УДК 621.793: 538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК НАНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

[1]Величко Р.В., [1]Гусев Е.Ю., [1]Гамалеев В.А., [1]Михно А.С., [2]Бычкова А.С.

[1]ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, e-mail: eyugusev@gmail.com;
[2]ФГУН «Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН, Санк-Петербург, e-mail: anastasiya.bychk@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов плазмохимического осаждения пленок кремния. Выявлен ряд параметров, влияющих на фазу, значение размера кристаллов и среднеквадратическое значение шероховатости полученных пленок. Установлены режимы, обеспечивающие получение пленок нано- и поликристаллического кремния с размером кристаллов 40–100 и 100–250 нм и среднеквадратическим значением шероховатости 1,4–3,5 и 1,1–2,6 нм соответственно. Методами дифракции быстрых электронов на отражение и эллипсометрии установлено, что с увеличением температуры структура полученных пленок претерпевает переход от аморфной фазы к нанокристаллической при температуре около 540°С и поликристаллической при 610°С. Микроскопические исследования показали, что размер кристаллов и СКЗ шероховатости поверхности увеличивается с температурой и давлением в камере. Отмечается наличие максимума на температурной зависимости СКЗ шероховатости при 600°С. Влияние мощности разряда на размер кристаллов было незначительным и требует дальнейшего уточнения.

Ключевые слова: нанотехнологии, плазмохимическое осаждение, нанокристаллический кремний, поликристаллический кремний

PECVD ANALYSIS OF NANO- AND POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS

[1]Velichko R.V., [1]Gusev E.Y., [1]Gamaleev V.A., [1]Mikhno A.S., [2]Bychkova A.S.

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education Southern Federal University, Rostov-on-Don, e-mail: eyugusev@gmail.com;
[2]Institute of Silicate Chemistry of RAS, St.-Peterburg, e-mail: anastasiya.bychk@mail.ru

We have investigated the effect of power, chamber pressure and temperature on the structural properties of silicon film grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition. Reflection high-energy electron diffraction and ellipsometry shown amorphous, nano- and polycrystalline structure of layers obtained. Amorphous phase turn into nanocrystalline at 540°C, and to polycrystalline at 610°C. Atomic force microscopy data analysis clearly showed the grain size and root-mean square roughness increased with the temperature and pressure. However the RMS roughness has reached maximum at 600°C with following decreasing. Effect of power on the crystal size was negligible, and requires further accurate definition. Thus deposition conditions of nano- and polycrystalline silicon films with the grain size of 40–100 and 100–250 nm, and RMS roughness of 1,4–3,5 and 1,1–2,6 nm, respectively were obtained and are challenging for gas sensor, MEMS, optoelectronic and solar cell device construction and manufacturing.

Keywords: nanotechnology, PECVD, nanocrystalline silicon, polycrystalline silicon

Нано- и поликристаллический кремний широко применяется при изготовлении современных устройств микро- и наносенсорики, микро- и наносистемной техники, солнечной энергетики, специализированных интегральных схем в качестве жертвенных, технологических и пьезорезистивных слоев в микроэлектромеханических системах, в виде тонких пленок при создании солнечных элементов [4–6]. Обширная область применения обуславливает необходимость тщательного контроля электрических и физических свойств пленок нано- и поликристаллического кремния, которые в значительной степени зависят от структуры, типа и размера зерен, что определяется технологией их получения [1]. Высокая чувствительность свойств нано- и поликристаллического кремния к изменению технологических параметров, с одной стороны, позволяет в широких пределах варьировать свойства материала, а с другой – затрудняет получение материала с воспроизводимыми свойствами [4, 5].

В данной работе для получения пленок использован метод плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХО). Использование газоразрядной плазмы для разложения реакционного газа на активные радикалы дает возможность управлять процессами разложения в разряде и позволяет проводить ПХО пленок при температурах менее 700 С и высоких скоростях около 2 нм/с, чем в аналогичных процессах химического осаждения из газовой фазы с термическим разложением реакционного газа (0,8 нм/с) [4]. При этом низкая термическая чувствительность скорости ПХО обеспечивает высокую (±5 %) однородность свойств получаемых пленок. Получение обозначенных фаз кремния с воспроизводимыми свойствами методом ПХО требует установления ключевых технологических параметров и тонкого управления ими в процессе осаждения.

Целью данной работы является получение нано- и поликристаллической фаз пленок кремния методом плазмохимического осаждения.

Материалы и методы исследования

Плазмохимическое осаждение кремния проводили на установке PlasmaLab 100 Oxford Instruments. В качестве подложек использовали окисленный кремний площадью 1×1 см^2. Реакция восстановления моносилана (SiH4) в среде аргона (Ar) протекала следующим образом: $SiH_4 \rightarrow SiH_2 + H_2\uparrow, SiH_2 \rightarrow Si + H_2\uparrow$. Исследовали следующие диапазоны параметров осаждения: мощность от 20 до 40 Вт, давление в камере от 1 до 2 мм рт. ст., температура от 500 до 700°С; поток смеси газов при этом поддерживали постоянным на уровне 500 см^3/мин (Ar:SiH_4 9:1) [2]. Рассчитанная по данным РЭМ скорость осаждения составила 1,3–1,9 нм/с.

Определение структуры проводили методом дифракции быстрых электронов (ДОБЭ). Для исследования морфологии поверхности и толщины осажденных пленок использовали зондовую нанолабораторию NTEGRA Vita, растровый электронный микроскоп с ионной колонной Nova Nanolab 600 [6]. Показатель преломления определяли эллипсометрически на ЛЭФ-3М (при 632,8 нм). Статистическую обработку полученных АСМ-изображений производили с использованием программного пакета Image Analysis 3.5.

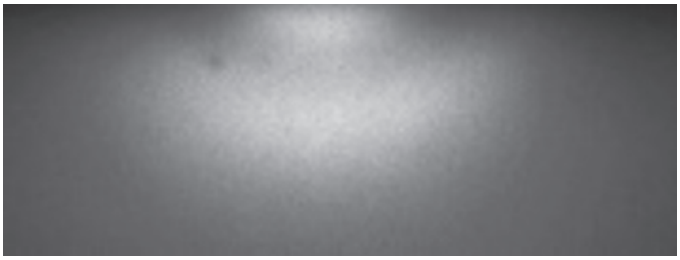
Результаты исследования и их обсуждение

С целью установления влияния режимов получения пленок на их морфологию и структуру изготовлена серия образцов.

Установлено, что с увеличением температуры структура полученных пленок претерпевает переход от аморфной фазы к нанокристаллической при температуре около 540°С и поликристаллической при 610°С, что коррелирует с соответствующими температурами, приведенными в [1, 3]. Наличие указанных фаз полученных пленок в соответствующих областях подтверждается данными дифрактометрии (рис. 1) и эллипсометрии. Значения показателя преломления составили от 3,5 до 4,0 для нанокристаллической фазы, от 4,0 до 4,5 для поликристаллической и от 4,5 до 5,5 для аморфной.

а

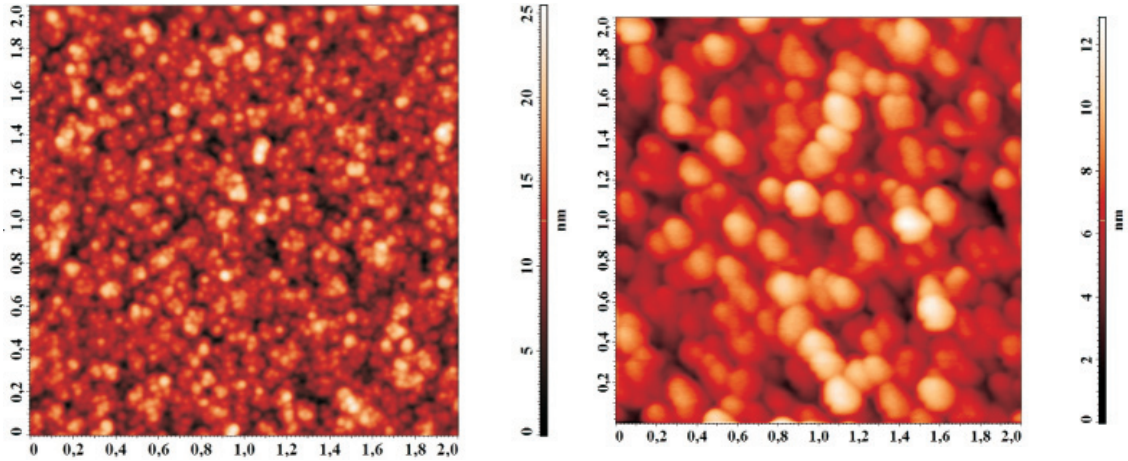
б



в

Рис. 1. ДОБЭ-изображения осажденных пленок кремния:
а – аморфная фаза; б – нанокристаллическая фаза; в – поликристаллическая фаза

Микроскопические исследования показали, что полученные пленки однородны, при этом значения диаметра кристаллов лежат в диапазоне 40–250 нм. В зависимости от режимов меняется форма кристаллов (рис. 2). Сравнительным анализом данных микроскопии и дифрактометрии установлено, что размер кристаллов и СКЗ шероховатости поликристаллических пленок составили 100–250 и 1,1–2,6 нм, с соответствующими значениями для нанокристаллических пленок: 40–100 и 1,4–3,5 нм.



а б

Рис. 2. АСМ-изображения осажденных пленок кремния при 40 Вт, 1 мм рт. ст.: а – нанокристаллическая фаза при 550 °С; б – поликристаллическая фаза при 700 °С

Выявлено, что с повышением общего давления в камере и мощности разряда увеличиваются размер кристаллов и СКЗ шероховатости поверхности пленок, что подтверждается данными [4–6]. Подобное влияние на размер оказывает и температура. При этом на температурной зависимости СКЗ шероховатости отмечается наличие максимума около 600 С.

Так, на пленках, полученных при 40 Вт, 1 мм рт.ст., с ростом температуры от 500 до 700 °С наблюдалось изменение размера кристаллов от 40 до 118 нм. Отмеченный характер температурной зависимости СКЗ шероховатости можно объяснить переходом от нано- к поликристаллической фазе.

При увеличении общего давления от 1 до 2 мм рт. ст. диаметр кристаллов возрастал на 6–8 %, а СКЗ шероховатости на 75–80 %; при повышении мощности с 10 до 30 Вт – в 2,3 раза. Установлено, что при увеличении мощности разряда СКЗ шероховатости возрастает с 1,12 до 2,57 нм. Влияние мощности разряда на размер кристаллов незначительно и требует дальнейшего уточнения.

Заключение

В работе получены однородные пленки нано- и поликристаллического кремния методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Показано, что морфология, структура и оптические свойства таких пленок определяются режимами получения. Установлены режимы, обеспечивающие получение пленок нано- и поликристаллического кремния с размером кристаллов 40–100 и 100–250 нм и СКЗ шероховатости 1,4–3,5 и 1,1–2,6 нм соответственно.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии создания чувствительных элементов сенсорики и микроэлектромеханики, оптоэлектроники и солнечной энергетики.

Работа выполнена при поддержке государственными соглашениями № 12-08-90045/12, № 14.A18.21.0126, № 14.A18.21.0923, № 14.A18.21.0933, № 14.A18.21.0900, № 14.A18.21.0887, № 14.A18.21.1206 в рамках проектов РФФИ и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Список литературы

1. Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 / О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.В. Михайличенко, В.А. Смирнов, В.В. Пташник, М.С. Солодовник, А.А. Федотов, Е.Г. Замбург, В.С. Климин, О.И. Ильин, А.Л. Громов, А.В. Рукомойкин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 114. – № 1. – С. 109–116.

2. Величко Р.В., Гамалеев В.А., Михно А.С. Исследование режимов получения пленок поликристаллического кремния методом плазмохимического осаждения для создания устройств микро- и наноэлектроники // ЮНЦ РАН: тезисы докладов VIII ежегод. науч. конф. студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН (Ростов-на-Дону, 11–26 апр., 2012). – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. – С. 178–179.

3. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – Т. 89. – № 12(89). – С. 165–175.

4. B. El-Kareh. Fundamentals of semiconductor processing technology. – Boston: Springer, 1995. – 599 p.

5. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and actuators. – A: Physical, 2002. – Vol. 99. – P. 3–12.

6. Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A. Wide bandgap semiconductors: fundamental properties and modern photonic and electronic devices. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 460 p.

References

1. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Mikhaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Ilin O.I., Gromov A.L., Rukomoykin A.V. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no 1, pp. 109–116.

2. Velichko R.V, Gamaleev V.A., Mikhno A.S. *VIII Annual Scientific conference of students and base departments PhDs of the Southern Scientific Centre RAS* (Abstracts of “VIII Annual Scientific conference of students and base departments PhDs of the Southern Scientific Centre RAS”). Rostov-on-Don, 2012, pp. 178–179,

3. Konoplev B.G., Ageev O.A. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2008, no 12, pp. 165–175.

4. B. El-Kareh. Fundamentals of semiconductor processing technology. Boston, Springer, 1995. 599 p.

5. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems. *Sensors and actuators A*: *Physical*, 2002, vol. 99, pp. 3–12.

6. Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A. Wide bandgap semiconductors: fundamental properties and modern photonic and electronic devices. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 460 p.

Рецензенты:

Рындин Е.А., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ЮНЦ РАН;

Жорник А.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии ФГБОУ ВПО ТГПИ;

Пен Р.З., д.т.н., профессор кафедры целлюлозно-бумажного производства, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 13.11.2012.