УДК 681.7.068.4

А. И. ФИЛИППЕНКО, д-р техн. наук, О. В. ЛЕГКАЯ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ СВАРКОЙ ПЛОСКИХ ВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ

Введение

Прогрес в сфере телекоммуникационных услуг, таких как Интернет, локальные сети, абонентское телевиденье и т.д., вызывает потребность в передаче больших объемов информации, что стимулируют широкое внедрение ленточных волоконных оптических кабелей (ВОК). При этом важной задачей является реализация их соединений методом групповой сварки. Из-за несовершенства методов групповой сварки возникают оптические потери, связанные с деформацией основной оси и оболочки волокна. Следовательно, непосредственная местная оценка оптических потерь каждого индивидуального сварного соединения в ленточном кабеле является актуальной задачей.

Постановка задачи

Цель работы – разработка метода оценки оптических потерь при сварном соединении плоских волоконных кабелей, основанного на изображениях горячего волокна, взятых во время сварки, и на изображениях холодного волокна, взятых до и после того, как осуществилась сварка.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– обосновать метод восприятия изображений оптического кабеля и оптической системы;

– выполнить теоретическое обоснование метода оценки оптических потерь, базируемого непосредственно на основной деформации, используя изображения горячего волокна;

– выполнить теоретическое обоснование метода оценки оптических потерь, основанного на изменении формы оболочки во время соединения;

– провести экспериментальные исследования разработанных методик.

Метод восприятия изображений оптического кабеля и оптической системы

Технология контроля параметров сварных соединений оптических волокон (ОВ) аналогична задаче контроля оптико-геометрических параметров самих оптических волокон и должна быть основана на специальных автоматизированных методах. Широкое применение получили бесконтактные оптические методы, которые обеспечивают требуемые точность и быстродействие контроля. Юстировка должна выполняться на основе метода фокусировки с использованием PAS системы, что позволяет использовать оптическую систему, имеющуюся в сварочном аппарате [1].

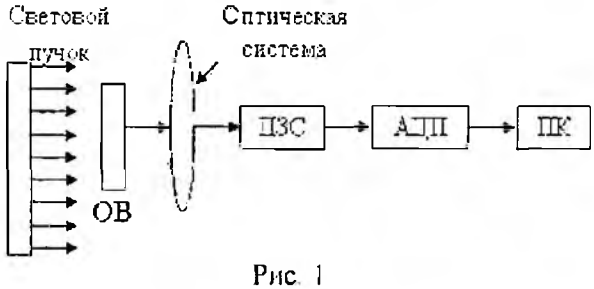


Рис. 1

На рис. 1 представлена структурная схема устройства, предназначенного для получения и обработки изображения сварного соединения оптических волокон.

Место соединения волокон облучается световым коллимированным пучком под прямым углом к оси оптоволокна. Зондирующий луч, входящий в сердцевину волокна, которая действует как цилиндрическая линза, преломляется и выходит из сердцевины. Далее излучение через оптическую систему попадает в матрицу приемника с зарядовой связью (ПЗС), откуда после аналого-цифрового преобразования изображение поступает на персональный компью-

тер (ПК) для последующего исследования параметров сварного соединения.

Требования к оптической системе:

– волокна ленточного ВОК должны наблюдаться в двух плоскостях одновременно;

– в каждой плоскости все волокна должны быть зафиксированы и сосредоточены в том же самом изображении;

– усиление и время незащищенности ПЗС-камер должны быть согласованы согласно требованиям процесса сварки для изображений холодного и горячего волокна.

Для реализации таких требований разработана оптическая система, схема которой представлена рис. 2.

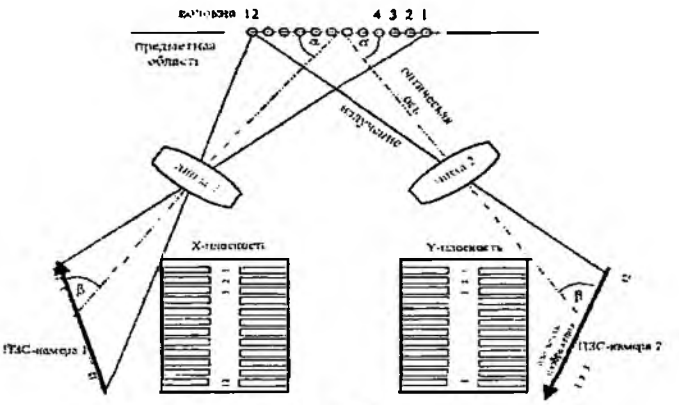


Рис. 2

Две ПЗС-камеры используются для получения изображения двух плоскостей одновременно. Они развернуты под углами α и β к оптическим торцам линз, чтобы обеспечить регистрацию 12 волокон в центральной плоскости. Однако при таком развороте увеличение изображения неоднородно по всем волокнам. Увеличение для каждого волокна является одним из существенных параметров в расчете потерь соединений и может быть вычислено с помощью рис. 3.

Параксиальное увеличение оптической системы может быть описано выражением

$$M_0 = P/Q = \tan\alpha/\tan\beta. \qquad (1)$$

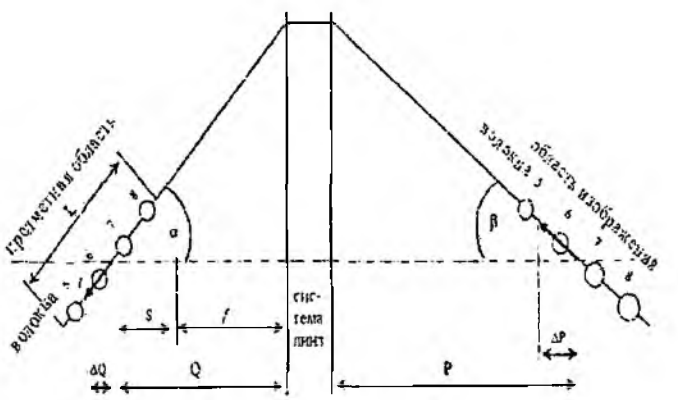


Рис.3

где Q и P – расстояние от плоскости объекта и плоскости изображения до основной плоскости оптической системы на оптической оси: α и β – углы плоскости объекта и плоскости изображения к оптической оси, соответственно: ΔQ и ΔP – смещение на плоскости изображения и плоскости объекта соответственно.

Для параксиальных лучей уравнение линзы имеет вид

$$\frac{1}{P+\Delta P}+\frac{1}{Q+\Delta Q}=\frac{1}{f}. \qquad (2)$$

где f – фокусное расстояние системы линз; ΔP или ΔQ могут быть отрицательными.

Принимая $S = Q - f$, получаем

$$M_0 = \frac{P + \Delta P}{Q + \Delta Q} = \frac{f}{Q + \Delta Q - f} = \frac{f}{S + l\cos\alpha}. \quad (3)$$

На плоскости изображения падающие лучи, которые формируют изображение волокон, покрывают расширенную область на ПЗС, повернутую на угол β. Это можно рассматривать как одномерное увеличение оболочки волокна, поперечное к оси волокна, называемое увеличением оболочки M_{cl}.

Таким образом, M_{cl} может быть представлено как

$$M_{cl} = 1/\sin a. \quad (4)$$

Полное увеличение оболочки в плоскости, поперечной к оси волокна M_t, может быть получено из выражения

$$M_t = M_0 M_{cl} = \frac{f}{(S + l\cos\alpha)\sin\beta}. \quad (5)$$

Полное увеличение, параллельное оси волокна, M_p, описывается как

$$M_p = M_0 = \frac{f}{S + l\cos\alpha}. \quad (6)$$

Если размер пикселя для ПЗС-камеры принять как $p(мкм) \times t\,(мкм)$ в плоскостях, параллельной и поперечной к оси волокна в изображении соответственно, мы имеем разрешающую способность на один элемент изображения r_p параллельно оси волокна

$$r_p = \frac{p}{M_p} = \frac{p(S + l\cos\alpha)}{f(мкм/пиксель)}, \quad (7)$$

и r_t - перпендикулярно к оси волокна;

$$r_t = \frac{t}{M_t} = \frac{t(S + l\cos\alpha)\sin\beta}{f(мкм/пиксель)}. \quad (8)$$

Однако должен быть учтен ее один фактор увеличения для сердцевины волокна M_{co} в плоскости, поперечной к оси волокна.

Приняв радиус волокна R и коэффициент преломления оболочки n_1 смещения сердцевины d

$$D = n_1 d, \quad (9)$$

$$M_{co} = n_1, \quad (10)$$

$$r_{t\,core} = \frac{r_t}{M_{co}} = \frac{t(S + l\cos\alpha)\sin\beta / f}{n_1}. \quad (11)$$

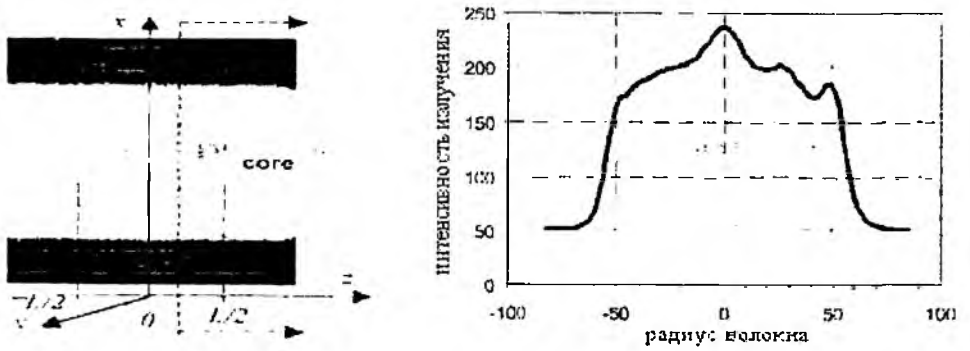
Все эти отношения изменяются от волокна к волокну в зависимости от изменения оптического увеличения M_0 для их различных положений в изображении, следовательно, M_0 нужно вычислять для каждого соединения, в зависимости от позиции волокна.

Метод оценки оптических потерь, базируемый на основной деформации

Потери в сварном соединении вызваны деформацией сердцевины волокна. Если форма основной деформации известна, потери сварного соединения могут быть вычислены из анализа соединения в виде функции от вида деформации [2]. Таким образом, правильное восстановление основной деформации по цифровому изображению позволяет получить точную оценку потерь сварного соединения.

На рис. 4, *а* изображено распределение интенсивности цифрового изображения горячего волокна, а на рис. 4, *б* его профиль интенсивности излучения. Кривая профиля отражает расположение света, испускаемого сердцевиной и оболочкой, а также шума, внесенного оптическими и электронными составляющими системы. При оценке потерь волокна ленточного ВОК необходимо обеспечить достаточную разрешающую способность около 0,1 элемента изображения. Чтобы преодолеть пиксельный барьер и достигнуть необходимого разрешения,

разработан метод свертки изображения. Являясь фильтром низкой частоты (Гауссовский фильтр [4]), примененным в пространственной области, свертка может быть представлена как непрерывная пространственная функция



а *б*

Рис. 4

$$S(x,z)=\sum_{i=-m}^{m}\sum_{j=-n}^{n} I(x+i,z+j)G(i,j,A,B), \tag{12}$$

$$G(i,j,A,B)=\frac{1}{1\pi\sqrt{AB}}\exp\left(-\frac{i^2}{4A}-\frac{j^2}{4B}\right), \tag{13}$$

где m и n определяют область выборки: A и B – параметры Гауссовского фильтра.

В y-проекции горячего изображения в центре волокна вдоль оси волокна можем получить основную деформацию как функцию оси z $f_{y\text{-}view}(z)$ в y-проекции. Используя подобную формулу, аналогично можем получить основную деформацию $f_{x\text{-}view}(z)$ в x-проекции. Имея функции основной деформации в двух осях координат можно вычислить потери сварного соединения Γ_{tot} из-за основной деформации в цифровой форме с применением теории соединения [2] для x-плоскости и y-плоскости соответственно, в пределах области сварного соединения (-L/2, L/2), рис.4, *а*

$$\Gamma_{tot}=\Gamma_x+\Gamma_y, \tag{14}$$

$$\Gamma_x=\frac{2C\Delta}{b^2\omega^2}\sum_{s}\left[\left|F_s-view(\beta_q-\beta_{1s})\right|^2\right]\frac{J_1^2(j_{1s}a/b)}{J_0^2(j_{1s})}, \tag{15}$$

$$\Gamma_y=\frac{2C\Delta}{b^2\omega^2}\sum_{s}\left[\left|F_s-view(\beta_q-\beta_{1s})\right|^2\right]\frac{J_1^2(j_{1s}a/b)}{J_0^2(j_{1s})}. \tag{16}$$

$$F(\beta)=\int_{-L/2}^{L/2} f(z)\exp[-i(\beta_q-\beta_{1s})z]dz \quad \beta=\beta_q-\beta_{1s}. \tag{17}$$

где a, b, и ω – радиусы сердцевины волокна, оболочки и моды соответственно; β_q и β_{1s} – константа распространения направляемой моды и оболочечной моды; $\Delta=(n_2-n_1)/n_1$, где n_1 и n_2 – показатели преломления оболочки и сердцевины; J_0 и J_1 – Бесселевы функции нулевого и первого порядка; j_{1s} – Бесселева функция для корня n-й степени первого порядка; $C=10\log e=4.34$.

Константы распространения могут быть рассчитаны по выражениям

$$\beta_q\approx\sqrt{n_2^2k^2-\frac{1}{a^2}-\frac{2}{u^2}}. \tag{18}$$

$$\beta_{1s} \approx \sqrt{n_1^2 k^2 - \left(\frac{j_{1s}}{b}\right)^2} \quad .k = 2\pi/\lambda. \tag{19}$$

Уравнение (18) может быть заменено преобразованием Фурье

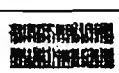
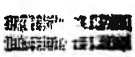
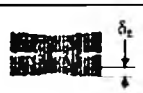
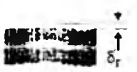
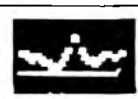
$$F(\beta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z)\exp(-i\beta_z)dz. \tag{20}$$

Метод оценки оптических потерь, основанный на изменении формы оболочки

Несмотря на то. что более чем 80 % типов ленточных волокон в мировом рынке могут быть обработаны методом изображения горячего волокна. существуют типы ленточных волокон или комбинации сварных соединений. для которых его использование затруднительно. Для этих случаев формула оценки потерь также может быть использована, однако необходимо найти способ определения функции основной деформации оси, не используя изображения горячего волокна.

Если произвести большое количество сварных соединений различных типов волокон. можно найти определенные отношения между деформацией оболочки и основной деформацией. Некоторые типичные отношения между основной деформацией и деформацией оболочки полученных в результате сварных соединений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип деформации	Форма оболочки перед соединением	Форма оболочки после соединения	Основная деформация	Типичная причина
А: смещение оси δ_A Б: деформация оси $\delta_B=\delta_b-\delta_A$				Грязное v-углубление или скрученное волокно
В: клиноподобное угловое смещение δ_C				Плохой скол или волокно, искривленное перед сколом
Г: угловое смещение вдоль оси δ_D				Выступ на конце при плохом сколе
Д: смещение радиуса δ_E				Слишком большой промежуток между концами или небольшое перекрытие
Е: изгиб при наложении δ_F				Слишком большое перекрытие или небольшое накладывание

Типичные диапазоны деформации оболочки перечислены в табл. 2 для каждого соответствующего типа деформации.

Таблица 2

Тип деформации оболочки и измеренная потеря	Максимум	Минимум	Среднее значение	Стандартное отклонение
А: смещение оси δ_A	1.4 *мкм*	0.0 *мкм*	0.4 *мкм*	0.2 *мкм*
Б: деформация оси $\delta_B=\delta_b-\delta_A$	13,7 *мкм*	0,1 *мкм*	2,3 *мкм*	1.9 *мкм*
В: клиноподобное угловое смещение δ_C	6.7	0.0	0,9°	0.7°
Г: угловое смещение вдоль оси δ_D	0,6°	0,0°	0,3°	0,1°
Д: смещение радиуса δ_E	8,3 *мкм*	-4,2 *мкм*	-0,5 мкм	0.01 *мкм*
Е: изгиб при наложении δ_F	6,0 *мкм*	0,0 *мкм*	0,6 мкм	0,4 *мкм*
Измеренная потеря	1,49 *дБ*	0.00 *дБ*	0,07 *дБ*	0,10 *дБ*

Из табл. 1 и 2, видно, что большинство основных типов деформации можно моделировать показательной функцией $f_i(z)$

$$f_e(z)=\begin{cases}\delta_l e^{\gamma_l z}; & z<0. \quad \gamma_l<0\\ \delta_r e^{\gamma_r z}; & z>0. \quad \gamma_r>0\end{cases}, \tag{21}$$

где r и l – индексы, которые обозначают деформации по двум ортогональным проекциям, δ и γ – описывают величину и искривление основной деформации соответственно.

Заменяя деформацию функцией $f_e(z)$ в уравнении (20), можно получить квадрат модуля коэффициента передачи для большинства случаев, кроме большого искривления угла:

$$|F(\beta)|^2=\frac{(\delta_l+\delta_r)^2\gamma^2+(\delta_l-\delta_r)\beta^2}{(\gamma^2+\beta^2)^2}. \tag{22}$$

где $\gamma=\gamma_l=\gamma_r$.

Используя уравнения (16) и (22) при $\delta=\delta_l=-\delta_r$, $\gamma=\gamma_l=\gamma_r$, можно определить типовое соотношение между оптическими потерями сварного соединения и основными типами деформации в виде

$$\Gamma=c(\gamma,\beta)\delta^2/\omega^2, \tag{25}$$

где $\omega>3$.

Коэффициент $c(\gamma,\beta)$ определен изгибной деформацией γ и параметром волокна β. Коэффициент потерь для различных типов деформации описывается приведенными ниже выражениями. Для деформации типа А и Б:

$$c(\gamma,\beta)=\frac{8C\Delta}{b^2}\sum_{\nu}\frac{\beta^2}{(\gamma^2+\beta^2)^2}\frac{J_1^2(j_{1\nu}a/b)}{J_0^2(j_{1\nu})}. \tag{26}$$

для деформации типа В, Г и Д:

$$c(\gamma,\beta)=\frac{8C\Delta}{b^2}\sum_{\nu}\frac{\gamma^2}{(\gamma^2+\beta^2)^2}\frac{J_1^2(j_{1\nu}a/b)}{J_0^2(j_{1\nu})}. \tag{27}$$

Коэффициент потерь может быть приближен функцией

$$c(\gamma_i)\approx c(\gamma_i,\beta|_{\omega=4.5}), \tag{28}$$

для $i=A,B,\ldots,F$ и $4\le\omega\le5$

Отношение между величиной деформации δ и смещение от δ_A до δ_F определяется выражением

$$\delta=k_i\delta_i. \tag{29}$$

Полные потери сварного соединения могут быть получены из выражения

$$\Gamma_{sobl}\le\frac{1}{\omega^2}\sum_{i=A}^{I}k_i c(\gamma_i)\delta_i^2, \tag{30}$$

для x-плоскости или y-плоскости.

Методика проведения эксперимента

Чтобы определить параметры m, n, A, и B в уравнении (13) и $k_i c(\gamma_i)$ в уравнении (30) использовалась прикладная программа Tech Sight, разработанная на кафедре ТАПР Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Схема алгоритма обработки изображения сварного соединения показана на рис. 5.

Изображения из массива данных сварных соединений загружаются в программу обработки изображения Tech Sight. Модуль ввода информации находит массив интенсивностей точек изображения, находящихся в узлах координатной сетки матричного фотоприемника и представляет их в качестве таблицы.

В загруженных изображениях из-за влияния различных помех сердцевина не имеет четких границ, что может привести к значительным погрешностям дальнейших вычислений, поэтому проводят предварительную обработку изображения с целью исключения шумовых компонентов, а также удаления фоновой составляющей, которая не несет положительной информации и является источником дополнительной погрешности.

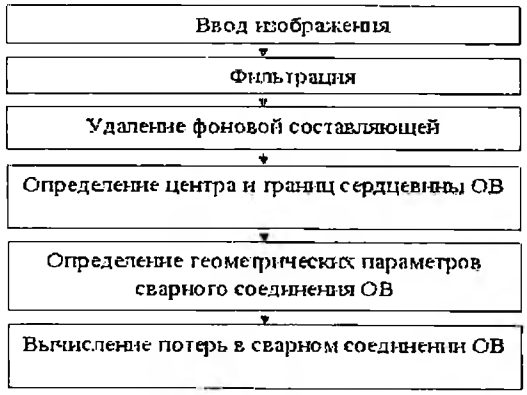


Рис. 5

После предварительной обработки измеренного изображения можно вычислять необходимые геометрические параметры сварного соединения, а затем и вносимые потери.

Результаты экспериментальных исследований

Для оценки оптических потерь в мире широко используются критерии точности Bellcore [3], приведенные в табл. 3. Они определяют 90% и 100 % границы требований.

Таблица 3

Допустимые потери	Оценка диапазона			
	Требуемая		Полученная	
	90%	100%	90%	100%
≤0,40 *дБ*	± 0,10 *дБ*	± 0,25 дБ	± 0,05 *дБ*	± 0,10 *дБ*
>0,40 *дБ*	± 25%	± 50%	± 15%	± 30%

В эксперименте были проверены четыре различных типа ленты с 12-ю волокнами и один тип ленты с 8-ю волокнами.

Чтобы получить оценку потерь сварного соединения, для каждого сварного соединения использовались горячие и холодные методы. Кроме того, эти два метода объединены для большей точности оценки. Потери, оцененные по горячему и холодному методам, обозначены как Γ_{hot} и Γ_{cold}, потери объединенного метода Γ_{comb} и определены для каждого сварного соединения:

$$\Gamma_{comb} = \max(\Gamma_{hot}, \Gamma_{cold}). \qquad (31)$$

Результаты эксперимента приведены в табл. 4.

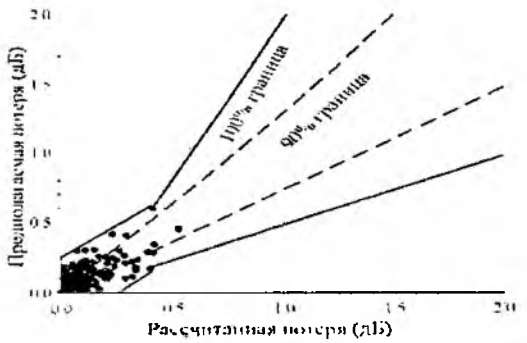
Таблица 4

	Тип волокна	Горячий метод	Холодный метод	Комбинированный метод
90% границы	OVD-12 (40 соединений)	95,96%	93,09%	93,90%
	MCVD-12 (20 соединений)	92,50%	91,20%	92,13%
	VAD-12 (40 соединений)	91,83%	88,38%	92,29%
	True-wav-12 (20 соединений)	88,17%	92,13%	92,13%
	VAD-8 (45 соединений)	93,23%	92,62%	93,23%
100% границы	OVD-12 (40 соединений)	99,36%	99,80%	100,00%
	MCVD-12 (20 соединений)	99,50%	99,54%	100,00%
	VAD-12 (40 соединений)	99,35%	99,38%	99,58%
	True-wav-12 (20 соединений)	96,24%	99,54%	99,54%
	VAD-8 (45 соединений)	97,23%	99,08%	99,69%

Горячий метод оказался не очень эффективным для волокна типа True-wave, потому что тонкая сердцевина имеет плохое разрешение в горячем изображении.

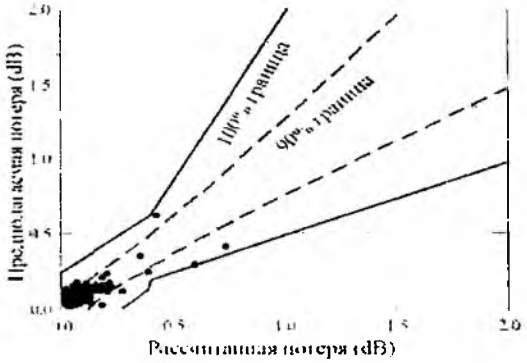
На рис. 6, 7 изображена детализированная информация об оценки потерь волокна типа OVD, MCVD.

Требование Bellcore для точности оценки потерь представлены областями, сформированными пунктирными линиями и сплошными линиями. Чтобы соответствовать требованию 90 % точек должны находиться в области выделенной пунктирными линиями, и 100 % точек должны попасть в область, выделенную сплошными линиями. Сплошные линии требования Bellcore не прерывны, они преломляются при рассчитанных потерях, равных 0,4 *дБ*.



Волокно типа OVD

Рис. 6



Волокно типа OVD

Рис. 7

Выводы

Предложена методика оценки оптических потерь при сварном соединении. Разработанная методика содержит схему алгоритма, по которому произведены расчеты оптических потерь экспериментально полученных сварных соединений.

В результате исследования выявлено, что метод холодного изображения имеет точность и стабильность подобную методу горячего изображения. Однако ни горячий, ни холодный, метод не отвечают 100 %-му требованию Bellcore.

Объединенный метод дает возможность обеспечить достаточную точность оценки оптических потерь сварного соединения для большинства типов волокон, которую требуют критерии точности оценки потери Bellcore.

Список литературы: 1. *Иванов А. Б.* Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус системс. 1999. 2. *Zheng W. S.* Loss estimation for fusion splices of single-mode fibers. oc. Int. SPIE'91 Conf., Boston, MA, Sept 1991.vol. 1580, pp.380-390. 3. *Katagiri T. M.* Direct core observation method using thermal radiation of silica fiber with dopants. Japan: Electron. Commun. 1988, vol. 71, no. 11, pt 2, pp. 77 – 85. 4. *Bellcore*, Generic Requirements for Multi-Fiber Single-Mode Optical Splices and Splicing Systems. GR-1095-CORE, Issue 2, Nov. 1996.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.07.2008