

Электрофизические и оптические свойства карбидокремниевых приборных структур

Д.Ю. Голубева, А.В. Щербак

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Представлены результаты исследований тонких пленок карбида кремния, получаемых методом высокочастотного магнетронного распыления на подложках различного типа. Морфология поверхности карбида кремния исследовалась методом растровой электронной микроскопии. Шероховатость поверхности измерялась при помощи профилометра. Фазовый состав и структурное совершенство пленок определялись методами рентгенофазового анализа и комбинационного рассеяния света. Разработана методика расчета оптических и некоторых электрофизических параметров слоев карбида кремния на основе экспериментально полученных спектров нормального отражения естественного света от структуры и от подложки. Рассчитаны показатель преломления, коэффициент экстинкции и удельная проводимость пленок карбида кремния в зависимости от длины волны падающего света.

Ключевые слова: приборные структуры, карбид кремния, электрофизические параметры, оптические параметры, магнетронное распыление.

Введение

Карбид кремния (SiC) по основным параметрам: ширине запрещенной зоны, теплопроводности, допустимой температуре, скорости дрейфа электронов SiC значительно превосходит традиционные полупроводниковые материалы, такие как кремний, германий, арсенид галлия. Карбид кремния имеет высокую термо- и радиационную устойчивость, большую механическую прочность, очень малую скорость диффузии и самодиффузии примесей, очень слабую химическую активность, что обусловлено высокой энергией связи в решетке карбида кремния (5эВ) [1–5]. Благодаря совокупности вышеперечисленных свойств этот материал является наиболее перспективным для силовой быстродействующей электроники, СВЧ электроники повышенной мощности [6; 7], оптоэлектроники [8], микросистемной техники [9–12], а также в области разработки различных датчиков, предназначенных для работы в экстремальных условиях, таких как повышенные температуры, агрессивные среды, воздействие радиации, в условиях открытого космического пространства [13–16].

В последние годы наряду с совершенствованием технологии получения карбида кремния в

виде монокристаллических пластин требуемых размеров [17] наблюдается интенсивное изучение пленочных структур карбида кремния [18–20], которые обладают целым рядом преимуществ по сравнению с объемными монокристаллами. Полупроводниковые пленки имеют гораздо больше структурных форм, нежели объемные монокристаллы. В ряде случаев в виде пленок удастся изготовить материалы и реализовать типы кристаллических структур, которые невозможно получить в виде объемных монокристаллов. В связи с этим изучение свойств тонких пленок карбида кремния на различных типах подложек является актуальной задачей.

В настоящее время известно много способов получения пленок карбида кремния [1–5]. Одним из перспективных методов получения пленок карбида кремния является метод магнетронного распыления [21–23], к основным преимуществам которого относятся его универсальность, высокая скорость осаждения пленок, возможность получения пленок большой площади.

В данной работе предпринята попытка исследования электрофизических и оптических параметров пленок карбида кремния, получаемых методом магнетронного распыления, на сапфировых, поликорковых и кремниевых подложках.

1. Получения пленок карбида кремния методом магнетронного распыления

Для получения структур SiC/поликор, SiC/сапфир и SiC/Si использовался метод высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления, т.к. с его помощью можно получить пленки из тугоплавких, непроводящих электрический ток, материалов сложного состава на подложках из различных по химическому составу материалов.

Процесс магнетронного распыления производился на установке ВУП-5М с высокочастотным источником питания магнетронной распылительной системы (МРС). Частота питающего напряжения 13,56 МГц, мощность регулируется в диапазоне от 0 до 500 Вт. Остаточное давление в камере не более 10^{-5} мм рт. ст., температура подложек регулируется от 50 до 1000 °С. Время откачки не более 15 мин.

Для получения пленок важное значение имеет предварительная подготовка подложек. Процесс подготовки подложек включал следующие операции:

- лазерное скрайбирование подложек на отдельные образцы,
- обезжиривание пластин кипячением в толуоле,
- промывка в спирте, и затем в деионизованной воде,
- промывка в деионизованной воде и сушка.

Подготовленные подложки помещались в вакуумную камеру МРС. Распыление карбида кремния проводилось при следующих условиях: расстояние мишень – подложка 50 мм, мощность распыления, подводимая к мишени, 300 Вт, давление рабочего газа (аргона) 10^{-1} Па, температура подложки 800 °С, время напыления 10 мин. При указанных условиях толщина получаемого слоя карбида кремния составляла 0,5 мкм, что соответствует скорости осаждения пленки 50 нм/мин.

2. Морфология поверхности

Исследование морфологии поверхности образцов полученных структур проводилось на растровом электронном микроскопе марки Supra 25 (Carl Zeiss). В исследовании пленок карбида кремния проводилось исследование поверхности для трех значений увеличения: 1000 раз, 2500 раз и 5000 раз. Данные значения увеличения соответствуют полю видения микроскопа

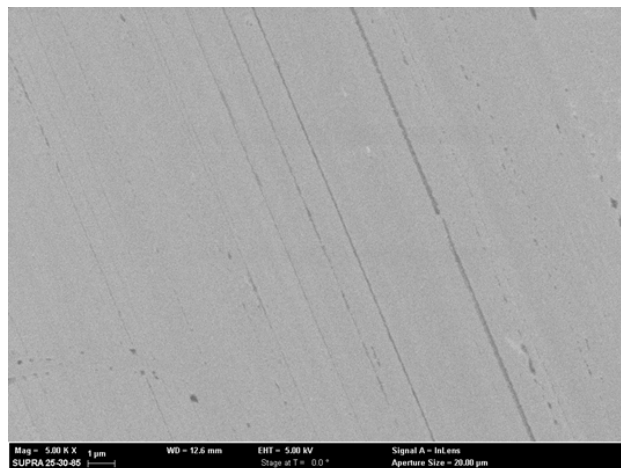


Рис. 1. Поверхность SiC структуры SiC/поликор при увеличении 5000 раз

соответственно 215 микрон, 86 микрон и 43 микрона. При таких увеличениях и разрешении получаемого изображения поверхности порядка 768 пикселей на поле видения, можно видеть детали морфологии размерами: для увеличения 1000 раз – от 0,5 до 100,0 мкм, 2500 раз – от 200 нм до 40 мкм, 5000 раз – от 100 нм до 20 мкм. Морфология структуры SiC/поликор при увеличении 5000 раз представлена на рис. 1.

Анализ изображений поверхности SiC исследуемых структур, полученных с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ изображений) показал, что на всех видах подложек пленки карбида кремния гладкие, морфология поверхности пленок аналогична морфологии поверхности подложек, пленки не содержат посторонних включений и микрокапель распыляемого вещества.

3. Микрорельеф поверхности

Поверхностная микрогеометрия образцов исследуемых структур исследовалась на профилографе-профилометре марки KLA-TencorP16+ при следующих значениях параметров измерения:

- разрешение по вертикали 0,1 Е.
- разрешение по горизонтали – 3 мкм.
- скорость сканирования – до 20 мкм/мин.
- прижимное усилие – 0,5 г.

Профилограммы поверхности SiC исследуемых структур приведены на рис. 2. С помощью полученных профилограмм измерялись максимальные значения высоты шероховатости и средний шаг неровностей профиля.

Наибольшая высота профиля равная 30 нм наблюдалась у пленок карбида кремния, выра-

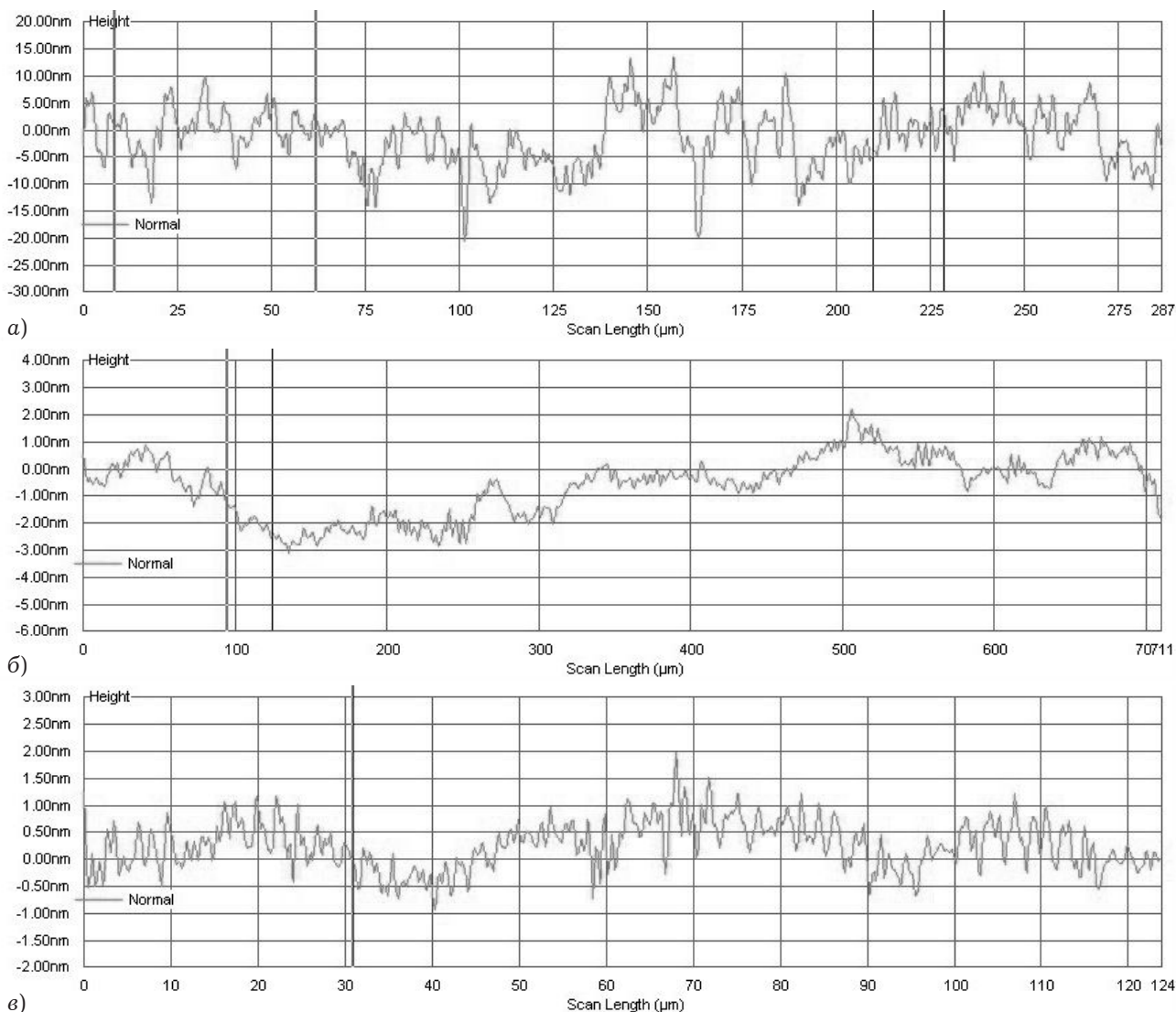


Рис. 2. Профилограммы поверхности SiC: а) структура SiC/поликор; б) структура SiC/сапфир; в) структура SiC/Si

щенных на поликоре. Средний шаг неровностей равен 8 мкм. Высоты профилей пленок, полученных на сапфировой и кремниевой подложках, примерно одинаковы и равны 3 нм. Средний шаг неровностей пленки SiC на сапфире приблизительно равен 10 мкм, на кремнии – 1 мкм.

4. Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ (РФА) пленок карбида кремния на поликоре, на сапфире и на кремнии проводился на рентгеновском дифрактометре

ДРОН-2.0 в CoK_{α} – излучении (длина волны α -линии $\lambda_{\alpha} = 1,785 \text{ \AA}$) при ускоряющем напряжении $U_a = 20 \text{ кВ}$ и силе тока $I_a = 20 \text{ мА}$, скорость вращения счетчика равна 2 об/мин.

По результатам проведенного качественного фазового анализа можно сделать следующие выводы:

- структура карбид кремния на поликоре содержит фазу карбида кремния (углы 42° ; $48,1^{\circ}$; $71,7^{\circ}$), фаза Al_2O_3 (углы 64° ; 67°),
- структура карбид кремния на сапфире аналогична по фазовому составу структуре карбид кремния на поликоре;
- структура карбид кремния на кремнии содержит фазу карбида кремния (углы 42° ; $48,1^{\circ}$; $71,7^{\circ}$), фазу кремния (подложка) (углы 34° ; $55,4^{\circ}$).

5. Комбинационное рассеяние света

Измерение спектров комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемых структур были проведены на установке «Интегра Спектра NT-MDT» (см. рис. 4).

Интенсивность и ширина пиков несет информацию о качестве пленки и совершенстве ее кристаллической решетки. Более широкие пики свойственны аморфным состояниям, более ин-

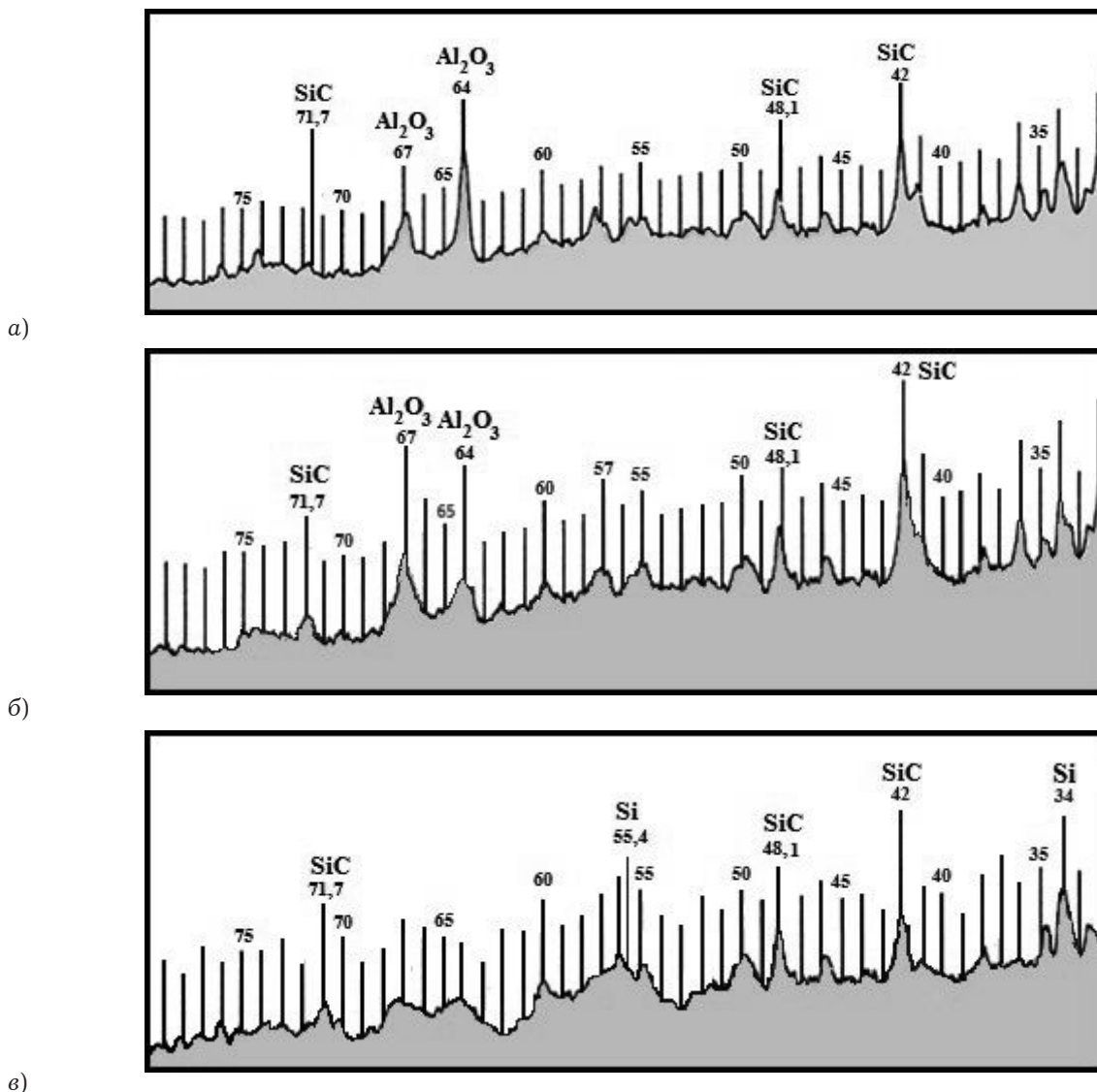


Рис. 3. Дифрактограммы структур: а) SiC/поликор; б) SiC/сапфир; в) SiC/Si

тенсивные и узкие кристаллическим состояниям. Из рис. 4 видно, что спектры КРС полученных структур слабо зависят от типа подложки. Наблюдаемые широкие пики при величине сдвига волнового вектора 1380 см^{-1} и 1600 см^{-1} соответствуют углероду на поверхности пленки в алмазоподобной (sp^3) и графитоподобной (sp^2) конфигурациях соответственно. Узкий пик при 549 см^{-1} соответствует кремниевой подложке.

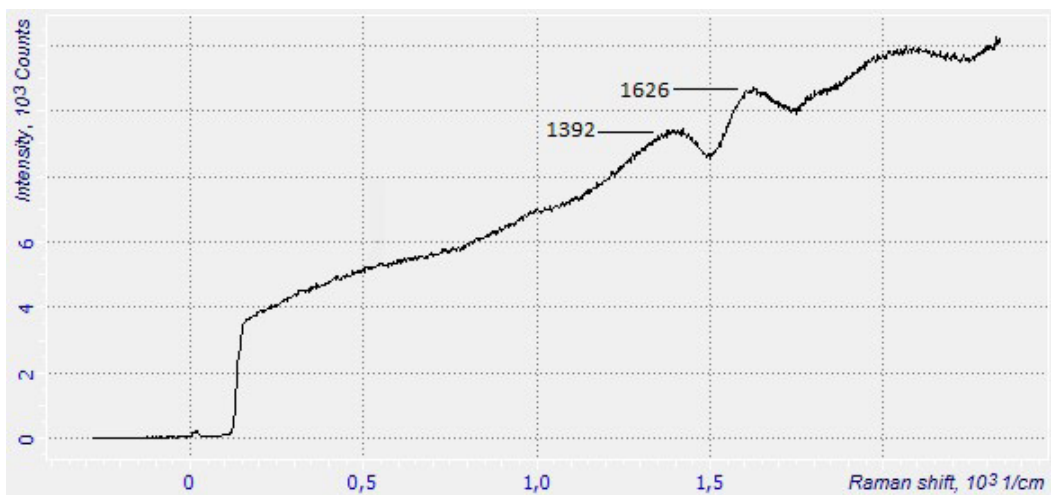
Спектры КРС структур показывают, что исследуемые пленки карбида кремния имеют преимущественно аморфную или нанокристаллическую структуру.

6. Нормальное отражение естественного света

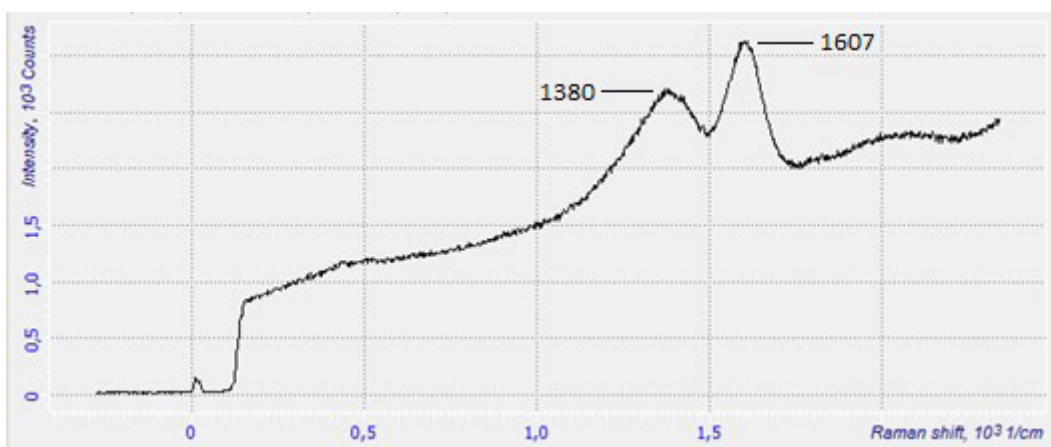
Для определения оптических констант и электрофизических параметров пленок карбида кремния на поликоровой, сапфировой и крем-

ниевой подложках были получены спектры нормального отражения естественного света в диапазоне длин волн от 250 до 1000 нм. Оптическая схема измерения спектрального коэффициента отражения приведена на рис. 5.

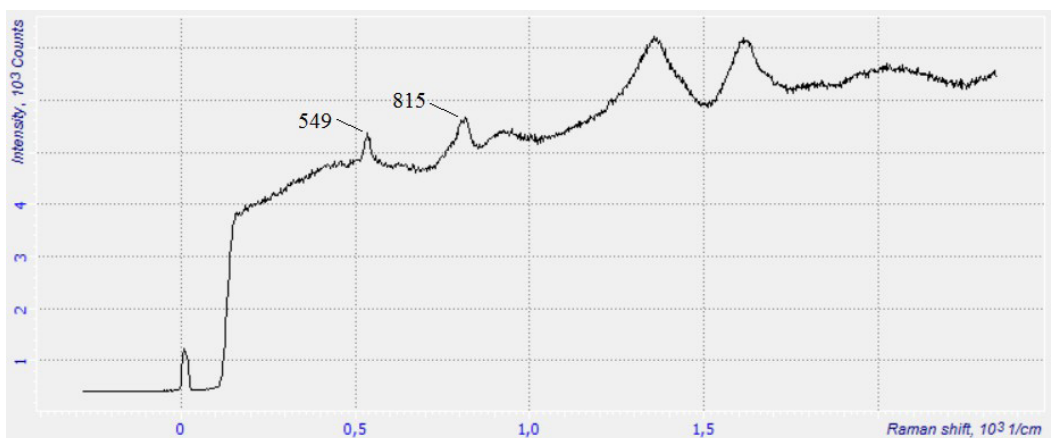
Свет от источника фокусируется вогнутым зеркалом (на рис. 5 не показано) и попадает на входное отверстие монохроматора. На выходе монохроматора выделяется излучение в узком интервале длин волн (практически монохроматическое), которое попадает на исследуемый образец под малым (не более 5°) углом падения. Отраженное от образца излучение попадает на вход измерителя интенсивности оптического излучения, где преобразуется в электрический сигнал. Монохроматор и измеритель интенсивности оптического излучения синхронизируются командами, поступающими от персонального компьютера, в результате чего формируется таблица данных, содержащая следующие столбцы:



а)



б)



в)

Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света исследуемых структур: а) SiC/поликор; б) SiC/сапфир; в) SiC/Si

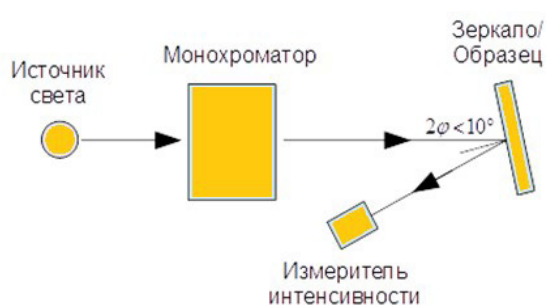


Рис. 5. Схема измерения коэффициента отражения структур

- порядковый номер отсчета длины волны;
- значение длины волны;
- значение интенсивности оптического излучения на данной длине волны.

После прохода заданного диапазона длин волн табличные данные записываются в файл для последующей обработки.

Коэффициент отражения определяется как отношение интенсивности отраженной световой волны к интенсивности падающей:

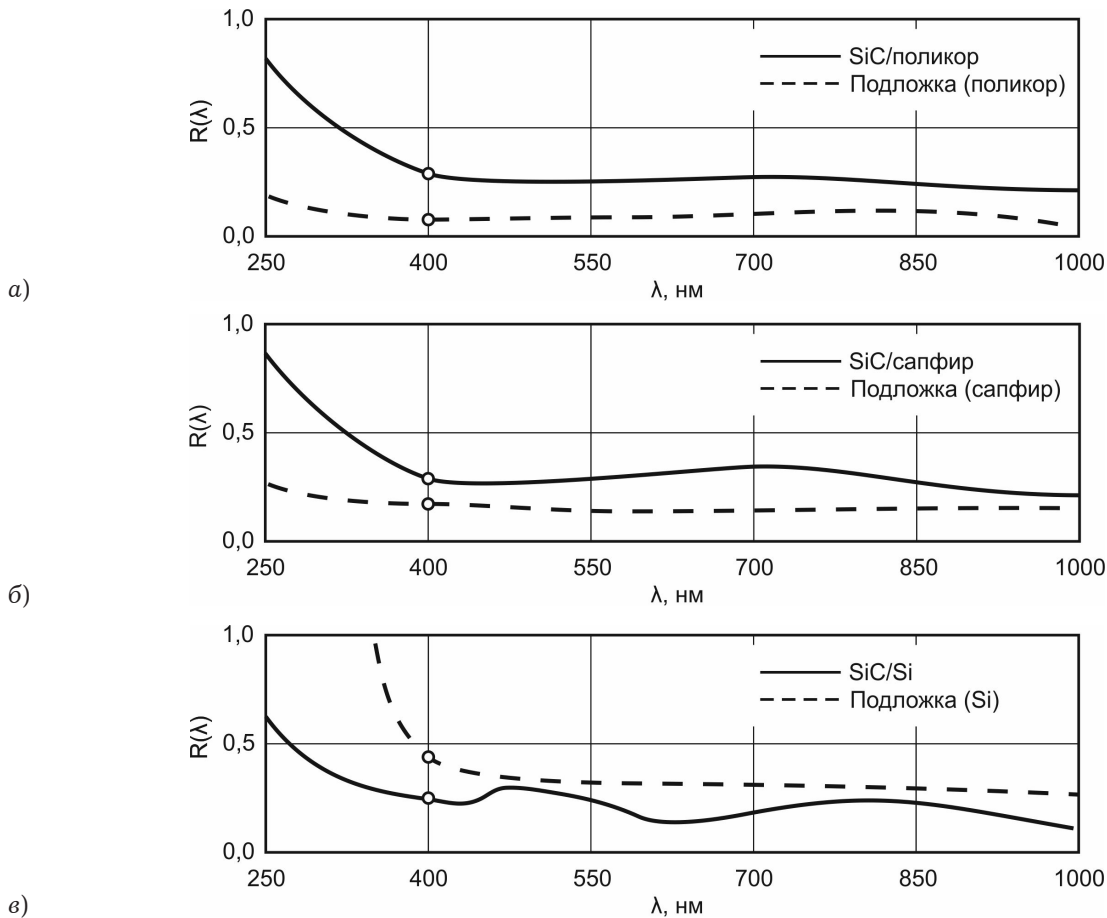


Рис. 6. Спектральные коэффициенты отражения структур: а) SiC/поликор; б) SiC/сапфир; в) SiC/Si

$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (1)$$

Измерение коэффициента отражения каждой структуры проводилось в двух поддиапазонах длин волн, так как использовалось два источника света – лампа накаливания в диапазоне от 1000 до 400 нм и дейтериевая лампа в диапазоне от 400 до 250 нм. Вначале фиксировался спектр падающего излучения $I_0(\lambda)$ в исследуемом диапазоне. Для этого образец заменялся на алюминиевое зеркало, имеющее практически постоянный коэффициент отражения в диапазоне от 250 до 1000 нм и проводилась запись зависимости интенсивности отраженного от зеркала излучения от длины волны. Затем записывалась зависимость интенсивности отраженного от образца излучения от длины волны – $I_R(\lambda)$. Коэффициент отражения структуры определялся по формуле (1). Аналогично определялись спектральные коэффициенты отражения подложек. Полученные спектры отражения структур карбид кремния на поликоре, на сапфире и на кремнии, а также спектры отражения поликоровой, сапфировой и кремниевой подложек приведены на рис. 6.

На спектрах отражения видно, что коэффициент отражения от всех типов исследуемых структур начинает возрастать при длинах волн меньших 400 нм. Возрастание коэффициента отражения связано с переходом носителей заряда из валентной зоны в зону проводимости при поглощении кванта света. В результате этого процесса свойства полупроводника изменяются при длинах волн меньших длины волны λ_g , соответствующей ширине запрещенной зоны E_g . При $\lambda > \lambda_g$ проводимость полупроводника очень мала, и коэффициент экстинкции можно положить равным нулю. В противоположном случае, когда $\lambda < \lambda_g$ проводимость резко возрастает, также возрастает и коэффициент экстинкции. В связи с этим целесообразно отдельно рассмотреть свойства пленок карбида кремния при $\lambda > \lambda_g$ и при $\lambda < \lambda_g$.

При $\lambda > \lambda_g$ можно считать карбид кремния прозрачным. В данной работе были вычислены спектры показателей преломления для пленок карбида кремния на сапфировой и поликоровой подложке, с учетом многократного отражения света от границы раздела пленка – подложка. Учитывалось также различие коэффициен-

тов отражения от границы воздух пленка и от границы пленка подложка. Рассмотрим отражение света от структуры пленка – подложка (см. рис. 7). Пусть на структуру падает луч света с интенсивностью I_0 . В точке 1 падающая волна разделяется на отраженную от пленки волну с интенсивностью $I_1 = I_0 R_{12}$, где R_{12} – коэффициент отражения воздух – пленка и прошедшую волну с интенсивностью $I'_1 = I_0(1 - R_{12})$. Волна I'_1 распространяется в пленке и на границе пленка – подложка разделяется на отраженную волну с интенсивностью $I'_1 R_{23}$ и прошедшую в подложку волну. Свет, прошедший в подложку, не отражается обратно, так как толщина подложки достаточно велика, и не дает вклад в отраженную волну. Отразившись от границы пленка – подложка, свет, прошедший через пленку, попадает на границу воздух пленка, где снова разделяется на волну, отраженную обратно в пленку, с интенсивностью $I_1 = I'_1 R_{23} R_{12}$ и волну, вышедшую из пленки с интенсивностью $I_2 = I'_1 R_{23}(1 - R_{12})$. Далее процесс повторяется (см. рис. 7).

Суммарная интенсивность отраженного от структуры света определяется суммой всех составляющих I_n и равна:

$$I_R = R_{12} I_0 + I_0 (1 - R_{12})^2 \sum_{n=2}^{\infty} R_{23}^{n-1} R_{12}^{n-2}. \quad (2)$$

Так как коэффициент отражения всегда меньше единицы, то ряд в (2) сходится, и окончательно для интенсивности отраженного света получаем

$$I_R = I_0 R_{12} + I_0 (1 - R_{12})^2 \frac{R_{23}}{1 - R_{23} R_{12}},$$

откуда коэффициент отражения структуры равен

$$R = \frac{I_R}{I_0} = R_{12} + \frac{(1 - R_{12}) R_{23}}{1 - R_{23} R_{12}}. \quad (3)$$

Коэффициенты отражения от границ раздела воздух – пленка и пленка – подложка соответственно равны

$$R_{12} = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \right)^2 \quad \text{и} \quad (4)$$

$$R_{23} = \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2} \right)^2, \quad (5)$$

где n_2 и n_3 – показатели преломления пленки и подложки соответственно.

Показатель преломления подложки можно вычислить из измеренного коэффициента отражения подложки без учета многократного отражения по формуле

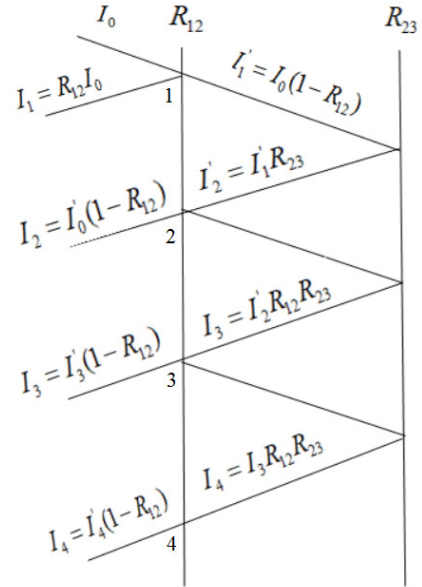


Рис. 7. Многократное отражение в пленке

$$R_S = \left(\frac{n_3 - 1}{n_3 + 1} \right)^2. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4) получаем коэффициент отражения структуры как функцию $f(n_2, n_3)$, зависящую от n_2 и n_3 . Показатель преломления n_3 можно найти из (6) и подставить в (5). В результате коэффициент отражения будет зависеть только от n_2 , т. е. $R = f(n_2)$. Следовательно, зная R и R_S можно найти показатель преломления пленки n_2 из уравнения

$$R - f(n_2) = 0. \quad (7)$$

В данной работе уравнение (7) решалось численно для каждой точки спектра отражения. Для решения этой задачи была составлена программа на языке программирования **C#** в среде разработки Visual Studio 10. Рассчитанные спектры показателей преломления для пленки карбида кремния на сапфировой и поликоревой подложке показаны на рис. 8.

Для кремниевой подложки и соответственно структуры **SiC** на кремнии вычисление показателя преломления описанным выше способом не было проведено, так как кремний обладает шириной запрещенной зоны 1,12 эВ и уже начиная с длины волны 1000 нм проявляет сильное поглощение света, в результате чего описанный выше способ вычисления показателей преломления становится неприменимым.

В области длин волн меньших λ_g пленка карбида кремния начинает поглощать свет. В данной работе было принято допущение, что поглощение света пленкой карбида кремния в этом диапазоне достаточно сильное, так что много-

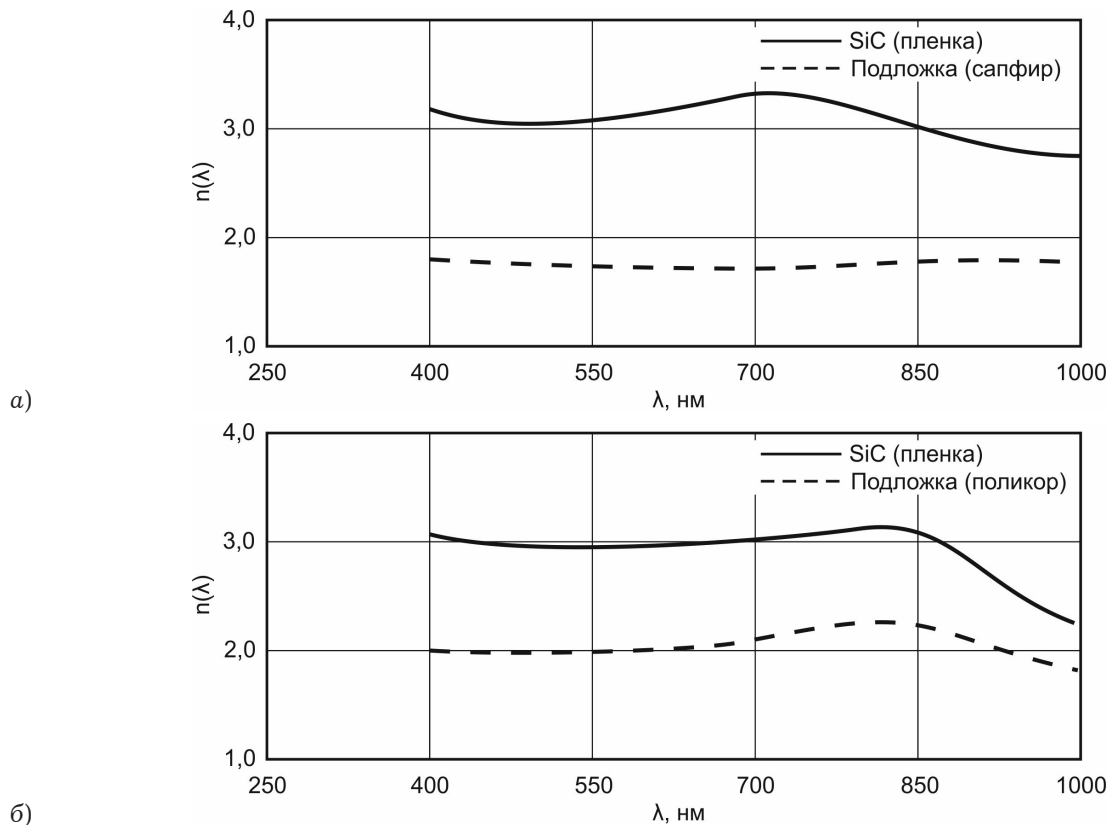


Рис. 8. Спектральный показатель преломления пленки SiC на сапфировой (а) и поликристовой (б) подложках

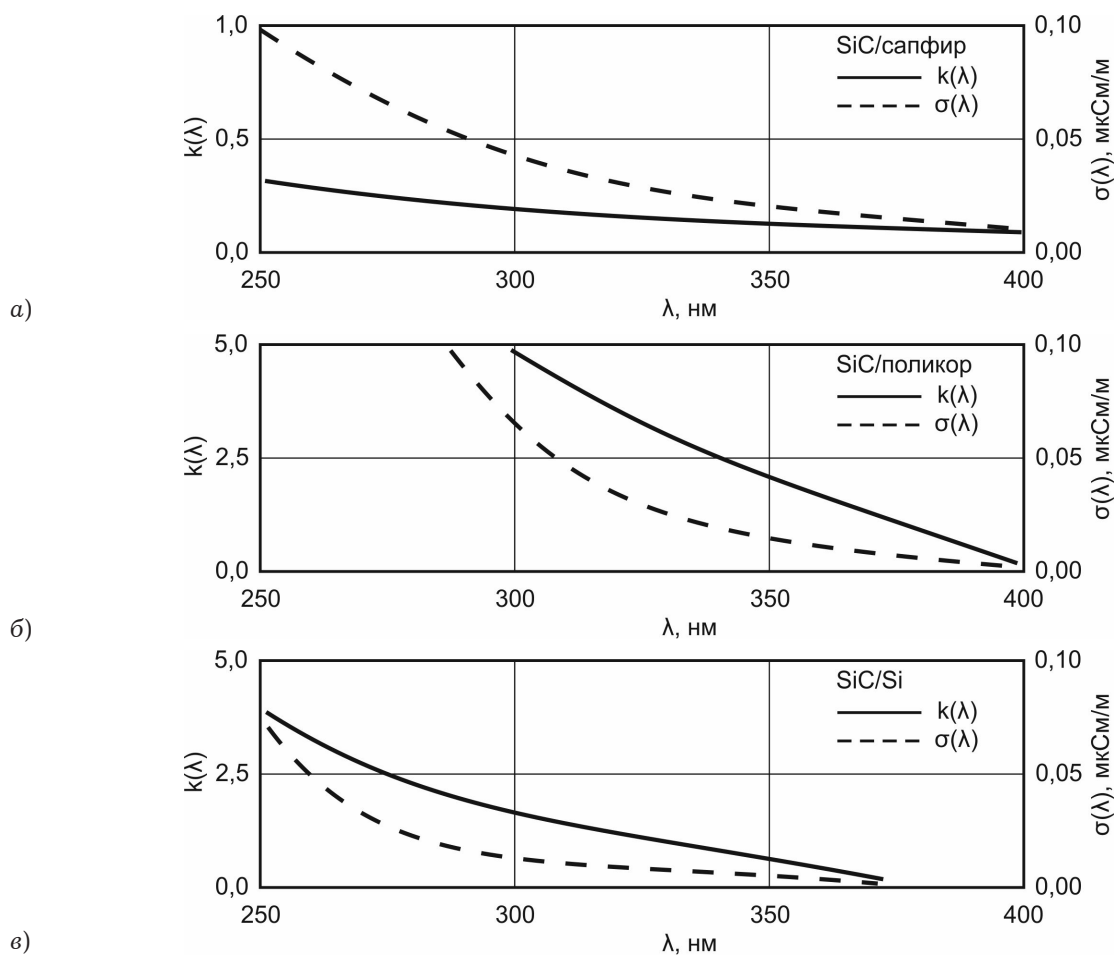


Рис. 9. Коэффициент экстинкции и удельная проводимость слоев карбида кремния: а) SiC/поликор; б) SiC/сапфир; в) SiC/Si

кратным отражением можно пренебречь для всех типов подложек. Это позволяет определить оптические константы пленки независимо от свойств подложки. В работе также было принято допущение, что показатель преломления карбида кремния слабо зависит от длины волны в исследуемом диапазоне, в результате чего его можно считать известным во всем исследуемом диапазоне длин волн (см. рис 8). На основании принятых допущений для всех исследуемых типов структур были вычислены коэффициенты экстинкции k карбида кремния из известного соотношения

$$R = \frac{(n_2 - 1) + k^2}{(n_2 + 1) + k^2}. \quad (8)$$

Проводимость пленок карбида кремния определяется по формуле

$$\sigma = 2n_2 k \varepsilon_0 \frac{c}{\lambda}. \quad (9)$$

Результаты расчетов коэффициента экстинкции и проводимости для всех типов исследуемых структур приведены на рис. 9.

Заключение

В данной работе для получения пленок SiC использовался метод ВЧ магнетронного распыления, который позволяет получать пленки карбида кремния на различных подложках независимо от их химического состава.

Проведены исследования структур методом растровой электронной микроскопии, сканирующей атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа, методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Исследована морфология поверхности слоев карбида кремния на кремниевой, поликорковой и сапфировой подложках, показано, что пленка повторяет структуру поверхности подложки.

Проведен качественный анализ фазового состава исследуемых структур. Установлено наличие фазы карбида кремния в исследуемых структурах.

Для каждой структуры были экспериментально определены спектральные коэффициенты отражения естественного света при нормальном падении в диапазоне от 250 до 1000 нм. На основе коэффициентов отражения были определены показатель преломления, коэффициент экстинкции и проводимость.

Список литературы

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7. С. 4.
2. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния – алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. 2010. № 1. С. 36–40.
3. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. 2004. № 8. С. 6.
4. Исследование толстых эпитаксиальных слоев 3C-SiC, полученных методом сублимации на подложках 6H-SiC / А.А. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 273–275.
5. Лебедев А., Сбруев С. SiC – электроника: прошлое, настоящее, будущее // Элементная база электроники: электроника: наука, технология, бизнес. 2006. Вып. 5. С. 28–41.
6. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А. Агеев [и др.]. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
7. Мокеров В.Г. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике. М.: Техносфера, 2010. 435 с.
8. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра / Т.В. Бланк [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025–1055.
9. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления / П.Г. Михайлов [и др.] // Известия Южного федерального университета. Серия «Технические науки». 2014. № 4(153). С. 204–213.
10. Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы, конструкции, технологии / П.Г. Михайлов [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.
11. Мокров Е.А., Баринов И.Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 1. С. 23–27.
12. Гуревич О.С., Буряченко А.Г., Ранченко Г.С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 10.
13. An overview of hightemperature electronics and sensor development at NASA Glenn research center / G.W. Hunter [et al.] // J. Turbomach. 2003. Vol. 125. № 4.
14. Katulka G.L. Micro-electromechanical systems and test results of SiC MEMS for high-g launch application // Proceedings of IEEE Sensors. 2002. Vol. 2.
15. Wright N. G., Horsfall A. B., Vassilevski K. Prospects for SiC electronics and sensors // Materials Today. 2008. V. 11. № 1–2.

16. SiC based pressure sensor for high-temperature environments / G. Wiczorek [et al.] // IEEE Sensors 2007 Conference. 2007.
17. Рост слитков карбида кремния политипа 4H на затравках сплоскостью (1010) / Д.Д. Авров [и др.] // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 12. С. 1483–1487.
18. Исследование толстых эпитаксиальных слоев 3C-SiC, полученных методом сублимации на подложках 6H-SiC / А.А. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 273–275.
19. Исследование начальных стадий роста нанокластеров карбида кремния на подложке кремния / Ю.В. Трушин [и др.] // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 48–54.
20. Ильин В.А., Матузов А.В., Петров А.С. Исследование процесса получения гетероэпитаксиальных структур 3C-карбида кремния на подложках кремния // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 4.
21. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е.В. Берлин [и др.]. М.: Техносфера, 2007. 176 с.
22. Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends / J. Musil [et al.] // Thin Solid Films. 2005. № 475. P. 208–218.
23. Kelly P.J. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. 2000. № 56. P. 159–172.

Electrophysical and optical properties of the silicon carbide device structures

D.Y. Golubeva, A.V. Shcherbak

The results of the research of silicon carbide thin films obtained by high-frequency magnetron sputtering on various types substrates are presented. The surface morphology of silicon carbide was studied by scanning electron microscopy. Surface roughness was measured using a profilometer. The phase composition and structural perfection of the films were determined by x-ray phase analysis and Raman scattering. The method of silicon carbide layers optical parameters calculation based on experimentally obtained spectra of natural light normal reflection from the structure and from the substrate is developed. The refractive index, extinction coefficient and specific conductivity of silicon carbide films are calculated depending on the wavelength of the incident light.

Keywords: device structure, electrophysical properties, optical properties, magnetron sputtering.

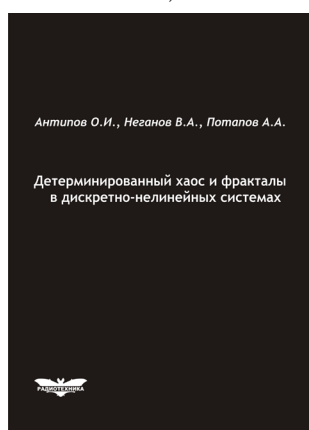
Антипов, О.И.

Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

ISBN 978-5-88070-237-4

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96



В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.