

# Свойства пленок кремния, выращенных при разных давлениях в плазмообразующей системе

© Д.М. Митин<sup>+\*¶</sup>, А.А. Сердобинцев<sup>+\*¶¶</sup>

<sup>+</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

<sup>\*</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 410019 Саратов, Россия

(Получена 29 ноября 2012 г. Принята к печати 10 декабря 2012 г.)

Изучено влияние давления рабочего газа на свойства тонких пленок кремния, синтезированных методом магнетронного распыления на постоянном токе. Пленки, полученные при более низких давлениях, отличаются меньшей шероховатостью и меньшим удельным сопротивлением. Качественно это можно объяснить большей длиной свободного пробега частиц в потоке осаждения при меньших давлениях.

## 1. Введение

Кремний является наиболее востребованным материалом в современной электронике. Особенно велика его значимость в области конверсии солнечной энергии в электрическую, что обуславливает актуальность разработки дешевых и эффективных методик получения тонких пленок с управляемыми свойствами [1,2].

Особое внимание в последние годы уделяется процессам, в которых возможна модификация свойств получаемых материалов. Исследователи отмечают, что модификация свойств имеет место в условиях бомбардировки растущей пленки высокоэнергетичными частицами плазмы [3]. Подобный режим может быть реализован в планарной магнетронной распылительной системе с факельной формой зоны рекомбинационного горения [4]. Кроме того, в ряде работ показано, что существует зависимость свойств материалов от давления в процессе синтеза. В частности, установлено, что пленки оксида цинка, синтезированные при различных значениях давления, обладают измененными межплоскостным расстоянием, показателем преломления, постоянной решетки и оптической шириной запрещенной зоны [5,6].

В данной работе изучено влияние давления рабочего газа на некоторые свойства тонких пленок кремния, полученных методом магнетронного распыления на постоянном токе.

## 2. Методика эксперимента

Пленки кремния синтезировались в несбалансированной магнетронной распылительной системе с факельной формой зоны рекомбинационного горения [7]. Напыление проводилось на постоянном токе, в качестве мишени использовалась пластина монокристаллического кремния марки КЭФ-5 диаметром 60 мм. Варьируемым параметром синтеза было давление рабочего газа (аргона) в камере. Остальные параметры синтеза оставались фиксированными для всех пленок.

Пленки синтезировались на стеклянной подложке с предварительно напыленным металлическим подслоем из сплава железо–никель–хром. Затем на поверхность кремниевой пленки через маску напылялись контакты в форме кругов с диаметром 2 мм из того же сплава для проведения дальнейших электрофизических исследований.

Для анализа влияния давления на морфологию поверхности пленок кремния были проведены исследования пленок с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Измерения проводились в полуконтактном режиме на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator. Для измерения использовался кантилевер с вольфрамовым зондом. Сканирование проводилось на трех различных участках образца; размер скана 5 мкм.

Туннельные вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись на воздухе с помощью сканирующего туннельного микроскопа NanoEducator в диапазоне напряжений смещения между зондом и образцом от  $-5$  до  $+5$  В. Комплекс измерений, проводимый в рамках изучения одного образца, осуществлялся при постоянном зазоре, соответствующем току, устанавливаемому при сканировании. Каждое измерение вольт-амперной характеристики в каждой точке повторялось 9 раз, при этом площадки сканирования выбирались на разных участках поверхности пленки.

Измерения ВАХ проводились на зондовой станции на основе характериографа Agilent B1500A на контактах, напыленных на поверхность пленки. В ходе измерений подаваемое на образец напряжение изменялось от  $-3$  до  $+3$  В.

## 3. Экспериментальные результаты

При анализе АСМ-исследований было обнаружено, что среднеквадратичная шероховатость пленок (RMS) изменяется пропорционально давлению (рис. 1). Установлено, что при низких давлениях пленка получается менее шероховатой и, вероятно, более плотной. На кривой рис. 1 можно выделить два участка, различающихся наклоном полученной зависимости к оси абсцисс. Гра-

<sup>¶</sup> E-mail: d1\_man26@mail.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: SerdobintsevAA@info.sgu.ru

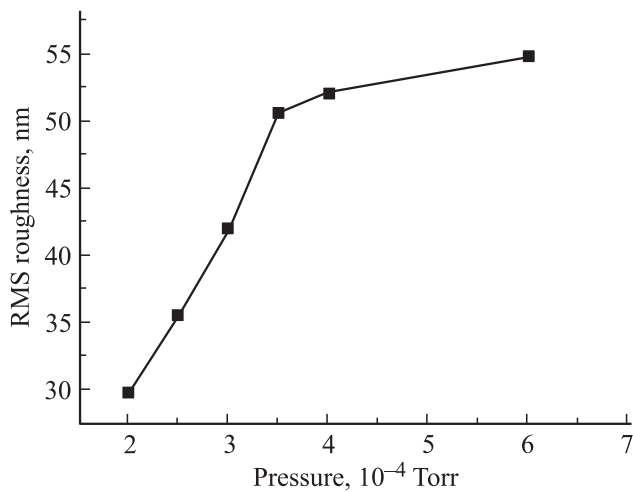


Рис. 1. Зависимость шероховатости от давления.

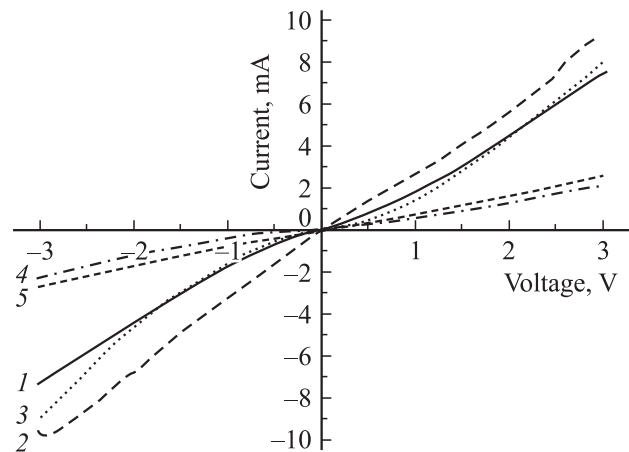


Рис. 2. ВАХ пленок кремния. Давление в камере,  $10^{-4}$  Торр: 1 — 2, 2 — 3, 3 — 3.5, 4 — 4, 5 — 6.

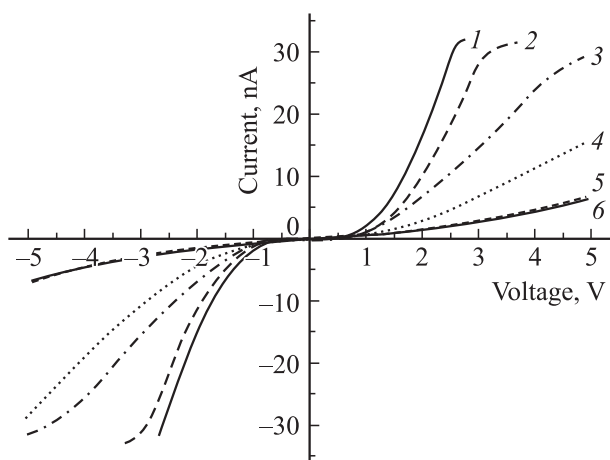


Рис. 3. Вид туннельных ВАХ пленок кремния. Давление в камере,  $10^{-4}$  Торр: 1 — 2, 2 — 2.5, 3 — 3, 4 — 3.5, 5 — 4, 6 — 6.

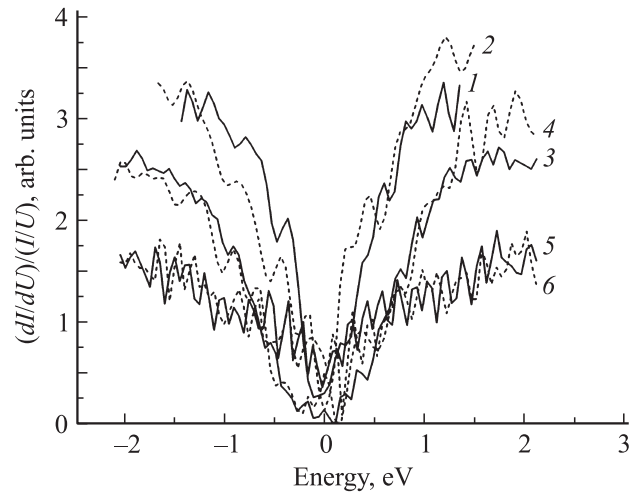


Рис. 4. Зависимости нормированной дифференциальной проводимости от энергии. Давление в камере,  $10^{-4}$  Торр: 1 — 2, 2 — 2.5, 3 — 3, 4 — 3.5, 5 — 4, 6 — 6.

ница между этими участками приходится на область  $0.35\text{--}0.4$  мТорр.

Следующим этапом работы стало изучение влияния давления на электрофизические свойства. На рис. 2 представлены ВАХ пленок кремния, синтезированных при разных давлениях.

Полученные ВАХ можно условно разделить на две группы — для низких,  $(2\text{--}3.5) \cdot 10^{-4}$  Торр, и высоких,  $(4\text{--}6) \cdot 10^{-4}$  Торр, давлений. Рис. 2 показывает, что при одном и том же напряжении с ростом давления синтеза происходит уменьшение тока, протекающего через пленку, что свидетельствует об увеличении удельного сопротивления.

Полученные туннельные вольт-амперные характеристики изображены на рис. 3. По усредненным значениям измерений ВАХ  $I(U)$  рассчитывалась нормированная дифференциальная проводимость  $(dI/dU)/(IU)$  (рис. 4) [8].

#### 4. Обсуждение результатов

Результаты всех экспериментов свидетельствуют о существовании некоторого критического давления синтеза, выше которого свойства пленок практически перестают зависеть от давления.

В частности, на зависимости шероховатости поверхности пленок от давления наблюдается следующая тенденция: с ростом давления шероховатость пленок увеличивается, причем для низких давлений эта тенденция значительно более выражена.

Увеличение шероховатости может быть объяснено снижением плотности пленок. Чем большей плотностью обладает полупроводник, тем меньше дефектов (пустот и полостей) в его структуре, а наличие дефектов прямо влияет на протекание тока в пленке [9]. В связи с

этим можно предположить, что более плотные пленки будут обладать меньшим удельным сопротивлением, что подтверждается исследованиями, рассмотренными далее.

Как и в случае с обычными вольт-амперными характеристиками, в туннельных ВАХ можно выделить два участка, а именно участок малых и больших давлений. Из рис. 3 отчетливо видно, как с уменьшением давления происходит рост туннельного тока при одном и том же значении напряжения. Эти данные хорошо согласуются с данными, полученными при измерении обычных ВАХ. Кроме того, видно, что с ростом давления происходит некоторое „насыщение“ электрических параметров: пленки, синтезированные при давлениях  $4 \cdot 10^{-4}$  и  $6 \cdot 10^{-4}$  Торр, имеют фактически одинаковые ВАХ.

Анализируя полученные туннельные спектры (рис. 4), можно сказать, что пленки, синтезированные при более низких давлениях, обладают большей плотностью состояний. Различия свойств пленок качественно можно объяснить большей длиной свободного пробега частиц в потоке осаждения при меньших давлениях и, как следствие, большей их энергией. Большая энергия частиц приводит к росту более плотных пленок с лучшими электрофизическими характеристиками.

Кроме того, полученные результаты позволяют сделать еще один важный вывод: свойства пленок практически перестают зависеть от давления синтеза при давлении выше  $4 \cdot 10^{-4}$  Торр или зависят очень слабо. В то же время в области низких давлений наблюдается резкая зависимость как морфологии пленок, так и электрофизических свойств от давления рабочего газа.

## 5. Заключение

С целью изучения влияния давления рабочего газа в процессе синтеза на морфологию поверхности пленок кремния проведены АСМ-исследования. При анализе результатов измерений обнаружено, что шероховатость пленок изменяется пропорционально давлению. При низких давлениях пленка получается менее шероховатой и, вероятно, более плотной.

В ходе исследования влияния давления на электрофизические свойства обнаружено, что пленки, синтезированные при более высоком давлении, обладают большим удельным сопротивлением.

Измерены туннельные вольт-амперные характеристики, из которых установлено, что с уменьшением давления газа в процессе синтеза пленок происходит рост туннельного тока при одном и том же значении напряжения.

Суммируя вышесказанное, можно сформулировать главный вывод: давление рабочего газа в процессе синтеза значительно влияет на свойства пленок кремния; пленки, синтезированные при более низких давлениях, отличаются меньшей шероховатостью, большей плотностью и меньшим удельным сопротивлением. Обнаружена область рабочих давлений, в которой возмож-

но управление свойствами получаемых тонких пленок кремния. Таким образом, в данной работе рассмотрена простая техническая реализация процесса напыления тонких пленок кремния, которая позволяет существенным образом повлиять на свойства получаемых пленок.

Полученные результаты открывают перспективы для создания гетероструктур на основе пленок кремния с различными свойствами.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-07-31241, 11-08-00529, 11-08-12058).

## Список литературы

- [1] В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков. *Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния*, 2-е изд. (СПб., Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2011) гл. 1, с. 7.
- [2] Guy Beaucarne. *Advances in OptoElectronics*, **2007**, Article ID 36 970 (2007).
- [3] U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A.P. Ehiasarian, J.T. Gudmundsson. *Thin Sol. Films*, **513** (1–2), 1 (2006).
- [4] А.Г. Веселов, А.С. Джумалиев. *ЖТФ*, **70** (4), 118 (2000).
- [5] А.А. Сердобинцев, А.Г. Веселов, О.А. Кирясова. *ФТП*, **42** (4), 496 (2008).
- [6] А.А. Сердобинцев, Е.И. Бурылин, А.Г. Веселов, О.А. Кирясова, А.С. Джумалиев. *ЖТФ*, **78** (3), 83 (2008).
- [7] Е.И. Бурылин, А.А. Веселов, А.Г. Веселов, А.С. Джумалиев, С.Н. Иванов, О.А. Кирясова. *Письма ЖТФ*, **26** (7), 31 (2000).
- [8] Т.К. Звонарева, В.И. Иванов-Омский, В.В. Розанов, Л.В. Шаронова. *ФТП*, **35** (12), 1460 (2001).
- [9] В.Е. Вавилов, А.Е. Кив, О.Р. Ниязова. *Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках* (М., Наука, 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

## Properties of silicon films grown at different pressures in the plasma-forming system

D.M. Mitin, A.A. Serdobintsev

Saratov State University  
named after N.G. Chernyshevsky,  
410012 Saratov, Russia  
V.A. Kotelnikov Institute  
of Radio Engineering and Electronics (Saratov Branch),  
Russian Academy of Sciences,  
410019 Saratov, Russia

**Abstract** The influence of plasma-forming gas pressure on the properties of silicon thin films synthesized by DC magnetron sputtering has been investigated. The films obtained at lower pressures have less roughness and lower resistivity. This can be qualitatively explained by a greater free path of the particles in the deposition flow at lower pressures.