

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ОБЫЧНЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ, ПЕРЕХОДНИКОВ НА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ И ПЕРЕХОДНИКОВ НА ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЕ

Введение

Одна из главных проблем применения обычных оптических волокон и волноводов – их неэффективность при соединении с интегральными оптическими устройствами, волноводами, полупроводниковыми устройствами, такими как лазерные диоды и другими волноводными устройствами с отличными свойствами. Потери на соединении возникают вследствие несоответствия поля распределения мод и изменения в показателе преломления [1]. Стандартным методом уменьшения потерь на соединении является метод преобразования направляемой моды с помощью адиабатического перехода в волноводной структуре между соединяемыми устройствами [1]. Этот метод легко осуществим и воспроизводим с помощью сужающегося устройства [2]. Слабое ограничение поля, существующее в простых ступенчатых волноводных переходниках, обычно приводит к многомодовому режиму или неприемлемым потерям и искажению моды вплоть до существенного преобразования направляемой моды [1]. Поэтому необходим поиск и более детальное исследование новых более эффективных типов переходников. Переходники на фотонных кристаллах (ФК) позволяют развивать компактные фотонные интегрированные системы, которые обеспечивают низкие потери при распространении сигнала и высокую эффективность передачи сигнала в элементах различной конфигурации необходимых в таких фотонных интегрированных цепях [3]. ФК сужения – отправная точка для создания нового класса перестраиваемых волоконных устройств. Эти волоконные устройства обладают высокой перестраиваемостью с очень маленькими вносимыми потерями или непреднамеренными поляризационно-зависимыми потерями, и могут быть легко соединены в оптических системах [4].

Плавно суженный ФК волновод и суженный ФК планарный волновод на эффекте фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) также имеют потенциал для существенного уменьшения длины сужения и восстановления первоначальной формы распределения поля моды при низких потерях [1]. Соблюдение плавности в ФК волноводных сужениях является важным условием для уменьшения потерь в них и (или) длины сужения.

В то же время такие переходники на фотонных кристаллах являются недостаточно исследованными. Например, недостаточно исследованы распределения полей в них, потери в различных типах переходников и величины пропускания. Для выявления всего потенциала таких переходников необходимо их более детальное исследование. В предыдущей работе [5] были численно исследованы распределения полей в таких переходниках, профили мод и потери в них. Но необходимо произвести исследования такой важной характеристик, как спектр пропускания данных переходников.

Поэтому цель данной работы – численное исследование влияния размеров на величину пропускания оптической волны проходящей через ФК и ФЗЗ переходники. Результаты вычислений для обычного переходника, ФК переходника и ФЗЗ переходника сравнены и проанализированы.

Теоретическая модель

В данной работе рассмотрены три типа планарных переходников: первый – обычный переходник, второй – ФК переходник и третий – ФЗЗ переходник.

Первый обычный переходник представляет собой участок сужения оптического планарного волновода со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 1). Материалом сердцевины и оболочки является оксид кремния с показателями преломления, равными 1.46 и 1.45 соответственно. Этот переходник работает на эффекте полного внутреннего отражения.

Второй тип переходника на основе ФК представляет собой сужение ФК волновода (далее этот тип переходника будет называться ФК переходник, рис. 2). Область сердцевины имеет форму переходного участка (рис. 2). Основным материалом является оксид кремния с показателем преломления равным 1.46 с воздушными отверстиями перпендикулярно направлению распространения волны. Этот переходник также работает на эффекте полного внутреннего отражения. Периодичность ФК в оболочечной области переходника позволяет нам перейти в моделировании на гомогенную среду с эффективным показателем преломления [6], что упрощает моделирование переходника, сокращает время расчетов распределения электромагнитного поля и упрощает анализ его свойств, а именно, его волноводных характеристик. Мы можем лучше понять волноводные свойства дырочных волноводов с помощью применения теории обычных волноводов (эффект полного внутреннего отражения) для рассмотрения оболочечной ФК области дырочных волноводов, как гомогенной среды с эффективным показателем преломления [5]. При введении эффективного показателя преломления трехмерный переходник можно свести к двумерному случаю [6]. Такой метод гомогенизации периодических сред может быть применен при моделировании широкого круга структур интегральной и волоконной оптики – таких как волноводы, переходники, разветвители и т.д. [7]. Таким образом, в данной работе заменяем ФК переходник его эффективной моделью, которая имеет эффективный показатель преломления ФК оболочечной области и эффективный диаметр сердцевины. Последний был нами получен в работе [6].

Показатель преломления оболочки в эффективной модели ФК переходника экспоненциально уменьшается при сужении и имеет ориентировочно величины от 1.455 в широкой части до 1.425 в узкой части [5], т.е. разница показателей преломления оболочки и сердцевины увеличивается к выходу переходника и поэтому должно увеличиваться оптическое ограничение моды. Величины показателей преломления в широкой части так же зависят от собственной ширины входа переходника, выход переходника остается неизменным.

Третьим типом переходника на основе ФК является планарный волновод на основе ФК, в котором область дефекта имеет форму переходного участка (далее этот тип переходника будет называться Ф33 переходник, рис. 2). Как видно, конструкции ФК и Ф33 переходников схожи, различаются эффекты волноведения, на которых они работают. Основным материалом является оксид кремния с показателем преломления равным 1.46, со стержнями из арсенида галлия (показатель преломления равен 3.37), расположенными перпендикулярно направлению распространения волны. Этот переходник работает на эффекте Ф33, т.е. рабочая длина волны расположена в пределах Ф33 ФК в оболочечной области. Область оболочки Ф33 переходника, которая основана на ФК, имеет следующие параметры: отношение между радиусом стержня и пичем (расстояние между центрами стержней) равно 0.23, пич – 0.7056 мкм, радиус стержня – 0.2254 мкм.

Таким образом, все типы переходников имеют в качестве материала сердцевины оксид кремния (1.46), где и распространяется волна. Такой выбор материала обоснован тем, что в настоящее время наиболее широко используются волоконные линии связи именно с сердцевиной на основе оксида кремния.

Рабочая длина волны $\lambda = 1.55$ мкм. Для всех типов переходников выходной радиус сердцевины равен 3.3 мкм. Длина переходников равна 5 мкм. В данной работе показаны результаты для переходников с входными радиусами сердцевины 5.1, 5.7, и 6.3 мкм.

Численное исследование трехмерных структур переходников представляет собой сложную задачу ввиду относительно малых размеров ФК и сложности расчетов приводящих к большим затратам вычислительных ресурсов. Поэтому мы рассматривали двумерное продольное сечение вдоль оси симметрии структуры (z-x плоскость), например на рис. 2 показано сечение ФК (или же аналогичного Ф33) переходника.

Распространение волны в рассматриваемых структурах описывается с помощью двумерного уравнения Гельмгольца для аксиальных поперечных электрических волн, т.е. Н-волн. Для численного исследования фотонных устройств могут быть использованы

следующие методы: метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод распространения луча, метод линий и метод конечных разностей во временной области. Для решения уравнения Гельмгольца был выбран метод конечных элементов, который использует краевые элементы второго порядка, которые дают хорошие результаты [7], а также позволяет рассматривать структуры с криволинейной геометрией. Кроме того, было получено аналитическое решение для тех же структур. В результате была выбрана такая точность численного решения, при которой аналитическое и численное решение были идентичны [5].

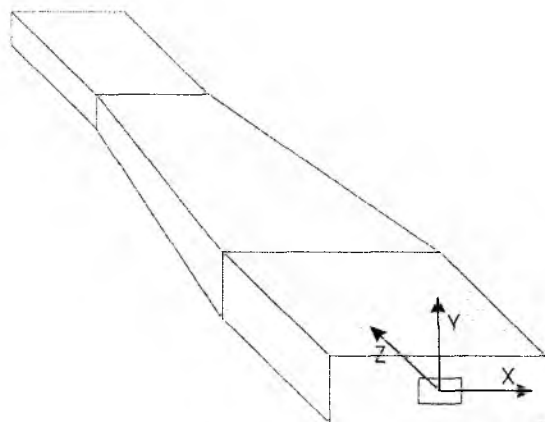


Рис. 1

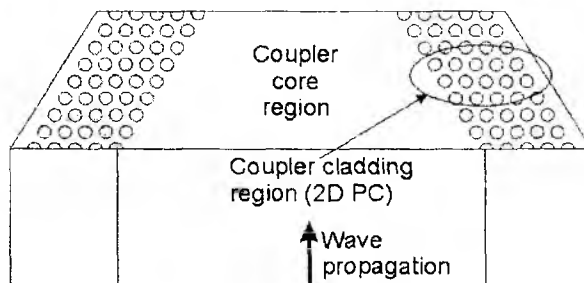


Рис. 2

Время расчетов было дополнительно сокращено благодаря сокращению радиальных размеров области оболочки, т.е. радиуса оболочки структуры [5]. Это сокращение было применено благодаря использованию идеально согласованных граничных условий используемых на краях структур [8] и оно не повлияло на распределение электромагнитного поля, т.к. данные граничные условия обладают 100 % поглощением и нулевым отражением, таким образом, моделируя бесконечные размеры структуры [5].

Результаты и обсуждения

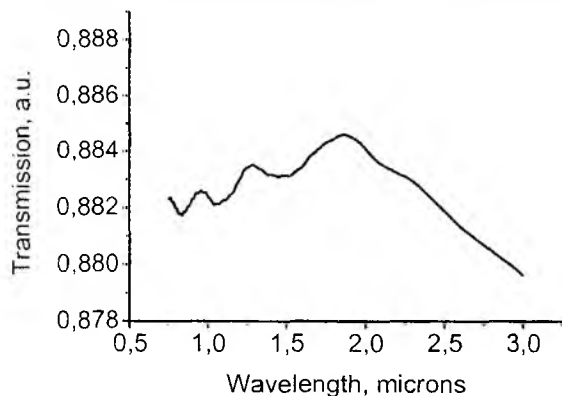
Были рассчитаны распределения электрического поля и радиальные распределения оптической мощности для трех разных входных радиусов переходников и величины потерь для них [5]. Как было показано в работе [5], с возрастанием входного радиуса сердцевины ФК переходника величина утечки в конечной части переходника возрастает. В ФЗЗ переходнике наибольшие потери имеют место в начале и конце переходника. Наибольшие потери в обычных переходниках имеют место в конечной области таких переходников.

Радиальные распределения мод на выходе переходников показало, что на выходе обычных переходников наблюдается незначительное искажение формы моды. На выходе ФК и ФЗЗ переходников происходит сильное искажение формы моды. Необходимо заметить, что больший угол перехода по отношению к оси переходника приводит к более значительному искажению моды на выходе этого переходника. В то же время ФЗЗ переходник имеет большее искажение моды, чем ФК переходник при одинаковых радиусах сердцевин.

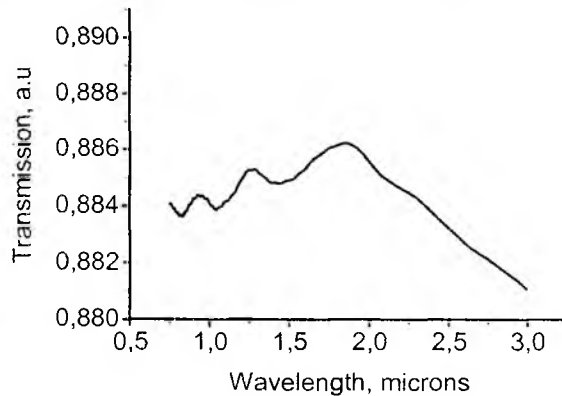
В развитие работы [5] проводились исследования спектров пропускания данных переходников. На рис. 3-5 представлены спектры пропускания трех вышеперечисленных видов переходников при трех входных радиусах сердцевин для всех переходников: 5.1, 5.7 и 6.3 мкм.

Первое, что видно из данных рисунков, это то, что формы спектров обычных переходников и ФК переходников имеют практически идентичную форму (рис. 3, а, b, c и 4, а, b, c). Это можно объяснить тем, что показатели преломления оболочек этих переходников имеют близкие значения и соответственно близкие значения разности показателей преломления сердцевин и оболочек и оптического ограничения. Но все же ФК переходник имеет оболочку с меньшим к концу переходника показателем преломления, чем обычный переходник, соответственно обладает большей разницей показателей преломления оболочки и сердцевин и большим оптическим ограничением. Данный эффект можно видеть на рис. 3, а, b, c и 4, а, b, c, где видно что при близкой форме спектров ФК переходник имеет незначительно

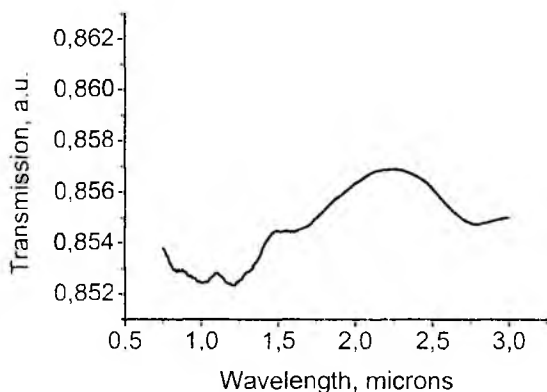
большие величины пропускания оптической моды (разница величин пропускания для идентичных длин волн порядка 0.002-0.004 отн. ед.). Далее, если провести сравнение ФЗЗ переходников и ФК переходников, можно видеть что ФЗЗ переходник имеет более высокие величины пропускания (разница величин пропускания для длины волны 1.55 порядка 0.015 отн. ед.), но и форму спектров отличную от формы спектров ФК переходника (рис. 5, *a*, *b*, *c*).



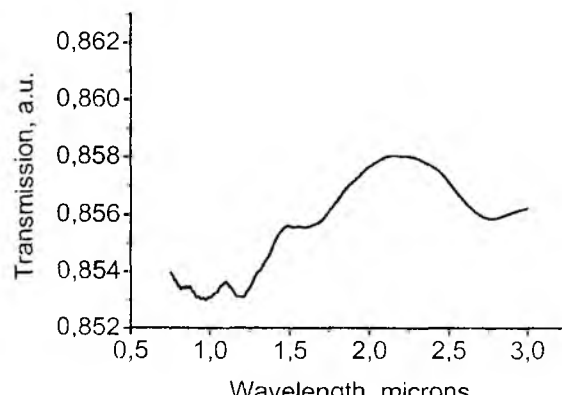
a



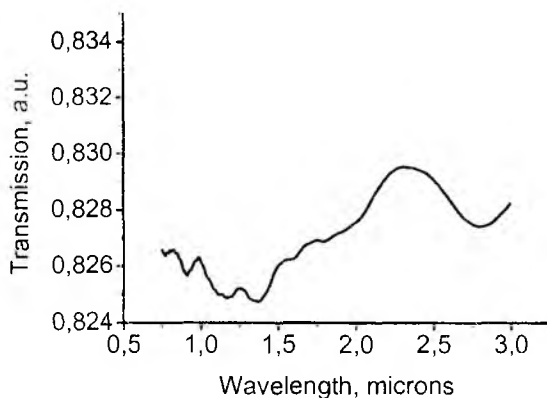
a



b

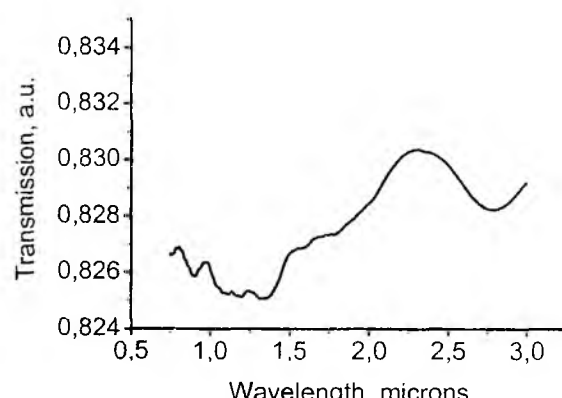


b



c

Рис. 3



c

Рис. 4

В спектре ФЗЗ переходников можно видеть искажения, появляющиеся в результате переотражения волны от стенок переходника благодаря большему оптическому ограничению внутри ФЗЗ переходников. В работе [5] было показано, что ФЗЗ переходники имеют наибольшее оптическое ограничение волны в переходнике за счет эффекта ФЗЗ и наименьшие потери, но и в то же время наибольшее искажение формы моды. Поэтому они, хотя и являются наилучшими среди данных типов переходников по величине потерь и пропускания, тем не менее, не являются идеальными с точки зрения формы моды. Поэтому все еще требуется их дальнейшее исследование и усовершенствование.

Также можно видеть, что в диапазоне длин волн 0.75-3.0 мкм наибольшие величины пропускания расположены в районе 2 мкм и положение это сдвигается в стороны больших длин волн при увеличении входного радиуса переходника любого типа (рис. 3, а, б, с, 4, а, б, с, 5, а, б, с). Это можно объяснить тем, что при большем входном диаметре переходника более длинные волны могут быть поданы на вход такого переходника и эффективно преобразованы к выходу с меньшим размером.

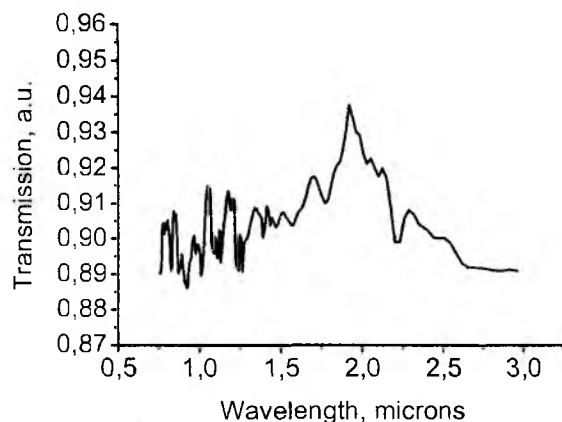
Для рабочей длины волны $\lambda = 1.55$ мкм был построен график величин пропускания для разных типов переходников и разных их входных радиусов (рис. 6). Было показано, что при увеличении входного радиуса переходника любого типа величина пропускания уменьшается, так как увеличивается угол перехода и соответственно количество переотражений и потерь [5]. Например, при увеличении входного радиуса переходника на 0.6 мкм, при неизменных остальных параметрах, величина пропускания уменьшается на 0.03 отн. ед.

Соответственно нужно стремиться к меньшим углам переходов, например за счет увеличения длины переходника. Так, при выборе угла стенки ФЗЗ переходника к его оси не более 19 град., что соответствует случаю переходника с входным 5.1 мкм и выходным 3.3 мкм радиусами, получаемая величина пропускания будет не менее 0.895 отн. ед. Приведенные на рис. 6 данные подтверждают, что обычный переходник имеет наименьшую величину пропускания для рабочей длины волны, а для ФЗЗ переходника характерно наибольшее пропускание.

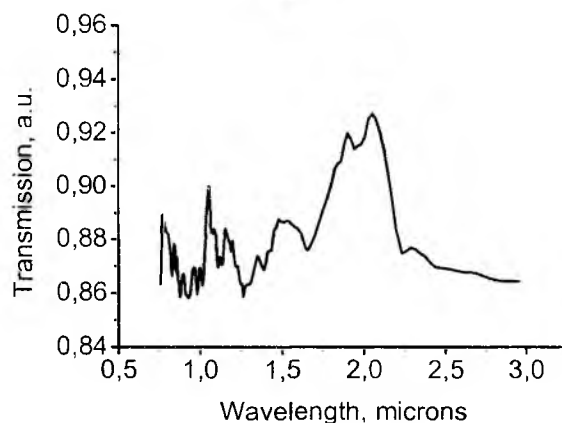
Выводы

Таким образом, в представленной работе были исследованы три типа переходников с разными входными радиусами: обычный волоконно-оптический переходник между волноводами с различными диаметрами, волноводные ФК и ФЗЗ переходники.

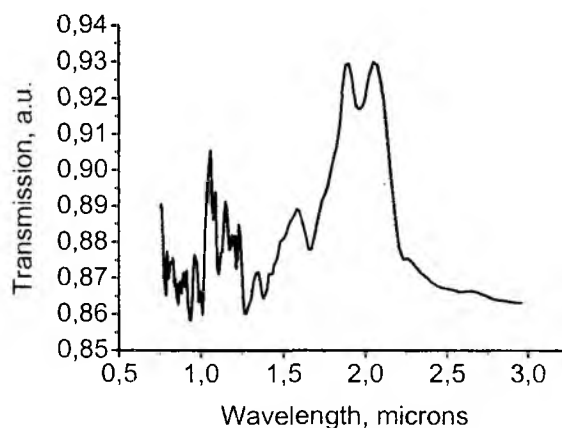
Полученные результаты численного исследования показывают, что увеличение угла перехода всех типов переходников приводит к уменьшению величины пропускания и, соответственно, к увеличению потерь излучения в переходнике.



а



б



с

Рис. 5

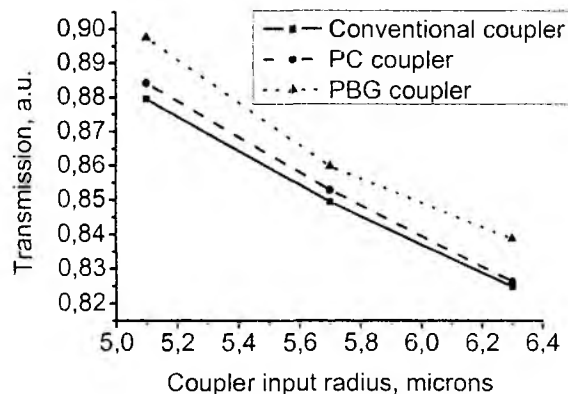


Рис. 6

Возрастание входного радиуса переходника на 0.6 мкм, при неизменных остальных параметрах, приводит к уменьшению пропускания на 0.03 отн. ед.

Преимуществом ФЗЗ переходника является наибольшее пропускание по сравнению с обычными и ФК переходниками (порядка 0.9 отн. ед. для длины волны 1.55 мкм), но в то же время для этого типа переходника характерно значительное искажение формы моды.

Было показано, что для того чтобы ФЗЗ переходник, который имеет наибольшее пропускание, имел эффективность прохождения оптической моды не ниже 90 %, угол такого переходника должен быть не больше 19 град.

Поэтому, при соединениях волокон с волокнами и с другими интегральными устройствами целесообразно использовать именно ФЗЗ переходники, так как они обеспечивают наибольшее пропускание при малой длине переходника. Но в то же время необходимо оптимизировать параметры такого переходника для уменьшения вносимых ним искажений оптической моды.

Список литературы: 1. *G. E. Town and J. T. Lizier.* Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion. *Optics Letters*, 2001, vol. 26, № 14. С. 1042-1044. 2. *J. K. Chandalia, B. J. Eggleton, R. S. Windeler, S. G. Kosinski, X. Liu, C. Xu.* Adiabatic Coupling in Tapered Air-Silica Microstructured Optical Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, № 1, January. С. 52-54. 3. *A. Talneau, Ph. Lalanne, M. Agio, C. M. Soukoulis.* Low-reflection photonic-crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, № 17, September 1. С. 1522-1524. 4. *Charles Kerbage, Benjamin J. Eggleton.* Microstructured Optical Fibers: For Integrated, Tunability of Photonic Devices. *Optics & Photonics News Optics*, 2002, September. С. 38-42. 5. *I.A. Sukhoivanov, A.V. Dyogtyev, P.S. Ivanov, J.A. Andrade-Lucio.* Tapered holey fiber and PBG couplers for optical integration. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5597, С. 109-117. 6. *P.S. Ivanov, I.V. Guryev, A.V. Dyogtyev, A.V. Kublik, I.A. Sukhoivanov.* Modified effective-index model for study of optical components made by defect in two-dimensional photonic crystal. *SPIE proceedings*, vol. 5582. 7. *R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla, S. Helfert.* Numerical Techniques for Modeling Guided-Wave Photonic Devices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, vol. 6, № 1, January/February. С. 150-162. 8. *A. R. Weily, L. Horvath, K. P. Esselle, B. C. Sanders.* Performance of PML absorbing boundary conditions in 3D photonic crystal waveguides. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, vol. 40, № 1, January 5. С. 1-3.

Харьковский национальный
университет радиотехники

Поступила в редколлегию 06.08.2007