

Использование альфа-профиля и гауссова профиля показателя преломления при разработке оптического волокна с сильной нелинейностью для эффективной нелинейной обработки оптических сигналов*

С.Селвендран, А.Сиванантарайя, С.Ариважаган, М.Каннан

Предложен профиль показателя преломления, позволяющий создавать оптические волокна с высокой нелинейностью и ультравыровненной дисперсией, обладающие заслуживающими высокой оценки рабочими параметрами (дисперсия и ее наклон, эффективная площадь, потери на изгибе и на стыке). Разработанное волокно имеет полосу пропускания с выровненной нормальной дисперсией, перекрывающую коммуникационные полосы S, C, L, U и простирающуюся до длины волны 1.9857 мкм. Максимальное изменение дисперсии, наблюдавшееся в оптоволокне, составило всего лишь 1.61 пс·км⁻¹·мкм⁻¹ по всему спектру пропускания шириной 500 нм. Нулевая дисперсия волокна имеет место при длинах волн 1.487 и 1.9857 мкм, а соответствующие наклоны дисперсии равны 0.02476 и 0.0068 пс·нм⁻²·км⁻¹. Для волокна характерны малая длина волны отсечки по ITU-T (1.2613 мкм) и высокий коэффициент нелинейности (9.43 Вт⁻¹·км⁻¹). Сочетание широкого спектра выровненной почти до нуля дисперсии с хорошим коэффициентом нелинейности делают разработанное волокно перспективным для различных приложений, связанных с нелинейной обработкой оптических сигналов.

Ключевые слова: профиль показателя преломления, эффективная площадь, дисперсия, наклон дисперсии, оптоволокно с высокой нелинейностью и ультравыровненной дисперсией, четырехволновое смешение.

1. Введение

Ежегодный рост числа пользователей в секторе услуг связи требует соответствующего увеличения скорости и ширины полосы передачи данных. Очевидно, что это требование может быть удовлетворено только при использовании оптической связи. Хотя последняя обладает намного более широкой полосой, чем традиционные системы связи, уже сегодня возникают проблемы конфликта информационных потоков, которые будут усугубляться в дальнейшем из-за бурного распространения оптической связи по всему миру. В будущем данная проблема может вызвать необходимость в новом спектральном окне для оптической связи. Проблема конфликта информационных потоков может быть снята за счет мультимедиа – тиражирования информации для множества выбранных пунктов доставки. Для динамической реконфигурации будущих сетей со сверхплотным мультиплексированием по длине волны (UDWDM) мультимедиа является су-

щественным и достигается посредством конверсии длин волн. Это не что иное, как эффективное использование отведенной полосы, похожее на повторное использование частоты в мобильной связи. Для удовлетворения потребности в расширении полосы можно открыть новое окно пропускания, если использовать такие перспективные оптические элементы, как многочастотные лазерные источники света на основе оптической нелинейности, различные оптические волокна и связанные с ними компоненты.

Сверхбыстрая полностью оптическая обработка сигнала — перспективная технология для решения проблем преобразования оптического сигнала в электрический и обратно и поддержки высокой скорости передачи битов [1]. Полностью оптическая нелинейная обработка сигналов может быть достигнута с помощью нелинейных эффектов, связанных с восприимчивостью третьего порядка, таких как самомодуляция фазы (СМФ), кросс-модуляция фазы (КМФ), четырехволновое смешение (ЧВС) и комбинационное рассеяние [2]. Среди них ЧВС, используемое главным образом для преобразования длины волны, параметрического усиления и генерации суперконтинуума, выделяется как важное явление из-за прозрачности формата битовой скорости, фазы и модуляции вновь генерируемых сигналов. ЧВС также сохраняет значение отношения сигнал/шум [2]. В процессе ЧВС две волны с частотами ω_1 и ω_2 , распространяющиеся в нелинейной среде, генерируют две новые частотные компоненты ω_3 ($2\omega_1 - \omega_2$) и ω_4 ($2\omega_2 - \omega_1$). На частотах ω_3 и ω_4 передаются сигналы частот ω_2 и ω_1 .

Волокно с высокой нелинейностью (ВВН), полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) и кварцевые волноводы — практические кандидаты на роли в нелинейной оптической обработке сигналов [3,4]. ВВН предпочтительно по сравнению с другими средами в силу сверх-

* Перевод с англ. В.Д.Дербова.

S.Selvendran. Alagappa Chettiar College of Engineering and Technology, Karaikudi, Tamilnadu, India;

e-mail: selvendrans@aol.com

A.Sivanantharaja. Alagappa college of Engineering and Technology, Karaikudi, Tamilnadu, India

S.Arivazhagan. Mepco Schlenk Engineering College, Sivakasi, Tamilnadu, India

M.Kannan. Madras Institute of Technology, Chennai, Tamilnadu, India

быстрого отклика, низкого шума, пассивности (не расходует мощности), широкой и плоской полосы конверсии [3]. Требованиями к конструкции ВВН являются малая эффективная площадь сечения сердцевинки (для высокой нелинейности), необходимая величина дисперсии, отвечающая разнообразным приложениям, низкая поляризационная модовая дисперсия (ПМД), малое ослабление (для увеличения эффективной длины взаимодействия). Наконец, длина волны отсечки должна быть намного меньше рабочей длины волны [5]. При конверсии длины волны качество преобразованного сигнала определяется эффективностью преобразования и частотой появления ошибочных битов (BER) [6]. Эффективность ВВН определяется степенью утилизации эффективной ширины полосы волокна – разностью между длинами волн, на которых эффективность конверсии падает ниже 3 дБ от максимального значения [7]. В общем случае ВВН обеспечивает высокую эффективность конверсии на длине волны нулевой дисперсии λ_{ZDW} и резко уменьшается на длинах волн вдали от λ_{ZDW} из-за увеличения фазовой расстройки между сигналами за счет профиля дисперсии [7, 8]. Если уменьшить дисперсию и ее наклон до минимального значения и выровнять дисперсионную кривую почти до нуля по спектру длин волн, то можно увеличить использование эффективной ширины полосы данного оптического волокна [8]. Выравнивание дисперсионной кривой в сочетании с хорошей нелинейностью может улучшить выполнение условий фазового синхронизма между сигналами, длина волны которых удалена от λ_{ZDW} , посредством чего будет улучшена и эффективность конверсии сигналов на этих длинах волн. Таким образом можно выровнять эффективность конверсии по широкому диапазону длин волн. Эффективность конверсии [9] сигнала, вновь сгенерированного с использованием эффекта ЧВС в ВВН, определяется выражением

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right], \quad (1)$$

где L – длина волокна, α – коэффициент потерь. Разности постоянных распространения Δ для генерируемых волн на частотах ω_3 и ω_4 имеют вид

$$\Delta\beta(\omega_3) = 2\beta\omega_1 - \beta\omega_2 - \beta\omega_3,$$

$$\Delta\beta(\omega_4) = 2\beta\omega_2 - \beta\omega_1 - \beta\omega_4.$$

Уменьшая $\Delta\beta$, согласно вышесказанному, можно улучшить выполнение условия фазового синхронизма между входными сигналами на ω_1 и ω_2 , что позволяет усилить взаимодействие с целью передачи максимальной мощности во вновь генерируемые сигналы. Эффективность конверсии за счет ЧВС максимальна при $\Delta\beta = 0$. Этого весьма трудно достичь, однако можно попытаться приблизиться к выполнению данного условия с помощью специально спроектированного волокна. Такое волокно должно иметь равномерно распределенную и очень низкую дисперсию в широком спектральном диапазоне, что позволит сделать $\Delta\beta$ почти равным нулю. Как видно из формулы

$$\Delta\beta(\omega_3, \omega_4) \approx 2\pi c \frac{\Delta\lambda^2}{\lambda_m^2} \left[D(\lambda_m) \pm \frac{\Delta\lambda}{2} \frac{dD}{d\lambda} \Big|_{\lambda_m} \right] \quad (2)$$

(знаки «+» и «-» соответствуют $\Delta\beta(\omega_3)$ и $\Delta\beta(\omega_4)$, c – скорость света, λ_m – средняя длина волны и $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$), уменьшение дисперсии D позволяет усиливать взаимодействие волн при ЧВС [9]. Полная дисперсия в волокне складывается из материальной и волноводной дисперсий. Материальная дисперсия фиксирована, так что полная дисперсия может быть модифицирована (или сведена к нулю) добавлением отрицательной величины к волноводной дисперсии, которая, в свою очередь, может быть изменена за счет профиля показателя преломления (ППП) волокна. Вредным эффектом для ЧВС является зависимость эффективности конверсии от разности частот на входе, что можно в определенной мере преодолеть, выравнивая и ослабляя дисперсию волокна. Оптимизация ППП может оказаться полезной и для создания волокна с более чем одной λ_{ZDW} . Использование данного волокна, имеющего к тому же выровненную нулевую дисперсию, перспективно для таких нелинейных приложений, как генерация суперконтинуума.

Волокна с различными ступенчатыми и градиентными ППП были созданы и описаны многими авторами [10–17]. В настоящей работе спроектировано и оптимизировано ВВН с двойной оболочкой (Fiber C) с ультравыровненной нулевой нормальной дисперсией для будущего применения при обработке сигналов. Альфа-пик и гауссов ППП использованы для оценки распределения электрического поля. Для такого волокна характерны также малая эффективная площадь и низкие потери на изгибах и стыках. Результаты моделирования показали, что новое волокно – лучшая альтернатива для работы с широкополосными и многоволновыми каналами, имеющими высокую скорость передачи битов, при нелинейной обработке оптических сигналов. Ультравыровненный дисперсионный отклик таких волокон позволяет сделать эффективность конверсии при ЧВС постоянной для приложений, связанных с преобразованием длины волны [7, 14]; увеличиваются также ширина полосы параметрического усиления и спектральная ширина суперконтинуума.

2. Конструкция оптимизированного ВВН с ультравыровненной дисперсией

При проектировании ВВН с ультравыровненной дисперсией (УВД) использовалась аппроксимация ППП степенной функцией (альфа-профиль) и гауссовой функцией. Альфа-профиль может быть двух типов: альфа-пик и альфа-провал [18]. При моделировании ППП мы использовали альфа-пик для сердцевинки и гауссов профиль для следующего слоя внутренней оболочки с пониженным показателем преломления (см. рис.1 и формулу (3)). Благодаря градиентной структуре альфа-пика и оптимизации параметров ППП сердцевинки можно уменьшить хроматическую дисперсию и поддерживать ее постоянной в широком диапазоне спектра; такая дисперсия позволяет повысить используемую ширину полосы оптического волокна [19, 20]. ППП в виде альфа-пика также способствует концентрации мощности в пределах сердцевинки, что увеличивает нелинейность и снижает длину волны отсечки в спроектированных нами волокнах. Гауссов профиль внутренней оболочки, прилегающей к сердцевинке, значительно улучшает равномерность дисперсионных характеристик волокна. Гауссов профиль [21–23] с оптимизированными значениями максимального показателя преломления и полной ширины ППП по полувысоте позволяет

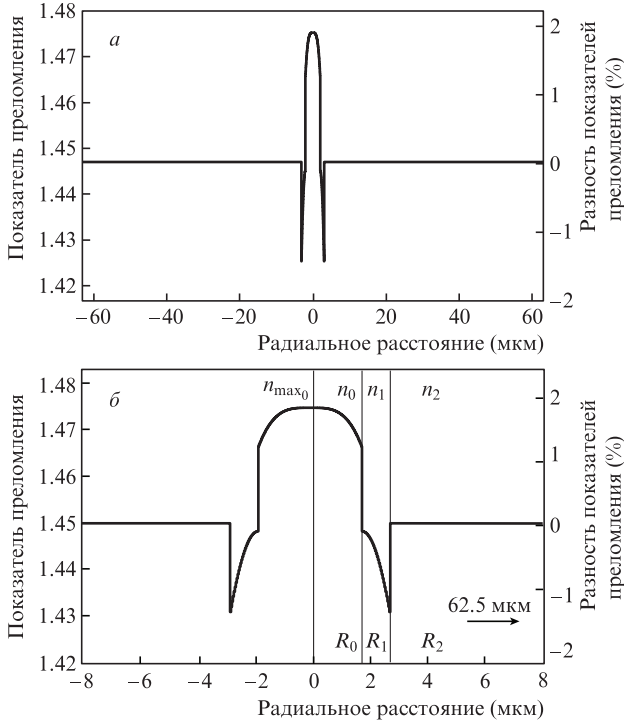


Рис.1. ППП оптимизированного ВВН-УВД (Fiber C) (а) и увеличенный вид части профиля (б).

еще больше сократить наклон дисперсии и эффективную площадь сердцевины. Другие рабочие параметры, такие как потери на стыках, длина волны отсечки и ПМД, оптимизируются путем варьирования параметров и альфа-пика, и гауссова профиля.

ППП предлагаемого волокна и его увеличенное изображение показаны на рис.1. Значения показателя преломления n в зависимости от радиального расстояния r рассчитывались по формуле

$$n(r) = \begin{cases} n_{\max_0} & |r| = 0, \\ n_0(x) = n_{\max_0} \sqrt{1 - 2\Delta(x/w)^{\alpha_0}} & 0 < |r| \leq R_0, \\ n_{\max_1} & |r| = R_0, \\ n_1(x) = n_{\max_1} \exp\{-\ln 2[(x - x_0)^2/(hw)]\} & R_0 < |r| \leq R_1, \\ n_2 & R_1 < |r| \leq R_2. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь n_{\max_0} и n_{\max_1} – наибольшие значения показателей преломления сердцевины и внутренней оболочки; n_0 , n_1 и n_2 – показатели преломления различных областей сердцевины и оболочки; R_0 , R_1 и R_2 – соответствующие им радиальные расстояния; x – текущая координата; w – ширина области; α_0 – параметр профиля; Δ – нормированная разность показателей преломления [23]; x_0 – положение пика; h – нормированная полная ширина гауссова профиля по уровню половины максимума (FWHM).

Ширина полосы оптического волокна, определяющая скорость передачи данных, ограничивается хроматической дисперсией D , которая, в свою очередь, определяется суммой материальной (D_m) и волноводной (D_w) дисперсий [10]:

$$D = D_m + D_w = \left(-\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}\right) +$$

$$+ \left\{ \frac{\lambda}{2\pi^2 c n W^2(\lambda, z)} \left[1 - \frac{2\lambda}{W(\lambda, z)} \left(\frac{3}{2} g_1(z) \lambda^{0.5} + 6g_2(z) \lambda^5 \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где $W(\lambda, z)$ – радиус поля моды; g_1 и g_2 – коэффициенты. Модифицируя профиль показателя преломления волокна, можно управлять вкладом волноводной дисперсии и, следовательно, изменять полную дисперсию нужным образом. На ширину полосы волокна влияет также поляризационная модовая дисперсия (ПМД), которую можно рассчитать с использованием дискретной модели [24], дающей среднее значение ПМД первого порядка для длинного участка волокна. Средняя дифференциальная групповая задержка (ДГЗ) $\Delta\tau$ пропорциональна квадратному корню из длины волокна L :

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \Delta\beta \sqrt{l} \sqrt{L}, \quad (5)$$

где l – длина взаимодействия.

Эффективная площадь моды волокна определяется выражением [25, 26]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (6)$$

где $E(x, y)$ – распределение поля оптической моды. Величина A_{eff} непосредственно связана с нелинейностью оптического волокна, а коэффициент нелинейности γ рассчитывается по формуле [27]

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}. \quad (7)$$

Здесь n_2 – нелинейный показатель преломления кварцевого волокна (его типичное значение – 3.1×10^{-20} м²/Вт).

Диаметр моды поля (ДМП) – важный параметр, связанный с распределением оптического поля в волокне; он определяется выражением [26]

$$d_{\text{eff}} = 2W = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{A_{\text{eff}}}. \quad (8)$$

ДМП дает информацию о таких рабочих характеристиках волокна, как потери при микро- и макроизгибах. Потери при изгибе волокна рассчитываются с использованием модели Сакаи и Кимуры [28]. Потери на макроизгибе определяются радиусом изгиба R_b в соответствии с формулой

$$\alpha_{\text{macro}} = \frac{\sqrt{\pi} P_{\text{cl}}/P}{2sr_{\text{co}} [K_{v-1}(W)K_{v+1}(W) - K_v^2(W)]} \times \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{R_b \Delta W^3}{r_{\text{co}} V^2}\right) \left[W \left(\frac{WR_b}{r_{\text{co}}} + \frac{V^2}{2\Delta W} \right)^{1/2} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где

$$V = k_0 r_{\text{co}} \sqrt{n_{\max}^2 - n_{\text{cl}}^2}; \Delta = \frac{n_{\max}^2 - n_{\text{cl}}^2}{2n_{\max}^2}; W = r_{\text{co}} \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_{\text{cl}})^2};$$

r_{co} – радиус сердцевины волокна; n_{\max} – максимальное значение показателя преломления; n_{cl} – показатель преломления оболочки; β – постоянная распространения моды,

k_0 – волновое число в вакууме; v – азимутальный индекс моды; $s = 2$ (если $v = 0$) и $s = 1$ (для $v \neq 0$); K_v – модифицированная функция Бесселя второго рода порядка v .

Потери на микроизгибах – это излучательные потери в волокне из-за взаимодействия мод, вызванного случайными микроизгибами, которые представляют собой повторяющиеся мелкомасштабные флуктуации радиуса кривизны оси волокна. Приближенное выражение для потерь на микроизгибах дано в [29] и имеет вид

$$\alpha_{\text{micro}} = A(k_0 n_{\text{co}} d_n)^2 (k_0 n_{\text{co}} d_n^2)^{2p}, \tag{10}$$

где A – постоянная; d_n – диаметр ближнего поля; n_{co} – показатель преломления сердцевин; p – показатель степенной зависимости.

Потери на стыках также являются важным параметром при проектировании волокна. Любое несовпадение показателей преломления на границе между волокном с высокой нелинейностью и одномодовым волокном (ОВ) приводит к отражению и преломлению света, падающего в место стыка, а следовательно, к потерям излучения. Для расчета этих потерь мы полагали, что профиль поля моды ОВ приблизительно гауссов. Потери связи стыковых коннекторов можно рассчитать по связи между двумя рассогласованными гауссовыми пучками различного диаметра на основе модели Миллера и Каминова [30]:

$$\alpha_{\text{splice}} = -10 \log \left[\left(\frac{16n_{\text{co}}^2 n_{\text{mat}}^2}{(n_{\text{co}} + n_{\text{mat}})^2} \right) \frac{\sigma}{q} \exp \left(\frac{-\rho u}{q} \right) \right], \tag{11}$$

где

$$\rho = \frac{(kw_1)^2}{2}; \quad q = G^2 + \frac{(\sigma + 1)^2}{4};$$

$$u = (\sigma + 1)F^2 + 2\sigma FG \sin \theta + \sigma \left(G^2 + \frac{\sigma + 1}{4} \right) \sin^2 \theta;$$

$$F = \frac{x}{kw_1^2}; \quad G = \frac{z}{kw_1^2}; \quad \sigma = \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2; \quad k = \frac{2\pi n_{\text{mat}}}{\lambda};$$

n_{mat} – показатель преломления среды между двумя волокнами; w_1 и w_2 – радиусы ближнего поля моды передающего и принимающего волокон; x и z – поперечное и продольное смещения; θ – угловое рассогласование.

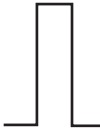
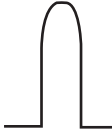
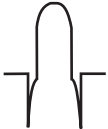
Длина волны отсечки λ_{cut} для каждой моды определяется как максимальная длина волны, при которой мода будет распространяться в волокне:

$$\lambda_{\text{cut}} = \frac{2\pi R_0}{V_{\text{cut}}} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2}, \tag{12}$$

где R_0 – радиус сердцевинки волокна; $V_{\text{cut}} = 2.405$ – параметр, определяемый аналитически для некоторых специальных профилей волокна. Как показано в табл.1, имеется два разных подхода для вычисления λ_{cut} основной моды. Теоретически длина волны отсечки, за которой данная мода не может распространяться, находится численно с помощью программных пакетов для расчета мод. Оценка λ_{cut} по рекомендации Международного телекоммуникационного союза (ITU-T) получается путем эмуляции реальных экспериментальных измерений отсечки, как описано в [31].

Проектирование и оптимизация волокна на основе подбора ППП выполнено с помощью встроенного в пакет Optifiber численного программного средства для расчета мод матричным методом. Программа определяет линейно поляризованные моды, используя радиальные матрицы передачи. Данный метод более точен, особенно при расчете дисперсии и других производных по длине волны. Оптимизация конструкции проводилась путем сканирования параметров, т.е. на основе параметрического расчета отдельных характеристик волокна в зависимости от некоторых технологических свойств или величин, характеризующих его структуру (разности показателей преломления сердцевинки и оболочки, простран-

Табл.1. Технические параметры оптимально спроектированных волокон Fiber A, B и C.

Параметры	Fiber A	Fiber B	Fiber C
ППП			
Длина волны нулевой дисперсии λ_{ZDW} (мкм)	1.4205	1.5673	1.487 и 1.9857
Наклон дисперсионной кривой при $\lambda = \lambda_{\text{ZDW}}$ (пс·нм ⁻² ·км ⁻¹)	0.04753	0.3038	0.02476 при $\lambda_{\text{ZDW}} = 1.487$ мкм, 0.0068 при $\lambda_{\text{ZDW}} = 1.9857$ мкм
Изменение дисперсии в полосах S, C, L и U при $\lambda = 1.47-1.98$ (пс·км ⁻¹ ·нм ⁻¹)	от 2.25 до 15.85 и 5.06 при $\lambda = 1.55$ мкм	от -3.26 до 10.34 и -0.6 при $\lambda = 1.55$ мкм	от -0.22 до 1.61 и 1.02 при $\lambda = 1.55$ мкм
ДПМ при $\lambda = 1.55$ мкм (мкм)	4.465	4.41	4.211
A_{eff} при $\lambda = 1.55$ мкм (мкм ²)	16	15.6	13.32
Коэффициент нелинейности при $\lambda = 1.55$ мкм (Вт ⁻¹ ·км ⁻¹)	7.93	8.055	9.43
ПМД 1-го порядка (пс)	0.102	0.058	0.051
Потери на стыке при $\lambda = 1.55$ мкм (дБ)	0.49	0.77	0.11
Потери на изгибе при $\lambda = 1.55$ мкм (дБ)	$\alpha_{\text{macro}} = 6.425 \times 10^{-21}$ $\alpha_{\text{micro}} = 2.33 \times 10^{-2}$	$\alpha_{\text{macro}} = 1.674 \times 10^{-16}$ $\alpha_{\text{micro}} = 4.116 \times 10^{-2}$	$\alpha_{\text{macro}} = 2.404 \times 10^{-14}$ $\alpha_{\text{micro}} = 6.9 \times 10^{-3}$
Расчетная длина волны отсечки (мкм)	1.512 (ITU-T = 1.479)	1.402 (ITU-T = 1.375)	1.2759 (ITU-T = 1.2613)

ственной ширины и т. п.). Эта процедура автоматически показывает, как любое заданное волокно можно оптимизировать в зависимости от поставленной цели, например как получить нулевую дисперсию и минимальную площадь моды.

С использованием сканирования параметров и матричного метода (3) обнаружено, что предлагаемое новое волокно (Fiber C) оптимально работает при выполнении следующих условий:

$$\begin{aligned} a &= 62.5 \text{ мкм (полный радиус волокна);} \\ R_0 &= 2.025 \text{ мкм, } a_0 = 2.025 \text{ мкм;} \\ R_1 &= 1.1 \text{ мкм, } a_1 = 3.125 \text{ мкм;} \\ R_2 &= 59.375 \text{ мкм, } a = 62.5 \text{ мкм;} \\ n_0(x) &= n_{\max_0} \sqrt{1 - 2\Delta_0(x/w)^{\alpha_0}} \text{ (профиль альфа-пики);} \\ n_1(x) &= n_{\max_1} \exp\left\{-\ln 2 \left[\frac{2(x-x_0)}{hw}\right]^2\right\} \text{ (гауссов профиль);} \\ n_2 &= 1.44692, n_{\max_0} = 1.475, n_{\max_1} = 1.445, \Delta_0 = 0.65\%; \\ \alpha_0 &= 3.5, h = 14, x_0 = 2.025. \end{aligned} \quad (13)$$

Из-за симметрии волокна рассматривается только половина ППП с использованием радиусов (a_0 и a_1 – кумулятивные радиусы областей с ширинами R_0 и R_1 соответственно).

3. Получение оптимизированного ВВН-УВД

Проектирование ВВН-УВД началось с выбора очень большого показателя преломления сердцевинной радиусом R_0 для волокна только с одной оболочкой радиусом R_2 (без области R_1). По мере увеличения разности показателей преломления сердцевинной и оболочки эффективная площадь моды уменьшается, при этом коэффициент нелинейности повышается [32], а наклон дисперсии сдвигается в сторону меньших длин волн. Сокращение эффективной площади может быть достигнуто также за счет уменьшения диаметра поля моды [25, 26]. ППП отдельной области оптимизируется путем последовательных приближений по параметрам этой области посредством вычислений с применением пакета программ для расчета мод матричным методом. Вначале (см. рис.1,б) были рассчитаны эксплуатационные качества волокна при оптимизированном ППП в областях R_0 и R_2 без альфа-параметра и области R_1 (Fiber A). Оптимальные рабочие характеристики волокна Fiber A получены при максимальном показателе преломления сердцевинной $n_{\max_0} = 1.475$ и радиусе $R_0 = 2.025$ мкм. Обычно высокий показатель преломления волокна достигается добавлением германия к кварцу, а низкий – добавлением фтора [33]. Большая разность показателей преломления (перелопа показателя преломления) сердцевинной и оболочки обеспечивает достижение конечной цели – получение малой $A_{\text{эфф}}$, равной 16 мкм^2 , и соответственно высокого коэффициента нелинейности $\gamma = 7.93 \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$. Спроектированное волокно имеет ДПМ, равный 4.465 мкм , а также очень низкие потери на сгибе и стыке (см. табл.1). Нами получена $\lambda_{\text{ЗДВ}}$ вблизи 1.4205 мкм , дисперсия волокна составила $5.06 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ на 1.55 мкм при наклоне дисперсии $0.04753 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-2}\cdot\text{км}^{-1}$. Выбрав оптимальную ширину сердцевинной 2.025 мкм , мы обеспечили работу волокна на ос-

новной моде LP_{01} . Однако длина волны отсечки данного волокна велика и составляет 1.512 мкм . Такое сочетание наклона дисперсии и длины волны отсечки ограничивает использование полосы пропускания волокна Fiber A.

Чтобы достичь низкой дисперсии в широкополосном волокне при проектировании, необходимо уделять внимание не только материальной, но и волноводной дисперсии, а также связи последней со специфической конфигурацией электромагнитного излучения внутри волокна. Концентрация мощности вблизи границы между сердцевинной и оболочкой обеспечит другие дисперсионные характеристики, чем при концентрации мощности в центре сердцевинной. Оптимизация таких параметров, как радиус сердцевинной, значение α_0 для градиентной структуры, относительная разность показателей преломления и длина волны, приведет к изменению волноводной дисперсии, противоположному по знаку материальной дисперсии, что позволит сделать суммарную дисперсию близкой к нулю [19].

Согласно формуле (3), введем параметр α_0 для сердцевинной и назовем волокно с модифицированным ППП Fiber B. Для оптимального $\alpha_0 = 3.5$ длина волны, при которой дисперсия равна нулю, смещается в длинноволновую область до 1.5673 мкм со снижением наклона дисперсионной кривой до $0.3038 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-2}\cdot\text{км}^{-1}$ без увеличения потерь на изгибе и стыке. ДПМ сокращается до 4.41 мкм , а $A_{\text{эфф}}$ с учетом вклада областей R_0 и R_2 составляет 15.6 мкм^2 . В результате нелинейность волокна также немного увеличивается (до $8.055 \text{ Вт}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$). Достигается весьма низкий уровень потерь на макро- и микроизгибах: 1.674×10^{-16} и $4.116 \times 10^{-2} \text{ дБ/км}$ соответственно при диаметре кривизны изгиба 12 мм . С ростом α_0 длина волны отсечки данного волокна смещается в длинноволновую сторону и достигает 1.402 мкм при оптимальном значении α_0 .

Однако волокно Fiber B все еще не имеет достаточно выровненную дисперсионную характеристику (или широкий спектр нулевой нормальной дисперсии). Полная дисперсионная характеристика волокна управляется изменением вклада волноводной дисперсии, для чего вводится область R_1 – внутренняя оболочка с пониженным показателем преломления. Волокно с новым ППП будем называть Fiber C (см. рис.1,а). Включение области R_1 с пониженным показателем преломления [12, 34] сокращает эффективную площадь волокна, отлично выравнивает дисперсионную кривую, приближая ее к нулевой отметке, и уменьшает потери на изгибе [35]. Область R_1 также оптимизировалась путем многократного численного моделирования с целью получения оптимального ВВН-УВД для оптической связи. Найденное в результате последовательных итераций оптимальное значение максимального показателя преломления в области R_1 $n_{\max} = 1.445$, ширина области R_1 составила 1.1 мкм , а FWHM оказалась равной 14 . При этих оптимизированных параметрах волноводная и материальная дисперсии могут компенсировать друг друга, что приводит к выравниванию дисперсии в широком спектральном диапазоне. Измеренные потери на изгибе также приемлемы при таких оптимизированных (область R_1) значениях показателя преломления оболочки и ее толщины.

Предложенное волокно Fiber C с оптимальным ППП обладает улучшенными рабочими характеристиками: ультравыровненной дисперсионной характеристикой, очень малыми потерями на стыках, способностью работать только на основной моде LP_{01} . Оптимизированный аль-

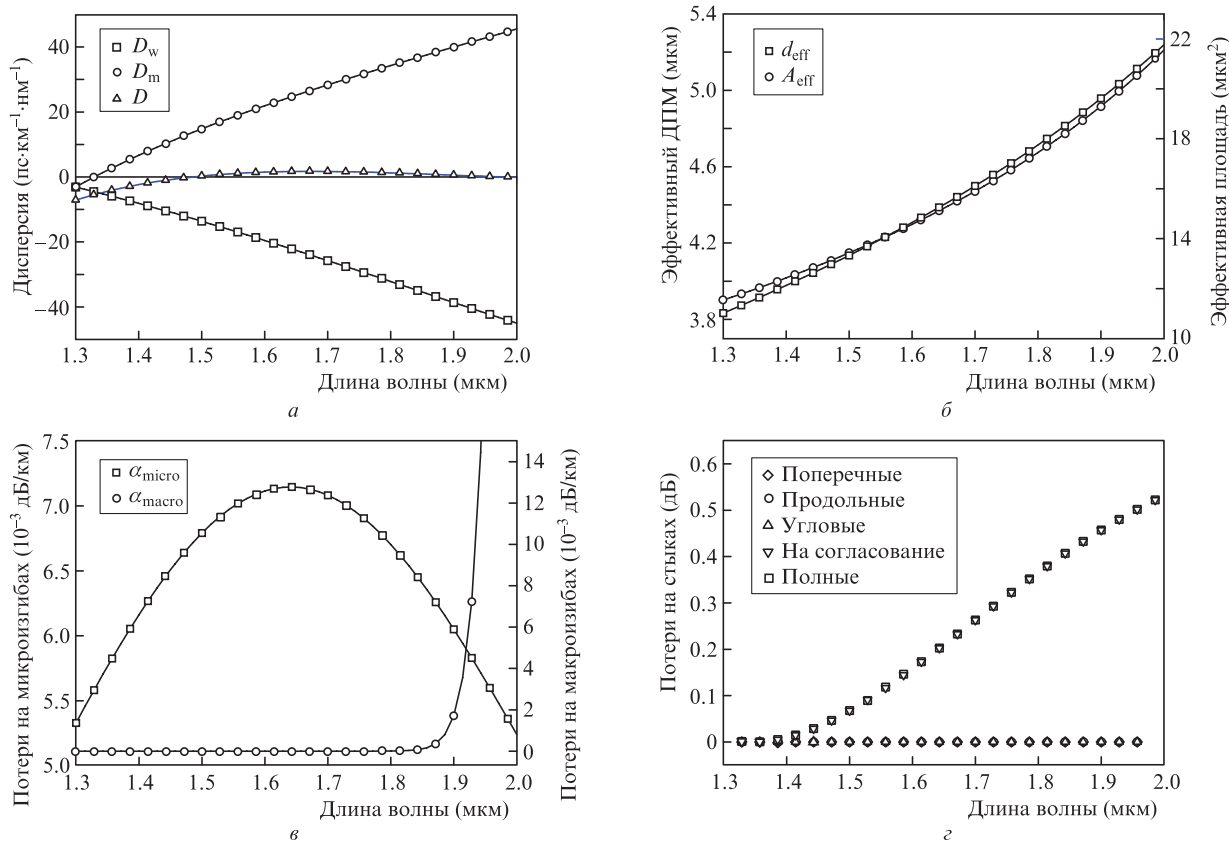


Рис.2. Зависимости дисперсии (а), ДПМ (б), потерь на изгибах (в) и на стыках (з) от длины волны для волокна Fiber C.

фа-пик расположен в сердцевине, а гауссов профиль – во внутренней оболочке (см. (13)). Такой ППП позволит лучше ограничить поле внутри сердцевины с указанным ДПМ (4.21 мкм), что, в свою очередь, приведет к снижению потерь на стыках по сравнению с потерями в Fiber B. Более того, можно управлять потерями на изгибе (рис.2). Потери на микро- и макроизгибах для оптимизированного волокна Fiber C составляют 2.404×10^{-14} и 6.9×10^{-3} дБ/км соответственно. Потери на стыках также очень малы и составляют 0.11 дБ на $\lambda = 1.55$ мкм. Значения λ_{ZDW} данного волокна равны 1.487 и 1.9857 мкм, что позволяет расширить используемую область спектра и перекрыть все полосы S, C, L и U при максимальном значении дисперсии всего $1.61 \text{ пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$. Это волокно имеет очень низкую теоретическую длину волны отсечки (1.2759 мкм) при очень хорошем коэффициенте нелинейности ($9.43 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$).

Из рис.3,а и б хорошо видно влияние n_{\max} области R_1 и ее ширины на полную дисперсионную характеристику волокна Fiber C. С ростом показателя преломления наклон дисперсионной кривой предлагаемого волокна растет, и наилучшее значение выровненной дисперсии достигается при $n_{\max} = 1.445$. В то же время увеличение ширины области R_1 сдвигает всю дисперсионную кривую в положительную сторону, причем оптимальная ширина составляет 1.1 мкм, поскольку в этом случае полная дисперсия ближе всего к нулевой дисперсии в широкой области спектра. Оптимизацию ширины h гауссова профиля области R_1 иллюстрирует рис.3,в. Наилучшее выравнивание дисперсии достигается при $h = 14$. Измеренные полные дисперсии и эффективные ДПМ волокон Fiber A, B и C показаны на рис.4. Волокно Fiber C демонстрирует наилучшие показатели по выравниванию дисперсии и уве-

личению нелинейности за счет уменьшения ДПМ. Гауссов профиль области R_1 у волокна Fiber C усиливает ограничение поля и уменьшает ДПМ по сравнению с волокнами Fiber A и B. На рис.5 приведены трехмерные графики распределения поля мод для волокна Fiber B и оптимизированного волокна Fiber C. Четко видно, что Fiber C с альфа-профилем градиентного показателя преломления сердцевины и гауссовым профилем в области внутренней оболочки R_1 – действительно оптимизированное волокно с высокой нелинейностью и УВД. Введение области R_1 в конструкцию волокна Fiber C понижает длину волны отсечки до 1.2759 мкм ($\text{ITU-T} = 1.2613 \text{ мкм}$) и гарантирует работу волокна только на основной моде с линейной поляризацией LP_{01} , тогда как волокно Fiber B без области R_1 работает на двух модах (LP_{01} и LP_{11}) (рис.5,а). Исключение моды LP_{11} в Fiber C также вносит существенный вклад в выравнивание дисперсии волокна.

Перечень оптимизированных параметров и их значения для волокон Fiber A, B и C приведены в табл.1. Волокно Fiber C имеет две длины волны λ_{ZDW} и очень малый наклон дисперсионной кривой в промежутке между ними, так что оно может поддерживать обработку оптических сигналов в широком диапазоне спектра. Вариации дисперсии ВВН в полосах S, C, L, U и далее также очень малы по сравнению с вариациями дисперсии, приведенными ранее в [5, 12, 25, 26, 36–39]. Предложенное нами волокно Fiber C демонстрирует очень хорошую эффективную площадь и высокий коэффициент нелинейности. Несмотря на то, что у Fiber C коэффициент нелинейности $9.43 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ несколько ниже, чем полученный ранее для ВВН, точное выполнение условия фазового синхронизма между сигналами достигается благодаря ультравыровненной нулевой нормальной дисперсионной характери-

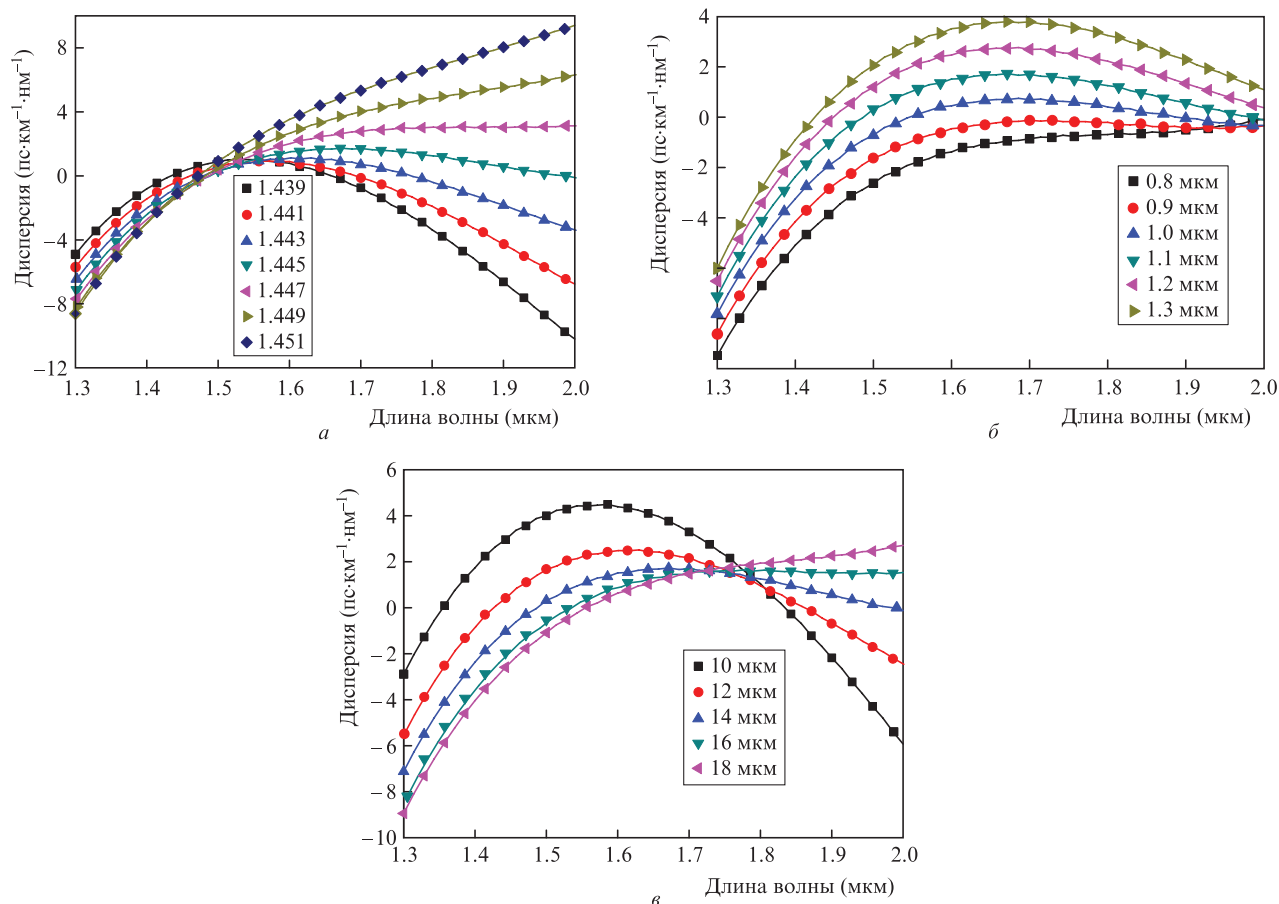


Рис.3. Зависимость дисперсии волокна Fiber C от длины волны при различных значениях n_{\max} (а), толщины области R_1 (б) и нормированной ширины гауссова профиля $h R_1$ (в).

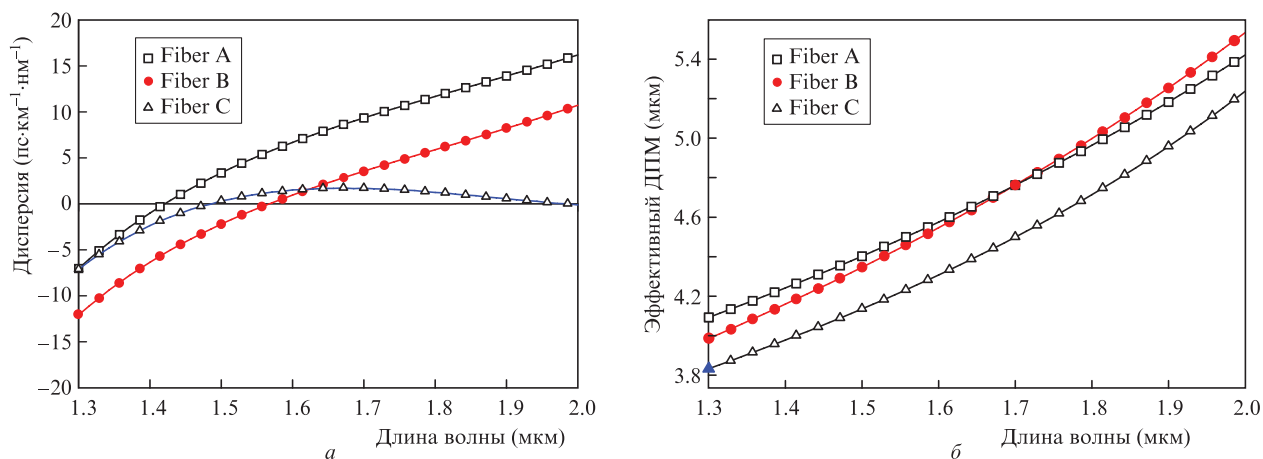


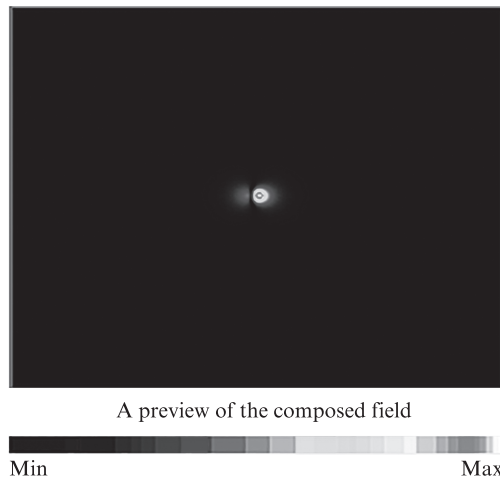
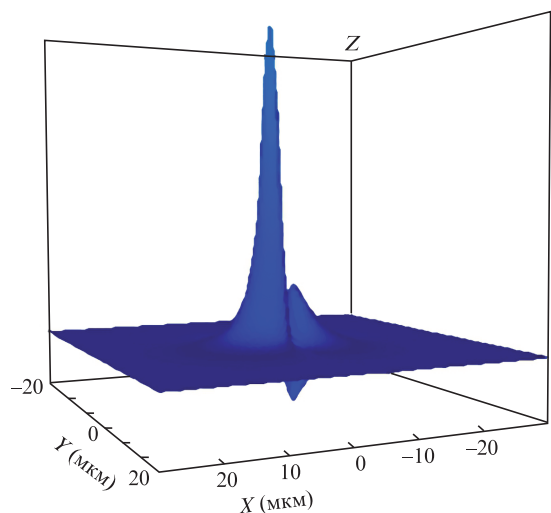
Рис.4. Зависимости дисперсии (а) и эффективного ДПМ (б) от длины волны для волокон Fiber A, B и C.

стике волокна Fiber C. Это, в свою очередь, делает возможной эффективную конверсию длин волн в оптических сетях с использованием методики ЧВС, а также генерацию суперконтинуума.

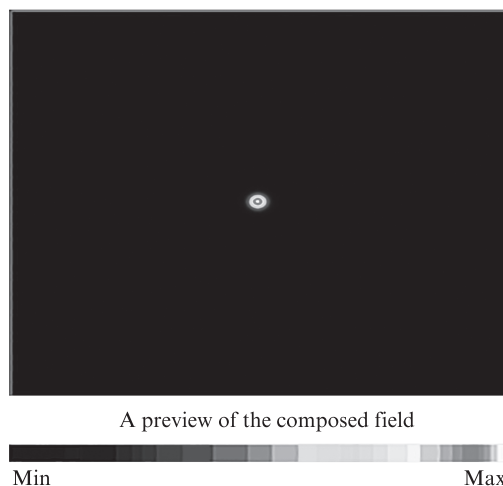
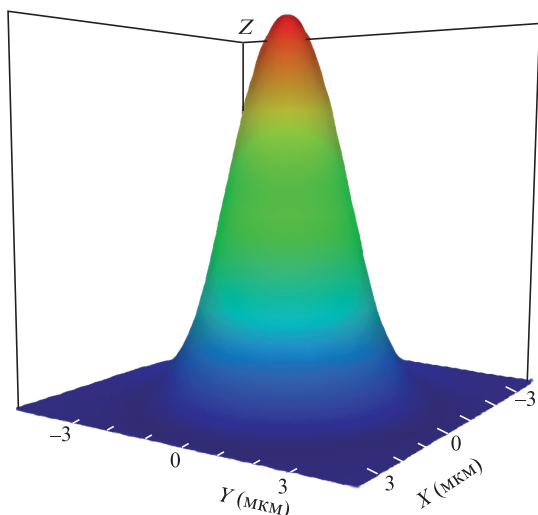
4. Результаты и их обсуждение

Для изготовления волокна с тонкой структурой ППП наилучшим образом подходит технология активированного плазмой химического осаждения из газовой фазы (PCVD). Использование PCVD позволяет наносить пре-

дельно тонкие слои (скорость нанесения 0.5–1 г/мин) с высокой эффективностью (~100% для SiO_2 и 80%–100% для GeO_2) благодаря кинетике реакции, отличающейся от таковой в случае внешней тепловой активации. Таким образом, за сотни циклов процесса наносится слой толщиной менее одного микрометра, что позволяет полностью контролировать соответствие ППП преформы [40–42] условиям (13). Оптимизированное указанным способом волокно обладает рабочими характеристиками, представленными в табл.1. Наше ВВН-УВД Fiber C характеризуется очень низкой дисперсией и широким диапазо-



a



b

Рис.5. Распределение поля мод в волокне Fiber B (a) и в оптимизированном волокне Fiber C (б).

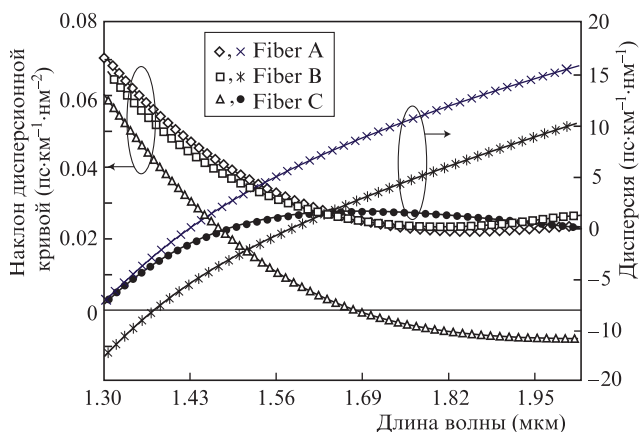


Рис.6. Зависимости дисперсии и наклона ее кривой от длины волны для волокон Fiber A, B и C.

ном выровненной дисперсии (рис.6). Волокно имеет две длины волны нулевой дисперсии λ_{ZDW} (на 1.487 и 1.9857 мкм) с максимальным изменением дисперсии между ними 1.61 пс·км⁻¹·нм⁻¹. Измеренный наклон дисперсионной кривой при $\lambda_{ZDW} = 1.487$ мкм равен 0.02476 пс × нм⁻²·км⁻¹. Из рис.6 видно, что на длинах волн от 1.53 до

2 мкм измеренный наклон кривой дисперсии изменяется лишь в узком интервале (от +0.01 до -0.01). Такой уменьшенный наклон демонстрирует качество выравнивания дисперсионной кривой. Оптимизированное волокно Fiber C также имеет $A_{eff} = 13.32$ мкм² и $\gamma = 9.43$ Вт⁻¹·км⁻¹. Возможно и дальнейшее повышение коэффициента нелинейности, но только за счет компромиссного увеличения потерь на изгибе и стыке. Кроме того, при этом может пострадать и выровненность дисперсионной характеристики.

Для вычисления ПМД использовалась дискретная модель. Длина волокна z полагалась равной 1 км, длина взаимодействия $l = 20$ м, внутреннее возмущение за счет эллиптичности сердцевин $\xi = 0.01$ и дифференциальное тепловое расширение равно 6.5×10^{-8} . Выбранное нами оптимизированное волокно имеет очень низкое значение ПМД первого порядка (0.051 пс). При идеальной его стыковке (без внешней разъюстировки) с одномодовым волокном с ДПМ 9.8 мкм и согласовании показателя преломления в пределах сердцевин наше ВВН-УВД обладает весьма низкими потерями на стыке (0.11 дБ). В области R_1 волокна Fiber C значения показателя преломления очень низкие. Столь большая разность показателей преломления сердцевин и внутренней оболочки сильно

Табл.2. Моды рассмотренных волокон с коэффициентами связи по мощности.

Волокно	Поддерживаемая мода и модовый показатель преломления	Параметры вводимого в моду излучения		
		Амплитуда поля моды	Фаза поля моды	Мощность (коэффициент связи)
Fiber A	LP ₀₁ ; 1.4643102	0.61792	0	0.38182
	LP ₁₁ ; 1.4501719	1.6544×10^{-16}	0	2.7369×10^{-32}
Fiber B	LP ₀₁ ; 1.4624935	0.61681	0	0.38046
	LP ₁₁ ; 1.4481877	2.6749×10^{-16}	0	7.1552×10^{-32}
Fiber C	LP ₀₁ ; 1.4620085	0.59134	0	0.34968

ограничивает поле в сердцевине, так что оно редко вытекает в оболочку [12, 34]. В этом случае потерями на изгибе можно пренебречь, даже если волоконный кабель намотан на катушку [14]. Для нашего оптимизированного волокна измеренные потери на микро- и макроизгибах на $\lambda = 1.55$ мкм составляли лишь 2.404×10^{-14} и 6.9×10^{-3} дБ/км соответственно, даже при диаметре изгиба 12 мм. Для оценки потерь на макроизгибе использовалась формула из работы [30], применимая к любой моде при любом ППП. Длина волны отсечки волокна Fiber C, полученная численно с помощью программного пакета для расчета мод, составила 1.2759 мкм, а оценка по методике ITU-T дала значение 1.2613 мкм. Оптимизированное волокно Fiber C работает на одной основной моде (LP₀₁) и благодаря очень низким длинам волн отсечки может эффективно использовать полосы S, C, L, U и далее.

В табл.2 показаны поддерживаемые моды для разработанных нами волокон Fiber A, B и C, а также модовые показатели преломления и параметры рассчитанного поля. Значения в колонке «мощность» соответствуют сумме квадратов действительной и мнимой частей и имеют смысл обычных коэффициентов связи для каждой моды. Для вычисления упомянутых выше величин возбуждающий входной пучок с гауссовым профилем (FWHM = 10 мкм) и с полярным углом 0° относительно оси волокна имеет коэффициент связи 0.34968 для моды LP₀₁, т. е. примерно такой же, как и у волокон Fiber A и B, но влияние моды LP₁₁ на распространение пучка в волокне исключено. Уменьшив ширину возбуждающего гауссова пучка, можно повысить коэффициент связи.

Область аномальной дисперсии представляет больший интерес для таких нелинейно-оптических применений, как распространение солитонов, обращение волнового фронта и генерация суперконтинуума, чем области нулевой или отрицательной дисперсии волокна. В частности, генерация суперконтинуума требует наличия более одной длины волны нулевой дисперсии и большого расстояния между ними. Поэтому целью настоящей работы было выравнивание дисперсии на очень низком положительном уровне (вблизи нуля) по широкой области спектра, а также получение нескольких длин волн нулевой дисперсии, что позволило бы использовать полный спектр (от 1.48 до 1.98 мкм) для нелинейной обработки сигналов. В предлагаемой конструкции волокна на интервале длин волн в 500 нм дисперсия варьируется от 0 до $1.62 \text{ пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$, так что весь спектр может быть эффективно использован. Уменьшая диаметр сердцевины, можно увеличивать отрицательную волноводную дисперсию, и тогда при оптимальном значении кривая полной дисперсии ложится на линию нулевой дисперсии. Однако эти изменения ограничивают рабочую полосу до 250 нм, затрагивая также такие параметры, как потери на изгибе и стыке.

5. Заключение

В работе спроектировано и оптимизировано волокно с высокой нелинейностью и ультравыровненной дисперсионной характеристикой. Оптимизированное волокно Fiber C демонстрирует равномерность дисперсии в диапазоне 500 нм, перекрывающем полосы S, C, L, U и ниже с изменениями дисперсии всего лишь от 0 до $1.61 \text{ пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$. Созданное волокно имеет две длины волны λ_{ZDW} , равные 1.487 и 1.9857 мкм. Результаты расчетов показали, что волокно Fiber C имеет высокий коэффициент нелинейности ($9.43 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$) и очень низкие потери на стыке (0.11 дБ). Среднее значение ПМД первого порядка для такого волокна равно всего лишь 0.051 пс. Волокно Fiber C гарантирует очень широкую рабочую полосу за счет своей выровненной нормальной почти нулевой дисперсии в широком диапазоне спектра и очень низкой длины волны отсечки (1.2613 мкм). Потери на макро- и макроизгибах составляют 2.404×10^{-14} и 6.9×10^{-3} дБ/км соответственно. Поэтому потерями на изгибе можно пренебречь даже тогда, когда волоконный кабель намотан на катушку в компактной системе. Предлагаемая конструкция ВВН-УВД подходит для многих нелинейных приложений, таких как волоконные лазеры, генерирующие на различных длинах волн, параметрические усилители, конверсия длины волны, оптическая регенерация, оптическая выборка, сжатие импульсов, а также, что особенно важно, для генерации суперконтинуума.

1. Saruwatari M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (6), 1363 (2000).
2. Wu X., Huang H., Wang J., Wang X., Yilmaz O.F., Nuccio S.R., Willner A.E. *Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science (QELS)*, **1–2**, 16 (2010).
3. Wang D., Cheng T.-H., Yeo Y.-K., Xu Z., Wang Y., Xiao G., Liu J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **28** (24), 3497 (2010).
4. Ophir N., Chan J., Padmaraju K., Biberman A., Foster A.C., Foster M.A., Lipson M., Gaeta A.L., Bergman K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23** (2), 73 (2011).
5. www.oelabs.com/images/goodspdf/201109/High%20Nonlinear%20Optical%20Fibre Available from: www.oelabs.com/images/goodspdf/201109/High%20Nonlinear%20Optical%20Fibre.
6. Hirano M., Nakanishi T., Okuno T., Onishi Masashi. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15** (1), 103 (2009).
7. Weber H.G., Nakazawa M. *Ultrahigh-speed Optical Transmission Technology* (Berlin: Springer, 2007, pp 141–165).
8. Inoue K. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **10** (11), 1553 (1992).
9. Bass M., van Stryland E.W. *Fiber Optics Handbook: Fiber, Devices, and Systems for Optical Communications* (New York: McGraw-Hill, 2002).
10. Shizhuo Yin, Kun-Wook Chung, Hongyu Liu, Kurtz P., Reichard K. *Opt. Commun.*, **177** (1837–6), 225 (2000).
11. Wandel M., Kristensen P. *J. Opt. Fiber Commun.*, **3** (1), 25 (2006).
12. Li Ming-Jun, Li Shenping, Daniel A.Nolan. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6025**, 602503 (2006).
13. Ramachandran S., Ghalmi S., Nicholson J.W., Yan M.F., Wisk P., Monberg E., Dimarcello F.V. *Opt. Lett.*, **31** (17), 2532 (2006).

14. Okuno T., Hirano M., Nakanishi T., Onishi M. *SEI Tech. Rev.*, **62**, 34 (2006).
15. Camerlingo A., Feng X., Poletti F., Ponzio G.M., Parmigiani F., Horak P., Petrovich M.N., Petropoulos P., Loh Wei H., Richardson D.J. *Opt. Express*, **18** (15), 15747 (2010).
16. Feng X., Shi J., Ponzio G.M., Poletti F., et al. *Proc. ECOC* (Geneva, 2011, paper We.10.P1.05).
17. Poletti F., Feng X., Ponzio G.M., Petrovich M.N., Loh W.H., Richardson D. *Opt. Express*, **19** (1), 66 (2011).
18. Chamberlain G.E., Day G.W., Franzen D.L., Gallawa R.L., Kim E.M., Young M. *NBS* (1983, p. 225).
19. Carnevale Anthony, Paek Un-Chul., Peterson George E. Patent US 4412722A (Nov. 1, 1983).
20. Ma Daiping, Smith David Kinney. Patent US 2001/0001624 A1 (May 24, 2001).
21. Seraji F.E., Kiaee R. *Intern. J. Opt. Appl.*, **4** (2), 62 (2014).
22. Rostami A., Makouei S., in *Advances in Solid State Circuit Technologies* (ISBN, InTech, 2010, pp 107–140).
23. <http://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/08/fiber-cad>.
24. Bruyère F. *Effets de Polarisation dans les Systèmes à Amplification Optique de Longue Distance*. Ph.D.Dissertation (University of Paris XI Orsay, 1994).
25. Shashi Kant, Hrudayaranjan Sahu, Abhay Arora. *Proc. the 55th IWCS/Focus* (Providence, Rhode Island, USA, 2006 1994, pp 330–333).
26. Jong-Kook Kim. *Investigation of high-nonlinearity glass fibers for potential applications in ultrafast nonlinear fiber devices*, Ph.D. Thesis (Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2005).
27. Selvendran S., Sivanantharaja A., Kalaiselvi K., Esakkimuthu K. *Opt. Quantum Electron.*, **45** (2), 135 (2013).
28. Sakai J., Kimura T. *Appl. Opt.*, **17** (10), 1499 (1978).
29. Petermann K. *Electron. Lett.*, **20** (3), 107 (1976).
30. Miller S.E., Kaminow I.P. *Optical Fiber Telecommunications II* (CA: Acad. Press, 1988).
31. *Definition and Test Methods for the Relevant Parameters of Single Mode Fibers*. ITU-T Rec. G.650 (1993).
32. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (Acad. Press, 2007).
33. Masanori Takahashi, Jiro Hiroishi, Ryuichi Sugizaki, Yuki Taniguchi. Patent US 7006742 B2 (Feb 28, 2006).
34. Sillard P., Molin D. Patent US 2011/0188826 A1 (Aug. 4, 2011).
35. Dana Craig Bookbinder, Ming-Jun Li, Pushkar Tandon. Patent US 8588569 B2 (Nov. 19, 2013).
36. Saini T.S., Baili A., Kumar A., Cherif R., Zghal M., Sinha R.K., *Mod. Opt.*, **62** (19), 1570 (2015).
37. Saini T.S., Kumar A., Sinha R.K. *J. Lightwave Technol.*, **33** (18), 3914 (2015).
38. Agrawal A., Tiwari M., Azabi Y.O., Janyani V., Rahman B.M., Grattan K.T. *J. Mod. Opt.*, **60** (12), 956 (2013).
39. Wijeratne I.N.M., Kejalakshmy N., Agrawal A., Rahman B.M.A., Grattan K.T.V. *IEEE Photon. J.*, **4** (2), 357 (2012).
40. Kyunghwan Oh., Un-Chul Paek. *Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components: Design, Fabrication, and International Standards* (John Wiley & Sons, 2012, p. 96).
41. Beck B. *Photon. Spectra*, **39** (12), (2005).
42. Sanghera J.S., Aggarwal I.D. *Infrared Fiber Optics* (CRC Press, 1998, pp 43–45).