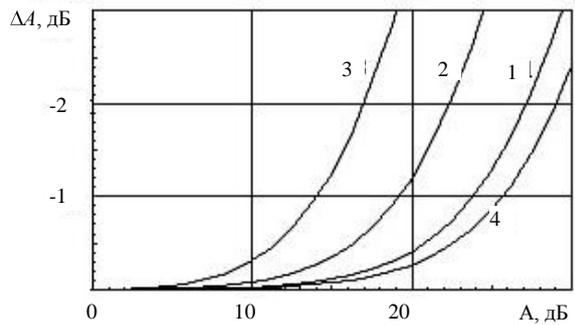


Рис. 3. Основная составляющая погрешности АТ на частоте 0,89 ТГц с решетками: 20x5 мкм (кривая 1); 40x10 мкм (кривая 2); 80x20 мкм (кривая 3); 40x15 мкм (кривая 4)

На рис. 4 приводится расчетная зависимость относительного уровня сигнала побочной поляризации на выходе АТ при использовании таких же решеток. Рассмотренная основная составляющая погрешности АТ является систематической, знак которой и величина для рабочей длины волны и для выбранных параметров решеток нам известны. В связи с этим при проектировании АТ для работы в заданном диапазоне частот его шкала может быть рассчитана с учетом данной поправки на средней частоте диапазона. Это существенно снизит основную составляющую погрешности на краях диапазона, при этом в коротковолновом участке заданного диапазона она будет входить в полную погрешность АТ со знаком -, а в длинноволновом - со знаком +.

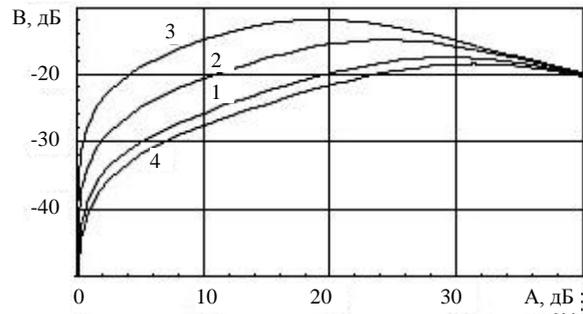


Рис. 4. Относительный уровень сигнала побочной поляризации на выходе АТ при использовании таких же решеток

Для решеток с $s \sim 0,4$ применение H -поляризаторов позволяет получить большее максимальное ослабление и меньшую погрешность по сравнению с применением E -поляризаторов. Для решеток с $s \sim 0,15$ применение E -поляризаторов позволяет получить максимальное ослабление на ~ 20 дБ больше и меньшую погрешность по сравнению с применением H -поляризаторов. Однако выполнение решеток с $k < 0,1$ и $s < 0,2$ в терагерцевом диапазоне связано со значительными технологическими трудностями.

Все изложенное позволяет сделать заключение о предпочтительности использования в терагерцевом диапазоне частот (во всяком случае, в его длинноволновой части) АТ с H -поляризаторами, в которых решетка выполнена с $s \sim 0,4$.

Испытание прямоотсчетного АТ на основе ПДЛ диаметром 20 мм с тремя идентичными H -поляризаторами с решетками из вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм, намотанной с периодом 30 мкм, было проведено на частоте 0,89 ТГц, генерируемой газовым HCN лазером. Такой АТ имеет максимальное ослабление 30 дБ, максимальное ослабление, отсчитываемое по расчетной шкале, 20 дБ. Полная погрешность АТ не превышает $\pm (0,1 + 0,03A)$, дБ, где A - ослабление по шкале в децибелах. Начальное ослабление АТ менее 0,6 дБ, КСВН - менее 1,05.

Также осуществлен и испытан АТ на основе полого металло-диэлектрического волновода квадратного поперечного сечения 10x10 мм с поляризующими решетками 40x10 мкм. В диапазоне 0,26 ТГц максимальное ослабление такого аттенуатора 35 дБ, расчетная шкала ослаблений $A=(0..25)$ дБ, начальное ослабление 0,3 дБ, КСВН < 1,05. Погрешность АТ $\pm (0,1 + 0,02A)$, дБ. Фото внешнего вида этого АТ представлено на рис. 5.



Рис. 5. Аттенуатор на основе МДВ

QUASIOPTICAL POLARIZATION ATTENUATORS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliov,
Ye. M. Kuleshov, M. S. Yanovsky

The loss of quality of grating polarizers operating in terahertz frequency range results in the limitations of inserted attenuation interval indicated by direct reading scale of polarization attenuator and occurrence of parasitic orthogonally polarized signal on the attenuator output. The comparison of different modifications of polarization attenuators including transmitting and reflective polarizers has allowed to make conclusion of merits of attenuators including transmitting polarizers. The examples of the attenuators realized on the basis of hollow dielectric and metal-dielectric waveguides are presented.

Key words: terahertz range, quasioptics, polarization attenuators.

КВАЗІОПТИЧНІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ АТЕНУАТОРИ У ТЕРАГЕРЦЕВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В. І. Безбородов, В. К. Кісельов,
Є. М. Кулешов, М. С. Яновський

Розглянуто обмеження, які виникають при створенні квазіоптичних поляризаційних аттенуаторів у терагерцевому діапазоні частот, які зв'язані із зниженням якості ґраткових поляризаторів. На основі порівняння різних варіантів побудови таких аттенуаторів зроблено висновок про переваги аттенуаторів з прохідними *H*-поляризаторами. Подано результати дослідження таких аттенуаторів на основі порожнистого діелектричного та метало-діелектричного хвильоводів.

Ключові слова: терагерцевий діапазон, квазіоптика, поляризаційні аттенуатори.

Рукопись поступила 23 марта 2007 г.

1. Яновский М. С., Князьков Б. Н., Кулешов Е. М. Поляризационные аттенуаторы для квазиоптического тракта // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1974. - 17, №9. - С.49-54.
2. Безбородов В. И., Киселёв В. К., Князьков Б. Н. и др. Сверхширокополосный квазиоптический поляризационный аттенуатор для металлodielectricкого волновода // Радиофизика и электроника - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1998. - 3, №1. - С.102-104.
3. А.с. 302054 СССР БИ. Диэлектрический лучевод субмиллиметрового диапазона волн / Ахиезер А. Н., Горошко А. И. и др. // Открытия. Изобретения. - 1972. - №8.
4. Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Прямоугольные волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электроника. - 1978. - 23, №10. - С.2060-2068.
5. Вайнштейн Л. А. К электродинамической теории решеток // Электроника больших мощностей. - 1963. - №2. - С.26-74.
6. Киселёв В. К., Кушта Т. М., Литвинов Д. Д. Методика расчета решеточных поляризационных разделителей для квазиоптических поляриметров // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1987. - 30, №5. - С.28-32.
7. Шестопалов В. П., Литвиненко Л. Н. и др. Дифракция волн на решетках. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. - 287с.