

## КОНТРОЛЛЕР ПОЛЯРИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2016 г. И.А. АЗАРОВ<sup>1,2</sup>, Ю.Ю. ЧОПОРОВА<sup>2,3</sup>, Б.А. КНЯЗЕВ<sup>2,3</sup>, В.А. ШВЕЦ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, г. Новосибирск,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,

<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: azarov\_ivan@mail.ru, choporenok@yandex.ru,

В настоящее время область субмиллиметровых длин волн привлекает большое число исследователей. Разработаны различные источники и приёмники терагерцового излучения. Данный диапазон позволяет исследовать неоднородные среды – такие, как биологические субстанции, границы с шероховатостями и порами с масштабом в несколько микрон. Отдельный интерес представляет исследование метаматериалов и спектроскопия мелких уровней в твёрдых телах.

В экспериментах по измерению оптических констант материалов, оптической активности а также в спектроскопии твёрдого тела необходимо иметь возможность менять поляризацию заданным образом. Целью данной работы является создание устройств для контролируемого изменения поляризации излучения терагерцового диапазона.

Ранее в нашей группе был создан эллипсометр терагерцового диапазона, способный измерять состояние поляризации в рассматриваемой области частот электромагнитного излучения [1]. Эллипсометр работает по фотометрической схеме в режиме пошагового вращения анализатора. Накопление сигнала в режиме синхронного детектирования совместно с использованием опорного канала позволяет сократить уровень до 2%, что позволяет реализовать точность измерений до  $\delta\psi=0.03$  и  $\delta(\cos(\Delta)) = 0.01$ . В качестве источника терагерцового излучения при этом используется новосибирский лазер на свободных электронах [2]. С использованием такого оборудования можно реализовать различные варианты оптических схем с поляризационными элементами и детально исследовать их свойства.

Нами предложено несколько схем поляризационных контроллеров. Первая – схема интерферометра Майкельсона с ортогональными поляризациями в плечах (рис. 1, а). Вторая – с использованием набора поляризаторов и призмой-компенсатором между ними (рис. 2, б).

В интерферометре Майкельсона с ортогональной поляризацией в плечах изменение длины одного из плеч позволяет изменять поляризацию от правой циркулярной до левой циркулярной через линейную. На рис. 1, б. показаны результаты измерений фазового сдвига при движении зеркала в одном из плеч интерферометра. При этом ортогонально поляризованные компоненты в каждом из плеч складываются каждая в своей фазе. Видно, что в эксперименте не достигается строго линейная поляризация. Это связано с конечной шириной линии излучения ЛСЭ и сильной ахроматичностью фазосдвигающего устройства интерференционного типа. Ахроматичность обусловлена различным набегом фазы в плечах для отличающихся между собой длин волн. Длина когерентности составляет 3 см, что соответствует отношению ширины линии к длине волны  $\sim 10^3$ . Тем не менее, данный метод управления поляризацией позволяет быстро и контролируемо менять состояния поляризации, что может быть полезно в приложениях со сканированием по фазе (таких как поляриметрия и системы rmp-probe). К тому же, на базе данного устройства можно легко реализовать интерференционный эл-

липсометр [3] в терагерцовом диапазоне, который позволит визуализировать эллипс поляризации на экране осциллографа.

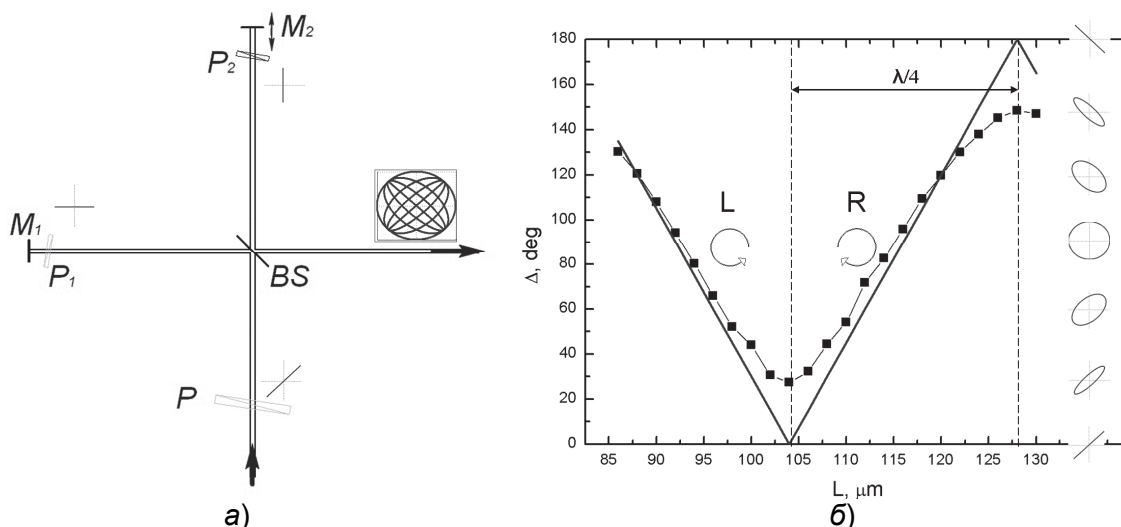


Рис. 1. а) схема интерферометра Майкельсона с ортогональными поляризациями в плечах. P-входной поляризатор, установленный под углом  $45^\circ$  к плоскости лучей;  $P_1$  и  $P_2$  – поляризаторы в плечах, имеющие ортогональные поляризации (в плоскости лучей и в перпендикулярном направлении); BS – делитель пучка в виде тонкой плёнки полипропилена;  $M_1$  – неподвижное зеркало,  $M_2$  – зеркало на линейной микроподвижке. Жирными стрелками указано направление входящего и выходящего пучков; б) результаты измерений поляризации на выходе устройства. По оси абсцисс отложено положение зеркала  $M_2$ ; сплошной линией показано расчётное поведение фазового угла  $\Delta$ ; точки – результат измерений эллипсометром. Справа приведены соответствующие эллипсы поляризации, круговыми стрелками указано направление вращения вектора электрического поля L – левое вращение, R – правое, которые меняются при смещении зеркала  $M_2$  на четверть длины волны ( $\lambda/4$ ).

Вторая схема поляризационного контроллера была создана с использованием фазосдвигающего устройства на основе призмы. В качестве материала призмы выбран высокоомный кремний – чистый, химически инертный материал с высоким показателем преломления ( $n = 3.418$ ), что подтверждено нашими измерениями на эллипсометре [1]. На рис. 2, а. показано расчётное изменение фазового сдвига между p- и s- волнами на границе кремний-воздух при изменении угла падения. Видно, что критический угол (при котором происходит полное внутреннее отражение света) равен  $17$  градусам, ещё один важный угол – главный угол, при котором фазовый сдвиг составляет  $90$  градусов, равен  $42$  градусам. Призма, выполненная в виде равнобедренного треугольника с углом при основании  $45$  градусов, может служить фазосдвигающим устройством с  $\Delta = 84.6^\circ$ . Хотя расчётное значение фазового сдвига при такой геометрии отличается от  $90^\circ$ , прямоугольная призма более удобна при юстировке. Если требуется фазовый сдвиг  $90^\circ$ , нужно изготовить призму с углом у основания  $42^\circ$ .

Нами были проведены измерения фазового сдвига при прохождении через призму в трёх вариантах: при падении излучения перпендикулярно короткой грани призмы, а также под углами  $\pm 45$  градусов относительно нормали к короткой грани. Результаты измерений во всех трёх случаях совпадают с расчётными, в которых учитываются коэффициенты Френеля для всех 3 граней. В случае использования призмы в качестве компенсатора, требования к настройке призмы довольно низкие в связи с сильным преломлением луча в кремнии, но требования к точности изготовления для достижения требуемых значений фазового сдвига достаточно строгие. Длина оптического пути в нашей призме с катетом  $35$  мм существенно больше длины когерентности (нужно учитывать показатель преломления кремния), что позволяет избавиться от многолучевой интерференции.

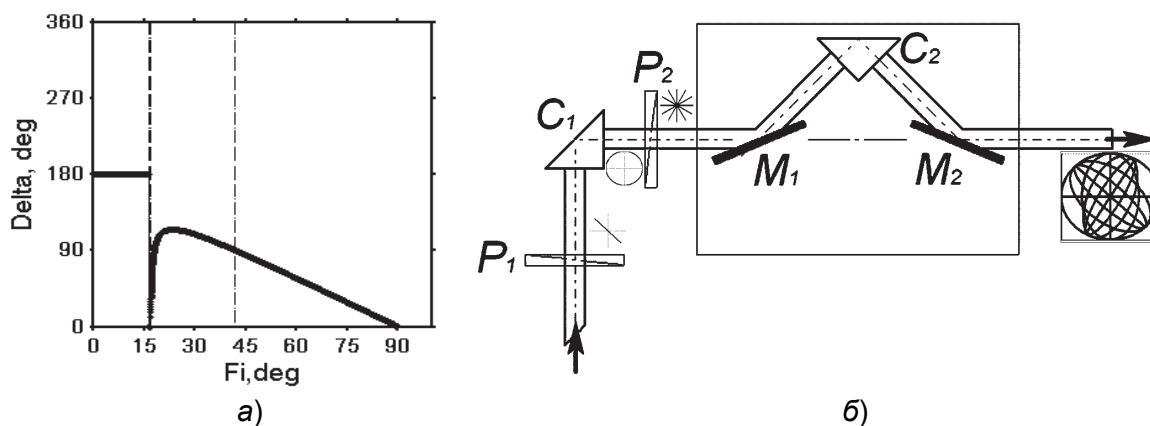


Рис. 2. а) поведение фазового угла при изменении угла падения из кремния ( $n=3.418$ ) в воздух ( $n=1$ ); б) схема контроллера поляризации с кремниевыми призмами.  $P_1$ -входной поляризатор, задающий поляризацию  $45^\circ$  относительно плоскости падения на рабочую грань кремниевой призмы  $C_1$ , после которой поляризация становится круговой.  $P_2$  – рабочий поляризатор;  $M_1, M_2$  и  $C_2$  – элементы узла компенсатора (два зеркала и кремниевая призма, соответственно). Узел компенсатора может вращаться относительно оси, совпадающей с осью пучка.

Призма-компенсатор имеет фиксированный фазовый сдвиг, но устройство из двух таких призм и набора поляризаторов позволяет задать произвольную требуемую поляризацию, изменяя азимуты элементов. На рис. 2, б. показано изменение поляризации вдоль хода пучка терагерцового излучения. Поляризатор  $P_2$  и узел компенсатора ( $C_2$  совместно с зеркалами  $M_1$  и  $M_2$ ) могут занимать любое азимутальное положение. Комбинация азимутальных положений  $P_2$  и узла компенсатора с призмой  $C_2$  полностью определяет поляризацию на выходе устройства. Поляризация при этом может изменяться от линейной до циркулярно поляризованной с любой нужной ориентацией осей эллипса [4]. Так как дисперсия оптических констант кремния в терагерцовом диапазоне незначительна [5], то призма является ахроматическим компенсатором и может использоваться в диапазоне 0.1-10 ТГц.

Таким образом, в работе созданы и исследованы два различных устройства управления поляризацией. Проведён анализ факторов, влияющих на точность и стабильность их работы. Предложены способы использования данных устройств в различных измерительных схемах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров И.А., Швец В.А., Прокопьев В.Ю., Дулин С.А., Рыхлицкий С.В., Чопорова Ю.Ю., Князев Б.А., Кручинин В.Н., Кручинина М.В. Эллипсометр терагерцового диапазона. Приборы и техника эксперимента. 2015, № 3, с. 71–78.
2. Knyazev V.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. Meas. Sci. Techn., vol. 21, 054017, 13p. 2010.
3. Hasebroek H.F., Holscher A.A. Journ. Phys. E.: Sci.Instr., № 6, v. 822 (1973).
4. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. - М.: Мир, 1981.
5. Adachi S. Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors. Numerical data and graphical information. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1999.