

УДК 681.7.068

С.А. Капустин¹, В.А. Малахов¹, Г.С. Малышев², А.С. Раевский¹**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ДИСПЕРСИИ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА
НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АО «ОКБМ Африкантов»²

Изложена методика расчета коэффициента дисперсии на основе результатов измерения профиля показателя преломления заготовки на установке Р-102 в лаборатории технологии волоконных световодов в ИХВВ им. Г.Г. Девярых (РАН). Данные заготовки выполнены методом химического осаждения внутри опорной кварцевой трубки (MCVD-метод).

Ключевые слова: волоконный световод, профиль показателя преломления, заготовка волоконного световода, дисперсионный параметр.

Введение

Для систем волоконно-оптической связи со спектральным уплотнением каналов необходимы волоконные световоды (ВС) с точно определенным значением величины дисперсии в заданном диапазоне длин волн, включая значения, близкие к нулю [1]. Максимально обеспечить выполнение этих условий можно только в световодах с достаточно сложным профилем показателя преломления (ППП) [2]. Приближенное представление дисперсии в таких световодах в виде суммы материальной и волноводной приводит к существенным погрешностям. Чтобы этого избежать, необходимо уже на начальном этапе решения уравнений Максвелла учитывать зависимость ППП световода от длины волны.

Теоретическая часть

Одной из наиболее важных характеристик одномодовых световодов является дисперсионный параметр β_2 [3], определяемый как

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}. \quad (1)$$

где $\beta(\omega)$ – это продольное волновое число основной волны HE_{11} (находится при решении дисперсионного уравнения волн ВС). Параметр β_2 имеет размерность $[\text{пс}^2/\text{км}]$.

Принцип получения дисперсионного уравнения волн градиентного ВС изложен в работе [4], в которой после ряда преобразований удалось представить дисперсионное уравнение в виде равенства нулю определителя второго порядка. Для представления составляющих поля во всех слоях этого световода, за исключением первого и последнего, вместо стандартной комбинации функций Бесселя и Неймана использовалась другая их комбинация, что позволило представить составляющие поля в виде степенных рядов с высокой скоростью сходимости.

По указанному алгоритму была написана программа на языке программирования C++ в среде MS Visual Studio, позволяющая вычислять дисперсионные характеристики волн и коэффициент дисперсии волоконных световодов с произвольным законом изменения концентрации легирующих добавок от радиальной координаты (с произвольным ППП). При этом на каждом шаге нахождения корней дисперсионного уравнения в аппроксимирующих слоях поперечного сечения световода учитывалась зависимость показателей преломления

этих слоев от длины волны. С использованием данной программы были рассчитаны дисперсионные характеристики для заготовок, полученных в лаборатории технологии волоконных световодов Института химии высокочистых веществ РАН.

Профиль показателя преломления в сечении заготовки измерялся при помощи анализатора заготовок Р-102 фирмы York Technology (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид анализатора заготовок Р-102 фирмы York Technology для измерения профиля показателя преломления кварцевых заготовок

Принцип определения показателя преломления основан на явлении отклонения оптического луча в средах с неоднородной оптической плотностью. Блок-схема оптической части установки Р-102 приведена на рис. 2. На рис. 3 показан внешний вид измерительной ячейки. Луч от He-Ne лазера с рабочей длиной волны 0,63 мкм после поворотного зеркала и входной оптической системы пересекает преформу. Чтобы свести к минимуму влияние формы оболочки на ввод луча, преформа в зоне измерений помещается в прямоугольную кювету, заполненную иммерсионной жидкостью, имеющей показатель преломления такой же, как оболочка волоконного световода. В результате отличия оптической плотности сердцевины преформы от оболочки образуется цилиндрическая линза, которая отклоняет луч. Пройдя измерительный объектив, измеритель отклонений, поворотное зеркало, луч через собирающую цилиндрическую линзу попадает в детектор луча.

Измеритель отклонений содержит модулятор, оптодатчик и счетчик. При прохождении края модулятора через стартовый датчик счетчик (на рис. 2 не показан) начинает считать импульсы со стабильного генератора, а при пересечении луча счет останавливается. При изменении позиции луча меняется время, а значит и число отсчетов. Таким образом, при перемещении кюветы с преформой прописывается функция отклонения. Далее программа пересчитывает ее с учетом перемещения в функцию отклонения оптической плотности (профиль показателя преломления).

Установка Р-102 позволяет перемещать заготовку в направлении, перпендикулярном оси заготовки, с шагом от 5 до 400 мкм. Точность определения абсолютной величины показателя преломления не хуже $5 \cdot 10^{-4}$.

При перетягивании заготовки в волоконный световод изменения профиля показателя преломления практически не наблюдается. Поэтому есть все основания считать, что профиль

показателя преломления, измеренный в сечении заготовки, характеризует и профиль показателя преломления в световоде. Следует лишь учитывать пропорциональное изменение всех геометрических размеров в соответствии с коэффициентом перетяжки полученной заготовки в световод.

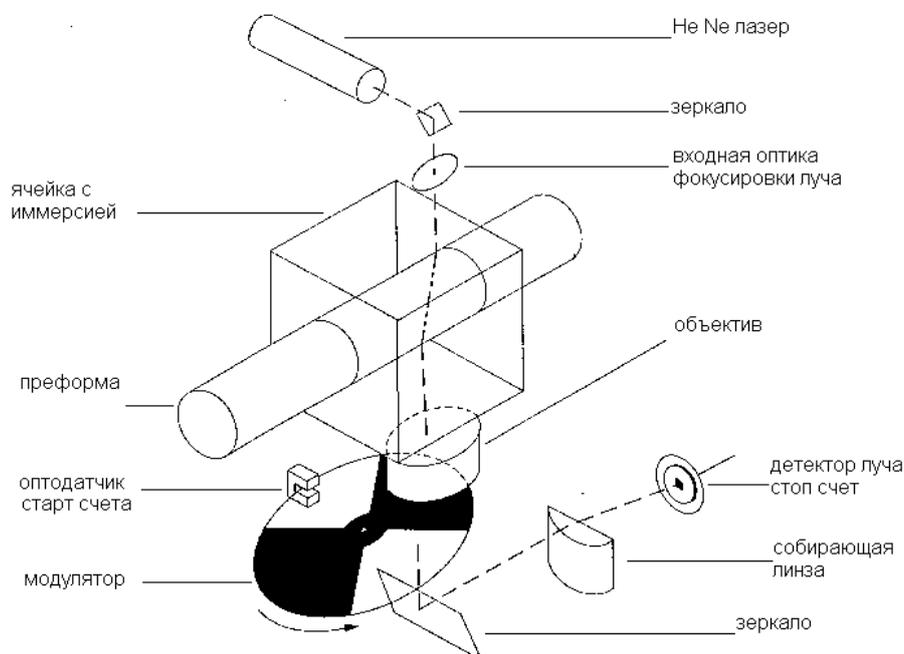


Рис. 2. Блок-схема оптической части установки Р-102



Рис. 3. Измерительная ячейка анализатора заготовок Р-102

К сожалению, нельзя создать универсальный алгоритм, пригодный для расчета параметра дисперсии ВС с произвольным ППП. Дело в том, что при вычислениях необходимо знать функциональную зависимость $n(c, \lambda)$ показателя преломления от длины волны и концентрации легирующей добавки. В большинстве же случаев возможно определить зна-

чение показателя преломления лишь для *фиксированного* значения концентрации легирующей добавки.

В современном производстве ВС широко распространено использование в качестве легирующей добавки оксида германия. Существуют работы [5], где приведены выражения, позволяющие определять показатель преломления для *произвольного* значения концентрации оксида германия в кварцевом стекле. Поэтому в данной работе проводились исследования заготовок, легированных оксидом германия.

Экспериментальная часть

На рис. 4 приведен пользовательский интерфейс программы, в которой реализован описанный метод расчёта интегральных характеристик волоконного световода: дисперсионной характеристики и спектральной зависимости коэффициента дисперсии для данного ВС. Анализ большого массива данных, полученных в результате измерений, позволил выделить три наиболее типичных профиля. Они изображены на рис. 5.

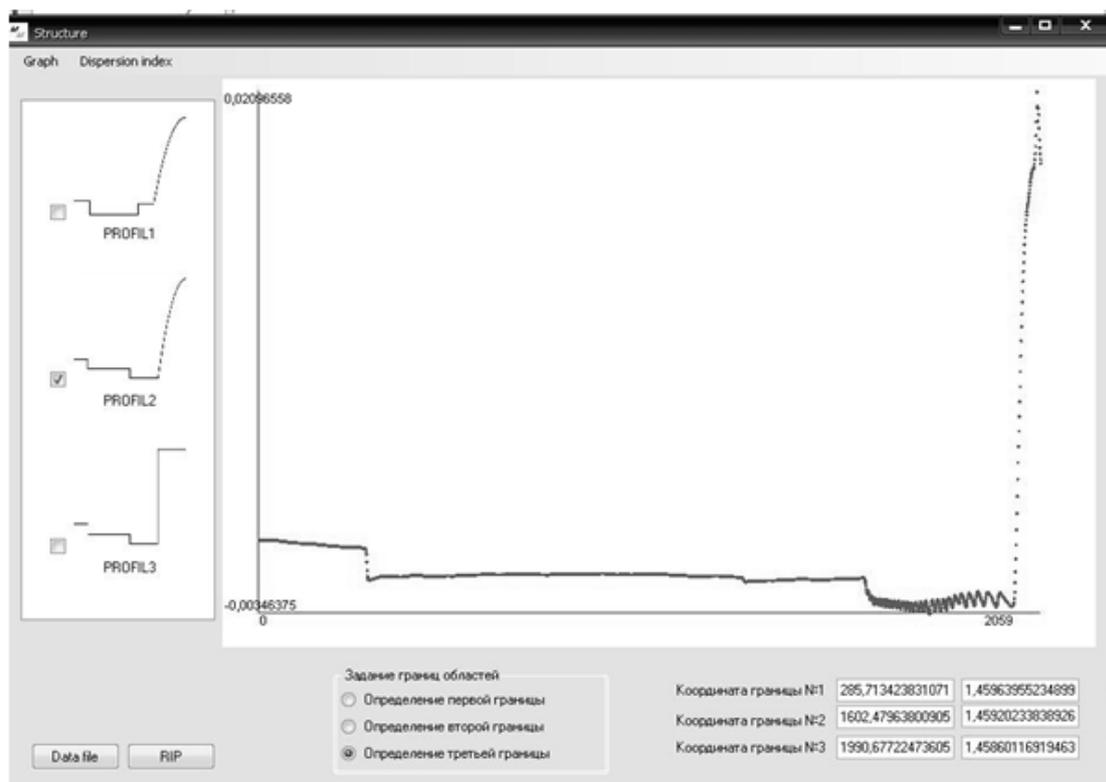


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы расчета коэффициента дисперсии

Для точного расчета коэффициента дисперсии необходим учет дисперсии материала [6]. Во всех трех случаях исследовались заготовки из кварцевого стекла, легированного оксидом германия. Внешняя оболочка преформы изготавливалась из чистого кварца. При нажатии на кнопку «Data file» открывается окно диалога, с помощью которого пользователь может выбрать файл с данными, полученными с помощью установки P-102. После этого происходит считывание данных из файла и построение ППП в графическом окне. Пользователь сравнивает построенную зависимость с одним из трех видов структур, отображенных слева от графического окна. По результатам сравнения устанавливается галочка напротив подходящего профиля. Запуск на расчет дисперсионных характеристик и коэффициентов дисперсии производится кнопкой «RIP». Все полученные в результате вычислений данные сохраняются в отдельных файлах.

Данная программа может быть использована для расчёта интегральных характеристик

световодов с произвольными значениями концентраций оксида германия в каждом из слоев приведенных структур. При этом геометрические соотношения между размерами слоёв могут быть произвольными.

Остановимся подробнее на процессе обработки экспериментальных данных, считанных из файла. Алгоритм основан на методе многоступенчатой аппроксимации реального профиля, поэтому важной задачей являлось выделение из всего массива данных только тех, которые будут непосредственно обрабатываться в программе. Первоначально следует выделить те участки ППП, в пределах которых показатель преломления либо постоянен, либо градиентно изменяется, зафиксировать их геометрические размеры. Для этого численно фиксировались все резкие перепады в пределах экспериментально измеренного профиля. Координаты этих перепадов выводятся в текст – боксы «координата границы» (рис. 4). Пользователь также может ввести координаты границ областей вручную. Для этого в групп-боксе «задание границ областей» пользователь устанавливает одну из радиокнопок определения границ (рис. 4), после чего щелкает мышью на соответствующий резкий перепад профиля, выведенного в графическом окне. И так для каждого перепада.

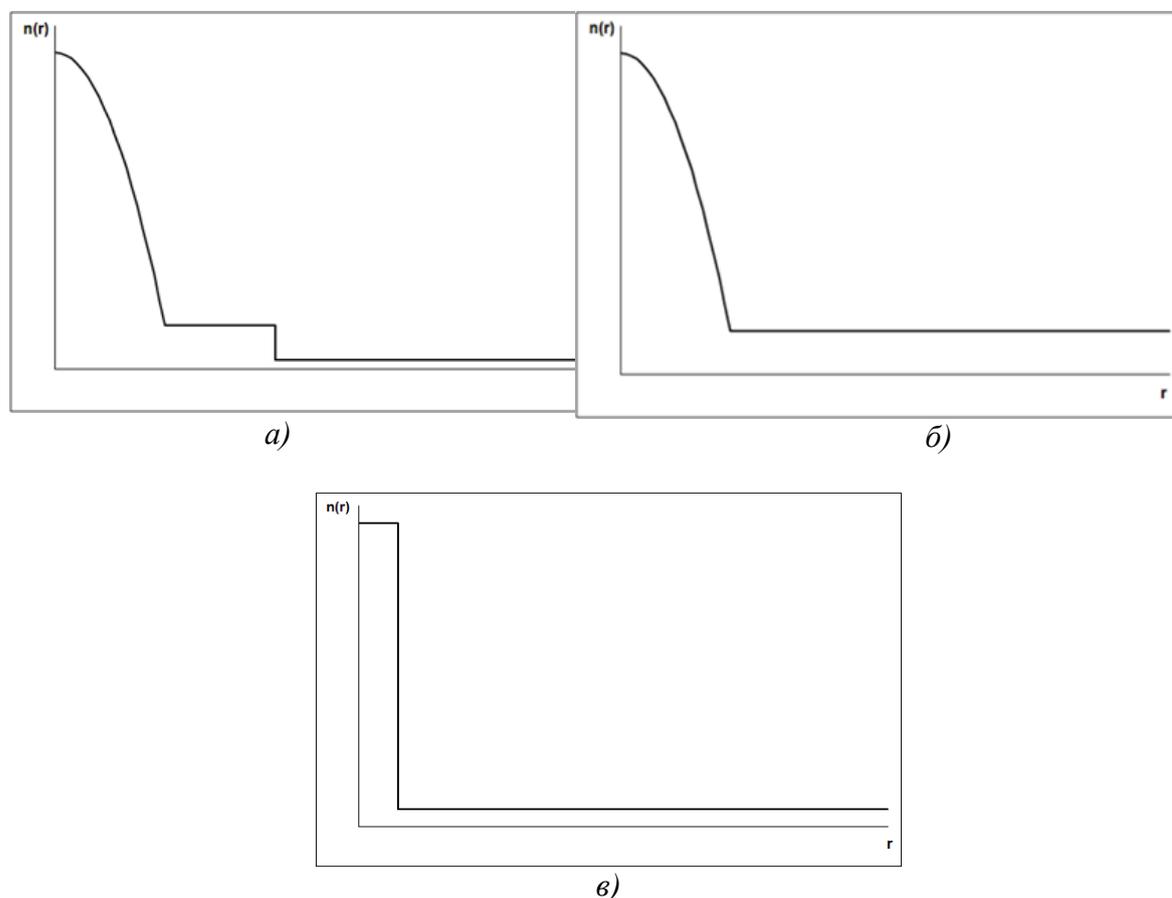


Рис. 5. Наиболее типичные профили показателей преломления волоконных световодов

Из рис. 4 хорошо видно, что те участки ППП, которые в идеале должны иметь неизменный по радиальной координате показатель преломления, в реальности таковым не обладают, что связано с несовершенством технологического процесса изготовления заготовок. Поэтому в пределах данных участков необходимо было производить усреднение показателя преломления. Усреднённое значение и использовалось в процессе дальнейших вычислений.

Все три рассматриваемых типа ППП имеют своим последним слоем участок с повышенным показателем преломления (рис. 4). Этот участок соответствует иммерсионной жидкости, в которую была помещена заготовка ВС для проведения измерения ППП. Этот

участок не должен учитываться при расчете дисперсионной характеристики световода и спектральной зависимости коэффициента дисперсии.

Далее необходимо было убрать из рассмотрения все участки, показатель преломления которых ниже, чем у кварцевой оболочки. Дело в том, что легирование кварцевого стекла оксидом германия может приводить только к повышению показателя преломления. Понижение же показателя преломления возникает из-за добавления других видов легирующих добавок (например фтора), что связано с технологическими особенностями производства заготовок. Добавление понижающих добавок приводит к изменению температуры стеклования, вязкости и других параметров кварцевых стекол, что дает некоторые преимущества в процессе изготовления преформ. Однако в процессе вытяжки световода из заготовки данный провал в ППП фактически полностью исчезает, поэтому его можно не учитывать в процессе вычислений.

Размеры каждого выделенного слоя заготовки необходимо пересчитать в размеры слоев световода. Эти размеры определяются из простых соотношений

$$r_{N-1} = \frac{r'_{N-1}}{r'_N} 62,5; \quad r_{i-1} = \frac{r'_{i-1}}{r'_i} r_i; \quad i = 2, \dots, N-1,$$

где N – число аппроксимирующих слоев; r'_N и r'_{N-1} – радиус последнего и предпоследнего слоев (штрих соответствует размерам слоев заготовки); r_i и r_{i-1} – размеры слоев световода, соответствующие размерам r'_i и r'_{i-1} , считанным из файла. В нашем случае последним слоем является кварцевая оболочка. При получении дисперсионного уравнения волн волоконного световода полагается, что внешняя оболочка имеет бесконечные размеры, то есть $r'_N = \infty$, что совершенно оправдано, так как поле во внешней оболочке очень быстро затухает по радиальной координате. В приведенных выражениях учтено, что диаметры стандартных оптических волокон составляют 125 мкм, поэтому радиусы слоев световода вычисляются в микрометрах.

После аппроксимации ППП, считанного из файла, требуется определить концентрацию легирующей добавки в пределах каждого аппроксимирующего слоя. Для этого необходимо решить уравнения вида

$$n(c, \lambda) - n_i = 0, \quad (2)$$

где n_i – показатель преломления в аппроксимирующем слое с номером i ; λ – длина волны, на которой и производилось измерение ППП. Данное уравнение решается относительно концентрации c на длине волны $\lambda = 0,632$ мкм. Очевидно, что необходимо знать функциональную зависимость $n(c, \lambda)$ показателя преломления от длины волны и концентрации легирующей добавки. Эта зависимость дается выражением [6]

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + 0,01c(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [Sl_i + 0,01c(Gl_i - Sl_i)]^2}, \quad (3)$$

где SA_i , Sl_i , GA_i и Gl_i – так называемые коэффициенты Зельмеера (пределяются из табл. 1). Концентрация c задается в молярных процентах.

Таблица 1

Значения коэффициентов формулы Зельмеера

Состав стекла	Тип коэффициента	i		
		1	2	3
Чистый SiO ₂	SA _{<i>i</i>}	0.6961663	0.4079426	0.8974794
	Sl _{<i>i</i>}	0.0684043	0.1162414	9.896161
Чистый GeO ₂	GA _{<i>i</i>}	0.80686642	0.71815848	0.85416831
	Gl _{<i>i</i>}	0.068972606	0.15396605	11.841931

После определения радиусов всех аппроксимирующих слоев и концентрации легирующих добавок в каждом из них можно переходить к непосредственному вычислению дисперсионных характеристик.

Порядок проведения расчётов

Методика расчёта дисперсионных характеристик в случае учёта материальной дисперсии состоит в следующем:

1. Фиксируется некоторая длина волны, на которой будут находиться корни дисперсионного уравнения.

2. По известным значениям концентраций примесей c_i в каждом слое определяется показатель преломления в данном слое с номером i на фиксированной длине волны с использованием формул (2) и (3), а также данных табл. 1.

3. По известному значению показателя преломления n_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в каждом слое для фиксированной длины волны определяются нормированные поперечные волновые числа u_i на заданной частоте для каждого из слоёв по формуле

$$u_i = \sqrt{n_i^2 - n_e^2}, \quad \text{где } n_e = \beta/k_0, \quad k_0 = 2\pi/\lambda.$$

4. Производится решение дисперсионного уравнения. Задаётся шаг по n_e . На каждом шаге вычисляется выражение $u_i = \sqrt{n_i^2 - n_e^2}$, где $i = 1, 2, \dots, N$. Пределы изменения n_e определяются неравенством $n_N(\lambda) \leq n_e < n_1(\lambda)$. Вычислив на фиксированной частоте нормированные поперечные волновые числа u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) для всех слоёв, нужно перейти к поиску корней самого дисперсионного уравнения, двигаясь с шагом по n_e на заданной частоте.

5. Операции 1–4 повторяются для другого значения длины волны и т.д.

Для поиска дисперсионного параметра β_2 необходимо численное нахождение второй производной продольного волнового числа основной волны по формуле (1), для чего требуется получение решений дисперсионного уравнения волн волоконного световода с *очень высокой* точностью. Этот факт отмечался ранее другими исследователями [7]. Вторая производная функции $f(x)$ в точке x_0 вычисляется по формуле безразностного дифференцирования [8]

$$f_0'' = \frac{1}{h^2} [f_{-1} - 2f_0 + f_1] - \frac{h^2}{12} f^{\text{IV}}(\xi_2), \quad (4)$$

где $\xi_2 \approx x_0$; $f_0'' = f''(x_0)$; $f_{-1} = f(x_0 - h)$; $f_1 = f(x_0 + h)$; $f_0 = f(x_0)$.

То есть приближённо

$$f_0'' = \frac{1}{h^2} [f_{-1} - 2f_0 + f_1]. \quad (5)$$

Очевидно, чем меньше будет выбран шаг h , тем точнее определяемое по формуле (5) значение f_0'' . Однако, если при этом величину шага h выбрать слишком малой, то получится большая ошибка из-за вычитания двух близких величин, то есть $(f_{-1} - f_0)$ и $(f_1 - f_0)$. Поэтому для высокой точности вычислений необходимо как можно точнее определять значения f_{-1} , f_1 и f_0 .

Приведём пример, показывающий влияние точности вычисления значений f_{-1} , f_1 и f_0 на поведение второй производной, вычисляемой по формуле (5). Рассмотрим обычный ВС со ступенчатым ППП. Концентрация оксида германия в сердцевине радиусом 5 мм составляет $c = 6,205$ мол. %. Такой тип ППП относится к третьему типу (рис. 5, в).

Найдём зависимость $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$ от длины волны, пользуясь формулой (5). При этом величины f_{-1} , f_1 и f_0 будем вычислять с точностью до 10-го знака после запятой. Результат расчёта приведён на рис. 6, а. Далее проводим те же самые вычисления, но теперь находим f_{-1} , f_1 и f_0 с точностью до 15-го знака. Результат приведён на рис. 6, б.

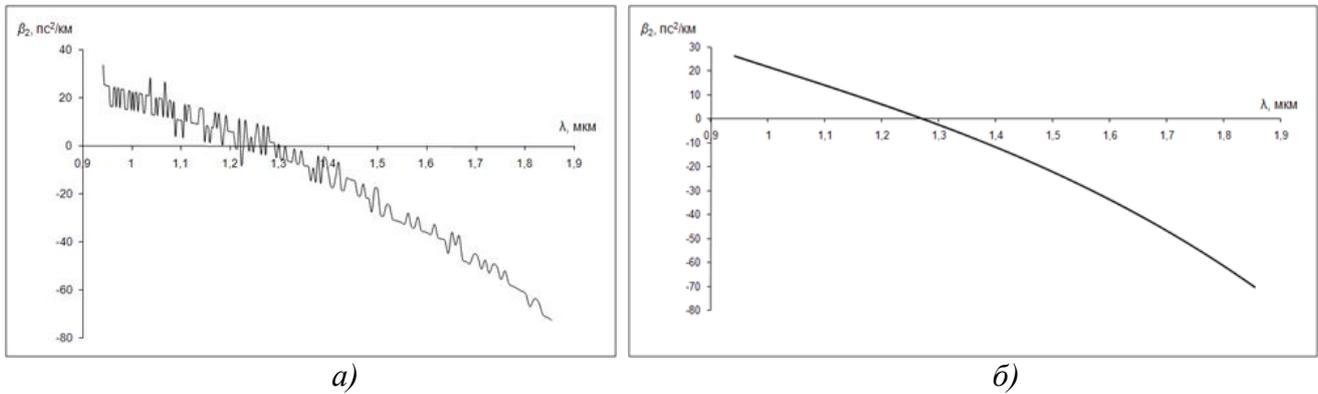


Рис. 6. Результаты расчета спектральной зависимости коэффициента дисперсии:
а – с точностью до 10-го знака; *б* – с точностью до 15-го знака

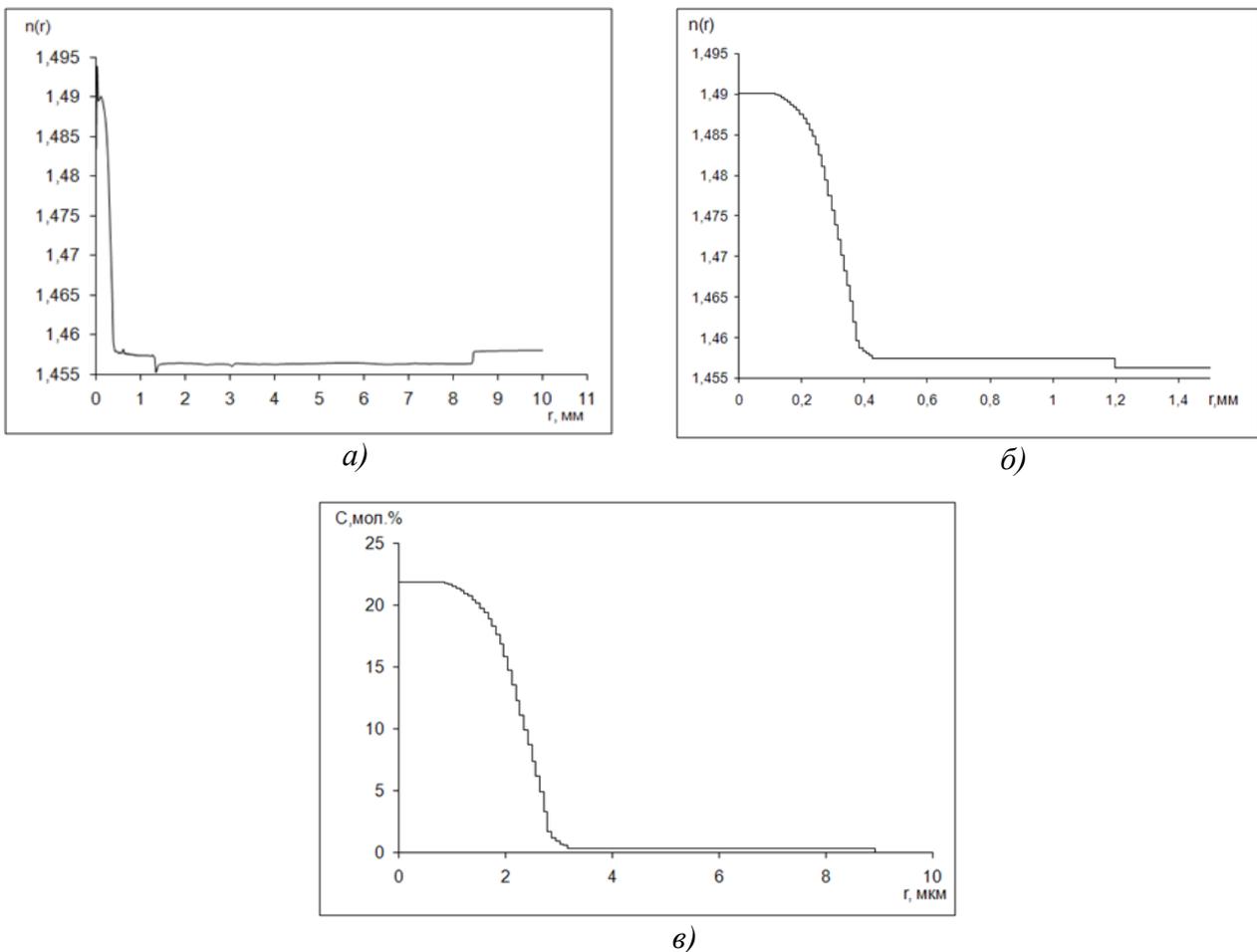


Рис. 7. Заготовка с ППП №1:

а – измеренный профиль показателя преломления; *б* – результат аппроксимации ППП; *в* – послойное распределение концентрации GeO_2 в световоде, вытянутом из заготовки

Сравнивая результаты, приведённые на рис. 6, а, б, можно сделать вывод о необходимости вычисления величин, входящих в формулу (5), с очень высокой точностью. Однако из формулы (4) видно, что оценить аналитически погрешность $\frac{h^2}{12} f^{IV}(\xi_2)$ вычисления второй производной невозможно. Поэтому и величину шага h , и точность вычисления величин f_{-1} , f_1 и f_0 из (5) приходится определять численно для каждой конкретной задачи в отдельности.

В качестве примера рассмотрим заготовку с ППП №1, рис. 7, а. На рис. 7, б приведен результат аппроксимации ППП, на рис. 7, в – послойное распределение концентрации GeO_2 в световоде, вытянутом из заготовки №1. На рис. 8 представлена спектральная зависимость коэффициента дисперсии β_2 для данного световода.

Таким образом, представленные алгоритм и программа позволяют произвести строгий расчет коэффициента дисперсии волоконного световода по результатам измерения профиля показателя преломления заготовки, полученным на установке Р-102.

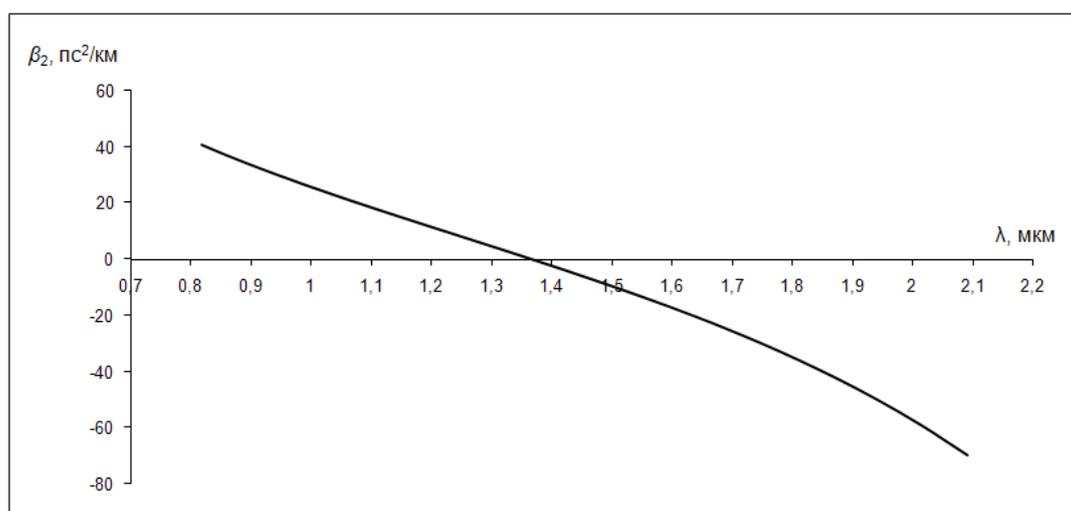


Рис. 8. Рассчитанная спектральная зависимость коэффициента дисперсии световода с ППП №1

Библиографический список

1. Беланов, А.С. Предельные скорости передачи информации по волоконным световодам / А.С. Беланов, Е.М. Дианов // Радиотехника. – 1982. – Т. 37. – № 2. – С. 35–43.
2. Беланов, А.С. О возможности компенсации материальной дисперсии в трехслойных волоконных световодах в диапазоне $\lambda < 1,3$ мкм / А.С. Беланов [и др.] // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – №5. – С. 426.
3. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал; под ред. П.В. Мамышева. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
4. Беланов, А.С. Дисперсия в световодах со сложным профилем показателя преломления / А.С. Беланов, Е.М. Дианов, В.И. Кривенков // Доклады академии наук. – 1999. – Т. 364. – №1. – С. 37–41.
5. Беловалов, М.И. Элементы ВОЛС и методы их исследования / М.И. Беловалов [и др.] // Труды ИОФАН. Волоконная оптика. – 1987. – Т. 5. – С. 125–135.
6. Fleming, J. W. Dispersion in GeO_2 - SiO_2 glasses // J. W. Fleming // Applied Optics. – 1984. – V. 23. – №24. – P. 4486–4493.
7. Бурдин, А.В. Алгоритм расчета хроматической дисперсии одномодовых ОВ на основе метода смешанных конечных элементов / А.В. Бурдин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 7. – №2. – С. 13–16.

8. Юнаковский, А.Д. Начала вычислительных методов для физиков / А.Д. Юнаковский. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. – 220 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.01.2017*

S.A. Kapustin¹, V.A. Malahov¹, G.S. Malyshev², A.S. Raevskiy¹

**CALCULATION OF DISPERSION COEFFICIENTS OF OPTICAL FIBERS BASED
ON MEASUREMENTS REFRACTIVE INDEX PROFILE PREFORM**

¹Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev¹,
JSC «Afrikantov OKBM»²

Purpose: research dispersion fiber and dispersion coefficient calculation based on measurements refractive index profile preform.

Design/methodology/approach: To accurately calculate the coefficient of variance must take into account the dispersion of the material. In all three cases we studied preforms of quartz glass doped with germanium oxide. The outer shell of the preform was made of pure quartz.

Findings: The algorithm and the program will allow to make accurate calculation of the dispersion coefficient of the optical fiber by measuring the refractive index profile of the preform obtained on the installation of P-102.

Key words: optical fiber, the refractive index profile, optical fiber preform, the dispersion parameter.