

УДК 681.7.068

Е.А. Насибулин, Д.В. Кусайкин

Уральский технический институт связи и информатики, филиал
Сибирского государственного университета телекоммуникаций
и информатики, Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАНАРНОГО СПЛИТТЕРА 1×8 С РАЗМЕРОМ СВЕТОВОДОВ 6×6, 5,5×5,5 И 5×5 МКМ² ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО РАЗМЕРОВ

Представлены результаты исследования зависимости оптических параметров планарных разветвителей 1×8 с древовидной структурой (Y-branch splitters) от изменения их геометрических размеров и размеров световодов. Проведено исследование изменения характеристик планарных разветвителей при уменьшении и увеличении их длины, ширины, а также уменьшении сердцевины световодов при различных длинах волн излучения.

Ключевые слова: планарные разветвители, оптические сплиттеры, вносимые потери, неравномерность выходных уровней сигналов, отношение сигнал/шум.

E.A. Nasibulin, D.V. Kusaykin

Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch)
Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Yekaterinburg, Russian Federation

RESEARCH OF OPTICAL PARAMETERS OF Y-BRANCH PLANAR SPLITTER 1×8 WITH 6×6, 5.5×5.5 AND 5×5 μM² WAVEGUIDE SIZES IN THE CASE OF CHANGE ITS SIZE

The article presents the results of a study of the dependence of the optical parameters of 1×8 planar splitters with a tree structure (Y-branch splitters) on changes in their geometric dimensions and the sizes of optical waveguide. A study was made of the change in the characteristics of planar splitters with a decrease and increase in their length and width, as well as a decrease in the core of optical fibers at various radiation wavelengths.

Keywords: planar dividers, optical splitters, insertion loss, unevenness of output signal levels, signal to noise ratio.

Введение

Операция разделения и объединения нескольких оптических сигналов играет важную роль в пассивных оптических сетях (Passive optical network, PON), позволяющих множеству клиентов подключать услуги

высокоскоростного Интернета, цифрового телевидения и телефонии на основе волоконно-оптических линий передачи. Для разделения оптического сигнала в пассивных волоконно-оптических сетях используются оптические сплиттеры. Существуют два основных вида оптических сплиттеров: планарные делители с древовидной структурой Y-типа (Y-branch splitters) и сплиттеры, основанные на многомодовой интерференции (MMI – multimode interference) [1].

Самый простой планарный сплиттер с древовидной структурой ответвлений разделяет один входной сигнал на 2 выходных. Принцип работы такого делителя обеспечивает нечувствительность к поляризации излучения, отсутствие зависимости коэффициента деления от длины волны и широкий рабочий диапазон длин волн, удовлетворяющий требования современных волоконно-оптических систем передачи информации. С другой стороны, в данном сплиттере не достигается полная симметрия долей мощности разделенных сигналов, так как производство таких делителей с высокими параметрами симметрии долей мощности технологически очень сложно. Существует еще одна особенность планарного сплиттера: кривизна световодов, образующих разветвления, должна быть небольшой, чтобы сигнал испытывал меньшие потери, что приводит к увеличению размера сплиттера.

В настоящее время проводятся различные исследования в данной области. В работе [2] представлено сравнение параметров 1×8 MMI-разветвителя и планарного разветвителя 1×8 с древовидной структурой при размерах световодов 6×6 и $5,5 \times 5,5$ мкм², в том числе по значениям дисбаланса уровней выходных сигналов для различных длин планарных сплиттеров. В 2018 г. Rajdi Agalliu, Catalina Burtcher и др. [3] исследовали оптимизированный по длине до 120 000 мкм планарный сплиттер 1×64 с древовидной структурой Y-типа с уменьшенным значением световодов $5,5 \times 5,5$ мкм², проведя сравнение его параметров неравномерности, вносимых потерь и фонового шума со стандартным сплиттером длиной 318 000 мкм и размером световодов 6×6 мкм². В 2019 г. Yu Zheng, Bingxin Xia и др. [4] проанализировали влияние температуры на планарный сплиттер 1×8 и обнаружили зависимость вносимых потерь при разных температурах. В 2019 г. W. Purnamaningsih и др. [5] сконструировали четырехсегментный сплиттер, в котором в качестве материала для световодов используется нитрид галлия, для буферного слоя – нитрид

алюминия. Как отмечают авторы, данный сплиттер простой в изготовлении, что обеспечивает перспективное использование в оптических сетях связи. Как видно из представленного обзора, исследования в данной области актуальны и разнообразны.

В данных работах не было уделено должного внимания исследованию характеристик сплиттера в случае изменения его геометрических размеров, что является основной темой исследования в данной статье. Здесь обсуждаются результаты исследования зависимости оптических параметров планарных делителей 1×8 с древовидной структурой от изменения их геометрических размеров и размеров световодов.

Построение планарного оптического сплиттера 1×8 и методика проведения моделирования

Исследуемый планарный оптический сплиттер состоит из кварцевой подложки, представляющей из себя отражающий слой-оболочку из кварцевого стекла и отражающий слой, представляющий систему световодов. Особое внимание было уделено показателям преломления этих слоев – установлены показатели преломления сердцевин световодов $n_c = 1,456$ и оболочки $n_o = 1,445$ со стандартным показателем преломления $\Delta n = 0,75\%$. Размеры сердцевин световодов устанавливались равными 6×6 мкм² и $5,5 \times 5,5$ мкм².

Планарный оптический сплиттер был смоделирован при помощи специализированной программной среды OptiBPM Designer. В данном программном комплексе имитация распределения электромагнитного излучения оптического диапазона в конструируемых системах основывается на методе распространения луча (Beam Propagation Method, BPM), имитирующем прохождение света через любую волноводную среду, как изотропную, так и анизотропную. Данный метод, как и метод конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD), обеспечивает численное решение уравнений Максвелла, используя конечные разности вместо частных производных. В связи с этим BPM требует больших вычислительных ресурсов, однако может обеспечить построение адекватных моделей для достаточно широкого ряда устройств.

При моделировании была использована структура планарного сплиттера 1×4 , построенная с использованием предопределенной формы «s-bend-arc», заложенной в OptiBPM. Выбор данной формы

обоснован тем, что она обеспечивает наименьшие потери [3]. На рис. 1 изображена структура построенного планарного сплиттера 1×8 . Из рисунка видно, что сплиттер состоит из линейного входного порта, представляющего собой прямолинейный световод длиной 1000 мкм, 8 линейных выходов и 7 узлов разветвлений, которые распределены по 3 сегментам. Длина первого сегмента ветвления составляет 5000 мкм, второй сегмент ветвления удваивается и составляет 10 000 мкм, третий сегмент ветвления также удваивается и составляет 20 000 мкм. При построении разветвителя шаг между световодами в каждом слое автоматически удваивался, в первом слое он составил 120 мкм, во втором – 240 мкм, в третьем – 480 мкм. После третьего сегмента ветвления добавлен сегмент с прямолинейными световодами длиной 1000 мкм. Таким образом, длина построенного планарного сплиттера 1×8 составляет 37 000 мкм, ширина – 840 мкм. Имитационное моделирование процесса работы исследуемого планарного оптического сплиттера 1×8 проводилось на трех длинах волн: $\lambda = 1550, 1310, 850$ нм.

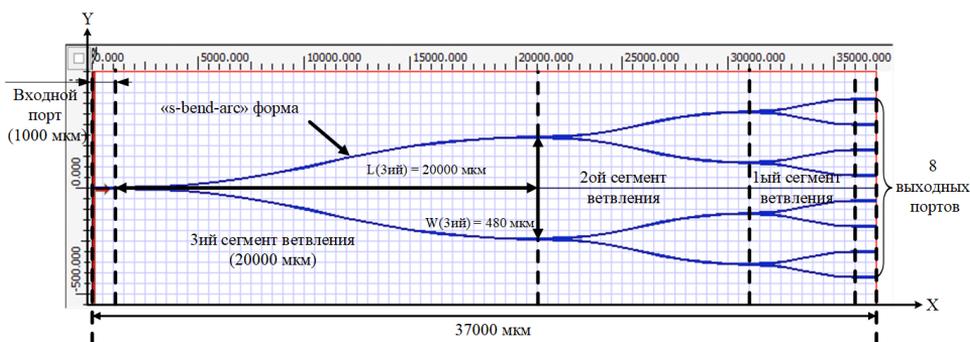


Рис. 1. Макет стандартного планарного сплиттера 1×8 с использованием инструмента OptiBPM

В качестве параметров, оценивающих эффективность исполнения сплиттера, выступали: дисбаланс уровня мощности сигнала на выходах (ILu), отношение мощности сигнал-шум (SNR) и вносимые потери (IL).

Дисбаланс мощности сигнала (Insertion Loss uniformity) – параметр, показывающий насколько отличаются уровни мощности сигналов на выходах сплиттера, определяется по формуле:

$$ILu = 20 \log \left(\frac{E_{\min}}{E_1} \right) - 20 \log \left(\frac{E_{\max}}{E_1} \right), \quad (1)$$

где E_{\max} и E_{\min} – максимальное и минимальное значения напряженности электромагнитного излучения на выходах сплиттера соответственно; E_1 – напряженность электромагнитного излучения на входе планарного сплиттера.

Отношение мощности полезного сигнала к мощности фонового шума (Signal to Background Noise Ratio) – параметр, характеризующий шум, который обусловлен выходом электромагнитного излучения из направляющей системы, измеренного по оси Y , определяется по формуле:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_S}{P_{BN}} \right), \quad (2)$$

где P_S – мощность полезного сигнала; P_{BN} – энергия фонового шума.

Вносимые потери (Insertion Loss) – параметр, показывающий, насколько уменьшилась мощность сигнала при его прохождении через сплиттер:

$$IL = \left| 20 \log \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \right|, \quad (3)$$

где E_2 – напряженность электромагнитного излучения на выходе планарного сплиттера.

Моделирование работы сплиттера и анализ результатов

На рис. 2 представлена схема смоделированного планарного сплиттера 1×8 с использованием инструмента OptiBPM.

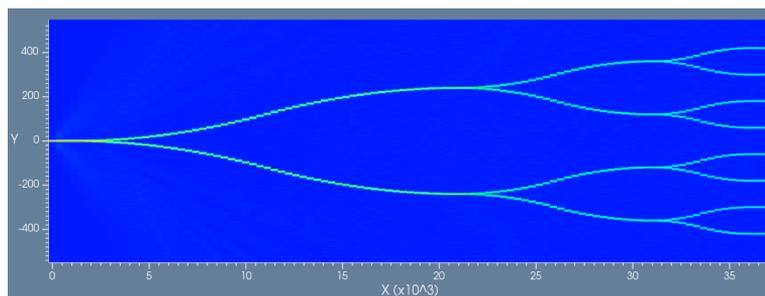


Рис. 2. Схема смоделированного планарного сплиттера 1×8 с использованием инструмента OptiBPM

На входной порт подавался гауссов пучок единичной амплитуды с ТЕ-поляризацией. На рис. 3 представлены результаты распределения напряженности поля на выходных портах сплиттера при длине волны излучения $\lambda = 1550$ нм. По оси Y было получено 5000 измеренных значений. На рис. 4 представлен график распределения вносимых потерь на выходных портах сплиттера на длине волны 1550 нм.

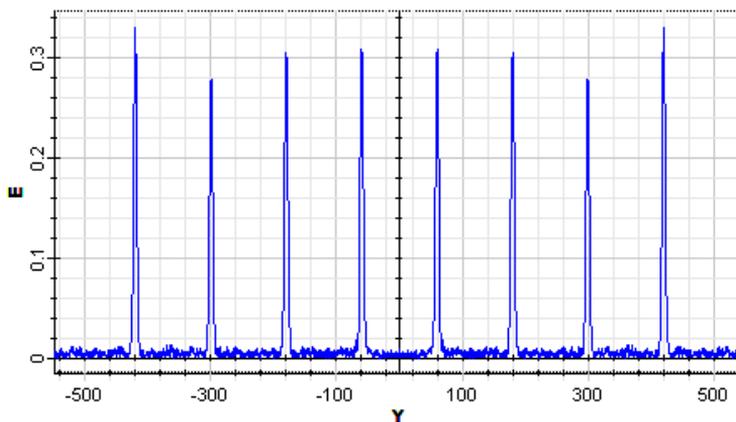


Рис. 3. Результаты распределения напряженности поля на выходных портах сплиттера 1×8 на длине волны 1550 нм с размером световодов 6×6 мкм²

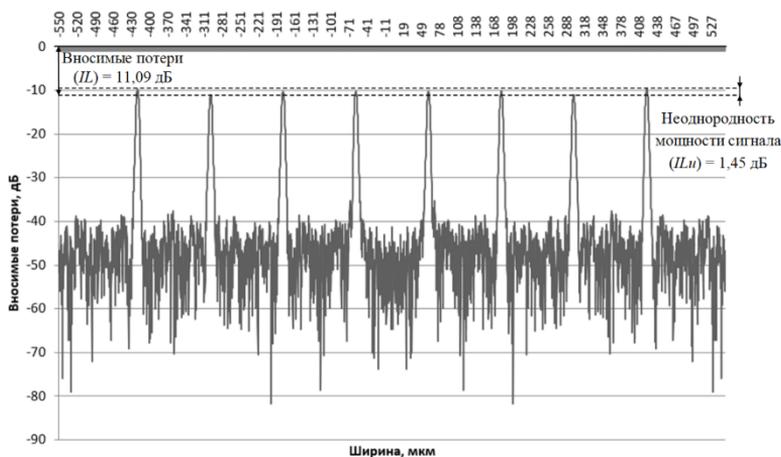


Рис. 4. Распределение вносимых потерь на выходных портах сплиттера 1×8 на длине волны 1550 нм с размером световодов 6×6 мкм²

Как видно из рис. 4, дисбаланс мощности сигнала $ILu = 1,45$ дБ и наибольшие вносимые потери $IL = 11,09$ дБ. Отношение сигнал / шум $SNR = 34,84$ дБ.

На рис. 5, 6 представлены графики распределения вносимых потерь на выходных портах сплиттера при длине волны излучения 1310 и 850 нм.

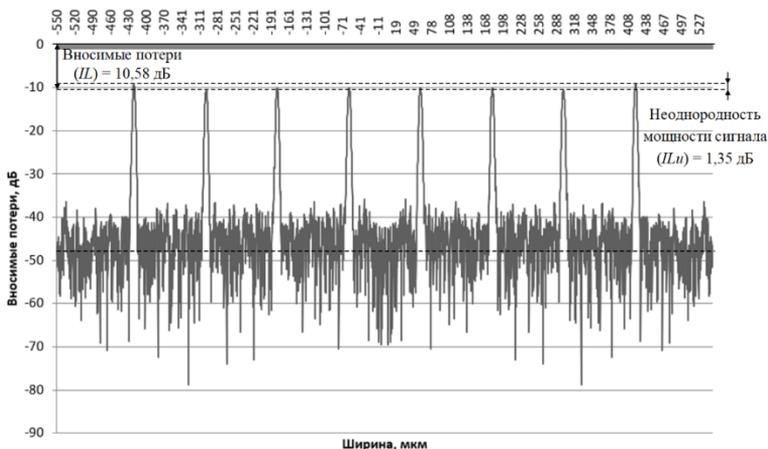


Рис. 5. Зависимости вносимых потерь на выходных портах планарного сплиттера 1×8 на длине волны 1310 нм с размером световодов 6×6 мкм²

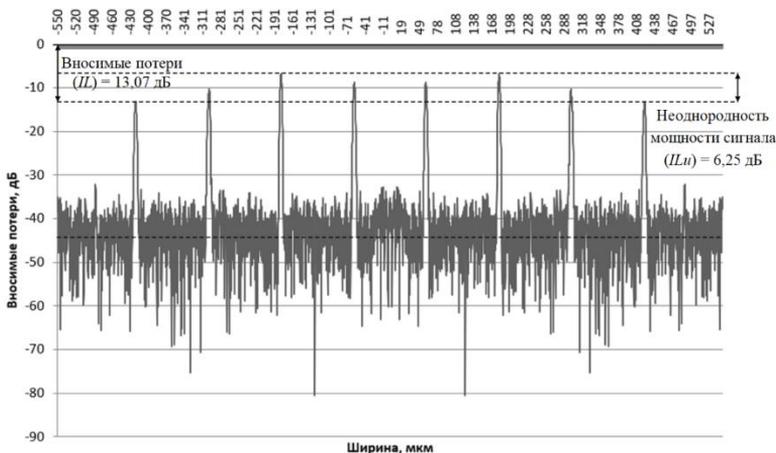


Рис. 6. Зависимости вносимых потерь на выходных портах планарного сплиттера 1×8 на длине волны 850 нм с размером световодов 6×6 мкм²

Для исследования зависимости характеристик сплиттера на разных длинах волн на рис. 7–15 представлены графики зависимости $SNR = f(\lambda)$, $ILu = f(\lambda)$ $IL = f(\lambda)$ сплиттера с размером сердцевин световодов 6×6 , $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² при различных значениях его длины.

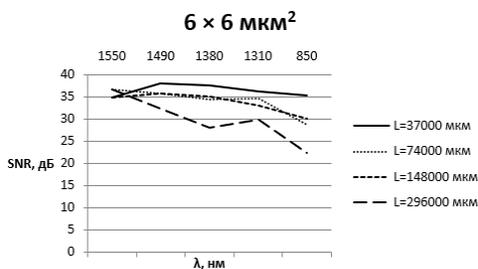


Рис. 7. $SNR = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов 6×6 мкм²

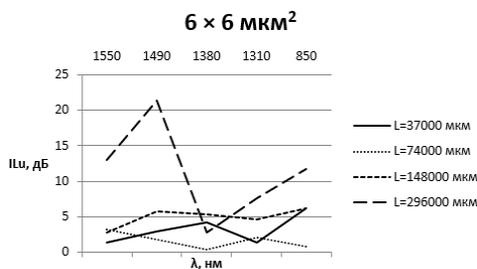


Рис. 8. $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов 6×6 мкм²

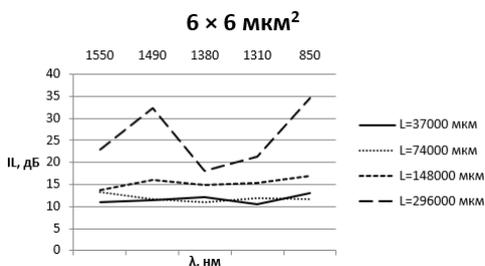


Рис. 9. $IL = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов 6×6 мкм²

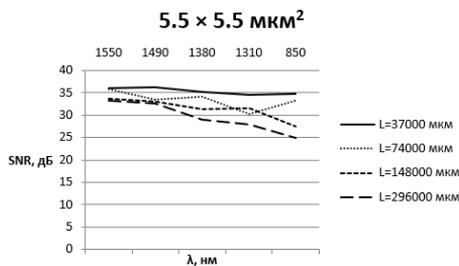


Рис. 10. $SNR = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

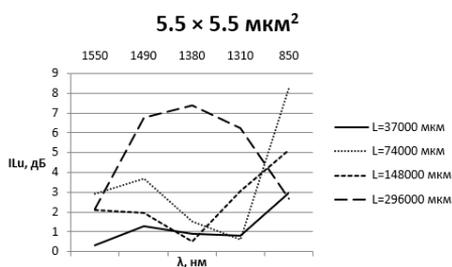


Рис. 11. Зависимость $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

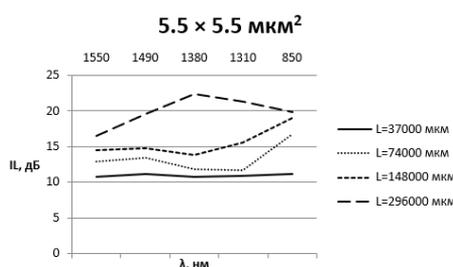


Рис. 12. Зависимость $IL = f(\lambda)$, размер сердцевин световодов $5,5 \times 5,5$ мкм²

Проанализировав графики, можно сделать вывод, что при изменении длины планарного сплиттера наибольшее значение отношения сигнал/шум оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра SNR составляет 35,48 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 33,35, 32,71 и 29,68 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения неоднородности оказывается при длине 74 000 мкм, при котором среднее значение параметра ILu составляет 2,06 дБ. При длине 37 000 мкм результат оказался 3,02 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 4,53 и 10,8 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения вносимых потерь оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра IL составляет 11,58 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 12,28, 15,32 и 26,29 дБ соответственно.

При уменьшении размеров световодов до $5,5 \times 5,5$ мкм² наибольшее значение отношения сигнал/шум оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра SNR составляет 35,08 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 33,15, 30,96 и 28,65 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения неоднородности оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра ILu составляет 1,37 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 3,94, 3,44 и 3,68 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения вносимых потерь оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра IL составляет 10,91 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 13,78, 16,38 и 19,24 дБ соответственно.

При уменьшении размеров световодов до 5×5 мкм наибольшее значение отношения сигнал/шум оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра SNR составляет 35,81 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 33,99, 31,14 и 24,25 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения неоднородности оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра ILu составляет 1,54 дБ. При после-

дующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 6,03, 6,36 и 6,68 дБ соответственно. Наименьшее значение изменения вносимых потерь оказывается при длине 37 000 мкм, при котором среднее значение параметра IL составляет 11,84 дБ. При последующих рассматриваемых значениях длины сплиттера эта величина составляет 15,67, 19,16 и 25,95 дБ соответственно.

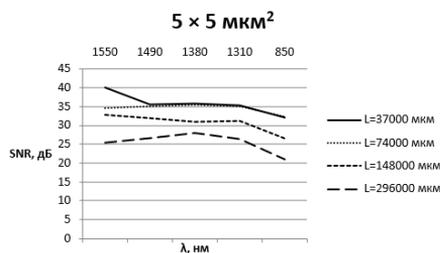


Рис. 13. Зависимость $BN = f(\lambda)$, размер сердцевини световодов $5 \times 5 \text{ мкм}^2$

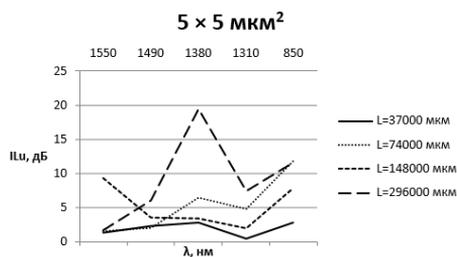


Рис. 14. Зависимость $ILu = f(\lambda)$, размер сердцевини световодов $5 \times 5 \text{ мкм}^2$

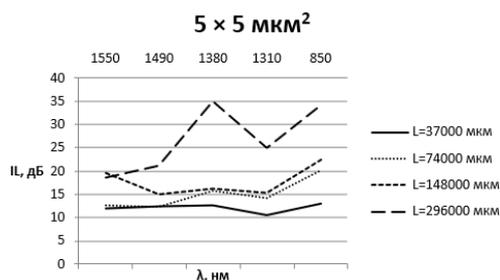


Рис. 15. Зависимость $IL = f(\lambda)$, размер сердцевини световодов $5 \times 5 \text{ мкм}^2$

Точные значения всех параметров при других геометрических характеристиках рассматриваемого сплиттера представлены в таблице.

В некоторых ячейках таблицы отсутствуют значения по причине того, что сигнал при измененных значениях геометрических параметров сплиттера выходит за пределы световодов и не регистрируется на его выходных портах.

Средние значения фонового шума, дисбаланса мощности сигнала и вносимые потери на измеряемых длинах волн при размерах световодов планарного сплиттера $6 \times 6 \text{ мкм}^2$, $5,5 \times 5,5 \text{ мкм}^2$ и $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ при изменении его геометрических параметров

Длина сплиттера, мкм	Ширина сплиттера, мкм	Ширина подложки, мкм	Размер световодов, мкм^2	Среднее значение отношения сигнал / шум (SNR), дБ	Среднее значение неравномерности вносимых потерь (Π_u), дБ	Среднее значение вносимых потерь (Π_L), дБ
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
74 000	840	1100	6×6	33,35	2,06	12,28
148 000	840	1100	6×6	32,71	4,5	15,32
296 000	840	1100	6×6	29,68	10,8	26,29
37 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	35,08	1,37	10,91
74 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	33,15	3,94	13,78
148 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	30,96	3,44	16,38
296 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	28,65	3,68	19,24
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
74 000	840	1100	5×5	33,99	6,03	15,67
148 000	840	1100	5×5	31,14	6,36	19,16
296 000	840	1100	5×5	24,25	6,86	25,95
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
18 500	840	1100	6×6	36,8	6,17	13,63
9250	840	1100	6×6	32,28	6,3	14,43
4625	840	1100	6×6	20,79	6,61	16,17
37 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	35,08	1,37	10,91
18 500	840	1100	$5,5 \times 5,5$	37,08	4,26	12,29
9250	840	1100	$5,5 \times 5,5$	30,48	5,88	14,27
4625	840	1100	$5,5 \times 5,5$	19,14	5,94	16,25
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
18 500	840	1100	5×5	34,53	3,54	11,63
9250	840	1100	5×5	28,48	3,01	12,14
4625	840	1100	5×5	29,37	3,45	13,32
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
37 000	1680	2200	6×6	28,82	4,99	15,54
37 000	3360	4400	6×6	–	–	–
37 000	6720	8800	6×6	–	–	–
37 000	840	1100	$5,5 \times 5,5$	35,08	1,37	10,91
37 000	1680	2200	$5,5 \times 5,5$	28,99	3,08	14,26
37 000	3360	4400	$5,5 \times 5,5$	–	–	–
37 000	6720	8800	$5,5 \times 5,5$	–	–	–
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
37 000	1680	2200	5×5	28,87	5,3	16,53
37 000	3360	4400	5×5	–	–	–
37 000	6720	8800	5×5	–	–	–

Окончание таблицы

Длина сплиттера, мкм	Ширина сплиттера, мкм	Ширина подложки, мкм	Размер световодов, мкм ²	Среднее значение отношения сигнал / шум (SNR), дБ	Среднее значение неравномерности вносимых потерь (PLu), дБ	Среднее значение вносимых потерь (PL), дБ
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
37 000	420	550	6×6	40,88	2,68	11,21
37 000	210	275	6×6	44,83	1,39	10,27
37 000	105	137,5	6×6	36,44	1,17	10,17
37 000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
37 000	420	550	5,5×5,5	40,09	1,44	10,73
37 000	210	275	5,5×5,5	42,84	0,95	10,24
37 000	105	137,5	5,5×5,5	37,35	1,04	10,24
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
37 000	420	550	5×5	40,27	2,59	11,58
37 000	210	275	5×5	41,67	0,52	10,16
37 000	105	137,5	5×5	36,14	0,56	9,87
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
74 000	1680	2200	6×6	26,45	6,91	19,81
148 000	3360	4400	6×6	–	–	–
296 000	6720	8800	6×6	–	–	–
37 000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
74 000	1680	2200	5,5×5,5	27,77	8,53	22,19
148 000	3360	4400	5,5×5,5	–	–	–
296 000	6720	8800	5,5×5,5	–	–	–
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
74 000	1680	2200	5×5	25,91	4,51	20,22
148 000	3360	4400	5×5	–	–	–
296 000	6720	8800	5×5	–	–	–
37 000	840	1100	6×6	35,48	3,02	11,58
18 500	420	550	6×6	40,02	1,98	10,82
9250	210	275	6×6	39,82	5,1	12,55
4625	105	137,5	6×6	25,66	4,72	12,11
37 000	840	1100	5,5×5,5	35,08	1,37	10,91
18 500	420	550	5,5×5,5	34,92	2,64	11,02
9250	210	275	5,5×5,5	32,11	2,07	10,38
4625	105	137,5	5,5×5,5	25,94	3,4	11,18
37 000	840	1100	5×5	35,81	1,54	11,84
18 500	420	550	5×5	37,8	2,74	11,51
9250	210	275	5×5	32,87	2,62	11,45
4625	105	137,5	5×5	24,03	4,18	12,65

Заключение

По полученным результатам можно сделать вывод, что одновременное увеличение длины и ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм², $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² нецелесообразно, так как в этом случае сигнал выходит за пределы световодов. Изменение длины сплиттера 1×8 при фиксированной ширине также нецелесообразно, так как наилучшие параметры сплиттера наблюдаются при стандартном значении длины 37 000 мкм.

Уменьшение ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм² дает положительные результаты относительно параметра дисбаланса мощности сигнала IL_u и параметра вносимых потерь IL . Наилучшие результаты наблюдаются при ширине сплиттера 137,5 мкм. При размерах световодов $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² планарного сплиттера 1×8 наилучшие результаты наблюдаются при ширине 275 мкм.

Положительное влияние оказало одновременное уменьшение длины и ширины планарного сплиттера 1×8 при размерах световодов 6×6 мкм². Сравнительный анализ значений параметров показал, что лучшие результаты наблюдаются при длине сплиттера 18 500 мкм и ширине 550 мкм. При размерах световодов $5,5 \times 5,5$ и 5×5 мкм² лучшие результаты наблюдаются при длине сплиттера 37 000 мкм и ширине 1100 мкм.

Список литературы

1. Shibata Y., Kikuchi N., Tohmori Y. // Proc. OFC'03. – 2003. – 2. – P. 667.
2. Burtscher C., Lucki M., Seyringer D. Comparison of optical properties of 1×8 splitters based on Y-branch and MMI approaches // Romanian Reports in Physics. – 2015. – Vol. 67, No. 4. – P. 1578–1585.
3. Optical splitter design for telecommunication access networks with triple-play services / Rajdi Agalliu, Catalina Burtscher, Michal Lucki, Dana Seyringer // Journal of Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 69. – № 1. – P. 32–38.
4. Novel research on reliability of silica-based PLC optical splitters / Yu Zheng, Bingxin Xia, Piaopiao Gao, Xionghui Wu, Zhixin Xiao // Optic. – International Journal for Light and Electron Optics. – 2019. – 178. – P. 1294–1301.
5. Retno W. Purnamaningsih, Nji R. Poespawati, Elhadj Dogheche. Design of a Four-Branch Optical Power Splitter Based on Gallium-Nitride Using Rectangular Waveguide Coupling for Telecommunication Links // Department of Electrical Engineering, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI,

Depok, 16424, Indonesia; Universit'e Polytechnique Hauts de France, CNRS IEMN DOAE. – Valenciennes, France.

References

1. Shibata Y., Kikuchi N., Tohmori Y. Photonic Integrated Devices for High Speed Signal Processing and Switching *Proc. OFC'03*, 2003, 2, 667 p.
2. Burtscher C., Lucki M., Seyringer D. Comparison of optical properties of 1×8 splitters based on Y-branch and MMI approaches. *Romanian Reports in Physics*, 2015, vol. 67, no. 4, pp. 1578-1585.
3. Rajdi Agalliu, Catalina Burtscher, Michal Lucki, Dana Seyringer. Optical splitter design for telecommunication access networks with triple-play services. *Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol. 69, no. 1, pp. 32-38.
4. Zheng Yu, Xia Bingxin, Gao Piaopiao, Wu Xionghui, Xiao Zhixin. Novel research on reliability of silica-based PLC optical splitters. *Optic - International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 178, pp. 1294-1301.
5. Retno W. Purnamaningsih, Nji R. Poespawati, Elhadj Dogheche. Design of a Four-Branch Optical Power Splitter Based on Gallium-Nitride Using Rectangular Waveguide Coupling for Telecommunication Links. Department of Electrical Engineering, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI, Depok, 16424, Indonesia; Universit'e Polytechnique Hauts de France, CNRS IEMN DOAE, Valenciennes, France.

Получено 10 июня 2020