

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:

27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.

Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

**Сборник статей международной научно-практической конференции по
«Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные
источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года**

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАСHEB Механизмы формирования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.....	7
М.Х. АШУРОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, З.И. КАРИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, Ф.А. ИСКАНДАРОВА Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.....	10
М.Т. НОРМУРАДОВ, Е.Н. ВЛАСОВА, К.Т. ДОВРАНОВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов, созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом.....	15
Е.С. РЕМБЕЗА, Т.В. СВИСТОВА, Н.Н. КОШЕЛЕВА, М.Б. РАСУЛОВА Гетероструктуры металлооксид-кремний, как перспективные структуры для создания солнечных элементов.....	24
О.О. МАМАТКАРИМОВ, В.Х. QUHQAROV, М.А. ERGASHEV, А.А. XOLMIRZAYEV Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari.....	28
S.Z. ZAINABIDINOV, H.J. MANSUROV, N.YU. YUNUSALIEV Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures.....	34
Х.Б. АШУРОВ, А.А. ЗАРИПОВ, А.А. РАХИМОВ, У.Ф. БЕРИДЕВ, И.Ж. АБДИСАИДОВ, М.М. АДИЛОВ Методы синтеза никелевого нанокатализатора для получения углеродных нанотрубок.....	39
Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, М.М. ШОАБДУРАХИМОВА Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике.....	46
Ш.Б. УТАМУРАДОВА, Ж.Ж. ХАМДАМОВ, В.Ф. ГРЕМЕНOK, К.А. ИСМАЙЛОВ, Х.Ж. МАТЧОНОВ, Х.Ю. УТЕМУРАТОВА Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd.....	54
N.N. ABDURAZAKOV, R. ALIEV Power load forecasting using linear regression method of machine learning: Andijan regional case.....	58
И. Н. КАРИМОВ, М. ФОЗИЛЖОНОВ, А.Э. АБДИКАРИМОВ Вольт-фарадные характеристики SOI FINFET структуры.....	63
О.А. АБДУЛХАЕВ, А.З. РАХМАТОВ Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания.....	67
SH.X. YO'LCHIYEV, B.D. G'ULOMOV, J.A. O'RINBOYEV ZnO va ZnO:Al yuqqa plyonkalarini sintez qilish va ularni fizik xossalari o'rganish.....	75
Ш.Т. ХОЖИЕВ, С.Ф. КОВАЛЕНКО, С.Е. МАКСИМОВ, В.М. РОТШТЕЙН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, Ш.К. КУЧКАНОВ Кластеры Y_n^+ и $Y_nO_m^+$, распыленные ионной бомбардировкой: эксперимент и теоретические аспекты.....	79

M. RASULOVA	
Application of Solution of the Quantum Kinetic Equations for Renewable Energy problem.....	85
A.A.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ	
разработка высокоэффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
D.G' KHAJIBAEV, B.Ya. YAVIDOV	
On correlation of T_c and Cu-O _{apex} distance in single layered cuprates.....	97
A. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖОНОВ, Р.ЭРГАШЕВ	
Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями.....	102
М.К. КУРБАНОВ, К.У. ОТАБАЕВА, Д.У. ХУДОЙНАЗАРОВА	
Распыление пленок льда при бомбардировке ионами Ag+.....	107
H.O. QO'CHQAROV S.B. FAZLIDDINOV B.B.BURXONJANOV	
Simmetrik bo'lgan silikon diodning statik parametrlarini hisoblash p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlarning δ -qatlami o'tish.....	113
N.Yu. SHARIBAYEV, B.M. BAXROMOV R.M. JALALOV A.A. YUSUFJONOV	
Study of electrophysical properties of semiconductor materials based on lead-selenium.....	120
Ш.К.КУЧКАНОВ, Х.Б.АШУРОВ, Б.М.АБДУРАХМАНОВ, С.Е.МАКСИМОВ, О. Э. КИМИЗБАЕВА, Ш.А.МАХМУДОВ	
О роли структурных дефектов в процессах генерации при нагреве эдс и носителей заряда в эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структурах.....	125
S.Z. ZAYNABIDINOV, I.M. SOLIYEV, SH.K. AKBAROV	
Kremniy monokristallarida elektro noaktiv nikel va kislorod atomlarining o'zaro tasirlashuvi.	128
M.A.MUYDINOVA, G.J. MAMATOVA	
Yarimo'tkazgich plastinalar sirti va p-n strukturalarning optik xususiyatlari va ularni takomillashtirish usullari.....	132
L.O.OLIMOV, I.I. ANARBOYEV	
Kremniy granulari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi.....	136

Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом

М.Т. Нормурадов¹, Е.Н. Власова², К.Т. Довранов¹, Д.А. Нормуродов¹, Х.Т. Давранов¹

¹Каршинский государственный университет. Карши 180100. Узбекистан

²Институт высокомолекулярных соединений РАН (ИМС РАН) 199004, Санкт-Петербург.

Аннотация: В данной работе были исследованы диэлектрические пленки SiO_2 , сформированные различными методами. Впервые тонкие пленки оксида кремния были сформированы на подложке, нагретой в высоком вакууме с помощью усовершенствованного устройства магнетронного распыления. Спектры поглощения, пропускания и отражения полученных тонких пленок измерялись с помощью инфракрасных и ультрафиолетовых спектрометров, коэффициент поглощения, показатель преломления, связи и колебания атомов Si-O исследовались спектроскопически. Были измерены вторично-эмиссионные свойства чистого и ионизированного образцов Si, а также проведен элементный анализ образцов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Морфологию поверхности изучали с помощью микроскопа Quanta 200-3D (Scios FEI), оптические параметры измеряли с помощью спектрофотометра IRTracer-100 (Shimadze). Изучено изменение условий образования и выхода вторичных электронов из образцов оксида кремния, созданных низкоэнергетическими ионами O_2 в монокристаллах кремния (111). Тонкая структура энергетических зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии и их значений для диэлектрических пленок SiO_2 определяется предисторией образцов. Пленки SiO_2 , полученные ионно-плазменной обработкой ионами O_2 , обладают хорошей адгезией, сплошностью и гладкостью поверхности. Кристаллизация аморфной пленки является одной из причин увеличения глубины реальной зоны вторичной электронной эмиссии.

Ключевые слова: показатель преломления, магнетронное распыление, оксид кремния, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, коэффициент вторичной электронной эмиссии, упруго отраженные электроны..

Введение. Исследование физических процессов, происходящих при взаимодействии ионов и электронов с различными многокомпонентными материалами, представляет большой научный и практический интерес для решения ряда важнейших задач современной электроники. Воздействие ионных лучей приводит к разрушению структуры образцов, появлению радиационных дефектов, внедрению посторонних примесей, что приводит к изменению физико-химических, механических, оптических и эмиссионных свойств облученного ионами материала. Создание новых материалов с улучшенными физическими свойствами поверхностных слоев, в частности эффективных эмиттеров вторичных электронов на основе диэлектриков, является одной из актуальных задач микроэлектроники, поскольку они широко используются в электронно-лучевых запоминающих устройствах и оптических приборах, магнетронах и т. д. Одним из методов направленного изменения электрических и других свойств твердых тел является ионно-плазменный метод, имеющий ряд преимуществ перед другими методами легирования. С помощью ионов низкой энергии можно контролировать такие параметры, как атомный и молекулярный перенос кислорода на поверхность кремния, толщину легированного слоя, концентрацию вносимой смеси, в результате чего метод получил широкое распространение в полупроводниковой технике и микроэлектронике [1, 2].

Термическое окисление тонких пленок SiO_2 [3], термическое испарение [4], ионно-ассистированное осаждение [5], ионно-лучевое распыление [6], плазмохимическое осаждение из газовой фазы [7], золь-гель [8] можно получить методом импульсного лазерного осаждения [9] и магнетронного распыления [10]. Вследствие сильного неравновесного физико-химического процесса изменяются состав, плотность, аморфная, кристаллическая структура, показатель преломления и коэффициент поглощения тонких слоев SiO_2 .

Аморфные пористые диэлектрические пленки являются перспективным материалом для микро-, нано- и оптоэлектроники. Эти материалы используются в светодиодах, фотодетекторах, вакуумных микроэлектронных катодах, биологических имплантатах, газовых сенсорах и мембранах. На их основе можно изготавливать ненагреваемые электронные источники, элементы памяти. Одним из таких материалов является пористый диоксид кремния. Он имеет большие перспективы для создания датчиков влажности, газовых, химических и биологических датчиков, а также для других приложений. Получение и исследование аморфных пористых пленок является приоритетным направлением физической электроники.

Исследование диэлектрических пленок до и после ионного легирования представляет научный интерес, поскольку позволяет понять процессы, происходящие в диэлектриках при ионной бомбардировке, изменение условий образования и выхода вторичных электронов, а также объяснить природу высокой эффективности вторичной эмиссии сложных диэлектриков [11]. В данной работе были исследованы диэлектрические пленки SiO_2 , полученные различными методами окисления. Существует несколько способов получения диоксида кремния: в водяном паре, в сухом кислороде, во влажном кислороде, в водяном паре атмосферного давления, имплантацией низкоэнергетических ионов O^+_2 и ионно-плазменным методом с использованием системы магнетронного распыления. Эксперименты показали, что пленки SiO_2 , полученные в парах воды, менее совершенны, а пленки, полученные в атмосфере сухого кислорода, окисляются равномерно. Хорошая адгезия, отсутствие дефектов и гладкость поверхности характерны для пленок SiO_2 , полученных размещением ионов O_2 на кремнии. Кроме того, следует отметить, что ионно-плазменный метод имеет преимущества перед другими методами производства, так как позволяет получать пленки определенной толщины, от 8 нм до нескольких микрон, с высоким уровнем химической чистоты [12].

Экспериментальная методика. В камере магнетронного устройства EPOS-PVD-DESK-PRO с помощью молекулярного турбонасоса создавался высокий вакуум при давлении 10^{-6} Торр. Путем введения в камеру аргона создавалось давление, достаточное для создания ионно-плазменной, и этот процесс контролировался на мониторе CP-307 прибора «Магнетрон». Ток от источника питания магнетрона составлял 657 мА, мощность 221 Вт, напряжение 336 В. Воздух в камеру засасывался до давления 10^{-5} Торр с помощью турбонасоса. Первоначально были созданы тонкие пленки оксида кремния различной толщины при комнатной температуре, давлении $3 \cdot 10^{-4}$ мбар ионно-плазменным методом.

Элементный анализ полученных тонких пленок SiO_2 проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, морфологию поверхности изучали с помощью микроскопа Quanta 200-3D (Scios FEI).

Производство тонких пленок и их исследование. Пленки SiO_2 наносились на полированные подложки монокристаллического кремния. В ходе экспериментов подложки устанавливались на вращающемся карусельном держателе на расстоянии 150 мм от поверхности магнетронной мишени.

Формирование тонкой пленки SiO_2 на поверхности кремния осуществлялось в следующие этапы:

- поверхность подложки предварительно механически очистили 30%-ной разбавленной плавиковой кислотой;
- плазменный ток в вакууме создается источником ионов с холодным катодом напряжением 1,5-3,5 кВ и током до 100 мА в течение 4-6 минут. Чтобы улучшить ковалентную связь атомов Si-O, поверхность базового кремния повторно очищалась газами Ar^+ с использованием «ионной пушки»;
- на очищенную низкоэнергетическими ионами в различных дозах поверхность кремния распылялся O_2 через устройство магнетронного распыления;

- в модернизированном устройстве «Epos-PVD-Desk-Pro» для получения качественной пленки оксида кремния база одновременно нагревалась до температуры 400 К с помощью специального нагревателя.

Схема модернизированной экспериментальной установки для нанесения слоев оксида кремния твердофазным ионно-плазменным методом магнетронного распыления представлена на рис. 1. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли 6 мин (режим вращения подложкодержателя), 685 эВ и 326 мА соответственно.

СЭМ тонкой пленки оксида кремния (SiO_2), полученной низкоэнергетическим ионно-плазменным методом с использованием устройства магнетронного распыления, а также химический состав и энергодисперсионная рентгенограмма образца SiO_2 , полученного после выращивания окисных слоев толщиной 150-250 нм при высокой температуре в качестве подложки, приготовленной с использованием энергодисперсионного устройства. Анализы проводили на микроскопе Quanta 200-3D (Scios FEI) (рис. 2). Результаты (O-масс. % - 34,27, At% - 35,94), (Si-масс.% - 65,73, At% - 64,06) элементы определяли в долях.

Результаты и обсуждение. Исследовались пленки SiO_2 , полученные ионно-плазменным методом, сухим окислением и имплантацией ионов O_2^+ на кремний. Эксперименты проводились в высоковакуумной установке с системой магнетронного распыления и ионной пушкой с ускоряющим полем, позволяющей изучать состояние поверхности пленки с помощью атомно-силового микроскопа.

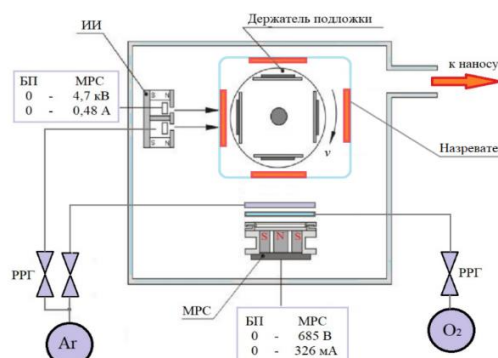


Рис.1. Схема экспериментальной установки для формирования слоев оксида кремния твердофазным ионно-плазменным методом с устройством магнетронного напыления: И - ионный источник для очистки, МРС - магнетронная распылительная система, РРГ - регулятор расхода газа

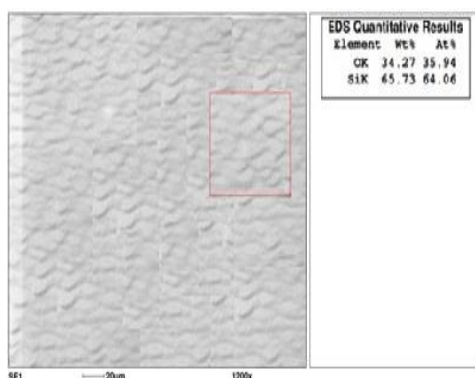
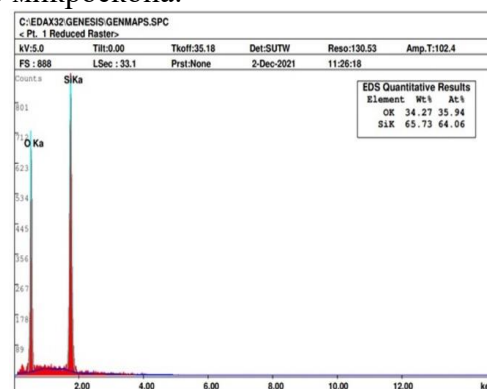


Рис. 2. SiO_2 химический состав и энергодисперсионный рентгеноструктурный анализ



Измерение вторично-эмиссионных свойств образцов чистого и ионного оксида кремния. Давление остаточных газов в аппарате не превышало 10^{-3} Па. Ионное осаждение на SiO_2 проводилось нами при заданной комнатной температуре.

На рис. 3 представлены энергетические зависимости коэффициента эмиссии вторичных электронов σ (E_p) и упруго отраженных электронов $R(E_p)$ для низкоэнергетической области первичных электронов E_R , полученных из образцов SiO_2 , полученных разными методами. Хотя численные значения для разных пленок различны, тонкая структура их кривых энергетической зависимости в малом диапазоне E_p практически одинакова.

Хорошо известно, что по сравнению с металлами и полупроводниками значения коэффициента ВЭЭ для диэлектриков обусловлены главным образом большой глубиной выхода истинных вторичных электронов (ИВЭ). Последний случай связан с достаточно большой шириной запрещенной зоны (ΔE_g) и низкой концентрацией свободных носителей тока в диэлектриках. Поэтому возбужденные электроны с энергией меньше ΔE_g теряют энергию лишь до возбуждения фононов. Поэтому в диэлектриках вторичные электроны могут пройти гораздо больший путь, чем в металлах и полупроводниках, пока их энергия не снизится до величины порядка сродства к электрону. Для определения максимальной глубины выделения ВВЭ из оксида кремния были изучены зависимости $\sigma(E_p)$ в широком диапазоне E_p при нанесении на кремниевую подложку пленок SiO_2 различной толщины (рис.4).

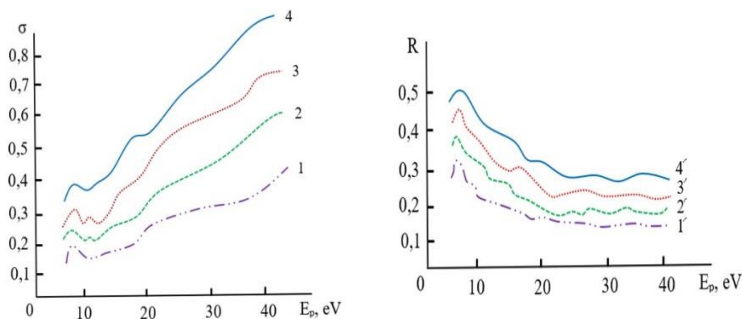


Рисунок 3. Зависимость σ (1-4) и R (1'-4') от E_p в области низких энергий для полученных пленок SiO_2 : -1,1' в парах воды; в сухом кислороде - 2,2'; Имплантацией ионов O_2^+ в кремний - 3,3' и нанесением ионов O_2^+ на поверхность кремния ионно-плазменным методом - 4,4'

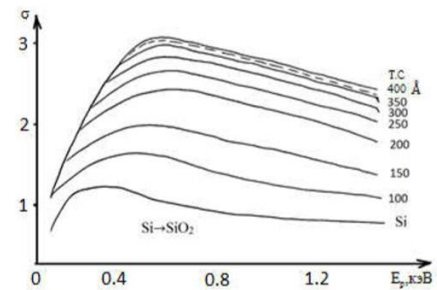


Рис.4. Зависимости $\sigma(E_p)$ для системы $\text{Si} - \text{SiO}_2$ при различной толщине пленки.

Толщину пленки определяли с точностью 10% по времени выдержки силикона в атмосфере кислорода. Видно, что с увеличением толщины пленки d значение коэффициента σ увеличивается и положение σ_m смещается в сторону большего E_p .

Такое поведение можно объяснить, если вспомнить, что σ достигает максимального значения, когда максимальная глубина возбуждения вторичных электронов равна их зоне выхода. По $d=350 \text{ \AA}$, исходя из практически отсутствия изменения положения, σ_m и формы кривых $\sigma(E_p)$, можно отметить, что глубина выхода для SiO_2 . Выход ИВЭ составляет около $\sim 350 \text{ \AA}$. Более наглядно эти данные представлены на рис. 5а, где показаны зависимости $\sigma(d)$ для различных энергий первичных электронов E_p .

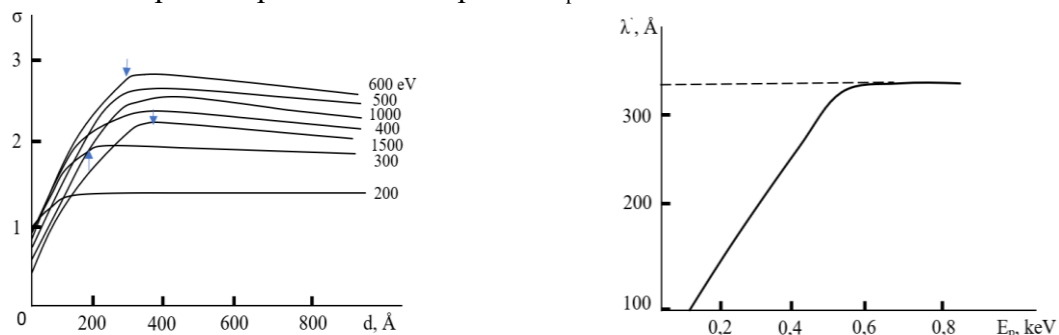


Рис.5. Зависимость σ от толщины d пленок, нанесенных на поверхность Si , для различных энергий первичных электронов

Видно, что при энергии $= 600 \text{ эВ}$ кривая $\sigma(d)$ выходит на плато при толщине пленки $d = 350 \text{ \AA}$. Для меньших энергий кривая $\sigma(d)$ начинает выходить на плато при малых толщинах, что объясняется меньшей глубиной проникновения первичных электронов при данных энергиях. Таким образом, из этих графиков можно получить важную информацию, такую как глубина проникновения первичных электронов разных энергий в диэлектрики, а также зависимость глубины зоны выхода ИВЭ от энергии первичных электронов.

Эта взаимосвязь показана на рисунке 5b. Видно, что величина глубины вывода ИВЭ сначала линейно возрастает с увеличением E_p , а при 600 эВ зависимость $\sigma(E_p)$ достигает максимума. Значение λ' на рисунке соответствует максимальному значению глубины зоны выхода ИВЭ для образцов чистого SiO_2 .

ИК-спектр и оптические параметры тонких пленок. Толщины слоев тонких пленок SiO_2 , выращенных на поверхности кремния, измерялись методами пропускания и методом НПВО однократного отражения (Ge-призма) при углах падения 45° и 90° . Толщина пленок SiO_2 составляет 250, 200 и 150 нм. На рисунке 6 показаны результаты измерений ATR. По мере того, как оксидный слой становится тоньше, пики около 1258 см^{-1} и 1164 см^{-1} смещаются в сторону больших (или меньшего волнового числа) длин волн.

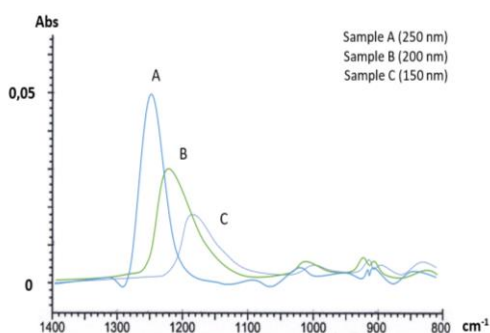


Рис.6. Результаты измерений НПВО пленки SiO_2

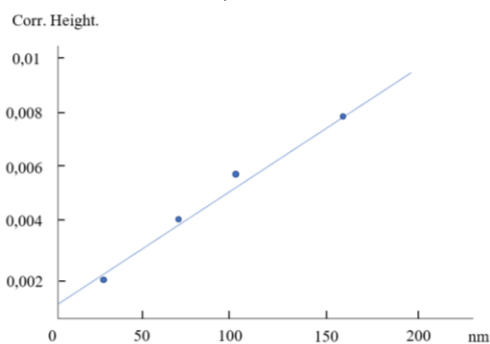


Рис.7. Фотометрические графические результаты пленок оксида кремния различной толщины

Структурные изменения в диэлектрических пленках оценивали методами FTIR-спектроскопии пропускания и многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) [13]. Использовался ИК-Фурье-спектрометр “IRTracer-100”. Для исследования структуры и состава пленок SiO_2 методом НПВО использовались образцы п-германия трапецеидальной формы с удельным сопротивлением $18 \text{ }\Omega \cdot \text{см}$, обладающие прозрачными в интересующем диапазоне длин волн.

Таблица 1. Результаты ИК-анализа пленок SiO_2 различной толщины

Колебательные моды химических связей	Образец А (d=150 нм) Поток O_2 , 3 sccm	Образец Б (d = 200 нм) Поток O_2 , 10 sccm	Образец С (d=250 нм) Поток O_2 , 14 sccm
Деформационные колебания от плоской деформации Si-O	Большие пики, наложенные на сильную полосу 445 см^{-1} .	Большие пики, наложенные на сильную полосу 445 см^{-1} .	Большие пики, наложенные на сильную полосу 445 см^{-1} .
Si-OH растяжение Валентные колебания	760 см^{-1} слабая полоса	760 см^{-1} прочная полоса	760 см^{-1} прочная полоса
Si-O Валентные колебания -Si растяжка	890 см^{-1}	895 см^{-1} с хорошо выраженным уступом	895 см^{-1} с хорошо выраженным уступом
деформация Si-OH; CH Деформационные колебания	Очень маленькие пики, расположенные при $1500\text{-}1700 \text{ см}^{-1}$.	маленькие пики, расположенные при $1500\text{-}1700 \text{ см}^{-1}$.	маленькие пики, расположенные при $1500\text{-}1700 \text{ см}^{-1}$.

Для анализа стекол SiO_2 состава в области $\sim 1565\div 1271 \text{ см}^{-1}$ в качестве образца МНПВО использовался также высокоомный кремний с удельным сопротивлением $15 \text{ к}\Omega \cdot \text{см}$. Толщины диэлектрических пленок измерялись эллипсометрическим методом. При анализе влияния высокотемпературных отжига на структуру образцов диэлектрик — полупроводник использовались растровая электронная и атомно-силовая микроскопия.

Высота пика нанесена по вертикальной оси, а толщина пленки — по горизонтальной оси, чтобы определить взаимосвязь между интенсивностью пика и толщиной пленки в спектрах пропускания под углом 45° . На рисунке 7 показаны результаты для низких длин

волн. Эти результаты показывают, что была достигнута хорошая корреляция между пиковой интенсивностью и толщиной пленки.

ИК-спектры пропускания и поглощения пленок, нанесенных в области, характерной для колебательных зон Si-O, показаны на рис. 8. Они очень похожи, поскольку имеют схожий химический состав и структуру. Общая более высокая интенсивность в ИК-спектрах образцов А (зеленый) и В (красный) обусловлена большей толщиной пленки. Отнесение полос ИК-колебаний в спектрах пленок, осажденных в различных условиях плазмы, приведено в табл. 1.

Как видно из рисунка 8, ИК-спектры показывают характерные колебательные полосы при 1080 , 800 и 445 см^{-1} , соответствующие растяжению, изгибу и вне плоскостной деформации связей Si-O соответственно. Он имеет коэффициент пропускания $35,21\%$ при волновом числе 893 см^{-1} основной линии колебаний Si-O и коэффициент пропускания 50% при 758 см^{-1} . В спектре поглощения $45,3\%$ света поглощается при длине волны $11197,7$ нм. Поглощение при $13192,6$ нм составило 30% , а хорошо выраженное плечо указывает на стехиометрическую структуру кремнезема. В то же время наблюдаются и полосы, связанные с примесью. Основные пики светопропускания составили $893,04$ см^{-1} . Поэтому можно подчеркнуть существование валентных колебаний Si и OH-групп на этих пиках.

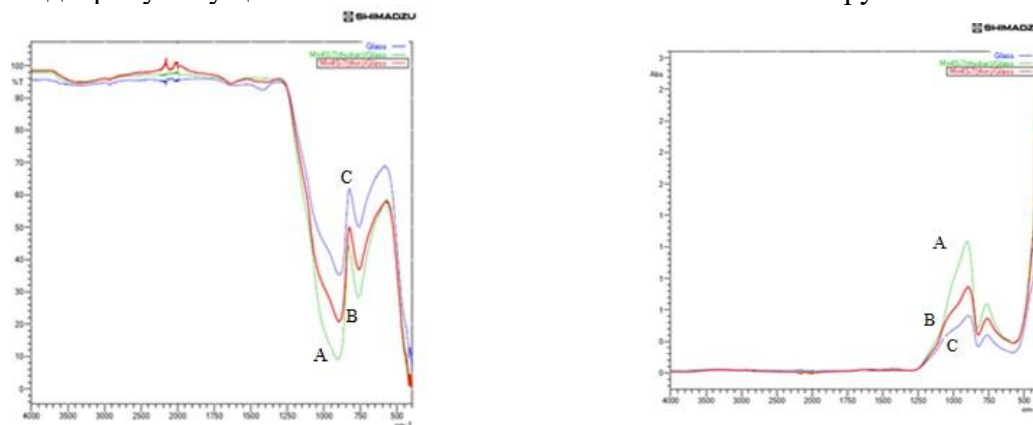


Рис. 8. Спектры пропускания и поглощения тонких пленок SiO_2 различной толщины, образованных низкоэнергетическими ионами O^+

При окислении кремния (естественным образом в воздушной атмосфере или под воздействием высокой температуры) на его поверхности образуются гидроксильные группы Si-OH, а в приповерхностном слое - SiO_x -группы. Наличие гидроксильных групп приводит к адсорбции атмосферной влаги и соответствующим изменениям спектров образцов. Спектры поглощения и пропускания пленок SiO_2 , полученных ионно-плазменным методом, получали на спектрофотометре IRTracer-100 методом Нарт-Ганзел. В диапазоне $400\div 4000$ см^{-1} , чтобы уменьшить влияние молекул водяного пара (H_2O) и углекислого газа (CO_2), было сделано несколько следующих поправок: сложение, сглаживание, коррекция нуля базовой линии, нормализация, фильтрация и ATR. коррекция [14].

На рис. 9 представлены спектры инфракрасного поглощения и пропускания пленки SiO_2 , сформированной на поверхности кремния. В спектре поглощения пик наблюдался в районе $769,60$ см^{-1} . Эти линии соответствуют антисимметричным валентным колебаниям групп Si-O-Si соответственно. Пик спектра пропускания в районе $644,22$ см^{-1} соответствует «отпечаточной» области спектра чистого кремния. Слои кремнезема имеют три полосы поглощения: низкочастотную полосу $418,55$ см^{-1} , слабую полосу $771,53$ см^{-1} и интенсивную широкополосную полосу с максимумом $644,22$ см^{-1} . Эти линии связаны с маятниковыми колебаниями, симметричным и антисимметричным растяжением групп Si-O-Si [15]. В зависимости от хрупкости последняя линия оксида может иметь полуширину от 95 см^{-1} до 140 см^{-1} для плотного оксида. Исследование оксидов кремния показало, что при осаждении

образуется SiO_x ($x=1\div 2$), а при отжиге с уменьшением x предел максимума нижних волновых чисел n -зоны ($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) смещается в область (915 см^{-1} при $x=1$, 980 см^{-1} при $x=2$). наоборот, увеличивается с 780 до 835 см^{-1} ; частота колебаний маятника увеличивается с увеличением x (Рис.8).

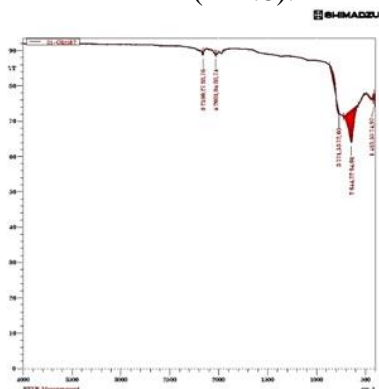


Рис.9. Сглаживающий анализ спектров пропускания и поглощения SiO_2/Si

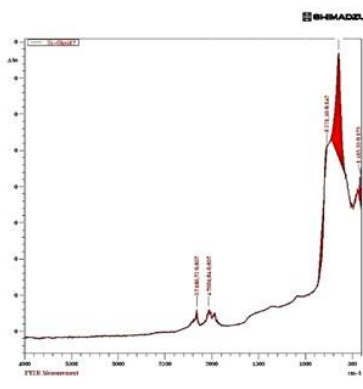


Рис.10. Спектр кремния Крамерса-Кронига SiO_2/Si , полученный с помощью измерительной ИК-Фурье-спектроскопии методом «двойного БПФ».

Глубина проникновения инфракрасного света зависит от образца и показателя преломления кристалла. Поскольку показатель преломления зависит от длины волны, спектры ATR имеют несколько разные соотношения интенсивностей по всему спектру и могут потребовать корректировки для сравнения со спектрами пропускания.

Таблица 2. Сравнительное сравнение оптических параметров пленок Si и SiO_2

Образец	Si(111)	$\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$	Литература, Si(111)
Диапазон (см-1)	503	465 - 1397	587,6 [19]
Показатель преломления	3,45323	1,494	3,9766 [19]
Угол падения	45	90	
Средние края вмешательства	24	122	
Толщина (мкм)	51,34	12,36	
Стандартное отклонение (мкм)	10,06	64,32	
Коэффициент поглощения	0,03241	0,00423	0,030209 [19]
Минимальный пик (%)	47.6527	64.007	23.47
Максимальный пик (%)	96.5350	92.099	64.35

Мы использовали следующее модифицированное выражение *Селлмейера Эдвардса и др.*, которое является наиболее подходящим дисперсионным уравнением для температуры окружающей среды [16].

$$n^2 = \varepsilon + \frac{A}{\lambda^2} + \frac{B\lambda_1^2}{(\lambda^2 - \lambda_1^2)}$$

здесь $\lambda_1 = 1,1071\text{ мкм}$, $\varepsilon = 1,16858 \cdot 10^1$, $A = 9,39816 \cdot 10^{-1}$ и $B = 8,1046 \cdot 10^{-3}$. Полученные результаты дали $\lambda = 1,99807\text{ микрон}$ для кремния и $\lambda = 1,0111223\text{ микрон}$ для оксида кремния.

Зная угол падения и показатель преломления в функции «рассчитать плотность пленки» в блоке обработки данных спектрофотометра IRTracer-100, можно измерить толщину пленки, среднее количество интерференционных полей и стандартное отклонение. Ниже в табл. 2 приведены измеренные параметры пленок различной толщины, полученных в магнетронном устройстве.

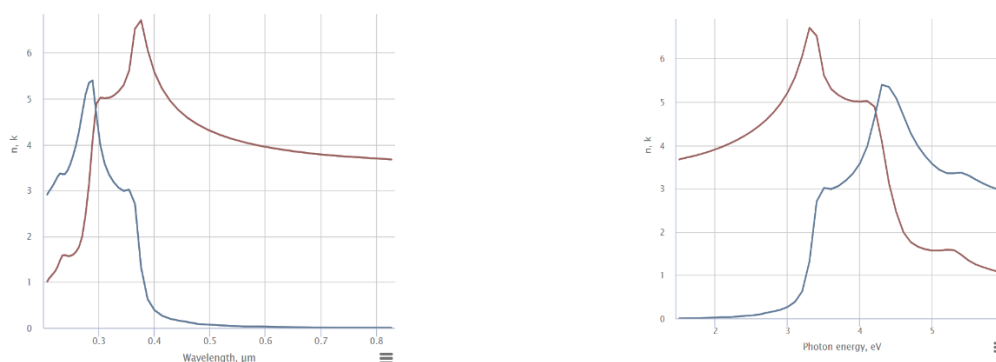


Рис. 11. Показатель преломления и коэффициент поглощения образца Si [17,18]

Данные в цитируемых источниках, следующие [17]: длина волны 0,5876 мкм, показатель преломления: $n=3,9766$, коэффициент поглощения $k=0,030209$, комплексный показатель преломления ($n+ik$).

На рис. 12 представлена спектральная зависимость показателя преломления образцов А, Б и С, а также показателя преломления стехиометрического термически выращенного SiO_2 . По эллипсометрическим данным анализировали физический состав пленок. Результаты показали несколько более низкий стехиометрический состав $\text{SiO}_{1,985}$ для образца А и $\text{SiO}_{1,938}$ для образца С. Однако увеличение скорости потока кислорода до 12 см^3 приводит к образованию пустот с объемной долей $\sim 1,5\%$. Этот результат объясняет наблюдаемые меньшие значения показателя преломления при уменьшении толщины пленки.

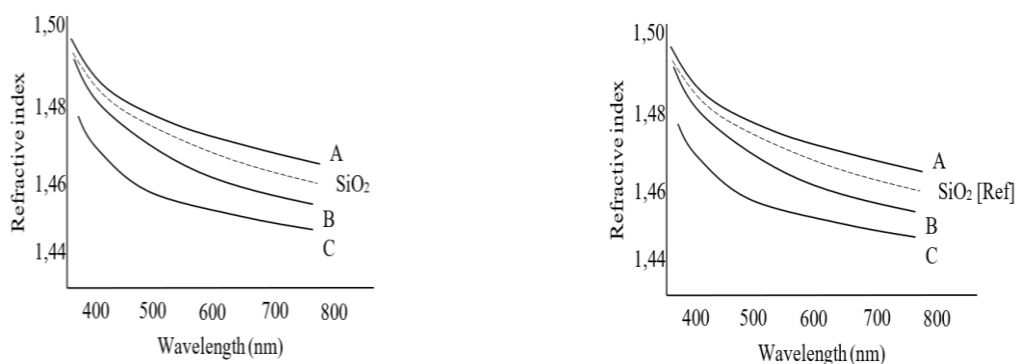


Рис.12. Дисперсия показателя преломления пленок оксида кремния, осажденных различной толщины

Как видно из рис.12, с длиной волны изменяются как показатель преломления, так и коэффициент экстинкции пленки SiO_2 , что указывает на то, что пленка SiO_2 имеет определенную дисперсию. Показатель преломления и коэффициент экстинкции нанесенных тонких пленок SiO_2 при длине волны 250 нм составляют 1,494 и 0,00423 соответственно.

Заключение. В данной работе представлена технология получения диэлектрических пленок SiO_2 , полученных с помощью устройства магнетронного напыления, термического оксидирования в атмосфере сухого кислорода и имплантации. Пленка оксида кремния, полученная методом магнетронного распыления изучена, методами спектроскопии упруго рассеянных электронов, электронной оже-спектроскопии, измерения вторично-эмиссионных свойств чистых и ионизированных образцов Si, а также элементного анализа образца методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, морфологию поверхности изучали с помощью микроскопа Quanta 200 (Scios FEI), оптические параметры измеряли с помощью спектрофотометра IRTracer-100 (Shimadze).

Полученные результаты подтверждают качественный и количественный анализ формирования тонких пленок оксида кремния, выращенных с помощью ионов низкой энергии ионно-плазменным методом, границы раздела $\text{SiO}_2\text{--Si}$, а также колебательными методами химической связи, абсорбции и спектры пропускания нанопленок. Толщина и

показатель преломления тонкой пленки были измерены аналитическими и экспериментальными методами. Показатель преломления $n=3,45323$ для кремния и $n=1,494$ для оксида кремния. Измерены «средние границы шума» для оксида кремния и чистого кремния. Измерена глубина проникновения инфракрасного света в кристалл. Результаты показывают, что нанесенные тонкие пленки SiO_2 могут быть использованы в оптических пленках с низким показателем преломления.

Литература

1. A.L. Stepanov, A.A. Trifonov, Y.N. Osin, V.F. Nuzhdin. Optoelektr. Adv. Mat-Rapid. Comm. 2003. Vol. 7, no.9-10, pp. 692-697.
2. Умирзаков Б.Е., Нормурадов М.Т., Ташмухамедова Д.А., Ташатов А.К. Нанозпитаксиальные пленки и геттероструктуры на основе кремния. Ташкент, MERIEUS, 2012, 184 p. (in Russian).
3. И.А. Романов, Н.С. Ковальчук, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, Д.В. Шестовский, С.А. Демидович. Электролюминесценция пленок SiO_2 на Si, полученных термическим окислением и плазмохимическим осаждением. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2021; № 3: с.26–31.
4. Ching-Fa Yeh, Tai-Ju Chen, and Ching-Lin Fan. Investigation of silicon oxide prepared by room-temperature ion plating. J. Appl. Phys., Vol. 83, No. 2, 15 January 1998. pp. 1107-1113.
5. Б.И.Селезнев, Д.Г.Федоров. ИК-спектроскопия пленок диоксида кремния, полученных низкотемпературными методами. Вестник Новгородского Государственного Университета. №5(103), 2017. с. 114-118.
6. Huasong Liu, Lishuan Wang, Yugang Jiang, Shida Li, Dandan Liu, Yiqin Ji, Feng Zhang, Deying Chen. Study on SiO_2 thin pylonka modified by post hot isostatic pressing. Vacuum №148 (2018), pp. 258-264.
7. Jinshan Lua, Haibin Yang, Bingbing Liu, Jie Han, Guangtian Zou. Preparation and physical properties of nanosized semiconducting CrSi_2 powders. Materials Chemistry and Physics. Volume 59, Issue 2, 25 May 1999, Pages 101-106.
8. А.Н. Мурашкевич, А.С. Лавицкая, Т.И. Баранникова, И.М. Жарский. Инфракрасные спектры поглощения и структура композитов $\text{TiO}_2\text{—SiO}_2$. Т. 75, № 5 Журнал прикладной спектроскопии. (2008), С.724-728.
9. Б.Е. Умирзаков, И.Р. Бекпулатов, Б.Д. Игамов, И.Х. Турапов, А.З.Фаттахов. Получение пленок $\text{CoSi}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ методом лазерного напыления и их электрофизические свойства. Uzbek Journal of Physics. Vol. 24, No. 2, pp. 150-155, 2022.
10. I.R. Bekpulatov, G.T. Imanova, T.S. Kamilov, B.D. Igamov, I. Kh. Turapov. Formation of n-type CoSi monosilicide film which can be used in instrumentation. International Journal of Modern Physics B. 2350164 (10 pages), (2022). DOI: 10.1142/S0217979223501643
11. М.Т. Нормурадов, Д.А. Нормуродов, К.Т. Давронов, Н.М. Мустафаева. Creation of new materials based on dielectric films using low-energy ion implantation. Euroasian Journal of Semiconductors. Science and Engineering: Vol.1: Iss. 6, Article 8. (2019) pp.12-15.
12. F. Boschetto, N. Toyama, S. Horiguchi, M.R. Bock, J.B. McEntire, T. Adachi, E. Marin, W. Zhu, B.O. Mazda. S. Balde, G. Pezzotti. II.Fourier transform infrared spectroscopy. Analyst. 2018, **143**, pp. 2128-2140. <https://doi.org/10.1039/C8AN00234G>
13. Milekhin A.G., Himcinschi C., Friedrich M., Hiller K., Wiemer M., Gessner T., Schulze S., Zahn D.R.T. Infrakrasnaia spektroskopiiia kremnievykh srashchennykh plastin [Infrared spectroscopy of bonded silicon wafers]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors, 2006, vol. 40, no. 11, pp. 1304-1313
14. Б.И.Селезнев, Д.Г.Федоров. ИК-спектроскопия пленок диоксида кремния, полученных низкотемпературными методами. Вестник новгородского государственного университета. №5(103), (2017) С.114-118.
15. М.Т. Нормурадов, К.Т. Довранов, Х.Т. Давранов, М. Давлатов. Спектр инфракрасного излучения пленок SiO_2 и Mn_4Si_7 . «Перспективы развития физики конденсированного состояния» Материалы Международной научной и научнотехнической конференции. Карши. – 2022. 113-115 с.
16. С.С. Некрашевич, В.А. Гриценко. Электронная структура оксида кремния. Физика твердого тела, 2014, том 56, вып. 2. С. 209-223.
17. Queeney K.T., Weldon M.K., Chang J.P., Chabal Y.J., Gurevich A.B., Sapjeta J., and Opila R.L. Journal of Applied Physics 87, (2000); pp.1322-1330.
18. F. Hamelmann, U. Heinzmann, A. Szekeres, N. Kirov, T. Nikolova. Deposition of silicon oxide thin films in teos with addition of oxygen to the plasma ambient: ir spectra analysis. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 7, No. 1, February 2005, p. 389 – 392.