

СВЕТОДИОДНЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ЭЛЛИПСОМЕТР С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

© 2016 г. В. И. Ковалёв, доктор техн. наук; А. И. Руковишников, канд. физ.-мат. наук; С. В. Ковалёв; В. В. Ковалёв, аспирант

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Фрязино, Московская обл.

E-mail: ellipsometry@yandex.ru

Приведено описание светодиодного эллипсометра с непрерывным диапазоном длин волн 260–1000 нм и высокими техническими характеристиками. Воспроизводимость и стабильность измерений эллипсометрических параметров Ψ и Δ кремния с собственным диоксидом на пиковых длинах волн излучения светодиодов не хуже 0,001 и 0,01° соответственно. На длинах волн 365, 375, 390, 405, 420 и 465 нм воспроизводимость измерений Ψ и Δ пленок металлов около 0,0003 и 0,001° соответственно. Спектральное разрешение – 4 нм. Минимальное время измерения Ψ и Δ в полном диапазоне длин волн – 20 с.

Ключевые слова: светодиодный спектральный эллипсометр, переключение поляризации, ахроматический компенсатор, высокая чувствительность, стабильность измерений.

Коды OCIS: 120.2130

Поступила в редакцию 15.06.2015

Введение

Широкое использование спектральной эллипсометрии в различных областях науки и техники обуславливает важность задачи улучшения основных технических характеристик спектральных эллипсометров [1, 2]. Развитый автором этих работ метод эллипсометрии с бинарной модуляцией состояния поляризации (БМСП) имеет ряд преимуществ по сравнению с общепризнанными методами эллипсометрии с фазовой модуляцией и с вращающимся компенсатором [3–5]. Например, простой алгоритм эллипсометрических измерений с переключением ортогональных состояний поляризации при использовании импульсных ксеноновых ламп РХ-2 с большим рабочим ресурсом позволил выполнять высокоточные измерения дисперсии оптических констант диэлектрических покрытий в диапазоне 250–1050 нм [6]. Светодиодные источники импульсного или непрерывного излучения открывают широкие возможности упрощения и удешевления оптических приборов различного назначения при одновременном улучшении их технических характеристик [7, 8]. Современные разработки

интенсивных SMD¹ светодиодов малого размера с большим ресурсом работы и характерное для них высокое отношение сигнал/шум при измерении эллипсометрических параметров [9] объясняют интерес к созданию широкодиапазонного светодиодного спектрального эллипсометра (ССЭ). Известны прецизионные промышленные спектральные эллипсометры (FS-1, PHE101M) с использованием нескольких светодиодов с неперекрывающимися диапазонами длин волн.

Авторами настоящей статьи созданы ССЭ с непрерывным спектром, отличающиеся высокими чувствительностью и стабильностью при использовании метода эллипсометрии с БМСП. Описание многоканального ССЭ с диапазоном длин волн 350–810 нм приведено в публикации [10]. Сканирующий ССЭ для области спектра 270–900 нм представлен в работе [11].

С использованием более полного комплекта SMD светодиодов создан широкодиапазонный ССЭ (рис. 1) со сравнительно равномерным распределением интенсивности излучения в области длин волн от 260 до 1000 нм.

¹ Surface mounted device.



Рис. 1. Внешний вид светодиодного широкодиапазонного СЭ.

На рис. 2 приведена блок-схема ССЭ. Излучение светодиодов, расположенных на диске 2 шагового двигателя 1, линзой 3 фокусируется на щели 4. Сферическое зеркало 5 (фокусное расстояние $F = 50$ мм) направляет коллимированное излучение на дифракционную решетку 6. Сферическое зеркало 7 фокусирует излучение на круговой диафрагме 8 диаметром 0,4 мм. Сферическое зеркало 9 формирует пучок, расходимость которого контролируется автоколлиматором 26. Клиновидный элемент 10 с углом при вершине 18° делит падающий на него пучок на пучки обыкновенных и необыкновенных лучей, которые фокусируются в плоскости симметрии сферическим зеркалом 11 с $F = 60$ мм. Идентичное зеркало 12 снова направляет пучки на клин, совмещающий пучки с первоначальным направлением. Электромагнитный переключатель 13 последовательно перекрывает сфокусированные

пучки с ортогональными азимутами поляризации. Элементы 11–13 составляют эффективный переключатель состояния поляризации. Электромагнитный переключатель 14 вводит в пучок асимметричный 4-х зеркальный компенсатор 15. Кварцевые линзы 16 и 17 с $F = 50$ мм вводятся в пучок при локальных измерениях. Наклон поверхности 19 образца 18 контролируется автоколлиматором 26. Отраженное от образца излучение делится призмой Волластона из α -ВВО¹ на два ортогонально поляризованных пучка, которые зеркалами 21 и 23 направляются на фотоприемники 22 и 24. Устройство управления, регистрации и сопряжения 25 расположено в корпусе блока анализатора.

В табл. 1 приведены типы светодиодов, их пиковые длины волн и схема “сшивания”.

Принцип действия ССЭ основан на переключении состояний поляризации, при этом на исследуемый образец попеременно направляются ортогонально поляризованные пучки с азимутами линейной поляризации P и $P + 90^\circ$ ($P \approx 30^\circ$). Левое плечо эллипсометра содержит призму Волластона, два сферических зеркала и два кремниевых фотодиода. При переключении азимутов P и $P + 90^\circ$ измеряется отношение сигналов на фотодиодах при азимутах разведенных призмой пучков A и $A + 90^\circ$ ($A \approx 10^\circ$). По измеренным отношениям определяются эллипсометрические параметры Ψ и Δ . В работе [5] приведены расчетные формулы, используемые в эллипсометрии с БМСП.

Калибровка ССЭ заключается в измерении спектров разности азимутов поляризатора P

¹ Альфа-борат бария.

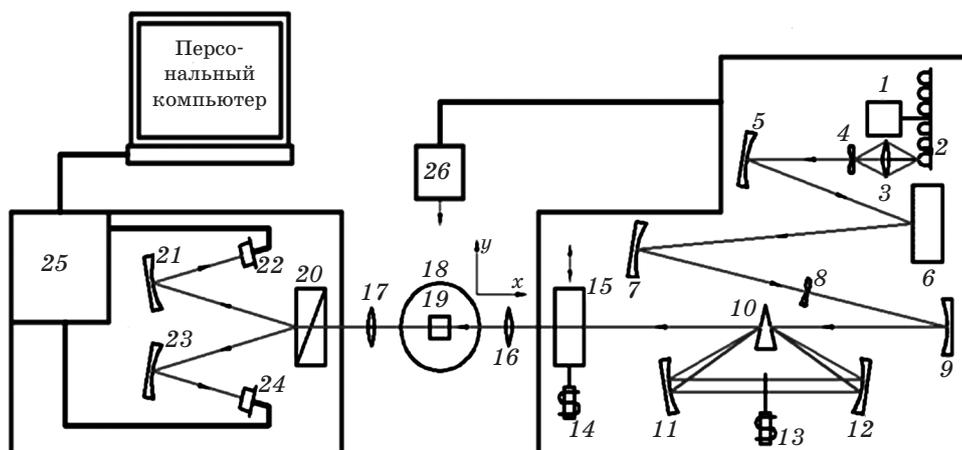


Рис. 2. Блок-схема ССЭ. Пояснения в тексте.

Таблица 1. Набор используемых светодиодов

Название светодиода	Длина волны максимума, нм	Диапазон длин волн, нм
UVTOP260 SMD	265	260–271
UVTOP270 SMD	275	271–282
UVTOP285 TO18 FW	290	282–299
UVTOP305SMD	305	299–312
UVTOP320 TO18 FW	320	312–327
UVTOP335 TO18 FW	340	327–355
UVLED365-SMD	365	358–370
UVLED375E-SMD	375	370–382
VL390-3228	390	382–400
SMC405	405	400–410
RLCU-415	420	410–430
APG 2C3WW	белый	430–665
SMC700	700	665–718
SMC735	735	718–760
SMC780	780	760–800
SMC810	810	800–828
SMC850	850	828–876
SMC890	890	876–911
SMC940	940	911–1000

и анализатора A и включает спектры коэффициента, учитывающего поляризационную зависимость фотоприемников в положении плеч поляризатора и анализатора на одной оси. В этой же геометрии определяются спектры Δ и Ψ компенсатора. Измерения спектров Δ и Ψ на образцах Si с собственным термическим диоксидом SiO₂ при угле падения 70° позволяют определить действительные значения переключаемых в блоках поляризатора и анализатора азимутов.

Тестовые измерения выполнены на эталонной кремниевой пластине (*Wafer Step 0-500 nm* фирмы *Ocean Optics*) с 5 пленками термического оксида различной толщины.

На рис. 3а приведены экспериментальные и расчетные спектральные зависимости Ψ и Δ пленок толщиной 205,7 нм (паспортное значение). Отклонение измеренных толщин от этого значения менее 0,4 нм. Наблюдается хорошее соответствие измеренных и расчетных зависимостей. На рис. 3б представлены аналогичные спектральные зависимости эталонного образца кремния с диоксидом толщиной 2,5 нм. Показательно, что даже на краю коротковолнового диапазона наблюдается высокая воспроизводимость измерения Δ и Ψ (рис. 4). Следовательно,

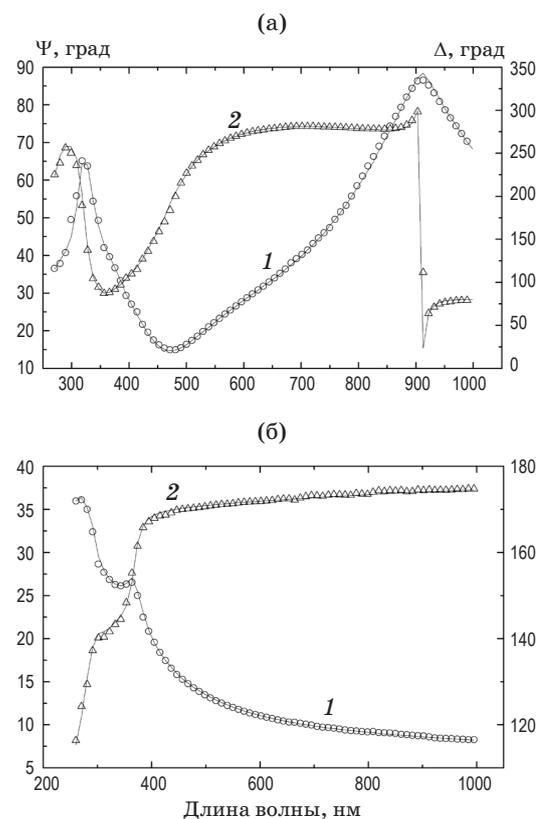


Рис. 3. Расчетные (сплошные линии) и измеренные спектральные зависимости Ψ (1) и Δ (2) эталонного образца термического диоксида кремния толщиной 205,7 (а) и 2,5 нм (б) на Si.

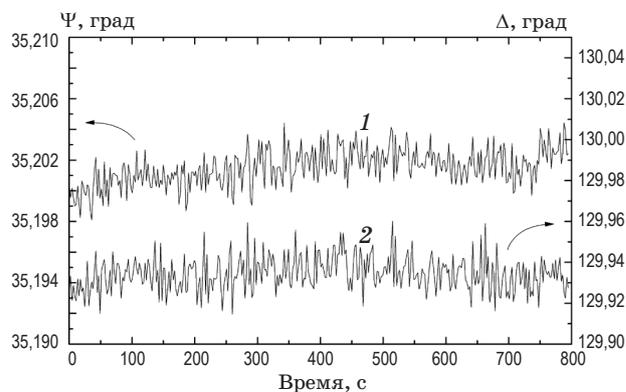


Рис. 4. Временные зависимости Ψ (1) и Δ (2) эталонного образца кремния с собственным диоксидом толщиной 2,5 нм, измеренные на длине волны 285 нм. Угол падения излучения на образец 70°.

светодиоды UVTOP с успехом заменяют недостаточно надежные и сравнительно дорогие ксеноновые лампы в большей части ультрафиолетового диапазона.

Преимуществами светодиодных широкодиапазонных эллипсометров с БМСП, основные технические характеристики которых приведе-

Таблица 2. Основные технические характеристики

Рабочий спектральный диапазон, нм	260–1000	Воспроизводимость и стабильность измерений Ψ^* , град	не хуже 0,001
Спектральное разрешение, нм	4	Воспроизводимость и стабильность измерений Δ^* , град	не хуже 0,01
Минимальное время измерения полного спектра, с	20	Воспроизводимость измерений Ψ^{**} , град	0,0003
Диаметр светового пучка, мм с кварцевыми линзами, мкм	3 200	Воспроизводимость измерений Δ^{**} , град	0,001

Примечание. * эллипсометрических параметров кремния с собственным диоксидом на пиковых длинах волн излучения светодиодов. ** пленок металлов на длинах волн 365, 375, 390, 405, 420 и 465 нм.

ны в табл. 2, по сравнению с коммерческими СЭ с ламповыми источниками излучения являются более высокие отношение сигнал/шум и воспроизводимость при измерении эллипсометрических параметров, надежность и экономичность, возможность измерений с импульсным и непрерывным режимами питания светодиодов, кроме того, не требуется использование отсекающих дифракционные порядки фильтров.

Заключение

Использование набора из 19 светодиодных источников излучения невысокой мощности (стандартные токи 20 мА) в предложенной и развиваемой авторами эллипсометрии с переключением ортогональных состояний поляризации обеспечило достаточно высокие техниче-

ские характеристики созданного сканирующего широкодиапазонного спектрального эллипсометра. Имеются очевидные возможности дальнейшего улучшения технических характеристик ССЭ. Наблюдаемый прорыв в области технологий изготовления светодиодных источников излучения малого размера позволит в ближайшем будущем существенно улучшить основные технические параметры светодиодных эллипсометров, увеличить скорость и пространственное разрешение измерений Ψ и Δ . Высокая чувствительность светодиодных эллипсометров при невысокой стоимости позволит существенно расширить области их применения в магнито-оптических исследованиях, в локальных кинетических исследованиях процессов образования монослоев на поверхности жидких и твердых сред и в сенсорных устройствах.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fujiwara H.* Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications. N.Y.: Wiley, 2007. 392 p.
2. *Aspnes D.E.* Spectroscopic ellipsometry — Past, present, and future. Review // *Thin Solid Films*. 2014. V. 571. № 3. P. 334–344.
3. *Ковалев В.И.* Методы и приборы лазерной и спектральной эллипсометрии с бинарной модуляцией состояния поляризации // Автореф. докт. дис. Фрязино: ИРЭ РАН, 2011. 34 с.
4. *Azzam R.M.A.* Polarization Michelson interferometer (POLMINT): Its use for polarization modulation and temporal pulse shearing // *Opt. Commun.* 1993. V. 98. № 1. P. 19–23.
5. *Ковалев В.И., Руковишников А.И., Перов П.И., Россуканый Н.М., Авдеева Л.А.* Разработка оптических методов и аппаратуры для контроля технологии и параметров полупроводниковых структур нано- и микроэлектроники // *Радиотехника и электроника*. 1999. Т. 44. № 11. С. 1404–1407.
6. *Leontyev A.V., Kovalev V.I., Khomich A.V., Komarov F.F., Grigoryev V.V., Kamishan A.S.* PMMA and polystyrene films modification under ion implantation studied by spectroscopic ellipsometry // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5401. P. 129–136.
7. *de Lima K.M.G.* A portable photometer based on LED for the determination of aromatic hydrocarbons in water // *Microchemical Journal*. 2012. V. 103. P. 62–67.
8. *Obeidat S., Bai B., Rayson G.D., Anderson D.M., Puscheck A.D., Landau S., Glasser T.* A multi-source portable light emitting diode spectrofluorometer // *Appl. Spectr.* 2008. V. 62. № 3. P. 327–332.

9. *Callegaro L., Puppini E.* Lasers and light-emitting diodes as sources for fixed-wavelength magneto-optical phase modulated ellipsometry // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. № 11. P. 5375–5376.
10. *Kovalev V.I., Rukovishnikov A.I., Kovalev S.V., Kovalev V.V.* An LED multichannel spectral ellipsometer with binary modulation of the polarization state // *Instruments and Experimental Techniques.* 2014. V. 57. № 5. P. 607–610.
11. *Ковалев С.В., Руквишников А.И., Ковалев В.И.* Светодиодный спектральный эллипсометр с бинарной модуляцией состояния поляризации // III Всерос. молодежная конф. “Функциональные материалы и высококачественные вещества”. Сб. материалов. М., 2012. С. 319–320.
12. *Kovalev V.I., Ali M., Kovalev S.V., Kovalev V.V.* Possibilities of achromatization of coaxial asymmetric phase shifters with an even number of reflections // *Opt. and Spectr.* 2014. V. 117. № 1. P. 118–120.