

УДК 681.7.063

ПОШАГОВАЯ ЗАПИСЬ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК Ti:Sa ЛАЗЕРОМ В АНИЗОТРОПНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНОЕ АКРИЛАТНОЕ ПОКРЫТИЕ

С.В. Архипов^a, М. Грен^b, С.В. Варжель^a, В.Е. Стригалёв^a, Н. Грига^b, Г.И. Айхлер^b

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Берлинский технический университет, Берлин, 10623, Германия

Адрес для переписки: thinkingcreature@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.03.15, принята к печати 23.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-373-377

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Архипов С.В., Грен М., Варжель С.В., Стригалёв В.Е., Грига Н., Айхлер Г.И. Пошаговая запись брэгговских решеток Ti:Sa лазером в анизотропное оптическое волокно через защитное акрилатное покрытие // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 373–377.

Аннотация

Продемонстрирована пошаговая запись волоконных брэгговских решеток излучением Ti:Sa фемтосекундного лазера, излучающего на длине волны 800 нм, в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой отечественного производства. Предложенный метод записи волоконных решеток Брэгга имеет преимущества по сравнению с традиционным методом использования фазовой маски. Возможность создания решеточных структур со сложным профилем и относительно высокая прозрачность акрилатного покрытия для длины волны работы Ti:Sa фемтосекундного лазера (800 нм) позволяет записывать решетки с фазовыми сдвигами в структуре, чирпированные решетки и суперструктуры на их основе в оптическое волокно без снятия защитной акрилатной оболочки. Метод обеспечивает запись дифракционных структур в оптические волокна как с увеличенной, так и со стандартной концентрацией диоксида германия в сердцевине. Проведен эксперимент по записи решетки Брэгга в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой через защитное акрилатное покрытие. Достигнутый коэффициент отражения составил 10%. Представлено фотографическое изображение дифракционной структуры в данном типе волоконного световода, полученное на оптическом микроскопе. Решетка с периодом 1,07 мкм записана путем протаскивания волокна с постоянной скоростью при установленной частоте повторений импульсов лазера в 1 кГц. Результаты работы могут найти применение в области создания чувствительных элементов различных оптоволоконных сенсорных систем на основе решеток Брэгга.

Ключевые слова

брэгговская решетка, фемтосекундный лазер, пошаговая запись, анизотропное волокно, акрилатная оболочка.

Благодарности

Работа выполнена в Берлинском техническом университете и Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

POINT-BY-POINT INSCRIPTION OF FIBER BRAGG GRATINGS INTO BIREFRINGENT OPTICAL FIBER THROUGH PROTECTIVE ACRYLATE COATING BY Ti:Sa FEMTOSECOND LASER

S.V. Arkhipov^a, M. Grehn^b, S.V. Varzhel^a, V.E. Strigalev^a, N. Griga^b, H.J. Eichler^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Technical University of Berlin, Berlin, 10623, Germany

Corresponding author: thinkingcreature@yandex.ru

Article info

Received 23.03.15, accepted 23.04.15

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-373-377

Article in Russian

For citation: Arkhipov S.V., Grehn M., Varzhel S.V., Strigalev V.E., Griga N., Eichler H.J. Point-by-point inscription of fiber Bragg gratings into birefringent optical fiber through protective acrylate coating by Ti:Sa femtosecond laser. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 373–377.

Abstract

The paper deals with point-by-point inscription of fiber Bragg gratings by the 800 nm Ti:Sa femtosecond laser pulses into a unique birefringent fiber with elliptical stress cladding of home manufacture. The proposed inscription method has advantages over the conventional phase mask method. The possibility to create complex grating structures and relatively high

transparency of acrylate coating to the Ti:Sa femtosecond laser radiation of 800 nm gives the possibility for inscription of phase shifting gratings, chirped grating and superstructures without stripping the fiber. Also, this method makes it possible to inscribe these diffractive structures with and without co-doping of GeO₂ in the fiber core. Achieved reflectance was 10%. The microscopic image of the diffractive structure in the fiber core is presented. The grating of 1.07 μm is realized by pulling the fiber with constant speed while the laser pulses are applied with a repetition frequency of 1kHz. The results are usable in the sphere of creation of different fiber optic sensitive elements based on Bragg gratings.

Keywords

Bragg grating, femtosecond laser, point-by-point inscription, anisotropic fiber, acrylate coating.

Acknowledgements

The work was carried out in Technical University of Berlin and ITMO University under financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project № 02.G25.31.0044)

Введение

Волоконные брэгговские решетки (ВБР), записанные при помощи инфракрасных (ИК) фемтосекундных лазеров, представляют большой интерес в различных областях – от изготовления телекоммуникационных и чувствительных элементов до производства волоконных лазеров [1–6]. Главным отличием от метода записи с использованием ультрафиолетового лазера и фазовой маски являются механизмы взаимодействия между излучением ИК фемтосекундного лазера и диэлектрическим материалом – мультифотонное поглощение и туннельная ионизация. Это отличие избавляет от необходимости повышения фоточувствительности оптического волокна (ОВ) для сильной модификации показателя преломления (ПП) в нем [7]. Наличие оптических повреждений (абляции) материала и изменения ПП зависят от плотности энергии излучения, используемого для этого [8]. Эта зависимость позволяет записывать внутренние структуры в прозрачных диэлектрических материалах сфокусированными лучами, одновременно избегая абляции внешней части образцов. Главными преимуществами данной техники являются свобода задавать период ВБР без использования фазовой маски и возможность локализовать изменения ПП внутри или снаружи сердцевины с высокой точностью, тем самым избегая связи с модами оболочки. Кроме того, решетки, записанные излучением ИК фемтосекундного лазера, обладают высокой температурной стойкостью (более 1000 °С) [9–11], что существенно расширяет диапазон их возможного применения.

Неоднократно докладывалось о пошаговой записи решеток Брэгга в различных видах ОВ, например [12], но до сих пор не сообщалось о применении пошаговой записи к специальным двулучепреломляющим ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой.

Для записи ВБР было выбрано анизотропное ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, изготовленное по технологии [13, 14], со сложной структурой [15], включающей в себя сердцевину, круговую изолирующую оболочку, эллиптическую напрягающую оболочку и круговую внешнюю оболочку. Образец, который мы использовали, имел следующие характеристики: 4 мол.% GeO₂ в сердцевине; оптические потери меньше 1 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для записи ВБР пошаговым методом излучением Ti:Sa фемтосекундного лазера.

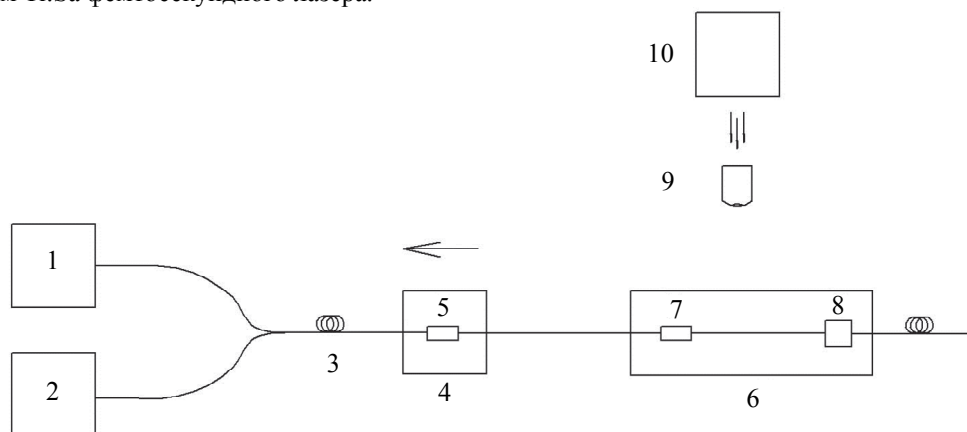


Рис. 1. Схема записи: 1 – источник излучения; 2 – оптический спектроанализатор; 3 – образец оптического волокна; 4 – однокоординатная подвижка; 5 – держатель оптического волокна; 6 – рамка на двухкоординатной подвижке; 7 – керамическая ферула; 8 – держатель оптического волокна; 9 – микроскопный объектив; 10 – фемтосекундный лазер.

Примечание: керамическая ферула 7 и держатель оптического волокна 8 закреплены на подвижке 6; в держателе оптического волокна 8 магнит на «лапке» находится в положении, позволяющем протягивать оптическое волокно через держатель без особых усилий

В ходе экспериментов по записи ВБР пошаговым методом была отработана специальная процедура пространственного совмещения фокальной перетяжки Ti:Sa лазерного излучения, прошедшего через микрообъектив с сердцевинной волокна при случайной ориентации напрягающей эллиптической оболочки.

На рис. 2 представлена геометрия фокусировки оптического излучения Ti:Sa фемтосекундного лазера на сердцевину ОВ с помощью микроскопного объектива. Короткофокусный объектив позволял получить достаточно большой размер пучка на поверхности ОВ (2ω) по сравнению с размером фокальной перетяжки ($2\omega_0$) в области сердцевинной волоконного световода на расстоянии z от его поверхности, что давало возможность добиться максимальной плотности мощности только в сердцевине волокна ($2z_r$, где z_r – радиус ОВ), при этом не повреждая внешнее защитное акрилатное покрытие световода.

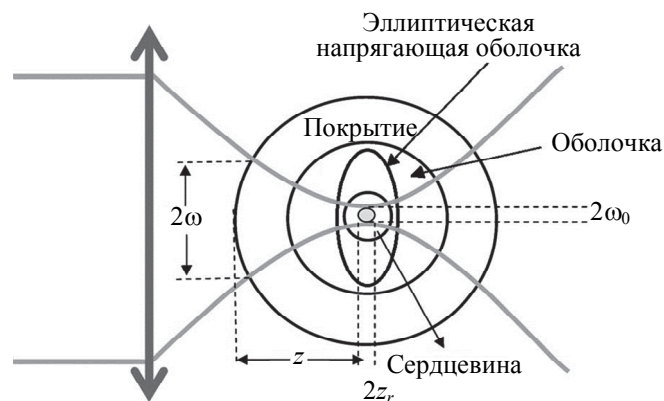


Рис. 2. Геометрия фокусировки

Излучение фемтосекундного лазера фокусировалось в сердцевину при помощи $100\times$ -го оптического объектива (0.34 NA). Импульсы излучения длины волны 800 нм, сгенерированного усиленным Ti:Sa лазером, имели длительность около 120 фс, частоту повторений 1 кГц и энергию от 1 до 8 мкДж (измерялась перед объективом). Для изготовления ВБР волокно протягивалось через керамическую ферулу и настраиваемый волоконный держатель, что надежно фиксировало участок волокна между двумя точками. Эта конструкция, состоящая из ферулы и волоконного держателя, закрепленных в рамочной системе фирмы «Thorlabs», была помещена на двухкоординатную подвижку. ОВ было закреплено в волоконном держателе, зафиксированном на тянущей подвижке. Последняя двигалась с постоянной скоростью, протягивая волокно относительно фокальной точки пучка. Таким образом, длина периода устанавливалась отношением скорости протягивания к частоте повторения импульсов.

Результаты

Для записи ВБР было выбрано двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с 4 мол.% GeO₂ в сердцевине, что соответствует характеристикам волокна без повышенной фоторефрактивности. Структуры записывались через защитную акрилатную оболочку одиночными импульсами.

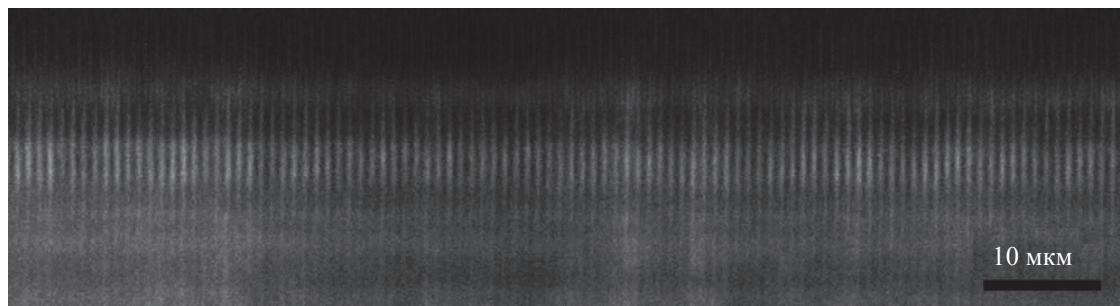


Рис. 3. Фотография периодической структуры в сердцевине двулучепреломляющего оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой

На рис. 3 представлено изображение одной из периодических структур, снятое микроскопом Zeiss Axio Imager.A1 через $50\times$ -ый объектив в режиме темного поля. Подобные изображения решеток, записанных AgF и KrF эксимерными лазерами методом фазовой маски, ранее были получены авторами в работах [16, 17]. Также данное изображение схоже с решеткой, индуцированной излучением Ti:Sa ИК фемтосекундного лазера методом фазовой маски [18]. Период решетки составляет примерно 1,07 мкм, что соответствует заданному отношению скорости протягивания ОВ к частоте импульсов.

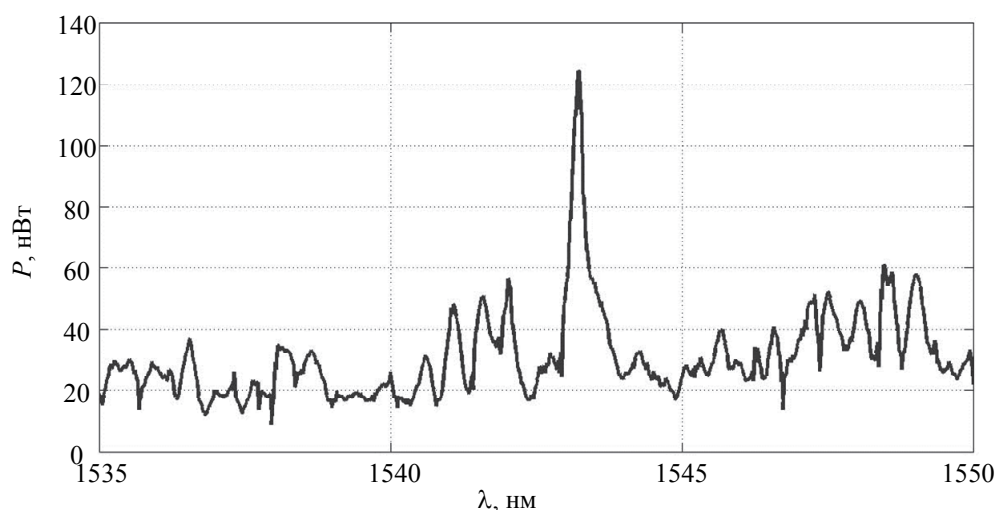


Рис. 4. Спектр отражения решетки Брэгга, записанной в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой

На рис. 4 представлен спектр отражения ВБР, индуцированной в анизотропное ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой через защитное акрилатное покрытие волоконного световода. Спектры решеток получены на оптическом спектроанализаторе Yokogawa AQ6370C с диапазоном измерений 600–1700 нм и разрешающей способностью в 0,02 нм. Длина волны брэгговского резонанса представленной решетки составляет 1543 нм, что соответствует второму порядку дифракции для решетки с данным периодом, коэффициент отражения ВБР – около 10%.

Заключение

Пошаговым методом были записаны волоконные брэгговские решетки 2-го порядка в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой без повышенной концентрации GeO_2 в сердцевине (около 4 мол.%) через защитное акрилатное покрытие с применением фемтосекундного Ti:Sa лазера. Полученная волоконная брэгговская решетка относится к решеткам, которые имеют широкую область применения благодаря относительно простому процессу изготовления и высокой устойчивости к механическим воздействиям, возможности использования при высоких температурах (более 1000 °C). Еще одним важным преимуществом данного метода записи структур является возможность записывать волоконные решетки показателя преломления со сложным профилем.

References

- Grobncic D., Mihailov S.J., Smelser C.W., Ding H.M. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, no. 11, pp. 2505–2507. doi: 10.1109/LPT.2004.834920
- Jovanovic N., Eslund M., Fuerbach A., Jackson S.D., Marshall G.D., Withford M.J. Narrow linewidth, 100 W cw Yb^{3+} -doped silica fiber laser with a point-by-point Bragg grating inscribed directly into the active core. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, no. 19, pp. 2804–2806. doi: 10.1364/OL.32.002804
- Tre'panier F., Brochu G., Morin M., Mailloux A. High-end FBG design and manufacturing for industrial lasers, sensing and telecommunications. *Proc. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, BGPP 2014*. Barcelona, Spain, 2014, p. 2716.
- Lai Y., Martinez A., Khrushchev I., Bennion I. Distributed Bragg reflector fiber laser fabricated by femtosecond laser inscription. *Optics Letters*, 2006, vol. 31, no. 11, pp. 1672–1674. doi: 10.1364/OL.31.001672
- Wikszak E., Thomas J., Burghoff J., Ortac B., Limpert J., Nolte S., Fuchs U., Tunnermann A. Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating. *Optics Letters*, 2006, vol. 31, no. 16, pp. 2390–2392. doi: 10.1364/OL.31.002390
- Jovanovic N., Thomas J., Williams R.J., Steel M.J., Marshall G.D., Fuerbach A., Nolte S., Tunnermann A., Withford M.J. Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings enable simple, linearly polarized fiber lasers. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 8, pp. 6082–6095. doi: 10.1364/OE.17.006082
- Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2, no. 4, pp. 219–225. doi: 10.1038/nphoton.2008.47
- Schaffer C.B., Brodeur A., Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, no. 11, pp. 1784–1794. doi: 10.1088/0957-0233/12/11/305

9. Grobnc D., Smelser C.W., Mihailov S.J., Walker R.B. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fiber Bragg grating made with ultrafast laser radiation. *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, no. 5, pp. 1009–1013. doi: 10.1088/0957-0233/17/5/S12
10. Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 176–178. doi: 10.1049/el:20057898
11. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. doi: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041
12. Geernaert T., Kalli K., Koutsides C., Komodromos M., Nasilowski T., Urbanczyk W., Wojcik J., Berghmans F., Thienpont H. Point-by-point fiber Bragg grating inscription in free-standing step-index and photonic crystal fibers using near-IR femtosecond laser. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 1647–1649. doi: 10.1364/OL.35.001647
13. Eron'jan M.A. *Process of Manufacture of Fibrous Light Guides Preserving Radiation Polarization*. Patent RF, no. RU2155359, 2000.
14. Bureev S.V., Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Komarov A.V., Levit L.G., Khokhlov A.V., Zlobin P.A., Strakhov V.I. Processing large blanks of anisotropic single-mode lightguides with elliptical cladding. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2007, vol. 74, no. 4, pp. 297–298.
15. Andreev A.G., Kryukov I.I., Mazunina T.V., Poloskov A.A., Tsibinogina M.K., Bureev S.V., Eron'yan M.A., Komarov A.V., Ter-Nersesyants E.V. Increasing the birefringence in anisotropic single-mode fiber lightguides with an elliptical stress cladding. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2012, vol. 79, no. 9, pp. 608–609. doi: 10.1364/JOT.79.000608
16. Petrov A.A., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Palanjyan D.A., Gribaev A.I., Konnov K.A. Zapis' reshetok Bregga ArF eksimernym lazerom v anizotropnom opticheskom volokne [Record of Bragg grating in an anisotropic optical fiber using ArF excimer laser]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 31–36.
17. Varzhel S.V., Kulikov A.V., Zakharov V.V., Aseev V.A. Odnoimpul'snaya zapis' i vizualizatsiya volokonnykh reshetok Bregga tipa II [Single-pulse writing and visualization of type II fiber Bragg gratings]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 5 (81), pp. 25–28.
18. Mihailov S.J., Smelser C.W., Lu P., Walker R.B., Grobnc D., Ding H., Henderson G., Unruh J. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation. *Optics Letters*, 2003, vol. 28, no. 12, pp. 995–997.

<i>Архипов Сергей Владимирович</i>	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, thinkingcreature@yandex.ru
<i>Грен Моритц</i>	– научный сотрудник, Берлинский технический университет, Берлин, 10623, Германия, grehn@physik.tu-berlin.de
<i>Варжель Сергей Владимирович</i>	– кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vsv187@gmail.ru
<i>Стригалёв Владимир Евгеньевич</i>	– кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vstrglv@mail.ru
<i>Грига Нильс</i>	– научный сотрудник, Берлинский технический университет, Берлин, 10623, Германия, nils.griga@googlemail.com
<i>Айхлер Ганс Иоахим</i>	– доктор технических наук, профессор, профессор, Берлинский технический университет, Берлин, 10623, Германия, joachim.eichler@tu-berlin.de
<i>Sergey V. Arkhipov</i>	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, thinkingcreature@yandex.ru
<i>Moritz Grehn</i>	– scientific researcher, Technical University of Berlin, Berlin, 10623, Germany, grehn@physik.tu-berlin.de
<i>Sergey V. Varzhel</i>	– PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vsv187@gmail.ru
<i>Vladimir E. Strigalev</i>	– PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vstrglv@mail.ru
<i>Nils Griga</i>	– scientific researcher, Technical University of Berlin, Berlin, 10623, Germany, nils.griga@googlemail.com
<i>Hans Joachim Eichler</i>	– PhD, Professor, Senior Professor, Technical University of Berlin, Berlin, 10623, Germany, joachim.eichler@tu-berlin.de