

УДК 539.213.27

## СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ А-SI ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

С.В. Паров, А.М. Маленова, В.П. Макаров

Приведены результаты исследования влияния термического воздействия на поверхностную структуру пленок аморфного кремния.

*Ключевые слова:* аморфный кремний; напыление; нагрев; анализ.

## STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHANGES IN THE SURFACE OF THIN-FILM ELEMENTS OF A-SI BY THERMAL EXPOSURE

S.V. Parov, A.M. Malenova, V.P. Makarov

It presents the results of investigation of thermal effects on the surface structure of amorphous silicon films.

*Key words:* amorphous silicon; spraying; heating; analysis.

Для получения пленок аморфного кремния ( $\alpha$ -Si) был разработан новый тип магнетрона. Для получения однородной структуры пленок магнетрон был помещен в высокочастотное магнитное поле, которое позволило существенно увеличить скорость напыления пленок без осаждения крупных частиц [1].

Пленки  $\alpha$ -Si получали методом магнетронного распыления и СВЧ в тлеющем разряде (рисунок 1). Во избежание загрязнения подложки все работы проводили в условиях высокого вакуума в среде рабочего инертного газа аргона. Для получения сконцентрированного пучка ионов была разрабо-

тана специальная фокусирующая система, позволяющая формировать равномерный пучок ионов, направленный на подложку.

Цель данной работы – выявление влияния тепловой обработки на морфологические и структурные изменения в пленках аморфного кремния в зависимости от величины теплового воздействия.

Была отработана технология получения пленок с заданными параметрами, а именно – однородной структурой  $\alpha$ -Si, толщиной в пределах 1 мкм. Фотография характерной поверхности аморфной пленки представлена на рисунке 2.

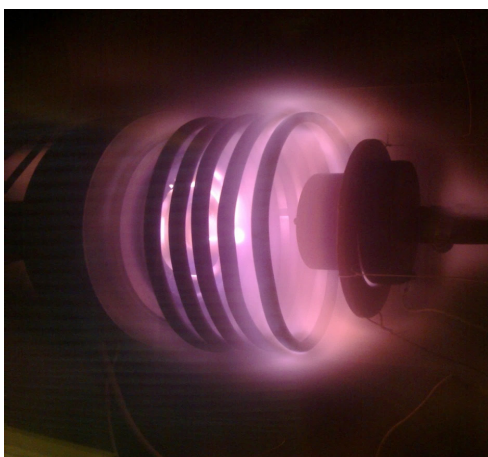


Рисунок 1 – Процесс магнетронного напыления

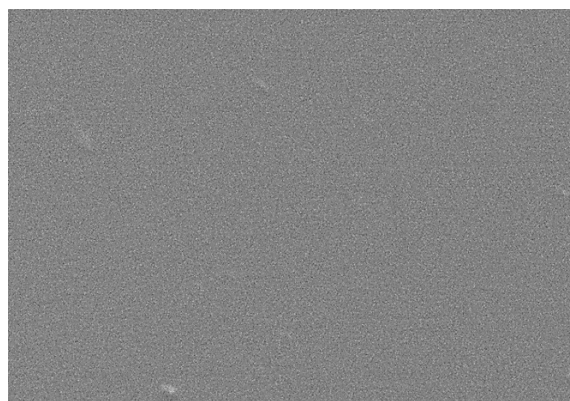


Рисунок 2 – Фото поверхности пленки аморфного кремния, полученной магнетронным распылением. x 500 (РЭМ)

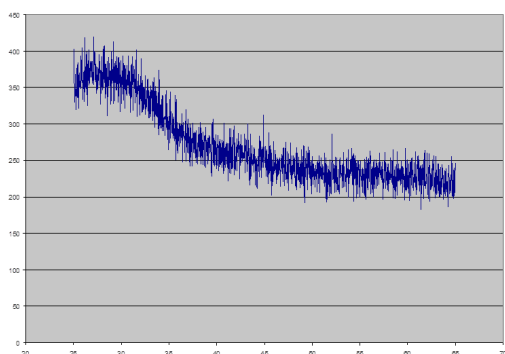


Рисунок 3 – Дифрактограмма с пленки кремния до термического воздействия лазерным пучком указывает на аморфность полученной пленки

Для определения структуры напыляемых пленок проводили качественный анализ фазового состава пленки на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2. Толщину напыляемого слоя определяли непосредственно в процессе напыления. Окончательный контроль толщины пленок и морфологии поверхности проводили на сканирующем электронном микроскопе BS-301.

Рентгеноструктурный анализ показал, что получаемые пленки кремния имеют аморфную структуру (рисунок 3). При проведении лазерной (термической) обработки происходит процесс кристаллизации поверхности (рисунок 4).

При напылении под воздействием высокочастотного электромагнитного поля появилась возможность получать пленки непроводящих материалов из-за отсутствия эффекта накопления заряда на поверхности мишени. Большинство ионов немобильны в условиях высокочастотного напыления (530 МГц), в отличие от электронов, которые чувствительны к колебаниям прикладываемого потенциала. Если электрод подсоединяется

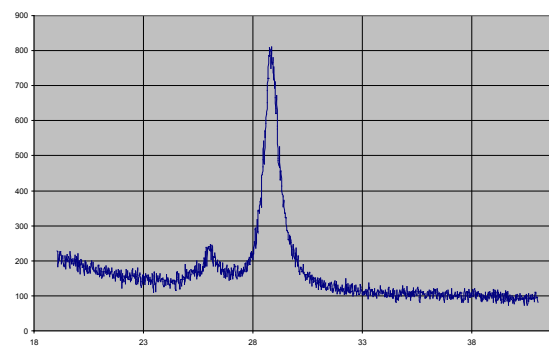


Рисунок 4 – Дифрактограмма с пленки кремния после теплового воздействия. Появился пик монокристаллического кремния

к радиочастотному генератору, на нем появляется отрицательное напряжение вследствие различия в подвижности между электронами и ионами. Напыление может производиться при достаточно низких давлениях (5–15 торр), в отличие от известного планарного магнетронного напыления из-за более высокой частоты колебаний электронов и их большей энергии, следовательно, большее количество соударений может приводить к ионизации.

Для исследования влияния теплового воздействия на структурные и морфологические изменения в пленках аморфного кремния ( $\alpha$ -Si), полученные магнетронным напылением, пленки нагревали в печи на воздухе и в инертной среде до 750 °С с интервалами в 50°. После каждого интервала проводили исследование морфологии поверхности на оптическом (Микро 201Т-01) и сканирующем электронном (BS-301) микроскопах, а структурные изменения исследовали на рентгеновском дифрактометре.

Исследования показали, что структурные и морфологические изменения начинаются при температурах нагрева выше 550 °С. Качество и ко-

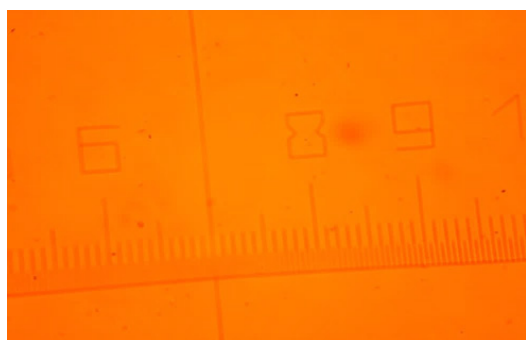


Рисунок 5 – Исходная поверхность пленки аморфного кремния. (Оптический микроскоп увеличение x400)

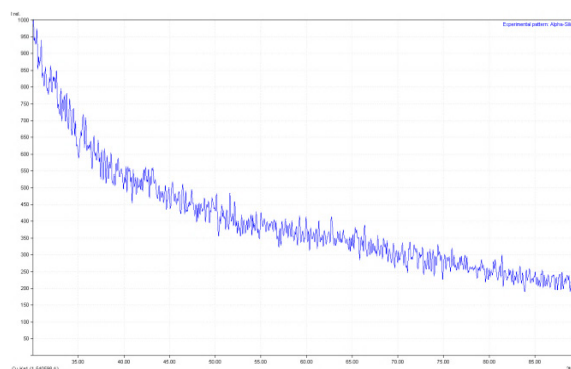


Рисунок 6 – Рентгенограмма пленки кремния без тепловой обработки

личество изменений зависит от времени нагрева при определенной температуре, времени выдержки при данной температуре и толщине исследуемой пленки. На рисунке 5 приведено фото поверхности пленки аморфного кремния, не подвергнутой тепловому воздействию.

На рентгенограмме этой пленки (рисунок 6) видно, что кремний находится в аморфном состоянии.

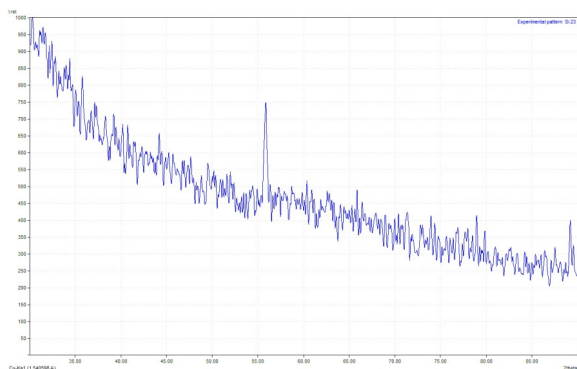


Рисунок 7 – Рентгенограмма с пленки аморфного кремния, нагретого до 550. Наблюдается начало появления кристаллической фазы

Нагрев свыше 550 °С приводит к морфологическим и структурным изменениям в пленках аморфного кремния. При нагреве 550 °С (с температурной выдержкой 60 мин) начинается рост кристаллической фазы на поверхности кремния, что проявляется на рентгенограмме в виде пиков кристаллического кремния (рисунок 7), а на поверхности появляются кристаллические элементы (рисунок 8), которые растут с увеличением температуры нагрева до 600 °С (с температурной выдержкой 30 мин), как показывает дифрактограмма (рисунок 9). При нагреве до температуры 650–725 °С происходит образование волнообразной структуры поверхности кремния. Рентгеноструктурный анализ указывает на то, что при этом происходит фазовый переход (рисунок 10). Появление волнообразных структур можно объяснить следующим образом. Расстояние между атомами кремния в аморфном состоянии составляют 0.1–0.3 нм, а в кристаллическом состоянии атомы находятся на расстоянии 0.357 нм, то есть при переходе из аморфного состояния в кристаллическое, расстояние между атомами кремния увеличивается почти в три раза, что приводит к волнообразности самой пленки.

Таким образом, отработана технология магнетронного напыления пленок аморфного кремния толщиной до 5 мкм. Конструкция разработанного магнитного поля позволяет получать однородные пленки любой толщины.

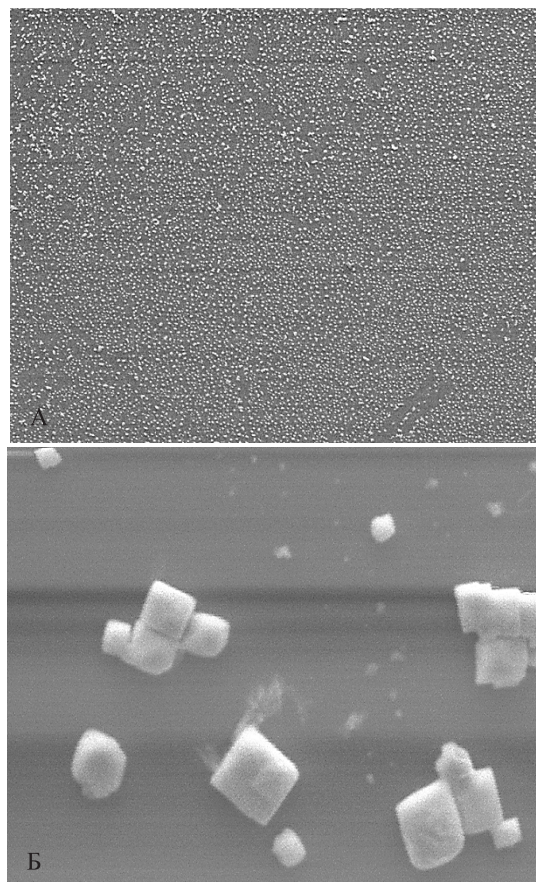


Рисунок 8 – Образование кристаллических частиц на поверхности кремния, нагретого до 550 (с температурной выдержкой 60 мин) (РЭМ: А – X47 и Б – X2000)

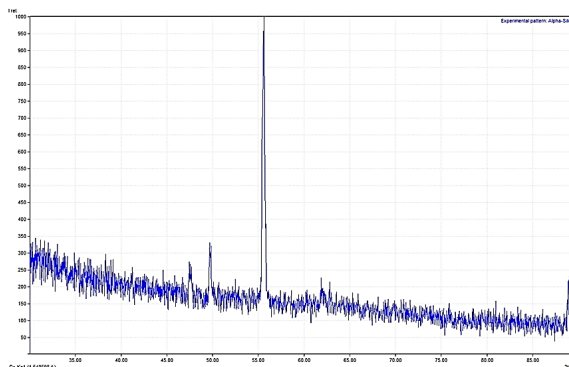


Рисунок 9 – Рентгенограмма с пленки аморфного кремния нагретого до 600. Наблюдается увеличение кристаллической фазы

Установлены морфологические и структурные изменения в пленках аморфного кремния в зависимости от величины теплового воздействия. Уста-

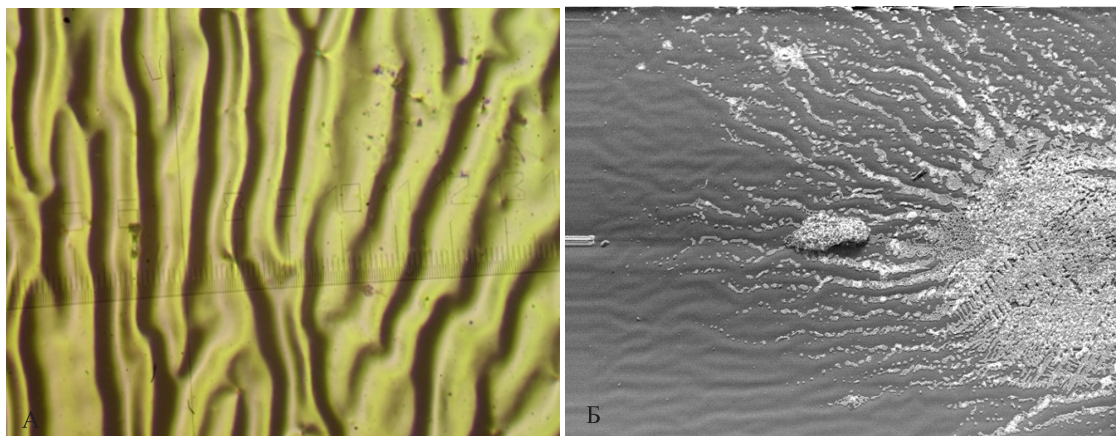


Рисунок 10 – Волнообразная поверхность пленки аморфного кремния нагретого до 725:  
А – оптический микроскоп X400, Б – электронный микроскоп BS 301 X72

новлено, что структурные и морфологические изменения начинаются при температурах нагрева выше 550 °С. Качество и количество изменений зависит от времени нагрева при определенной температуре, времени выдержки, и толщине исследуемой пленки. При этом происходит перестройка структуры кремния, изменяется его объем.

#### *Литература*

1. Великасов С.С., Лелевкин В.М., Макаров В.П., Паров С.В. Получение тонких пленок аморфного кремния / С.С. Великасов, В.М. Лелевкин, В.П. Макаров, С.В. Паров // Матер. Всерос. конф. “Физика низкотемпературной плазмы” ФНТП-2014 (том 2). Бишкек: КРСУ, 2014.