

Юрий ВАСИЛЬЕВ,
д. т. н., профессор

Потери в микрооптическом переключателе оптических каналов

Перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ) зависят от уровня разработок оптических коммутационных устройств. В работе [1] описан принцип работы микрооптических двухкоординатных акустооптических переключателей (ДАОП), использующих с целью миниатюризации в качестве коллимирующей и фокусирующей оптической системы две стержневые градиентные линзы типа «градан», состыкованные с входным и выходными оптическими волокнами (ОВ) каналов. На рис. 1 изображена схема ДАОП.

Коллиматорный 2 и фокусирующий 4 граданы расположены на одной оптической оси, проходящей через звукопровод ДАОЯ 3. Для засветки области акустооптического взаимодействия световым пучком под углами Брэгга ОВ 1 стыкуется с торцом градана 2 со сдвигом относительно его оси. ОВ 5 стыкуются с торцом градана 4 также на удалении от оси для фокусировки дифрагированного светового пучка, излучаемого ОВ 1, на торце одного из ОВ 5, в зависимости от переключения в тот или иной выходной оптический канал.

Одним из основных параметров ДАОП являются вносимые оптические потери. В работе [2] представлены результаты расчетов потерь ДАОП с учетом акустического затухания и структуры светового пучка.

Однако на этот параметр существенное влияние оказывает зазор Δ между граданом и двухкоординатной акустооптической ячейкой (ДАОЯ), а также взаимное смещение центра светового пучка, излучаемого граданом 2, от оси фокусирующего градана 4 и расходимость светового пучка. Учет этих факторов

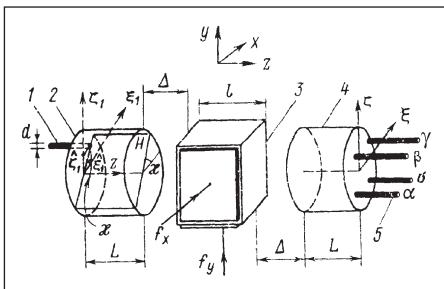


Рис. 1. Схема ДАОП: 1, 2 — соответственно ОВ входного оптического канала и коллиматорный градан; 3 — двухкоординатная акустооптическая ячейка (ДАОЯ); 4, 5 — соответственно фокусирующий градан и ОВ выходных оптических каналов; l — длина области акустооптического взаимодействия; Δ — зазор между граданами и ДАОЯ

позволит более точно рассчитывать оптические потери ДАОП и разрабатывать конструкцию переключателя с целью уменьшения суммарных вносимых оптических потерь в тракт передачи ВОСПИ. Данная статья является продолжением работы автора [2] и уточняет вносимые оптические потери, создаваемые переключателем.

Рассмотрим распространение световых лучей, излучаемых оптическим ОВ 1, состыкованным с торцом градана 2 в точке с координатами $\xi_1 = r_0 \cos k$; $\zeta_1 = r_0 \sin k$ и лежащих в плоскости H , которая проходит через оптическую ось градана и наклонена к горизонтальной плоскости (ξ, z) под углом k . Численная апертура ОВ обозначается через (NA). Найдем координаты (ξ_1, ζ_1) точки стыковки, рассматривая распространение в градане трех световых лучей, вводимых из ОВ в градан 2 под следующими к оси градана углами: $\Theta_0 = 0$ — нулевой луч, $\Theta_1 = \arcsin [NA/n(r_0)]$ — первый луч и $\Theta_2 = -\Theta_0$ — второй луч. Показатель преломления градана в точке r_0 рассчитывается по формуле:

$$n(r_0) = n_0 [1 - (gr_0)^2]^{1/2},$$

где n_0 — показатель преломления на оси градана; g — постоянная градана.

При малых углах Брэгга смещения ξ_1 и ζ_1 относительно оси градана также малы, поэтому для определения траектории i -го светового луча ($i = 0, 1, 2$) можно использовать уравнения [1, 3] меридианальных пучков:

$$\rho_i = r_0 \cos \Omega z + (\text{tg } \Theta_i / \Omega) \sin \Omega z, \quad (1)$$

$$\text{tg } \Psi_i = -\Omega r_0 \Omega z + (\text{tg } \omega_i) \cos \Omega z, \quad (2)$$

где ρ_i и Ψ_i — соответственно координата и угол выхода i -го светового луча из градана длиной z ; $\Omega = g [1 - (gr_0)^2]^{1/2}$ — постоянная распространения.

Длины 2 и 4 граданов в ДАОП выбираются [1, 3] равными четверти периода $L = (\pi [1 - (gr_0)^2]^{1/2}) / 2g$. Тогда из (2) следует, что световые лучи излучаются граданом 2 под углом:

$$\Psi_0 = -\text{arctg } (\Omega r_0). \quad (3)$$

Углы в среде с показателем преломления n_1 , расположенной между торцами граданов и гранями ДАОЯ, обозначим *. Величины k и Ψ_0^* определяются из условия, что выходной световой пучок, излучаемый коллиматорным

граданом 2, распространяется под брэгговскими углами:

$$\varphi_{xB}^* = \arcsin (\lambda f_x / 2 V_x n_1),$$

$$\varphi_{yB}^* = \arcsin (\lambda f_y / 2 V_y n_1),$$

где λ — длина волны света в вакууме; f_x и f_y — частоты сигналов, возбуждающих акустические волны в звукопроводе ДАОЯ, соответственно, вдоль координат x и y ; V_x и V_y — скорость распространения соответствующих акустических волн. Тогда углы k и Ψ_0^* находятся из соотношений:

$$\text{tg } k = \text{tg } \varphi_{yB}^* / \sin \varphi_{xB}^*,$$

$$\text{tg}^2 \Psi_0^* = \text{tg}^2 \varphi_{xB}^* + (\text{tg}^2 \varphi_{yB}^* / \cos^2 \varphi_{yB}^*). \quad (4)$$

Значение r_0 определяется из уравнения (3), из которого при выполнении уравнения Снелиуса ($n_0 \sin \Psi_0 = n_1 \sin \Psi_0^*$) получаем:

$$r_0 = n_1 \sin \Psi_0^* / g n_0,$$

где Ψ_0^* рассчитывается из (4).

Тогда координаты ξ_1 и ζ_1 стыковки входного оптического канала с торцом градана 2 описываются выражениями:

$$\xi_1 = n_1 \sin \Psi_0^* \cos k / (g n_0),$$

$$\zeta_1 = n_1 \sin \Psi_0^* \sin k / (g n_0),$$

где n_1 — показатель преломления окружающей среды.

При использовании в качестве звукопровода ДАОЯ стекла ИКС-23, когда средой с показателем преломления n_1 является воздух и $f_0 = f_x = f_y$, а численные значения для $\xi_1 = \zeta_1 = a$ и r_0 приведены в таблице.

Таблица. Характеристики ДАОП

Материал ДАОЯ	λ , мкм	f_0 , МГц	a , мкм	r_0 , мкм
ИКС-23	0,85	100	45	64
		150	67	94
	1,3	100	67	94
		150	102	145

Длина фокусирующего градана 4 также выбирается равной L , поэтому центры ОВ выходных оптических каналов α , β , γ и σ располагаются на торце градана в плоскости (ξ, ζ) , соответственно, в точках $(-\xi_1, -\zeta_1)$, $(-\xi_1, \zeta_1)$, (ξ_1, ζ_1) , $(\xi_1, -\zeta_1)$. Тогда световой пучок, излучаемый коллиматорным граданом 2, переключается в ОВ выходных оптических кана-

лов включением и выключением управляющих электрических сигналов, поступающих на ДАОЯ.

Из (1) следует, что $\rho_1 = -\rho_2$, поэтому диаметр D светового пучка составляет $2\rho_1$. Тогда:

$$D = \frac{2}{g} \operatorname{tg}[\arcsin(\text{NA})/n(r_0)]\sqrt{1-(g \times r_0)^2}.$$

Угол μ^* расходимости светового пучка, засвечивающего ДАОЯ, рассчитывается из соотношения Лагранжа по формуле:

$$\mu^* = \arcsin [d(\text{NA})/n_1 D],$$

где d — диаметр световой жилы ОВ.

Оптические потери W [дБ] в ДАОП рассчитываются по формуле:

$$W = \lg(\pi R_1^2 / \delta S),$$

где R_1 — радиус светового пучка, засвечивающего фокусирующий градан $4, \delta S$ — часть площади торца градана, засвечиваемая световым пучком, изображенным на рис. 2. При засветке возможно несколько вариантов взаимного смещения с центра светового пучка и оси фокусирующего градана: $R_1 \leq R_0 - \varepsilon$ (рис. 2а), $\varepsilon \leq R_1 \leq \varepsilon + R_0$ (рис. 2б), $\varepsilon - R_0 \leq R_1 \leq \varepsilon$ (рис. 2в) и $R_1 \leq R_0 - \varepsilon$ (рис. 2г), где R_0 — радиус градана; ε — расстояние между центром градана и светового пятна.

Последний случай (рис. 2г) вызывает бесконечно большие потери, так как световое пятно не засвечивает градан. В остальных случаях:

- при $R_1 \leq R_0 - \varepsilon$:

$$W = 20 \lg c,$$

- при $\varepsilon \leq R_1 \leq \varepsilon + R_0$:

$$W = -10 \lg \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{c^2} \arccos \left(\frac{1-c^3+b^2}{2b} \right) + \arctg \frac{\sqrt{4b^3-(1-c^2+b^2)^2}}{c^2+b^2-1} - \frac{1}{2c^2} \sqrt{4b^2-(1-c^2+b^2)} \right] \right\}; \quad (6)$$

- при $\varepsilon - R_0 \leq R_1 \leq \varepsilon$:

$$W = -10 \lg \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{c^2} \left(\frac{1-c^2+b^2}{2b} \right) + \arccos \left(\frac{b^2+c^3-1}{2cb} \right) - \frac{1}{2c^2} \sqrt{4b^2-(1-c^2+b^2)} \right] \right\}; \quad (7)$$

где $c = R_1/R_0$; $b = \varepsilon/R_0$.

Исходя из закона Снелиуса, можно показать, что в случае $f_x = f_y = f_0$ и $V_x = V_y = V_0$ величины R_1 и ε определяются по формулам:

$$R_1 = (D/2) + 2\Delta [\operatorname{tg}(\varphi_B^* + \mu^*) - \operatorname{tg}\varphi_B^*] + 1 \{ \operatorname{tg} \{ [\arcsin \{ (n_1/n_2) \sin(\varphi_B^* + \mu^*) \}] - \operatorname{tg}\varphi_B^* \}, \\ \varepsilon = \sqrt{4\Delta \operatorname{tg}\varphi_B^* + 2 \operatorname{tg}\varphi_B^*}$$

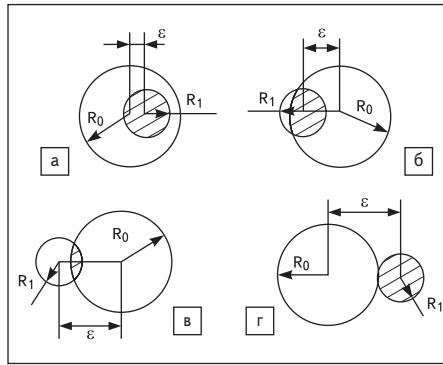


Рис. 2. Различные варианты засвечивания части площади торца градана световым пучком

где $\varphi_B^* = \arcsin(\lambda f_0 / 2V_0 n_1)$; $\varphi_B = \arcsin(\lambda f_0 / 2V_0 n_2)$; n_2 — показатель преломления звукопровода ДАОЯ.

Численные расчеты по формулам (6, 7) были проведены для случая, когда в качестве переключаемых каналов используются ОВ с параметрами $\text{NA} = 0,18$, $d = 50$ мкм, а также четвертьпериодные граданы: $L = 7$ мм, $n_0 = 1,628$, $g = 0,2252$ мм⁻¹. ДАОЯ изготовлена из стекла ИКС-23 или монокристалла TeO_2 (парателлуриг), у которого две ортогональные акустические сдвиговые волны возбуждаются вдоль направлений $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$. Результаты расчетов приведены на рис. 2, 3, которые соответствуют стеклу и парателлуриг при $\lambda = 0,85$ мкм.

Кривые 1, 2 соответствуют частотам $f_0 = 100$ МГц и $f_0 = 150$ МГц, а сплошные и штриховые линии получены для $l = 6$ мм и $l = 10$ мм.

Зазор Δ оказывает существенное влияние на уровень вносимых оптических потерь. Поэтому для их уменьшения и большей компактности следует стыковать граданы с гранями ДАОЯ. В этом случае объем ДАОП с ДАОЯ размерами $10 \times 10 \times 10$ мм, состыкованной с граданами длиной $L = 7$ мм, составит не более 2,5 мл.

Общие потери W_0 ДАОП с учетом потерь $\delta C_p(v, \chi_1)$, вызванных акустическим затуханием v и структурой светового пучка χ_1 [2], составит:

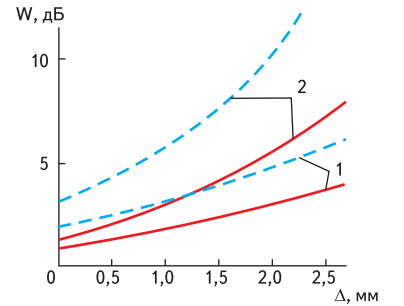
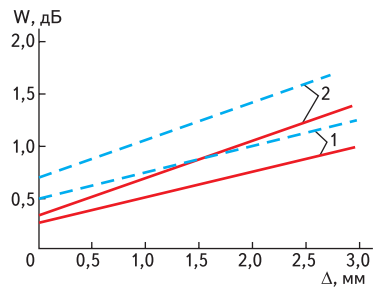


Рис. 3. Расчетные характеристики

$$W_0 = C_p(0, 0) + \delta C_p(v, \chi_1) + W,$$

где W — потери, рассмотренные в данной статье; $p = \alpha, \beta, \gamma, \sigma$ — оптические переключаемые каналы; $C_p(0, 0)$ — потери без учета рассмотренных в [2] и данной статье факторов.

Литература

1. Васильев Ю. Г. Двухкоординатные акустооптические переключатели // Радиотехника. 1997. № 10.
2. Васильев Ю. Г. Вносимые оптические потери и переходные помехи в акустооптическом переключателе каналов ВОСПИ // Компоненты и технологии. 2008. № 11.
3. Васильев Ю. Г. Использование градиентных микролинз для соединения оптических элементов // Компоненты и технологии. 2007. № 10.