

**А. В. Агашков, А. М. Варанецкий**  
Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБВОЛНОВЫХ СЛОЕВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

### **Введение**

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и магнитная проницаемость  $\mu$  являются основными характеристиками, определяющими распространение электромагнитных волн в среде. Веселаго в своей широко известной работе [1] предсказал, что в материалах с одновременно отрицательными  $\varepsilon$  и  $\mu$  направления групповой и фазовой скоростей света противоположны. Данное свойство среды описывается отрица-

тельным показателем преломления  $n$ . Несмотря на большое количество экспериментов, выполненных для подтверждения реальности идеи отрицательного показателя преломления, она не нашла достаточно широкого признания, что обусловлено рядом причин.

Отрицательная оптическая длина пути, рассмотренная в [2], является наиболее обоснованной идеей для подтверждения основного свойства слоя метаматериала – отрицательного показателя преломления.

Впервые попытки прямых измерений данного параметра, точнее оптической разности хода (OPD) между тонким слоем материала и слоем воздуха такой же толщины, были предприняты на устройстве типа «walk-off interferometer» [3]. 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 OPD от угла наклона образца. Отсутствует возможность выбора рабочей точки на первом этапе измерения, когда компенсируется OPD между опорным и предметным пучками без слоя метаматериала. В результате, измерение OPD 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.

Для преодоления указанных трудностей были разработаны два типа интерферометров. Один из них – дифференциальный поляризационный интерферометр (ДПИ) [4, 5], второй – неравноплечий интерферометр Маха-Цендера или Майкельсона [6]. Рассмотрим более подробно принципы их работы.

### **1. Используемые образцы метаматериалов**

Для проведения экспериментов с отрицательным показателем преломления была выбрана пленочная структура диэлектрик-металл-диэлектрик, сформированная на стеклянной подложке [5]. В эксперименте исследовались образцы пленок на плоскопараллельных пластинках из стекла К8 толщиной 2,9 мм, на которые был напылен слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм. Двухслойная пленка  $\text{Ag}(28 \text{ нм})/\text{SiO}_2(12 \text{ нм})$

нанесена на часть поверхности подложки. Спектр пропускания характеризуется отсутствием плазмонных резонансов.

## 2. Принцип работы дифференциального поляризационного интерферометра

Оптическая схема ДПИ и сигналы с фотоприемника представлены на рисунке 1.

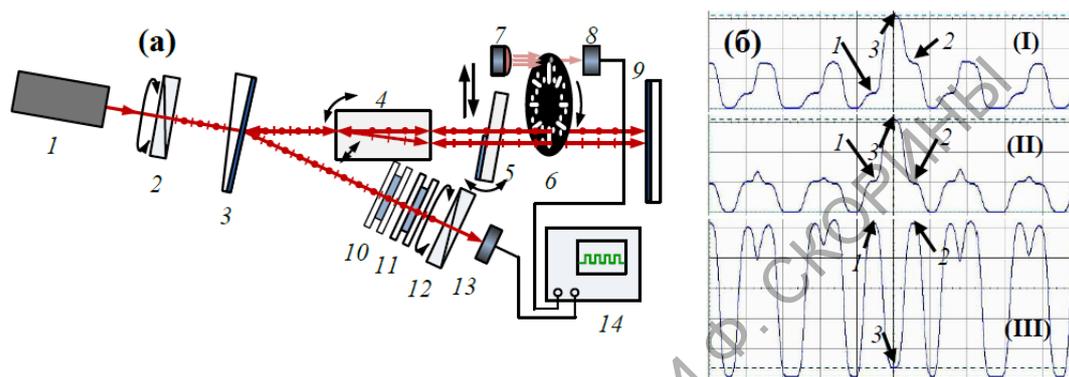


Рисунок 1 – Оптическая схема дифференциального поляризационного интерферометра (а): 1 – He-Ne-лазер; 2 – первый поляризатор; 3 – светоделитель; 4 – двоякопреломляющий элемент; 5 – образец; 6 – прерыватель; 7 – светодиод; 8 – фотодиод; 9 – плоское зеркало; 10, 11 – электрически управляемые ЖК-компенсаторы; 12 – второй поляризатор (анализатор); 13 – фотоприемник; 14 – цифровой осциллограф. Сигналы с фотоприемника (б): 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

Амплитуды поляризационных компонент выравниваются поляризаторами, ЖК-компенсаторы управляют фазами. Один из компенсаторов служит для выбора рабочей точки, второй – для измерения разности фаз.

## 3. Принцип работы неравноплечих интерферометров

На рисунках 2 и 3 показан принцип работы неравноплечих интерферометров: S – когерентный точечный источник (сферический волновой фронт) или когерентный линейный источник (цилиндрический волновой фронт); BS, BS1 и BS2 – делители пучка; M1 и M2 – зеркала; O – объект; P – плоскость наблюдения, она находится на расстоя-

нии  $z$  от источника (путь S-P в интерферометре Маха-Цендера и S-M1-P в интерферометре Майкельсона, соответственно); С – цифровая камера

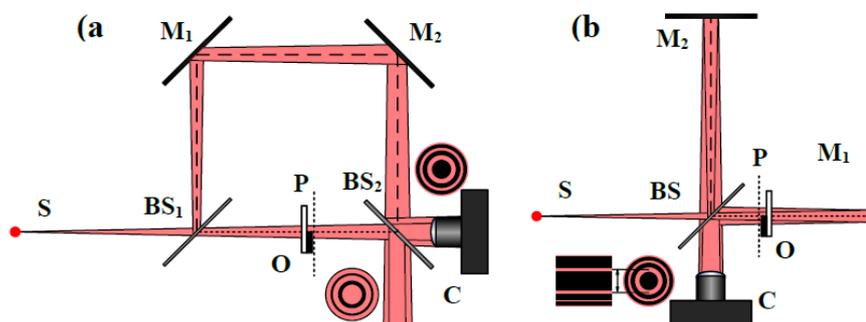


Рисунок 2 – Неравноплечие интерферометры: (а) однопроходный интерферометр Маха-Цендера, (б) двухпроходный интерферометр Майкельсона,

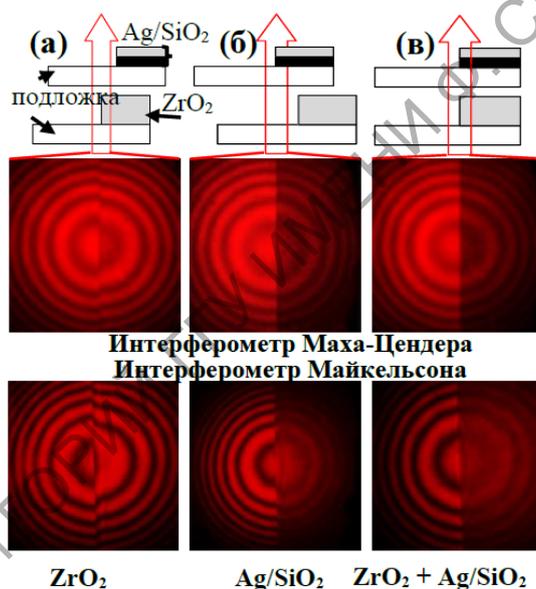


Рисунок 3 – Взаимодействие удаленных слоев  $ZrO_2$  и  $Ag/SiO_2$ , находящихся на расстоянии  $\sim 7$  см: Положение объектов в коротком плече интерферометров представлено вверху. Соответствующие им интерферограммы, полученные в интерферометре Маха-Цендера, отображены в среднем ряду и в интерферометре Майкельсона – в нижнем ряду

### 3. Обсуждение результатов

Прямые измерения с помощью ДПИ, выполненные в диапазоне углов падения  $0-50^\circ$ , показали, что в структуре  $Ag(28 \text{ нм})/SiO_2(12 \text{ нм})$  длина оптического пути, как и показатель преломления являются отрицательными. С ростом угла падения анизотропия показателя преломления для  $p$ - и  $s$ -поляризации монотонно возрастают.

Показано, что неравноплечие интерферометры, например, однопроходный – Маха-Цендера или двухпроходный – Майкельсона, освещаемые когерентным точечным источником (сферический волновой фронт) или когерентным линейным источником (цилиндрический волновой фронт), позволяют однозначно определить знак фазового сдвига вопреки общепринятому принципу неопределенности знака в двухлучевой интерферометрии.

### **Заключение**

Разработано устройство (дифференциальный поляризационный интерферометр), позволяющий корректно измерять фазовый сдвиг, производимый тонким слоем метаматериала с потерями, в широком диапазоне углов падения излучения.

Предложена методика определения знака OPD на основании одиночной интерферограммы с помощью неравноплечих интерферометров. Экспериментально установлено, что положительная длина оптического пути обычной среды в воздухе может быть компенсирована удаленным слоем метаматериала с отрицательным показателем преломления.

### **Литература**

1. Веселаго, В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  / В. Г. Веселаго // УФН. – 1967. – Т. 92, № 3. – С. 517–526.
2. Веселаго, В. Г. О формулировке принципа Ферма для света, распространяющегося в веществах с отрицательным преломлением / В. Г. Веселаго // УФН. – 2002. – Т. 172, № 10. – С. 1215–1218.
3. Shalaev, V. M. Negative index of refraction in optical metamaterials / V. M. Shalaev [et al.] // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30, № 24. – P. 3356–3358.
4. Agashkov, A. V. Differential polarization interferometer / A. V. Agashkov [et al.] // Patent US 9778019: Int. Cl. G01B 9/02, G01J 9/02 (2006.01) /; Date of Patent: 03.10.2017.
5. Агашков, А. В. Применение дифференциального поляризационного интерферометра для измерения оптической длины пути в тонких слоях метаматериалов с потерями на отражение и поглощение / А. В. Агашков, Н. С. Казак // ПТЭ. – 2019. – № 4. – С. 84–88.

6. Agashkov, A. Two-beam interferometry for characterizing subwavelength layers with a negative optical path length / A. Agashkov // Opt. Commun. – 2020. – № 462. – 125306 (4 pp.).