

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ “БЫСТРОЙ”
ОСИ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫХ ПЛАСТИНОК© 2022 г. В. М. Стяпшин^{а,*}, Г. М. Михеев^{а,**}^а Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

*e-mail: vms@udman.ru

**e-mail: mikheev@udman.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Предложен простой метод определения “быстрой” оси четвертьволновых пластинок, основанный на регистрации возникающих в пленочных структурах поверхностных фототоков, зависящих от направления вращения вектора электрического поля падающего импульсного лазерного излучения. В качестве поляризационно-чувствительных пленочных структур можно использовать серебропалладиевые (Ag/Pd) нанокompозитные пленки, изготовленные по толстопленочной технологии, а также тонкие нанокompозитные пленки CuSe/Se, синтезированные методом вакуумно-термического напыления. Разработанный метод позволяет оперативно определять “быструю” ось четвертьволновых пластинок, работающих в широком диапазоне длин волн, от 266 до 4000 нм, без использования дополнительных оптических приспособлений.

DOI: 10.31857/S0032816222040267

Фазовые четвертьволновые пластинки применяются для прямого и обратного преобразований линейно поляризованного излучения в эллиптически или циркулярно поляризованное. Важным параметром этих пластинок является расположение “быстрой” и “медленной” осей, определяющих направление вращения вектора электрического поля E в прошедшем излучении. В тех сферах применения, где направление вращения вектора E имеет значение, важно знать, какая из осей четвертьволновой пластинки является “быстрой”, а какая – “медленной”. Обычно производители указывают на готовом изделии “быструю” ось, однако известны случаи, когда в продажу поступали изделия с ошибочно указанными осями. В связи с этим при проведении экспериментов возникает потребность в простом методе для самостоятельного определения осей четвертьволновых пластинок. В данной работе мы представляем метод определения “быстрой” оси четвертьволновых пластинок, принципиально отличающийся от известных методов с использованием поляризационных оптических элементов.

Действие четвертьволновых пластинок основано на эффекте двойного лучепреломления в материалах с показателем преломления, зависящим от поляризации и направления распространения света. Обычно четвертьволновые пластинки изготавливают из одноосных кристаллов, распола-

гая рабочие грани пластинки, через которые вводится и выводится излучение, параллельно оптической оси. В плоскости рабочей грани выделяют две взаимно перпендикулярные оси: обыкновенную и необыкновенную, различающиеся показателями преломления. При этом необыкновенная ось совпадает с оптической осью кристалла. Для удобства вместо обыкновенной и необыкновенной осей различают соосные им, в зависимости от материала пластинки, “быструю” и “медленную” оси. Нормально падающее линейно поляризованное излучение распространяется внутри четвертьволновой пластинки в виде двух взаимно перпендикулярных волн, колебания вектора E в которых происходят вдоль “быстрой” и “медленной” осей с амплитудами, равными проекциям вектора E входящей в пластинку волны на направления указанных осей. Термины “быстрая” и “медленная” определяются исходя из фазовой скорости света в кристалле, определяемой по формуле $v = c/n$, где c – скорость света в вакууме, а n – показатель преломления кристалла в плоскости колебаний вектора E . Для волны, поляризованной вдоль “быстрой” оси, пластинка имеет меньший показатель преломления, чем для волны, поляризованной вдоль “медленной” оси, поэтому фазовая скорость первой волны больше. При распространении между двумя волнами возникает фазовый сдвиг, который на выходе из пла-

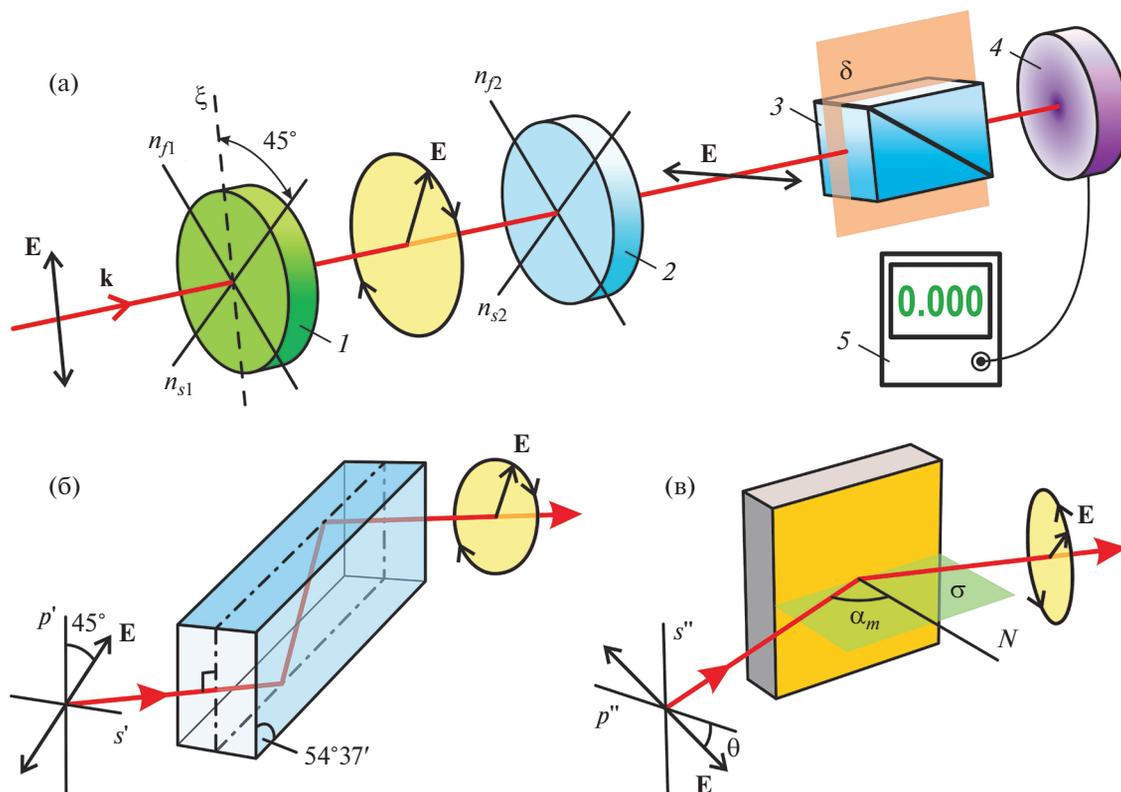


Рис. 1. Метод определения “быстрой” оси четвертьволновой пластинки при помощи эталонной четвертьволновой пластинки (а) и преобразование линейно поляризованного излучения в циркулярно поляризованное при помощи ромба Френеля (б) и металлического зеркала (в). 1 и 2 – эталонная и проверяемая четвертьволновые пластинки соответственно; 3 – анализатор; 4 – фотоприемник; 5 – электроизмерительное устройство; n_{f1} и n_{f2} , n_{s1} и n_{s2} – “быстрые” и “медленные” оси эталонной и проверяемой четвертьволновых пластинок соответственно; δ – плоскость пропускания анализатора; \mathbf{k} , \mathbf{E} – соответственно волновой и электрический векторы падающего излучения ($\mathbf{k} \perp \mathbf{E}$, $\mathbf{k} \perp \xi$, ξ лежит в плоскости δ); штрихпунктирной линией обозначена плоскость симметрии ромба Френеля; p' и s' – оси прямоугольной системы координат, направленные перпендикулярно лучу вдоль и поперек плоскости симметрии ромба Френеля соответственно; N – нормаль к поверхности зеркала; σ – плоскость падения луча на зеркало; α_m – главный угол падения; p'' и s'' – оси прямоугольной системы координат, направленные перпендикулярно лучу вдоль и поперек плоскости σ соответственно; θ – угол между вектором \mathbf{E} и плоскостью σ .

стинки составляет четверть длины волны, что приводит в общем случае к преобразованию линейно поляризованного излучения в излучение с эллиптической поляризацией. Излучение, поляризованное по биссектрисе между “быстрой” и “медленной” осями, приобретает циркулярную поляризацию, а поляризованное параллельно одной из этих осей – остается линейно поляризованным. При этом направление вращения вектора \mathbf{E} выходящего излучения зависит от знака фазового сдвига, определяемого взаимным расположением осей четвертьволновой пластинки и плоскости поляризации падающего на нее излучения. Если при взгляде со стороны источника излучения и мысленном повороте плоскости поляризации падающего на пластинку излучения по часовой стрелке первой встречается “быстрая” ось, то из-

лучение на выходе будет поляризовано вправо, а если “медленная” – влево¹.

Определить “быструю” ось можно различными методами, например, при помощи эталонной четвертьволновой пластинки с известной ориентацией осей, анализатора и фотоприемника (рис. 1а). Для этого линейно поляризованное излучение следует преобразовать в циркулярно поляризованное при помощи эталонной пластинки, работающей на одной длине волны с проверяемой. Плоскость пропускания анализатора следует расположить параллельно плоскости поляризации падающего на эталонную пластинку излучения, а

¹ В данной работе поляризация считается правой или левой, когда наблюдателю, смотрящему навстречу световому лучу, кажется, что конец электрического вектора описывает эллипс, двигаясь по часовой или против часовой стрелки соответственно.

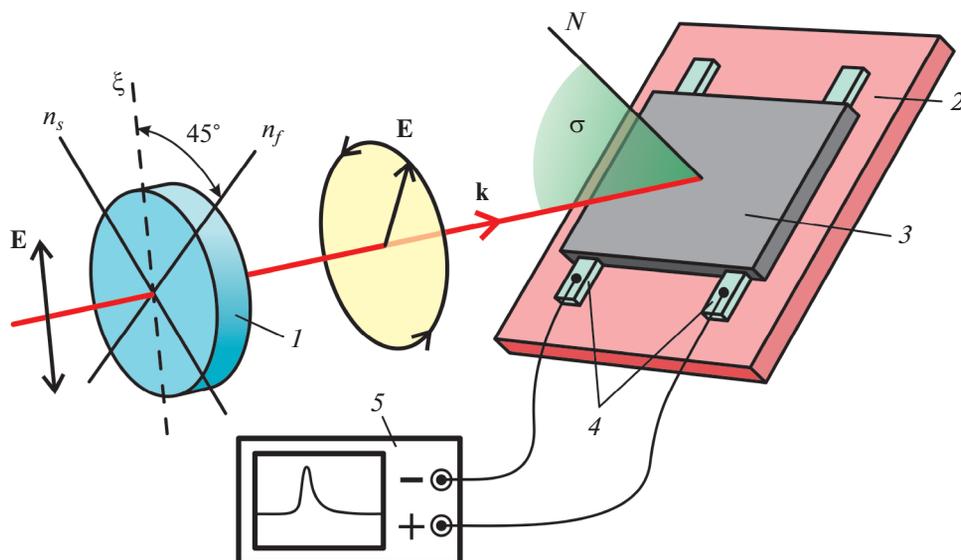


Рис. 2. Схема регистрации циркулярного фототока. 1 – четвертьволновая пластинка; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – проводящая пленка, обладающая свойством генерации циркулярного фототока; 4 – измерительные электроды; 5 – осциллограф; n_f и n_s – “быстрая” и “медленная” оси четвертьволновой пластинки соответственно; N – нормаль к поверхности пленки; σ – плоскость падения; \mathbf{k} , \mathbf{E} – соответственно волновой и электрический векторы падающего излучения ($\mathbf{k} \perp \mathbf{E}$, $\mathbf{k} \perp \xi$, ξ лежит в плоскости σ); измерительные электроды параллельны σ .

проверяемую пластинку установить перед анализатором так, чтобы сигнал на его выходе обратился в нуль. В таком положении обе пластинки совместно действуют как одна полуволновая и их “быстрые” оси параллельны.

При отсутствии эталонной четвертьволновой пластинки преобразовать линейно поляризованное излучение в циркулярно поляризованное можно при помощи ромба Френеля (рис. 1б). Для этого плоскость поляризации излучения, нормально падающего на входную грань ромба, следует установить под углом 45° к плоскости его симметрии [1]. Далее плоскость пропускания анализатора устанавливают параллельно плоскости поляризации падающего на ромб излучения, а проверяемую пластинку размещают между ромбом и анализатором так, чтобы сигнал на выходе из анализатора обратился в нуль. В таком положении “быстрая” ось проверяемой четвертьволновой пластинки окажется параллельной плоскости симметрии ромба Френеля.

Вместо ромба Френеля или эталонной четвертьволновой пластинки можно также использовать металлическое зеркало. При падении линейно поляризованного излучения на поверхность зеркала под определенным углом α_m (рис. 1в), называемым главным углом падения, между p - и s -компонентами поляризации отраженного излучения возникает разность фаз в четверть длины волны, а вектор \mathbf{E} описывает эллипс, полуоси которого совпадают с p - и s -направлениями (вдоль и поперек плоскости падения σ соответственно)

[2]. При этом отраженное излучение будет поляризовано по кругу, если плоскость поляризации падающего на металлическое зеркало излучения составляет с плоскостью падения угол θ , тангенс которого равен отношению коэффициентов отражения p - и s -компонент [2]. Полученное при помощи металлического зеркала циркулярно поляризованное излучение следует пропустить через анализатор, плоскость пропускания которого установлена под углом 45° к плоскости падения на зеркало линейно поляризованного излучения и под наименьшим углом к плоскости поляризации последнего. Установив проверяемую четвертьволновую пластинку перед анализатором так, чтобы сигнал на его выходе обратился в нуль, найдем “быструю” ось пластинки: она окажется параллельна зеркалу. Следует отметить, что на длине волны 532 нм углы α_m и θ , согласно справочным данным, для золота составляют 69° и 33° , а для серебра – 75° и 44° соответственно. При этом в инфракрасной области с увеличением длины волны угол α_m приближается к 90° , и получение циркулярной поляризации становится возможным только при многократном отражении.

Во всех рассмотренных методах для определения “быстрой” оси четвертьволновых пластинок используются поляризационные оптические приспособления. Они имеют ограничения по ширине рабочего спектра и нуждаются в определенной юстировке при применении. Также для индикации прошедшего через анализатор излучения за пре-

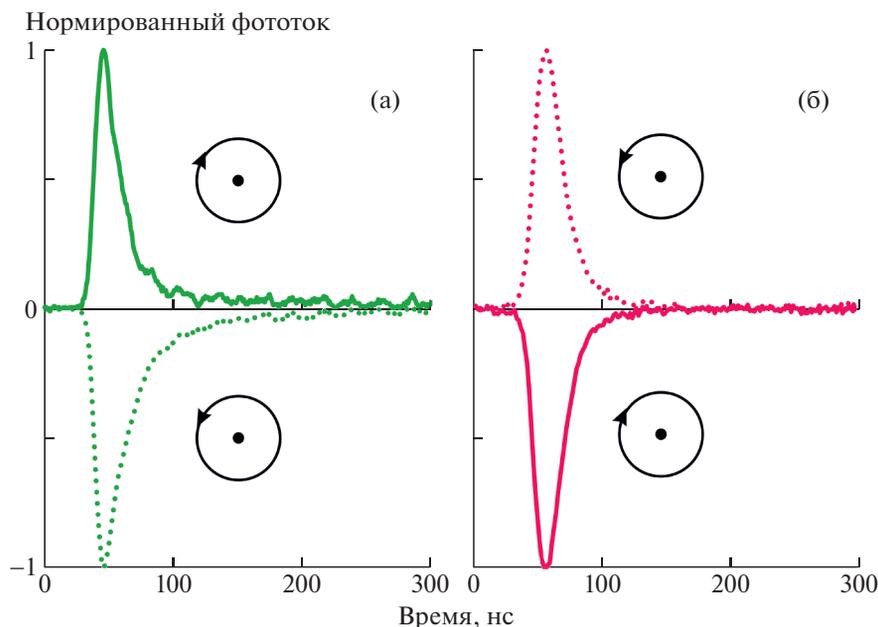


Рис. 3. Нормированные на пиковые значения осциллограммы фототока, полученные при наклонном облучении импульсным циркулярно поляризованным лазерным излучением нанокompозитной Ag/Pd-пленки на длине волны 532 нм (а) и нанокompозитной пленки CuSe/t-Se на длине волны 1064 нм (б). На вставках показано направление вращения вектора электрического поля в падающем излучении.

делами видимого диапазона требуются соответствующие фотоприемники.

Предлагаемый фотовольтаический метод определения “быстрой” оси позволяет отказаться от поляризационной оптики и фотоприемников. Он основан на применении специальных пленочных структур, обладающих свойством генерации фототока, зависящего от знака циркулярной поляризации падающего излучения.

В работах [3–5] нами было показано, что при наклонном падении на нанокompозитную Ag/Pd-пленку импульсного циркулярно поляризованного лазерного излучения (рис. 2) в ней возникает импульсный поперечный фототок (фотоэдс), протекающий в направлении, перпендикулярном плоскости падения, в широком диапазоне длин волн. Амплитуда фототока линейно зависит от энергии падающего излучения, а полярность определяется направлением вращения вектора E и знаком угла падения. Такой фототок называется циркулярным. При нормальном падении он отсутствует. Наблюдаемое явление нашло объяснение в рамках теории эффекта увлечения и поверхностного фотогальванического эффекта [6, 7].

Для примера на рис. 3а представлены нормированные на пиковые значения осциллограммы фототока, возникающего в нанокompозитной Ag/Pd-пленке при наклонном облучении (под углом 45°) импульсным циркулярно поляризованным лазерным излучением с длиной волны 532 нм. На вставках показано соответствующее направление вра-

щения вектора E в падающем излучении. Фототок возбуждался и регистрировался по схеме, представленной на рис. 2. Энергия лазерных импульсов длительностью 13.5 нс составляла 1.4 мДж. В качестве регистрирующего устройства использовался цифровой осциллограф с входным сопротивлением 50 Ом и полосой пропускания 7 ГГц.

Согласно рис. 3а, при воздействии на Ag/Pd-пленку лазерного излучения, циркулярно поляризованного вправо, электрический сигнал, регистрируемый осциллографом, имеет положительную полярность, а для излучения, поляризованного влево, – отрицательную. Нами установлено, что такое соответствие характерно для всего диапазона длин волн от 266 до 4000 нм. Учитывая, что направление вращения вектора E на выходе из четвертьволновой пластинки определяется взаимным расположением осей пластинки и плоскости поляризации падающего на нее излучения, можно установить однозначное соответствие между полярностью регистрируемого в Ag/Pd-пленке электрического сигнала и положением “быстрой” оси четвертьволновой пластинки. Если полярность сигнала положительная, то “быстрая” ось встречается первой при взгляде со стороны источника излучения и мысленном повороте плоскости поляризации падающего на пластинку излучения по часовой стрелке (см. рис. 2). В случае отрицательного сигнала “быстрая” ось встречается первой при повороте против часовой стрелки.

Следует отметить, что технология получения Ag/Pd-пленок известна [8, 9]. В наших экспериментах использовались Ag/Pd-пленки размером 12.5×11 мм, полученные по стандартной толстопленочной технологии путем вжигания резистивной серебро-палладиевой пасты на керамическую подложку. В состав пасты входили следующие компоненты: Ag_2O – 17.78 вес.%, Pd – 18.05 вес.%, стекло свинцовоборосиликатное – 44.17 вес.%, органическое связующее – 20 вес.%. Пасту вжигали поверх двух предварительно сформированных на подложке параллельных пленочных серебряных измерительных электродов шириной 2 мм. Вжигание осуществлялось в конвейерной печи по стандартному температурному профилю при максимальной температуре 560°C в течение 40 мин. В результате этого процесса, при котором органическое связующее испаряется и сгорает, палладий вступает в химическую реакцию с оксидом серебра и кислородом воздуха, а расплавленное стекло смачивает образовавшиеся продукты реакции, были получены механически прочные пленки толщиной около 10 мкм с квазиоднородным распределением нанокристаллитов металлического твердого раствора Ag/Pd и полупроводникового PdO в аморфной диэлектрической стеклянной матрице [10]. Сопротивление постоянному току между измерительными электродами после нанесения пленок составило около 70 Ом.

Заметим, что при относительной простоте изготовления Ag/Pd-пленок, их высокой прочности и износостойкости коэффициент преобразования энергии лазерных импульсов в фототок в них относительно мал и составляет около 0.07 А/Дж [3], а входящий в состав палладий имеет высокую стоимость.

В то же время существуют другие материалы, в которых возможна генерация циркулярного фототока [11–13]. В частности, нами установлено, что циркулярный фототок способен возникать в тонких стехиометрических пленках селенида меди CuSe [14] и в тонких нанокомпозитных пленках CuSe/Se [15] под действием наносекундных и фемтосекундных лазерных импульсов. Как показывают наши исследования, коэффициент преобразования энергии лазерных импульсов в циркулярный фототок в тонких пленках на основе CuSe может быть более чем на один порядок выше, чем в Ag/Pd-пленках. При этом генерация циркулярного фототока в тонких пленках на основе CuSe находится в качественном согласии с теорией генерации фототока за счет циркулярного поверхностного фотогальванического эффекта [14].

На рис. 3б представлены нормированные на пиковые значения осциллограммы фототока, экспериментально полученные нами при облучении циркулярно поляризованным импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм

тонкой нанокомпозитной пленки, состоящей из кристаллических фаз CuSe и тригонального селена *t*-Se. Облучение осуществлялось под углом 45° по представленной на рис. 2 схеме при длительности и энергии лазерных импульсов 20 нс и 0.3 мДж соответственно. Согласно рис. 3б, полярность циркулярного фототока в нанокомпозитной пленке CuSe/*t*-Se на длине волны 1064 нм имеет обратную зависимость от направления вращения вектора **E** в падающем излучении по сравнению с Ag/Pd-пленкой.

Примечательно, что технология изготовления тонких пленок CuSe/Se проста. Однако эти пленки обладают гораздо меньшей износостойкостью (легко царапаются мягкими материалами, например, ватным тампоном). В наших экспериментах тонкие пленки CuSe и CuSe/Se синтезировались вакуумно-термическим напылением на стеклянную подложку при последовательном распылении гранул Se и Cu в едином вакуумном цикле [15]. Для этого использовался универсальный вакуумный пост ВУП-5. В экспериментах подложка размером 15×35 мм находилась при комнатной температуре и располагалась перпендикулярно к направлению движения напыляемых частиц. Расстояние от испарителя до подложки составляло 120 мм. Давление в вакуумной камере равнялось 10^{-3} Па. Горячие пары и кластеры меди, попадая на легкоплавкий селен, вступали с ним в химическую реакцию, образуя поверх слоя селена слой селенида меди. Меняя соотношения навесок Se и Cu в испарителе, можно было получать стехиометрические пленки CuSe или нанокомпозитные пленки CuSe/*a*-Se, состоящие из нанокристаллитов CuSe и аморфного селена *a*-Se. Для перевода *a*-Se в кристаллическую форму *t*-Se осуществлялся отжиг полученной нанокомпозитной пленки CuSe/*a*-Se при температуре 140°C в течение 30 мин. Для регистрации фототока вдоль коротких сторон подложки на пленку были нанесены два параллельных тонкопленочных измерительных электрода из золота шириной 5 мм. Варьируя навеску испаряемых материалов Se и Cu, мы по данной методике получили сплошные нанокомпозитные пленки CuSe/Se толщиной от 40 до 250 нм. При этом сопротивление постоянному току между измерительными электродами находилось в пределах от 30 до 100 Ом.

Как отмечалось ранее, для регистрации импульсов фототока наносекундной длительности, возникающих в поляризационно-чувствительных пленочных структурах, использовался цифровой осциллограф. Согласно разработанной методике, для определения “быстрой” оси четвертьволновой пластинки достаточно информации о полярности всего одного импульса циркулярного фототока, полученного за одну вспышку импульсного лазерного источника. Это означает, что цифровой осциллограф может быть с успехом заменен на

простое электронное устройство, позволяющее определять полярность электрических импульсов наносекундной длительности, возникающих в пленочной структуре.

Таким образом, в работе предложен и реализован метод, позволяющий осуществить оперативное определение “быстрой” оси четвертьволновой пластинки с помощью поляризационно-чувствительных пленочных структур, генерирующих электрические импульсы противоположной полярности при лево- и право-циркулярно поляризованной импульсной лазерной накачке. В качестве поляризационно-чувствительных структур могут быть использованы нанокompозитные Ag/Pd-пленки, изготавливаемые по толстопленочной технологии, а также тонкие пленки на основе CuSe, синтезируемые методом вакуумно-термического напыления. С применением разработанной методики возможно оперативное определение “быстрой” оси различных четвертьволновых пластинок, работающих в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном оптическом диапазонах.

БЛАГОДАРНОСТИ

При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП “Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий” УдмФИЦ УрО РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (№ гос. рег. 1021032422167-7-1.3.2) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00112).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 62.
2. Борбат А.М., Горбань И.С., Охрименко Б.А. Оптические измерения. Киев: Техника, 1967. С. 326.
3. Михеев Г.М., Саушин А.С., Зонов Р.Г., Стяшин В.М. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 10. С. 37.
4. Михеев Г.М., Саушин А.С., Ванюков В.В. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 7. С. 635. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n07ABEH015783>
5. Mikheev G.M., Saushin A.S., Vanyukov V.V., Mikheev K.G., Svirko Y.P. // Nanoscale Res. Lett. 2017. V. 12. P. 39. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1771-4>
6. Gurevich V.L., Laiho R. // Phys. Solid State. 2000. V. 42. № 10. P. 1807. <https://doi.org/10.1134/1.1318868>
7. Saushin A.S., Mikheev G.M., Vanyukov V.V., Svirko Y.P. // Nanomaterials. 2021. V. 11. № 11. P. 2827. <https://doi.org/10.3390/nano11112827>
8. Wang S.F., Dougherty J.P., Huebner W., Pepin J.G. // J. Am. Ceram. Soc. 1994. V. 77. № 12. P. 3051. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb04549.x>
9. Михеев Г.М., Саушин А.С., Гончаров О.Ю., Дорофеев Г.А., Гильмутдинов Ф.З., Зонов Р.Г. // ФТТ. 2014. Т. 56. № 11. С. 2212.
10. Saushin A.S., Zonov R.G., Aleksandrovich E.V., Mikheev K.G., Ali R., Vanyukov V.V., Mikheev G.M. // Phys. Status Solidi B. 2019. V. 256. № 9. P. 1800671. <https://doi.org/10.1002/pssb.201800671>
11. Glazov M.M., Ganchev S.D. // Phys. Rep. 2014. V. 535. P. 101. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.10.003>
12. Kastl C., Karnetzky C., Karl H., Holleiter A.W. // Nat. Commun. 2015. V. 6. P. 6617. <https://doi.org/10.1038/ncomms7617>
13. Zonov R.G., Mikheev G.M., Obratsov A.N., Svirko Y.P. // Opt. Lett. 2020. V. 45. № 7. P. 2022. <https://doi.org/10.1364/OL.391528>
14. Mikheev G.M., Kogai V.Y., Mogileva T.N., Mikheev K.G., Saushin A.S., Svirko Y.P. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. P. 061101. <https://doi.org/10.1063/1.5109069>
15. Mikheev G.M., Kogai V.Y., Mikheev K.G., Mogileva T.N., Saushin A.S., Svirko Y.P. // Mater. Today Commun. 2019. V. 21. P. 100656. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100656>