

# Поляризационные оптические датчики для измерения физических величин

В.Н. Федоринин, В.И. Сидоров

Представлены конструкции датчиков для измерения механических деформаций и перемещений, жидкостной электронный рефрактометр, экспериментальный образец газового сенсора, оптический ДНК-сенсор. Датчики оснащены цифровой системой сбора данных, обеспечивающей оперативные измерения, что является принципиальным, например, при контроле напряжённого состояния породных целиков в подземных выработках.

*Ключевые слова:* деформация, перемещение, нагрузка, анизотропия, фотоупругость, поляризатор.

## 1. Введение

Распространение электромагнитного излучения в пространстве описывается тремя взаимортогональными векторами, один из которых определяет направление потока энергии электромагнитного излучения, два других вектора описывают состояние поляризации световой волны. На рис. 1 представлена схема поведения электромагнитного излучения в пространстве, где  $\Delta$  – фазовый сдвиг между двумя взаимортогональными компонентами электрического вектора.

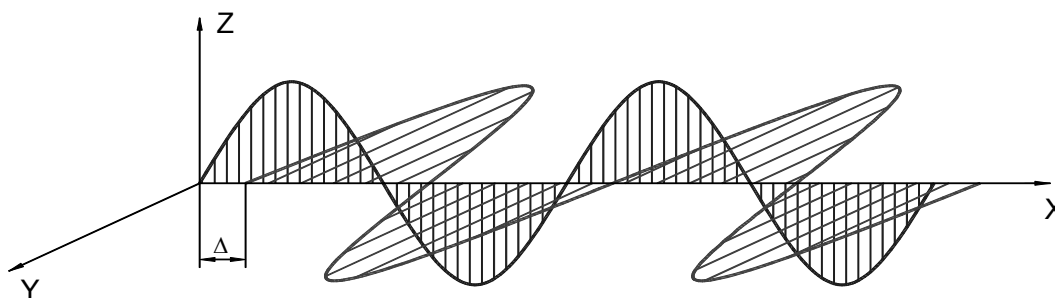


Рис.1. Поведение электромагнитной волны в пространстве

В зависимости от величины фазового сдвига результирующий электрический вектор световой волны будет описывать в пространстве фигуру эллипса. В частных случаях при разности фаз  $\Delta = 0$ ,  $\Delta = 180^\circ$  эллипс вырождается в прямую линию (рис. 2 а, в). Такое излучение называется линейно-поляризованным. При  $\Delta = 90^\circ$  результирующий вектор описывает в пространстве окружность, излучение в этом случае становится поляризованным по кругу (рис. 2 б).

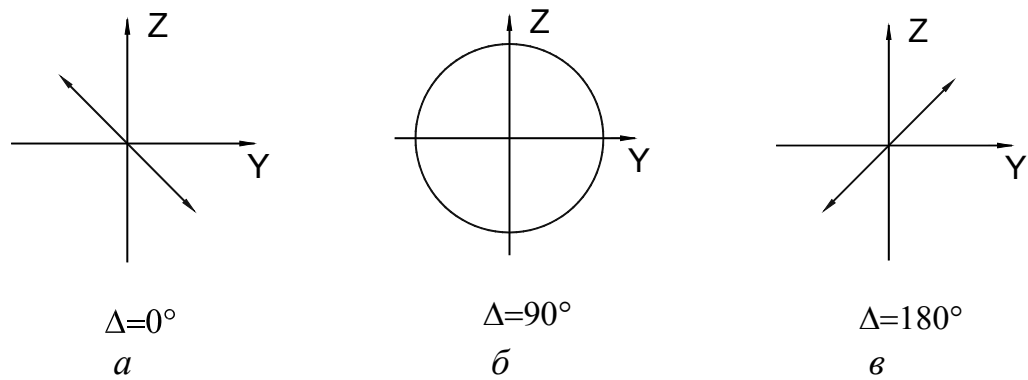
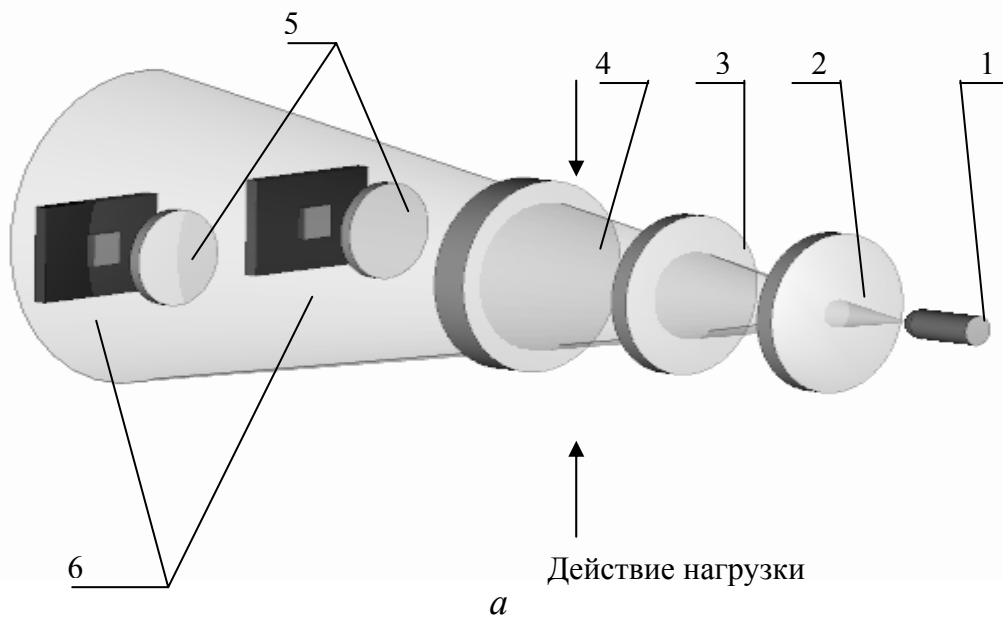


Рис. 2. Частные случаи результирующего электрического вектора световой волны

Изменение поляризационных характеристик электромагнитного излучения в результате взаимодействия с физическим объектом лежит в основе работы поляризационных оптических датчиков и используется для измерений различных механических, геометрических величин и физико-химических параметров объектов.

На рис. 3 представлена схема датчиков, работающих на пропускание и отражение.



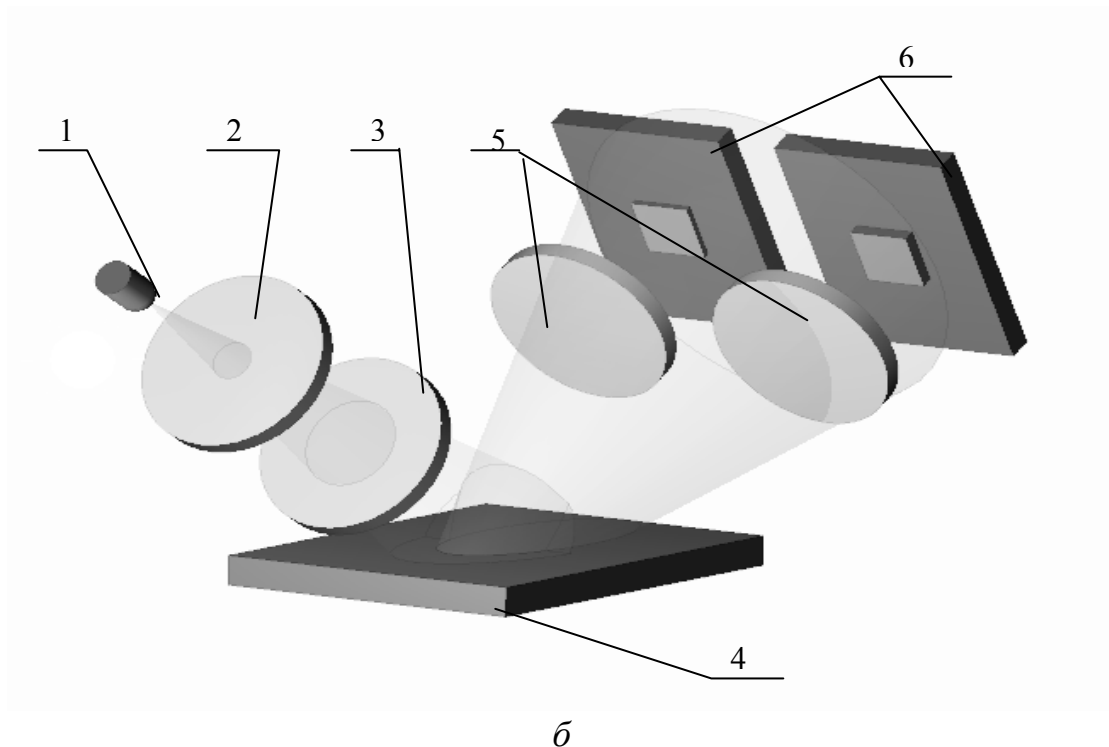


Рис. 3. Оптическая схема поляризационных датчиков: *a* – на пропускание; *б* – на отражение

Излучателем (1) в датчике служит светодиод или полупроводниковый лазер. Датчик состоит из плёночного поляризатора (2), фазовой пластинки  $\lambda/4$  (3), объекта измерения (4), двух фотодиодов (6), перед которыми устанавливается плёночный поляризатор (5) с азимутами поляризации, развернутыми на  $90^\circ$  относительно друг друга. Описание и принцип датчика можно найти в работе [1].

Сигнал, который снимается с фотоприёмников, пропорционален интенсивности падающего излучения и в общем случае выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0' - I_0' \sin \Delta, \\ I_2 &= I_0'' + I_0'' \sin \Delta \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I_1$ ,  $I_2$  – интенсивности падающего на фотоприемники излучения,  $I_0'$ ,  $I_0''$  – интенсивность излучения перед поляризатором,  $\Delta$  – фазовый сдвиг между двумя взаимортогональными компонентами электрического вектора.

Результирующий сигнал  $K$ , преобразуемый в датчике, имеет вид (2) и пропорционален изменению фаз:

$$K = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \sim \sin \Delta \quad (2)$$

Чувствительность датчика к изменению фазы составляет  $10^{-4}$  рад или  $10^{-5}$  длины волны излучения.

## 2. Поляризационные оптические датчики

На базе оптической схемы, представленной на рис. 3, разработаны ряд датчиков для измерения механических деформаций и перемещений с использованием пьзооптического эффекта (фотоупругость). Явления фотоупругости связано с изменением скорости распространения электромагнитной волны вследствие наведённых внутренних механических напряжений. Данный эффект широко применяется в экспериментальной механике при изучении на моделях деформационных полей, возникающих в сложных конструкциях и ин-

женерных сооружениях. Использование данного явления в датчиках, где одним из важных условий является линейность показаний, стало возможным при увеличении чувствительности регистрации фазовых изменений: так, при динамическом диапазоне изменения фазы  $\pm 0.1$  рад, чувствительности  $10^{-4}$  рад линейность показаний составляет 0.1 %. В конструкциях разработанных датчиков в качестве чувствительных элементов используется пластинки, изготовленные из плавленого кварца. Уникальность применения данного материала состоит в том, что при воздействии на данный материал многократных нагрузок, превышающих более чем в 30 раз динамический диапазон, в данном материале отсутствовали остаточные явления. На рис.4 представлена конструкция тензометрического датчика, предназначенного для измерения величин статических и динамических деформаций металлических, железобетонных и бетонных конструкций. Датчики могут работать в составе силоизмерительных, весовых и дозирующих устройств.

#### Технические характеристики

База датчика, мм	$\varnothing 15.5 - 16.5$
Диапазон измерения относительной деформации	$0.5 \times 10^{-3}$
Чувствительность к изменениям относительных деформаций	$1 \times 10^7$
Температурная нестабильность, град	$4 \times 10^{-7}$
Диапазон линейной характеристики выходного сигнала	$10^3$
Питание, В	5
Потребляемая мощность, мВт	65

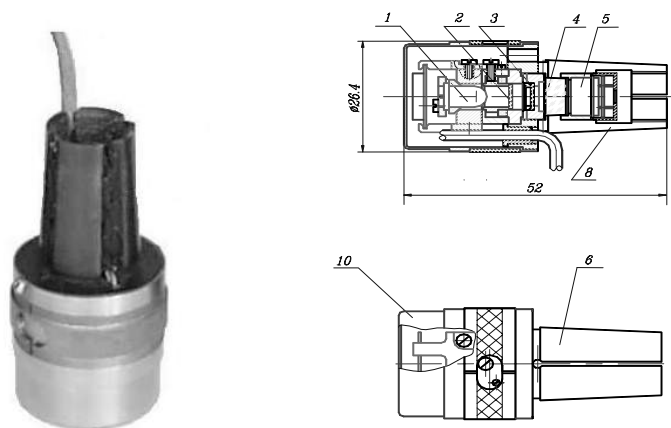


Рис. 4. Конструкция тензометрического датчика: 1 – светодиод, 2 – поляризатор, 3 – фазовая пластинка, 4 – фотоупругий элемент, 5 – фотодиод с поляризационными плёнками, 8 – монтажная втулка, 10 – защитный кожух

Пример монтажа датчика в силоизмерительном устройстве на 50 т и 100 т представлен на рис. 5.

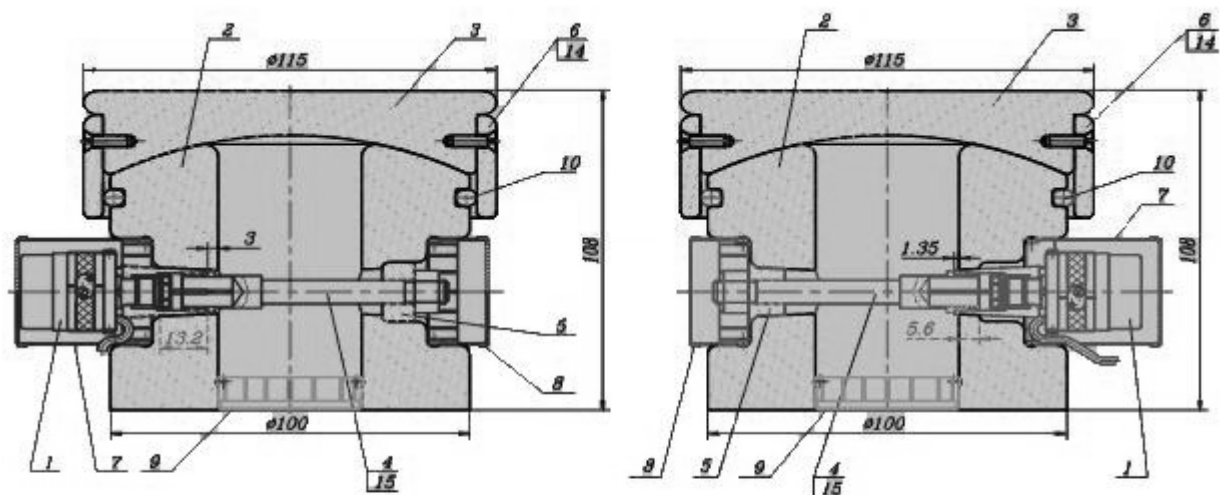


Рис. 5. Монтажная схема датчика в силоизмерительном устройстве: 1 — датчик, 2 — основание, 3 — приёмная площадка, 4 — стягивающий стержень, 5 — упор, 8 — зажимная гайка

Датчик для измерения перемещений представлен на рис. 6 со следующими характеристиками.

#### Технические характеристики

База датчика, мм	12
Диапазон измерения линейных перемещений, мм	10
Точность измерения, мм	0.001
Питание, В	5
Потребляемая мощность, мВт	65

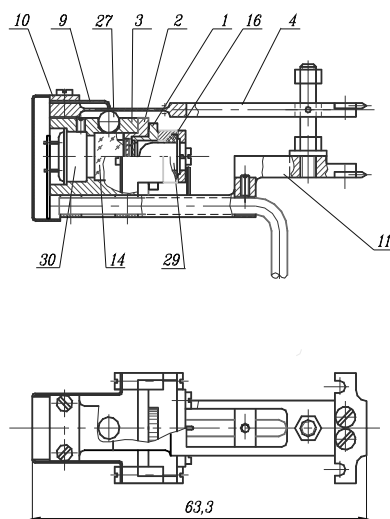


Рис. 6. Конструкция датчика для измерения перемещений: 1 — поляризатор, 2 — фазовая пластина, 3 — корпус, 4 — подвижный рычаг, 9 — пружина, 10 — планка, 11 — неподвижный рычаг, 14 — фотоупругий элемент, 27 — шарик, 29 — светодиод, 30 — фотодиод

На рис. 7 представлена цифровая тензометрическая станция на 8 датчиков.



Рис. 7. Тензометрическая станция

#### Технические характеристики

Число одновременно подключаемых датчиков	8
Период опроса всех датчиков, не более, мсек	10
Диапазон изменения выходных значений	$\pm 49999$
Канал связи с ЭВМ	USB 2.0
Питание, В	10 ÷ 14
Потребляемая мощность, не более, Вт	5

Использование свойства электромагнитного излучения изменять свою поляризацию при отражении от границы раздела сред положено в основу разработки датчиков для измерения физико-химических параметров жидких, газовых и биологических сред. На основе поляризационной оптической схемы измерения (рис. 3 б) разработаны перечисленные ниже изделия.

Жидкостной электронный рефрактометр, предназначенный для измерений показателей преломления жидких растворов. Может использоваться в качестве детектора в жидкостной хроматографии, а также в автоматизированных системах контроля качества продукции.

Определение показателя преломления производится методом ПВО путём измерения фазового сдвига  $\Delta$  световой волны, отражённой от границы раздела призма – раствор. Минимальный объём проточной кюветы составляет 0.2 мкл.

На рис. 8 приведён общий вид жидкостного электронного рефрактометра.

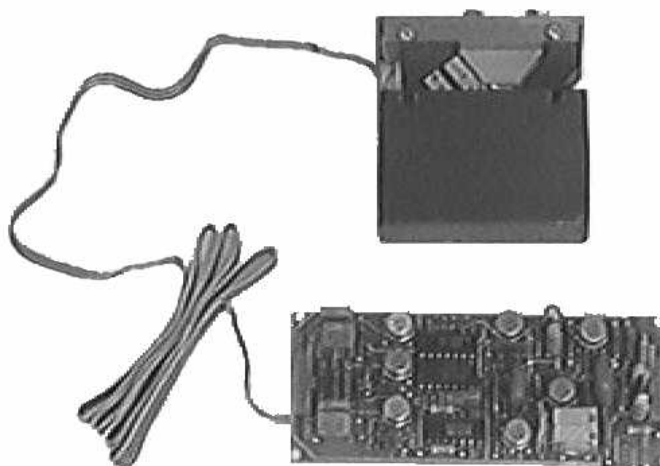


Рис. 8. Электронный рефрактометр

## Технические характеристики

Длина волна излучения, нм	650
Диапазоны измерения показателей преломления	1.33 – 1.39 1.38 – 1.49
Погрешность измерения показателя преломления	$5 \cdot 10^{-5}$
Габариты, мм	$65 \times 75 \times 15$
Потребление, В; Вт	$\pm 6; 05$

Газовые сенсоры, в которых используются оптические методы регистрации, отличаются от других сенсорных устройств тем, что в этих системах реализуются бесконтактные методы измерения. Общий принцип работы таких устройств основан на регистрации изменения коэффициентов поглощения чувствительного слоя при адсорбции газов. Такой способ количественного детектирования токсичных газов в значительной степени ограничивает круг материалов, которые могут быть использованы в качестве чувствительных слоев. Более универсальным, на наш взгляд, может быть признан оптический метод, основанный на измерении рефрактометрических характеристик (показателя преломления) материала чувствительного слоя. Достаточным условием для изменения рефракционных характеристик чувствительного слоя является химическое взаимодействие молекул токсичного газа с рецепторным центром, при котором происходит изменение молекулярной поляризуемости. Физическая основа процесса может быть представлена следующими математическими соотношениями.

В общем случае показатель преломления материала ( $n$ ) связан с молекулярной поляризуемостью составляющих его молекул соотношением Лорентц – Лоренца [2]

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = 4\pi/3 \sum_R N_R \alpha_R, \quad (3)$$

где  $N_R$  – количество молекул в единице объема с поляризуемостью  $\alpha_R$ ,  $R$  – число типов молекул (или связей).

Пусть при взаимодействии молекул газа с рецепторными центрами образуется  $M$  адсорбционных комплексов типа (Q) с молекулярной поляризуемостью  $\alpha_Q$ , тогда выражение (3) для слоя нового состава с показателем преломления  $n_1$  примет вид

$$\frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2} = 4\pi/3 \left[ \sum_{R-1} N_{R-1} \alpha_{R-1} + (N_R - M) \alpha_R + M \alpha_Q \right]. \quad (4)$$

Изменение показателя преломления слоя ( $n - n_1 = \delta n$ ), обусловленное этой реакцией, определится выражением

$$\frac{6\delta n \cdot n}{(n^2 + 2)^2} = \frac{4\pi}{3} M(\alpha_R - \alpha_Q). \quad (5)$$

Использование малогабаритного поляризационного датчика при изменении соответствующих чувствительных слоев позволяет создавать сенсоры на различные газы.

Для создания экспериментального образца сенсора на диоксид серы использовались модифицированные алкиламинами полисилоксановые слои. Выбор этого материала в качестве чувствительного слоя основан на том, что диоксид серы образует с алкиламинами соединения донорно-акцепторного типа [3]. Факт образования таких соединений при адсорбции  $\text{SO}_2$  на полисилоксановых слоях, содержащих аминогруппы, был установлен ранее методами ИК-спектроскопии [4] и автоматической эллипсометрии [5].

На Рис. 9, 10 представлены схема экспериментального образца и результаты измерений концентрации диоксида серы.

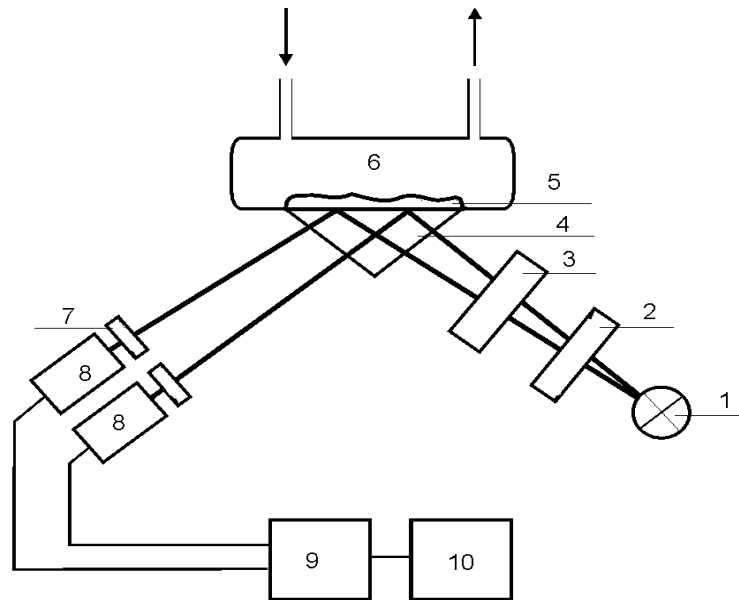


Рис. 9. Схема экспериментального образца газового сенсора

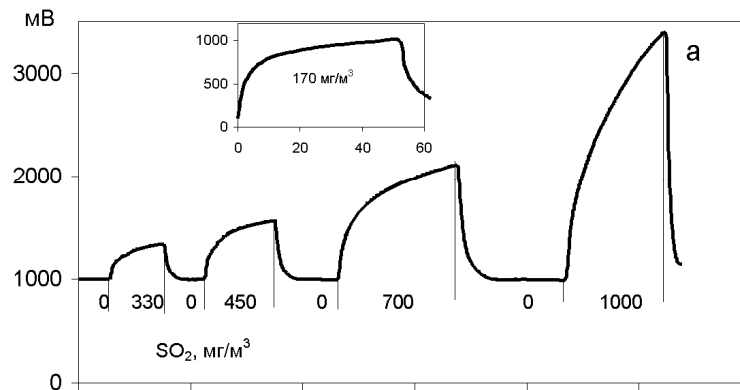


Рис. 10. Результаты измерений концентрации диоксида серы



В рамках проводимых совместных работ с Институтом химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН поляризационные оптические датчики были использованы в качестве ДНК-сенсоров при анализе вирусов опасных заболеваний. Принцип работы сенсора основан на детектировании дуплексов ДНК, образующихся между комплементарными фрагментами, один из которых (олигонуклеотид) иммобилизован в виде плёнки на поверхности стеклянной призмы (ДНК-чипа), а второй (анализируемая ДНК) адсорбируется на этой плёнке из раствора.

На рис. 11 представлен общий вид оптического ДНК-сенсора.

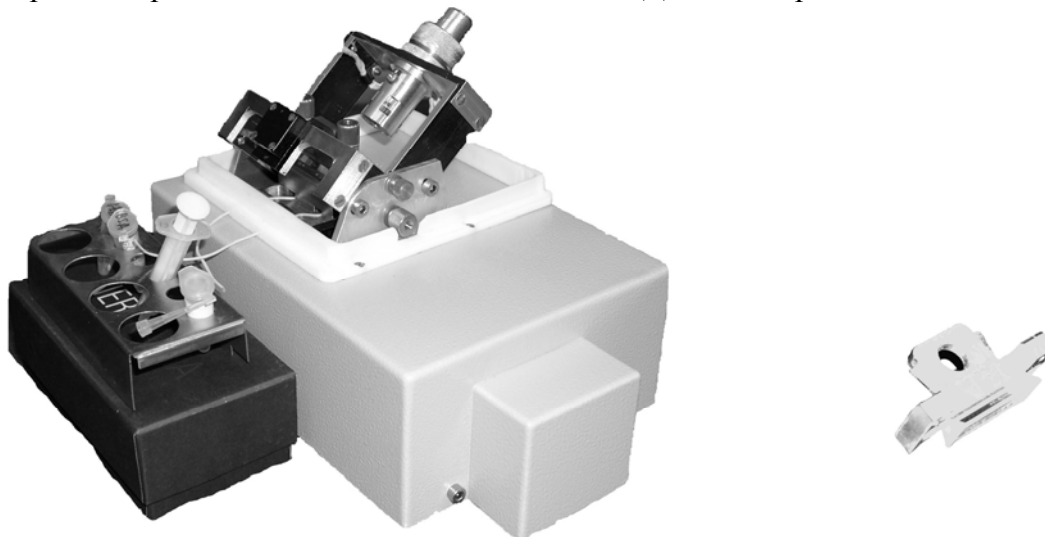


Рис. 11. Общий вид оптического ДНК-сенсора, призмный узел и призма с иммобилизованными олигонуклеотидами

#### Технические характеристики:

Длина призмы с иммобилизованными олигонуклеотидами, мм	20
Шаг сканирования, мкм	1
Диаметр светового зонда, мм	0.1
Длина волны излучения, нм	645
Мощность излучения, не более, мВт	1
Чувствительность датчика к изменению поляризационного угла, град.	0.003
Тип кюветы	проточная
Объём кюветы, мкл	4
Потребляемая мощность, не более, Вт	10
Минимальное количество материала для анализа на ДНК-чипе,	моли ДНК $10^{-13}$
	граммы $10^{-10} - 10^{-9}$
Время сканирования ДНК-чипа, сек	40
Объём анализируемой пробы, мкл	50 – 100

На рис. 12 представлен пример детектирования реакции гибридизации комплементарных и некомплементарных олигонуклеотидов.

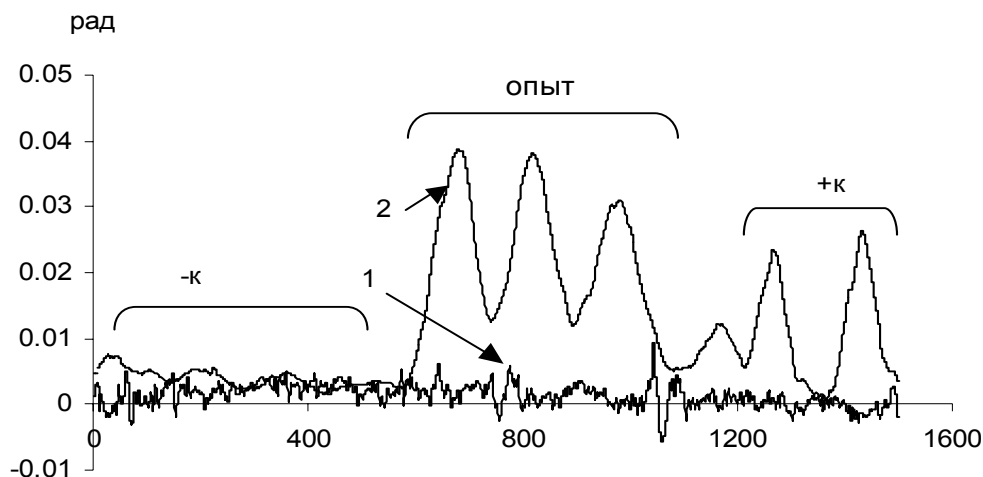


Рис. 12. Регистрация процесса гибридизации детектируемого фрагмента M-bio с иммобилизованным олигонуклеотидом и последующей реакции с латексными микрочастицами (кривая 1) и затем после реакции с конъюгатом St-AP и хромогенными субстратами (кривая 2). Иммобилизованные олигонуклеотиды: M-PL (отрицательный контроль, -к), K-PL (опыт), PL-oligo-biot (положительный контроль, +к)

В заключение хотелось бы отметить, что результаты исследований, представленные в данной работе, были получены в рамках программ интеграционных проектов, финансируемых РАН совместно с Институтом горного дела СО РАН, Институтом физики полупроводников СО РАН, Институтом химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН.

## Литература

1. В.Н. Федоринин. Эллипсометрический датчик. Патент РФ № 2157513 от 10.10.2000.
2. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л. Химия. 1983 г.
3. Л.Л. Васильева, А.С. Кушкова, С.М. Репинский, В.Н.Федоринин. Поляризационный газовый датчик на диоксид серы// Журнал аналитической химии. Т. 55, № 7, с.764 – 769.
4. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризационный свет. М.Мир. 1981г.
5. Блюмкина Ю.А., Архипенко А.В., Соколов В.К. и др. Автоматический эллипсометрический комплекс ЛЭФ-4А-МикроЭВМ// Эллипсометрия: Теория, методы, приложения. Новосибирск. Наука. 1987. С.108 – 111.

*Статья поступила в редакцию 08.06.2009*

**Федоринин Виктор Николаевич**

к.т.н., и.о. руководителя Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» (Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В.Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»), 630090, г. Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева 2/1

тел. (383) 3306-559, ф. 3165-726, e-mail: ktipm@amel.oesd.ru

**Сидоров Виктор Иванович**

вед. инженер-конструктор отдела моделирования оптико-электронных приборов Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» (Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»), 630090, г. Новосибирск-90, пр. ак. Лаврентьева 2/1

тел. (383) 3309-539, ф. 3309-106, e-mail: vsidorov@gmail.com

**Optical polarization sensors for physical quantity****V. Fedorinin****V. Sidorov**

The designs of sensors for mechanical deformation and displacement measurements, liquid electronic refractometer, a gas sensor, optical DNA-sensor are presented. Sensors are equipped by the digital data acquisition system providing high efficiency of measurements.

*Keywords:* deformation, transportation, pressure, anisotropy, photoelasticity, polarizer.