

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВАРКИ НА ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

### Характеристика проблемы и анализ публикаций, посвященных ее решению

В современном обществе с каждым днем требуется передавать все большие объемы информации на огромные расстояния с максимально возможной скоростью. При этом важным параметром магистральных линий является длина регенерационного участка.

Для ВОСП основным фактором, ограничивающим длину регенерационного участка, является не затухание, а вносимая оптическим кабелем и компонентами хроматическая дисперсия. В процессе распространения оптических импульсов вследствие хроматической дисперсии они увеличиваются по длительности. Если длительность оптических импульсов становится больше, чем длительность тактового интервала цифровых сигналов, возникают ошибки при передаче информации.

Для увеличения длины регенерационного участка требуется применение компенсации хроматической дисперсии, что влечет за собой необходимость увеличения коэффициента усиления оптических усилителей, поскольку компенсаторы дисперсии вносят большое затухание. Увеличение количества оптических усилителей кроме наращивания шумов приводит также и к дополнительной хроматической дисперсии. Из сказанного очевидна необходимость учета хроматической дисперсии, вносимой каждым элементом ВОСП.

Расчет приведенной к единице длины и единице полосы длин волн источника излучения хроматической дисперсии оптической линии передачи производится по формуле [6-9]

$$D = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot c} \left[ \lambda^2 \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} + 2\lambda \frac{d\beta}{d\lambda} \right], \quad (1)$$

где  $D$  – хроматическая дисперсия;  $\beta$  – постоянная распространения оптического волновода;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны.

Для расчета постоянной распространения  $\beta$  использованы известные выражения [6-8]:

$$\beta^2 = \frac{1}{a^2} \left( \frac{V^2}{2\Delta} - U^2 \right), \quad (2)$$

где

$$V = k \cdot a \cdot n_0 (2\Delta)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_1^2}{2n_0^2}, \quad (4)$$

$V$  – нормированная частота;  $\Delta$  – высота профиля;  $n_0$  – значения показателя преломления на оси волокна;  $n_1$  – значение показателя преломления оболочки;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число в свободном пространстве.

Для расчета спектральных характеристик постоянной распространения и ее производных использован метод приближения Гаусса и его модификаций для произвольного профиля показателя преломления.

Метод основан на аппроксимации радиальной зависимости поля основной моды функцией Гауса:

$$F_0(R) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{R_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $R = a/r$  – приведенный радиус;  $R_0$  – приведенный эквивалентный радиус пятна моды;

Для определения эквивалентного радиуса пятна моды необходимо решить вариационное уравнение

$$\frac{dU^2}{dR_0} = 0. \quad (6)$$

В случае приближения Гаусса параметр основной моды определяется выражением [6-8]

$$U^2 = \frac{2}{R_0^2} \int_0^\infty \left( \left[ \frac{dF_0(R)}{dR} \right]^2 + V^2 \cdot f(R) \cdot [F_0(R)]^2 \right) \cdot R dR. \quad (7)$$

Здесь  $f(R)$  – функция, задающая профиль показателя преломления, который описывается формулой

$$n^2(R) = n_0^2 \cdot [1 - 2\Delta \cdot f(R)]. \quad (8)$$

Данная формула позволяет рассчитывать дисперсию не только для стандартных форм профилей, но и для профиля произвольной формы. Это позволяет математически моделировать изменения, получаемые при сварке оптических волокон. Для произвольного профиля показателя преломления можно использовать аппроксимацию

$$f(R) = h_p, p \cdot \Delta R \leq R < (p+1) \cdot \Delta R, p = 0, 1, \dots, m, \quad (9)$$

где  $m$  – число узлов сетки.

### Постановка задачи

Цель данной работы – исследование степени влияния сварки дисперсионно-модифицированных ОВ, используемых в магистральных ВОСП, на ППП, а следовательно, и на величину вызываемой этим изменением дисперсии. Необходимо исследовать, как различные режимы сварки изменяют ППП волокна и выдвинуть на основании этих исследований требования к сварке, позволяющие достигнуть увеличения дисперсии не выше заданных пределов [1-5].

Задачи данной работы:

- исследование зависимости дисперсии дисперсионно-модифицированных ОВ от формы ППП;
- моделирование кусочно-нерегулярных ОВ, имитирующих сварное соединение и расчет дисперсии в них;
- анализ полученных результатов и формирование требований к допустимым изменениям профиля показателя преломления при сварке.

На сегодняшний день вопрос о влиянии соединения оптических волокон на дисперсию остается неизученным. При соединении учитывают в основном вносимое затухание и механическую прочность. Однако очевидно, что при сварке изменяется профиль преломления ОВ. Особенно сильные искажения профиля возникают при сварке ОВ со сложной структурой и соответственно сложными ППП, а именно данные волокна используются в сетях, в которых скорость передачи имеет важное значение. На рис. 1 представлены волокна, ППП которых наиболее искажаются при сварке.

В данной работе исследуются соединения дисперсионно модифицированных ОВ с точки зрения именно дисперсии. Данный анализ проводится на основе математического моделирования изменений характеристик оптического волокна в месте сварки с учетом возможных изменений профиля показателя преломления при сварке. После расчета в полученном волокне дисперсии проводится анализ, на основе которого выявляется степень влияния искажения профиля на величину дисперсии. На основе полученных данных можно вывести рекомендации о предпочтительных режимах сварки, позволяющих не превышать заданное изменение профиля.

Для достижения поставленной задачи необходимо предварительно решить некоторые подзадачи:

- вывод математического уравнения, учитывающего зависимость показателя преломления от радиуса оптического волокна, для моделирования произвольного профиля;

– определение, как сварка может повлиять на профиль показателя преломления дисперсионно-модифицированного оптического волокна;

- выбор метода вычисления дисперсии, при котором учитывается ППП и возможно моделировать данный ППП произвольно;
- формирование различных ОВ со сложными ППП;
- моделирование с помощью средств ЭВМ изменения сформированных профилей;
- расчет дисперсии, вносимой смоделированным изменением;
- анализ полученных результатов;
- выводы и рекомендации.

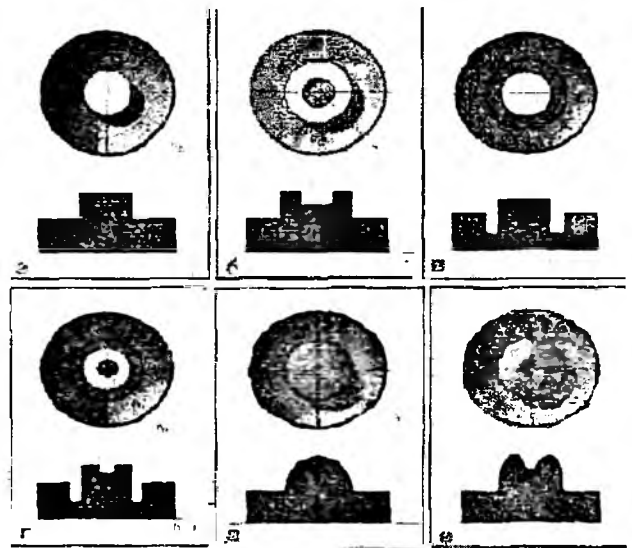


Рис. 1

### Алгоритм исследований

Обобщенный алгоритм исследования влияния сварного соединения дисперсионно-модифицированного ОВ на степень изменения дисперсии можно представить в следующем виде:

- графическое представление ППП исследуемого ОВ;
- построение ППП, получаемого в результате большой степени сглаживания исходного волокна;
- определение приведенного радиуса;
- выбор шага аппроксимации;
- математическая запись построенных профилей;
- расчет дисперсии ОВ для каждого случая:
  - 1) расчет высоты профиля;
  - 2) получение функции профиля показателя преломления;
  - 3) расчет нормированной частоты;
  - 4) определение эквивалентного радиуса пятна моды;
  - 5) расчет параметра моды  $U$ ;
  - 6) определение постоянной распространения;
  - 7) нахождение дисперсии;
- анализ полученных результатов.

Алгоритм данного процесса изображен на рис. 2.

### Результаты исследований

Для разработки математической модели исследуемых профилей, прежде всего, необходимо разработать графические модели, при этом количество этих моделей должно быть достаточным для обеспечения наиболее полной картины исследования. Разрабатываемые профили должны иметь достаточно широкий диапазон изменения всех своих основных параметров, таких как: высота профиля, диаметр сердцевинки –  $2a$ , диаметр оболочки –  $2b$ , глубина провала ПП промежуточной оболочки, крутизна профиля.

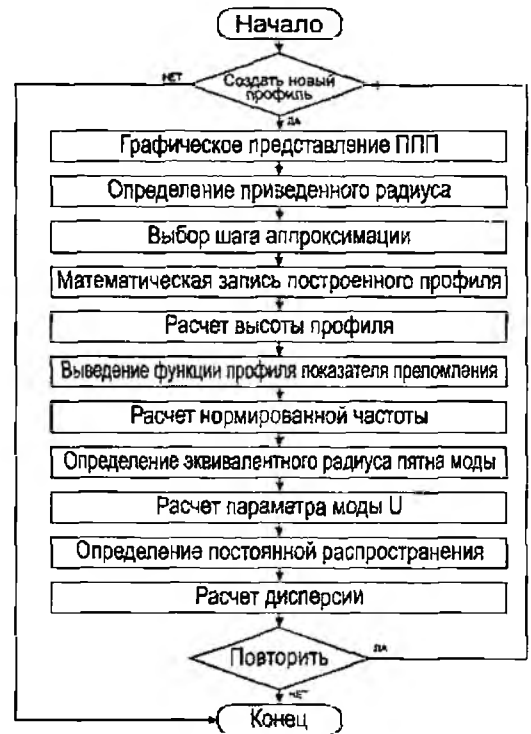


Рис. 2

Для математического описания профилей используется ступенчатая аппроксимация, благодаря которой возможна математическая запись произвольной формы профиля любой сложности.

При разработке математической модели формы профиля выбираются исходя из следующих предположений: начальная форма профиля выбирается произвольно (учитывая изложенные требования), затем разрабатывается математическая модель ППП, полученного из исходного путем незначительного сглаживания и расширения (что характерно для изменения ППП в непосредственной близости от сварного соединения). Последняя модификация исходного профиля, ожидаемая в самом месте сварки, имеет сильную степень сглаживания и расширения, максимально приближающую исходный профиль к форме нормального распределения.

Для анализа было разработано семь исходных профилей. Каждый исходный профиль представляет собой ППП свариваемого ОВ до искажения. По каждому ППП реализовано три модификации: исходный ППП  $n1(r)$ , ППП измененный незначительно  $n2(r)$  и ППП с сильной степенью изменения, приближенный к распределению Гаусса  $n3(r)$ .

Пример одного из разработанных ППП представлен на рис. 3.

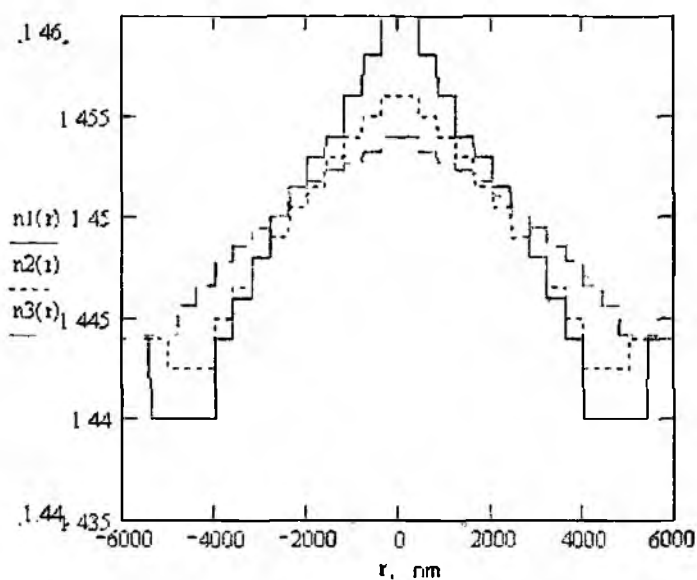


Рис. 3

$$k = 2\pi/\lambda = 2 \cdot 3.14/1550 = 4.054 \cdot 10^{-3} \text{ (1/нм)}.$$

По формулам (3) и (4) рассчитывается нормированная частота и высота профиля исследуемого волокна.

Следующим шагом нахождения дисперсии является вывод функции, задающей профиль показателя преломления. Эта функция определяется из выражения (9) для каждого исследуемого профиля.

После этого подстановкой выражений (5) и (7) в уравнение (6) находятся приведенные эквивалентные радиусы пятна моды для каждого исследуемого волокна

Следующим этапом является нахождение параметра моды  $U$ .

По полученным данным с помощью (2) определяется постоянная распространения. Дисперсия исследуемых ОВ рассчитывается по формуле (1).

На основе описанного алгоритма определены зависимости дисперсии от различных факторов изменения ППП: высоты профиля, радиуса сердцевинки, глубины промежуточной оболочечки и ее ширины.

Для определения точной зависимости учитывались изменения, вызываемые факторами в отдельности.

Математическое описание ППП осуществлялось в математической среде Mathcad.

Шаг аппроксимации у всех ППП  $\Delta r = 0,4 \cdot 10^3$  мкм.

Математическое описание ППП является основой для определения функции профиля, которая, в свою очередь, позволяет рассчитать изменение дисперсии при заданном искажении ППП.

Расчет дисперсии начинается с нахождения волнового числа в свободном пространстве. Данная величина одинакова для всех исследуемых волокон, так как зависит только от длины волны, которая одинакова для всех волокон и равна 1550 нм

Рассмотрим зависимость дисперсии от высоты профиля. Зависимость определялась при следующих исходных данных: радиус сердцевины – 3 мкм, ширина промежуточного слоя 2 мкм, глубина – 0.0025. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и рис. 4.

Оценим зависимость дисперсии от радиуса сердцевины. Результаты расчетов (при высоте профиля 0,48%) приведены в табл. 2 и рис. 5.

Таблица 1

$\Delta, \%$	$R_0$	$V$	$U$	$\beta, \text{рад/км}$	$D, \text{пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$
1,1	1,437	2,621	1,073	5,908	-4,817
0,96	1,452	2,451	0,94	5,902	-4,744
0,82	1,473	2,295	0,89	5,897	-4,603
0,75	1,494	2,172	0,802	5,892	-4,489
0,69	1,507	2,07	0,739	5,889	-4,417
0,62	1,517	1,964	0,729	5,885	-4,359

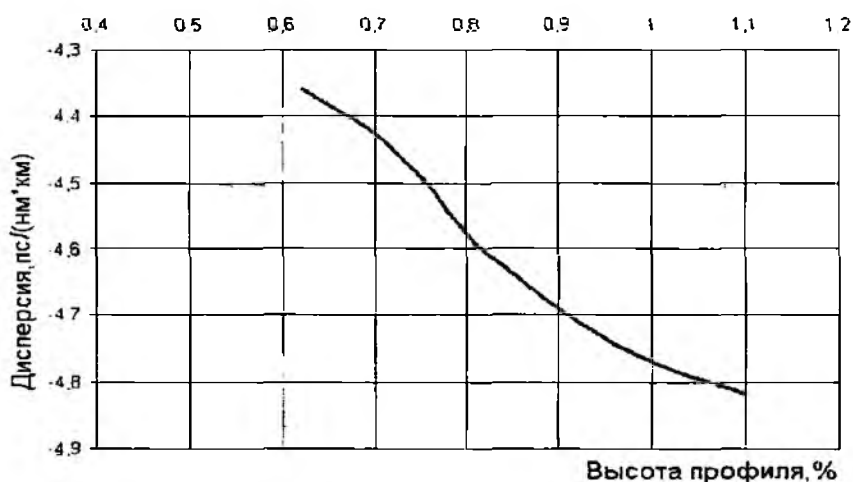


Рис. 4

Исследуем зависимость дисперсии от ширины промежуточного слоя  $t$ . Зависимость определялась при следующих исходных данных: радиус сердцевины – 3,5 мкм, высота профиля 0,48%, глубина промежуточного слоя – 0,004. Результаты расчетов приведены в табл. 3 и рис. 6.

Рассмотрим зависимость дисперсии от глубины промежуточного слоя  $x$ . Зависимость определялась при следующих исходных данных: радиус сердцевины – 3 мкм, высота профиля 0,48%, ширина промежуточного слоя – 2 мкм. Результаты расчетов приведены в табл. 4 и рис. 7.

Из полученных результатов видно, что при соединении дисперсионно модифицированных ОВ методом сварки при значительном изменении ППП дисперсия ОВ изменяется в пределах 2 пс/(нм\*км). Учитывая, что данное изменение профиля волокна происходит на отрезке длиной приблизительно 1 см, вносимое изменение будет составлять в среднем  $10^{-5}$  пс.

Таблица 2

$a, \text{мкм}$	$R_0$	$V$	$U$	$\beta, \text{рад/км}$	$D, \text{пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$
2,5	1,326	1,443	0,754	5,874	-8,24
3	1,408	1,731	0,71	5,877	-5,067
3,5	1,487	2,02	0,672	5,879	-3,335
4	1,564	2,308	0,639	5,88	-2,307
4,5	1,64	2,597	0,61	5,88	-1,657
5	1,714	2,885	0,583	5,881	-1,229

Для исследуемых волокон дисперсия уменьшается. Такое изменение может объясняться увеличением волноводной составляющей и снижением материальной.

Учитывая рекомендации по изготовлению дисперсионно модифицированных волокон, в которых допускается дисперсия порядка  $0,1 - 6 \text{ пс/нм}^2\text{км}$ , изменения, вызванные сваркой, не вносят изменений, нарушающих данные требования. Это позволяет не учитывать данную характеристику при сварке, т.к. она не оказывает ощутимого влияния на волоконно-оптическую линию в целом.

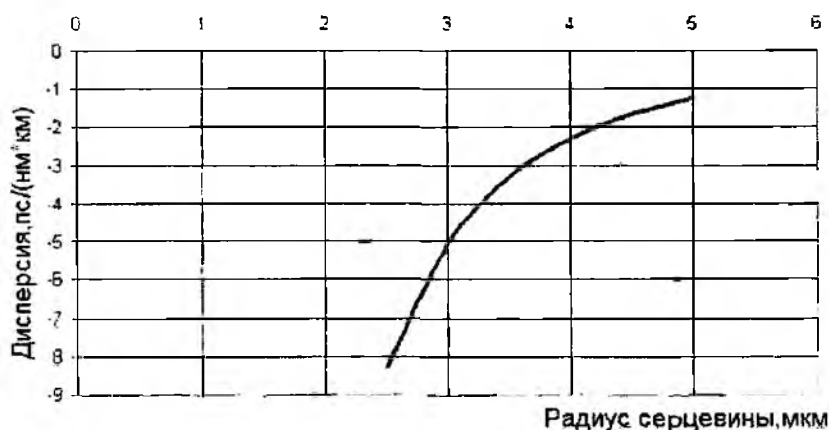


Рис. 5

Таблица 3

$r, \mu\text{м}$	$R_0$	$V$	$U$	$\beta, \text{рад/км}$	$D, \text{пс/нм}^2\text{км}$
0,5	1,287	1,443	0,777	5,874	-3,919
1	1,266	1,443	0,79	5,873	-4,006
1,5	1,262	1,443	0,792	5,873	-4,006
2	1,269	1,443	0,788	5,873	-3,942
2,5	1,284	1,443	0,779	5,847	-3,84

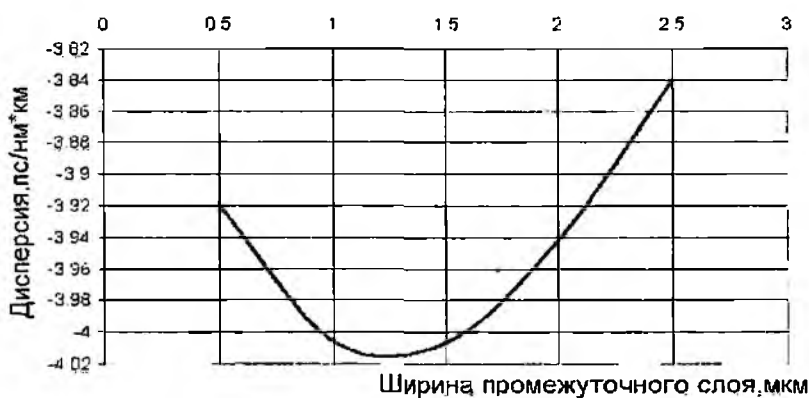


Рис. 6

## Выводы

Исследовано влияние сварного соединения оптических волокон на дисперсионные характеристики оптического волокна, используемого при построении высокоскоростных ВОЛС, на примере одномодового волокна со смещенной ненулевой дисперсией.

Предложена модель, позволяющая исследовать вносимое сварным соединением увеличение дисперсии и искажение дисперсионной характеристики. Синтезирован алгоритм расчета дисперсии, учитывающий любые изменения профиля показателя преломления.

Уже на первом этапе анализа видно, что даже при идеальной стыковке ОВ ППЦ в месте сварки значительно изменяется по различным параметрам, таким как высота профиля, радиус сердцевин, ширина промежуточной оболочки, ее глубина и др.

Таблица 4

X	R <sub>0</sub>	V	U	$\beta$ , рад/км	D, пс/(нм*км)
0,004	1,269	2,02	0,788	5,878	-4,582
0,003	1,28	2,02	0,781	5,878	-4,504
0,002	1,293	2,02	0,773	5,878	-4,413
0,001	1,308	2,02	0,765	5,878	-4,313
0,0005	1,317	2,02	0,759	5,878	-4,254

По разработанному алгоритму произведены расчеты дисперсии, возникающей при сварке дисперсионно-модифицированных волокон с различными исходными профилями.

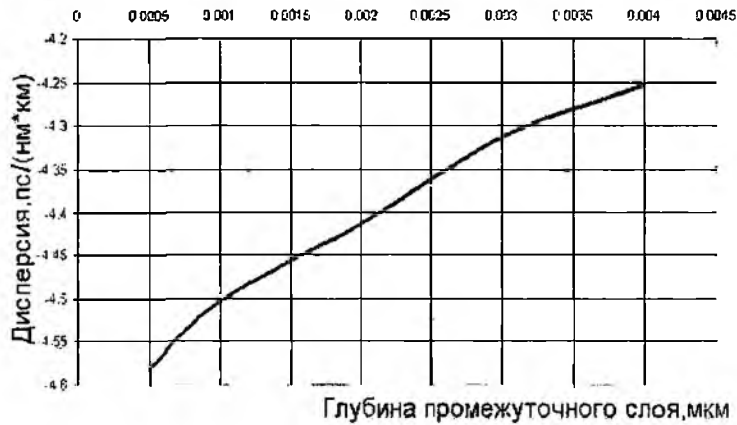


Рис. 7

По полученным результатам построены графики, показывающие зависимость дисперсии от каждого изменяющегося параметра профиля.

В результате исследования различных моделей соединения ОВ, построенных по данному методу, выявлено, что вносимая сварным соединением дисперсия составляет в среднем  $10^{-5}$  пс. Данная величина является пренебрежительно малой даже для магистральных ВОЛС, что позволяет не учитывать ее, т.к. она не влияет на скорость передачи информации и длину регенерационного участка.

**Список литературы:** 1. Высококачественная сварка оптических волокон // Технические заметки. 2001. №3. С. 12-17. 2. Каток В., Ковтун А., Руденко И. Оптоволоконно: неразъемные соединения // Сети и телекоммуникации. 2005. С. 23-27. 3. Питерских С.Э. Влияние технологических процессов производства на свойства оптических волокон, определяющие оптические потери в сварных соединениях // Электросвязь. 2003. №2. С. 27-31. 4. Питерских С.Э. Влияние внутренних и внешних факторов на потери в сварных соединениях одномодовых ОВ // Электросвязь. 2003. №7. С. 30-33. 5. Питерских С.Э., Трещиков В.Н. Исследование качества сварных соединений оптических волокон различного происхождения // Электросвязь 2004. №1. С. 49-51. 6. Беланов А.С., Кривенков В.И., Коломийцева Е.А. Расчет дисперсии в световодах со сложным профилем показателя преломления // Радиотехника. 1998. № 3. С. 32-35. 7. Андреев Р.В., Пропорциков Д.Е. Анализ зависимостей параметров хроматической дисперсии круглых слабонаправляющих оптических волокон от профиля показателя преломления // Оптоэлектроника и волоконно-оптические устройства. 60-я науч. сессия, посвященная Дню радио, 17-19 мая 2005. 8. Hoang Yan Lin, Ruey-Beei Wu. An efficient algorithm for determining the dispersion characteristics of single-mode optical fibers // J. Lightwave Technology Aug. 1999. Vol. 10. P. 705-711.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 01.02.200