

07;12

©1995 г.

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С КОГЕРЕНТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ

*А.П.Жилинский, Ю.А.Русанов, А.В.Шипилин*

Московский технический университет связи и информатики,

105855, Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 1 марта 1994 г.

В окончательной редакции 8 августа 1994 г.)

Теоретически и экспериментально исследован распределенный волоконно-оптический датчик на основе оптического гетеродинного интерферометра со слабокогерентным источником излучения, в котором используется межмодовая связь в двулучепреломляющих или изотропных двухмодовых световодах. Разность задержек распространения в двух модах до точки измерения компенсируется внешней оптической задержкой. Выполнены эксперименты, демонстрирующие распределенное измерение силы, действующей на световод, и квазираспределенное измерение температуры и электрического напряжения. Разрешение по длине составило менее 1 м при общей длине световода до 272 м.

### Введение

В последнее время большое внимание уделяется разработке и исследованию распределенных волоконно-оптических датчиков различных физических величин, в том числе механических сил, давления, температуры и т. д. [1-3]. В таких датчиках волоконный световод (ВС) является одновременно чувствительным элементом и линией связи с блоком регистрации. При этом каждая точка ВС чувствительна, а метод опроса позволяет разделять сигналы от разных точек с разрешением, определяемым качеством оптоэлектронной аппаратуры, параметрами ВС и источников излучения. Таким образом, предоставляется уникальная возможность измерять пространственное распределение физической величины с помощью одного чувствительного ВС.

Методы разделения сигналов можно разбить на три основные группы. Это — временное, частотное и когерентное разделение. К датчикам с временным разделением относятся традиционные оптические рефлектометры [1], поляризационные рефлектометры [1,4], датчики со встречным нелинейно-оптическим взаимодействием (комбинационное и бриллюэновское усиление, оптический эффект Керра) [5]. Все эти

устройства требуют применения мощных импульсных лазеров и чувствительных быстродействующих фотоприемников. Методы частотного разделения, в частности частотная рефлектометрия [6] и измерение межмодовой связи с применением частотной модуляции [7], основаны на интерференции опорного пучка с сигнальным, рассеянным в ВС или прошедшим в другой моде ВС. Осуществляя частотную модуляцию оптической несущей, достигают того, что частота интерференционных биений однозначно связана с расстоянием до точки измерения на ВС. Для этих методов требуются высококогерентные лазеры с возможностью широкой перестройки частоты излучения изменением тока инжекции. В методах когерентного разделения [8,9] используется слабокогерентный источник света. При этом сигнал интерференции, соответствующий данной точке измерения, имеет место только при совпадении разности плеч приемного интерферометра и измерительного, образованного, например, разными ВС или двумя модами одного ВС. Достоинствами таких методов являются высокий уровень оптического сигнала по сравнению с рассеянным светом и возможность опроса чувствительного ВС относительно медленным сканированием, что снимает требование высокого временного разрешения фотоприемника. Эти же основные методы применяются и для квазираспределенных датчиков, т. е. таких, которые имеют ограниченное число дискретных чувствительных элементов, распределенных вдоль одного ВС.

В настоящей работе исследуется датчик с когерентным разделением, основанный на измерении межмодовой связи в ВС, возникающей в результате внешнего механического воздействия.

Ниже излагаются результаты исследований датчика с различными ВС, как двулучепреломляющими, так и изотропными двухмодовыми, а также исследуется возможность квазираспределенного измерения с его помощью температуры и электрического напряжения.

### Принцип измерения

Схема распределенного волоконно-оптического датчика с когерентным разделением, основанного на межмодовой связи в ВС, представляет собой для каждой точки измерения интерферометр Маха-Пендера со слабокогерентным источником излучения. Один из двух пучков, на которые делится излучение, сразу вводится в "медленную" моду ВС, а другой задерживается с помощью оптической линии задержки (ОЛЗ) и затем вводится в "быструю" моду. Это могут быть поляризационные моды двулучепреломляющего ВС или моды  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  изотропного ВС. На выходе ВС установлены модовый фильтр и фотоприемник. Воздействие на ВС приводит к связи двух мод, описываемой уравнениями [11],

$$\begin{aligned}\frac{da_1}{dz} &= -iN_{11}a_1 - iN_{12}a_2, \\ \frac{da_2}{dz} &= -iN_{21}a_1 - iN_{22}a_2,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $a_1(z)$ ,  $a_2(z)$  — зависящее только от продольной координаты  $z$  коэффициенты разложения полей по ортонормированным модовым функциям невозмущенного световода ( $\mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{h}_1$ ) и ( $\mathbf{e}_2$ ,  $\mathbf{h}_2$ );  $N_{ij}$  — коэффициенты модовой связи.

Для поперечной силы, действующей на двулучепреломляющий ВС, коэффициенты равны [9]

$$N_{11} - N_{22} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ B - C \frac{4F}{\pi b} \cos(2\theta) \right],$$

$$N_{12} = N_{21} = -\frac{4F}{\lambda b} C \sin(2\theta), \quad (2)$$

где  $B$  — двулучепреломление ВС,  $C = c_1 - c_2$  — фотоупругая постоянная,  $b$  — внешний радиус ВС,  $\theta$  — угол между осью анизотропии ВС и направлением силы,  $F$  — сила на единицу длины ВС.

В случае, если сила постоянна на участке ВС длиной  $d$  и равна 0 вне его, решая систему (1), получим для сигнала фотодетектора

$$S \sim (1 - h)a_1^2(0) + ha_2^2(0) + Ka_1(0)a_2(0)|\gamma_{12}(\tau)| \cos(\Omega t + \Delta\phi), \quad (3)$$

где  $h$  — коэффициент связи по интенсивности,

$$K = \frac{C_0 N_{12}}{D^2} (\cos 2Dd - 1), \quad C_0 = \frac{N_{22} - N_{11}}{2},$$

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{(N_{22} - N_{11})^2 + (2N_{12})^2}, \quad (4)$$

$\Omega$  и  $\Delta\phi$  — разности частот и фаз;  $\gamma_{12}(\tau)$  — комплексная степень когерентности, зависящая от разности времен прохождения  $\tau = z(1/v_1 - 1/v_2) - \delta\tau$ ;  $v_1, v_2$  — групповые скорости света в модах 1 и 2;  $\delta\tau$  — задержка ОЛЗ;  $|\gamma_{12}(\tau)|$  достигает максимума при  $\tau = 0$  или  $\delta\tau_m = z(1/v_1 - 1/v_2)$ .

Таким образом, по  $\delta\tau_m$  можно определить расстояние  $z$ , а сканируя ОЛЗ, опрашивать весь чувствительный ВС.

Разрешение по длине ВС для случая гауссовского спектра источника излучения и материала ОЛЗ, имеющего показатель преломления  $n_2$  [12],

$$\Delta z = \frac{\tau_c}{\tau_p} \sqrt{1 + \left( \frac{2\lambda^2}{\pi c \tau_c^2} \right)^2 \left( \frac{d\tau_p}{d\lambda} + \frac{\lambda \tau_p}{n_2} \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} \right)^2} z^2, \quad (5)$$

где  $\tau_c$  — время когерентности источника излучения,  $\tau_p$  — межмодовая дисперсия ВС.

Таким образом, в общем случае разрешение ухудшается с увеличением расстояния до точки измерения. Это является следствием зависимости межмодовой дисперсии ВС от длины волны. При соответствующем подборе материала ОЛЗ или для воздушной ОЛЗ при выборе ВС, удовлетворяющего условию  $d\tau_p/d\lambda = 0$ , можно достичь наилучшего и не зависящего от длины разрешения  $\Delta z = \tau_c/\tau_p$ .

Из выражений (2) и (4) следует, что для линейности зависимости выходного интерференционного сигнала датчика от действующей на ВС внешней силы необходимо выполнение условий  $N_{12}, N_{11}, N_{22}$  и

$N_{22} - N_{11} \sim 2\pi B/\lambda$ . В этом случае внешнее воздействие не меняет длину межмодовых биений ВС  $L_b = \pi/D \sim B/\lambda$ . Соответственно сигнал датчика приблизительно равен

$$S_b \sim \frac{4FC L_b}{\pi b} \left( \cos \frac{2\pi d}{L_b} - 1 \right). \quad (6)$$

При больших силах воздействия длина биений уже зависит от силы и зависимость  $S_b(F)$  становится нелинейной, а затем и немонотонной.

Описываемый датчик позволяет измерять распределение поперечных механических сил (а также изгибов, кручения) вдоль ВС. Для измерения другой физической величины необходим преобразователь, в котором, например, создается пропорциональная ей сдвливающая ВС поперечная сила. Такого рода преобразователи применялись в поляризационных нераспределенных датчиках, например, в работах [13,14]. Для измерения электрического напряжения можно использовать преобразователь на основе пьезокерамики. Когда к пластине пьезокерамики прикладывается напряжение  $U$ , происходит увеличение ее размера на  $d_p U$ , где  $d_p$  — пьезоэлектрический модуль. Следовательно, ВС, помещенный между такими пластинами, сжимается поперечной силой, пропорциональной  $U$ . Аналогично может быть измерена температура. ВС в этом случае сжимается вставкой из материала с большим температурным коэффициентом линейного расширения.

Другой подход к квазираспределенному измерению температуры может быть основан на использовании зависимости межмодовой дисперсии ВС от температуры. Особенно сильно эта зависимость проявляется для двулучепреломляющих ВС, в которых, как известно [15], оптическая анизотропия создается за счет остаточных напряжений в сердцевине, возникающих вследствие разности температурных коэффициентов расширения материалов оболочки и напрягающих элементов или сердцевины и оболочки. Следуя [16], для небольшого интервала температур можно выразить зависимость поляризационной дисперсии от температуры для ВС с большими внутренними напряжениями в виде

$$\frac{dT_p}{dT} = \frac{\tau_p(T)}{T - T_s}, \quad (7)$$

где  $T_s$  — температура размягчения материала ВС.

Располагая устройства, создающие межмодовую связь, вдоль ВС на расстоянии  $l_T$  друг от друга, получим квазираспределенный датчик температуры, в котором чувствительным элементом является вся длина  $l_T$ , а температура определяется по разности задержек между максимумами сигнала интерференции  $\delta\tau$ . При условии  $|T - T_0| \ll |T - T_s|$ , где  $T$  — измеряемая температура,  $T_0$  — начальное значение, для которого зафиксирована задержка между максимумами  $\delta\tau_0$ ,

$$T = \frac{T_s(\delta\tau - \delta\tau_0)}{\tau_p(T_0)l_T} + T_0. \quad (8)$$

Экспериментальные исследования датчика выполнялись с помощью установки, схема которой приведена на рис. 1 [17].

Излучение от источника 1, в качестве которого использовались полупроводниковые инжекционные лазеры с длиной волны  $\lambda = 0.8-0.86$  мкм, шириной спектра несколько нанометров и мощностью несколько милливольт, коллимировалось с помощью объектива и делилось на два пучка на анизотропном акустооптическом модуляторе (АОМ) 2. С помощью АОМ, работающего в брегговском режиме, осуществлялся также сдвиг оптической частоты и поворот плоскости поляризации на  $\pi/2$  в отклоненном пучке. При работе с изотропными ВС, когда поворот не требовался, в этот пучок устанавливалась полуволновая пластина 4. Одно из плеч интерферометра содержало сканируемую ОЛЗ 3 на основе прецизионного оптического столика, перемещаемого вручную или электромотором. Пучки сводились на светоделительном зеркале 5 и затем с помощью микрообъектива 6 вводились в ВС 7. При работе с двулучепреломляющим ВС ось его анизотропии ориентировалась вдоль направления поляризации в одном из пучков, тем самым обеспечивался ввод излучения из каждого плеча интерферометра в одну из поляризационных мод. Для изотропного ВС преимущественного ввода излучения из одного плеча в моду  $LP_{01}$ , а из другого в моду  $LP_{11}$  удавалось добиться подбором углов ввода. Излучение с выхода ВС через модовый фильтр 11, для изотропного ВС, представлявший собой диафрагму, а для двулучепреломляющего поляризатор, поступало на фотоприемник 12. Сигнал с фотоприемника подавался на селективный усилитель 13, выделявший частоту генератора, управлявшего АОМ (прибор SMV) и далее на вход Y двумерного регистратора (запоминающий осциллограф или самописец) 14. На вход X подавалось напряжение, пропорциональ-

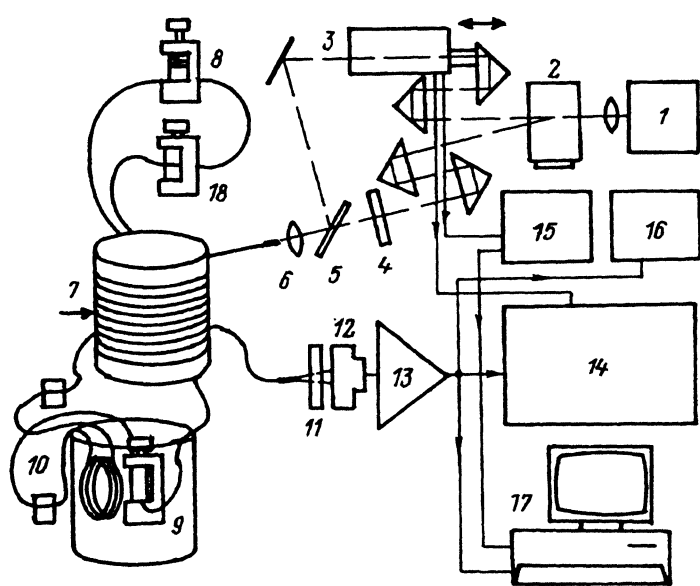


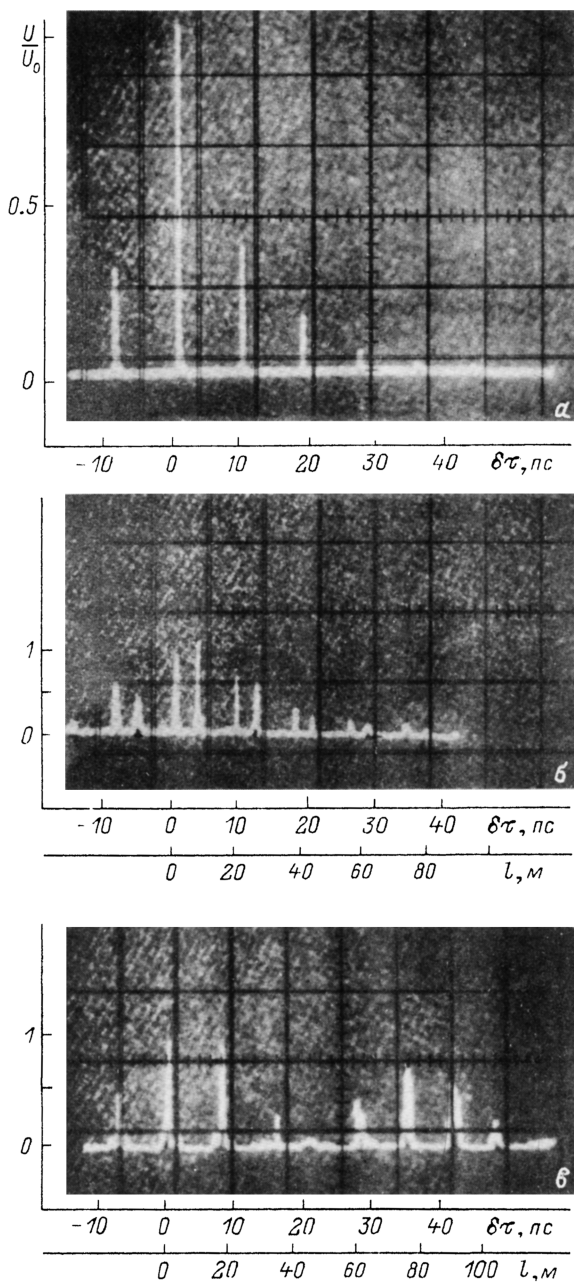
Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Номер ВС	Диаметр, мкм			$\lambda_c$ , мкм	$L_b$ , мм	$\tau_p$ , нс/ккм	$L$ , м	$\Delta z$ , см	
	сердцевины		оболочки					$z = 1 \text{ м}$	$z = L$
	$a$	$b$							
1	8.9	8.9	124	1.12	0.6	4.3	47	5.3	
2	8	8	125	1.1		4	1.6	6	
3	9	9	125	1.2		2.5	4.7	9	
4	7	7	125	0.93	0.5	1.6	2	14	
5	2.3	4.4	80	0.76	10	0.46	272	50	110
6	2.7	5.3	81.5	0.73	17	0.2	120	120	160
7	5	5	120	<0.8	3	0.92	120	25	25
8	6.6	6.6	125	0.75	8	0.23	10	100	

ное положению ОЛЗ. Для более точных измерений ОЛЗ снабжалась цифровым пересчетным устройством 15 с шагом 1 мкм, а выходной сигнал датчика измерялся милливольтметром 16. Ряд экспериментов был выполнен с применением персональной ЭВМ 17, связанной с селективным усилителем через АЦП и синхронизируемой с выхода пересчетного устройства [18]. Параметры ВС, применявшихся в экспериментах, приведены в таблице. ВС 1-4 — это изотропные, одномодовые для  $\lambda = 1.3$  мкм, в них на  $\lambda = 0.8 - 0.86$  мкм могут распространяться две  $LP$ -моды. ВС 5 и 6 — это двулучепреломляющие с эллиптической сердцевинной, ВС 7 — типа ПАНДА, а ВС 8 — с напрягающей эллиптической оболочкой. Межмодовая дисперсия ВС измерялась в ходе экспериментов. Световоды наматывались в один слой на барабан диаметром 0.32 м таким образом, что было возможно воздействовать на участок одного из витков, не возмущая остальные. От основного ВС были отведены отдельные петли для исследования зависимости сигнала от силы, измерения температуры и электрического напряжения. Для измерения зависимости сигнала датчика от поперечной силы применялся калиброванный пресс 8. Преобразователь электрического напряжения 18 представлял собой две пьезокерамические пластины, зажатые струбиной, между которыми помещался участок ВС. Исследовались преобразователи температуры двух типов. Первый 9 содержал вставку из полиметилметакрилата, обладающего большим температурным коэффициентом линейного расширения. Второй 10 состоял из двух устройств, создающих небольшую межмодовую связь в ВС, и участка ВС между ними, свитого в небольшую катушку. Температура определялась по разности задержек между максимумами сигналов. Преобразователи помещались при измерениях в воду заданной температуры.

### Экспериментальные результаты

Сигнал датчика как функция задержки ОЛЗ в случае использования лазера ИЛПН-112Б при токе накачки, близком к пороговому, без воздействия на ВС приведен на рис. 2, а. Этот сигнал возникает за счет связи мод или неидеального разделения мод на входе ВС. Приведенная зависимость имеет вид автокорреляционной функции излучения лазера. Наличие отдельных пиков обусловлено многомодовым спектром излучения лазера. На рис. 2, а и б показаны сигналы при



**Рис. 2.** Выходной сигнал датчика.

*a* — без воздействия на ВС, *б* — воздействие на расстоянии  $z = 8$ , *в* — 75 м.

воздействию на участки ВС 5 длиной  $d = 2$  мм на расстояниях  $z = 8$  и  $75$  м от входа ВС соответственно. Межмодовая связь, вызванная механическим воздействием, приводит к появлению новых пиков сигнала, которые повторяют форму автокорреляционной функции (вообще говоря, искаженную за счет зависимости межмодовой дисперсии от  $\lambda$ ) и имеют максимум при  $\delta\tau = z(1/v_1 - 1/v_2)$ .

Измеренная для ВС 5 зависимость амплитуды выходного сигнала от поперечной силы, действующей на ВС, представлена на рис. 3. Так же показаны зависимости (кривые 2-4), рассчитанные по формулам (2)-(4). Экспериментальная кривая 1 соответствует  $b = 40$  мкм, т.е. радиусу ВС без полимерного покрытия, кривая 2 —  $b = 75$  мкм с учетом покрытия, а кривая 3 получена при подгонке параметра  $4C/\pi b = 3.8 \cdot 10^{-12}$  м/Н. Графики демонстрируют качественное совпадение экспериментальных данных с теорией. Количественные различия могут быть объяснены следующими соображениями. При выводе формул (2) предполагают, что сжимающие ВС силы приложены в двух диаметрально противоположных точках по сечению ВС, а материал ВС считается однородным, следовательно, формулы строго применимы только для малых деформаций ВС без покрытия. Эксперимент проводился с ВС в полимерном покрытии, при этом происходит существенная деформация покрытия, сила распределена по поверхности ВС и межмодовая связь оказывается меньшей.

Аналогичные данные получены для других типов двулучепреломляющих ВС. При выборе длины участка воздействия, обеспечивающей максимум сигнала, чувствительность к механической силе оказывается выше у ВС с малым двулучепреломлением, а диапазон линейности шире у ВС типа ПАНДА, обладающего высоким двулучепреломлением. Для изотропных двухмодовых ВС получены в основном качественные результаты. Чувствительность к поперечной силе у них намного ниже, чем у двулучепреломляющих ВС. В случае, если внешнее воздействие создает серию изгибов с периодом, близким к длине межмодовых биений, чувствительность существенно повышается. В

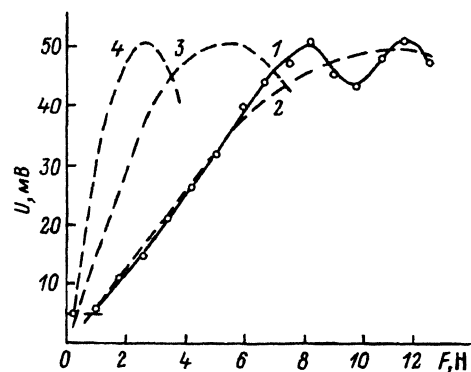


Рис. 3. Зависимость сигнала датчика от поперечной силы.

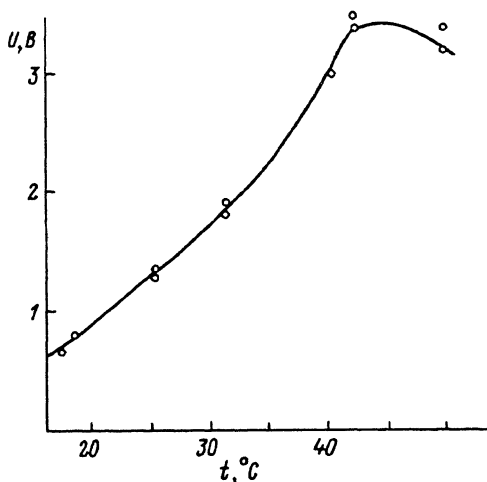


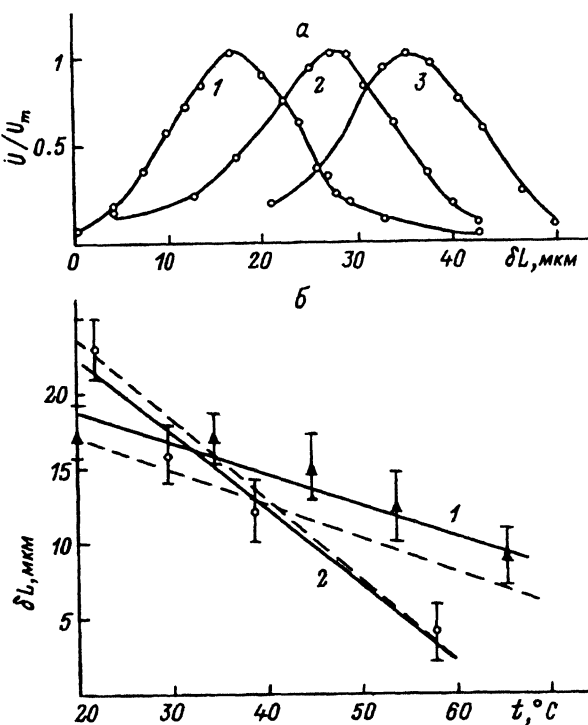
Рис. 4. Зависимость сигнала датчика от температуры при использовании преобразователя первого типа и ВС 5.



эксперименте при воздействии на ВС решеткой, создающей 7–8 изгибов, показано увеличение сигнала примерно на порядок по сравнению с одиночным изгибом.

Для оценки величины  $d\tau_p/d\lambda$  и ее влияния на разрешение датчика измерялась полуширина центрального пика зависимости сигнала от  $\tau$  по уровню  $1/e$  при воздействии в разных точках по длине ВС. Ухудшение разрешения  $\Delta z$  с ростом  $z$  видно из экспериментальных результатов, приведенных в последних двух графах таблицы. Определенные по этим данным значения  $d\tau_p/d\lambda$  оказались равными  $0.3 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$  для ВС 5 и  $0.4 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$  для ВС 6. При длине ВС 7 (типа ПАНДА) до  $120 \text{ м}$  уширения центрального пика не наблюдалось в пределах погрешности эксперимента. Это показывает, что основной вклад в зависимость  $\tau_p$  от  $\lambda$  вносит геометрический фактор.

На рис. 4 показан пример зависимости выходного сигнала от температуры при использовании преобразователя первого типа. Динамический диапазон и погрешность измерений зависят от материала, формы, размеров вставки. Добиться лучшей линейности можно, очевидно, применяя тщательно обработанные вставки из более твердого материала. Для данного варианта преобразователя (ВС 5, вставка из ПММА длиной  $12 \text{ мм}$ , длина воздействия на ВС около  $2 \text{ мм}$ ), как видно из рисунка, диапазон измерений может составить  $0\text{--}40^\circ\text{C}$ , а погрешность около  $1^\circ\text{C}$ .



**Рис. 5.**  
*a* — смещение центрального пика сигнала при изменении температуры для ВС 7: 1 —  $t = 21$ , 2 — 43, 3 —  $65^\circ\text{C}$ ; *b* — зависимость положения центрального пика сигнала от температуры: 1 — ВС 5, 2 — ВС 7

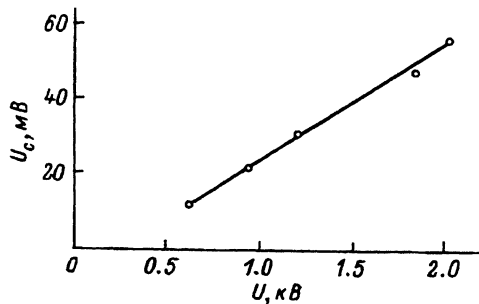


Рис. 6. Зависимость сигнала датчика от электрического напряжения на преобразователе.

Были проведены эксперименты по измерению температуры вторым описанным выше способом с помощью ВС 5 и 7. Длины измерительных участков ВС составляли соответственно 5.1 и 5.6 м. На рис. 5, а показано смещение положения центрального пика по шкале  $\delta\tau$  при измерении температуры для ВС 7, а на рис. 5, б — зависимость положения максимума от температуры для обоих ВС. На этом же рисунке штриховыми линиями показаны зависимости, рассчитанные теоретически по формуле (7). При этом  $T - T_s$  принималась равной 1000 К для ВС 5 ( $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ ) и 800 К для ВС 7 ( $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_5$ ) [16]. Оценка  $d\tau_p/dT$  из эксперимента дает  $0.53 \pm 0.03$  пс/м · К для ВС 5 и  $1.04 \pm 0.1$  пс/м · К для ВС 7. Теоретические значения равны соответственно 0.47 и 1.12 пс/м · К. Погрешность измерения температуры составила примерно 3–5 °С для указанных длин измерительных участков ВС.

Эксперименты по квазираспределенному измерению электрических напряжений проведены с использованием преобразователя на основе двух пластин пьезокерамики толщиной 5 мм и ВС 6. Длина воздействия составляла 4 мм. Результат измерения приведен на рис. 6. Зависимость в данном случае линейна в диапазоне 100–2500 В, а погрешность измерений составляет примерно 10%.

### Заключение

Таким образом, выполненные в работе исследования демонстрируют широкие возможности распределенных волоконно-оптических датчиков с когерентным разделением сигналов и использованием межмодовой связи. Показана возможность измерения распределения механической силы вдоль ВС с разрешением 0.1–1 м. В случае, если длина области воздействия и направление действия силы неизвестны, такой датчик может быть, очевидно, использован для определения места механического воздействия, например, в различных сигнальных устройствах. Для более точных измерений на основе такого датчика может быть построен квазираспределенный датчик, состоящий из ВС и ряда измерительных преобразователей. В условиях выполненных экспериментов измерялись механические силы в диапазоне 0.1–20 Н, температура в диапазоне 0–70 °С и электрическое напряжение 100–2500 В.

Диапазон измерения этих физических величин может быть существенно шире: Кроме того, аналогично можно измерять многие другие величины (например, магнитное поле и электрический ток, гидростатическое давление, скоростной напор и т. д.). Таким образом, на основе одного световода может быть построена многофункциональная измерительная система.

Хотя эксперименты проводились с ВС длиной до 272 м, полученные результаты позволяют надеяться, что без существенного ухудшения параметров можно применять ВС длиной по крайней мере до 10 км.

### Список литературы

- [1] *Rogers A.J.* // Phys. Rep. 1988. Vol. 169. N 2. P. 99–143.
  - [2] *The Distributed Fibre Optic Sensing Handbook* / Ed. J.P.Dakin. New York, 1990. 210 p.
  - [3] *Жилинский А.П., Русанов Ю.А., Шипилин А.В.* // II Всесоюз. конф. “Физические проблемы оптической связи и обработки информации”. Севастополь, 1991. С. 8–9.
  - [4] *Rogers A.J.* // Appl. Opt. 1981. Vol. 20. P. 1060–1074.
  - [5] *Valis T., Turner R.D., Measures R.M.* // Appl. Opt. 1989. Vol. 28. N 11. P. 1984–1990.
  - [6] *Kingsley S.A.* // IEE Colloq. Distr. Opt. Fibr. Sen. London. P. 7/1–7/6.
  - [7] *Franks R.J., Torruellas W., Youngquist R.C.* // Opt. Acta. 1986. Vol. 33. N 12. P. 1505–1518.
  - [8] *Optical Fiber Sensors. Systems and Applications* / Ed. B.Culshaw, J.Dakin. 1989. Vol. 2.
  - [9] *Tsubokawa M., Higashi T., Negishi Y.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 1. P. 166–173.
  - [10] *Chen S., Giles I.P., Fahadiroushan M.* // Opt. Lett. 1991. Vol. 16. P. 342–344.
  - [11] *Marcuse D.* // Bell Sys. Tech. J. 1975. Vol. 54. N 6. P. 985–995.
  - [12] *Жилинский А.П., Русанов Ю.А., Шипилин А.В.* II Всесоюз. конф. “Физические проблемы оптической связи и обработки информации”. Севастополь, 1991. С. 22.
  - [13] *Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В.* Модуляционные эффекты в волоконных светодиодах и их применение. М., 1991. 152 с.
  - [14] *Rajkumar N., Jagadaeesh Kumar V., Sankaran P.* // Appl. Opt. 1993. Vol. 32. N 7. P. 1225–1228.
  - [15] *Kaminov I.* // IEEE J. Quant. Electr. 1981. Vol. QE-17. N 1. P. 18–22.
  - [16] *Sakai J.-I., Kimura T.* // IEEE J. Quant. Electr. 1982. Vol. QE-18. N 11. P. 1899–1909.
  - [17] *Jilinsky A.P., Nalivaiko V.P., Rusanov Ju.A., Shipilin A.V.* // 1<sup>st</sup> Intern. Sov. Fib. Opt. Conf. ISFOC’91. Leningrad, 1991. P. 300–304.
  - [18] *Jilinsky A.P., Rusanov Ju.A., Shipilin A.V.* // 3<sup>th</sup> Intern. Sov. Fib. Opt. Conf. ISFOC’93. St. Petersburg, 1993. P. 292–295.
-