

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ПУТИ В ТОНКИХ СЛОЯХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ С ПОТЕРЯМИ НА ОТРАЖЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ

© 2019 г. А. В. Агашков<sup>a,\*</sup>, Н. С. Казак<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
Республика Беларусь, 220072, Минск, просп. Независимости, 68-2

\*e-mail: a.agashkov@ifanbel.bas-net.by

Поступила в редакцию 26.10.2018 г.

После доработки 26.10.2018 г.

Принята к публикации 19.01.2019 г.

Разработан дифференциальный поляризационный интерферометр, корректно измеряющий оптическую длину пути в тонких слоях метаматериалов с потерями на поглощение и отражение. В результате прямого измерения показано, что в широком диапазоне углов падения лазерного пучка с длиной волны излучения 632.8 нм бинарный слой Ag(28 нм)/SiO<sub>2</sub>(12 нм), нанесенный на стеклянную подложку, характеризуется отрицательным показателем преломления.

DOI: 10.1134/S0032816219040013

### ВВЕДЕНИЕ

Для подтверждения реальности идеи отрицательного показателя преломления, предложенной в [1], было проведено большое количество экспериментов. Широко используемое применение ( $R$ ,  $T$ )-метода и его модификаций, основанных на измерении спектров отражения  $R$  и пропускания  $T$ , требует соответствия расчетной модели и исследуемого образца, что зачастую не вполне достоверно. Как было показано в ряде исследований [2–6], эффекты негативной рефракции и суперлинзы не являются гарантированным подтверждением подобной идеи.

Концепция отрицательной оптической длины пути, рассмотренная в [7], является наиболее обоснованной идеей для подтверждения основного свойства слоя метаматериала – отрицательного показателя преломления.

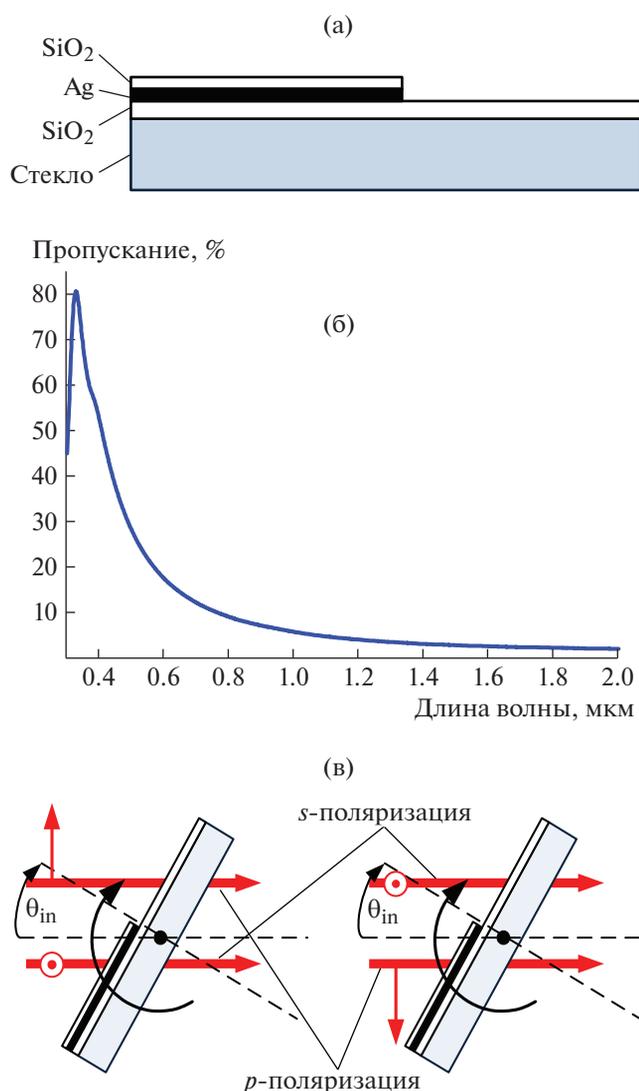
Прямые измерения данного параметра, точнее оптической разности хода (о.р.х.) между тонким слоем материала и слоем воздуха такой же толщины, позволяют создать в режиме пропускания так называемый walk-off interferometer [8, 9]. Подобные устройства обладают рядом недостатков. Различие в свойствах двоякопреломляющих элементов может приводить к некомпенсируемому сдвигу фаз между опорным и предметным пучками, что ухудшает точность измерений. Крайне проблематичны измерения зависимости о.р.х. от угла наклона образца. Отсутствует возможность выбо-

ра рабочей точки на первом этапе измерения, когда компенсируется о.р.х. между опорным и предметным пучками без слоя метаматериала. В результате измерение о.р.х. между слоем метаматериала и слоем воздуха такой же толщины на втором этапе может оказаться невозможным из-за выхода за границы рабочего диапазона фазового компенсатора. Наиболее существенный недостаток данных устройств заключается в том, что они корректно работают только с материалами, потери излучения в которых на отражение и поглощение пренебрежимо малы, что в настоящее время практически нереализуемо.

Указанные трудности были успешно преодолены в разработанной нами модификации интерферометра – дифференциальном поляризационном интерферометре (д.п.и.) [10, 11]. Ниже представлено описание экспериментального варианта д.п.и., который, за исключением перестраиваемого по длине волны лазерного источника, обладает всеми заявленными параметрами.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения эксперимента с отрицательным показателем преломления была выбрана пленочная структура диэлектрик–металл–диэлектрик, теоретически рассмотренная в [12], которую достаточно просто сформировать на стек-



**Рис. 1.** Образец метаматериала: схематическое представление (а), пропускание образца (б) и поляризационные соглашения (в).

лянной подложке. В эксперименте исследовались образцы пленок на плоскопараллельных пластинках из стекла К8 толщиной 2.9 мм, на которые был напылен слой SiO<sub>2</sub> толщиной 100 нм. Двухслойная пленка Ag(28 нм)/SiO<sub>2</sub>(12 нм) нанесена на часть поверхности подложки (рис. 1а). Спектр пропускания характеризуется отсутствием плазмонных резонансов (рис. 1б). Рис. 1в поясняет геометрию эксперимента, в частности положение оси вращения образца и ориентацию вектора поляризации, падающих на исследуемый образец пучков света.

Оптическая схема экспериментального образца дифференциального поляризационного интерферометра представлена на рис. 2. В качестве источника когерентного излучения *1* использует-

ся He-Ne-лазер JDSU 1144P. Поляризатор *2* с начальной ориентацией оси пропускания под углом 45° к плоскости рисунка формирует пучок с двумя ортогонально поляризованными компонентами. С помощью светоделителя *3* формируются две оптически связанные ветви I (4–9) и II (10–13). В качестве светоделителя *3* в экспериментальной установке использовано клиновое зеркало, развернутое на угол ~2° к оси ветви I.

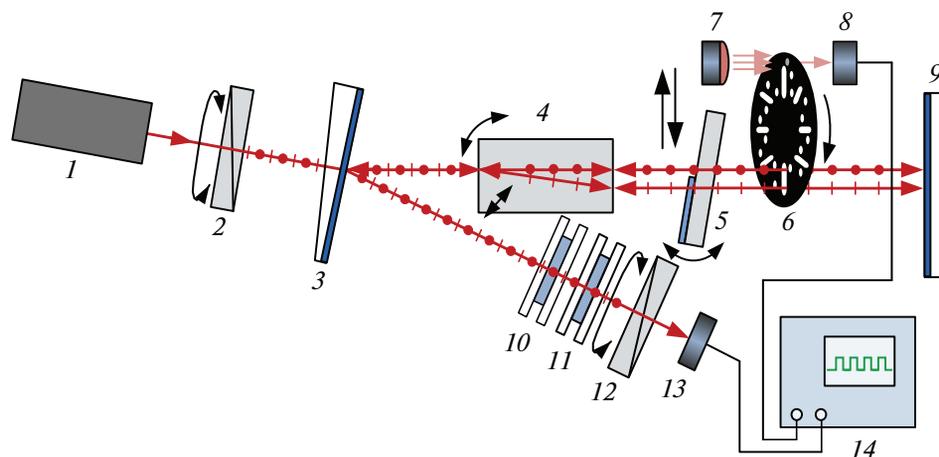
В установке в соответствии с [10, 11] используется только один двоякопреломляющий элемент *4* из кальцита с возможностью тонкой регулировки его наклона. После прохождения элемента *4* формируются два параллельных ортогонально поляризованных пучка, один из которых является опорным, а второй предметным.

В установке предусмотрены регулируемые сдвиг и наклон образца. Плоское зеркало *9* отражает падающие на него пучки в обратном направлении и обеспечивает двукратное прохождение излучения через исследуемый образец *5*, после чего они приобретают удвоенную о.р.х. После прохождения двоякопреломляющего элемента *4* в обратном направлении вновь формируется единый пучок с ортогонально поляризованными компонентами. Он частично отражается светоделителем *3* в ветвь II, последовательно проходит через электрически управляемые жидкокристаллические (ж.к.) компенсаторы *10* и *11*, которые управляют фазой одной из компонент и тем самым регулируют разность хода между ними.

Один из компенсаторов является измерительным устройством (например, это элемент *10*) и должен быть калиброван, второй – вспомогательный (элемент *11*) предназначен для выбора рабочей точки на первом этапе измерения. Здесь следует отметить, что ранее успешно прошел проверку метод выбора рабочей точки за счет тонкой регулировки (единицы угловых секунд) наклона двулучепреломляющего элемента [12]. Второй поляризатор (анализатор) *12* с осью пропускания –45° смешивает поляризационные компоненты падающего на него пучка, преобразуя в пучок, являющийся результатом интерференции поляризационных компонент.

Интерференционный пучок падает на фотоприемник *13*, преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал, который анализируется с помощью цифрового осциллографа *14*. При равных амплитудах поляризационных компонент и скомпенсированной о.р.х. между ними пучок за анализатором гасится, а амплитуда электрического сигнала равна нулю. Таким образом, при отсутствии потерь в образце алгоритмы работы данного устройства и walk-off интерферометра принципиально не отличаются.

В реальных условиях ортогонально поляризованные пучки, проходящие через образец, могут



**Рис. 2.** Оптическая схема экспериментального образца дифференциального поляризационного интерферометра. 1 – He-Ne-лазер; 2 – первый поляризатор; 3 – светоделитель; 4 – двоякопреломляющий элемент; 5 – образец; 6 – прерыватель; 7 – светодиод; 8 – фотодиод; 9 – плоское зеркало; 10, 11 – электрически управляемые ж.к.-компенсаторы; 12 – второй поляризатор (анализатор); 13 – фотоприемник; 14 – цифровой осциллограф.

испытывать потери. Так различие в потерях за двойной проход подложки при наклоне образца может достигать 12%. После прохождения предметным пучком поглощающей и/или отражающей исследуемой пленки его интенсивность может уменьшиться в 10–100 раз. В этом случае для корректного измерения о.р.х. необходимо выравнять интенсивности поляризационных компонент пучка, падающего на фотоприемник.

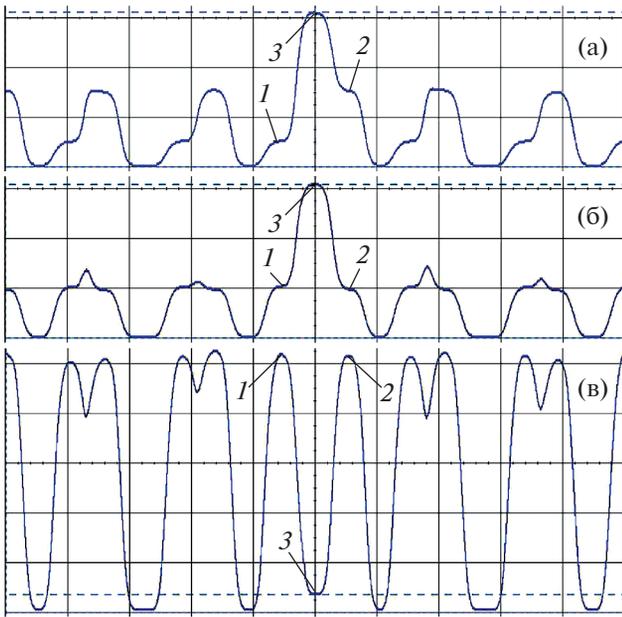
Для их выделения используется прерыватель 6, выполненный в виде вращающегося диска с системой отверстий и цепью синхронизации, в которую входят светодиод 7 и фотодиод 8. Прерыватель последовательно открывает на некоторое время ортогонально поляризованные пучки по отдельности, затем одновременно. Схема синхронизации позволяет получать на экране осциллографа стабильную картину с последовательным расположением импульсов, соответствующих отдельным ортогонально поляризованным пучкам и единому пучку с интерферирующими ортогонально поляризованными компонентами.

На начальном этапе измерения, когда оба пучка проходят только через подложку, амплитуды импульсов сигналов поляризационных компонент выравниваются с помощью поворота первого поляризатора 2 от начального угла  $45^\circ$ . Во временном интервале, когда прерыватель открывает оба пучка, на входе фотоприемника 13 наблюдается интерференция результирующего пучка, прошедшего через анализатор 12. Изменением управляющего напряжения на вспомогательном ж.к.-компенсаторе 11 добиваются минимума амплитуды импульса сигнала интерференционного пучка. Операции выравнивания амплитуд импульсов сигналов поляризационных компонент и минимизации амплитуды импульса сигнала ин-

терференционного пучка могут проводиться последовательно несколько раз для достижения требуемого результата. Пусть этому соответствует предварительно установленное показание  $p_1$  на измерительном ж.к.-компенсаторе.

На втором этапе измерения образец смещают таким образом, чтобы один из пучков проходил через поглощающую/отражающую пленку. Амплитуды импульсов сигналов поляризационных компонент выравниваются поворотом анализатора 12. Изменяя напряжения на измерительном компенсаторе, добиваются минимизации амплитуды сигнала интерференционного пучка. Операции выравнивания амплитуд сигналов поляризационных компонент и минимизации амплитуды интерференционного сигнала могут проводиться последовательно несколько раз для достижения требуемого результата.

На рис. 3 приведены реальные осциллограммы, зарегистрированные на цифровом осциллографе. Конфигурация импульсов определяется конструкцией вращающегося прерывателя. Если ж.к.-компенсаторы управляют сдвигом фазы компоненты пучка, поляризация которой совпадает с поляризацией пучка, проходящего через исследуемую пленку (предметного пучка), то измеренное значение о.р.х. равно  $\Delta p = (p_2 - p_1)/2$ , где  $p_2$  – показание измерительного компаратора на втором этапе измерения. При сдвиге фазы компоненты пучка, поляризация которой совпадает с поляризацией пучка, проходящего только через подложку (опорного пучка),  $\Delta p = -(p_2 - p_1)/2$ . Соответствующий сдвиг фаз в угловых градусах равен  $\Delta\phi = 360\Delta p/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны используемого лазерного излучения.



**Рис. 3.** Сигналы на фотоприемнике: неравные интенсивности компонент, фазы не компенсированы (а); равные интенсивности компонент, некомпенсированные фазы (б); равные интенсивности компонент, разность фаз нулевая (в). 1 и 2 – сигналы ортогонально поляризованных компонент; 3 – сигнал интерференционного пучка.

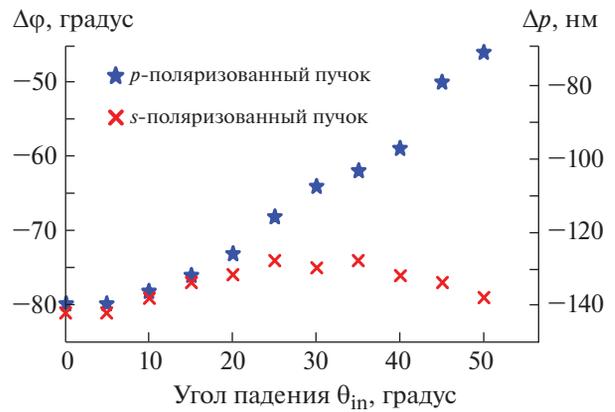
**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Для проверки работоспособности интерферометра была измерена о.р.х. пленки ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ ) толщиной  $d = 60$  нм, показатель преломления  $n = 1.7826$  на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм [13]. При нормальном падении пучка на образец расчетное значение о.р.х.  $\Delta p = (n - 1)d = 47$  нм, в результате измерения получено значение  $\Delta p = 48$  нм ( $\Delta\phi = 27.5^\circ$ ), что является достаточно хорошим совпадением. На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость о.р.х.  $\Delta p$  и фазового сдвига  $\Delta\phi$  структуры  $\text{Ag}/\text{SiO}_2$  от угла падения пучка света  $\theta_{\text{in}}$  для  $s$ - и  $p$ -поляризованного падающего излучения. Как видно из приведенного рисунка, двухслойная пленка  $\text{Ag}/\text{SiO}_2$  характеризуется отрицательной о.р.х., обладающей выраженной анизотропией для  $p$ - и  $s$ -поляризации. С ростом угла падения эта анизотропия монотонно возрастает.

В общем случае длина оптического пути в слое является отрицательной, если выполняется следующее условие:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p < 0 \\ |\Delta p| > d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При нормальном падении пучка излучения  $\Delta p(0^\circ) = -140 \pm 5$  нм, что при общей геометрической толщине слоя метаматериала  $d_{\text{AgSiO}_2} = 40$  нм удовлетворяет условию (1). Таким образом, длина



**Рис. 4.** Изменение о.р.х.  $\Delta p$  и фазового сдвига  $\Delta\phi$  от угла падения  $\theta_{\text{in}}$  для  $s$ - и  $p$ -поляризованных пучков.

оптического пути в слое  $(nd)_{\text{Ag}/\text{SiO}_2} = -100$  нм, а показатель преломления (точнее, его действительная часть)  $n_{\text{AgSiO}_2} = -2.5$ . Следовательно, как длина оптического пути, так и показатель преломления исследованного образца являются отрицательными. Близкие по значениям результаты были получены также для двухслойных пленок  $\text{Ag}(20 \text{ нм})/\text{TiO}_2(10 \text{ нм})$ .

В настоящее время отрицательная длина оптического пути не является общепризнанным физическим фактом, поэтому для подтверждения результатов прямого измерения необходимы различающиеся экспериментальные методики. В качестве устройства с иным принципом измерения может быть выбран неравноплечий интерферометр с непараллельным гомоцентрическим пучком лучей на входе, например, однопроходный – Маха–Цендера [14] или двухпроходный – Майкельсона.

Данные устройства просты в изготовлении и настройке, однако точность измерения оптической разности хода с их помощью несколько ниже. В подобных интерферометрах при размещении исследуемого объекта в коротком плече при показателе преломления слоя материала  $n > 1$  диаметр колец уменьшается, а при  $n < 1$  (в частности, при  $n < 0$ ) – увеличивается [15]. Измеренная длина оптического пути в слое является отрицательной, если выполняются условие (1). В экспериментах с образцами, аналогичными представленному на рис. 1, дифференциальный поляризационный интерферометр и неравноплечий интерферометр Маха–Цендера дали близкие по значениям результаты. Более подробно методика применения неравноплечих интерферометров к измерению отрицательной длины оптического пути будет представлена позже.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты измерения отрицательной оптической длины пути в тонком слое метаматериала с помощью предложенного дифференциального поляризационного интерферометра показали его перспективность для подобных исследований. Прямые измерения выполнены в диапазоне углов падения  $0-50^\circ$ , что по сведениям, известным авторам, выполнено впервые.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Г. Смирнову за измерения геометрических толщин пленок методом спектральной эллипсометрии.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке контракта КАССТ-ICHNM-SIPN/01 и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф18А3-003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Veselago V.G.* // УФН. 1967. Т. 92. № 3. С. 517. doi 10.3367/UFNr.0092.196707d.0517
2. *Luo C., Johnson S.G., Joannopoulos J.D., Pendry J.B.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. № 20. P. 201104-1. doi 10.1103/PhysRevB.65.201104
3. *Foteinopoulou S., Soukoulis C.M.* // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. № 23. P. 235107-1. doi 10.1103/PhysRevB.67.235107
4. *Kuo C.-H., Ye Z.* // Phys. Rev. E. 2004. V. 70. № 5. P. 056608-1. doi 10.1103/PhysRevE.70.056608
5. *Feng S., Li Z.-Y., Feng Z.-F., Ren K., Cheng B.-Y., Zhang D.-Z.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. № 6. P. 063102-1. doi 10.1063/1.2058190
6. *Belov P.A., Hao Y.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. № 11. P. 113110-1. doi 10.1103/PhysRevB.73.113110
7. *Veselago V., Braginsky L., Shklover V., Hafner C.* // J. Comput. Theor. Nanosci. 2006. V. 3. № 2. P. 1. doi 10.1166/jctn.2006.002
8. *Shalaev V.M., Cai W., Chettiar U.K., Yuan H.-K., Sarychev A.K., Drachev V.P., Kildishev A.V.* // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 24. P. 3356. doi 10.1364/OL.30.003356
9. *Drachev V.P., Cai W., Chettiar U. Yuan H.-K., Sarychev A.K., Kildishev A.V., Klimeck G., Shalaev V.M.* // Laser Phys. Lett. 2006. V. 3. № 1. P. 49. doi 10.1002/lapl.200510062
10. *Agashkov A.V., Kazak N.S., Agabekov V.E., Alshammari M.S.O., Binhussain M.A.* Patent US 9778019. 2017. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d9/a8/c6/af64e4ea53f693/US9778019.pdf>
11. *Agashkov A.V., Kazak N.S., Agabekov V.E., Alshammari M.S.O., Binhussain M.A.* Patent EP 3054274. 2017. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d3/12/13/850f6fe9cce6cc/EP3054274A1.pdf>
12. *Казак Н.С., Агашков А.В., Хило Н.А., Варанецкий А.М.* // Докл. НАН Беларуси. 2016. Т. 60. № 3. С. 43.
13. Refractive index of  $\text{In}_2\text{O}_3-\text{SnO}_2$  (Indium tin oxide, ITO) – Konig [Electronic resource]. <http://refractiveindex.info/?shelf=other&book=In2O3-SnO2&page=Konig>
14. *Agashkov A.V.* // J. Opt. Technol. 2015. V. 82. № 1. P. 6. doi 10.1364/JOT.82.000006
15. *Агашков А.В.* // VI Конгресс физиков Беларуси (20–23 ноября 2017): Сборник научных трудов. Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2017. С. 140. <http://master.basnet.by/congress2017/VIkongress.pdf>