

Фототок в резистивных пленках Ag/Pd, зависящий от знака циркулярной поляризации ИК лазерного излучения

Г.М.Михеев, А.С.Саушин, В.В.Ванюков

Показано, что в резистивных пленках Ag/Pd, изготовленных по толстопленочной технологии, при наклонном падении лазерного излучения наносекундной длительности с длинами волн 1350–2100 нм в направлении, перпендикулярном плоскости падения, имеет место фототок фотонного увлечения, зависящий от эллиптичности и знака циркулярной поляризации падающего излучения. Наблюдаемый фототок состоит из так называемых циркулярного и линейного вкладов, соответственно зависящих и не зависящих от знака циркулярной поляризации. В указанном диапазоне длин волн амплитуда циркулярного вклада во много раз превышает амплитуду линейного вклада. Полученные результаты позволяют использовать резистивные пленки Ag/Pd для разработки и изготовления принципиально новых датчиков знака циркулярной поляризации импульсного лазерного излучения, работающих в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: эффект увлечения, циркулярная поляризация, знак циркулярной поляризации, циркулярный фототок, ИК излучение, резистивные пленки Ag/Pd, датчик знака циркулярной поляризации света.

1. Введение

Одной из интересных особенностей взаимодействия лазерного излучения с электропроводящими пленочными материалами является генерация поверхностных токов, обусловленных различными механизмами [1–9]. Среди них особое место занимают циркулярный фотогальванический эффект (ЦФГЭ) [10, 11] и эффект увлечения [12, 13], которые могут приводить к генерации фототока, зависящего от степени эллиптичности поляризации и направления вращения вектора электрического поля (знака циркулярной поляризации) возбуждающего света. Для простоты такой ток называется циркулярным фототоком (ЦФТ) [14]. Исследования ЦФТ представляют интерес с точки зрения развития спинтроники [15] и разработки датчиков знака циркулярной поляризации лазерного излучения [14].

ЦФГЭ возникает в гиротропных средах, где нарушается их симметрия относительно зеркального преобразования, и обусловлен особенностями зонной структуры гиротропных кристаллов. Впервые он был обнаружен в теллуре [16]. Эффект наблюдался в виде фото-ЭДС, возникающей между торцами цилиндрического стержня кристаллического теллура длиной 8 мм при освещении его торцевой поверхности импульсным излучением CO₂-лазера на длине волн 10.6 мкм, направленным вдоль геометрической оси образца. ЦФГЭ проявляется и в других гиротропных материалах, например в силикате висмута Bi₁₂SiO₂₀ [17], в квантовых ямах [6, 18], а также в кристаллических пленках InN при межзонных квантовых переходах [19]. Следует отметить, что в квантовых ямах в зависимости от типа симметрии ЦФГЭ может наблюдаться как при наклонном,

так и при нормальном падении эллиптически поляризованного света на поверхность образца [20].

Эффект увлечения, впервые обнаруженный в работах [21, 22], приводит к генерации фото-ЭДС (фототока) за счет передачи импульса фотонов падающего излучения носителям заряда при внутризонных или межзонных энергетических переходах. В отличие от ЦФГЭ, эффект увлечения можно наблюдать и в centrosymmetric средах [13]. При циркулярной поляризации возбуждающего излучения эффект увлечения может сопровождаться генерацией ЦФТ, что экспериментально наблюдалось при наклонном падении лазерного пучка в квантовых ямах [23], пленках из золота нанометровой толщины с различной морфологией [24, 25], графене при возбуждении в терагерцевой [26] и средней ИК [27] областях, а также в резистивных пленках Ag/Pd [14, 28]. Циркулярный эффект увлечения при возбуждении в терагерцевом диапазоне интерпретируется как динамический эффект Холла, при котором фототок возникает под действием силы Лоренца, действующей на носители зарядов в электрическом и магнитном полях циркулярно поляризованного возбуждающего излучения [26].

При наклонном падении лазерного излучения поперечный ЦФТ, протекающий в направлении, перпендикулярном плоскости падения, состоит из линейного и циркулярного вкладов (см., напр., [13, 19, 26]). Линейный вклад зависит от ориентации эллипса поляризации и степени эллиптичности возбуждающего излучения и не зависит от знака циркулярной поляризации, а циркулярный вклад – зависит от того и от другого. Вследствие этого, в зависимости от степени эллиптичности излучения, при одном и том же знаке циркулярной поляризации ЦФТ может быть положительным или отрицательным. Однако в нашей недавней работе [14] было продемонстрировано, что отношение циркулярного вклада поперечного ЦФТ к линейному в резистивных пленках Ag/Pd увеличивается с увеличением длины волны возбуждающего излучения в спектральном диапазоне 266–1064 нм.

Г.М.Михеев, А.С.Саушин. Институт механики УрО РАН, Россия, 426067 Ижевск, ул. Т.Барамзиной, 34; e-mail: mikheev@udman.ru
V.V.Vanyukov. Institute of Photonics, University of Eastern Finland, Joensuu 80101, Finland

В результате было установлено, что в диапазоне длин волн 529–1064 нм поперечный ЦФТ имеет определенную полярность для фиксированного знака циркулярной поляризации при любой степени эллиптичности. Это позволяет использовать резистивные пленки Ag/Pd для разработки и создания простых быстродействующих датчиков знака циркулярной поляризации излучения.

Следует иметь в виду, что резистивные пленки Ag/Pd имеют стабильные электрические параметры и давно применяются в электронике [29]. Они широко используются для получения гибридных микросхем, многокристальных модулей, сборок интегральных микросхем, а также в качестве пассивных электронных компонентов, таких как резисторы, индуктивные элементы и многослойные конденсаторы [30]. Недавно было показано, что резистивные пленки Ag/Pd можно использовать в качестве фотовольтаических преобразователей, чувствительных к направлению волнового вектора падающего излучения [31]. Установлено, что такие преобразователи могут работать в широком спектральном диапазоне (266–1064 нм) [32].

Целью настоящей работы является исследование ЦФТ в резистивных пленках Ag/Pd в диапазоне длин волн возбуждающего излучения 1350–2100 нм для разработки фотовольтаических датчиков знака циркулярной поляризации импульсного лазерного излучения в широкой спектральной области.

2. Получение и основные характеристики резистивных пленок Ag/Pd

Используемые в экспериментах резистивные пленки Ag/Pd были изготовлены по хорошо известной толсто-пленочной технологии [33]. Специальная паста, содержащая оксид серебра и палладий, при температуре $T_{\text{бур}} = 878 \text{ К}$ «вжигалась» на поверхности диэлектрической подложки [31, 34]. Данным способом были получены образцы резистивных пленок Ag/Pd с размером $20 \times 20 \text{ мм}$ и толщиной $\sim 20 \text{ мкм}$ на керамической подложке из алюмо-оксидной керамики ВК-94. В процессе изготовления пленки снабжались двумя параллельными измерительными пленочными серебряными электродами, расположенными на противоположных сторонах квадратной пленки между подложкой и пленочным материалом (рис. 1, а). Сопротивление постоянному току между электродами, замкнутыми через пленку, составляло 29 Ом. Измерения показали, что полученные пленки обладают р-проводимостью при концентрации носителей заряда $9.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и их подвижности $10^{-1} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Удельное сопротивление пленок было равно $6.6 \times 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. С помощью рентгеноструктурного анализа было установлено, что исследуемые пленки состоят из фаз AgPd, PdO и Ag₂O с соотношением масс 80.3:18.7:1.0. Минимальный размер кристаллитов фазовых компонентов AgPd и PdO составлял 39 и 28 нм соответственно. Исследования, проведенные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), показали, что полученные резистивные пленки Ag/Pd являются пористым материалом (рис. 1, б). Размер пор колеблется от 25 до 500 нм, а твердые частицы данного материала имеют характерный размер от 50 до 200 нм. Таким образом, исследуемые пленки Ag/Pd представляли собой пористую структуру из PdO и твердого раствора AgPd, преимущественно состоящего из Ag [34].

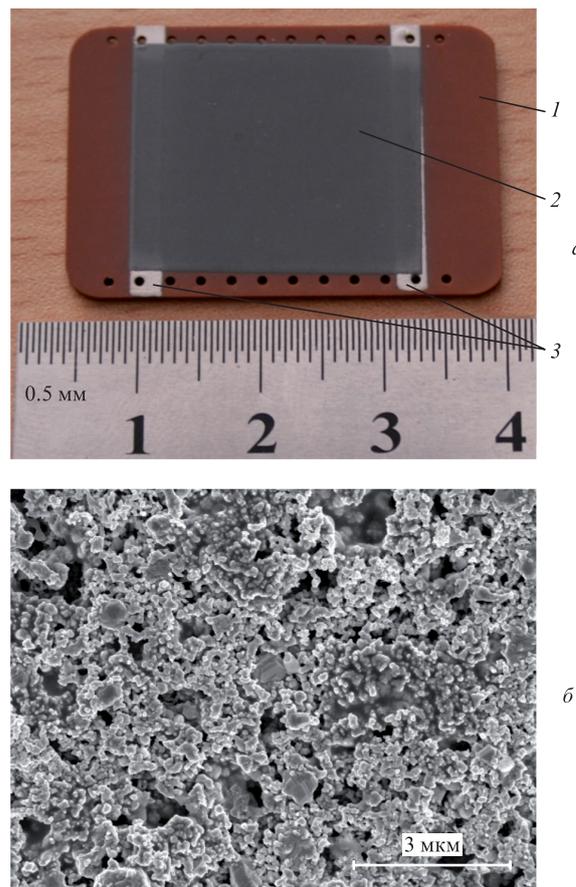


Рис. 1. Фотография пленки Ag/Pd (а) и РЭМ-изображение участка поверхности пленки (б):

1 – подложка; 2 – пленка Ag/Pd; 3 – серебряные измерительные электроды, расположенные между подложкой и пленкой.

3. Техника эксперимента

В экспериментах использовался автоматизированный, перестраиваемый по частоте ИК лазерный источник (Laser Vision), состоящий из параметрического генератора света и усилителя на основе нелинейно-оптических кристаллов КТР и КТА. Накачкой служило излучение первой и второй гармоник Nd³⁺:YAG-лазера с электрооптической модуляцией добротности, работающего с частотой повторения импульсов 10 Гц. Длину волны выходного излучения лазерного источника можно было перестраивать в диапазоне 1350–5000 нм. Длительность импульсов τ на полувысоте в зависимости от длины волны составляла 6–8 нс и измерялась с помощью быстродействующего ИК фотоприемника PD-10.6-3 (Vigo-System Ltd) с постоянной времени менее 0.2 нс и цифрового осциллографа LeCroy 42Xs с полосой пропускания 400 МГц, усреднение проводилось по 100 импульсам.

Импульсное излучение лазерного источника с заранее заданной длиной волны (от 1350 до 2100 нм) проходило через диафрагму диаметром 4 мм, поляризатор Глана и ахроматическую четвертьволновую пластину, работающую в диапазоне длин волн 900–2100 нм. Далее оно падало на пленку Ag/Pd под углом $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2). На выходе поляризатора излучение лазера было поляризовано вдоль оси x' , лежащей в вертикальной плоскости, которая совпадает с плоскостью падения σ (р-поляризованное излучение). Энергия E лазерных импульсов, падающих на пленку, не

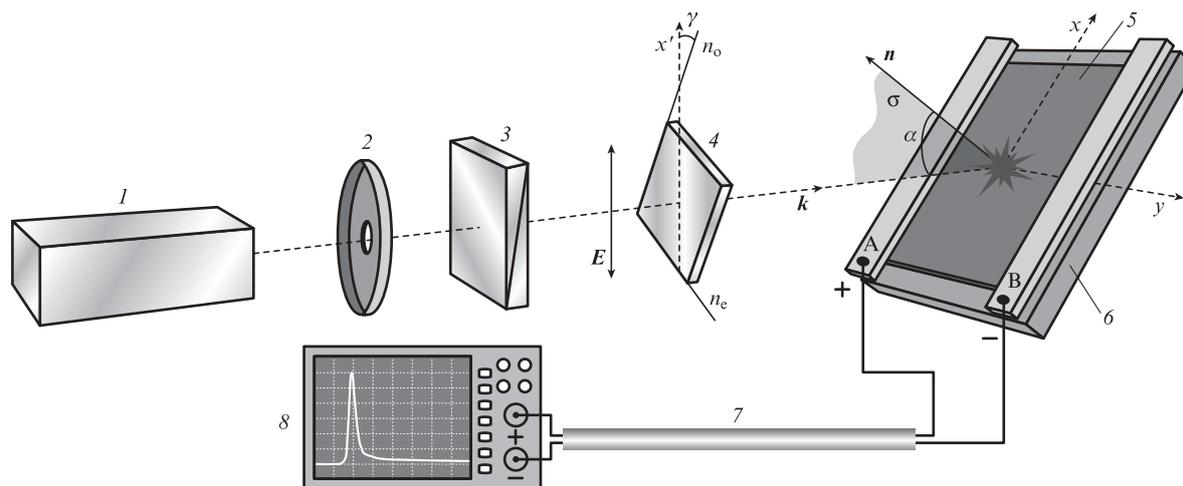


Рис.2. Схема эксперимента:

1 – источник лазерного излучения; 2 – диафрагма; 3 – поляризатор; 4 – ахроматическая четвертьволновая пластина; 5 – пленка Ag/Pd; 6 – подложка; 7 – коаксиальный кабель; 8 – цифровой осциллограф; E – вектор электрического поля падающего излучения; k – волновой вектор; n – нормаль к поверхности пленки; α – угол падения; σ – плоскость падения; x, y – оси прямоугольной системы координат ($y \perp \sigma$); А и В – измерительные электроды, параллельные плоскости σ ; x' – вертикальная ось; n_e – оптическая ось четвертьволновой пластины; n_o – ось, перпендикулярная оси n_e .

превышала 3 мДж. Измерительные электроды А и В располагались на пленке параллельно плоскости σ (продольная геометрия эксперимента [14]), и во время экспериментов излучение лазера на них не попадало. С помощью коаксиального кабеля электроды непосредственно подсоединялись ко входу цифрового осциллографа. Входное сопротивление r осциллографа составляло 50 Ом. В экспериментах измерялось экстремальное значение U_y однополярных одиночных импульсов фото-ЭДС, возникающих между электродами А и В при облучении пленки. При этом поперечный ЦФТ (т.е. ток, протекающий в направлении, перпендикулярном плоскости падения σ) можно было определять по формуле $j_y = U_y/r$. В зависимости от условий эксперимента значения U_y могли быть положительными, отрицательными или равными нулю.

В экспериментах исследовалось влияние эллиптичности и знака циркулярной поляризации падающего излучения на U_y . Для этого при фиксированном угле падения лазерного излучения на пленку $\alpha = 45^\circ$ исследовались зависимости U_y от угла поворота четвертьволновой пластины γ при различных длинах волн λ , где γ – угол между вертикальной осью x' и осью n_o , перпендикулярной оптической оси n_e пластины (рис.2). Результаты были получены при усреднении по 100 и более импульсам лазера.

Принято, что если смотреть навстречу направлению распространения волны, то знак поляризации считается положительным, когда вектор электрического поля вращается по часовой стрелке, и отрицательным, когда его вращение происходит против часовой стрелки.

4. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.3 показаны типичные осциллограммы возбуждающих лазерных (осциллограмма 1) и возникающих в пленке фотовольтаических (осциллограммы 2 и 3) импульсов, полученные при длине волны излучения 2100 нм и угле падения $\alpha = 45^\circ$. Заметим, что при $\alpha = 0$ фотовольтаический сигнал отсутствует при любых параметрах падающего лазерного излучения [14, 28, 32]. Из рис.3 видно,

что при положительном знаке циркулярной поляризации ($\gamma = 45^\circ$) фотовольтаический импульс имеет положительную полярность (осциллограмма 2), а при отрицательном знаке ($\gamma = 135^\circ$) – отрицательную полярность (осциллограмма 3). Таким образом, наблюдается ЦФТ. В пределах точности эксперимента передние фронты зарегистрированных фотовольтаических и лазерных импульсов совпадают. Однако длительности и времена спада фотовольтаических импульсов существенно превышают соответствующие характеристики лазерных импульсов. Длительность и время спада лазерных импульсов, определенные по стандартным критериям, равны 7 и 6 нс соответственно, в то время как эти же параметры для фотовольтаических импульсов в среднем составляют 14 и 85 нс.

Эксперименты по исследованию зависимости U_y от угла падения α показали, что во всем диапазоне изменения длин волн (1350–2100 нм) и при любом фиксированном

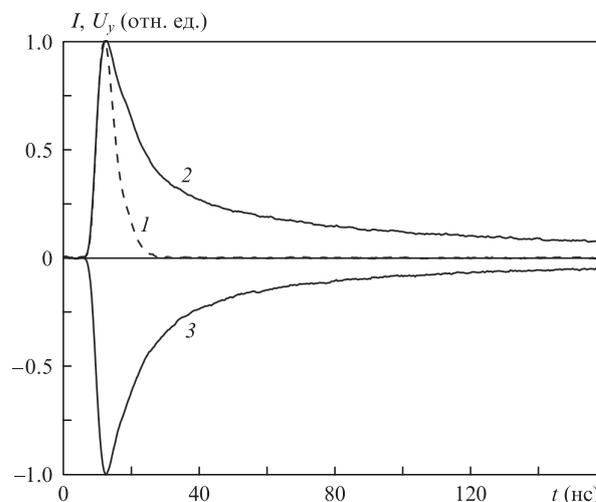


Рис.3. Нормированные на максимальное значение осциллограммы возбуждающих лазерных импульсов (1) и импульсов фото-ЭДС, возникающих при положительном (2) и отрицательном (3) знаках циркулярно поляризованного излучения на длине волн 2100 нм при угле падения $\alpha = 45^\circ$.

угле γ выполняется соотношение $U_y(\gamma, \alpha) = -U_y(\gamma, -\alpha)$, где $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$. Это означает, что полярность сигнала зависит от направления волнового вектора k падающего излучения. Согласно работам [13, 26], это позволяет относить наблюдаемое явление к эффекту увлечения. Ввиду линейной зависимости величины U_y от мощности падающего излучения P и ее независимости от площади облучения при фиксированном P [28, 32] представляется возможным построить зависимости коэффициента преобразования $\eta_y = U_y/P$ световой мощности в импульсное напряжение U_y от угла поворота γ при фиксированной длине волны λ . В качестве примера на рис.4 показана полученная по экспериментальным данным для $\lambda = 1750$ нм нормированная зависимость $\bar{\eta}_y(\gamma) = \eta_y(\gamma)/\eta_y^{\max}$, где η_y^{\max} – максимальное по модулю значение η_y в интервале $0 \leq \gamma \leq 180^\circ$. Видно, что при $\gamma = 0, 90^\circ, 180^\circ$ (p-поляризованное излучение) сигнал отсутствует. Фото-ЭДС также отсутствует при s-поляризации, что было доказано при проведении дополнительных экспериментов. Сигнал на рис.4 положителен для циркулярной поляризации с положительным знаком ($0 < \gamma < 90^\circ$) и отрицателен для циркулярной поляризации с отрицательным знаком ($90^\circ < \gamma < 180^\circ$), причем коэффициент преобразования $\bar{\eta}_y(\gamma)$ существенно зависит от степени эллиптичности поляризации света, т.е. от угла γ . Полученная нормированная экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется следующей функцией (рис.4, кривая 1):

$$\bar{\eta}_y = \eta_{02} \sin 2\gamma - \eta_{04} \sin 4\gamma, \tag{1}$$

где $\eta_{02} = 0.986$ и $\eta_{04} = 0.083$ – амплитуды циркулярного и линейного вкладов соответственно ($\xi = \eta_{02}/\eta_{04} = 11.9$). Кривые 2 и 3 на рис.4 описывают циркулярный ($\eta_{02} \sin 2\gamma$) и линейный ($-\eta_{04} \sin 4\gamma$) вклады, соответственно зависящий и не зависящий от знака циркулярной поляризации. Видно, что при углах $0 < \gamma < 90^\circ$ циркулярный вклад по-

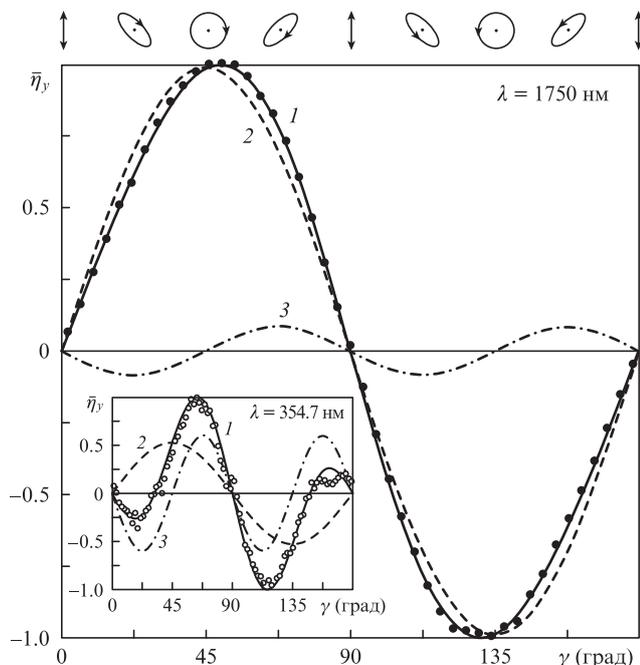


Рис.4. Зависимости нормированного коэффициента преобразования лазерной мощности в фото-ЭДС от угла γ (точки), полученные для длин волн возбуждающего излучения 1750 и 354.7 нм [14] (вставка). Кривые 1 – аппроксимирующие зависимости, кривые 2 и 3 – зависимости циркулярных и линейных вкладов соответственно. Вверху показаны эллипсы поляризации излучения для различных углов γ .

ложителен, а линейный вклад меняет полярность, кроме того, выполняется соотношение $\eta_{02} \gg \eta_{04}$.

Аналогичные экспериментальные зависимости $\bar{\eta}_y(\gamma)$ были получены для длин волн 1350, 1450, 1650, 1850, 1950 и 2100 нм. В результате их математической обработки с учетом данных работы [14] построена зависимость $\xi(\lambda)$, которая представлена на рис.5. Видно, что в УФ области спектра отношение $\xi = \eta_{02}/\eta_{04}$ сравнимо с единицей, а в ИК области для длин волн 1350–2100 нм амплитуда циркулярного вклада η_{02} во много раз превышает амплитуду линейного вклада η_{04} . Таким образом, можно утверждать, что в диапазоне длин волн 1350–2100 нм наблюдается практически «чистый» циркулярный эффект увлечения.

Из выражения (1) следует, что для правополяризованного света ($0 < \gamma < 90^\circ$) нормированный коэффициент преобразования $\bar{\eta}_y$ положителен, если $\xi > 2$. В результате линейной аппроксимации первых четырех точек в коротковолновой области спектра, приведенного на рис.5, было установлено, что выполняется следующее условие: $\xi > 2$, если $\lambda > 529$ нм. Это означает, что в спектральном диапазоне $529 < \lambda \leq 2100$ нм для представленной выше геометрии эксперимента и электрической схемы подключения измерительных электродов к осциллографу фотovoltaический сигнал имеет положительную полярность для положительного знака циркулярной поляризации и отрицательную – для отрицательного. Однако при $\lambda < 529$ нм для одного и того же знака циркулярной поляризации света в зависимости от γ (степени эллиптичности) коэффициент преобразования $\bar{\eta}_y$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Это хорошо демонстрирует зависимость $\bar{\eta}_y(\gamma)$, полученная в работе [14] при $\lambda = 354.7$ нм (см. вставку на рис.4), для которой $\eta_{02} = 0.53$, $\eta_{04} = 0.6$, а найденное значение ξ меньше единицы и составляет 0.88.

Фототок, обусловленный эффектом увлечения, при линейной и циркулярной поляризациях возбуждающего излучения был также исследован в пористых нанографитных пленках [35, 36] и пленках из однослойных нанотрубок [9, 37] в видимой и ИК областях. Однако в указанных нанougлеродных пленках ЦФТ не наблюдается. Между тем, как это видно из представленных выше результатов, в резистивных пленках Ag/Pd ЦФТ наблюдается в широком спектральном диапазоне. Почему это так и какие свойства пленок Ag/Pd ответственны за генерацию ЦФТ при эффекте увлечения, остается не выясненным и является предметом дальнейших исследований. Тем не менее со-

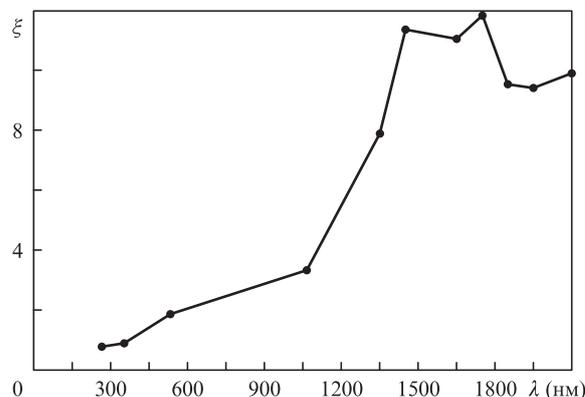


Рис.5. Зависимость от длины волны падающего излучения λ отношения ξ амплитуд циркулярного и линейного вкладов для поперечного ЦФТ.

вершено очевидно, что на основе резистивных пленок Ag/Pd уже можно создавать датчики знака циркулярной поляризации импульсного лазерного излучения.

Таким образом, в пористых резистивных пленках Ag/Pd, состоящих из PdO и AgPd, в геометрии эксперимента, когда измерительные электроды параллельны плоскости падения возбуждающего излучения, в широком диапазоне его длин волн (266–2100 нм) наблюдается циркулярный эффект увлечения, приводящий к генерации фотовольтаического тока, зависящего от эллиптичности и знака циркулярной поляризации. В диапазоне длин волн 529–2100 нм полярность фототока (фото-ЭДС) однозначно определяется знаком циркулярной поляризации. Полученные результаты показывают возможность использования резистивных пленок Ag/Pd для разработки и создания быстродействующих датчиков, позволяющих по полярности лишь одного зарегистрированного фотовольтаического импульса определять знак циркулярной поляризации падающего импульсного излучения в широком диапазоне его длин волн.

Авторы выражают благодарность Ю.П.Свирко из Университета Восточной Финляндии, а также В.М.Стяпшину из Института механики УрО РАН за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-01031) и Финской академии наук (грант №288547).

- Von Gutfeld R.J. *Appl. Phys. Lett.*, **23** (4), 206 (1973).
- Конов В.И., Никитин П.И., Сатюков Д.Г. и др. *Изв. АН СССР, Сер. физич.*, **55**, 1343 (1991).
- Никишкин В.А., Севенюк А.А., Сухов А.В. *Квантовая электроника*, **18** (9), 1103 (1991).
- Берегулин Е.В., Павлов П.М., Рывкин С.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **25** (2), 113 (1977).
- Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н. и др. *Письма в ЖТФ*, **31** (3), 11 (2005).
- Ganichev S.D., Prettl W. *J. Phys. Condens. Matter.*, **15**, 935 (2003).
- Vengurlekar A.S., Ishihara T. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (9), 091118 (2005).
- Noginova N., Yakim A.V., Soimo J., et al. *Phys. Rev. B*, **84** (3), 035447 (2011).
- Mikheev G.M., Nasibulin A.G., Zonov R.G., et al. *Nano Lett.*, **12** (1), 77 (2012).
- Asnin V.M., Bakun A.A., Danishevskii A.M., et al. *Solid State Commun.*, **30**, 565 (1979).
- Белиничер В.И., Стурман Б.И. *УФН*, **130** (3), 415 (1980).
- Белиничер В.И. *ФТТ*, **23**, 461 (1981).
- Glazov M.M., Ganichev S.D. *Phys. Rep.*, **535** (3), 101 (2014).
- Михеев Г.М., Саушин А.С., Зонов Р.Г., Стяпшин В.М. *Письма в ЖТФ*, **40** (10), 37 (2014).
- Кусраев Ю.Г. *УФН*, **180** (7), 759 (2010).
- Аснин В.М., Бакун А.А., Данишевский А.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **28** (2), 80 (1978).
- Петров М.П., Грачев А.И. *Письма в ЖЭТФ*, **30** (1), 18 (1979).
- Yu J., Chen Y., Cheng S., Lai Y. *Physica E: Low Dimens. Syst. Nanostruct.*, **49**, 92 (2013).
- Zhang Z., Zhang R., Liu B., et al. *Solid State Commun.*, **145** (4), 159 (2008).
- Ивченко Е.Л. *УФН*, **172** (12), 1461 (2002).
- Данишевский А.М., Кастальский А.А., Рывкин С.М., Ярошецкий И.Д. *ЖЭТФ*, **58** (2), 544 (1970).
- Gibson A.F., Kimmitt M.F., Walker A.C. *Appl. Phys. Lett.*, **17** (2), 75 (1970).
- Shalygin V.A., Diehl H., Hoffmann C., et al. *Письма в ЖЭТФ*, **84** (10), 666 (2006).
- Hatano T., Ishihara T., Tikhodeev S., Gippius N. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (10), 103906 (2009).
- Akbari M., Onoda M., Ishihara T. *Opt. Express.*, **23** (2), 823 (2015).
- Karch J., Olbrich P., Schmalzbauer M., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **105** (22), 227402 (2010).
- Jiang C., Shalygin V.A., Panevin V.Y., et al. *Phys. Rev. B*, **84**, 125429 (2011).
- Михеев Г.М., Александров В.А., Саушин А.С. *Письма в ЖТФ*, **37** (12), 16 (2011).
- Melan E.H. *Microelectron. Reliab.*, **6**, 53 (1967).
- Wang S.F., Dougherty J.P., Huebner W., Pepin J.G. *J. Am. Ceram. Soc.*, **77** (12), 3051 (1994).
- Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Александров В.А., Русских Л.М. Патент РФ №2365027 (2009).
- Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Александров В.А. *Письма в ЖТФ*, **36** (14), 79 (2010).
- Larry J.R., Rosenberg R.M., Uhler R.O. *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, **3** (2), 211 (1980).
- Михеев Г.М., Саушин А.С., Гончаров О.Ю. и др. *ФТТ*, **56** (11), 2212 (2014).
- Михеев Г.М., Стяпшин В.М., Образцов П.А. и др. *Квантовая электроника*, **40** (5), 425 (2010).
- Obraztsov P.A., Mikheev G.M., Garnov S.V., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (9), 091903 (2011).
- Saushin A.S., Zonov R.G., Nasibulin A.G., Mikheev G.M. *Proc. NPO'4 Fourth Int. Work. Nanocarbon Photonics Optoelectron (Finland, University of Eastern Finland, 2014)*.