

**УДК 681.7.068**

**Волоконно-оптические датчики на основе инжекционного лазера с высокочастотной модуляцией / С.А. Егоров, Ю.А. Ершов // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 53-58.**

**Рассмотрен способ построения волоконно-оптических датчиков физических величин на основе инжекционного полупроводникового лазера с высокочастотной модуляцией инжекционного тока; приведены характеристики датчиков температуры и линейного перемещения. Библ. 9 назв. Ил. 4.**

С. А. Егоров, Ю. А. Ершов  
(НПО "Свет", Москва)

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Волоконно-оптические датчики (ВОД) являются устройствами, перспективными для измерения различных физических параметров: перемещения, давления, температуры и т.д. Своей нечувствительностью к электромагнитным помехам, пассивным способом измерения, пожаро-взрывобезопасностью ВОД выгодно отличаются от традиционных аналогов [1].

В основу построения ВОД положено измерение пути распространения света в оптическом тракте. При этом воздействие различных физических величин преобразовывается в линейное перемещение либо используется зависимость постоянной распространения света в волокне от внешних условий. Наибольшую чувствительность обеспечивают ВОД интерференционного типа. Однако в них, как правило, используются одномодовые световоды с вынужденным двулучепреломлением и требуются стабилизированные источники излучения с узкой спектральной линией, что сильно усложняет конструкцию таких приборов. Кроме того, диапазон однозначных измерений интерференционных ВОД очень мал. Методика подсчета интерференционных полос (максимумов или минимумов) приводит к расширению диапазона и нечувствительна к паразитному изменению потерь в системе, но отсутствие "памяти" при выключении питания значительно сужает область ее применения. Другой подход заключается в дальнейшем развитии методов оптической рефлектометрии. Применение оптических рефлектометров позволяет, с одной стороны, снизить требования к отдельным компонентам таких устройств, а с другой, увеличить диапазон измерений на несколько порядков.

Рассмотрим различные варианты построения приборов такого типа.

1. Оптическая рефлектометрия с временным разделением. Источник излучает короткие импульсы света и непосредственно измеряется время распространения сигнала по волоконно-оптическому тракту. В работах [2, 3] было достигнуто пространственное разрешение порядка 10 мкм в волокне, а также продемонстрированы ВОД давления и температуры, основанные на регистрации изменения оптической длины световолокна. Однако при этом использовалось уникальное оптоэлектронное оборудование пикосекундного диапазона, широкое применение которого нереально на сегодняшний день.

2. Когерентная оптическая рефлектометрия с временным разделением. Вариант обладает пространственным разрешением порядка 10 мкм, причем чувствительность метода пропорциональна спектральной ширине источника света [4]. Недостаток же метода состоит в использовании подвижных механических узлов, что может оказаться неприемлемым для решения многих задач.

3. Оптическая рефлектометрия с частотным разделением. В данном случае используется источник света с линейной частотной модуляцией несущей. Излучение идет по двум каналам: опорному и измерительному, а затем когерентно смешивается на фотоприемнике. В сигнале фототока присутствует спектральная компонента, частота которой является функцией разности оптических путей распространения света в двух каналах и скорости модуляции

источника (разностная частота). Разрешение данного метода достигает единиц микрометра [5], однако требования к стабильности и спектральным характеристикам источника излучения остаются высокими.

4. Модуляция интенсивности излучения источника ВЧ-гармоникой. Разность фаз двух продетектированных радиочастотных сигналов: опорного — непосредственно от источника, и измерительного — возвращенного из волоконно-оптического тракта, однозначно соответствует оптической длине тракта в диапазоне от  $-\pi$  до  $+\pi$ . При этом специальные требования к источнику излучения (высокая степень когерентности и стабильность) не предъявляются. В работе [6] сообщалось о ВОД линейного перемещения, построенном на этом принципе, однако чувствительность его ограничивалась частотой модуляции света — около 100 МГц.

Достижения в реализации высокоскоростных режимов работы полупроводниковых инжекционных лазеров (ИЛ) [7] позволяют эффективно их использовать при прямой модуляции тока накачки в гигагерцовой области. В настоящей работе мощность излучения ИЛ модулировалась на частоте вблизи 1 ГГц, что в сочетании с измерением разности фаз на уровне 0,1 угл. град. значительно улучшило характеристики и расширило диапазон применения таких ВОД.

В экспериментальной установке (рис.1) Ga Al As ИЛ помещался в широкополосный высокочастотный держатель. Это давало возможность осуществлять прямую глубокую модуляцию излучения лазера в диапазоне частот, превышающем 1 ГГц. В реальных устройствах для обеспечения высокой эффективности накачки ИЛ имеет смысл использовать реактивные резонансные согласующие схемы. Увеличение частоты модуляции больше указанного значения представляется нецелесообразным, поскольку приводит к заметному усложнению всего комплекса используемого оборудования.

Излучение лазера попадало в оптическую схему типа интерферометра Майкельсона, образованного полупрозрачным зеркалом ПЗ, микрообъективами  $M_1 \dots M_5$  и зеркалом З с высоким коэффициентом отражения, установленном на однокоординатном микропозиционере. В измерительном плече

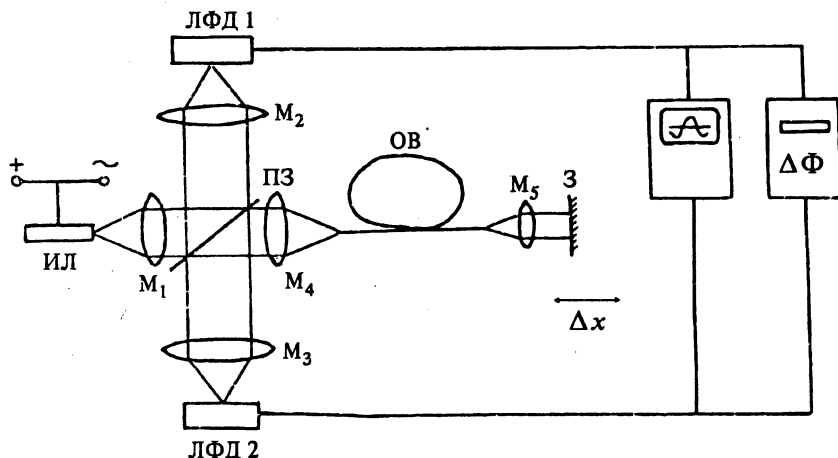


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  
Объяснение в тексте.

интерферометра помещалось оптическое волокно ОВ. В качестве приемников излучения использовались лавинные фотодиоды ЛФД-2А, сигнал которых регистрировался стробоскопическим осциллографом и измерителем разности фаз ФК2-29 с погрешностью измерений  $\pm 0,1$  угл.град. В этом случае разность фаз  $\Delta \Phi$  опорного и измерительного сигналов равна

$$\Delta \Phi = 2 \pi f (T_1 - T_2) + \Delta \Phi_0 = f / \nu_0 (L_1 \beta_1 - L_2 \beta_2) + \Delta \Phi_0,$$

где  $f$  — частота модуляции;  $\nu_0$  — частота оптической несущей;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — постоянные распространения света в каждом из плеч;  $T_1$ ,  $T_2$  и  $L_1$ ,  $L_2$  — времена и пути распространения сигнала в двух плечах соответственно;  $\Delta \Phi_0$  — дополнительная разность фаз, связанная с задержкой сигнала в фотодиодах. Последняя зависит от типа и конструкции фотодиода, от коэффициента лавинного умножения и, следовательно, от напряжения обратного смещения на фотоприемниках. Однако в нашем случае значение имеет не сама величина  $\Delta \Phi_0$ , а ее стабильность. Экспериментально наблюдались флуктуации  $\Delta \Phi$  при отсутствии ОВ в пределах погрешности измерителя разности фаз (т. е.  $\pm 0,1$  угл. град.) при стабильности источников питания фотодиодов на уровне  $10^{-4}$ . Это позволило считать  $\Delta \Phi_0$  постоянной величиной, а изменение  $\Delta \Phi$  связывать с изменением длины волоконно-оптического тракта

$$\frac{\partial (\Delta \Phi)}{\partial \xi} = \frac{f}{\nu_0} \left[ \beta_2 \frac{\partial L_2}{\partial \xi} + L_2 \frac{\partial \beta_2}{\partial \xi} \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\xi$  — внешний параметр: давление, температура и т.д.

На графике зависимости  $\Delta \Phi$  от  $\Delta x$  (рис. 2) сплошной линией показана аналитическая зависимость, построенная в соответствии с уравнением (1). Частота модуляции ИЛ равнялась 917,6 МГц. Погрешность определения положения зеркала составляет  $\pm 50$  мкм, что соответствует точности измерения разности времен распространения сигналов приблизительно  $\pm 0,2$  пс. Диапазон однозначных измерений равен  $\sim 15$  см.

В работе был исследован построенный по данной методике ВОД температуры. В этом случае фотодиод ФД2 устанавливался вместо зеркала З, а световолокно ОВ подвергалось нагреванию и охлаждению в термостате, обеспечивавшем однородное распределение температуры вдоль волоконно-оптического тракта. Результаты эксперимента приведены на рис. 3. Частота модуляции света равнялась 846,2 МГц, глубина

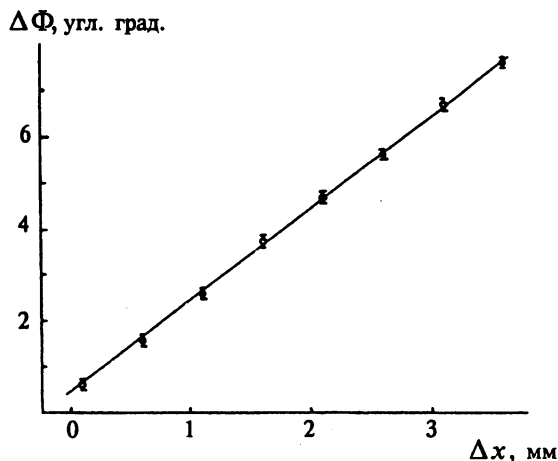


Рис. 2. Зависимость разности фаз  $\Delta \Phi$  опорного и измерительного сигналов от перемещения зеркала З на расстояние  $\Delta x$ .

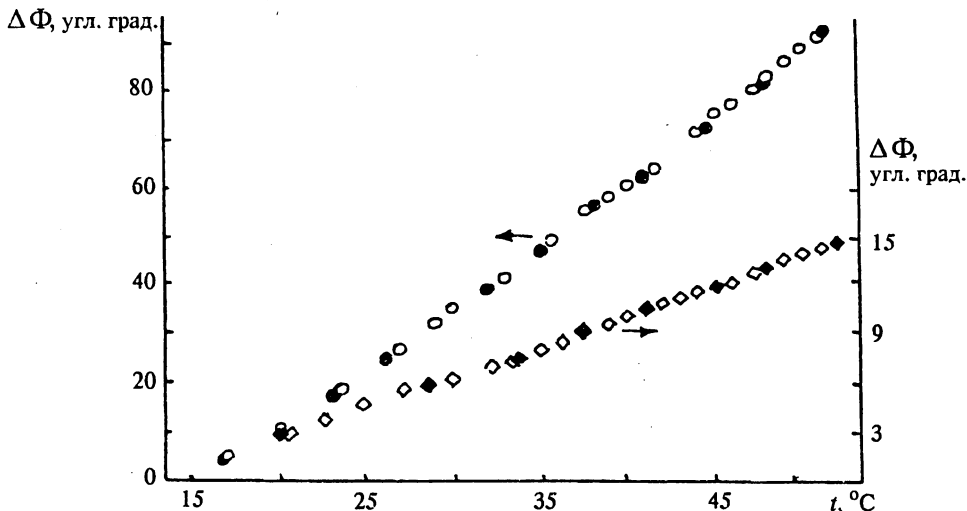


Рис.3. Зависимость разности фаз  $\Delta\Phi$  опорного и измерительного сигналов от температуры ОВ.

Объяснение в тексте.

модуляции — 0,7. В экспериментах использовалось ОВ различной длины и разных типов. Квадратики соответствуют многомодовому градиентному ОВ длиной 25 м, кружочки — одномодовому световоду длиной 260 м. Темные точки соответствуют результатам измерений при увеличении температуры, светлые — при уменьшении температуры.

Чувствительность ВОД возрастает с увеличением длины измерительного ОВ, однако при большом отличии длин  $L_1$  и  $L_2$  становится существенной паразитная девиация разности фаз  $\delta$  ( $\Delta\Phi$ ), связанная с нестабильностью частоты модуляции  $f$ . Из простого соотношения

$$\delta f / f = \delta(\Delta\Phi) c / [2\pi f(L_1 - L_2) n^*],$$

где  $n^*$  — эффективный показатель преломления, можно оценить требуемую стабильность радиочастотного генератора, исходя из максимально допустимой величины девиации  $\delta$  ( $\Delta\Phi$ ).

На рис. 4 показаны кривые, определяющие чувствительность такого ВОД в случае  $L_1 \ll L_2$  (когда измеряемым параметром  $\xi$  является температура). Гиперболы соответствуют вкладу от погрешности измерителя фаз  $\Delta\Phi_{\min}$  ( $\Delta\xi_{\min} = \Delta\Phi_{\min} / [\partial(\Delta\Phi) / \partial\xi]$ )

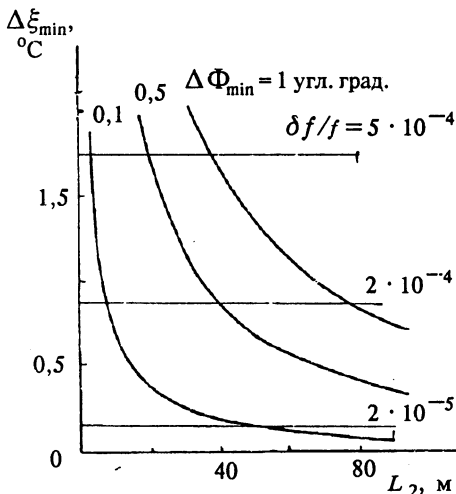


Рис.4. Зависимость минимальной абсолютной погрешности от длины измерительного ОВ.

при  $f = 10^9$  Гц,  $\nu_0 = 10^{14}$  Гц, а значение члена в квадратных скобках было взято из эксперимента равным  $\sim 10^{-2}$  угл.град. / °С, что хорошо согласуется с величиной, полученной ранее [8]. Уровни постоянного значения  $\Delta \xi_{\min}$  отвечают различной величине стабильности генератора модулирующего сигнала  $df/f$ .

Рисунок 4 дает возможность оценить параметры ВОД и требования к его отдельным элементам для получения заданной точности измерения  $\xi$ . Используемый в элементах генератор радиочастотного модулирующего сигнала имел кратковременную стабильность  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ . Это приводило к погрешности  $\delta(\Delta \Phi) \approx \pm 0,4$  угл. град. и, соответственно, разрешению по температуре  $\pm 0,2$  °С для ОВ длиной 260 м. Динамический диапазон подобного датчика составляет  $\sim 30$  дБ. Включение в опорное плечо отрезка ОВ таких же, как в измерительном плече, типа и длины позволяет значительно снизить требования к стабильности частоты модуляции, а кроме того, устранить другие факторы, влияющие на характеристики измерительного ОВ, и увеличить динамический диапазон.

Исследования показали, что градиентные световоды очень чувствительны к условиям ввода в них излучения, т.е. преимущественному возбуждению той или иной группы мод. Это объясняется тем, что временная разность  $\delta \tau$  в распространении световых лучей с модами наименьшего и наибольшего порядка для градиентных волокон становится заметной по сравнению с разрешением метода. Действительно, в нашем случае было измерено  $\delta \tau$  при селективном возбуждении мод в градиентном световолокне длиной 10 м, которое составило 1,8 пс (или  $\sim 0,2$  нс/км), что хорошо согласуется с расчетной величиной [9].

Общий физический принцип таких ВОД позволяет измерять различные величины, используя единый блок обработки информации. Это дает возможность перейти к построению многоцелевых волоконно-оптических измерительных систем. Область применения рассматриваемых ВОД обширна: от датчиков физических величин (перемещение, температура, давление) до систем автоматического управления и контроля. Благодаря высокому временному разрешению, использованию полупроводниковых лазеров, излучающих в широком диапазоне длин волн от 0,8 до 1,65 мкм, и возможности фокусировки светового пятна до размеров порядка нескольких микрометров данная методика может быть использована для исследования динамических и пространственно-временных характеристик быстродействующих полупроводниковых оптоэлектронных структур и приборов, а также элементов оптических систем связи и обработки информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Grattan K. T. V.* New developments in sensor technology - fiber and electro-optics: Measurement + Control. 1989. V. 22, July/August. P. 165-175.
2. *Beaud P., Schuts J., Hodel W.* e.a. Optical Reflectometry with Micrometer Resolution for Investigation of Integrated Optical Devices //IEEE J. Quantum Electron. 1989. QE-25, № 4. P. 755-759.
3. *Zimmerman B. D., Claus R. O., Kapp D. A., Murphy K. A.* Fiber - Optic Sensors Using High Resolution Optical Time Domain Instrumentation Systems// Ibid. 1990. QE-26, № 9. P. 1273-1277.

4. *Youngquist R. C., Karr S., Davies D. E .N.* Optical Coherencedomain Reflectometry: a New Optical Evaluation Technique // *Opt. Lett.* 1987. V. 12, № 3. P. 158-160.

5. *Beheim K., Fritsch K.* Remote Displacement Measurements Using a Laser Diode // *Electron. Lett.* 1985. V. 21, № 3. P. 93-94.

6. *Grosch G.* Comparison of three cosepts for a long stroke displacement transducer // *SPIE Proc.* 1988. V. 1011.P. 82-89.

7. *Полупроводниковые инжекционные лазеры: Динамика, модуляция, спектры/ Под ред. У.Тсанга. М., 1990. 319 с.*

8. *Kyuta K., Tai S., Sawada T., Nunoshita M.* Fiber - Optic Instrument for Temperature Measurement // *IEEE J. Quantum Electron.* 1982. QE-18, № 4. P. 647-679.

9. *Унгер Х.Г.* Планарные и волокнистые оптические волноводы. М., 1980. 656 с.

*Рукопись поступила 5.03.91*