

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 535.5

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ
В ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН****Е. В. Спесивцев¹, С. В. Рыхлицкий¹, В. А. Швец^{1,2}**¹*Учреждение Российской академии наук**Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*²*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования**«Новосибирский государственный университет»,**630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2**E-mail: shvets@isp.nsc.ru*

Рассматривается современное состояние разработок эллипсометрических методов и аппаратных средств, проводимых в Институте физики полупроводников СО РАН. Представлена оригинальная статическая схема эллипсометрических измерений, на базе которой создан ряд приборов различного функционального назначения: спектральные и лазерные эллипсометры, а также эллипсометры для проведения локальных измерений. Возможности эллипсометрической аппаратуры иллюстрируются результатами исследований различных объектов и быстропротекающих процессов. Показано, что с помощью эллипсометров статического типа можно проводить полный эксперимент, определяя все параметры частично деполяризованного света.

Ключевые слова: эллипсометрическая аппаратура, спектральная эллипсометрия, тонкие плёнки, быстропротекающие процессы.

Введение. Достижения современной науки и новейших технологий неразрывно связаны с развитием аналитических методов исследования и разработкой высокоточной диагностической аппаратуры. Особое место в этом ряду занимает метод эллипсометрии. Уже в самом начале его стремительного развития, которое совпало с бурным прогрессом в микроэлектронике, стало ясно, что высокая чувствительность метода, отсутствие возмущения на объект исследования могут стать определяющими критериями при выборе диагностических средств. По мере усовершенствования методических приёмов и разработки эллипсометрической аппаратуры возникали всё новые области применения эллипсометрии: физика твёрдого тела, кристаллофизика, оптические технологии, химия, биология, медицина. Прикладные задачи диктовали образование новых направлений приборных разработок. Так появились спектральная эллипсометрия, эллипсометрия высокого временного и высокого пространственного разрешения.

В Институте физики полупроводников (ИФП) СО РАН в 70–80-е годы прошлого столетия разработан ряд моделей эллипсометров [1, 2], которые тиражировались и успешно применялись в научных учреждениях страны и промышленном производстве. Но настоящий прорыв сделан после того, как была создана и запатентована оригинальная статическая схема [3], в которой реализованы накопленный опыт и новые идеи коллектива Института. Отличительная особенность этой схемы — отсутствие подвижных элементов и модуляции сигнала. Эта особенность была использована при разработке и создании эллипсометрической аппаратуры различного функционального назначения.

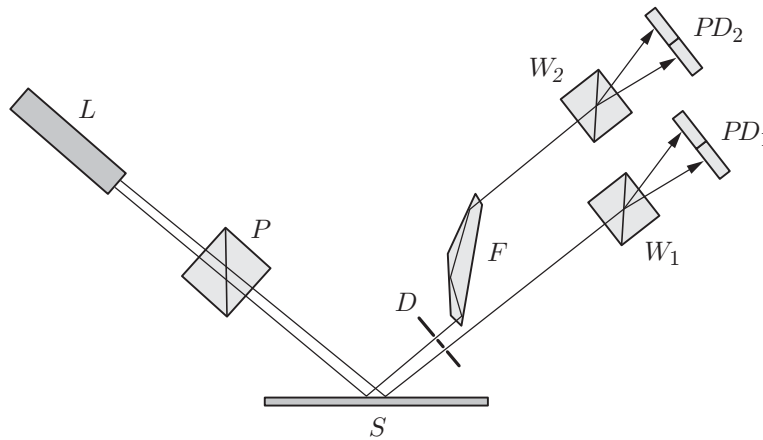


Рис. 1. Статическая схема эллипсометрических измерений

Цель данной работы — дать анализ современного состояния эллипсометрии в ИФП СО РАН и представить обзор новейших приборных разработок.

Статическая схема эллипсометрических измерений. В основе эллипсометрической аппаратуры, разработанной и изготовленной в Институте, лежит оригинальная статическая схема измерений, изображённая на рис. 1. Поляризованный линейным поляризатором P пучок света от источника L отражается исследуемой поверхностью S и разделяется диафрагмой D на два оптически независимых канала. В первом канале (амплитудном) свет разделяется пространственно поляризационной призмой Волластона W_1 (анализатором) на два пучка со взаимно ортогональными компонентами и интенсивностями I_1 и I_2 , регистрируемые двухплощадным фотоприёмником PD_1 . Второй канал (фазовый) отличается от амплитудного только наличием в оптическом тракте фазосдвигающего элемента, роль которого выполняет ахроматический ромб Френеля F . Расчёт с использованием формализма матрицы Джонса интенсивностей $I_{3,4}$ для фазового канала даёт следующие выражения:

$$I_3 = \left| (\rho \cos P \cdot \cos C + \sin P \cdot \sin C) \cos(A_2 - C) \rho_c - (\rho \cos P \cdot \sin C - \sin P \cdot \cos C) \sin(A_2 - C) \right|^2 I_0, \quad (1)$$

$$I_4 = \left| (\rho \cos P \cdot \cos C + \sin P \cdot \sin C) \sin(A_2 - C) \rho_c + (\rho \cos P \cdot \sin C - \sin P \cdot \cos C) \cos(A_2 - C) \right|^2 I_0, \quad (2)$$

где P, C, A_2 — азимутальные положения осей поляризатора, компенсатора и анализатора в фазовом канале, отсчитанные от плоскости падения; I_0 — интенсивность источника; $\rho_c = e^{i\delta_c}$ — комплексный параметр компенсатора, характеризующий его относительный фазовый сдвиг δ_c ; $\rho = \text{tg } \Psi \cdot e^{i\Delta}$ — комплексный эллипсометрический параметр, подлежащий измерению. Для амплитудного канала аналогичные выражения получаются, если в (1), (2) положить $\rho_c = 1$, что соответствует удалению компенсатора из оптической схемы.

В отличие от классической фотометрической схемы статическая оказывается нечувствительной к колебаниям интенсивности источника света. Действительно, отношение

уравнений (1) и (2) позволяет исключить I_0 и избавиться от соответствующих шумов. Детальный анализ рассматриваемой схемы был проведён в работе [4], где показано, что для определения эллипсометрических параметров Ψ и Δ достаточно измерения интенсивностей света в обоих каналах при некоторых фиксированных положениях оптических элементов (конфигурациях), т. е. такая схема не требует вращения оптических элементов и модуляции сигнала. Именно благодаря данной особенности удаётся повысить быстродействие измерительного тракта и отношение сигнала к уровню шумов. Предельное быстродействие, достигнутое при высокой дифференциальной чувствительности, составляет десятки микросекунд. При этом такая схема позволяет работать при слабой интенсивности зондирующего пучка. Особенности данной схемы открывают широкие возможности её применения в приборах самого различного функционального назначения.

Эллипсометрическая аппаратура и методы анализа. *Быстродействующая лазерная эллипсометрия.* Лазерный эллипсометр — самый простой по своим функциональным возможностям прибор. В качестве источника света в нём используется стабилизированный He—Ne-лазер, который даёт узконаправленное монохроматическое излучение большой мощности с высоким отношением сигнал/шум. Это обеспечивает высокие дифференциальную чувствительность прибора и быстродействие измерений. При фиксированных положениях элементов время измерения определяется только временами накопления и оцифровки сигналов для получения требуемой точности. Минимальное время измерения 40 мкс, а оптимальное, при котором достигается чувствительность измерений поляризационных углов уровня $0,003^\circ$, составляет 1 мс.

Если не требуется высокого быстродействия, то измерения проводят для нескольких положений оптических элементов: $P = \pm 45^\circ$, $A_1 = 0$ и 45° . При этом исключаются систематические приборные погрешности и повышается точность определения углов Ψ и Δ . Кроме того, снимается неопределённость при вычислении эллипсометрических параметров, которая имеет место, если измерения проводятся при фиксированных положениях оптических элементов. Переключение элементов осуществляется в автоматическом режиме без участия оператора.

В качестве примера использования быстродействующего эллипсометра рассмотрим результаты исследований, выполненных в процессе импульсного нагрева слоёв аморфного кремния. Слои получены имплантацией ионов Si^+ с энергией 190 КэВ до дозы $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в подложку низкоомного Si(100) с удельным сопротивлением $0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При таких условиях имплантации образуется аморфный слой Si толщиной порядка 200 нм с достаточно резкой границей раздела. Импульсный отжиг проводился по методике, описанной в [5].

Типичные изменения эллипсометрических параметров в процессе нагрева в высокотемпературном диапазоне ($T > 500^\circ \text{C}$) показаны на рис. 2. Начиная с температуры 550°C , траектория параметров в плоскости Ψ — Δ представляет собой разворачивающуюся со временем кривую в виде спирали. Такая траектория соответствует уменьшению толщины аморфного слоя за счёт движения фронта кристаллизации от подложки к поверхности. Однако витки спирали не вложены один в другой, а смещаются со временем в положительном направлении оси Ψ . Это смещение обусловлено отчасти температурным изменением оптических констант кремния от 550 до 850°C , а отчасти более сложными процессами, происходящими при кристаллизации, которые не учитываются в используемой нами однослойной модели. Из полученных данных определена скорость фронта кристаллизации V и её зависимость от температуры. Эта зависимость в координатах Аррениуса представляет собой прямую линию, доказывая тем самым, что процесс кристаллизации лимитирован температурой.

Быстродействующий лазерный эллипсометр успешно используется не только в научных исследованиях, но и в наукоёмких промышленных установках для технологического

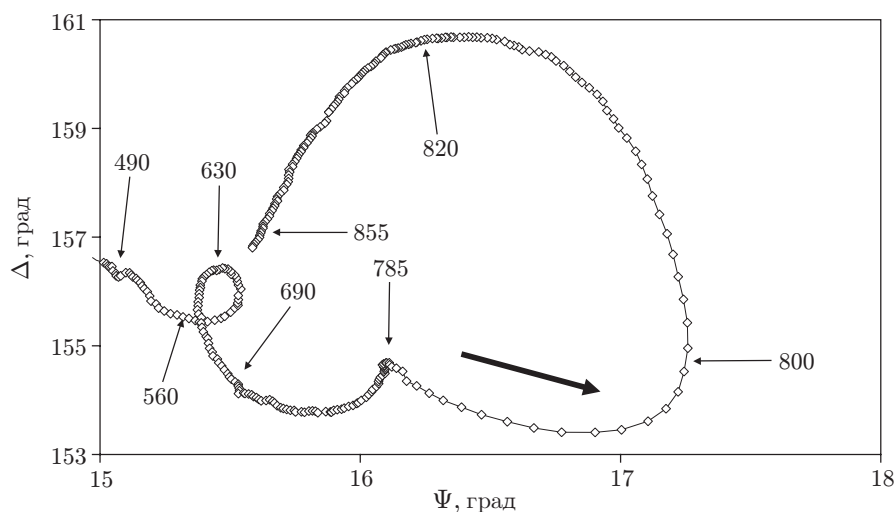


Рис. 2. Траектория эллипсометрических параметров, измеренная в процессе импульсного отжига слоя аморфного кремния (жирная стрелка показывает направление изменения со временем, тонкие стрелки — текущие значения температуры)

контроля. Модифицированная версия этого прибора может быть размещена на вакуумных камерах для проведения *in situ* измерений.

Спектральная эллипсометрия. Разработанные в ИФП СО РАН спектральные эллипсометры позволяют осуществлять измерения в оптическом диапазоне от ближнего УФ-до ближнего ИК-излучения. Основная область применения таких приборов — научные исследования: измерение спектров оптических постоянных различных материалов, анализ слоистых структур, характеристика сверхчистой поверхности. Внешний вид прибора показан на рис. 3. Источником света служит короткодуговая ксеноновая лампа или галогенная лампа накаливания, излучение которой разлагается по спектру и попадает в оптический тракт эллипсометра. Время измерения в спектральном диапазоне 250–1100 нм составляет несколько секунд. Специально разработанный быстродействующий монохроматор [6] обеспечивает развёртку спектра в этом диапазоне за 2 с. Спектральное разрешение монохроматора составляет 0,5 нм. Источник света и монохроматор выполнены в виде отдельного блока, который располагается вблизи эллипсометра, а свет в плечо поляризатора вводится через кварцевое оптоволокно. Эллипсометр снабжён предметным столиком, позволяющим перемещать образец по двум горизонтальным координатам в диапазоне 0–25 мм и в



Рис. 3. Общий вид спектрального эллипсометра с блоком осветителя

вертикальном направлении, а также регулировать его наклон. Гониометр с механизмом подъёма плеч позволяет дискретно менять угол падения света на образец для выбора наиболее оптимальных условий измерения. Разработан также вариант встраиваемого спектроэллипсометра для высокоинформативного мониторинга быстропротекающих процессов непосредственно в технологических установках. Спектральный эллипсометр снабжён развёрнутым программным обеспечением, позволяющим проводить измерения и обработку измеренных спектров, используя для этого различные модели и библиотеку данных по оптическим спектрам материалов.

Метод спектральной эллипсометрии хорошо зарекомендовал себя при исследовании сложных многослойных и многокомпонентных структур, а также при изучении оптических свойств новых перспективных материалов (рис. 4). На рисунке символами показаны измеренные спектры $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ для плёнки гидроксиапатита — материала, используемого в технике зубопротезирования. Плёнки получены магнетронным распылением на подложку Si.

Интерпретация измеренных эллипсометрических данных проводилась в рамках однослойной модели, для которой находили спектры оптических постоянных и толщину плёнки. Дисперсионные зависимости оптических постоянных моделировали формулой Коши: $n(\lambda) = n_0 + B/\lambda^2$, $k(\lambda) = D/\lambda^2$, где n_0 , B и D — коэффициенты, подлежащие определению. Подгоночным параметром служила также толщина плёнки d . Путём оптимизации стандартной целевой функции найдены следующие значения искомым параметров: $n_0 = 1,64$, $B = 64 \text{ нм}^2$, $D = 33 \text{ нм}^2$, $d = 481 \text{ нм}$. На рисунке сплошными линиями показаны расчётные спектры эллипсометрических параметров, соответствующие полученным значениям. Хорошее совпадение расчётных и измеренных спектров показывает согласованность используемой однослойной модели и реальной структуры. Известно, что показатель преломления материала коррелирует с его плотностью и характеризует структурные свойства. Оптическое поглощение может возникать из-за объёмных включений поглощающей фазы или структурных дефектов. Поэтому найденные зависимости оптических постоянных служат полезной информацией для отработки технологических режимов и получения совершенных по структуре слоёв.

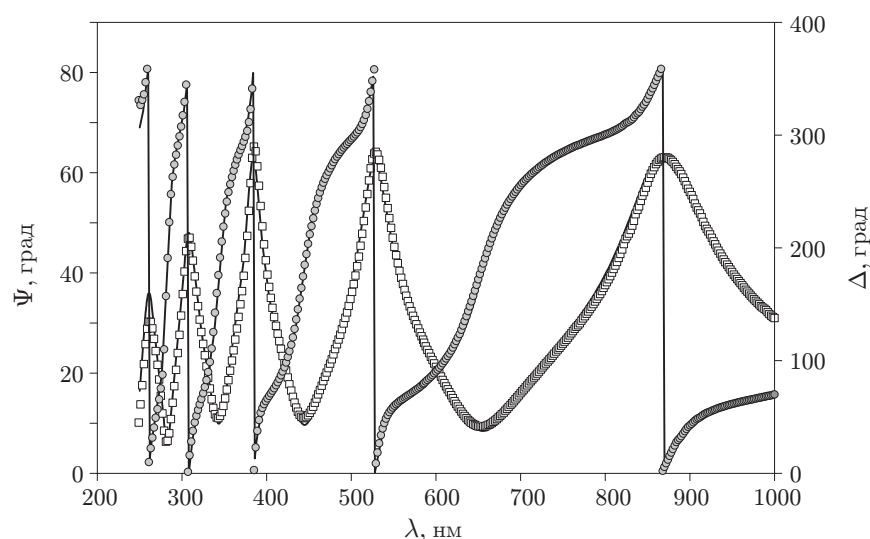


Рис. 4. Спектры эллипсометрических параметров плёнки гидроксиапатита на подложке Si: символы — измеренные значения, сплошные линии — результаты расчётов по однослойной модели

Эллипсометрия высокого пространственного разрешения. Для исследования микрообъектов, различного типа микроструктур, а также картирования оптических свойств поверхности используются методы эллипсометрического анализа с высоким пространственным (по площади образца) разрешением. Для таких исследований был разработан сканирующий по площади лазерный эллипсометр «МИКРОСКАН». Он снабжён микрооптикой для фокусировки лазерного пучка в пятно размером 10 мкм, микроскопом/автоколлиматором с 20-кратным увеличением для визуальной настройки образца и двухкоординатным сканирующим столиком для перемещения образца в процессе измерений по двум координатам в пределах 0–150 мм. Измерения проводятся в автоматическом режиме непосредственно в процессе сканирования исследуемой поверхности, а их результаты отображаются в реальном времени в виде цветной топограммы измеряемой характеристики или в виде трёхмерного образа. В этом приборе проявились достоинства базовой статической схемы, а именно возможность измерений при слабых световых потоках в квазипараллельном пучке, вырезанном диафрагмой из расходящегося светового конуса. Сканирование осуществляется в режиме «нон-стоп», т. е. сигналы считываются непрерывно в процессе перемещения образца с интервалом 1 мс и согласуются с текущей координатой, что открывает широкие возможности для создания промышленных эллипсометрических установок быстрого картирования полупроводниковых пластин размером 300 мм и больше.

Разновидностью эллипсометрии пространственного разрешения и новым направлением в этой области является обзорная эллипсометрия. В эллипсометрах такого класса в качестве фотоприёмного устройства используются ПЗС- или КМОП-матрицы, работающие в паре с проекционным объективом, отображающим плоскость образца на матрицу. Данная система позволяет проводить мгновенное картирование поляризационного контраста по поверхности образца. Обзорная эллипсометрия находит широкое применение в таких областях, как физика полупроводников и диэлектриков, характеристика поверхности и тонких плёнок, химия органических соединений, наносенсорика, биология, медицина и др. Наиболее развито использование отображающей эллипсометрии в нанобиотехнологиях для диагностики различных типов биочипов.

На рис. 5 представлена структурная схема разработанного в ИФП СО РАН отобра-

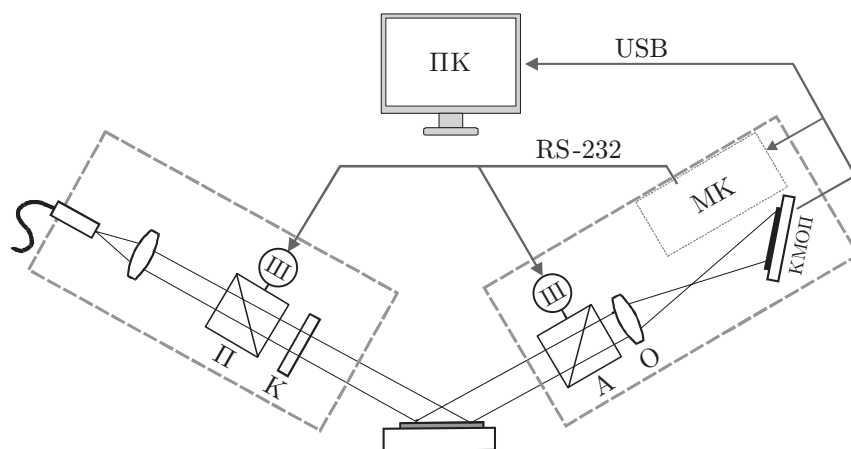


Рис. 5. Оптическая схема отображающего эллипсометра: П — поляризатор, К — компенсатор (четвертьволновая пластинка кристаллического кварца), А — анализатор, О — проекционный объектив, переносящий изображение поверхности на КМОП-матрицу, МК — микроконтроллер, Ш — шаговые двигатели, управляющие азимутальными положениями поляризатора и анализатора

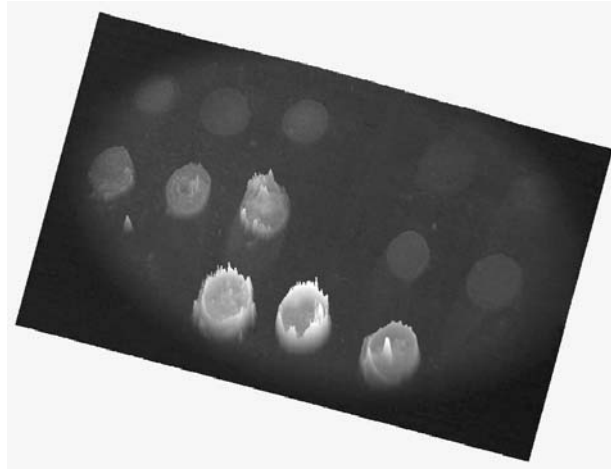


Рис. 6. Поляризационное изображение матрицы биомаркеров, полученное с помощью обзорного эллипсометра

жающего эллипсометра. В её основе лежит нулевая схема эллипсометрических измерений. Изображение формируется в условиях наибольшего эллипсометрического контраста, которые подбираются оператором для каждого образца. Это обеспечивает наиболее высокую чувствительность к изменению оптических и структурных свойств поверхности. На рис. 6 показано поляризационное изображение микрочипа с матрицей олигонуклеотидных биомаркеров, полученное на таком приборе.

Полная эллипсометрия. Развитие современных технологий приводит к появлению новых материалов, характеризующихся нелинейными оптическими свойствами, анизотропной внутренней и поверхностной структурой. Указанными свойствами могут обладать напряжённые слои, атомарно-чистые поверхности полупроводников, гетерогенные материалы с кластерной структурой. Например, при отражении света от слоёв поликристаллического кремния может появляться диффузно рассеянная деполаризованная компонента. В результате отражённый свет будет частично поляризован.

Для изучения физических свойств этих материалов необходимо измерение не только эллипсометрических углов, но всех параметров вектора Стокса и полной 16-элементной матрицы Мюллера [1]. Такой подход к анализу отражённого света называется «методом полной эллипсометрии» и даёт исчерпывающую информацию об оптических свойствах анизотропной и диффузно рассеивающей поверхности. Полная эллипсометрия экспериментально реализована на базе рассмотренной выше статической схемы измерений. Для этого создан экспериментальный образец мюллер-эллипсометра, в котором набор независимых конфигураций оптических элементов дополнен положениями поляризатора $P = 0$ и $P = 90^\circ$ (для идеальной изотропной поверхности эти положения дают тривиальные результаты измерений).

В работе [7] показано, что, используя измерения при четырёх азимутальных положениях поляризатора: $P = 0, \pm 45$ и 90° , можно определить все элементы нормированной матрицы Джонса Ψ_{ij}, Δ_{ij} ($i, j = 1, 2$). Более того, при этом удаётся разделить эффекты анизотропии и деполаризации и в дополнение к элементам матрицы Джонса экспериментально найти степень поляризации света:

$$P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2},$$

где $S_1 = \cos \Psi_{pp}$, $S_2 = \sin \Psi_{pp} \cdot \cos \Delta_{pp}$, $S_3 = \sin \Psi_{pp} \cdot \sin \Delta_{pp}$ — элементы приведённого вектора Стокса. Тем самым обоснована и экспериментально проверена возможность полных

эллипсометрических измерений на базе статической схемы.

Заключение. Предложенная в данной работе статическая схема эллипсометрических измерений оказалась очень продуктивной для создания эллипсометрической аппаратуры нового поколения. Она сочетает в себе конструктивную простоту и высокую точность измерения эллипсометрических параметров. На базе статической схемы разработаны и изготавливаются эллипсометры, позволяющие решать широкий класс исследовательских задач: спектральные для изучения сложных структур, лазерные с высоким временным разрешением, сканирующие по площади с возможностью картирования оптических свойств поверхности. Кроме того, с помощью такой аппаратуры удаётся проводить полные эллипсометрические измерения для анизотропных частично деполяризующих систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** эллипсометрии /Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
2. **Соколов В. К.** Аппаратурное обеспечение эллипсометрического метода // Эллипсометрия: теория, методы, приложения /Под ред. А. В. Ржанова, Л. А. Ильиной. Новосибирск: Наука, 1987. С. 90–94.
3. **Пат. 2303623 РФ.** Эллипсометр /Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий, В. А. Швец. Опубл. 10.07.2007, БИ № 19.
4. **Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В.** Анализ статической схемы эллипсометрических измерений // Оптика и спектроскопия. 2004. **97**, № 3. С. 514–525.
5. **Швец В. А., Чикичев С. И., Прокопьев В. Ю. и др.** Эллипсометрический комплекс для исследования быстропротекающих высокотемпературных процессов // Автометрия. 2004. **40**, № 6. С. 61–69.
6. **Рыхлицкий С. В., Дулин С. А., Спесивцев Е. В. и др.** Малогабаритный быстродействующий монохроматор МБМ-1М // ПТЭ. 2006. № 5. С. 162–163.
7. **Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В.** Измерение нормированной матрицы Джонса анизотропных образцов методом статической эллипсометрии // Оптика и спектроскопия. 2008. **105**, № 4. С. 689–695.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.
