

На правах рукописи



УСОЛЬЦЕВА ДАРЬЯ СЕРГЕЕВНА

**ЭЛЕКТРОННАЯ, АТОМНАЯ СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК Al-Si**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж - 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Терехов Владимир Андреевич**

Официальные оппоненты: **Виноградов Александр Степанович** - доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра электроники твердого тела, профессор

Котов Геннадий Иванович - доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится 14 июня 2018 года в 16:40 на заседании диссертационного совета Д 212.038.06 при Воронежском государственном университете по адресу: г. Воронеж, Университетская пл., 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте ВУЗа по адресу: <http://www.science.vsu.ru/disserinfo&cand=3091>

Автореферат разослан 25 апреля 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Дрождин Сергей Николаевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сплавы и соединения алюминия с другими элементами периодической системы характеризуются легкостью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью, технологичностью и относительно низкой ценой. Поэтому они широко применяются в авиа- и автомобилестроении, электротехнической промышленности. Тонкие пленки на основе алюминия активно используются в производстве электронной компонентной базы. В последние годы пленки алюминия, легированные кремнием, часто применяются в производстве дискретных приборов интегральных схем для металлизации.

При этом существующие технологии магнетронного напыления композитных пленок Al-Si позволили сформировать с помощью последующего анодирования нанокompозитные пленки с наноструктурированным пористым кремнием, встроенным в алюмооксидную матрицу, и реализовать достаточно эффективную фотолюминесценцию в видимой области. Технология получения данной структуры хорошо совместима с технологией изготовления интегральных схем (ИС), что открывает возможности для разработки ИС, основанных на передаче информации внутри чипа с помощью света, и многократного увеличения быстродействия.

Однако то, что представляет собой нанокompозитная структура на различных этапах формирования пленок, в настоящий момент представляется довольно упрощенно. Не учитывается даже тот, факт что магнетронное напыление характеризуется большой энергией падающих на подложку частиц (~7эВ) - почти на 2 порядка выше тепловой энергии при плавлении - что может привести к формированию как стабильных, так и метастабильных фаз.

Поэтому в диссертации были исследованы вопросы фазообразования в тонких композитных пленках Al-Si в зависимости от состава распыляемой мишени, способа распыления (магнетронный либо близкий к нему ионно-лучевой), последующего отжига и селективного химического травления. В процессе получения нанокompозитных структур могли формироваться как кристаллические, так и аморфные фазы, поэтому для выяснения фазового состава исследуемых пленок были привлечены как стандартные методы рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии, так и нестандартный метод фазового анализа с помощью ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии. Кроме того, для анализа особенностей трансформации морфологии поверхности пленок при различных фазовых превращениях была использована растровая электронная микроскопия.

Цель и задачи диссертации

Основной целью диссертации является установление закономерностей фазообразования в композитных пленках Al_xSi_{1-x} ($x=0.55; 0.70; 0.73; 0.75$) в

зависимости от способа нанесения (магнетронное или ионно-лучевое напыление), последующего импульсного фотонного отжига и селективного химического травления.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Определение фазового состава композитных пленок Al-Si различного состава, полученных магнетронным и ионно-лучевым напылением.
2. Исследование особенностей электронного строения композитных пленок Al-Si до и после удаления алюминия.
3. Анализ влияния импульсного фотонного отжига на фазовый состав ионно-лучевых пленок состава $Al_{0.75}Si_{0.25}$.

Научная новизна

Большинство экспериментальных результатов, представленных в данной диссертации, было получено впервые. Наиболее важные следующие из них:

1. Использование магнетронного и особенно ионно-лучевого способа нанесения пленок Al-Si приводит к образованию ранее неизвестной метастабильной фазы Al_3Si .
2. Кратковременный фотонный (~ 1 с) отжиг приводит к распаду метастабильной фазы Al_3Si на элементарные фазы Al и Si.
3. Селективное химическое вытравливание алюминия из композитной магнетронной пленки приводит к формированию в магнетронной пленке пористой структуры, состоящей из нанокристаллов кремния с размерами порядка 20-30 нм, поверхностный слой которых (~ 5 нм) аморфизирован.
4. В нанокристаллах кремния, находящихся в матрице алюминия, ввиду их изолированности друг от друга ход плотности состояний у дна валентной зоны не соответствует параболическому приближению объемного кремния.

Научная и практическая значимость

Научная и практическая значимость полученных результатов определяется прежде всего тем, что установлено влияние технологических факторов на фазовый состав композитных пленок Al_xSi_{1-x} ($x=0.55; 0.70; 0.73; 0.75$).

Показано, что образование фазы Al_3Si в ионно-лучевых и магнетронных пленках может существенно влиять на скорость селективного травления алюминия и качество сформированного рисунка при гравировке с использованием фотолитографии.

Научные положения, выносимые на защиту

1. При ионно-лучевом напылении композита Al_xSi_{1-x} ($x=0.55; 0.70; 0.73; 0.75$) формируется пленка на основе метастабильной фазы Al_3Si , которая представляет собой упорядоченный твердый раствор кубической сингонии $R\bar{3}m$ с параметром примитивной ячейки $a=4.085\text{\AA}$.

2. Взаимодействие атомов алюминия и кремния в композитной пленке приводит к уменьшению плотности Al 3s-состояний в центре валентной зоны и на уровне Ферми.

3. При образовании в матрице алюминия нанокристаллов кремния с размерами 20-25 нм энергетическое распределение плотности валентных состояний отличается от массивного кремния по всей валентной зоне. В то же время селективное вытравливание алюминия и образование связей между нанокристаллами кремния приводит к восстановлению хода плотности состояний аналогично объемному кристаллическому кремнию.

4. Кратковременный фотонный отжиг приводит к распаду метастабильной фазы Al_3Si и образованию фаз алюминия и нанокристаллического кремния.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается комплексным использованием современных методов исследования фазового состава, в том числе рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии и уникальной методики определения фазового состава по тонкой структуре ультрамягких рентгеновских эмиссионных спектров (УМРЭС). Для обработки экспериментальных результатов применялась современная компьютерная техника и программное обеспечение.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XXII Всероссийская конференция «Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь» (Владивосток, 2016), IV Международная научная конференция «Нано-2014» (Минск, 2014), V Всероссийская конференция по наноматериалам «Нано-2013» (Звенигород, 2013), IX Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, 2014), XXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2014), Двадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-20» (Ижевск, 2014), 21 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2014» (Москва, 2014), XV Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XII века» (Воронеж, 2014), XVII Международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Махачкала, 2014), Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 2014), XVI Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (Воронеж, 2015).

Личный вклад автора

Определение направления исследования и постановка задач выполнены д.ф.-м.н., профессором Тереховым В.А.

Экспериментальные ультрамягкие рентгеновские эмиссионные $SiL_{2,3}$ - и $AlL_{2,3}$ -спектры исследованных образцов получены лично соискателем. Спектры ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения XANES получены д.ф.-м.н. Турищевым С.Ю. Результаты рентгеновской дифракции получены доцентом, к.ф.-м.н. Заниным И.Е. Результаты РЭМ

получены к.т.н., инженером ЦКПНО при ФГБОУ ВО "ВГУ" Агаповым Б.В. при непосредственном участии соискателя. Результаты ПЭМ получены доцентом, к.ф.-м.н. Синельниковым А.А. - также совместно с соискателем.

Обработка и анализ полученных данных полностью проводилась лично соискателем.

Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем - д.ф.-м.н., профессором Тереховым В.А.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 148 страниц, включая 73 рисунка, 26 таблиц, список литературы, который содержит 104 наименования, включая публикации по теме диссертации.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность работы, формулируются цели и задачи диссертации, научная и практическая значимость, научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и состоит из разделов, в которых рассматриваются особенности фазообразования как в объемных, так и в пленочных композитах Al-Si. Имеются данные о том, что при воздействии мощным электронным пучком возможно образование метастабильных интерметаллических фаз Al_xSi_{1-x} .

Во второй главе описаны техника и методика проведения эксперимента, а также методика получения образцов.

Одна группа образцов была изготовлена в Белорусском государственном университете радиотехники и электроники и представляет собой пленки композитов $Al_{0.73}Si_{0.23}$, $Al_{0.70}Si_{0.30}$ и $Al_{0.55}Si_{0.45}$ толщиной 0.5 мкм, нанесенные методом магнетронного распыления составной мишени из кремния и алюминия на монокристаллические кремниевые подложки Si(100) и Si(111) в атмосфере аргона.

Вторая группа образцов была изготовлена в Воронежском государственном техническом университете и является композитными пленками составов $Al_{0.75}Si_{0.25}$ и $Al_{0.55}Si_{0.45}$ толщиной 0.5 мкм, нанесенными методом ионно-лучевого напыления в атмосфере аргона на подложку из монокристаллического кремния Si(100).

Импульсный фотонный отжиг проводился на модернизированной установке УОЛП – 1М (Установка отжига лучевого, первая модификация) в вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Рентгенофазовый анализ и оценка средних размеров кремниевых нанокристаллов проводились с применением данных рентгеновской дифракции, которые были получены на аппарате PANanalytical Empyrean с монокроматическим $CuK_{\alpha 1}$ - излучением ($\lambda=0.154056 \text{ \AA}$) при непрерывно вращающемся образце.

Морфология поверхностных слоев пленок и элементный состав исследовались с использованием сканирующего электронного микроскопа

(СЭМ) JEOL JSM-6380LV ЦКП НО ВГУ. Данные просвечивающей электронной микроскопии получены на микроскопе Libra 120 ЦКП НО ВГУ.

Анализ плотности электронных состояний валентной зоны композитов Al_xSi_{1-x} проводился с применением методики УМРЭС. Ультратонкие рентгеновские эмиссионные $SiL_{2,3}$ - и $AlL_{2,3}$ -спектры были получены на рентгеновском спектрометре-монохроматоре РСМ-500, который характеризуется высоким разрешением по энергии - порядка 0.2 эВ. Использовалось ускоряющее напряжение 3кВ на рентгеновской трубке, которое соответствует глубине анализа 60 нм. Вакуум в рабочей камере во время съемки составлял 10^{-6} мм. рт. ст.

Анализ электронных состояний зоны проводимости проводился с использованием XANES (X-ray absorption near edge structure) $SiL_{2,3}$ -спектров, которые были получены на синхротроне SRC (Университет Висконсин-Мэдисон, Стоутон, США) с энергетическим разрешением порядка 0.1 эВ. Вакуум в рабочей камере - 10^{-10} торр, энергия пучка в кольце - 800 МэВ, ток - 160-260 мА. Глубина анализа в случае XANES $SiL_{2,3}$ -спектров составляет 5 нм, диапазон энергий фотонов в спектре на использованном канале - от 50 до 800 эВ.

В третьей главе анализируются результаты исследования морфологии, фазового состава и особенностей электронного строения магнетронных пленок составов $Al_{0.55}Si_{0.45}$, $Al_{0.70}Si_{0.30}$ и $Al_{0.73}Si_{0.27}$. На рисунке 1 представлена морфология поверхностного слоя магнетронной пленки $Al_{0.70}Si_{0.30}$ до и после вытравливания алюминия, а также дифрактограммы этой пленки. Как видно из рисунка 1а, в исходной пленке с неоднородностями по размеру в пределах 100 нм наблюдаются более светлые (то есть кремниевые) включения с размером 20-50 нм. После удаления алюминия (рисунок 1б) наблюдается губчатая кремниевая структура с размерами перемычек около 30 нм.

Рентгеновская дифракция обнаруживает в исходной пленке (рисунок 1с) рефлексы $Al(111)$, $Al(200)$, $Si(220)$, $Si(311)$. Очень интенсивный рефлекс $Si(111)$ и очень слабый $Si(222)$ представляют собой отражения в двух порядках от монокристаллической подложки (111). Кроме того, на дифрактограмме отмечаются два дополнительных рефлекса в области малых углов. После вытравливания алюминия остаются только рефлексы кремния и лишние рефлексы в области малых углов.

При этом энергетический спектр валентных электронов кремния и алюминия приобретает некоторые особенности. В исходных пленках, то есть когда нанокристаллы кремния находятся в матрице композита, энергетическое распределение $Si3s$ -состояний заметно отличается от распределения в объемном кремнии (рисунок 2а) прежде всего отсутствием в $SiL_{2,3}$ -спектре низкоэнергетического хвоста у дна валентной зоны. То есть, если в объемном кремнии при $E < 88$ эВ наблюдается плавный спад интенсивности спектра до ~ 80 эВ, то в спектре композита в этой области интенсивность спадает линейно.

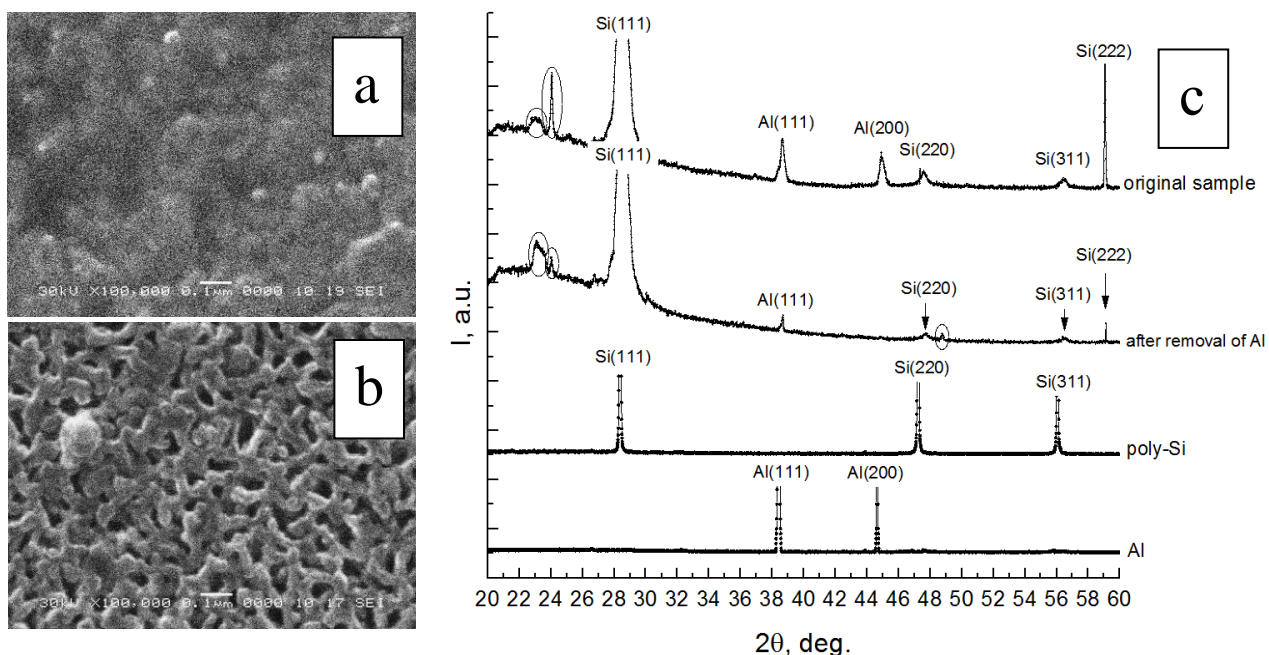


Рисунок 1 - (а) РЭМ магнетронной пленки $Al_{0.70}Si_{0.30}$ до вытравливания алюминия, (б) то же - после вытравливания алюминия, (с) дифрактограммы магнетронной пленки $Al_{0.70}Si_{0.30}$ до и после селективного химического вытравливания алюминия. Внизу для сравнения приведены дифрактограммы эталонных металлического алюминия и поликристаллического кремния.

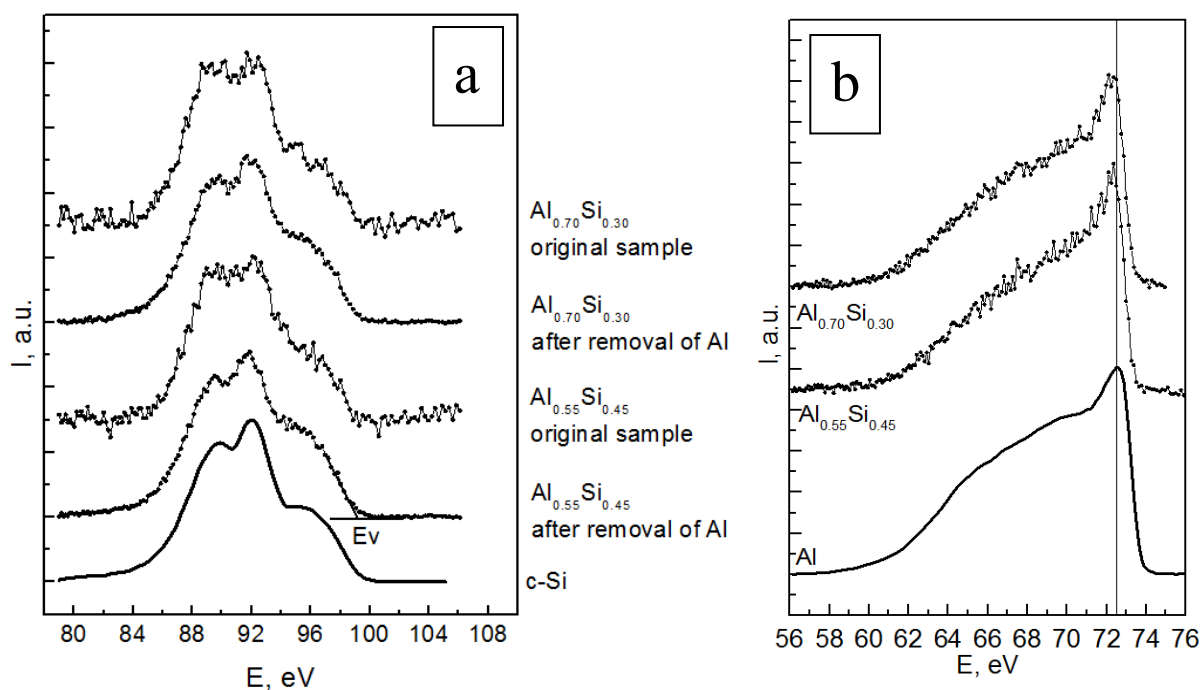


Рисунок 2 - (а) Рентгеновские эмиссионные $SiL_{2,3}$ -спектры магнетронных композитных плёнок до и после вытравливания алюминия (показаны точками), в сравнении со спектром кристаллического кремния (показан сплошной линией). (б) Рентгеновские эмиссионные $AlL_{2,3}$ -спектры этих же образцов до вытравливания алюминия (показаны точками), в сравнении со спектром чистого алюминия (показан сплошной линией).

По данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) дно валентной зоны кремния находится при энергии около 87.0 эВ (12.5 эВ в шкале энергий связи). Так как образование длинноволновых хвостов у рентгеновских эмиссионных полос обусловлено Оже-расширением уровней у дна валентной зоны, то отсутствие "хвоста" можно объяснить локализацией глубоких валентных состояний кремния в наночастицах, изолированных друг от друга алюминиевой матрицей. После вытравливания алюминия SiL_{2,3}-спектр становится как в объемном кремнии.

Детальный анализ AlL_{2,3}-спектров этих же композитов (рисунок 2b) показывает, что плотность Al3s-состояний вблизи уровня Ферми ($E \approx 72.5$ эВ) уменьшается по сравнению с чистым алюминием в результате перераспределения электронов на атомы кремния.

В четвертой главе проводится исследование фазового состава и электронного строения композитных пленок Al_{0.55}Si_{0.45} и Al_{0.75}Si_{0.25}, полученных ионно-лучевым напылением.

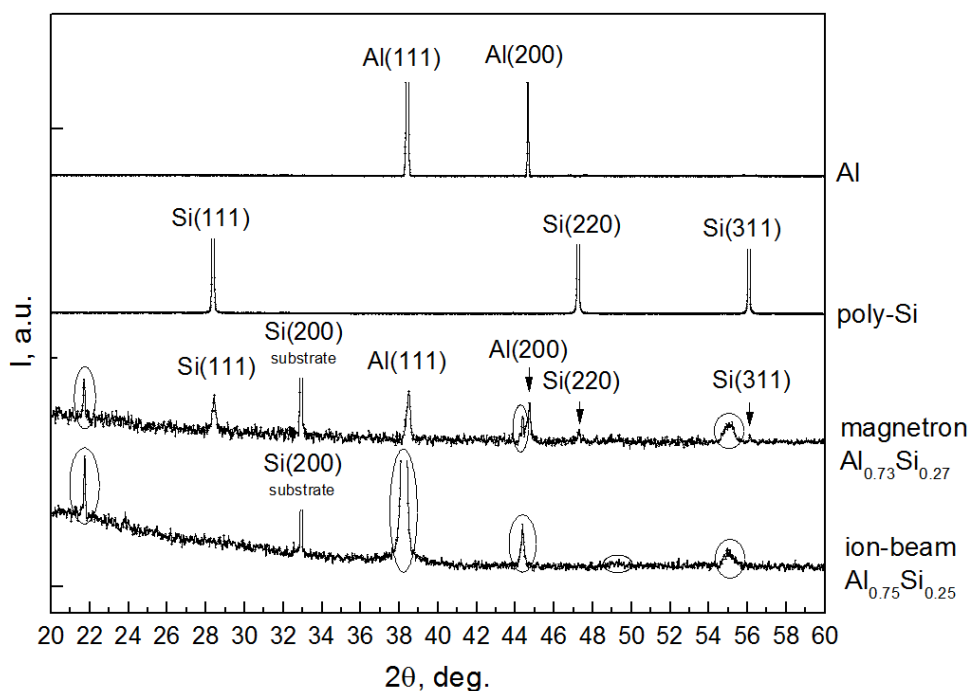


Рисунок 3 - Дифрактограммы магнетронного и ионно-лучевого образцов (до проведения ИФО) в сравнении с дифрактограммами поликристаллического кремния и металлического алюминия.

При проведении рентгендифракционных исследований было обнаружено отличие ионно-лучевых пленок от магнетронных (рисунок 3). В случае магнетронной пленки Al_{0.73}Si_{0.27}, как мы отмечали в главе 3, наблюдаются рефлексы кремния, алюминия и некоторой дополнительной фазы. А для ионно-лучевой пленки Al_{0.75}Si_{0.25} на дифрактограмме присутствуют рефлексы неизвестной фазы, но нет рефлексов кремния и алюминия, кроме сильно сдвинутого рефлекса Al(111) (рефлекс Si(200) соответствует монокристаллической кремниевой подложке). Это может

означать, что почти весь распыленный материал вошел в состав неизвестной кристаллической фазы, в то время как другие фазы могут находиться в аморфном состоянии.

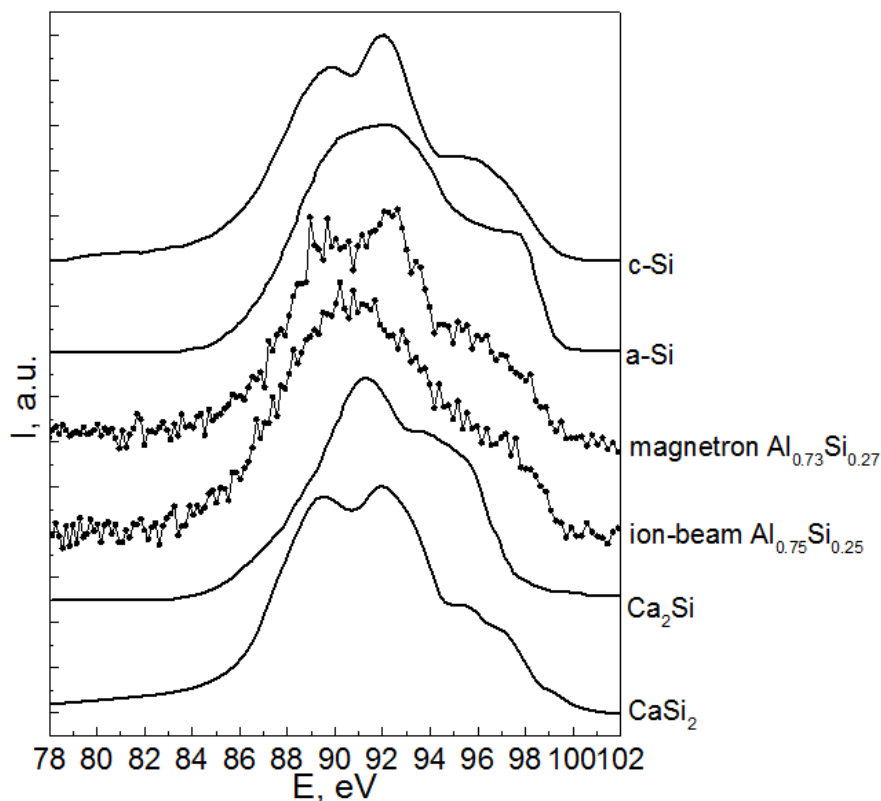


Рисунок 4 - Рентгеновские эмиссионные SiL_{2,3}-спектры эталонных образцов: кристаллического и аморфного кремния, силицидов кремния CaSi₂ и Ca₂Si, а также образцов Al_{0.73}Si_{0.27} и Al_{0.75}Si_{0.25}, полученных методами магнетронного и ионно-лучевого напыления соответственно.

Поэтому были проведены исследования с применением рентгеновской спектроскопии, которые подтвердили существенное различие магнетронных и ионно-лучевых пленок (рисунок 4). Результаты показали, что УМРЭС SiL_{2,3}-спектр исходной ионно-лучевой пленки характеризуется одним максимумом плотности состояний при ~ 91 эВ, что характерно также для низших силицидов металлов. Так как в исходной ионно-лучевой пленке согласно рентгендифракционным данным наблюдаются только рефлекс неизвестной фазы, то наблюдаемый SiL_{2,3}-спектр можно отнести к фазе Al₃Si.

На основании характерного для изучаемой фазы набора межплоскостных расстояний (таблица 1), особенностей тонкой структуры SiL_{2,3}-спектров и соотношения концентраций Al и Si нами была предложена интерпретация этой фазы как упорядоченного твердого раствора Al₃Si с примитивным типом ячейки кубической сингонии типа Pm3m. Структуру данного соединения можно представить в виде четырех примитивных подрешеток, одна из которых образована атомами кремния, а три других - атомами алюминия.

Таблица 1 - Теоретически рассчитанные значения межплоскостных расстояний d упорядоченного твердого раствора с примитивной кубической ячейкой и параметром решетки 4.085 \AA в сравнении с экспериментальными значениями межплоскостных расстояний для исходной ионно-лучевой пленки пленки $\text{Al}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$.

hkl	Теоретически рассчитанные значения $d(\text{hkl})$, \AA	Экспериментальные значения	
		d , \AA	2θ , град.
100	4.085	4.085	21.74
110	2.885	-	-
111	2.356	2.352	38.24
200	2.040	2.040	44.37
210	1.825	1.847	49.29
211	1.666	1.668	55.02

Хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными значениями подтверждает правильность выбранной модели обнаруженной нами фазы.

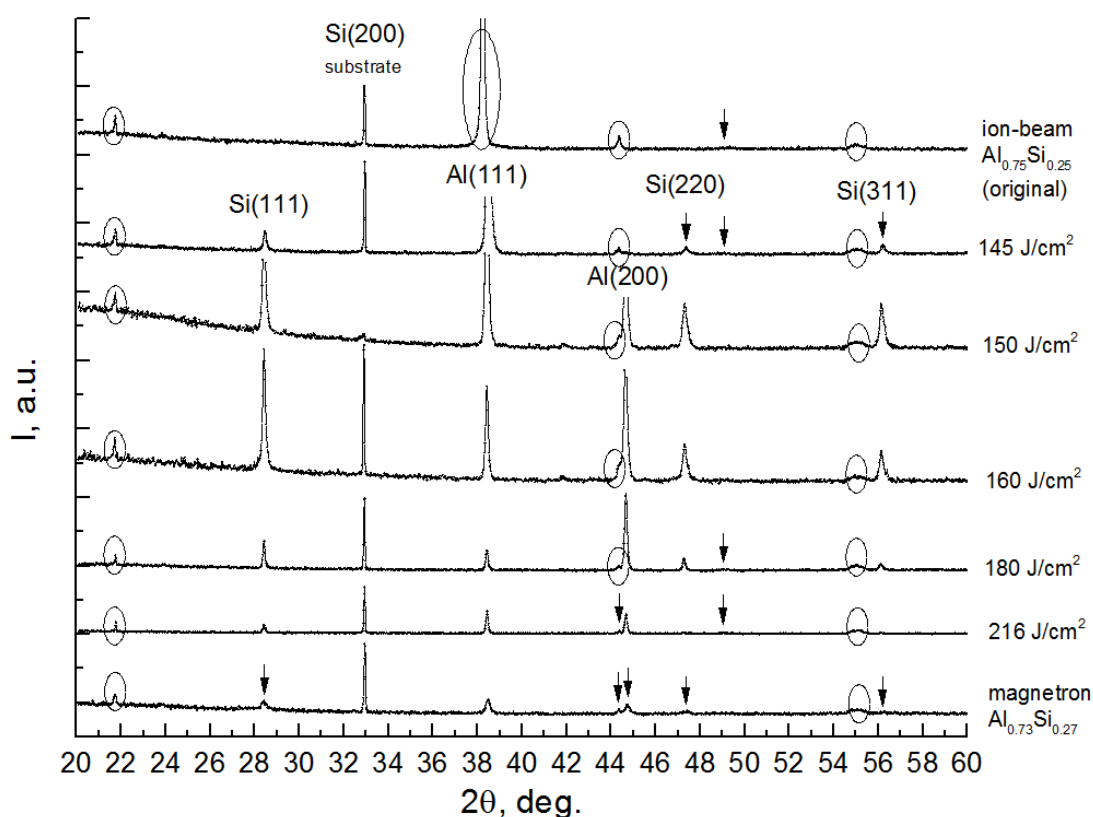


Рисунок 5 - Данные рентгеновской дифракции пленок $\text{Al}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$, полученных методом ионно-лучевого напыления, до и после ИФО различными дозами, и пленки $\text{Al}_{0.73}\text{Si}_{0.27}$, полученной методом магнетронного напыления. Кружками показаны рефлексы фазы Al_3Si .

Для того, чтобы проверить стабильность дополнительной кристаллической фазы Al_3Si , нами было принято решение провести импульсный фотонный отжиг ионно-лучевых пленок в различных режимах (дозами 145, 150, 160, 180 и 216 $\text{Дж}/\text{см}^2$).

Как видно из рисунка 5, после отжига на дифрактограмме появляются рефлексы кристаллического кремния и алюминия. С ростом дозы облучения до $160\text{Дж}/\text{см}^2$ интенсивность рефлексов Si и Al растет. Это свидетельствует о частичном распаде фазы с образованием кристаллического кремния и алюминия. При увеличении дозы ИФО до 180-216 $\text{Дж}/\text{см}^2$ интенсивность рефлексов кремния вновь падает. Данный эффект может свидетельствовать о том, что при быстром расплавлении пленки под мощным потоком ИФО и последующем охлаждении не происходит полной кристаллизации кремния и часть его может переходить в аморфное состояние. Об образовании аморфного кремния свидетельствует и сглаживание плотности состояний в области главных максимумов $\text{SiL}_{2,3}$ -спектров (рисунк 6).

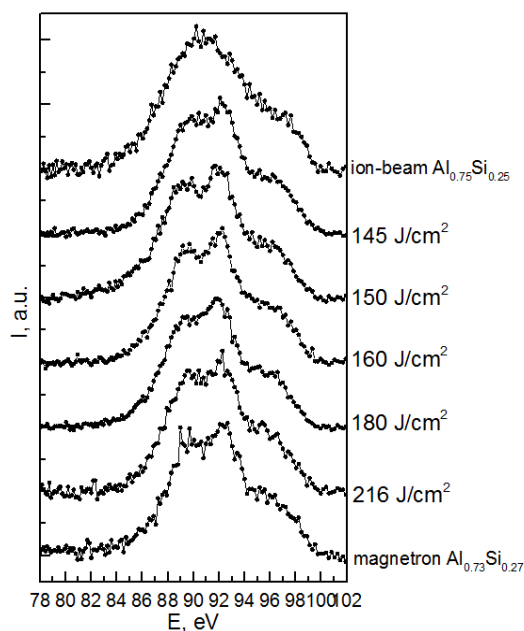


Рисунок 6 – Ультрамягкие рентгеновские эмиссионные $\text{Si L}_{2,3}$ -спектры магнетронного и ионно-лучевого (до и после ИФО различными дозами) образцов.

Выводы:

Таким образом, в результате проведения комплексных исследований фазового и элементного состава, а также особенностей электронно-энергетического строения композитных пленок $\text{Al}_x\text{Si}_{1-x}$, полученных магнетронным и ионно-лучевым методом, было установлено:

1. Комплексные исследования композитных пленок Al-Si показали, что их фазовый состав и электронно-энергетическое строение зависит от способа получения и режима последующей термической обработки.

2. При ионно-лучевом напылении композитных пленок состава $\text{Al}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$ и $\text{Al}_{0.55}\text{Si}_{0.45}$ формируется метастабильная фаза упорядоченного твердого раствора Al_3Si .

3. Импульсный фотонный отжиг ионно-лучевых пленок приводит к распаду метастабильной фазы с образованием фазы чистого алюминия и нанокристаллического кремния. При этом нанокристаллы кремния образуют два массива: один со средним размером кристаллитов кремния ~100 нм и нормальным параметром решетки, и второй - со средним размером кристаллитов ~30-40 нм и уменьшенным параметром решетки.

4. При магнетронном напылении композитных пленок $Al_{0.55}Si_{0.45}$, $Al_{0.70}Si_{0.30}$ и $Al_{0.73}Si_{0.27}$ основными фазами, входящими в состав пленки, являются поликристаллический алюминий и нанокристаллический кремний. Кроме того, в композитах всех составов присутствует фаза Al_3Si .

5. При образовании метастабильной фазы энергетическое распределение Si3s-состояний становится подобным их распределению в низших силицидах металлов с формулой Me_3Si .

6. Образование фазы упорядоченного твердого раствора Al_3Si сопровождается уменьшением плотности Al3s-состояний на уровне Ферми и в центре валентной зоны по сравнению с металлическим алюминием.

Основные публикации по теме диссертации

1. Терехов, В.А. Особенности электронной и атомной структуры нанокристаллов кремния в матрице алюминия / В.А. Терехов, С.К. Лазарук, А.А. Лешок, П.С. Кацуба, И.Е. Занин, Д.Е. Спирин, А.А. Степанова, С.Ю. Турищев // Физика твердого тела. - 2014. - Т. 56, вып. 12. - С. 2452- 2456.

2. Терехов, В.А. Особенности фазообразования и электронного строения в пленочных композитах $Al_{1-x}Si_x$ при магнетронном и ионно-лучевом напылении / В.А. Терехов, Д.С. Усольцева, О.В. Сербин, И.Е. Занин, Т.В. Куликова, Д.Н. Нестеров, К.А. Барков, А.В. Ситников, С.К. Лазарук, Э.П. Домашевская // Физика твердого тела. - 2018. - Т. 60, вып. 5. - С. 1004-1010.

3. Терехов, В.А. О возможности формирования метастабильной фазы Al_3Si в композитных пленках Al-Si, полученных ионно-лучевым и магнетронным напылением / В.А. Терехов, Д.С. Усольцева, О.В. Сербин, И.Е. Занин, Т.В. Куликова, Д.Н. Нестеров, К.А. Барков, А.В. Ситников, С.К. Лазарук, Э.П. Домашевская // Конденсированные среды и межфазные границы. - 2018. - Т. 20, № 1. - С. 135–147.

4. Терехов, В.А. Строение и электронная структура нанокомпозитов алюминий-кремний, полученных методом магнетронного распыления мишени / В.А. Терехов, С.К. Лазарук, Д.С. Усольцева, А.А. Лешок, П.С. Кацуба, И.Е. Занин, Д.Е. Спирин, А.А. Степанова, С.Ю. Турищев // Материалы IV Международной научной конференции «Нано-2014». - 2014. - С. 227-228.

5. Терехов, В.А. Рентгеноспектральные и рентгенодифракционные исследования особенностей электронного строения и фазового состава пленочных композитов Al-Si / В.А. Терехов, Д.С. Усольцева, И.Е. Занин, С.К. Лазарук, А.В. Ситников // Материалы XXII Всероссийской конференции «Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь». - 2016. - С. 105.

6. Terekhov, V.A. Electronic and atomic structure of silicon nanocrystals in aluminum matrix and without it / V.A. Terekhov, D.S. Usoltseva, I.E. Zanin, B.L.

Agapov, P.S. Katsuba // Physics, chemistry and application of nanostructures: Proceedings of International Conference Nanomeeting. - 2015. - P. 124-127.

7. Терехов, В.А. Электронно-энергетический спектр и атомная структура в нанокompозитных пленках алюминий / В.А. Терехов, С.К. Лазарук, С.Ю. Турищев, А.А. Лешок, П.С. Кацуба, Д.С. Усольцева, И.Е. Занин, А.В. Анисимов, А.А. Степанова // Материалы IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». - 2014. - С. 101-102.

8. Усольцева, Д.С. Изучение электронной структуры нанокompозитов Al-Si методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии / Д.С. Усольцева, Е.В. Парина // Материалы XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». - 2014. - С. 281-282.

9. Усольцева, Д.С. Изучение особенностей электронного строения нанокompозитов алюминий-кремний методом USXES / Д.С. Усольцева, Е.В. Парина // Материалы Двадцатой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-20». - 2014. - С. 191-192.

10. Усольцева, Д.С. Особенности электронного строения нанокompозитов Al-Si / Д.С. Усольцева // Материалы 21 Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2014». - 2014. - С. 53.

11. Терехов, В.А. Особенности электронной и атомной структуры нанокристаллов кремния в матрице алюминия / В.А. Терехов, С.К. Лазарук, С.Ю. Турищев, Д.С. Усольцева, И.Е. Занин, А.В. Анисимов, А.А. Степанова // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XII века». - 2014. - С. 422-427.

12. Усольцева, Д.С. Изучение электронной структуры нанокompозитов Al-Si, полученных методом магнетронного распыления мишени / Д.С. Усольцева // Материалы XVII Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». - 2014. - С. 113-114.

13. Усольцева, Д.С.. Комплексное изучение структуры нанокompозитов Al-Si, полученных методом магнетронного распыления мишени / Д.С. Усольцева // Материалы Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». - 2014. - С. 151-155.

14. Терехов, В.А. Изучение фазового состава плёнок нанокompозитов алюминий-кремний методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии / В.А. Терехов, С.К. Лазарук, И.Е. Занин, Д.С. Усольцева, Н.А. Степанова, А.В. Анисимов // Материалы V-ой Всероссийской конференции по наноматериалам «Нано-2013». - 2013. - С. 393-394.

Работы [1-3] опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертации.