

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2016»
21–25 ноября 2016 г., Москва

Под редакцией
академика РАН А.С. Сизова

Часть 4

FUNDAMENTAL PROBLEMS
OF RADIOENGINEERING AND DEVICE
CONSTRUCTION

Proceedings of the International Scientific and
Technical Conference «INTERMATIC – 2016»
November 21–25, 2016, Moscow

Edited by A. Sigov

Part 4

Москва - 2016

УДК 539.1: 621.315.5: 621.382:

Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2016», 21–25 ноября 2016 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Галлея-Принт, 2016, часть 4. – 246 с.

ISBN 978-5-9909316-4-0 (ч. 4)
978-5-9909316-0-2

В настоящий сборник включены материалы Международной НТК «INTERMATIC–2016», отражающие новые результаты научных и инженерных исследований в области радиоэлектронного приборостроения.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической электроники и технологии радиоэлектронного приборостроения. Он также может быть использован преподавателями, аспирантами и студентами при изучении соответствующих курсов.

В настоящий сборник также включены соответствующие теме материалы VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – 2016», 22–24 ноября 2016 г., Москва.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проекты № 16-02-20702, 16-32-10400

Редакционная коллегия:

Ю.В. Гуляев (председатель), А.С. Аджемов, К.А. Воротилов,
С.А. Кудж, П.А. Лучников, С.А. Никитов, В.Г. Орлов,
А.С. Сигов (ответственный редактор), Г.И. Сорокин

Научное издание

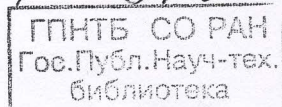
Компьютерная верстка – Д.С. Серегин

ООО «Галлея-Принт»
111024, Москва, 5-я Кабельная, 2Б, тел. +7 (495) 673-57-85

Подписано в печать с оригинал-макета 14.11.2016 г.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 25,83. Уч. изд. л. 24,37.
Тираж 250 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Галлея-Принт»

ISBN 978-5-9909316-4-0 (ч. 4)
978-5-9909316-0-2



© ИРЭ РАН, 2016
© МИРЭА, 2016

КОНТРОЛЛЕР ПОЛЯРИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2016 г. И.А. АЗАРОВ^{1,2}, Ю.Ю. ЧОПОРОВА^{2,3}, Б.А. КНЯЗЕВ^{2,3}, В.А. ШВЕЦ^{1,2}

¹Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, г. Новосибирск,

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,

³Институт 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 pump-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.

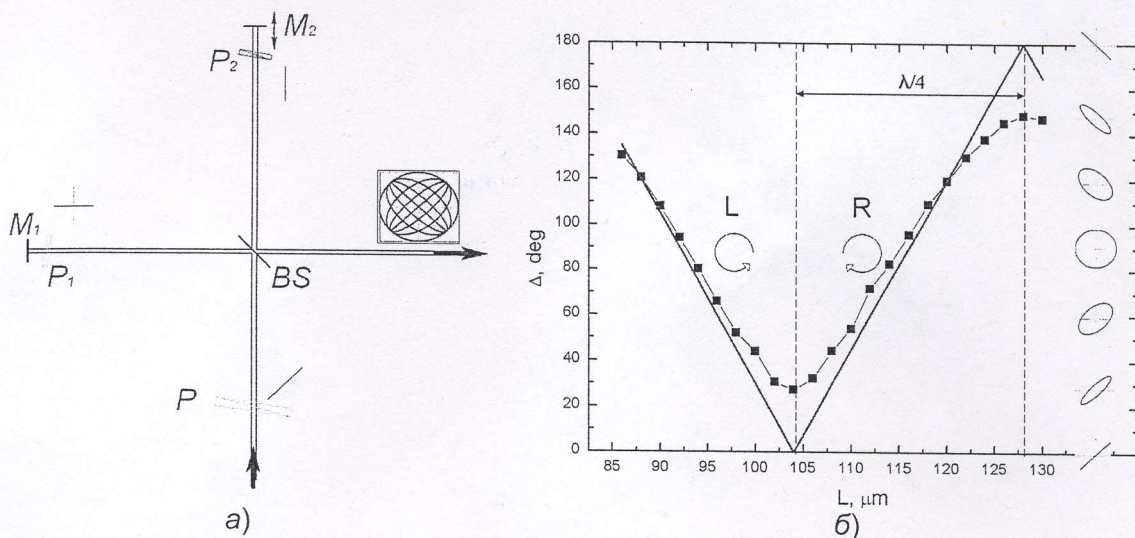


Рис. 1. а) схема интерферометра Майкельсона с ортогональными поляризациями в плечах. Р-входной поляризатор, установленный под углом 45° к плоскости лучей; P_1 и P_2 – поляризаторы в плечах, имеющие ортогональные поляризации (в плоскости лучей и в перпендикулярном направлении); BS – делитель пучка в виде 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 Δ ; 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 р- 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° , прямоугольная призма более удобна при юстировке. Если требуется фазовый сдвиг 90° , нужно изготовить призму с углом у основания 42° .

Нами были проведены измерения фазового сдвига при прохождении через призму в трёх вариантах: при падении излучения перпендикулярно короткой грани призмы, а также под углами ± 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.

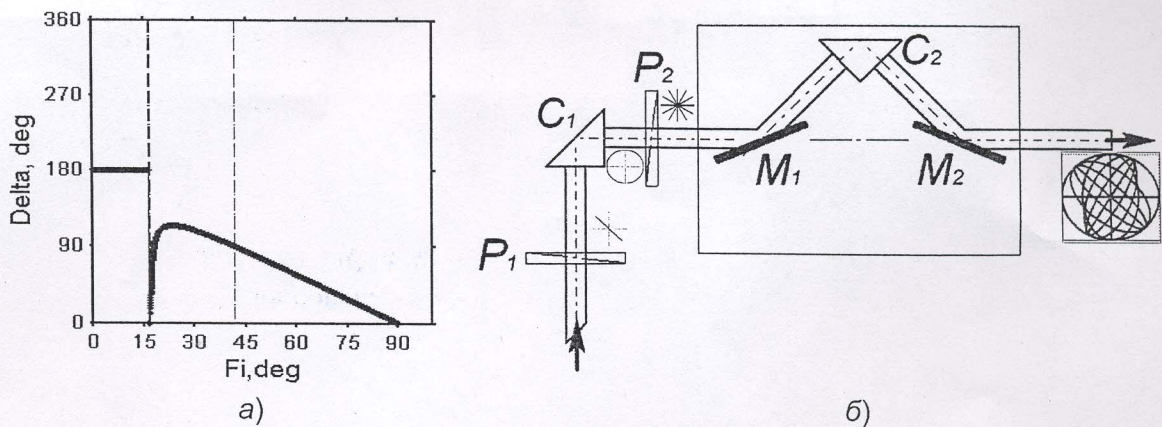


Рис. 2. а) поведение фазового угла при изменении угла падения из кремния ($n=3.418$) в воздух ($n=1$); б) схема контроллера поляризации с кремниевыми призмами. P_1 – входной поляризатор, задающий поляризацию 45° относительно плоскости падения на рабочую грань кремниевой призмы C_1 , после которой поляризация 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 B.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.