DOI: 10.18411/vntr2025-178-3

УДК 621.793

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК УГЛЕРОДА НА ПЛАСТИНАХ ИЗ КРЕМНИЯ

© Виктор Игоревич Черкунов[1], Людмила Алексеевна Кузьмина[2], Анатолий Васильевич Щагин [3], Владислав Витальевич Дадонов[4]
[1]АО «НПП «ЭСТО», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
chvi.esto@ya.ru
[2]АО «НПП «ЭСТО», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
kuzmina@nppesto.ru
[3]НИУ «МИЭТ», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
schagin4@rambler.ru
[4]ООО «Эстика», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
vdadonov@estika.ru

Аннотация. *Получение жестких масок из углерода является актуальной задачей в производстве МЭМС или фотонных устройств. Существует несколько технологий получения тонких пленок. В данной работе авторами изучается возможность получения тонкой пленки углерода с применением магнетронного распылительного устройства со сканированием. По результатам работы авторами отмечено, что применение нагрева необходимо для получения хорошей адгезии пленки углерода к кремнию. Так же отмечены низкие скорости роста пленок.*
Ключевые слова: *тонкие пленки углерода, магнетронное распыление, жесткие маски, кремниевые пластины, аморфный углерод, МЭМС, углеродные пленки, травление кремния.*

PRODUCTION OF THIN CARBON FILMS ON SILICON WAFERS

© Viktor Igorevich Cherkunov[1], Lyudmila Alekseevna Kuzmina[2], Anatoly Vasilyevich Shchagin[3], Vladislav Vitalievich Dadonov[4]
[1]AO «NPP «ESTO», Moscow, Zelenograd, Russia
chvi.esto@ya.ru
[2] AO «NPP «ESTO», Moscow, Zelenograd, Russia
kuzmina@nppesto.ru
[3]NIU «MIET», Moscow, Zelenograd, Russia
schagin4@rambler.ru
[4]LLC «Estika», Moscow, Zelenograd, Russia
vdadonov@estika.ru

Abstract. *Obtaining rigid masks from carbon is an urgent task in the production of MEMS or photonic devices. There are several technologies for producing thin films. In this paper, the authors study the possibility of obtaining a thin carbon film using a magnetron sputtering device with scanning. Based on the results of the work, the authors noted that the use of heating is necessary to obtain good adhesion of the carbon film to silicon. Low film growth rates are also noted.*
Keywords: *thin carbon films, magnetron sputtering, rigid masks, silicon wafers, amorphous carbon, MEMS, carbon films, silicon etching.*

Введение. В технологических маршрутах изготовления микроэлектромеханических или фотонных устройств присутствуют операции травления кремния и его оксида на относительно большую глубину. Для выполнения этой операции требуется высокое отношение скоростей травления двух различных материалов маски и кремния или оксида кремния, то есть требуется высокая селективность [1]. Пленки из аморфного углерода являются многообещающими кандидатами на роль материалов для жёстких масок нового поколения [2].

Существует проверенная технология получения углеродных жестких масок методом плазмостимулированного химического осаждения (PECVD) [3]. Данная технология CVD с использованием плазмы для осаждения аморфного углерода на кремниевые пластины, поскольку углерод сочетает в себе преимущества высокой селективности травления по отношению к кремниевым соединениям с лёгкостью удаления.

Так же существует множество технологий получения углеродных пленок магнетронным распылением. Например, Юрков А. Н., Мельник Н. Н., Сычев В. В и др. использовали в качестве плазмообразующего газ водород [4]. Авторы другой работы для нанесения углеродных покрытий используют биполярный комбинированный режим магнетронного и дугового распыления [5]. В целом технология магнетронного распыления графита для получения пленок углерода известна. Таким образом перед авторами данной статьи была поставлена задача получения тонкой пленки углерода на пластинах из кремния.

Описание эксперимента. В решаемой авторами задачи необходимо было получить пленки аморфного углерода на тонких пластинах из монокристаллического кремния. Толщина пленки должна достигать 500нм в соответствии с требованиями к глубине травления с учетом теоретической селективности травления кремния по отношению к аморфному углероду.

В качестве метода для получения углеродной пленки был выбран метод магнетронного распыления в аргоне на постоянном токе. Для распыления было применено магнетронное распылительное устройство со сканированием с диаметром мишени 100мм. Такое устройство позволяет осаждать тонкие пленки на подложки диаметром до 300 мм с равномерностью до 3% [6]. Магнетронное распылительное устройство, применяемое в данной работе изображено на рисунке 1. В качестве мишени использовалась мишень из углерода, изготовленная методом горячего прессования. Охлаждение мишени косвенное, через медный мишенедержатель.

Эксперименты проводились на модернизированной АО «НПП «ЭСТО»» установке УВН-71. Модернизация заключалась в полной автоматизации установки, замене технологических устройств на магнетроны, нагревателя на прямонакальный, а также замене всех средств откачки на безмасляные с криогенным высоковакуумным насосом.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе производилось напыление без предварительного нагрева, на комнатной температуре. На втором этапе выполнялся предварительный нагрев пластины до температуры около 250°С. Нагрев производился прямонакальным нагревателем, в котором в качестве нагревательного элемента используется тантал. Нагрев подложки способствует улучшению адгезии за счёт снижения внутренних напряжений в пленке и увеличения подвижности атомов на поверхности кремния.

Процесс нанесения покрытия осуществлялся в следующей последовательности: сначала была вакуумирована камера до давления $2x10^{-3}$ Па, далее на первом этапе в нее подавался аргон до давления $2,2x10^{-1}$ Па, включался магнетрон на мощности 300 Вт и производилось напыление в течение определенного времени. На втором этапе после откачки камеры

выполнен дополнительно нагрев. Фотография процесса напыления приведена на рисунке 2. При напылении из углеродной мишени для получения мощности 300 Вт на мишень подавалось напряжение 1000В. При этом было отмечено, что в процессе напыления для поддержания мощности 300Вт напряжение увеличивалось с 955 до 1000В, на что по мнению авторов работы влияет нагрев мишени.



Рис. 1. Фотография магнетронного распылительного устройства со сканированием.



Рис. 2. Фотография процесса напыления.

Для определения толщины нанесённой на пластину пленки углерода использовался профилометр Dektak 3030, изображен на рисунке 3. Он позволяет точно определить толщину и размеры нанесённого материала на поверхности образцов, используя измерение различия высот между двумя участками поверхности — например, между участком без пленки и участком с пленкой. Этот метод обеспечивает высокое разрешение и надёжность полученных данных, что важно для оценки качества и однородности углеродных пленок.



Рис. 3. Фотография профилометра Dektak 3030.

Обсуждение результатов. По результатам первого этапа напыления углеродных пленок, удалось получить пленки толщиной до 300нм. Пленки большей толщины имели низкую адгезию и осыпались с подложек. По результатам анализа пленки состояли на 96% из углерода и имели примеси в виде кислорода, железа и кремния. Изображения диаграммы спектров приведено на рисунке 4. Наличие железа и кремния в пленках авторы связывают с применяемой оснасткой из нержавеющей стали и пластинами из кремния.
По результатам второго этапа напыления с нагревом удалось получить пленки толщиной до 800нм. Фотографии образца и измерений приведены на рисунке 5 и 6. При этом пленки удерживались на кремнии и имели хорошую адгезию. Но стоит отметить, что скорости напыления углерода низкие и составили около 6 нм/мин.

Заключение. Получение пленок углерода в качестве жестких масок возможно с применением методов магнетронного распыления углерода на постоянном токе. Однако данный метод имеет низкие скорости роста пленок.
Эксперименты доказали необходимость предварительного нагрева подложки для обеспечения адгезии и стабильности пленки.
В будущих работах авторы планируют проведение экспериментов с применением мишеней из пиролитического графита, который в теории имеет большие скорости распыления.

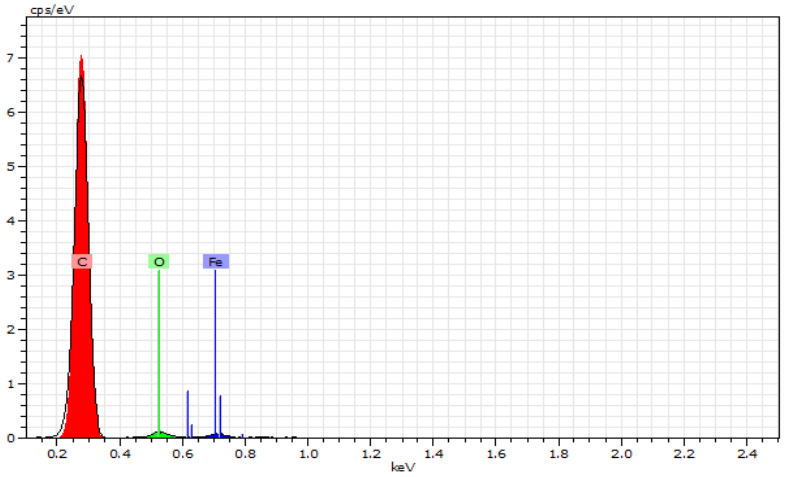


Рис. 4. Состав пленки углерода.



Рис. 5. Фотография образца с напыленной пленкой углерода.



Рис. 6. Фотография измерения образца второго этапа на профилометре Dektak 3030.

Список литературы

1. Галперин В. А., Данилкин Е. В., Мочалов А. И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: учебное пособие / под ред. С. П. Тимошенкова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.: ил. – (Нанотехнологии). – ISBN 978-5-9963-0032-7.
2. Kim S., Jeong M.-W., Kim K., Kim U., Kima M., Joo S.-Y., Joo Y.-C. Effect of N doping on the microstructure and dry etch properties of amorphous carbon deposited with a DC sputtering system // The Royal Society of Chemistry. – 2023. – № 13. – С. 2131-2139.
3. Vogt M., Buerger M., Seamons M., et al. Introduction of PECVD carbon hardmasks (APF™) for Sub-90nm dram technology – 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/289666746_Introduction_of_PECVD_carbon_hardmasks_APF_for_Sub-90nm_dram_technology
4. Юрков А. Н., Мельник Н. Н., Сычев В. В., и др. Синтез углеродных пленок магнетронным распылением графитовой мишени с использованием водорода в качестве плазмообразующего газа // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук: журнал. – 2011. – № 9. – С. 28-33.
5. Оскирко В. О., Захаров А. Н., Гренадеров А. С., и др. Нанесение углеродных покрытий в биполярном комбинированном режиме магнетронного и дугового распыления // Вестник Башкирского университета. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 270-277. – DOI 10.33184/bulletinbsu2023.3.9
6. Черкунов В. И. Оптимизация неравномерности магнетронного напыления пленок алюминия и оксида алюминия при взаимном перемещении подложки и магнетрона // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 14-21. – DOI 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21. – EDN ATGFRG.

References

1. Galperin V. A., Danilkin E. V., Mochalov A. I. Plasma etching processes in micro- and nanotechnology: textbook / edited by S. P. Timoshenkov. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2010. – 283 p.: ill. – (Nanotechnology). – ISBN 978-5-9963-0032-7. (in Russian).
2. Kim S., Jeong M.-W., Kim K., Kim U., Kima M., Joo S.-Y., Joo Y.-C. Effect of N doping on the microstructure and dry etch properties of amorphous carbon deposited with a DC sputtering system // The Royal Society of Chemistry. – 2023. – № 13. – С. 2131-2139.
3. Vogt M., Buerger M., Seamons M., et al. Introduction of PECVD carbon hardmasks (APF™) for Sub-90nm dram technology – 2004. URL:https://www.researchgate.net/publication/289666746_Introduction_of_PECVD_carbon_hardmasks_APF_for_Sub-90nm_dram_technology.
4. Yurkov A. N., Melnik N. N., Sychev V. V., and others. Synthesis of carbon films by magnetron sputtering of a graphite target using hydrogen as a plasma–forming gas // Brief Reports on Physics at the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences: journal, 2011, No. 9, pp. 28-33. (in Russian).
5. Oskirko V. O., Zakharov A. N., Grenaderov A. S., and others. Application of carbon coatings in a bipolar combined mode of magnetron and arc sputtering // Bulletin of the Bashkir University. – 2023. – Vol. 28. – No. 3. – pp. 270-277. – DOI 10.33184/bulletinbsu2023.3.9 (in Russian).

6. Cherkunov V. I. Optimization of the irregularity of magnetron sputtering of aluminum and aluminum oxide films during mutual displacement of the substrate and magnetron. // Izvestiya SPbSETU LETI. – 2025. – Vol. 18, No. 1. – pp. 14-21. – DOI 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21. (in Russian).

Дата поступления: 17 июля 2025 г.