

УДК 534; 621.382

А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова, В. В. Данилов
Донецкий Национальный университет, кафедра радиофизики
ул. Университетская, 24, 83055 Донецк, Украина
e-mail: krf@dongu.donetsk.ua

Интегральные акустооптические перестраиваемые фильтры для оптоволоконных линий передачи со спектральным уплотнением

Показано, что основным видом современной линии передачи информации, отвечающей насущным потребностям по пропускной способности, является волоконно-оптическая линия (ВОЛП) в которой для обеспечения минимальности вносимых искажений необходимо уплотнение-разуплотнение данных. Проведен анализ перспективности использования для этих целей интегральных акустооптических перестраиваемых фильтров (ИАОПФ) и методов снижения уровня боковых лепестков их частотной характеристики пропускания, основной причины ограничивающей использование ИАОПФ при организации каналов связи на основе ВОЛП.

Ключевые слова: акустооптический фильтр, аподизация, боковые лепестки, интегральная оптика, поверхностные акустические волны.

Введение

Практически неограниченные возможности по пропускной способности открывает использование оптических линий передачи, которые различаются как открытые и световодные (планарные и волоконные). Общая характеристика их приведена в работе [1], где показана перспективность использования для организации каналов связи волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Наличие нескольких видов дисперсии в волоконных световодах резко снижает пропускную способность ВОЛП, и применение их без специальных элементов уплотнения-разуплотнения (У/Р) информации довольно ограничено. В ВОЛП различают временное и спектральное У/Р потока данных [1]. За рубежом процесс получил название, соответственно временного и волнового мультиплексирования-демультиплексирования (Time Division Multiplexing — TDM; Wavelength Division Multiplexing — WDM), причем технология WDM или DWDM (Dense WDM), как более перспективное направление, непрерывно совершенствуется [1, 2, 21].

© А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова, В. В. Данилов

Особая роль в реализации WDM отводится акустооптическим перестраиваемым фильтрам (acoustooptic tunable filters — АОТФ). Это объясняется тем, что АОТФ являются полностью электронноуправляемыми [1–10], имеют большой диапазон перестройки (более чем в 20 раз превосходящий диапазон перестройки электрооптических фильтров), узкий интервал длин волн между каналами (порядка 1 нм), узкую полосу оптического пропускания (несколько ангстрем) и малое время произвольного переключения между каналами, определяемое скоростью распространения поверхностной акустической волны [10, 11]. По оценкам специалистов [1–12], для реализации WDM очень привлекательными являются интегральные акустооптические перестраиваемые фильтры (integrated acoustooptic tunable filter — ИАОТФ), которые, помимо уже отмеченных достоинств, имеют малые массу, габариты и энергопотребление, а также обладают возможностью дальнейшей, более сложной, интеграции [11, 12]. Низкие требования к уровню мощности управляющего сигнала позволяют организовать распараллеливание данных по нескольким оптическим каналам одновременно.

Однако, всем видам акустооптических перестраиваемых фильтров, как объемным, так и интегральным, присущ недостаток, обусловленный наличием вторичных максимумов (боковых лепестков) в их частотной характеристике пропускания. Эффект обусловлен сложным видом акустооптического взаимодействия (АОВ) между акустической и оптической волнами в твердотельной среде.

Интегральные акустооптические перестраиваемые фильтры, в которых коэффициент акустооптической связи между коллинеарно распространяющимися оптической и поверхностными акустическими волнами (ПАВ) является постоянным по всей длине АОВ, имеют теоретическую частотную характеристику (ЧХ) пропускания с уровнями боковых лепестков $-9,3$ дБ [7, 13]. Известен ряд экспериментальных работ [12, 14–16], свидетельствующих, что уровень боковых лепестков для ИАОТФ с постоянным коэффициентом связи превышает -9 дБ, что приводит к необходимости расширения частотного промежутка между каналами, следовательно, к уменьшению плотности каналов.

В настоящей работе проведен аналитический обзор методов снижения уровней боковых лепестков частотной характеристики интегральных акустооптических перестраиваемых фильтров, показана возможность их дальнейшего развития.

Методы аподизации

Одним из эффективных способов снижения уровней боковых лепестков ЧХ планарных акустоэлектронных устройств является аподизация [17]. В соответствии с данными работ [9, 11, 18–27], такой подход был опробован при создании ИАОТФ. Аподизации подвергся коэффициент акустооптической связи по длине АОВ (изменялся от минимума на концах к максимуму в середине области АОВ), причем в работе [23], процесс сопровождался использованием проводника переменной ширины, по которому распространялась поверхностная акустическая волна (ПАВ). В работах [9, 24] аподизация достигалась фокусировкой ПАВ при помощи специальной геометрии встречно-штыревого преобразователя (ВШП). В работах [6, 15] использовался однородный направленный ответвитель ПАВ (uniform-gap SAW directional coupler — SAWDC). Результаты расчетов и эксперимен-

тов показали, что ни в одном из случаев весовая функция, обеспечивающая уровни боковых лепестков ниже -18 дБ, при полном преобразовании мод, реализована не была.

Известна работа [26], где предложена однокаскадная аподизированная конструкция IAOTF на основе неоднородного направленного ответвителя ПАВ (рис. 1). Соответствующий анализ был проведен для фильтра на подложке из ниобата лития (LiNbO_3), работающего на длине волны оптического излучения $\lambda = 1,55$ мкм. Из нескольких синтезированных весовых функций наилучшие результаты (уровень наибольшего бокового лепестка $-44,7$ дБ) были получены для гауссового профиля аподизации (рис. 2).

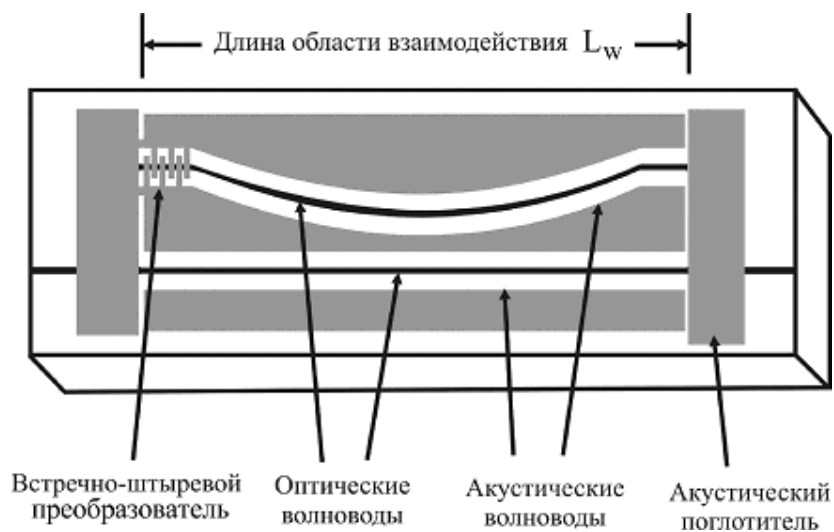


Рис. 1. Топология аподизированной конструкции IAOTF [26]

Расчет структур с аподизацией

Одним из наиболее распространенных подходов к построению модели акустооптического взаимодействия в АОТФ является использование метода связанных мод (coupling-of-modes — COM). Однако применение COM для конструкций с аподизацией осложнено, так как коэффициент акустооптической связи неоднороден вдоль длины АОВ. Использование традиционного подхода, метода малых возмущений, приводит к значительным погрешностям с ростом возмущений.

Значительно более привлекательны-

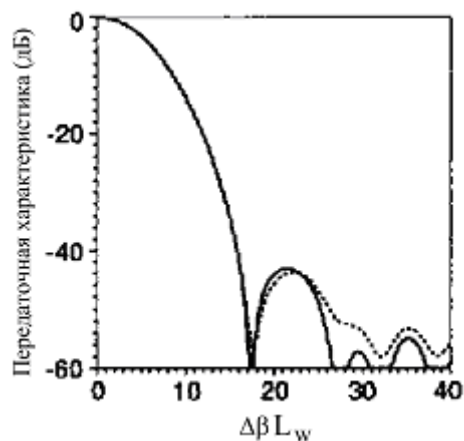


Рис. 2. Характеристика IAOTF для гауссового профиля аподизации: $\Delta\beta = 2\pi\Delta\lambda / (\lambda\Lambda)$, где $\Delta\lambda$ — диапазон перестройки; λ — центральная длина оптической волны; Λ — длина акустической волны [26]

ми в этом случае являются численные методы. Сочетание методов конечных элементов (finite elements method — FEM) и распространения луча (beam propagation method — BPM) предложено в работе [27]. Описанная процедура моделирования состоит в следующем. На первом этапе профили акустического поля в области подложки и на поверхности подложки рассчитываются раздельно методами FEM и BPM соответственно.

Полученные двумерные профили используются для построения трехмерных профилей поля деформаций и электрического поля. Затем, по полю деформаций и электрическому полю определяются изменения показателя преломления, обусловленные акустооптическим (АО) и электрооптическим (ЭО) эффектами. В результате, характеристики IAOTF могут быть определены на основе анализа свойств планарных световодов с измененными за счет АО- и ЭО-эффектов показателями преломления путем повторного использования BPM.

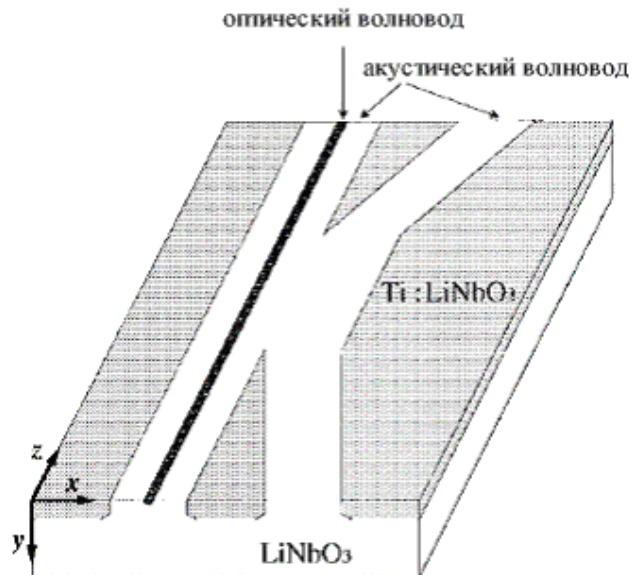


Рис. 3. Топология IAOTF на основе акустического неоднородного направленного ответвителя на подложке из ниобата лития [27]

Характеристики пропускания IAOTF на основе акустического неоднородного направленного ответвителя на подложке из ниобата лития (см. рис. 3) представлены на рис. 4 [27].

Методы многоволнового акустооптического взаимодействия

Основой метода многоволнового АОВ является физическая модель, учитывающая одновременное взаимодействие нескольких поверхностных акустических и световой волн. Такой подход может быть использован для подавления боковых лепестков ЧХ интегрального акустооптического перестраиваемого фильтра [28, 29].

В качестве демонстрации метода в [30] предлагается структура фильтра на базе оптического двухволноводного направленного ответвителя с акустически

создаваемой дифракционной решеткой (рис. 5). Техническая реализация метода обладает следующими преимуществами: не требуется входного и выходного поляризаторов, а также двоякопреломления материала подложки. Поскольку несколько акустических волн излучаются совместно, связь обеих ТЕ- и ТМ-поляризаций между двумя планарными световодами существует одновременно, что позволяет реализовать фильтрацию требуемой световой волны обеих поляризаций одновременно.

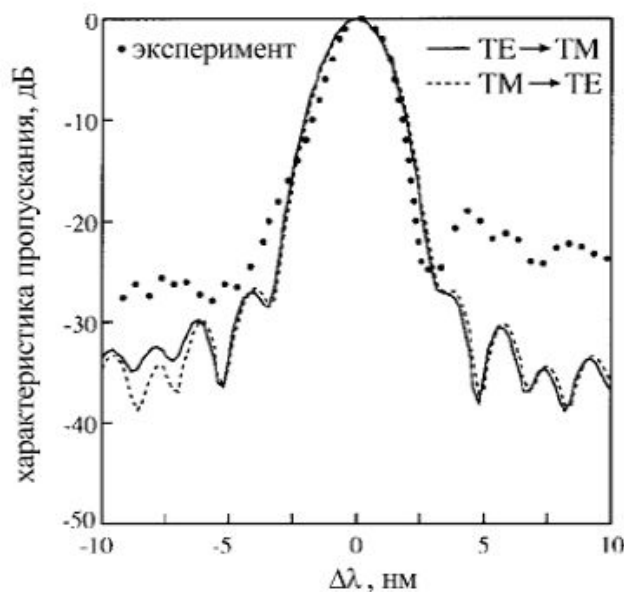


Рис. 4. Характеристики пропускания IAOTF [27]



Рис. 5. AOTF на основе оптического двухволноводного направленного ответвителя [30]

Поскольку предложенный акустооптический фильтр не требует входного и выходного поляризаторов, а также применения анизотропных материалов и с сильным двулучепреломлением, номенклатура материалов, из которых может быть изготовлен фильтр, расширяется. Это делает возможной интеграцию АОТФ с другими устройствами обработки сигналов в одном чипе.

В традиционных акустооптических фильтрах акустически формируемая дифракционная решетка обеспечивает связь между двумя ортогональными поляризациями в анизотропной среде. Эта среда должна обладать свойством сильного двулучепреломления, поскольку ширина оптической полосы пропускания фильтра обратно пропорциональна разности показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. Эти ограничения уменьшают совместимость традиционных акустооптических фильтров с другими оптическими устройствами. Также традиционные фильтры настраиваются на определенную поляризацию. Однако в приемном устройстве поляризация волны, выходящей из волоконного световода, не может быть гарантирована, и поляризационно-зависимый фильтр очень часто не может правильно обработать принятый сигнал.

В предложенной конструкции фильтра использование направленного ответвителя делает возможной одновременную фильтрацию обеих ТЕ- и ТМ-поляризаций за счет использования двух акустических волн разных частот одновременно. Одна акустическая волна приводит к связи ТЕ-поляризации оптической волны определенной длины одного волновода с другим, и другая акустическая волна приводит к связи ТМ-поляризации оптической волны такой же длины.

Снижение боковых лепестков в оптическом спектре пропускания фильтра достигается использованием дополнительной акустической волны, подобранной таким образом, чтобы ее постоянная распространения соответствовала длине волны вторичного максимума. Поскольку, волны главного и вторичного максимумов теоретически противофазны, воздействие этой дополнительной акустической волны способно значительно уменьшить уровень вторичного максимума при условии соответствующего выбора ее амплитуды. Рассчитанные характеристики пропускания фильтра [30] приведены на рис. 6.

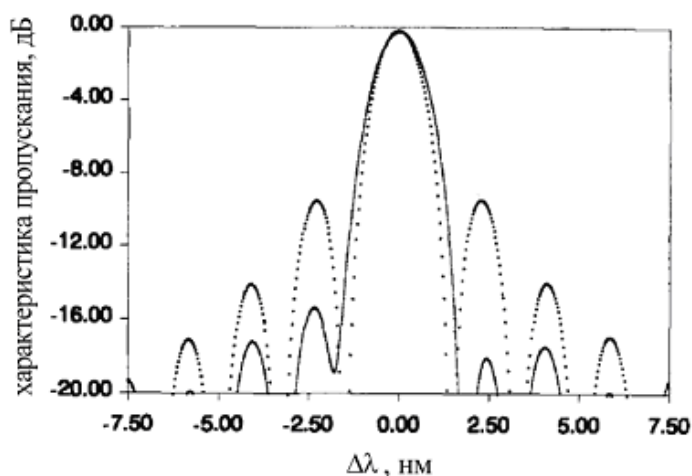


Рис. 6. Характеристики пропускания АОТФ [30]

Каскадное включение областей АОВ

Приемлемым способом снижения уровней боковых лепестков ИАОТФ является каскадное включение областей АОВ. Такая концепция была продемонстрирована для поляризационно-зависимых фильтров [31, 32]. Для ее расширения на случай поляризационной независимости может быть использована схема разделения поляризации, которая уже применялась для однокаскадных фильтров [33]. Первый прототип такого двухкаскадного поляризационно-независимого фильтра был предложен в [34].

В [35] предложен не зависящий от поляризации интегрально-оптический акустооптический перестраиваемый двухкаскадный фильтр селекции оптических сигналов на двулучепреломляющей подложке LiNbO_3 . Устройство состоит из четырех акустооптических преобразователей мод, поляризаторов ТЕ- и ТМ-каналов, и двух разветвителей/сумматоров поляризации (рис. 7).

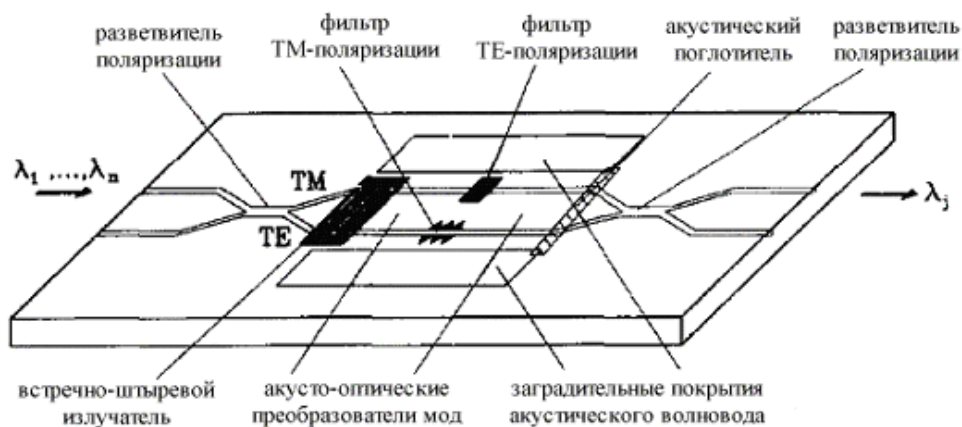


Рис. 7. Топология двухкаскадного поляризационно-независимого АОТФ с четырьмя областями АОВ, размещенными на одном акустическом волноводе [35]

Обе ветви для ТЕ и ТМ поляризованных волн размещены на одном акустическом волноводе, поверхностная акустическая волна в котором генерируется встречно-штыревым преобразователем. Для каждой из ветвей в первом каскаде выполняется поворот плоскости поляризации для волн, длина которых определяется частотой акустической волны.

В результате, следующего каскада для ТМ-ветви достигают только ТЕ поляризованные волны, а для ТЕ-ветви — волны с ТМ-поляризацией. Это обуславливает первичную функцию фильтрации. Далее, во втором каскаде в каждой из ветвей происходит избирательный возвратный поворот плоскости поляризации, также управляемый частотой акустической волны. Это приводит к значительному снижению уровней боковых лепестков в передаточной характеристике фильтра (рис. 8) по сравнению с однокаскадным случаем.

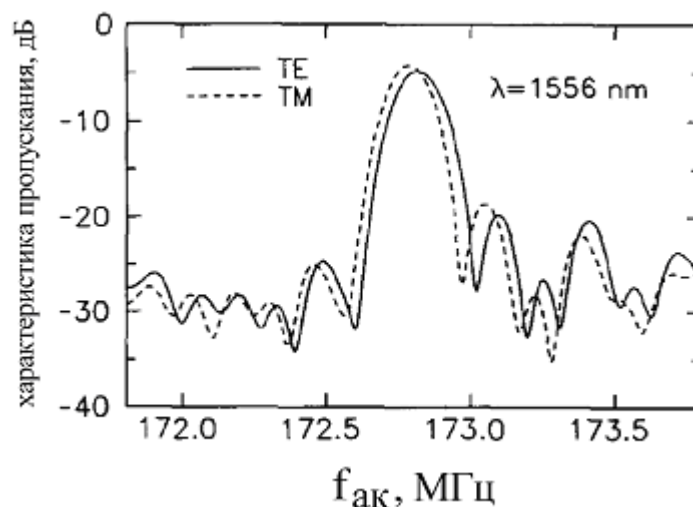


Рис. 8. Характеристика пропускания двухкаскадного IAOTF, $f_{ак}$ — частота акустической волны [35]

Выводы

Методами, позволяющими снизить уровни боковых лепестков частотной характеристики пропускания IAOTF, являются аподизация и многоволновое акустооптическое взаимодействие. Метод аподизации при реализации IAOTF с низким уровнем боковых лепестков ЧХ пропускания наиболее эффективен и позволяет осуществить подавление боковых лепестков до уровня $-44,7$ дБ. Однако, для его реализации необходимы материалы с большой анизотропией, а также наблюдается зависимость технических характеристик устройства от поляризации входного оптического сигнала. Метод многоволнового акустооптического взаимодействия, за счет использования нескольких акустических волн, позволяет управлять как уровнем основного, так и боковых лепестков ЧХ пропускания IAOTF. Применение многоволнового АОВ позволяет осуществить реализацию поляризационно-независимых фильтров.

Каждый из приведенных методов (и их комбинация) имеют потенциал дальнейшей оптимизации характеристик IAOTF, выполнение которой представляется перспективным путем использования численных методов.

1. Данилов В.В. Основи створення пристроїв вводу, розуцільнення й адресації потоків інформації для оптичних обчислювальних засобів: Автореф. д-ра. техн. наук / НТУ «КПІ». — К., 2003.

2. Mochida Y., Tsuda T., and Kuwahara H. The Photonic Technologies Impact on the Next Generation Network // Wireless Personal Communications. — 2001, June. — Vol. 17, N. 2–3. — P. 311–322.

3. Lifeng Xiao, Ying Liu, Meng Tian, and Fan Geng. Research and Development on Integrated Optical AOTF // Proc. SPIE. — 2005, Jan. — Vol. 5644. — P. 452–458.

4. *Yaguang Tian, Jianmin Cui, Wei Liu, Yu-nan Sun, and Fang Cui.* Novel Fully Dynamic and Reconfigurable Optical add/drop Multiplexer Based on AOTF with Low Crosstalk // Proc. SPIE. — 2004, May. — Vol. 5281. — P. 186–197.
5. *Chuanjing Wen, Jisheng Yang, Limin Zhang, and Hehua Xu.* Study on a Novel Quasi-Collinear AOTF // Proc. SPIE. — 2005, Jan. — Vol. 5623. — P. 243–247.
6. *Hang-you Lin, Ji-ping Ning, and Fan Geng.* Influence of SiO₂/In₂O₃ Film Acoustical Waveguide on the Mode Index of Ti:LiNbO₃ Optical Waveguide in Acousto-Optical Mode Converter // Proc. SPIE. — 2004, Apr. — Vol. 5279. — P. 505–508.
7. *Smith D.A., Baran J.E., Johnson J.J. and Cheung K.W.* Integrated-Optic Acoustically Tunable Filters for WDM Networks // IEEE J. Select. Areas Commun. — 1990. — Vol. 8. — P. 1151–1159.
8. *Cheung K.W., Choy M.M., and Kobrinski H.* Electronic Wave-Length Tuning Using Acousto-optic Tunable Filter with Broad Continuous Tuning Range and Narrow Channel Spacing // IEEE Photon. Technol. Lett. — 1989. — Vol. 1. — P. 38.
9. *Kar-Roy A. and Tsai C.S.* Low-Sidelobe Integrated Acousto-Optic Tunable Filter Using Focused Surface Acoustic Waves // IEEE Photon. Technol. Lett. — 1992. — Vol. 4. — P. 1132–1135.
10. *Cheung K.W., Smith D.A., Baran J.E. and Heffner B.L.* Multiple Channel Operation of an Integrated AO Tunable Filter // Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. — Houston, TX. — 1989, Feb. — P. THB3.
11. *Smith D.A. and Johnson J.J.* Sidelobe Suppression in an Acousto-Optic Filter with a Raised-cosine Interaction Strength // Appl. Phys. Lett. — 1992. — Vol. 61. — P. 1025–1027.
12. *Heffner B.L., Smith D.A., Baran J.E. Yi-Yan A. and Cheung K.W.* Integrated-Optic Acoustically tunable Infra-Red Optical Filter // Electron. Lett. — 1988. — Vol. 24. — P. 1562–1563.
13. *Kobrinski H. and Cheung K.W.* Wavelength Tunable Optical Filters: Applications and technologies // IEEE Commun. Mag. — 1989, Oct. — Vol. 27. — P. 53–63.
14. *Ohmachi Y. and Noda J.* LiNbO₃ TE-TM Mode Converter Using Collinear Acousto-Optic Interaction // IEEE J. Quantum. Electron. — 1977. — Vol. QE-13. — P. 43–46.
15. *Binh L.N. and Livingstone J.* A Wide-Band Acousto-Optic TE-TM Mode Converter Using a Doubly Confined Structure // IEEE J. Quantum. Electron. — 1980. — Vol. QE-16. — P. 964–971.
16. *Frangen J., Herrmann H., Ricken R., Seibert H., Sohler W. and Strake E.* Integrated Optical Acoustically Tunable Wavelength Filter // Electron. Lett. — 1989. — Vol. 25. — P. 1583–1584.
17. Расчет и конструирование АПФ-фильтров. — Новосибирск: Наука, 1982.
18. *Hu H.Z., Lin H.Y., Yang J.S., Zhang M., Chen J. and Geng F.* An Integrated Quasi-Collinear Coupled Acoustooptical Mode Converter // Optics Communications. — 2002, July. — Vol. 208, N 1–3. — P. 79–83.
19. *Hong Z. Hu, Zhang S.J., Liu W. and Geng F.* Design of Wide-Passband Top-Flattened and Side-steepened Acousto-Optical Tunable Filter // Proc. SPIE. — 2001, Oct. — Vol. 4603. — P. 77–80.
20. *Hong Sik Jung.* 2x2 Acousto-Optical Add/Drop Multiplexers Utilizing Tilted Film-Loaded Strip SiO₂ SAW Waveguides in Ti:LiNbO₃ // Optical Engineering. — 2005, Feb. — Vol. 44, N 2. — P. 1–8.
21. *Min Lv, Jianmin Cui, Wei Liu, Fang Cui and Yu-nan Sun.* Integrated Quasi-Collinear Acousto-Optic Mode Converter with Weighted Coupling // Proc. SPIE. — 2005, Jan. — Vol. 5624. — P. 591–595.
22. *Jianmin Cui, Lihui Feng, Wei Liu, Yaguang Tian, Fang Cui and Yunan Sun.* Weighted Coupling to Reduce Sidelobe of the Integrated Acousto-Optic Tunable Filters // Proc. SPIE. — 2004, Apr. — Vol. 5279. — P. 186–191.
23. *Yamamoto Y., Tsai C.S. and Esteghamat K.* Guided-Wave Acousto-Optic Tunable Filters Using Simple Coupling Weighting Technique // Proc. IEEE Ultrason. Symp. — New York. — 1990. — P. 605–608.

24. *Kar-Roy A. and Tsai C.S.* Integrated Acousto-Optic Tunable Filters Using Weighted-Coupling // IEEE J. Quantum. Electron. — 1994, July. — Vol. 30.
25. *Hemmann H. and Schmid St.* Integrated Acousto-Optical Mode-Converters with Weighted Coupling Using Surface Acoustic Wave Directional Couplers // Electron. Lett. — 1992. — Vol. 28. — P. 979–980.
26. *Kar-Roy A. and Tsai C.S.* Ultralow Sidelobe-Level Integrated Acousto-Optic Tunable Filters Using Tapered-Gap Surface, Acoustic Wave Directional Couplers // IEEE J. Lightwave Technology. — 1994, June. — Vol. 12, N 6. — P. 977–982.
27. *Saitoh K., Koshihara M., Tsuji Y.* Numerical Analysis of Integrated Acousto-Optic Tunable Filters with Weighted Coupling // IEEE J. Lightwave Technology. — 1999, Feb. — Vol. 17, N 2. — P. 249–254.
28. *Sobrinho C.S., De Oliveira M.V.N., Da Silva M.G., Lima J.L.S., De Almeida E.F. and Sombra A.S.B.* Numerical Analysis of the Crosstalk on an Integrated Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF) for Network Applications // Fiber and Integrated Optics. — 2004. — Vol. 23, N 5. — P. 345–363.
29. *Hong Z. Hu, Li Y.N. and Jisheng Yang, and Geng F.* Properties of Integrated Acousto-Optic Tunable Filters in Multiwavelength Operation for WDM System // Proc. SPIE. — 2001, Oct. — Vol. 4603. — P. 81–86.
30. *Tony E.S., Chaudhuri S.K.* A Directional Coupler Acoustooptic Filter with Reduced Sidelobe Levels // IEEE J. Lightwave Technology. — 1994, July. — Vol. 12, N 7. — P. 1144–1151.
31. *Herrmann H., Muller-Reich P., Reimann V., Ricken R., Seibert H. and Schler W.* Integrated Optical, TE- and TM-pass, Acoustically Tunable, Double-Stage Wavelength Filters in LiNbO₃ // Electron. Lett. — 1992. — Vol. 28. — P. 642–643.
32. *Smith D.A., Johnson J.J., Heffner B.L., Cheung K.W. and Baran J.E.* Two-Stage Integrated Optical Acoustically Tunable Optical Filter with Enhanced Side-Lobe Suppression // Electron. Lett. — 1989. — Vol. 25. — P. 398–399.
33. *Smith D.A., Baran J.E., Cheung K.W. and Johnson J.J.* Polarization Independent Acoustically Tunable Optical Filter // Appl. Phys. Lett. — 1990. — Vol. 56. — P. 209–211.
34. *Herrmann H., Leifeld Ch., Reimann V., Ricken R., Rust U., Sohler W., Tian F., Westenhofer S.* Polarization Independent Integrated Optical, Acoustically Tunable Double Stage Wavelength Filter in LiNbO₃ // Proc. 6-th Eur. Conf. Integrated Optics (ECIO'93). — Neuchatel (Switzerland). — 1993, April. — P. 1432–1433.
35. *Tian F., Harizi Ch., Herrmann H., Reimann V., Ricken R., Rust U., Sohler W., Wehrmann F. and Westenhofer S.* Polarization-Independent Integrated Optical, Acoustically Tunable Double-Stage Wavelength Filter in LiNbO₃ // IEEE J. Lightwave Technology. — 1994, July. — Vol. 12, N 7. — P. 1192–1197.

Поступила в редакцию 04.05.2005