

УДК 520.2.064.4:621.373.826

# Проектирование оптических фильтров Фабри–Перо для спектрального сложения лазерных пучков

© 2021 г. **В. Н. Федосеев**, канд. техн. наук, **В. Г. Жупанов**

АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск

E-mail: fvn@luch.com.ru

Поступила в редакцию 14.09.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-12-03-10

Рассмотрены разновидности спектрального сложения пучков технологических лазеров. Показано, что оптические фильтры Фабри–Перо обеспечивают приемлемую альтернативу поверхностным и объёмным дифракционным решёткам, а также краевым дихроичным фильтрам. Известные методы проектирования фильтров Фабри–Перо применительно к спектральному уплотнению каналов в волоконных телекоммуникациях были доработаны с учётом специфики технологических лазеров: иной уровень мощности излучения, ширина полос пропускания и подавления фильтров, обеспечение минимальных потерь мощности. Работоспособность предложенного подхода продемонстрирована на примере фильтров для сложения пучков иттербиевых волоконных лазеров.

**Ключевые слова:** волоконный лазер, спектральное сложение пучков, краевой дихроичный фильтр, оптический фильтр Фабри–Перо, спектральное уплотнение каналов, энергетическая эффективность, многослойное диэлектрическое покрытие.

**Коды OCIS:** 140.3298, 130.7408, 050.2230, 310.0310.

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерная обработка материалов находит широкое применение в промышленности. Ряд операций и, в частности, точная резка толстых листов металлов требуют высокой яркости непрерывного излучения, что подразумевает мощность на уровне 10 кВт и высокого качества излучения с величиной  $BPP$  (Beam Parameter Product — произведение параметров пучка) равной 2–6 мм\*мрад [1]. Величина  $BPP$  равна произведению радиуса перетяжки лазерного пучка и половинного угла расходимости. Для гауссовых пучков  $BPP = \lambda/\pi$ , где  $\lambda$  — длина волны. Изначально для таких приложений использовались  $CO_2$ -лазеры, затем волоконные лазеры, а в последнее время начинают использоваться даже диодные лазеры прямого действия [2, 3]. Мощность ла-

ров с высоким качеством излучения нередко ограничена на уровне 0,5–3 кВт [4]. При этом диодные лазеры прямого действия работают в области 900–980 нм, а иттербиевые волоконные лазеры — 1030–1100 нм. Весьма перспективным является сложение пучков нескольких лазеров с высоким качеством для повышения яркости излучения.

Данная статья посвящена расчётному анализу одной из разновидностей спектрального сложения лазерных пучков. Цель работы — доработать существующие методы проектирования оптических фильтров Фабри–Перо для спектрального уплотнения каналов WDM (Wavelength Division Multiplexing — дословно мультиплексирование разделённых длин волн) применительно к сложению пучков мощных технологических лазеров.

## ВИДЫ СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

На самом верхнем уровне обычно различают пространственное, когерентное и некогерентное сложение пучков [2, 5]. В первом случае несколько излучателей размещают рядом (бок о бок). При этом возрастает совокупная мощность излучения, но яркость не изменяется. При когерентном сложении все элементы работают с одним спектром излучения и относительными фазами элементов управляют таким образом, чтобы обеспечить конструктивную интерференцию. В некогерентном сложении различают спектральную и поляризационную разновидности, которые иногда применяют совместно.

Спектральное сложение, как правило, более простое в реализации и может быть реализовано с помощью поверхностных или объёмных брэгговских решёток VBG (Volume Bragg Grating), а также оптических фильтров. Каждый вид спектрального сложения имеет свои особенности и находит практическое применение.

Поверхностные дифракционные решётки с прямоугольным профилем канавок нередко формируют поверхность многослойного диэлектрического покрытия [6]. Сильной стороной такого подхода является высокая лучевая прочность. Однако для повышения дифракционной эф-

фективности в минус первом порядке дифракции используется конфигурация Литтроу [7] и углы падения излучения обычно находятся в диапазоне  $60^\circ$ – $70^\circ$ . Соответственно, появляются сложности с управлением поляризацией [8, п. 6.3]. Кроме того, поверхностные решётки с шагом 600 нм требуют очень деликатного обращения. Американская лаборатория Plymouth Grating ([www.plymouthgrating.com](http://www.plymouthgrating.com)) является мировым лидером в этой области и владеет необходимыми компетенциями для формирования дифракционных решёток с прямоугольным профилем поверхности многослойных диэлектрических покрытий. Дифракционная эффективность таких решёток в порядке «-1» достигает 95–98%, а порог лучевой прочности —  $2,5 \text{ Дж/см}^2$  на длине волны 1054 нм при длительности импульса 10 пс. Технология производства подобных изделий крайне сложна, поскольку связана одновременно и с дифракционными решётками, и с многослойными покрытиями.

Объёмные брэгговские решётки обычно записываются в толще фототерморефрактивных (ФТР) стёкол посредством голографии или прямой записью фемтосекундным ультрафиолетовым лазером [9]. Дифракция происходит при выполнении брэгговского условия [10]. Для сложения обычно используют отражающие решётки с периодом приблизительно

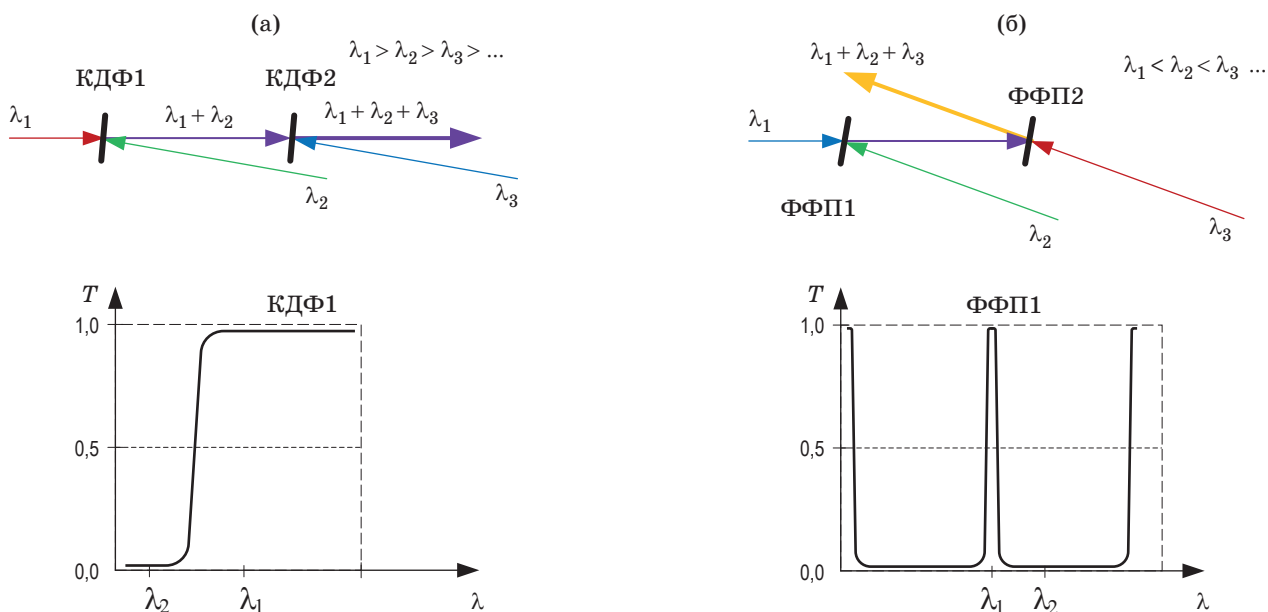


Рис. 1. Схемы сложения пучков и спектры пропускания: краевой дихроичный фильтр (а); фильтр Фабри–Перо (б).

350 нм, амплитудой модуляции показателя преломления 200–500 ppm и толщиной решётки в несколько миллиметров. К достоинствам применения VBG необходимо отнести высокую спектральную плотность каналов для сложения. Среди недостатков — проблемы с лучевой прочностью ФТР стёкол, а также с изготовлением оптических элементов размером более 50 мм.

Лучевая прочность современных многослойных покрытий лазерных зеркал превышает 60 Дж/см<sup>2</sup> на длине волны 1064 нм при длительности импульса 3 нс [11]. Сложение пучков на основе оптических фильтров происходит аналогично брэгговским решёткам. Пучок с одной длиной волны проходит через фильтр, а с другой — отражается. Спектральная кривая должна обладать высокой крутизной, когда переход от отражения к пропусканию происходит в узком диапазоне шириной 1 нм. Двумя основными типами фильтров для сложения являются краевые дихроичные фильтры и фильтры Фабри–Перо [12]. Схемы их сложения показаны в верхней части рис. 1, а в нижней части — характерный вид спектров пропускания.

Краевой дихроичный фильтр (рис. 1а, КДФ1, КДФ2) отражает пучок с одной длиной волны и пропускает с несколькими. Фильтр Фабри–Перо (рис. 1б, ФФП1, ФФП2) отличается узкой полосой пропускания. Соответственно, он пропускает только одну длину волны и может отражать несколько. Оба типа фильтров предполагают относительно небольшие углы падения излучения, чтобы исключить эффекты с поляризацией.

Пример сложения двух мощных лазерных пучков 1070 и 1090 нм с помощью краевого дихроичного фильтра из 268 слоёв SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> описан в [13]. Несмотря на значительное спектральное расстояние между каналами (20 нм) фильтр получился сложным и непростым в изготовлении. Желательно рассмотреть другие конструкции фильтров с меньшим числом слоёв.

### ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ WDM

Оптический фильтр Фабри–Перо часто рассматривают как синоним узкополосного пропускающего фильтра [14]. Он образован двумя высоко отражающими группами зеркаль-

ных слоёв с некоторой резонаторной полостью (spacer) между ними. Несколько такого рода зеркальных структур часто объединяют вместе для увеличения крутизны спектральной кривой. Детальное теоретическое исследование применения оптических фильтров Фабри–Перо для спектрального уплотнения каналов в волоконных коммуникациях WDM проведено в [15, 16]. Принципиальная схема фильтров представлена на рис. 2.

Слои диэлектрического материала с высоким  $nH$  и низким  $nL$  показателями преломления показаны чёрным и серым цветами. Группы слоёв образуют зеркальные структуры  $M_1, M_2, \dots, M_{q+1}$ , буквами  $S_1, S_2, \dots, S_q$  обозначены слой-полости. С обеих сторон многослойное покрытие ограничено материалом подложки с показателем преломления  $nS$ . Пропускание такого фильтра зависит от числа резонаторов  $q$ , отражения зеркал  $M_i$  и фазовых свойств полостей [15]. Последовательность расчёта фильтра при этом сводилась к следующему. Сначала по соотношению ширины полос подавления и пропускания определялось число резонаторов, затем строился прототип фильтра с использованием теории эквивалентных слоёв. Далее оптимизировалась конструкция зеркал  $M_i$  и определялась физическая толщина полостей, которая была кратной целому числу полуволен  $s\lambda_0/2$ , где  $\lambda_0$  — центральная длина волны фильтра. На заключительной стадии материал подложки (рис. 2) со стороны воздуха заменялся одно-двухслойным просветляющим покрытием. Процедура оптимизации конструкции покрытия была достаточно сложной, а требования к ширине полос пропускания и подавления относятся к лазерам малой мощности. Кроме того, толщины полостей могут быть значительными (от одной до восьми полуволен). Для WDM используется другой спектральный диапазон, число слоёв покрытий может составлять несколько сотен, и проблема лучевой прочности перед ними не стоит.

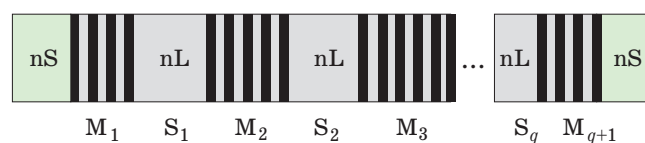


Рис. 2. Принципиальная схема оптического фильтра Фабри–Перо для WDM [15].

## ФИЛЬТРЫ ФАБРИ–ПЕРО ДЛЯ СЛОЖЕНИЯ ПУЧКОВ

В работе [17] предложен более простой подход к проектированию оптических фильтров Фабри–Перо, который может быть применён и к спектральному сложению пучков. Структура фильтра с одним резонатором записывается в виде

$$S \left| (HL)^{N_1} L (HL)^{N_1} L \right| S, \quad (1)$$

где  $S$  обозначает подложку,  $H$ ,  $L$  — оптические толщины материалов с высоким и низким показателями преломления, выраженные в четвертях длины волны QWOT (Quarter Wave Optical Thickness),  $N_1$  — число пар слоёв в зеркальной группе.

Из формулы (1) видно, что оптическая толщина слоя-полости в данном случае — всегда четверть длины волны.

Полуволновые слои типа  $LL$  или  $HH$  в английской литературе называются *absentee* (неучаствующие) и не оказывают влияние на спектральные характеристики на расчётной длине волны  $\lambda_0$ . Последовательно раскрывая скобки и удаляя неучаствующие слои, несложно показать, что в конечном счёте между двумя подложками не останется ничего. Другими словами, структура (1) на длине волны  $\lambda_0$  действует как идеальный узкополосный пропускающий фильтр, который становится ещё более узким при увеличении  $N_1$ .

На рис. 3 показан спектр пропускания оптического фильтра Фабри–Перо с одним резонатором и 30 слоями  $\text{SiO}_2 / \text{Nb}_2\text{O}_5$ . Угол падения —  $7^\circ$ , материал подложки — кварц. График наглядно демонстрирует, что фильтр обладает узкой полосой пропускания и широкой полосой отражения, причём область отражения справа от рабочей длины волны 1070 нм в 1,5 раза шире, чем слева.

Ширина полос пропускания  $S_T$  и подавления  $S_R$  для фильтров WDM обычно устанавливаются по следующим относительным уровням [15]:  $S_T$  — по уровню  $-0,5$  дБ (89,1%),  $S_R$  — по уровню  $-30$  дБ (0,1%). Однако, как будет показано ниже, при сложении пучков ширину полосы подавления целесообразно устанавливать по другому уровню.

Типичный мощный волоконный лазер имеет полную ширину спектра на половине

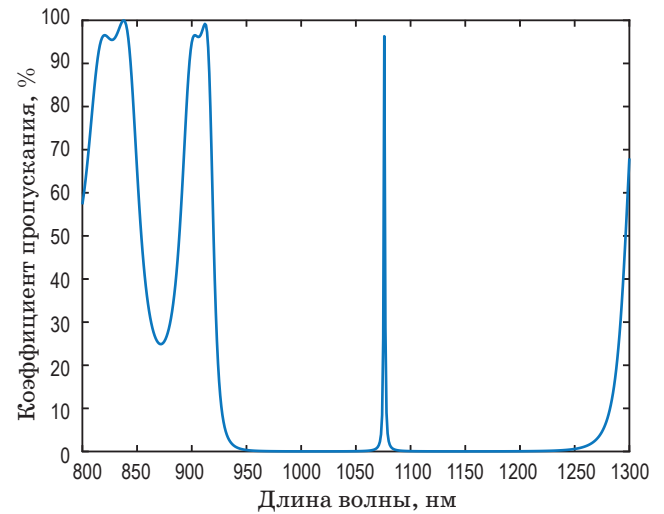


Рис. 3. Спектр пропускания фильтра Фабри–Перо с одним резонатором.

максимума (Full Width at Half Maximum)  $\text{FWHM} = 0,5$  нм, а характерное расстояние между каналами  $\Delta\lambda = 3$  нм. Считая, что спектральное распределение лазерного излучения подчиняется закону Гаусса, полуширина пучка по уровню  $1/e^2$  будет равна

$$w_e = \text{FWHM} / \sqrt{2 \ln 2} \approx 0,425 \text{ нм}.$$

В пределах полосы  $2w_e$  содержится 86,5% энергии гауссова пучка. С учётом этого можно установить в качестве начальных требований к ширинам полос пропускания и подавления удвоенное значение радиуса  $2w_e$  и удвоенное расстояние между каналами

$$S_T^{-0,5} \geq 2w_e, \quad (2)$$

$$S_R^{-30} < 2\Delta\lambda. \quad (3)$$

Требования (2), (3) являются несколько условными, поскольку на практике приходится искать компромисс между сложностью (и стоимостью) изготовления фильтра и потерями мощности в фильтре на отражение или пропускание. Выполнение условий (2) и (3) обеспечивает пропускание значительной доли излучения на центральной длине волны фильтра и эффективное отражение излучения на смежных длинах волн.

Несложно убедиться, что фильтр с одним резонатором не удовлетворяет требованию (2).

Структуры покрытий для фильтров Фабри–Перо с 2, 3, 4 и т.д. резонаторами записываются следующим образом [17]:

$$S \left| (HL)^{N_1} L (HL)^{N_1} \right| (HL)^{N_2} L (HL)^{N_2} \left| S, \quad (4)$$

$$S \left| (HL)^{N_1} L (HL)^{N_1} \right| (HL)^{N_2} L (HL)^{N_2} \left| (HL)^{N_3} L (HL)^{N_3} L \right| S, \quad (5)$$

$$S \left| (HL)^{N_1} L (HL)^{N_1} \right| (HL)^{N_2} L (HL)^{N_2} \left| (HL)^{N_3} L (HL)^{N_3} \right| (HL)^{N_4} L (HL)^{N_4} \left| S. \quad (6)$$

Следует отметить, что при нечётном числе резонаторов справа появляется дополнительный четвертьволновый слой  $L$ . Синтез многослойных интерференционных покрытий является сложной оптимизационной задачей. Расчёт покрытий по известной конструкции является относительно простым и осуществляется, как правило, послойным построением характеристической матрицы. Такой расчёт реализован в ряде программ и, в частности, в программе *Multidiel* [17, раздел 5.1], которая и использовалась в дальнейших расчётах.

Основными вопросами проектирования фильтров Фабри–Перо (4)–(6) являются выбор материалов слоёв, определение числа резонаторов и числа пар слоёв  $N_1, N_2, N_3, N_4$ . Основными материалами с высоким показателем преломления для рассматриваемого оптического диапазона являются оксиды металлов, в частности, гафния, тантала и ниобия. Число резонаторов влияет на крутизну спектра пропускания, а число пар слоёв в зеркальных группах — на ширину спектра. В результате расчётного анализа было установлено, что наилучшие результаты по величине пропускания при минимальной оптической толщине покрытия достигаются при  $N_2 = N_1 + 1$ . Кроме того, при числе резонаторов два и более общая структура фильтра должна быть симме-

тричной. Так, для трёх резонаторов  $N_3 = N_1$ , а для четырёх резонаторов  $N_3 = N_2, N_4 = N_1$ . Симметрия структуры фильтра определяет симметрию спектра его пропускания.

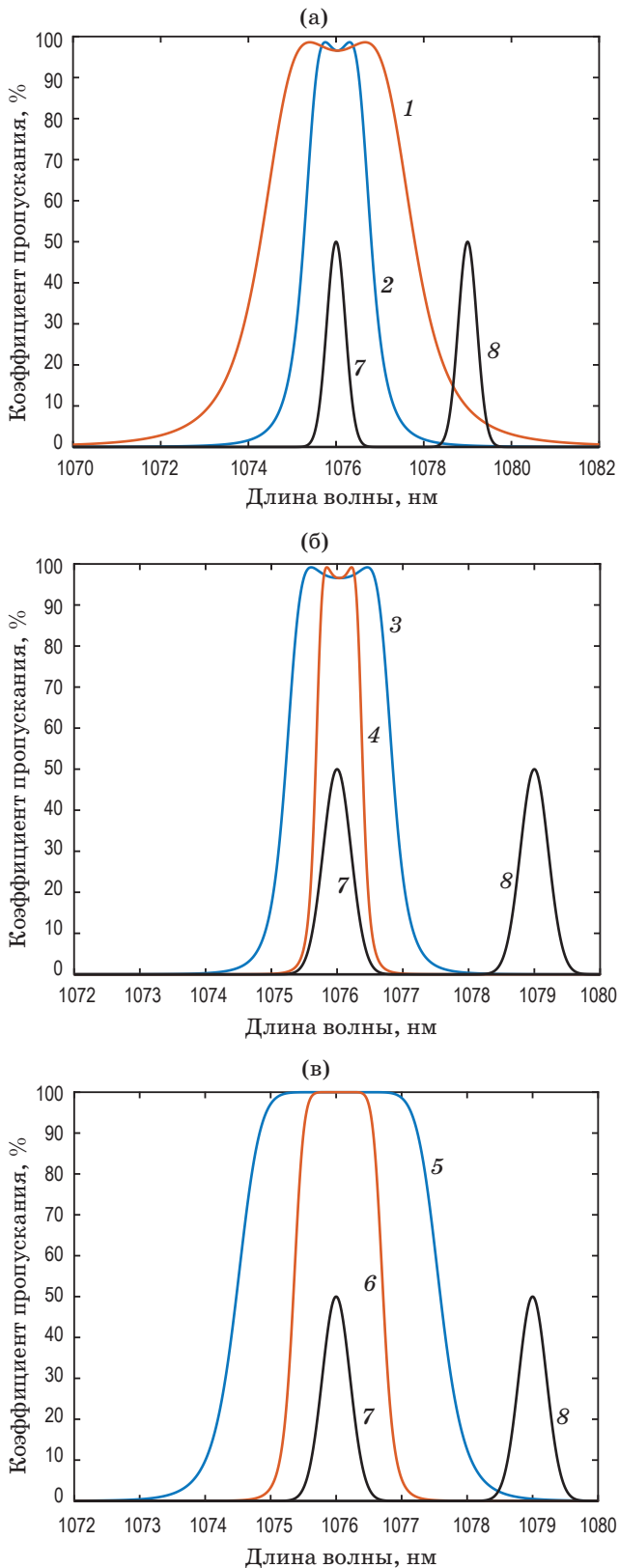
Некоторые результаты расчётов для покрытий со структурами (4)–(6) представлены на рис. 4. Материалами слоёв являлись  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , в качестве подложки использовался плавленый кварц. Угол падения составлял  $7^\circ$  и с учётом его малости расчёт проводился только для  $S$ -поляризации. На фильтре с четырьмя резонаторами дополнительно предусмотрено двухслойное просветляющее покрытие из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

На этих графиках чёрными линиями 7, 8 показаны гауссовы спектры излучения лазеров с длинами волн 1076 и 1079 нм с относительной амплитудой 50%, а спектры пропускания фильтров — линиями 1–6. Численные характеристики указанных фильтров представлены в таблице.

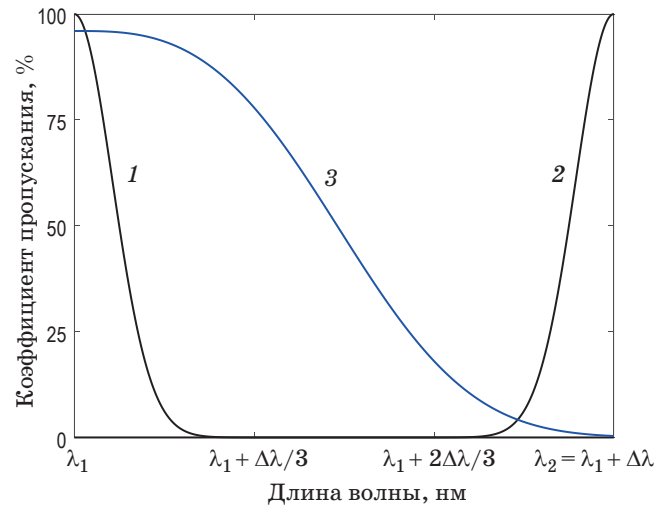
Ширина полосы пропускания установлена по уровню  $-0,5$  дБ, а полосы подавления по двум уровням  $-30$  дБ и  $-20$  дБ. Из таблицы следует, что строго удовлетворяют ограничениям (2), (3) только варианты 3 и 6 с числом слоёв 80 и 110. Однако на практике важны не столько значения ширины полосы пропускания/подавления, сколько энергетическая

#### Расчётные характеристики фильтров Фабри–Перо

Число резонаторов	2		3		4	
	1	2	3	4	5	6
Число слоёв	46	54	80	92	94	110
Полоса пропускания $S_T^{-0,5}$ , нм	2,20	0,92	1,15	0,47	2,34	0,99
Полоса подавления $S_R^{-30}$ , нм	17,77	8,05	4,75	2,05	7,15	3,10
Полоса подавления $S_R^{-20}$ , нм	10,37	4,50	3,24	1,39	5,35	2,30
Эффективность $\eta$ , %	86,1	96,5	97,1	85,0	99,3	99,3



**Рис. 4.** Спектры пропускания фильтров Фабри-Перо: 2 резонатора (а); 3 резонатора (б); 4 резонатора с двумя слоями просветления (в), кривые 1–6 соответствуют номерам вариантов в таблице, кривые 7, 8 — гауссовы спектры излучения лазеров.



**Рис. 5.** Иллюстрация расчёта энергетической эффективности: кривые 1, 2 — гауссовы спектры излучения лазеров, кривые 3 — спектр пропускания фильтра.

эффективность фильтров. Расчёт последней для фильтра на длине волны  $\lambda_1$  проиллюстрирован на рис. 5.

На этом рисунке линиями 1, 2 показаны две половинки спектров излучения лазеров на смежных длинах волн, расстояние между которыми составляет  $\Delta\lambda$ . Линия 3 представляет половинку рассматриваемого фильтра. В расчёте на один лазер энергетические потери связаны с недостаточным пропусканием на данной длине волны  $\lambda_1$ , а также пропусканием излучения на соседней длине волны  $\lambda_2$ . Влиянием пропускания на более удалённых каналах пренебрегалось. Энергетическая эффективность может быть определена следующим образом:

$$\eta = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (G_1\Phi_1 - G_2\Phi_1) d\lambda \bigg/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} G_1 d\lambda, \quad (7)$$

где  $G_1, G_2$  — спектры излучения смежных лазеров,  $\Phi_1$  — спектр пропускания рассматриваемого фильтра.

В нашем примере  $G_i(\lambda) = \exp[-2(\lambda - \lambda_i)^2/w_e^2]$ ,  $i = 1, 2$ ;  $\lambda_1 = 1076$  нм,  $\lambda_2 = 1079$  нм,  $w_e = 0,425$  нм.

Результаты расчёта энергетической эффективности при одинаковой мощности лазеров приведены в таблице. Относительно низкой эффективностью отличаются варианты 1 и 4. Первый — из-за слишком широкой полосы по-

давления, а четвёртый — из-за узкой полосы пропускания. Условие (3) отражает специфику фильтров WDM, когда информационный сигнал должен передаваться максимально точно и ширина полосы подавления устанавливается по уровню  $-30$  дБ (0,1%). Применительно к сложению пучков эта величина может быть установлена по уровню  $-20$  дБ (1%). Тогда для гауссовых пучков условие (3) можно переписать следующим образом:

$$S_R^{-20} \leq 2(\Delta\lambda - w_e). \quad (8)$$

В рассматриваемом примере величина  $2(\Delta\lambda - w_e) = 5,15$  нм и уровень  $-20$  дБ отражает более точно специфику сложения гауссовых пучков большой мощности. Если же принимаются меры по аподизации пучка или используется пучок, не являющийся гауссовым, то при проектировании фильтра Фабри–Перо нужно ориентироваться на приемлемую величину энергетической эффективности согласно уравнению (7).

Рассмотренные фильтры Фабри–Перо наносятся на выходные грани фильтров. На входную грань фильтра следует наносить просветляющее покрытие, проектирование которого не вызывает особых сложностей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование оптических фильтров Фабри–Перо для спектрального уплотнения каналов WDM в телекоммуникациях достаточно широко описано в литературе [15, 16]. Структура фильтров, число слоёв в полостях, общее число слоёв покрытия, которое зачастую достигает 200–300, выбор материалов, ширины полос пропускания и подавления нацелены

на максимально точную передачу сигнала. При сложении пучков технологических лазеров не требуется точная передача сигнала, но остро стоит проблема лучевой прочности покрытий.

Сложение лазерных пучков с помощью оптических фильтров предлагает вполне приемлемую альтернативу поверхностным или объёмным дифракционным решёткам. При этом фильтры Фабри–Перо могут иметь значительно меньшее число тонкоплёночных слоёв, чем краевые дихроичные фильтры с той же эффективностью.

Научная новизна данной работы заключается в доработке структуры фильтра Фабри–Перо применительно к сложению пучков мощных технологических лазеров. Показано, что четвертьволновые слои могут использоваться не только в зеркальных резонаторах, но и слоях-полостях между ними (см. выражения (4)–(6), графики на рис. 4). Структура фильтров должна быть симметричной, причём число пар слоёв во внутренних резонаторах должно быть на один больше, чем во внешних резонаторах. Как правило, для таких фильтров достаточно 2–4 резонатора. Ширина полос пропускания и подавления технологических лазеров с гауссовым спектральным распределением должна удовлетворять соотношениям (2), (8). Независимо от характера спектрального распределения лазерного пучка конечным критерием пригодности фильтра для сложения является его энергетическая эффективность (формула (7)). На примере волоконных иттербиевых лазеров с расстоянием между каналами 3 нм с гауссовым спектром и шириной полосы  $FWHM = 0,5$  нм показано, что энергетическая эффективность предлагаемых фильтров Фабри–Перо может достигать 96,5–99,3% при 2–4 резонаторах и 54–110 слоях покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Diehl R. High-power diode lasers: Fundamentals, technology, applications. Berlin: Springer, 2000. 416 p.
2. Injeyan H., Goodno G.D. High power laser handbook. N.Y.: Mac-Graw Hill, 2011. 618 p.
3. Rodrigues G.C., Duflou H.V. Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional fiber and CO2 technologies // Physics Procedia. 2014. V. 56. P. 901–908.
4. Rodrigues G.C., Cuypers M., Sichani E.F. et al. Laser cutting with direct diode laser // Physics Procedia. 2013. V. 41. P. 558–565.
5. Fan T.Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2005. V. 11. № 33. P. 567–577. doi:10.1109/jstqe.2005.850241.
6. Erdogan T. MLD vs. transmission gratings for the highest-efficiency, most-compact pulse compressors // OSA Technical Digest. 2020. Paper HM2B.2. 2 p. doi: 10.1364/HILAS.2020.HM2B.2.

7. *Palmer C.* Diffraction grating handbook. Rochester, N.Y.: Newport Corp., 2020. 252 p.
8. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. Сойфера В.А. Пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 736 с.
9. *Zhu H., Lin X., Zhang Y. et al.* kW-class fiber-coupled diode laser source based on dense spectral multiplexing of an ultra-narrow channel spacing // *Optics Express*. 2018. V. 26. № 19. P. 24723–24733.
10. *Kogelnik H.* Coupled wave theory for thick hologram gratings // *The Bell System Technical Journal*. 1969. V. 48. № 9. P. 2909–2947.
11. *Qi H., Zhu M., Fang M., Shao S. et al.* Development of high-power laser coatings // *High Power Laser Science and Engineering*. 2013. V. 1. № 1. P. 36–43.
12. Wavelength filters in fibre optics / Ed. by Venghaus H. Berlin: Springer, 2006. 480 p.
13. *Ma J., Chen F., Wei C., Zhu R.* Modeling and analysis of the influence of an edge filter on the combining efficiency and beam quality of a 10-kW-class spectral beam-combining system // *Appl. Sci*. 2019. V. 9. Is. 10. P. 2152. doi:10.3390/app9102152.
14. Encyclopedia of microfluids and nanofluids / Ed. by Li D. Berlin, Springer, 2008. 2241 p.
15. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* Automated design and sensitivity analysis of wavelength-division multiplexing filters // *Applied Optics*. 2002. V. 41. № 16. P. 3176–3182.
16. *Murthy C.S., Gurusamy M.* WDM optical networks: Concepts, design and algorithms. Hoboken, Prentice Hall, 2001. 430 p.
17. *Orfanidis S.J.* Electromagnetic waves and antennas. New Brunswick: Rutgers University, 2016. 1433 p.