

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С. Н. Антонов

Датчики магнитных полей с чувствительными элементами из волоконных световодов (ВС) широко разрабатываются и являются, очевидно, перспективными.

Исключительно удачное предложение состоит в использовании возникающей при намотке ВС оптической анизотропии, индуцированной регулярным изгибом, — реализации продольного фазового синхронизма для световых волн при пространственной периодической модуляции диэлектрической проницаемости среды, вызванной магнитным полем [1],

$$\beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda, \quad (1)$$

где  $\beta_1 - \beta_2$  — разность постоянных распространения собственных оптических мод ВС,  $\Lambda$  — период модуляции.

При этом изначально изотропный одномодовый ВС наматывается в виде цилиндрической катушки, что приводит к появлению разности в показателях преломления  $n_1$  и  $n_2$  собственных линейно поляризованных оптических мод, и условие (1) выполняется тем, что радиус катушки  $R$  выбран из равенства длины биений этих мод длине одного витка

$$L_0 = 2\pi/(\beta_1 - \beta_2) = \lambda/(n_1 - n_2) = 2\pi R, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны света.

Магнитное поле напряженностью  $H$  с силовыми линиями, перпендикулярными оси катушки, будет приводить к эффективной связи между собственными модами — изменению состояния поляризации света на выходе чувствительного элемента на угол  $\Delta\alpha$

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} H L V = \pi H R N V, \quad (3)$$

где  $L$  — длина ВС,  $V$  — постоянная Верде ВС,  $N$  — число витков катушки.

Синхронизм будет выполняться в диапазоне длин волн света  $\Delta\lambda = \lambda_m/2N$ , где  $\lambda_m$  — длина волны света, соответствующая максимальной эффективности взаимодействия, а спектральная зависимость имеет вид  $(\sin \lambda)/\lambda$ .

В [2, 3] впервые показано, что таким путем из кварцевого волокна можно создать датчик с длиной ВС в несколько метров и тем самым достигать чувствительности порядка  $10^{-2} - 10^{-3}$  Э. Однако такая конфигурация чувствительного элемента скорее иллюстрирует принцип распределенного магнитооптического взаимодействия, чем является практической конструкцией датчика. Это связано с тем, что заранее очень трудно подобрать необходимый диаметр катушки, обеспечивающий синхронизм на заданной длине волны света. Величина  $L_0$  определяется радиусами катушки и ВС, силой натяжения ВС. Таким образом, неизбежные вариации продольного натяжения при намотке, а также реальное непостоянство диаметра кварцевой оболочки, толщины и состава полимерного покрытия ВС не позволяют с необходимой точностью предсказать значение  $\lambda_m$ . Проведенные исследования показывают, что для типичного кварцевого ВС предельное число витков цилиндрической катушки составляет 20—30 (длина ВС менее метра), при котором еще возможен «захват» лазерного излучения полосой синхронизма катушки.

На рис. 1 схематично показана конфигурация чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля, свободного от указанных недостатков. Здесь катушка ВС 1 зажата между двумя пластинами 2, причем необходимое расстояние между которыми  $d$  фиксируется еще двумя пластинами 3, приклеенными к торцам пластин 2 (пластины выполнены из немагнитного материала, в созданном датчике по соображениям термостабильности использовался кварц). Видно, что виток такой катушки состоит из прямолинейной и изогнутой частей (в некотором приближении можно полагать, что изогнутые части имеют форму двух полуокружностей  $R = d/2$ ). Очевидно, что при такой конфигурации катушки условие синхронизма (2) сохраняет силу: при суммарной длине витка  $2\pi R + 2l$ , где  $l$  — длина прямолинейной части, длина биений остается равной  $2\pi R$ . Качественно это можно пояснить тем, что прямолинейные участки витков оптически изотропны и не расстраивают фазовые соотношения (не нарушают синхронизм), участвуя тем не менее в процессе магнитооптического взаимодей-

ствия. Из этого вытекает первое важное свойство «плоской» катушки: число ее витков и суммарная длина ВС оказываются «развязанными», и повышение чувствительности может обеспечиваться за счет увеличения длины прямолинейных участков без увеличения числа витков (как в цилиндрической катушке), что не приводит к сужению полосы синхронизма и существенно улучшает параметры датчика, например термостабильность. Второе принципиальное

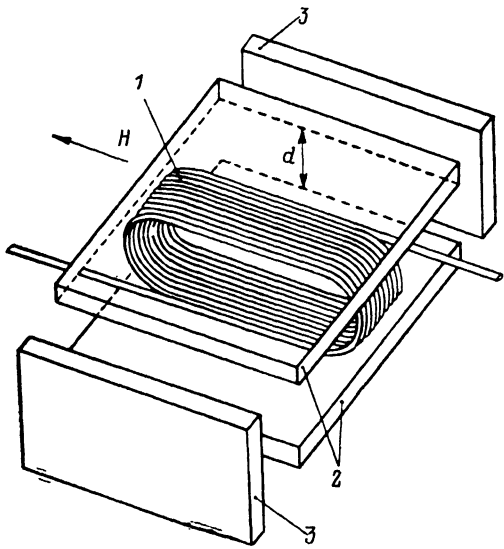


Рис. 1. Схема чувствительного элемента. H — ориентация вектора магнитного поля, при которой достигается максимальная чувствительность.

преимущество — простота обеспечения наперед заданного значения  $\lambda_m$ . Изготавливается цилиндрическая катушка большого диаметра (используется мягкий каркас), затем она помещается между пластинами и сжимается до необходимого расстояния  $d$ , которое фиксируется приклеивкой боковых пластин. Величина  $d$  при этом контролируется непосредственно с лазером нужной длины волны света по максимуму сигнала: чувствительный элемент включен в обычную поляризационную схему и на него действует переменное магнитное поле. Эксперименты показывают, что таким образом можно создать датчик с длиной ВС в несколько десятков метров. На рис. 2 показана экспериментальная спектральная характеристика одного из разработанных чувствительных элементов. Катушка содержала 100 витков кварцевого одномодового (с отсечкой на 0.6 мкм) ВС с диаметром по кварцу 110 мкм, по внешней пластиковой оболочке — 215 мкм, суммарная длина ВС 6 м, размер  $d$  составил 8.4 мм. Из рис. 2 следует, что ширина основного максимума хорошо соответствует формуле  $\Delta\lambda = \lambda_m/2N$  и, следовательно, индуцированное изгибами двулучепреломление достаточно однородно по длине всего ВС. Кроме того, видно «попадание» максимума эффективности на заданную длину волны He—Ne лазера 0.63 мкм склеенной катушки.

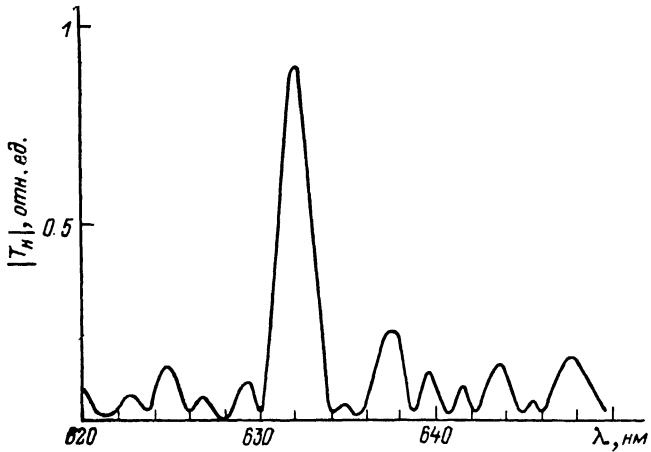


Рис. 2. Зависимость эффективности магнитооптического взаимодействия от длины волны света для экспериментального образца.

$|T_n|$  — модуль сигнала на выходе фотоприемников в отн. ед. Длина волны света в нм. Использовались ксеноновая лампа и монохроматор.

Данный чувствительный элемент был использован для создания макета датчика магнитного поля с традиционной оптической схемой: лазер (He—Ne, мощность 1 мВт), поляризатор, чувствительный элемент, поляризационная призма, два кремниевых фотоприемника. Датчик помещался в переменное магнитное поле с частотой 1 кГц; сигнал с фотоприемников через дифференциальный усилитель поступал на синхронный детектор (время накопления интегратора 1 с). Было установлено, что сигнал, соответствующий повороту плоскости поляризации

на выходе чувствительного элемента на  $90^\circ$ , наблюдался при значении магнитного поля около 800 Э, а соответствующий отношению сигнал—шум, равному единице, — при  $10^{-2}$  Э. Температурные испытания показали постоянство основных характеристик в диапазоне от 0 до  $150^\circ\text{C}$ . При низких температурах изменяются упругие свойства полимерного покрытия (у нас эпоксиакрилат). Очевидно, что эта проблема не является принципиальной, поскольку разработан целый класс низкотемпературных покрытий для ВС, которых мы, к сожалению, на момент работы не имели.

Таким образом, предложена практическая конструкция чувствительного элемента волоконно-оптического датчика магнитного поля.

Автор признателен А. Н. Булюку и В. М. Котову за помощь в проведении экспериментов и группе сотрудников (под руководством Г. А. Иванова), в которой был изготовлен ВС.

### Список литературы

- [1] Day G. W., Payne D. N., Barlow A. J., Ramskov-Hansen J. J. // Opt. Lett. 1982. Vol. 7. N 5. P. 238—240.
- [2] Антонов С. Н., Булюк А. Н., Гуляев Ю. В. // Квантовая электрон. 1989. Т. 16. № 11. С. 2310—2316.
- [3] Антонов С. Н., Булюк А. Н., Ветощко П. М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 6. С. 76—80.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР  
Фрязинская часть  
Московская область

Поступило в Редакцию  
19 марта 1990 г.

03

Журнал технической физики, т. 61, в. 3, 1991

© 1991 г.

## ПОВЕДЕНИЕ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С. Т. Завтрак, Е. В. Коробко

Влияние внешнего электрического поля на упругие свойства жидкостей вызывает давний интерес (см., например, [1-5]). В настоящей работе теоретически исследовано изменение упругих свойств жидких диэлектриков, содержащих газовые пузырьки, при воздействии как постоянного, так и переменных электрических полей. В качестве жидких диэлектриков могут рассматриваться различные виды масел, а также обыкновенная дистиллированная вода.

Рассмотрим вначале одиночный сферический газовый пузырек в поле с постоянной напряженностью  $E_0$ . Решение задачи о распределении электрического потенциала хорошо известно [6, 7]

$$\varphi_1 = - \frac{3(E_0 \cdot r)}{\left(2 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)}, \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} - 1\right) R^3 (E_0 \cdot r)}{\left(2 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) r^3} - (E_0 \cdot r). \quad (2)$$

Здесь  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответственно потенциалы поля внутри и вне пузырька;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — соответственно диэлектрические проницаемости газа, содержащегося в пузырьке, и окружающей его жидкости;  $R$  — радиус пузырька;  $r$  — радиус-вектор, начало которого совпадает с центром пузырька. Полная энергия электрического поля

$$U = \frac{1}{2} \int (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) dV, \quad (3)$$

где  $\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$  — вектор электрической индукции; интеграл (3) вычисляется по всему объему, занимаемому пузырьком и жидкостью.