

УДК 621.31:681.586.5' 326

Экспериментальное исследование осевой составляющей диаграммы направленности излучения многомодового оптоволокна¹

А.Д. Бялик, В.А. Гридчин, В.Ю. Васильев, А.Н. Игнатов, А.С. Чернов

В работе исследуется диаграмма направленности излучения многомодового оптоволокна. На примере оптоволоконных сенсоров давления исследуются особенности перераспределения интенсивности светового потока между торцом оптического волокна и фотоприёмником.

Ключевые слова: фотозлектрический сенсор давления, оптоволокно, диаграмма направленности излучения.

1. Введение

Практическое применение микро- и наноструктур в измерительной технике и технике физического эксперимента сделало актуальной проблему исследования диаграмм направленности излучения устройств, работающих с длинами волн, сопоставимыми с размерами микро- и наноструктур. Появилось значительное число работ, связанных с проблемами проектирования оптических наноантенн, работающих в диапазоне длин волн 0.4 – 1.5 мкм [1]. С другой стороны, успехи технологии микросистемной техники привели к возникновению нового класса оптических микро- и наносистемных устройств, где ключевое значение имеет диаграмма направленности излучения одно- или многомодовых оптических волокон. Это необходимо для проектирования сенсоров давления, вибрации, ускорения и т.д. До сих пор диаграммы направленности излучения оптических волокон обсуждались либо качественно, либо в простейшем приближении геометрической оптики [2].

В данной работе экспериментально исследуется осевая составляющая диаграммы направленности оптоволокна применительно к конструкции нового типа оптоэлектрического сенсора давления.

Сенсоры давления на основе технологии микросистемной техники имеют длительную историю развития, однако поиск новых конструктивно-технологических решений продолжается до сих пор. Это вызвано, в первую очередь, все возрастающими требованиями к условиям работы сенсоров и их метрике. В 90-х годах прошлого столетия появилась новая концепция построения сенсоров давления, согласно которой оптоволокно, связанное с упругим элементом сенсора давления, изменяет световой поток фотоприёмника, работающего в режиме холостого хода [3].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации НИР «Исследование перспективных конструкций и технологических принципов формирования оптоэлектронных приборов нового поколения (кремниевый фотозлектрический датчик давления)» (ГК №14.430.12.0005). Т

Такой сенсор не требует электрического питания, но имеет низковольтный выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки, и является безопасным при работе сенсора в агрессивных средах. Его недостатком являлось немонотонность преобразовательной характеристики.

В предложенной нами конструкции сенсора давления этот недостаток устранялся путём применения дифференциального включения двух фотоприёмников [4].

Кинематическая схема предложенного сенсора представлена на рис. 1.

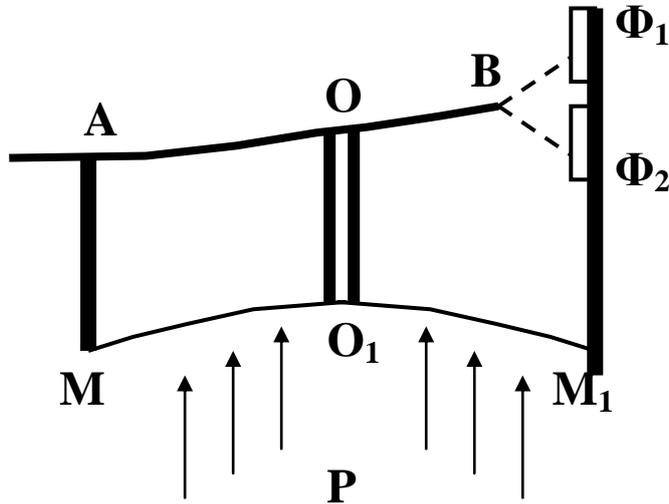


Рис. 1. Кинематическая схема предложенного фотоэлектрического сенсора давления

Оптомеханический узел содержит упругую кремниевую мембрану $МOM_1$ с жёстким центром OO_1 , оптоволокну AOB , жёстко закреплённое в точках A и O . Свободный конец оптоволокну может перемещаться вместе с мембраной и жёстким центром под действием измеряемого давления. Поток оптического излучения, выходящий из оптоволокну, изменяет засветку фотоприёмников Φ_1 и Φ_2 , работающих в режиме холостого хода.

Выходной сигнал такого сенсора и его чувствительность зависят от выбора величины зазора w между торцом оптоволокну и плоскостью, в которой расположены фотоприёмники, что влияет как на общую площадь светового пятна, так и на степень засветки фотоприёмников. Оптимальный выбор этого важного конструктивного параметра зависит от формы диаграммы направленности светового пятна, степени поглощения излучения в зазоре w и материалом фотоприёмников.

Между тем, до сих пор отсутствует аналитическое описание диаграммы направленности излучения, испускаемого из торца оптоволокну. Имеющиеся варианты описания [5 – 8] базируются на приближении геометрической оптики с рядом специальных допущений, либо на предположении о существовании гауссова пучка (как в оптоволокну) и в узком промежутке w [9]. Прямая экспериментальная проверка упомянутых приближений в настоящее время отсутствует.

Целью данной работы является экспериментальное исследование диаграммы направленности излучения, выходящего из оптоволокну, вдоль оси этого волокну по величине сигнала фотоприёмника при изменении величины зазора w .

2. Экспериментальная часть

Была проведена серия измерений преобразовательных характеристик исследуемого сенсора с целью определения и оптимизации положения рабочей точки сенсора, то есть, началь-

ного расстояния между торцом оптического волокна и плоскостью, на которой расположены фотоприёмники.

Для измерений использовалась установка, содержащая источник оптического излучения, 2 фотоприёмника, многомодовое оптическое волокно, один из торцов которого жёстко закреплён относительно источника излучения, а второй торец помещён на оптический столик и может смещаться в трёх взаимно перпендикулярных направлениях относительно точки закрепления фотоприёмников при помощи микрометрических винтов. При этом ось симметрии оптоволокна перпендикулярна плоскости, в которой закреплены фотоприёмники.

В качестве источников оптического излучения в эксперименте использовались полупроводниковые лазеры с коллимационными линзами, позволяющими изменять фокусное расстояние в пределах $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^1$ м. Тип лазера HLDPМ 12-655-5. Максимальная мощность излучения, $P = 5$ мВт. Длина волны лазеров $\lambda = 655$ нм, красный участок видимого спектра. Излучение непрерывное. Диаметр входного отверстия измерительного прибора $d = 2.5$ мм, диаметр коллимационной линзы лазера $d_1 = 5$ мм.

В качестве оптических волокон использовались единичные многомодовые волокна (длина $L = 1.5$ м, радиус сердцевины $r_c = 31.25$ мкм, диаметр оболочки, $d_{обл.} = 125$ мкм, диаметр внешней защитной полимерной оболочки – 900 мкм, числовая апертура $A_N = 0.2$, что соответствует углу расхождения светового пучка, равному 22.5°), собранные в конструкцию типа «pig-tail». В такой конструкции один конец оптического волокна заделан в коннектор типа «FC». Торец оптического волокна отполирован, плоскость торца оптического волокна в коннекторе строго перпендикулярна оси волокна. Второй конец оптического волокна свободный, плоскость скола торца оптического волокна перпендикулярна оси волокна. Погрешность позиционирования торца оптического волокна составляла ± 5 мкм.

В качестве фотоприёмников использовались кремниевые фотодиоды типа ФД-256 с удалённой коллимационной линзой.

Схема электронной обработки сигнала фотоприёмника (показана на рис. 2) основана на операционном усилителе ОР-177.

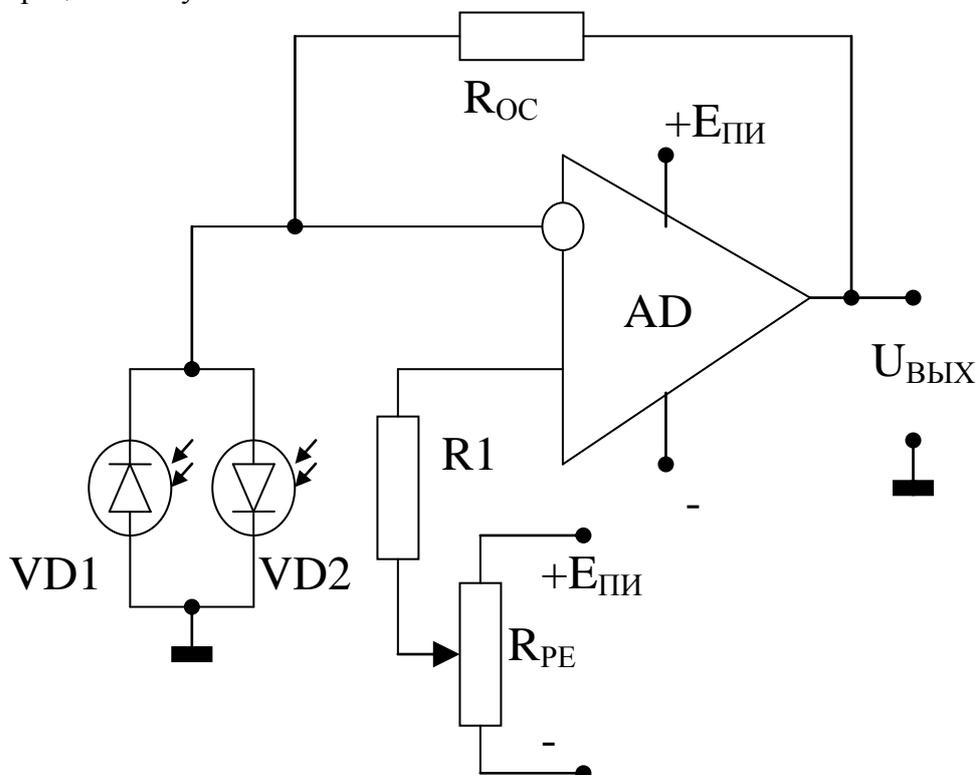


Рис. 2. Схема электронной обработки сигнала фотоприёмника

Для уменьшения влияния внешних паразитных засветок к рабочему фотоприёмнику (VD1) добавлен встречно-параллельно опорный фотоприёмник (VD2), образуя, таким обра-

зом, дифференциальную схему. Коэффициент усиления дифференциального сигнала был выбран равным $K_{yc} = 100000$.

Была проведена серия экспериментов, в ходе которой были получены зависимости выходного сигнала от расстояния вдоль оси оптоволоконна от торца оптоволоконна до плоскости, в которой расположены фотоприёмники.

В качестве параметров были выбраны схема настройки блока электронной обработки (установка или неустановка нуля перед началом эксперимента) и наличие или отсутствие внешних паразитных засветок.

Типичная осевая зависимость интенсивности излучения, выходящего из торца оптоволоконна, показана на рис. 3.

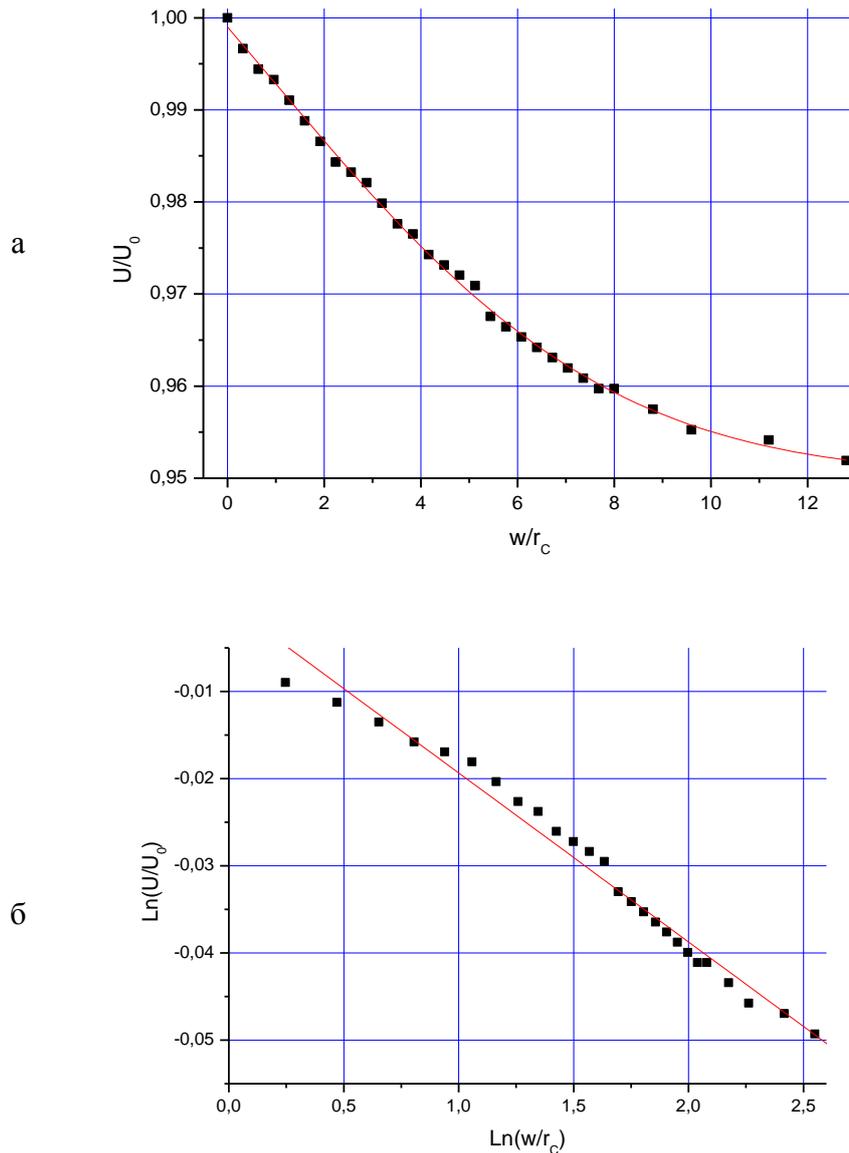


Рис. 3. Осевая зависимость интенсивности излучения, выходящего из торца оптоволоконна: а) приведённая; б) приведённая в двойном логарифмическом масштабе

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Величина выходного сигнала фотоприёмника напрямую связана с его интегральной облучённостью и особенностями диаграммы направленности. Из экспериментальных данных (рис. 3) следует, что выходной сигнал фотоприёмника монотонно уменьшается при возрастании зазора w в интервале $0 - 800$ мкм (отношение $w/r_C < 13$). Этот интервал типичен для фотоэлектрических и оптических сенсоров, создаваемых методами микросистемной техники, что связано с необходимостью эффективного преобразования излучения одиночного оптоволокна в измерительный сигнал.

При таких расстояниях w наиболее естественный подход для описания интенсивности излучения в зазоре заключается в предположении, что оно имеет гауссов профиль, характерный для электромагнитной волны в оптоволокне, но радиус круговой области $R(w)$, в пределах которой интенсивность излучения уменьшается в e^{-2} раз, непрерывно расширяется по закону, описанному в [9]:

$$R = r_C \cdot \left[1 + \left(\frac{A_N \cdot w}{r_C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где A_N – числовая апертура;

r_C – радиус сердцевины оптоволокна.

В таком приближении интенсивность излучения, попадающего в приёмное оптоволокно, расположенное соосно с излучающим волокном на расстоянии w , описывается выражением [10]:

$$P = P_0 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r_C}{R(w)} \right)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

где P_0 – интенсивность излучения при $w = 0$.

В случае, рассматриваемом в данной работе, размеры фотоприёмника много больше размера сердцевины излучающего оптоволокна, однако существует эффективная область облучения фотоприёмника $R_{эфф.}$, которая определяется условиями эффективной генерации неравновесных носителей заряда падающим потоком оптического излучения. С учётом этого экспериментальная зависимость выходного сигнала фотоприёмника (в приведённой форме) аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью вида:

$$P = P_0 + \frac{A}{w \cdot \sqrt{\pi/2}} \exp \left[- 2 \cdot \frac{(x - x_C)^2}{w^2} \right], \quad (3)$$

где $P_0 = 0.95027$, $A = 1.2026$, $w = 13.67851$, $x_C = - 5.84021$ – параметры аппроксимации.

Величина ошибки аппроксимации при этом не превосходит 5%.

Полученные данные не согласуются с теоретическими расчётами в рамках модели конических световых пучков, представленных в работах [2, 11]. Согласно этим результатам, зависимость интенсивности излучения от расстояния до приёмной площадки носит немонотонный характер (выходной сигнал пропорционален $1/w^2$) и при расстоянии $w/r_C \approx 2$ достигает минимума, причём при $w < r_C$ падение очень резкое.

В двойном логарифмическом масштабе аппроксимационные функции, как описанная в выражении (3), так и описанная в [2, 11], имеют вид прямых линий. Из наших экспериментальных данных следует, что в среднем угловой коэффициент – 0.018, в то время как угловой коэффициент, согласно [2, 11], должен быть равен в среднем – 2, что указывает на суще-

ственное расхождение экспериментальных данных и теоретической модели, описанной в [2, 11].

Для практических целей важна не только общая облучённость поверхности планарного фотоприёмника, но и величина производной $\delta = d\Phi/dw$. При массовом производстве неизбежен технологический разброс величины зазора δw , что влияет на выходной сигнал сенсора. Из результатов измерений следует, что при типичной величине зазора $w \approx 100$ мкм, его изменение на 20% к изменению выходного сигнала не более, чем на 0.3 %.

4. Заключение

Экспериментально исследована осевая составляющая диаграммы направленности излучения одиночного многомодового оптоволоконна. Установлено, что зависимость интенсивности излучения от расстояния хорошо описывается гауссовой функцией. Результаты измерений применены к анализу работы нового типа сенсора давления. Показано, что изменение зазора w между торцом оптоволоконна и фотоприёмниками влияет на величину выходного сигнала, что важно для контроля технологического процесса изготовления сенсоров.

Литература

1. *Краснок А.Е.* Оптические наноантенны [Текст] / Краснок А.Е., Максимов И.С., Денисюк А.И. [и др.] // Успехи физических наук, 2013 г., том 183, №6, С.561-587.
2. *Бадеева Е.А.* Разработка теории распределения светового потока в оптической системе волоконно-оптических преобразователей физических величин отражательного типа. [Текст] / Бадеева, Е.А., Коломиец, Л.Н., Кривулин Н.П. [и др.] // Пенза, Информационно-издательский центр ПензГУ, 2008. 102 с.
3. *Dziuban J.A.* Silicon optical pressure sensor [Текст] / Dziuban J.A., Gorecka-Drzazga A., Lipowicz U. // Sensors and Actuators A. 1992. V. 32. P. 628-631.
4. *Гридчин В.А.* Численное моделирование элементов фотоэлектрического волоконно-оптического сенсора давления [Текст] / Гридчин В.А., Васильев В.Ю., Чебанов М.А. [и др.] // Нано- и микросистемная техника, 2014 г. №6 (167), С. 3-7.
5. *Пивкин А.Г.* Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом [Текст] / А.Г. Пивкин, Е. А. Бадеева, А.В. Гориш [и др.]. // М. : МГУЛ, 2004. 246 с.
6. *Пивкин А.Г.* Волоконно-оптические датчики аттенуаторного типа для летательных аппаратов [Текст] / А.Г Пивкин, В.А. Мещеряков, Т.И. Мурашкина [и др.] // Датчики и системы, 2003. №4. С. 11 – 14.
7. *Мещеряков В.А.* Волоконно-оптические датчики давления отражательного типа для летательных аппаратов [Текст] / В.А. Мещеряков, Т.И. Мурашкина, Е.А. Мурашкина // Датчики и системы. 2001. №9. С. 14 – 18.
8. *Бялик А.Д.* Исследование основных параметров преобразовательных характеристик амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа [Текст] / А.Д. Бялик // Омский научный вестник 2009. №3 (83). С. 220 – 222.
9. *Cocorullo G.* An integrated silicon interferometric temperature sensor. In Puers, R. (ed.). Tech. digest [Текст] / Cocorullo, G., Della Corte F.G., Iodice, M. [и др.] // 10th Eur. Conf. Solid-State Transducers (Euroensors X), Leuven, Belgium, 8 – 11 Sept., 1996. P. 1413-1416.
10. *Peiner E.* A micromachined vibration sensor based on the control of power transmitted between optical fibres [Текст] / Peiner E., Scholz D., Schlachetzki A. [и др.] // Sensors and Actuators A. 1998. V. 65. P. 23-29.

11. *Пивкин А.Г.* Волоконно-оптические датчики аттенуаторного типа для космической техники [Текст] / А.Г Пивкин, Т.И. Мурашкина // Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ. 2005. 152 с.

Статья поступила в редакцию 30.03.2015

Бялик Александр Давидович

к.т.н., доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета, доцент кафедры технической электроники Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, корп. 3, ком. 370), тел. 26-98-255, 8-913-918-82-03, e-mail: bialik@ngs.ru

Гридчин Виктор Алексеевич

д.т.н., профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4, ком.121-а), тел. 346-08-75, 8-913-388-21-72.

Васильев Владислав Юрьевич

д.х.н., профессор кафедры технической электроники Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, заместитель директора по науке ООО «Рамит» (г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, корп. 3, ком. 370), тел. 26-98-255.

Игнатов Александр Николаевич

к.т.н., профессор, завкафедрой технической электроники Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (г. Новосибирск, ул.Кирова, 86, корп. 3, ком. 336), тел.26-98-255.

Чернов Артём Сергеевич

аспирант Новосибирского государственного технического университета, инженер-конструктор ООО «Рамит» (г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4, ком.122-а), тел. 346-08-75.

Experimental study of the axial component of the radiation pattern of multimode fiber

A. Byalik, V. Gridchin, V. Vasiljev, A. Ignatov, A. Chernov

In this paper, multimode fiber optic radiation pattern is investigated. Characteristic properties of the light beam intensity redistribution between the end of optic fiber and photodetector are researched illustrated by optic pressure sensors.

Keywords: radiation pattern, optic fiber, photoelectric pressure sensor.