

диод, а область 2 представляет управляемый многофункциональный ФЭПП. Рядом могут быть расположены элементы усилителей или коммутирующих, часто выполняемых по КМОП-технологии, устройств.

Многофункциональные одноэлементные ФЭПП на основе полупроводников с собственной проводимостью позволяют реализовать в одном измерительном преобразователе одновременное определение нескольких параметров оптического излучения, например, длины волны и мощности оптического излучения.

### Литература

1. Воробей, Р.И. Измерительные преобразователи систем оптической диагностики с многофункциональными фотоприемниками / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская // Приборы и методы измерений, 2018. – № 3. – С. 215–226.

2. Vorobey, R.I. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range / R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, A.I. Svistun, L.I. Shadurskaya, N.V. Yarzhebetskaya, K. Kierczynski // Przegląd elektrotechniczny, – № 5. – 2014. – Pp. 5–78

3. Баборыкин В.П., Семеников А.И., Яржембицкий В.Б. Лазерная технология легирования кремниевых эпитаксиальных структур / Плазменные и лазерно-стимулированные процессы в микроэлектронике. – Ростов Великий, 4-8 февраля 1991. – С. 34.

4. Бункин, Ф.В., Термическое действие лазерного излучения / Ф.В. Бункин, И.А. Кириченко, Б.С. Лукьянчук // Успехи физических наук, 1982. – Т. 138, № 9. – С. 45–94.

5. Andreou, A.G. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems / A.G. Andreou, Z.K. Kalayjian, A. Apsel, P.O. Pouliquen, R.A. Athale, G. Simonis, R. Reedy // Circuits and Systems. – 2001. V.1. – P. 22–30.

УДК 620.179.16-534.2

## О ВОЗБУЖДЕНИИ УПРУГИХ ВОЛН В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Баев А.Р.<sup>1</sup>, Митьковец А.И.<sup>2</sup>, Коновалов Г.Е.<sup>1</sup>, Парадинец В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Магнитные жидкости (МЖ) обладают агрегативной и седиментационной устойчивостью и относятся к классу высокостабильных коллоидных растворов наноматериалов, легко управляемых внешним электромагнитным полем [1]. Учитывая опыт предыдущих исследований оптических, акустических свойств МЖ, нами предложено использовать их объемы в качестве оптоакустического (ОА) преобразователя импульсного лазерного излучения (ЛИ) в упругие волны (УВ). В частности, это касается толщинометрии тонкостенных изделий толщиной до  $\sim 10^2$  мкм и радиусом кривизны до  $\pm 1$  см, ввода в твердые тела высокоинтенсивных упругих волн разной направленности (продольные, поперечные, пластинчатые и др.) и длительностью до  $\sim 10^8$  с; измерения интенсивности ЛИ и др. Если  $f(t)$  представляет собой временную функцию интенсивности лазерного излучения,  $A_r$  и  $D$  – коэффициенты прохождения света и упругих волн через границу твердое тело–жидкость, то вектор Умова–Пойнтинга потока интенсивности возбуждаемых волн согласно закону Бугера имеет вид:

$$\langle \vec{S}_u \rangle = J_s A_r f(t) \frac{d}{dz} \left[ \exp \left( - \int_0^z \alpha(z', t) dz' \right) \right] \vec{n},$$

где коэффициент поглощения света в коллоиде  $\alpha_1 = \alpha_1(z)$ . В работе [2] нами впервые была изуче-

на передаточная функция ОА преобразования  $\tilde{F}$  в режиме отражения от границы кварц-МЖ. Последняя имеет слабо выраженный максимум, определяемый теплофизическими, акустическими свойствами коллоида, дисперсионной среды, а также отношением акустических сопротивлений кварцевого световода и МЖ  $r = R_q/R_{мж}$ .

В настоящей работе экспериментально изучены особенности ОА возбуждения упругих волн при прохождении ЛИ через границу кварц-МЖ и воздух-МЖ с последующим их приемом с оппозитной стороны пьезопреобразователем (теневой режим). Необходимость таких исследований вызвана необходимостью уточнения физического механизма ОА-преобразования и возможными (как указано выше) применениями МЖ в качестве ОА-преобразователя для различных применений, включая измерение интенсивности ЛИ.

Экспериментальная проверка возможности использования предложенного метода в прикладной акустике и оптоакустике проведена в теневом режиме – согласно схеме, подобной той, что приведена на рис. 1. Диаметр луча ЛИ, генерируемого лазером типа ЛОТИС, 5 мм, а максимальный диапазон варьируемой энергии потока ЛИ, падающего на границу световод-МЖ,  $W = 1-120$  мДж. Объектом исследования служили высокоустойчивые образцы МЖ на основе син-

тетического масла с концентрацией магнетика, варьируемой в диапазоне  $Q = 0,29-8,3$  %. Высота слоя МЖ или акустической задержки  $L = 1,5$  см.

Электронная схема измерений стандартная и подобна той, что приведена в работе [2]. Стабильность излучаемой генератором ЛИ энергии  $\sim 5$ %. Изменяя интенсивность источника ЛИ и измеряя его с помощью прибора ПЭ-25SH, строилась зависимость импульсного сигнала  $U \sim A$  в мВ от энергии излучения  $W$ . Исследования проводились преимущественно при генерации ЛИ с длиной волны  $\lambda = 0,5$  мкм, а также – с  $\lambda = 1,06$  мкм. Рабочая частота приемного преобразователя (ПЭП) 5и 9 МГц.

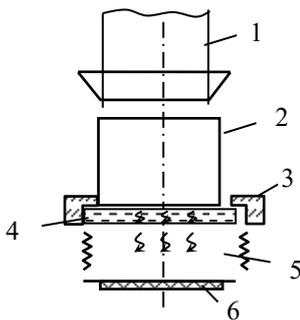


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследования ОА преобразования в МЖ: 1 – лазерный луч; 2 – световод; 3 – уплотнитель; 4 – МЖ; 5 – звукопровод; 6 – ПЭП

Базовые результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2 и 3. Как впервые установлено, для всех представленных образцов МЖ с варьируемой концентрацией магнетика  $Q = 0,29-8,3$  % зависимости амплитуды принимаемого сигнала  $U(W)$  в исследованном диапазоне изменения энергии ЛИ (два порядка) являются линейными – независимо от граничных условий, обусловленных отношением акустических импедансов МЖ и световода. При этом максимальная эффективность передачи возбуждаемых в коллоиде ЛИ акустических колебаний в твердое тело достигается именно в том случае, когда МЖ контактирует с кварцевым световодом. Причем максимум зависимости  $U(W)$  является слабо выраженным (диапазон  $Q = 1,5-5$  %) и находится в окрестности  $Q \sim 1,7$  %. Если же акустическая нагрузка световода нулевая (граница воздух–МЖ), то максимум величины акустического сигнала  $U$  достигается в окрестности  $Q \approx 0,5$  %.

Используя некоторые положения теории [3], был проведен анализ опто-акустического тракта и качественно показано, что если ОА-возбуждение осуществляется в режиме длинного импульса ( $\alpha_1^{-1} < C_A \omega^{-1}$ ), то максимум принимаемого сигнала достигается именно в случае, когда имеется граница кварц-МЖ. Как обнаружено в работе [2], этот режим реализуется при  $Q \geq 2-3$  %. Полученные результаты исследований представляют значительный интерес для ряда приложений в технической акустике. С одной

стороны – для создания коротких и мощных импульсов с высокой направленностью возбуждаемых в твердом теле волн, что требуется для толщинометрии, обнаружения дефектов

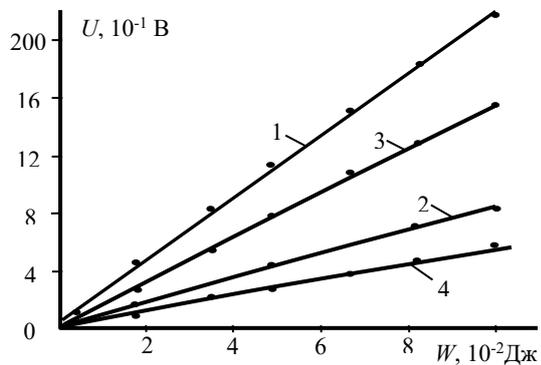


Рисунок 2 – Амплитуда УЗК при ОА-преобразовании на границе воздух–МЖ (1, 2); кварц–МЖ (3, 4):  $Q, \% = 0,29$  (1, 2);  $7,3$  (3, 4)

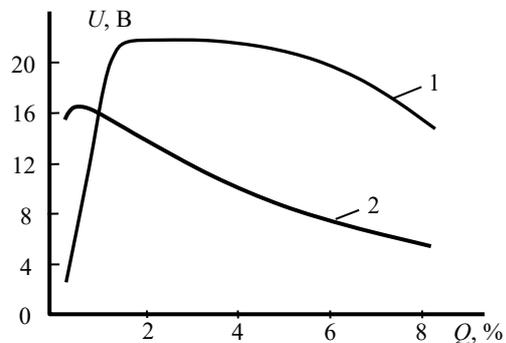


Рисунок 3 – Влияние концентрации магнетика на амплитуду акустического сигнала при воздействии лазерного излучения на границу кварц–МЖ (1) и воздух–МЖ (2)

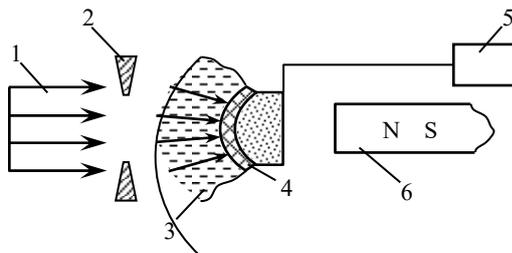


Рисунок 4 – Пример фокусировки энергии УЗК, возбуждаемых лазерным излучением, путем деформации объема МЖ магнитным полем для измерения интенсивности лазерного излучения и др. акустических приложений: 1 – лазерный луч, 2 – диафрагма, 3 – МЖ; 4 – пьезопреобразователь; 5 – приемник электрических колебаний; 6 – магнитная система

с малой отражающей способностью [4], измерения скорости УЗК, коррелирующей со структурой материала. С другой стороны, учитывая высокую эффективность ОА преобразования в МЖ, устойчивость и управляемость ее поверхности под воздействием магнитного поля, представляет значительный интерес использовать МЖ для измерения

интенсивности ЛИ, изменяемой по величине практически на 3 порядка и существенно расширенном диапазоне длин волн ЛИ. На рис.4 приведена одна из опытных схем, позволяющая фокусировать с помощью магнитного поля возбуждаемые ЛИ упругие волны, что представляет интерес как для измерения интенсивности ЛИ, так и для других акустических измерений.

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ, проект №Т15-153.*

### Литература

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига, Зинатне. 1989. – 389 с.

2. Гусев, В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. Москва : Наука, 1991. – 304 с.

3. Способ оптоакустического контроля качества неразъемного соединения двух материалов: пат. 17526 Респ.Беларусь, МПК G 01 N 29/04 / А.Р. Баев, В.Г. Гуделев, А.И. Митьковец. – № а20111234; заявл. 23.09.11; опубл. 30.04.13 // Открытия. Изобретения. – 2013. – 4 с.

4. Баев, А.Р. Оптоакустический метод ультразвуковой дефектоскопии и измерения физико-механических свойств твердых тел / А.Р. Баев, А.И. Митьковец, В.Г. Гуделев, Д.А. Костюк // Материалы 7-й Межд. науч. конф. «Лазерная физика и оптические технологии», ИФ им. Степанова НАН Беларуси. – Минск. – 2008. – Т 1. – С. 85–88.

УДК 681.2.082

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Таратын И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, Республика Беларусь

Для проведения анализа состава газовой среды широко используются полупроводниковые сенсоры. Основным материалом при разработке таких датчиков является кремний. Особое внимание при изготовлении сенсорных элементов следует уделять качеству подготовки поверхности подложек. Основной тип конструкций полупроводниковых сенсоров представляет собой кремниевую подложку, на поверхности которой сформирован диэлектрический слой, нагреватель, информационные электроды со сформированным на их поверхности газочувствительным слоем [1]. В силу своих полупроводниковых свойств поликристаллический кремний может выступать в качестве чувствительного элемента.

В ходе выполнения эксперимента по исследованию газочувствительных характеристик полупроводниковых свойств сенсорных элементов на кремниевых подложках был изготовлен чувствительный элемент из поликристаллического кремния размером 2,2x2,2x1,5 мм<sup>3</sup>. Полученный элемент был установлен в корпус с применением метода контактной сварки платиновой проволокой толщиной 20 мкм (рисунок 1). Кремний выполняет функцию нагревателя и информационных электродов. В качестве газочувствительного слоя был использован раствор SnO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Газочувствительный слой был получен с применением золь-гель методов и сформирован на поверхности сенсора с помощью микрошприца послойным путем [2]. Затем сенсор находился подключенным к источнику питания при токе 91 мА в течении 17 ч. Вольтамперные характеристики представлены на рисунке 2.

Вольтамперная характеристика при прямом ходе получена путем увеличения значения по-

даваемого тока на нагреватель, обратный ход – путём уменьшения значения тока. Как видно из рисунка 2 значения выходных характеристик не совпадают при прямом и обратном ходе, что вызвано особенностями тепловых характеристик взаимодействующих материалов. Затем сенсор был оставлен на 43 ч для формирования газочувствительного слоя при I=91 мА. Вольтамперная характеристика после длительного отжига представлена на рисунке 3.

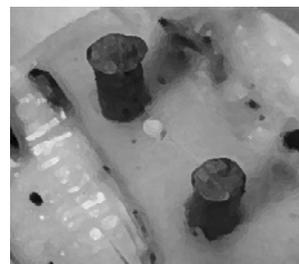


Рисунок 1 – Внешний вид полупроводникового сенсорного устройства с кремниевым нагревателем (с газочувствительным слоем)

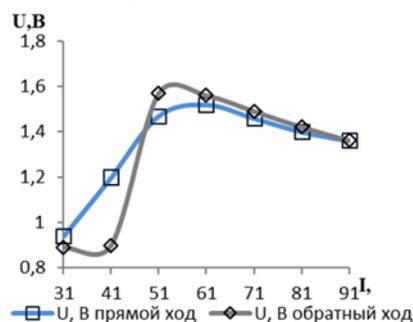


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика чувствительного элемента с кремниевым нагревателем до отжига