

28. Голографические фильтры в оптических информационных технологиях

В. М. Петров¹, А. В. Глейм¹, С. А. Козлов¹, А. В. Шамрай², К. А. Саечников²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Цитирование: Петров, В. М. Голографические фильтры в оптических информационных технологиях / В. М. Петров, А. В. Глейм, С. А. Козлов, А. В. Шамрай, К. А. Саечников // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 148–153.

Голографические фильтры на основе отражательных решёток Брэгга оказываются востребованными в оптических информационных технологиях благодаря своей высокой спектральной селективности $\delta\lambda$ [1]:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_B} \approx \frac{\Lambda}{T}, \quad (1)$$

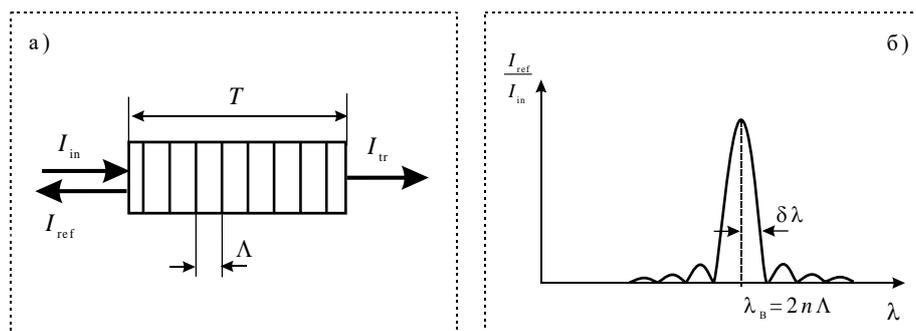
где λ_B — длина волны Брэгга, Λ — период решётки, T — толщина решётки.

Центральная, селективируемая длина волны фильтра определяется условием Брэгга для отражательной геометрии:

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (2)$$

где n — показатель преломления вещества. Для диапазона длин волн, используемых в современных волоконно-оптических линиях связи 1500–1600 нм, и для материала с показателем преломления $n = 1,5$ (например, плавленый кварц, стандартное оптическое волокно), характерная величина периода решётки Λ лежит в диапазоне 500–533 нм, а спектральная селективность $\delta\lambda = 0,4$ нм, достигается на толщине решётки порядка 2 мм. Аналогично, для материала с показателем преломления $n = 2,2$ (ниобат лития), характерная величина периода решётки Λ лежит в диапазоне 340–360 нм, а спектральная селективность $\delta\lambda = 0,4$ нм, достигается на толщине решётки порядка 1,5 мм. Приведённые значения требуемых периодов и толщин решёток вполне достижимы для современных технологий. В более общем случае, величины спектральных селективностей отражательных решёток, отвечающие требованиям Международного Союза Электросвязи (ITU) $\delta\lambda = 0,2$ – $0,8$ нм [2, 3], оказываются достижимыми при толщинах решётки $T = 3,0$ – $0,7$ мм соответственно.

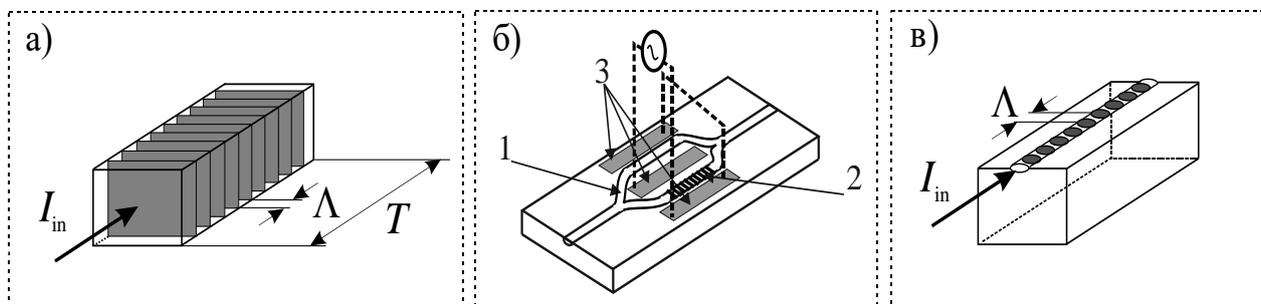
В современной литературе можно выделить три основных варианта исполнения фильтров на основе отражательных решёток: одномерное исполнение (1-D), например, решётки, сформированные в оптическом волокне; двумерное, плоское исполнение (2-D), например, решётки, созданные в приповерхностных оптических волноводах в интегральном исполнении; и трёхмерные (3-D) решётки, выполненные в объёмных образцах материала.



а) отражательная решётка Брэгга
б) зависимость дифракционной эффективности отражательной решётки от длины волны

T – толщина решётки, Λ – период решётки, I_{in} – падающая волна, I_{ref} – отражённая волна, I_{tr} – прошедшая волна, $\lambda_B = 2n\Lambda$ – длина волны Брэгга, $\delta\lambda$ – величина спектральной селективности решётки

Рис. 1



а) трёхмерное, «объёмное» исполнение
б) двумерное, интегральное исполнение
в) одномерное исполнение

1 – оптический волновод, 2 – отражательная решётка Брэгга, 3 – управляющие электроды

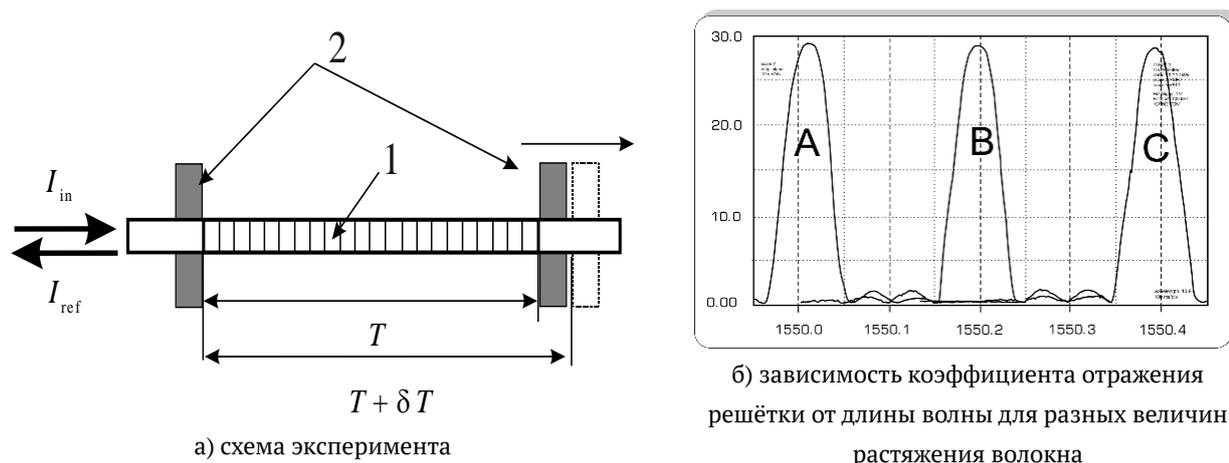
Рис. 2. Отражательная решётка Брэгга

Материалом для трёхмерных решёток могут быть различные стёкла, светочувствительные полимеры (например, PMMA), а также сегнетоэлектрики (LiNbO_3 , BaTiO_3), обладающие фоторефрактивным и электрооптическим эффектами. К несомненному достоинству фильтров на основе стёкол и полимеров следует отнести отсутствие зависимости характеристик от состояния поляризации света, так называемых поляризационно-зависимых потерь.

Выбор материала определяет возможность управления (или перестройки) длины волны Брэгга. Оптическое волокно, изготовленное из плавленого кварца, обладает определённой эластичностью. Механическое растяжение участка волокна, в котором создана решётка, позволяет изменять селектируемую длину волны λ_B до 10 нм. В этом случае используется зависимость длины волны Брэгга от периода решётки. Линейное увеличение периода решётки приводит к линейному увеличению длины волны Брэгга λ_B :

$$\lambda_B + \delta\lambda = 2n(\Lambda + \delta\Lambda)$$

$$\delta\lambda = \lambda_B \frac{\delta T}{T} \left(1 + \frac{\sigma}{n}\right) \quad (3)$$



а) схема эксперимента
1 — отрезок волокна с отражательной решёткой, 2 — муфты, одна из которых может перемещаться вдоль оси волокна, А — начальное состояние решётки, В — решётка растянута на 3,5 мкм, С — решётка растянута на 7 мкм

Рис. 3. Управление длиной волны Брэгга за счёт механического растяжения оптического волокна

где $\delta T/T$ — относительное удлинение, а σ — фотоупругий коэффициент, учитывающий изменение показателя преломления за счет механических напряжений, возникающих при растяжении. Растяжение участка волокна с $T = 3$ см на величину $\delta T \approx 0,7$ мкм, приводит к перестройке длины волны Брэгга λ_B на $\delta\lambda = 0,38$ нм.

Одним из важнейших параметров управляемых фильтров является время перестройки. В данном случае оно определяется механическими свойствами устройства, обеспечивающего растяжение, и не превышает долей секунды. Поскольку плавный кварц является оптически-изотропным материалом, то для решёток, созданных в таких материалах, отсутствуют какие-либо эффекты, связанные с ориентацией входной поляризации. Фильтры на основе таких решёток являются нечувствительными к ориентации поляризации падающего света.

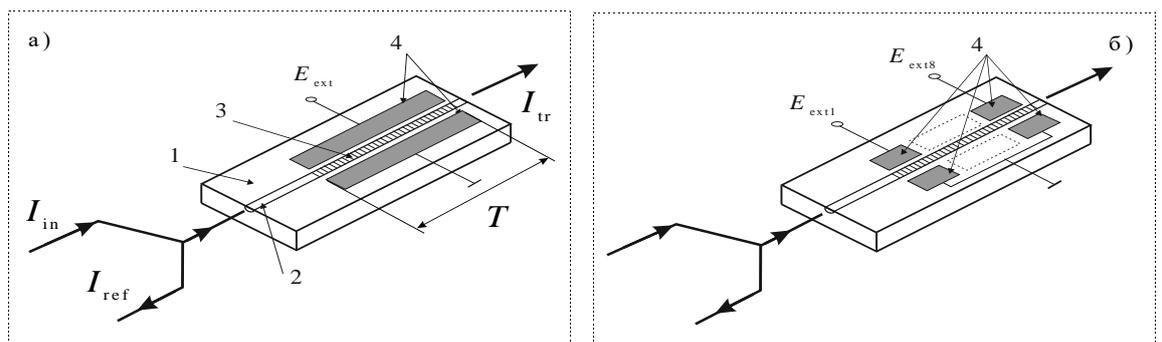
Использование кристаллов LiNbO_3 , BaTiO_3 , обладающих линейным электрооптическим эффектом, позволяет использовать зависимость длины волны Брэгга от величины показателя преломления [4, 5]:

$$\lambda_B + \delta\lambda = 2(n \pm \Delta n(E))\Lambda. \quad (4)$$

В этом случае принято говорить об электрическом управлении селективируемой длиной волны. Электрическое управление может быть реализовано в 1-D, 2-D, так и в 3-D исполнении.

В общем случае для линейного электрооптического эффекта изменение показателя преломления под действием приложенного электрического поля может быть выражено следующим образом:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \sum r_{ij}E_j, \quad (5)$$



а) электрически управляемый фильтр в интегральном исполнении

б) оптический кодер, содержащий восемь пар электродов. Одна пара электродов образует одну секцию решётки

1 — подложка из ниобата лития, 2 — поверхностный волновод, 3 — отражательная решётка Брэгга, 4 — электроды

Рис. 4.

где r_{ij} — тензор электрооптических коэффициентов. Для ниобата лития можно использовать оценку $\Delta n = (1/2)n^3 r_{33} E$ и величину $r_{33} \approx 30$ пм/В. Для реалистичных значений напряжённости электрического поля $E = 100$ кВ/см, изменение показателя преломления $\Delta n \approx 1,6 \times 10^{-4}$, что обеспечивает изменение длины волны $\delta \lambda \approx 0,25$ нм для $\lambda_B = 1550$ нм. Линейный электрооптический эффект является знакопеременным, что позволяет при соответствующем выборе полярности электрического поля, увеличивать или уменьшать селективируемую длину волны.

Время электрического управления селективируемой длины волны, т. е. время переключения отклика решётки из одного состояния в другое, в первом приближении определяется межэлектродной ёмкостью и техническими параметрами источника управляющего напряжения. Как показывает практика, при зазоре между электродами порядка 5–10 мкм, характерное время составляет десятки наносекунд. Фундаментальное ограничение связано с временем распространения света вдоль решётки. При длине электродов и решётки T , время распространения оптической волны на отрезке, ограниченной длиной электродов T составляет $\tau = T/nc$, где n — показатель преломления, c — скорость распространения света в вакууме. Для $n = 2,2$ (ниобат лития) это время составит примерно 73,3 пс ($73,3 \times 10^{-12}$ с). Данная величина определяет фактическое время перестройки центральной длины волны при изменении напряжения в виде ступеньки во временной области. Точный вид переходных процессов может быть определен, проводя анализ дифракции на решетке с изменяющейся во времени пространственной неоднородностью показателя преломления, при этом во время переходного процесса будет изменяться не только центральная длина волны, но и форма спектральной характеристики.

Заданная пространственная неоднородность для управления формой спектральной характеристики может быть легко создана за счет пространственной неоднородности электрического поля при использовании управляющих электродов сложной формы.

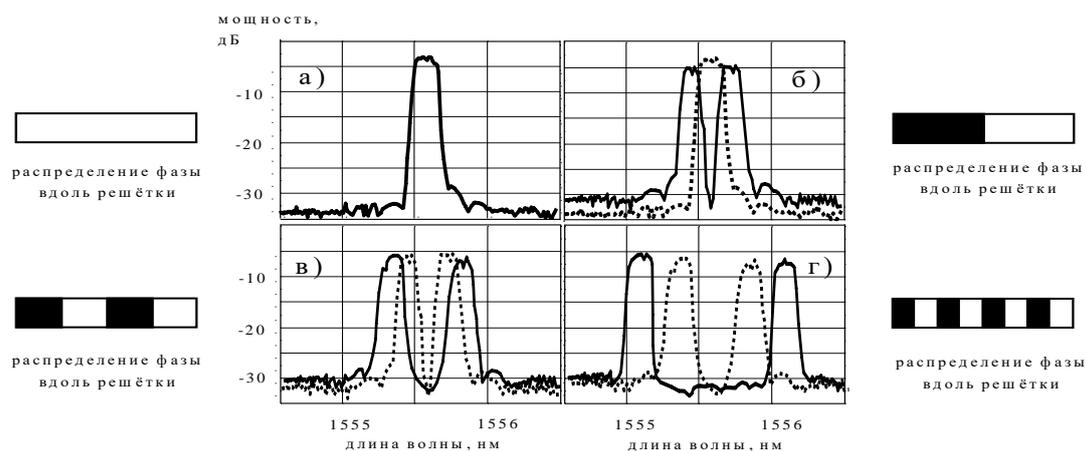


Рис. 5. Пример оптического кодирования. Показаны распределения фазы $\Delta\varphi$ вдоль решётки.
Белый цвет: $\Delta\varphi = 0$, чёрный цвет: $\Delta\varphi = \pi$.

В последние годы несомненный прогресс связан с развитием интегрально-оптических технологий [6], что позволило создавать электрически-управляемые фильтры, представляющие из себя комбинацию оптического волновода, отражательной решётки Брэгга и пар электродов, расположенных вдоль волновода [7, 8]. На всём протяжении решётка имеет одинаковую амплитуду и период. Управление формой отклика решетки осуществляется за счёт внесения электрически управляемых фазовых сдвигов $\Delta\varphi$ между отдельными секциями решётки. Особый интерес такие устройства вызывают для задач оптического, в том числе квантового кодирования, информации. Оптический фильтры в интегральном исполнении, с несколькими парами электродов, расположенных вдоль решётки, представляет из себя оптический кодер. Принцип кодирования, используемый такими устройствами, состоит в синтезе отклика решётки (т. е. зависимости коэффициента отражения от длины волны), имеющего различное число максимумов.

Можно показать, что для рассмотренной здесь в качестве примера решётки, содержащей $N = 8$ секций, можно реализовать как минимум 8 отличающихся друг от друга по профилю откликов решётки. Тогда информационную ёмкость такой системы можно оценить, как $C = \log_2 8 = 3$ [бит]. А скорость передачи информации, с учётом сделанных выше оценок времени переключения $\tau = 1-10$ нс, может быть оценена как $c = 3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$ [бит/с].

Как видно из представленных экспериментальных данных, спектральная селективность фильтра составляла примерно 0,2 нм. Потенциально имеется возможность улучшения спектральной селективности до 0,02 нм за счёт увеличения длины решётки примерно до 3 см. Это позволит увеличить число управляемых секций решётки до 16 или 32 и, соответственно, увеличить число отличающихся друг от друга профилей отклика решетки (т. е. число статистически-независимых состояний устройства), что, во-первых, позволит увеличить пропускную способность, и, второе, примерно на порядок уменьшить полосу спектра, используемую для кодирования.

Список источников

- [1] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.
- [2] Международный Союз Электросвязи МСЭТ–Т, сектор стандартизации электросвязи МСЭ, серия G: Пассивные волоконно-оптические сети с поддержкой гигабитных скоростей передачи (GPON): Спецификация зависимого от физической среды (PMD) уровня. Рекомендация МСЭТ-Т G.984.2. — 2003.
- [3] Международный Союз Электросвязи МСЭТ–Т, сектор стандартизации электросвязи МСЭ, серия G: Системы и среда передачи, цифровые системы и сети: Характеристики передачи оптических компонентов и подсистем. Рекомендация МСЭ-Т G.671. — 2005.
- [4] **Петров, В. М.** Интерференция и дифракция для информационной фотоники / В. М. Петров, А. В. Шамрай // С.-Петербург: Лань. — 2019. — 446 с.
- [5] **Petrov, V. M.** Optical on-line controllable filters based on photorefractive crystals / V. M. Petrov et al. // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. — 2003. — Vol. 5. — № 6. — P. 471–476.
- [6] **Ильичёв, И. В.** Оптимизация технологии изготовления канальных протоннообменных волноводов в кристаллах ниобата лития / И. В. Ильичёв, А. С. Козлов, П. В. Гаенко, А. В. Шамрай // Квантовая электроника. — 2009. — Том 39. — С. 98–104.
- [7] **Petrov, A. N.** Informational Properties of a DWDM electrically-controllable integrated optical filters with an additional polarizer / A. N. Petrov, V. M. Petrov, A. V. Shamray // Internet of Things, Smart Spaces and next Generation Networks and Systems, Edit. by S. Balandin et al., Springer-Verlag, Heidelberg. — 2014. — Vol. 8638. — P. 640–646.
- [8] **Petrov, V. M.** Optical Coder with a Synthesized Transfer Function for Optical Communication Line / V. M. Petrov, R. V. Kiyan // Internet of Things, Smart Spaces and next Generation Networks and Systems, Edit. by S. Balandin et al., Springer-Verlag, Heidelberg. — 2015. — Vol. 9247. — P. 705–711.