

UDK 66.094

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО И ПЕРЕХОДНОГО СЛОЕВ ПЛЕНКИ КРЕМНИЯ

Мухтаров Эркин Кобилжонович
Андижанский государственный университет
e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com
<https://orcid.org/0009-0001-5057-4905>

Аннотация: В данной работе представлены результаты исследований по моделированию рассматриваемой системы для интерпретации данных спектральной эллипсометрии и сравнению этих результатов с данными, полученными с помощью поперечного электронного микроскопа.

Ключевые слова: эллипсометрия, показатель преломления, коэффициент поглощения, амплитуда, фаза, поляризация, модель, подложка, граница зерен.

FEATURES OF SURFACE AND TRANSITION LAYERS OF SILICON FILM

Mukhtarov Erkin Kobilzhonovich
Andijan State University
e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com

Abstract: This paper presents the results of research on modeling the system under consideration for interpreting spectral ellipsometry data and comparing these results with data obtained using a transverse electron microscope.

Keywords: ellipsometry, refractive index, absorption coefficient, amplitude, phase, polarization, model, substrate, grain boundaries.

KREMNIY PLONKASI SIRTIY VA O‘TISH QATTAMLARINING XUSUSIYATLARI

Muxtarov Erkin Kobiljonovich
Andijon davlat universiteti
e-mail: erkinmuxtarov@yahoo.com

Annotatsiya: Ushbu maqola spektral ellipsometriya ma'lumotlarini sharhlash va bu natijalarni ko'ndalang elektron mikroskop yordamida olingan ma'lumotlar bilan solishtirish uchun ko'rib chiqilayotgan tizimni modellashtirish bo'yicha tadqiqotlar natijalarini taqdim etadi.

Kalit so'zlar: ellipsometriya, sindirish ko'rsatkichi, yutilish koeffitsiyenti, amplituda, faza, qutblanish, model, taglik, donadorlik chegasi.

Введение

Эллипсометрия – метод, позволяющий определять оптические параметры многослойных систем с высокой точностью [1]. Путем измерения эллипсометрических углов Ψ и Δ и последующего моделирования можно

получить важные сведения о структуре и свойствах исследуемых материалов, таких как поликристаллический кремний.

Эллипсометрия измеряет изменения в поляризации света при его отражении или прохождении через материал [2]. Два основных параметра, измеряемые в эллипсометрии, это Ψ и Δ , которые описывают изменение амплитуды и фазы поляризованных компонент света, соответственно. Эти параметры зависят от толщины слоев, показателей преломления и коэффициентов экстинкции материалов в исследуемой системе.

Анализ литературы по теме

Метод эллипсометрии основан на изменении состояния поляризации света при его отражении от поверхности. Задавая состояние поляризации до отражения от образца и измеряя его после, можно получить информацию об отражающей поверхности. Основными измеряемыми параметрами являются Ψ и Δ : Ψ – отражает изменение амплитуды поляризованного света; Δ – отражает изменение фазы поляризованного света. Эти параметры связаны с комплексным коэффициентом отражения ρ , который определяется как отношение коэффициентов отражения для параллельной (r_p) и перпендикулярной (r_s) компонент поляризации:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \operatorname{tg}(\Psi) e^{i\Delta}$$

Основная задача эллипсометрии состоит в нахождении оптических параметров системы, таких как показатель преломления (n), коэффициент поглощения (k), и толщина слоев, если известны экспериментальные значения эллипсометрических углов Ψ и Δ [3].

Если пленка представляет собой смесь нескольких компонентов, то для анализа её оптических свойств часто используется приближение эффективной среды. Это приближение предполагает, что поведение света в многослойной структуре можно описать как поведение света в однородной среде с определёнными эффективными оптическими параметрами, которые учитывают вклад каждого компонента с учётом их объёмных долей или других характеристик.

Для определения эффективных параметров можно использовать различные теоретические модели, такие как модели Лоренца или Друде для диэлектрической функции материалов, а затем комбинировать их в зависимости от вклада каждого компонента [4].

Допустим, многослойная пленка, состоять из двух материалов: диэлектрика с показателем преломления n_1 и металлического слоя с показателем преломления n_2 . По объёмным долям f_1 и f_2 этих компонентов можно определить эффективные оптические параметры:

Эффективный показатель преломления:

$$n_{eff} = f_1 \cdot n_1 + f_2 \cdot n_2$$

Эффективный коэффициент поглощения:

$$k_{eff} = f_1 \cdot k_1 + f_2 \cdot k_2$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты поглощения для каждого компонента соответственно [5].

Методология исследования

В ходе работы использовались следующие методы исследования: Проведение измерений с использованием спектрального эллипсометра; получение эллипсометрических данных в видимом диапазоне спектра при различных длинах волн; обработка полученных эллипсометрических данных с учетом зависимости от глубины проникновения зондирующего излучения; построение моделей многослойной структуры, включающих параметры слоев, такие как толщина, показатель преломления и коэффициент экстинкции; применение метода наименьших квадратов для подгонки теоретических кривых к экспериментальным данным.

Результаты и обсуждение

Для моделирования и интерпретации данных эллипсометрии были использованы следующие этапы:

- проведение спектральной эллипсометрии для измерения углов Ψ и Δ при различных длинах волн и углах падения.
- создание начальной модели структуры с использованием известных оптических параметров и толщин слоев.
- учет физически обоснованных предположений о поведении света при отражении от многослойной структуры.

Для моделирования смеси аморфного и кристаллического кремния с пустотами используется приближение эффективной среды. В рамках этого подхода предполагается, что смесь можно представить как однородную среду с эффективными оптическими параметрами, зависящими от объемных долей компонентов.

Показатель преломления и коэффициент поглощения аморфного кремния:

$$n_{a-Si}(\lambda), k_{a-Si}(\lambda)$$

Показатель преломления и коэффициент поглощения кристаллического кремния:

$$n_{c-Si}(\lambda), k_{c-Si}(\lambda)$$

Показатель преломления и коэффициент поглощения пустот:

$$n_{\text{void}}=1, k_{\text{void}}=0$$

Эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}}(\lambda)$ и коэффициент поглощения $k_{\text{eff}}(\lambda)$ вычисляются на основе объемных долей и параметров компонентов.

Для исследования поликристаллического кремния (pc-Si) была выбрана спектральная эллипсометрия совместно с просвечивающей электронной микроскопией по поперечному срезу (ХТЕМ — cross-section transmission electron microscopy). Эти методики дополняют друг друга, предоставляя всестороннюю информацию о структуре и свойствах материала [6].

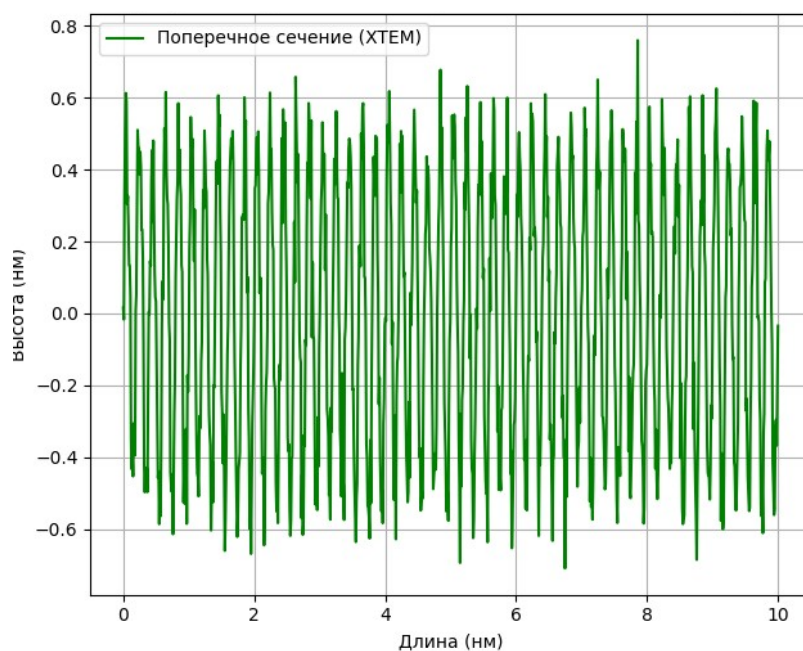


Рис. 1. Структура поверхности поликристаллического кремния (ХТЕМ)

На рис.1 показаны детали микроструктуры поверхностного слоя поликристаллической пленки Si исследуемой системы. Размер зерен поликристаллической пленки кремния составляет приблизительно 100 Å. Технологически изготавливалась структура (монокристаллическая кремниевая подложка (c-Si))–(пленка двуокиси кремния (SiO₂))–(поликристаллическая кремниевая пленка (pc-Si)). Результаты поперечного просвечивающего электронного микроскопа показали важные детали структуры исследуемой системы h-c-Si/SiO₂/pc-Si.

Анализ эллипсометрических спектров даёт возможность получить ценную количественную информацию о составе и толщине различных слоев исследуемой системы [7], [8]. На рисунках 2(a) и 2(b) приведены экспериментальные и рассчитанные спектры Ψ и Δ (угол падения 70°) для исследуемой структуры. Видно, что спектры отличаются не только количественно, но и качественно. Это может свидетельствовать о необходимости более точной модели для описания структуры, учитывающей дополнительные факторы, такие как шероховатость поверхности и неоднородность толщины слоев, о которых упоминалось ранее.

Наблюдение, что спектры 1 и 2 совпадают при $\lambda < 400$ нм, указывает на то, что при длине волны менее 400 нм технологическая модель и модель поверхности pc-Si дают одинаковые оптические характеристики. Это может свидетельствовать о том, что в данном диапазоне длины волн эти модели адекватно описывают оптические свойства материала.

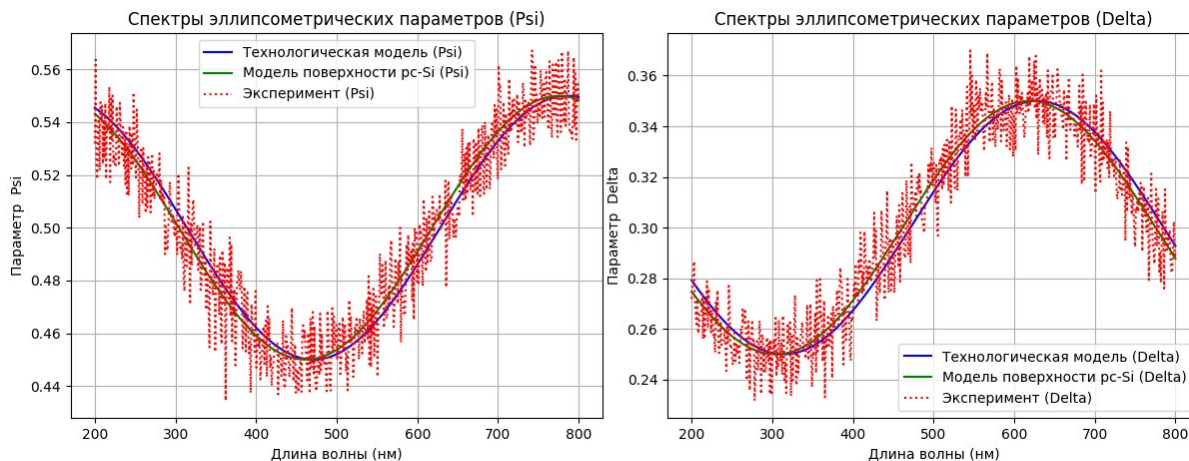


Рис. 2. Спектры эллипсометрических параметров

Совпадение спектров эллипсометрических параметров при $\lambda < 400$ нм подтверждает, что в данном диапазоне длины волн как технологическая модель, так и модель поверхности pc-Si правильно описывают оптические свойства материала. Экспериментальные данные могут немного отклоняться из-за различных факторов, таких как неоднородности поверхности или точность измерений, однако в целом они должны хорошо согласовываться с теоретическими моделями.

Для того чтобы однозначно определить реальную модель структуры h-c-Si/SiO₂/pc-Si, мы основывались на физически обоснованных соображениях и результатах, полученных с помощью поперечного просвечивающего электронного микроскопа. Этот подход обеспечил более точное моделирование и анализ структуры.

Анализ спектров глубины проникновения зондирующего излучения в различные формы кремния (монокристаллический c-Si, поликристаллический pc-Si и аморфный a-Si) позволяет лучше понять, как различные структуры поглощают и преобразуют солнечную энергию. В зависимости от кристаллической структуры, кремний имеет разные оптические свойства, которые влияют на глубину проникновения света и эффективность преобразования [9].

Из-за присутствия границ зерен в поликристаллическом кремнии и других дефектов, свет проникает в материал на меньшую глубину по сравнению с монокристаллическим кремнием. Это ограничивает эффективность в ближней инфракрасной области, но все же позволяет эффективно поглощать видимый свет [10].

Спектры глубины проникновения зондирующего излучения в различные типы кремния, такие как монокристаллический (c-Si), поликристаллический

(pc-Si) и аморфный (a-Si), важны для понимания их оптических и фотоэлектрических свойств. Эти спектры показывают, на какую глубину проникает свет разной длины волны в материалы и как эффективно они могут поглощать и преобразовывать солнечную энергию.

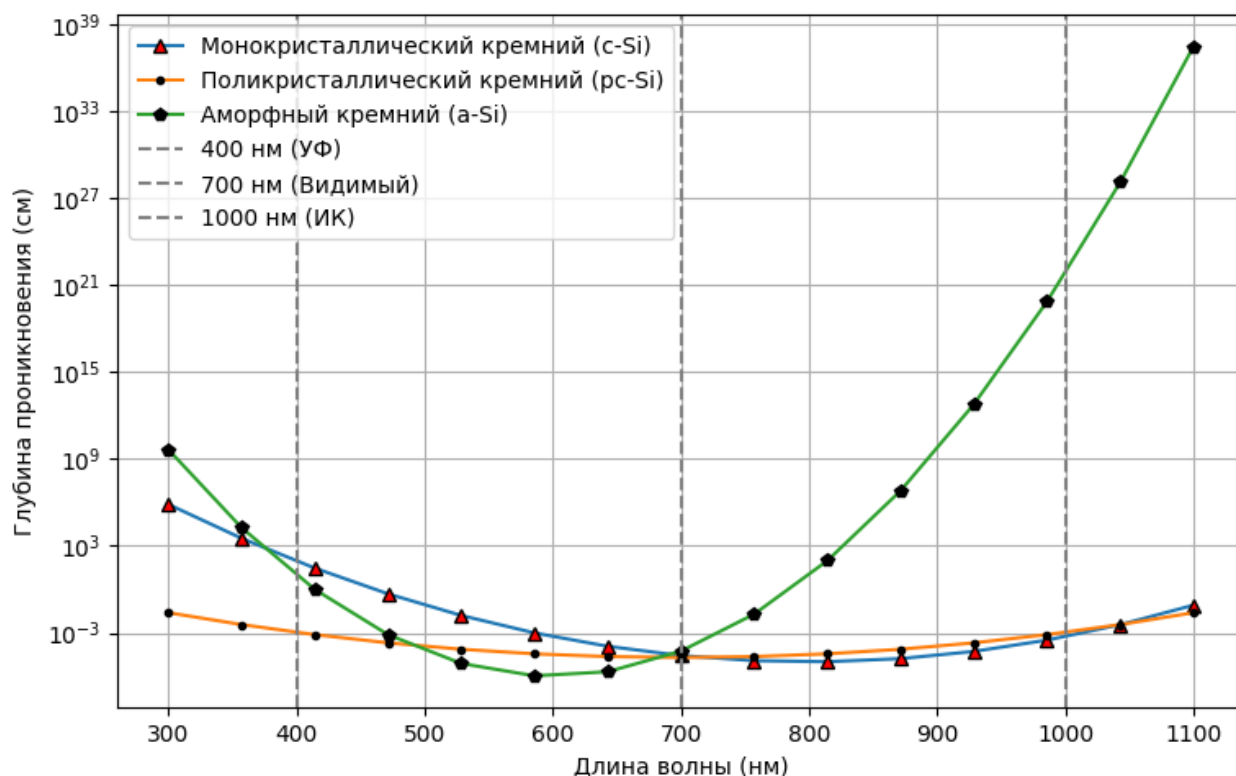


Рис. 3. Глубина проникновения зондирующего излучения в различные типы кремния

Из рис.3 видно, что монокристаллический кремний (c-Si) имеет большую глубину проникновения в ближнем инфракрасном диапазоне (> 800 нм), что означает эффективное поглощение длинноволнового света. Поликристаллический кремний (pc-Si) проникает на меньшую глубину по сравнению с монокристаллическим кремнием, особенно в видимом и инфракрасном диапазонах. Аморфный кремний (a-Si) имеет малую глубину проникновения, что делает его эффективным для поглощения коротковолнового света (< 600 нм), но менее эффективным для длинноволнового света.

Моделирование и экспериментальные данные показывают, что для длины волны менее 400 нм глубина чувствительности технологической системы меньше 200 нм. Это означает, что на этих длинах волн интерференционные эффекты в толще материала менее значимы, и свет не проникает глубже 200 нм. Это важно учитывать при проектировании и анализе тонкопленочных структур и технологических систем на основе поликристаллического кремния.

Заключение

Анализ излучения в кремниевую систему и построение эффективных моделей многослойной структуры поверхности основаны на понимании оптических свойств материалов, интерференционных эффектов, процессов поглощения и рекомбинации носителей заряда. Использование методов матричных моделей и численных методов позволяет оптимизировать многослойные структуры для повышения эффективности солнечных элементов. Комплексный подход к моделированию и оптимизации таких систем позволяет значительно улучшить их характеристики и расширить область применения.

Исследование поверхности поликристаллического кремния требует учета различных факторов, таких как границы зерен, поверхностная шероховатость и примеси, чтобы точно описать экспериментальные данные. Использование более сложных моделей, включающих эти факторы, позволяет лучше согласовать модель с экспериментальными спектрами, особенно в коротковолновой области. Это способствует более точной характеристике материала и улучшению его оптических свойств для применения в фотоэлектрических устройствах.

Список использованной литературы:

1. Эллипсометрия: теория, методы, приложение / Под ред. А. В. Ржанова и Л. А. Ильина. Новосибирск: Наука, 2009. 192 с.
2. Эллипсометрия – метод исследования поверхности / Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 2007. 180 с
3. Швец В.А. и др. Эллипсометрия – прецизионный метод мониторинга тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии, 2009, вып. 4, № 3–4, стр. 72–83.
4. Горляк А.Н., Храмцовский И.А., Солонуха В.М. Применение метода эллипсометрии в оптике неоднородных сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2015, вып. 15, № 3, стр. 378-386.
5. Солодуха В.А. и другие. Спектральная эллипсометрия как метод исследования влияния быстрой термической обработки кремниевых пластин на их оптические характеристики // Приборы и методы измерений. 2022, вып. 13, № 3, стр. 199–207. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2022-13-3-199-207>
6. Толстой В.П. Введение в оптико-абсорбционную спектроскопию наноматериалов. СПб.: СОЛО, 2014. С. 21, 39–48.
7. Рыхлицкая С.В. и др. Эллипсометрия физико-химических процессов на межфазных границах // Конденсированные среды и межфазные границы, том 8, №4, стр.327-333
8. Прокопенко В. Т. и др. Эллипсометрия оптических соединений элементов оптоэлектроники // Изв. Вузов. Приборостроение. 2018. Т. 51, № 10
9. Хашим Х. и др. Применение метода спектральной эллипсометрии для характеристики наноразмерных пленок // Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 11. стр. 2191-2195.

10. Хируненко Л.И., Помозов Ю.В., Соснин М.Г. Оптические свойства кремния с высоким содержанием бора // Физика и техника полупроводников, 2013, вып. 47, вып. 2, стр. 232–238.