

СЕКЦИЯ 3

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_538-546

УДК 621.794.4

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

П.Э. Гусев¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Аннотация. В работе рассматриваются подходы для формирования канавок в кремниевых пластинах. Разработано программное обеспечение для корректировки операционных параметров процесса плазмохимического травления. Оператор может выбрать соотношение между газом для пассивации поверхности и газом для удаления материала поверхности. Варьируются параметры расхода газов и длительность цикла воздействия. Экспериментально определены параметры для формирования полости внутри кремниевой пластины с необходимым аспектным соотношением глубины и ширины полости. Результаты данной работы могут быть использованы в медицинской технике при разработке микродозатора лекарственных средств.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, канавки в кремнии

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF TECHNOLOGY PLASMOCHEMICAL ETCHING OF SILICON

P.E. Gusev¹

¹National Research University of Electronic Technology (MIET)

Abstract. The paper discusses approaches for forming through holes in silicon wafers. Software has been developed to adjust the operating parameters of the plasma-chemical etching process. The operator can select the ratio between surface passivation gas and surface material removal gas. The gas flow parameters and the duration of the exposure cycle vary. The parameters for the formation of a cavity inside a silicon wafer with the required aspect ratio of the depth and width of the cavity were determined experimentally. The results of this work can be used in medical technology to develop a microdoser for drugs.

Keywords: Bosch process, TSV

Введение

Как известно, плазмохимический процесс – это технологический метод, использующий плазму для проведения химических реакций и изменения свойств поверхности материалов, в частности кремниевых пластин, широко применяемый в полупроводниковой и микроэлектронной индустрии. Особенно важным является использование плазмохимических процессов в микроэлектронике для создания микросхем и полупроводниковых устройств [1].

Понимание этих взаимосвязей поможет в разработке и оптимизации программного обеспечения, предназначенного для управления производственным оборудованием, выполняющим плазмохимические операции с кремниевыми пластинами. Известен процесс плазменной очистки поверхности для удаления загрязнений с поверхности кремниевых пластин [2]. Плазменная обработка может улучшить адгезию или изменить гидрофильные (водопритягивающие) и гидрофобные (водоотталкивающие) свойства поверхности. От свойств поверхности (например, шероховатость) могут зависеть механические свойства тонких плёнок [3]. Также известен процесс химического осаждения из газовой фазы усиленной плазмой (PECVD) [4]. В методе PECVD используется плазма для нанесения тонких пленок на кремниевую поверхность. Осуществляется возможность получать равномерные покрытия и контролировать толщину пленки с высокой точностью. Кроме осаждения слоёв, известны плазменные процессы травления. Например, плазменное травление диэлектриков (SiO_2 , Si_3N_4) позволяет точно удалять слои материала с поверхности кремниевой пластины, создавая нужные микроструктуры [5]. Вышеуказанный метод травления также ценится за возможность контролировать процесс на молекулярном уровне.

В данной работе корректируется процесс плазмохимического травления Si (Bosch-процесс). По сравнению с жидкостными процессами травления сухой плазменный способ травления позволяет обрабатывать одну сторону пластины, обеспечивает формирование микроструктур с повышенной точностью, имеет значительно меньшую зависимость от кристаллографической ориентации материала (возможно создавать полости цилиндрической формы в объёме кремниевой пластины), более высокую воспроизводимость процесса [6].

Программное обеспечение (ПО) играет критически важную роль в контроле и управлении производственным оборудованием, особенно в высокотехнологичных областях, таких как производство полупроводников, автоматизация производственных линий и робототехника [7]. ПО позволяет автоматически контролировать и регулировать параметры производственных процессов, такие как

температуру, давление, скорость подачи материалов, точность позиционирования оборудования и многое другое. Современное производственное оборудование часто программируется для выполнения разнообразных задач. ПО предоставляет гибкость в изменении производственных процессов без необходимости физических изменений в оборудовании. ПО может оптимизировать производственные процессы, уменьшая время простоя и увеличивая производительность. Современные системы ПО могут анализировать большие объемы данных с оборудования для предоставления ценной информации, помогающей в принятии решений на производстве. ПО обеспечивает непрерывный мониторинг состояния оборудования, предупреждая о возможных неисправностях или отклонениях в процессах. В случае возникновения аварийных ситуаций, ПО может автоматически принимать меры для минимизации ущерба, например, останавливая оборудование или активируя системы безопасности. ПО позволяет интегрировать различное оборудование в единую сеть, обеспечивая централизованный контроль и управление. ПО обеспечивает обмен данными между различными уровнями производственного процесса, от сенсоров и исполнительных механизмов до систем высшего уровня, таких как ERP (Enterprise Resource Planning) и MES (Manufacturing Execution Systems). ПО позволяет легко масштабировать производственные возможности, добавляя новое оборудование или обновляя существующее. ПО может регулярно обновляться для улучшения функциональности, эффективности и безопасности системы [7].

Эксперимент

Особенностью технологического маршрута формирования канавок в кремнии (TSV структур) является формирование маски для глубокого травления кремния. Слой фоторезиста толщиной единицы микрон стравливается раньше, чем происходит травление на необходимую глубину. В результате значительно возрастает площадь травления и возникает эффект черного кремния.

Поэтому стандартный слой фоторезиста заменяется на слой алюминия. Алюминий обладает большей селективностью к кремнию по сравнению с фоторезистом (при травлении кремния). Технологический маршрут формирования маски перед формированием канавок в кремнии описан ниже. Сначала формируют слой алюминия на обратной стороне подложки. Затем проводят фотолитографию по алюминию. После этого проводят жидкостное химическое травление алюминия и удаление резиста в ДМФА. Следующим шагом выполняют осаждение функционального слоя на лицевую (полированную) сторону подложки.

Функциональный слой представляет собой тонкую плёнку, состоящую из одного или нескольких слоёв. Затем осаждают слой алюминия на функциональный слой (на лицевой стороне) для предотвращения попадания мембран в реакционную камеру. Далее выполняют глубокое травление кремния (Bosch-процесс) на необходимую глубину подложки. После этого, проводят жидкостное химическое травление алюминия.

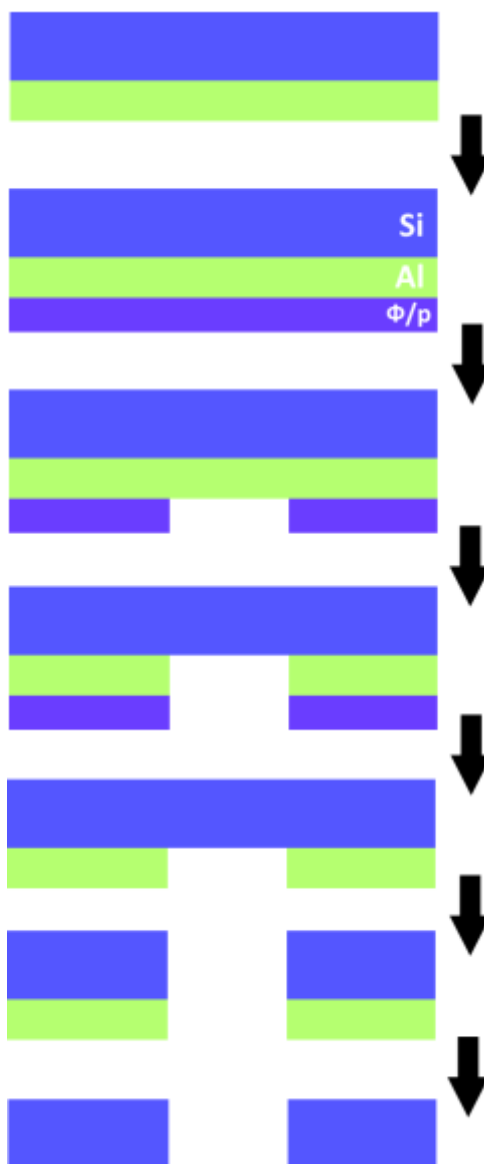


Рисунок 1 – Технологический маршрут формирования канавок в кремнии.

Следующим шагом было разработано программное обеспечение для корректировки операционных параметров процесса плазмохимического травления.

Таблица 1. Исходный рецепт

	Травление		Осаждение
Расход газа [см ³ /мин]	400 SF ₆ / 40 O ₂		250 C ₄ F ₈
Время цикла [с]	7		4
Давление в камере [мТорр]	20 (1.5 сек)	60	25
Мощность катушки (источник плазмы) [Вт]	2800		2000
Мощность подложкодержателя [Вт]	130 (1.5 сек)	40	Выкл
Температура подложкодержателя [°C]	25		

Таблица 2. Скорректированный рецепт

	Травление		Осаждение
Расход газа [см ³ /мин]	550 SF ₆ / 40 O ₂		200 C ₄ F ₈
Время цикла [с]	18		3
Давление в камере [мТорр]	20 (1.5 сек)	60	25
Мощность катушки (источник плазмы) [Вт]	2800		2000
Мощность подложкодержателя [Вт]	130 (1.5 сек)	40	Выкл
Температура подложкодержателя [°C]	25		

В результате коррекции рецепта формирования полости внутри кремневой пластины с необходимым аспектным соотношением глубины и ширины полости. Изображения полученных микроструктур представлены ниже.

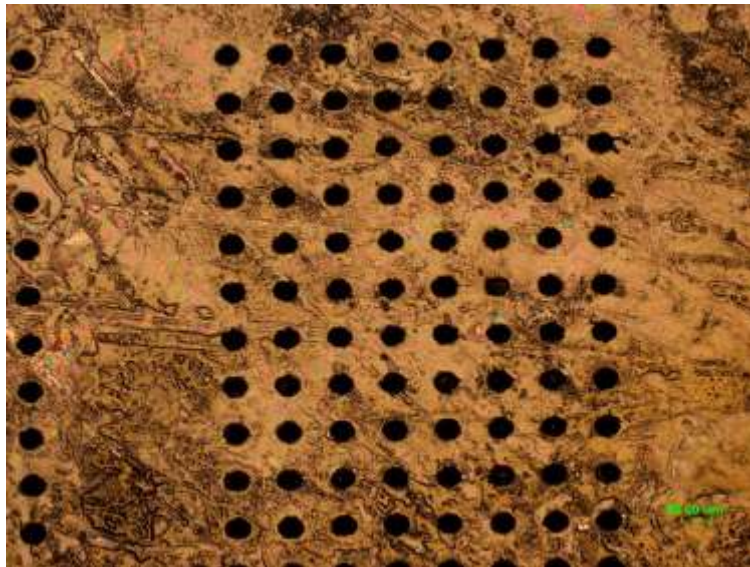


Рисунок 2 – Массив канавок в кремнии на микроскопе

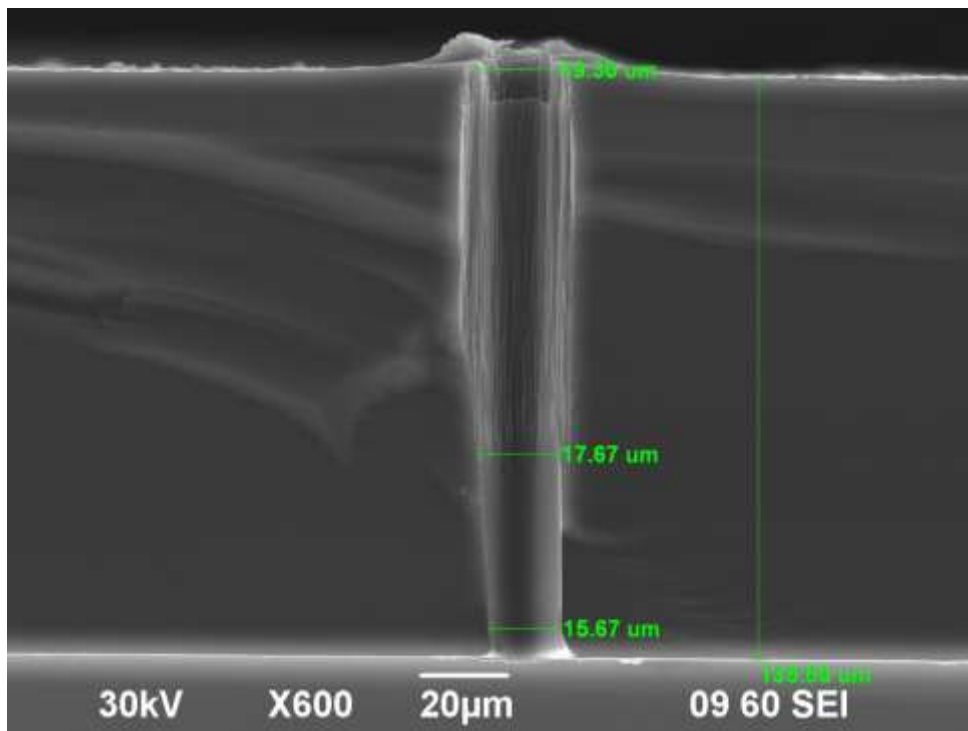


Рисунок 3 – РЭМ изображение канавок в кремнии

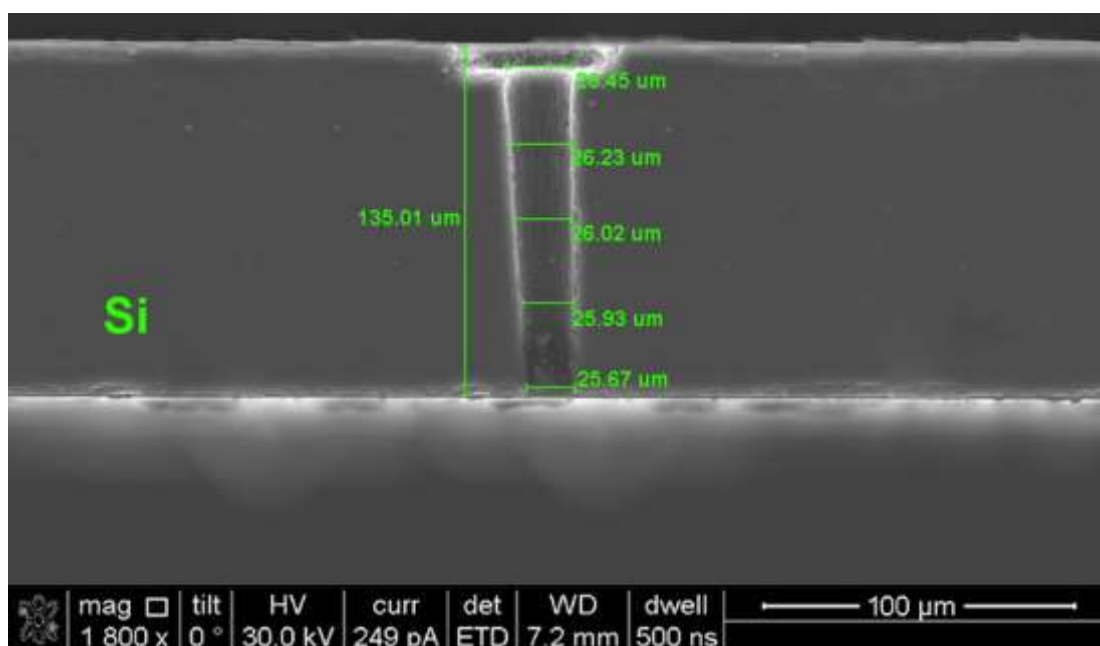


Рисунок 4 – РЭМ изображение канавок в кремнии после корректировки параметров

Выводы. Рассмотрены подходы для формирования отверстий в кремниевых пластинах. Разработано программное обеспечение для корректировки операционных параметров процесса плазмохимического травления. Оператор может выбрать соотношение между газом для пассивации поверхности и газом для удаления материала поверхности. Длительность цикла воздействия газа травления SF₆ увеличена с 7 до 18 с. Скорость расхода газа травления SF₆ увеличена с 400 до 550 куб. см/мин. Длительность цикла воздействия газа пассивации C₄F₈ уменьшена с 4 до 3 с. Скорость расхода газа травления SF₆ уменьшена с 250 до 200 куб. см/мин. Результаты данной работы могут быть использованы в медицинской технике при разработке микродозатора лекарственных средств.

Список литературы

1. Ачкасов А.В., Солодилов М.В., Литвинов Н.Н., Чубунов П.А., Зольников В.К., Шеховцов Д.В., Бордюжа О.Л. Особенности проектирования микросхем, выполненных по глубоко-субмикронным технологиям // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 7-17.

2. P. Krüger, R. Knes, J. Friedrich, Surface cleaning by plasma-enhanced desorption of contaminants (PEDC) // Surface and Coatings Technology. -1999. – Vol. 112, Issues 1–3. – P. 240-244, ISSN 0257-8972, DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00777-4.

3. Беспалов В.А., Товарнов Д.А., Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Гусев Е.Э., Зольников К.В. Обзор методов измерения механической прочности тонких пленок // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 110-128.

4. E.Yu. Gusev, J.Y. Jityaeva, O.A. Ageev Effect of pecvd conditions on mechanical stress of silicon films // Materials Physics and Mechanics. - 2018. - v. 37, p. 67-72.

5. Исмаилов Т.А., Захарова П.Р., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р. Исследование процесса плазмохимического травления пленок SiO₂ // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2014. - №4 (35).

6. Le Dain Guillaume et.al.. Modeling of silicon etching using Bosch process: Effects of oxygen addition on the plasma and surface properties // Journal of Vacuum Science & Technology. -2018.- v.36(3). DOI:10.1116/1.5023590.

7. Russell T. Berman, Using C++ to Write Automation Controller Software // SLAS Technology. - 2007.- V. 12, Issue 1. -Pages 12-16. ISSN 2472-6303. DOI: 10.1016/j.jala.2006.07.011.

References

1. Achkasov A.V., Solodilov M.V., Litvinov N.N., Chubunov P.A., Solnikov V.K., Shekhovtsov D.V., Bordyuzha O.L. Design features of microcircuits made using deep submicron technologies // Modeling of systems and processes. - 2022. – Vol. 15, No. 4. – pp. 7-17.

2. P. Kruger, R. Knes, J. Friedrich, Surface cleaning by desorption of contaminants, enhanced plasma (PEDC) // Technology of surfaces and coatings. -1999. - Volume 112, issues 1-3. – pp. 240-244, 0257-8972 ISSN number, Doi: 10.1016/S0257-8972(98)00777-4.

3. Беспалов В.А., Товарнов Д.А., Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Гусев Е.Э., Зольников К.В. Review of methods for measuring the mechanical strength of thin films // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – pp. 110-128.

4. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Ageev O.A. Influence of conditions on mechanical stress for plasma deposition of silicon films // Physics and Mechanics of materials.-2018.- vol. 37, pp. 67-72

5. Ismailov T.A., Zakharova P.R., Shangereeva B.A., Shakhmayeva A.R. Investigation of the process of plasmochemical etching of SiO₂ silicon dioxide films // Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. – 2014. - №4 (35).

6. Le Din Guiem et.al .. Development of a silicon application technique using Bosch technology: the effect of oxygen application on plasma and its properties // Journal of Vacuum Science & Technology. -2018.- vol.36(3). The utility index:10.1116/1.5023590.

7. Rasel T. Berman, Using C++ for software programming // Programming technology. - 2007.- Vol. 12, Issue 1. -pp. 12-16. ISSN 2472-6303. DOI: 10.1016/j.jala.2006.07.011.