

В. Ю. Кучерук, д. т. н., проф.; С. М. Довгалец, к. т. н., доц.;
И. П. Борщова; П. А. Хомчук

ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Проанализировано основные оптические методы измерения уровня жидкости. Предложено оптический измерительный преобразователь уровня жидкости, чувствительные элементы которого исполнены из диэлектрика с отрицательным показателем преломления.

Ключевые слова: оптический метод, уровень, преобразователь уровня жидкости, волновод, отрицательный показатель преломления, чувствительный элемент, спектр.

Введение. Измерение уровня жидкости является актуальным вопросом контроля состояния среды. Выбор прибора измерения уровня жидкости зависит прежде всего от ее свойств, условий хранения и параметров окружающей среды.

Анализ предыдущих исследований. В условиях высокого давления, низкой или высокой температуры, взрыво-или пожароопасной рабочей среды наиболее распространенными методами измерения жидкости являются механические, электромеханические, методы на основе измерения сопротивления при постоянном и сменном токе, термический метод, ультразвуковой и т. п. Но эти методы нуждаются в применении дополнительных средств для обеспечения нормальной работы приборов в специфических условиях, которые приводят к повышению стоимости соответствующих устройств. Поэтому для измерения уровня жидкости со стационарной поверхностью используются оптические методы.

Бесконтактные оптические методы основываются на отражении света от поверхности жидкости. Например, известный оптический измеритель уровня жидкости в резервуарах, в котором имеется калибровочный стержень, присоединённый нижним концом к поплавку для поднимания или опускания с уровнем жидкости [1]. Контактные оптические методы основываются на распространении света через оптический волновод, который погружается в жидкость. Например, уровнемер, основанный на импульсном методе отбора частичек по времени пролета [2].

Недостатком бесконтактных методов является высокая погрешность измерения, а контактных узкий диапазон измеряемой величины, который ограничен длиной чувствительного элемента.

Цель работы – разработка уровнемера повышенной точности и чувствительности с расширенным диапазоном измерения в сложных специфических условиях.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели необходимо сформулировать параметры чувствительного элемента, который бы удовлетворял следующие требования:

1) чувствительный элемент длиной L представляет собой диэлектрический стержень с сердцевинной, которая имеет показатель преломления n_1 и оболочкой с показателем преломления n_2 ;

2) элемент частично погружен в жидкость с показателем преломления n_3 на расстояние h ; над жидкостью находится газообразная среда с показателем преломления n_3' ;

3) оптическое излучение мощностью P_0^* подается в торец чувствительного элемента, исходная мощность P^* регистрируется на противоположном конце элемента.

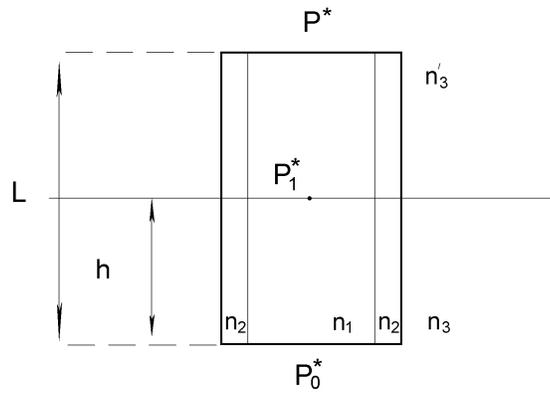


Рис. 1. Структура чувствительного элемента

Данная структура чувствительного элемента является известной, поскольку была раньше опубликована [3]. Но отличие предложенного устройства состоит в том, что сердцевина волновода изготовлена из материала, который имеет отрицательный показатель преломления. Особыми свойствами материалов с отрицательным показателем преломления являются: отрицательное преломление, одновременно отрицательные электрическая и магнитная проницаемости, антипараллельность групповой и фазовой скоростей [4].

Чувствительный элемент условно разбивается на две части, которые находятся в разных средах. Мощность на выходе той части, которая находится в жидкости, определяется как:

$$P_1^* = P_0^* \cdot e^{-2\alpha h}. \quad (1)$$

Мощность на выходе части элемента, который находится в газе, соответственно определяется как:

$$P^* = P_1^* \cdot e^{-2\alpha'(L-h)}, \quad (2)$$

где α , α' – коэффициенты угасания света, распространенного в волноводе, который находится в двух средах.

Тогда общая мощность света той части элемента, который находится на границе двух сред, запишется как:

$$P^* = P_0^* \cdot e^{2h(\alpha' - \alpha) - 2\alpha'L}. \quad (3)$$

Коэффициенты угасания α и α' определяются как воображаемые части постоянной распространения, полученной при решении характеристического уравнения предложенного волновода, соответственно для редкой и газообразной сред. Характеристическое уравнение трехслойного плоского волновода имеет вид:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) \pm k_3 \frac{k_1}{k_2} \frac{m_2}{m_1} \tan(k_2 d) \tan^{\pm 1}(k_1 L) - k_3 = 0, \quad (4)$$

где $k_1^2 = k^2 n_1^2 - h^2$, h – постоянная распространения, $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$ – показатель преломления сердцевинины, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - h^2$, $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2 + i\alpha_2}$ – показатель преломления оболочки, α_2 – коэффициент угасания света в оболочке, $k_3^2 = h^2 - k^2 n_3^2$, $n_3 = \sqrt{\varepsilon_3 \mu_3}$ – показатель преломления внешней среды, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства, λ – длина волны, $2L$ – геометрические размеры сердцевинины, d – геометрические размеры оболочки.

Коэффициент угасания света в сердцевинине принимается таким, что в сравнении с α , α' и α_2 ими можно пренебречь. Полученные при решении уравнения (4) значения α , Наукові праці ВНТУ, 2009, № 3

α' подставляются в уравнение (3), и строится зависимость мощности на выходе волновода от уровня жидкости. На основе полученного характеристического уравнения зависимость строится для волновода, сердцевина которого имеет ОПП, и для классического волновода, сердцевина которого имеет одновременно положительные значения магнитной и диэлектрической проницаемостей (будем называть такой материал материалом с положительным показателем преломления ППП).

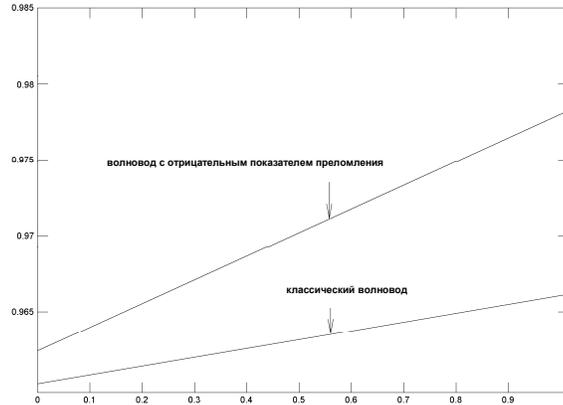


Рис. 2. Зависимость исходной мощности света от уровня жидкости

Наклон зависимости для волновода с ОПП сердцевины высший, чем для волновода с ППП, поэтому чувствительность датчиков на основе таких волноводов будет выше. Как было показано в [5], двухслойные волноводы с ОПП сердцевины имеют особый модовый состав. Для исследования модового состава предложенной трехслойной структуры необходимо построить зависимость приведенной частоты:

$$V = 2kL\sqrt{n_1^2 - n_3^2}, \tag{5}$$

от нормированной постоянной распространения:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3}. \tag{6}$$

При построении зависимости параметр V изменяется за счет параметра n_3 – показателя преломления внешней среды.

Отсечка второй моды происходит при $V = V_2$ и $b = 0$:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3} = 0 \Rightarrow h_2 = kn_3,$$

где h_2 – постоянная распространения, при которой происходит отсечка второй моды. Подставив данное значение постоянной распространения в характеристическое уравнение (4), полученное уравнение запишем как:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) = 0, \tag{7}$$

где $k_1^2 = k^2 n_1^2 - k^2 n_3^2$, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - k^2 n_3^2$.

Решая данное уравнение относительно переменной n_3 , при всех других заданных параметрах получим такое значение ППП внешней среды, при котором в волноводе наступает

отсечка второй моды. Определив по полученному решению приведенную частоту, определим значение $V_2 = 2.132$, которое независимо от величины параметров волновода обеспечивает отсечку второй моды.

Наличие в волноводе с ОПП сердцевины области непропуска излучения, при подаче на его вход некогерентного света, обеспечивает прерывание спектра излучения на его выходе (рис. 3).

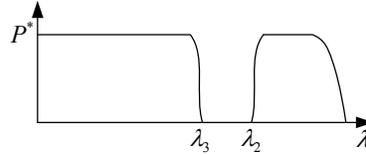


Рис.3. Спектр излучения на выходе волновода с ОПП

На рис. 3 λ_2 и λ_3 – длины волн, соответствующие приведенным частотам V_2 и V_3 . Исходя из полученного значения приведенной частоты в момент отсечки второй моды и формулы (5), устанавливается зависимость между длиной волны, на которой будет обеспечиваться отсечка второй моды в данном волноводе от ПП внешней среды $\lambda_2 = f(n_3)$:

$$\lambda_2 = \frac{2\pi}{V_2} L \sqrt{n_1^2 - n_3^2} = 2.947L \sqrt{n_1^2 - n_3^2}. \quad (8)$$

Значения длин волн отсечки, как видно из уравнения (8), зависят от показателей преломления жидкой и газообразной среды и не зависят от уровня жидкости. Таким образом, из исходного спектра определяется значение длины волны λ_2 , по которому определяется по приведенной зависимости ПП внешней среды n_3 . Это позволяет отстранить составные погрешности, возникающие за счет влияния температуры и давления на оптические свойства внешних сред и самого волновода. Подставляя полученное значение n_3 в характеристическое уравнение и решая его, получим комплексную постоянную распространения, воображаемая часть которой является коэффициентом рассеивания: α и α' в зависимости от того, в какой среде находится волновод, т. е. в зависимости от n_3 . Так как длина волны отсечки зависит от того, в какой среде находится волновод, то, если поместить его на границу раздела двух сред, исходный спектр примет вид:

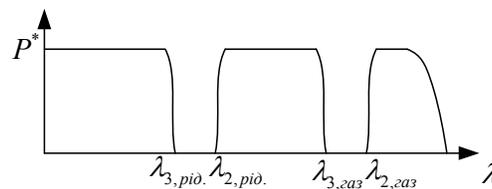


Рис. 4. Исходный спектр чувствительного элемента, который находится на границе двух сред

Для расширения диапазона измерения уровнемер состоит из нескольких последовательно соединенных чувствительных элементов (рис. 5). Параметры каждого из чувствительных элементов выбираются таким образом, чтобы области непропуска в них света были разными. Это позволяет регистрировать световой поток, который проходит последовательно через все чувствительные элементы, и отделять оптическую информацию от каждого из них. Потому, соединив последовательно n волноводов таким образом, чтобы каждый волновод имел свой уникальный диапазон $\lambda_{3, \text{pid.}} \dots \lambda_{2, \text{газ.}}$, и пропуская через них некогерентный свет, на выходе получим следующий спектр (рис. 6).

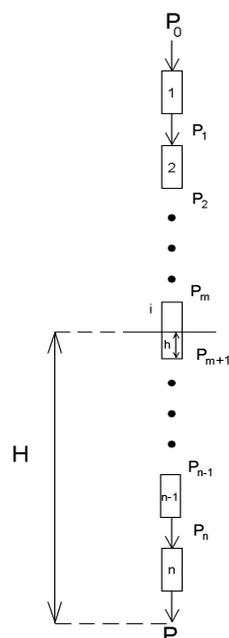


Рис. 5. Структура уровнемера

Определив по исходному спектру значения длин волн $\lambda_{2, \text{жид.}}^n$ и $\lambda_{2, \text{газ.}}^1$, по формуле (8) определяются соответственно ПП жидкости и газа, которые подставляются в характеристическое уравнение для определения α и α' . Зная из полученного спектра номер датчика i , который находится на границе раздела двух сред, определяем действительный уровень жидкости.

Расчет мощностей всего уровнемера, с учетом того, что показатели преломления элементов, которые находятся в разных средах, будут разными, имеет вид:

$$P_m = P_o \cdot e^{-2mL\alpha_1}, \quad (9)$$

$$P = P_{m+1} \cdot e^{-2(n-(m+1))L\alpha_2}. \quad (10)$$

Откуда
$$P_{m+1} = \frac{P}{e^{-2(n-(m+1))L\alpha_2}}, \quad (11)$$

где m – количество чувствительных элементов в газообразной среде, n – общее количество чувствительных элементов, которые входят в состав уровнемера.

С учетом формулы (3) уравнение преобразования примет вид:

$$h = \frac{\ln\left(\frac{P_m}{P_{m+1}}\right) + 2L\alpha_2}{2(\alpha_2 - \alpha_1)}. \quad (12)$$

Общий уровень жидкости в резервуаре рассчитывается по формуле:

$$H = L \cdot (n - (m + 1)) + h. \quad (13)$$

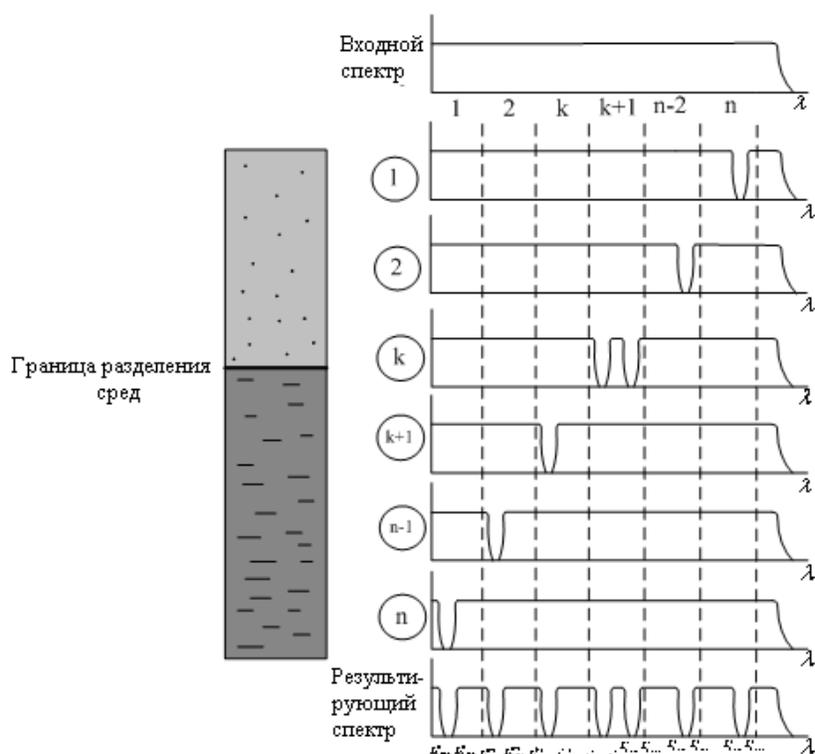


Рис. 6. Результирующий спектр уровнемера

Выводы. Предложен оптический измерительный преобразователь уровня жидкости, чувствительные элементы которого выполнены из диэлектрика с отрицательным показателем преломления. В результате исследования была повышена точность прибора за счет устранения влияния температуры и давления на оптические свойства материалов волновода и внешних сред, расширен диапазон измерительной величины за счет увеличения количества чувствительных элементов и повышена его чувствительность.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Optical tank-level gauge. United States Patent Application / Clark, Reece R. – №20020047760; publ. 25.04.2002.
2. High accuracy liquid level meter based on pulsed time of flight principle. United States Patent Application / Kari Matta, Juha Kostamovaara. – №36020567729; publ. 15.05.2004.
3. Довгалець С. Керування світлопропусканням тришарових оптичних хвильоводів / Сергій Довгалець, Анатолій Васюра // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001. – № 1. – С. 270 – 277.
4. Shadrivov I. V. Guided modes in negative-refractive-index waveguides / I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar // Physical Review E. – 2003. – Vol. 3, № 67. – P. 10 – 14.
5. Довгалець С. М. Рефрактометричні вимірювання з використанням оптичних хвильоводів із від'ємним показником заломлення / С. М. Довгалець, А. Ф. Хомчук, П. А. Хомчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – № 1 (9). – С. 56 – 60.

Кучерук Владимир Юрьевич – д. т. н., профессор кафедры метрологии и промышленной автоматике.

Довгалець Сергей Михайлович – к. т. н., доцент кафедры автоматике и информационно-измерительной техники.

Борцова Ирина Петровна – студент кафедры автоматике и информационно-измерительной техники.

Хомчук Петр Анатольевич – магистрант кафедры автоматике и информационно-измерительной техники.

Винницкий национальный технический университет.