

УДК 621.01, 533.924

ФОРМИРОВАНИЕ МАСКИ ИЗ SiO₂ ДЛЯ ГЛУБОКОГО РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫХ КАНАЛОВ В КРЕМНИИ

Влезько Дмитрий Сергеевич⁽¹⁾, Юдин Андрей Игоревич⁽²⁾

*Студент 3 курса бакалавриата⁽¹⁾, магистр 1 года⁽²⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В.В. Рыжков,
кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ «Функциональные микро- и наносистемы»*

Микрофлюидные устройства находят широкое применение в современных лабораториях-на-чипе (Lab-on-a-Chip), системах экспресс-диагностики и платформах «органа-на-чипе». Базовым элементом таких устройств являются микроканалы, позволяющие проводить необходимые манипуляции с микрообъёмами жидкостей на чипе. При этом часто необходимо обеспечить травление на разные глубины на одном чипе, например, для формирования каналов (100 мкм) и сквозных отверстий (525 мкм).

Для изготовления микрофлюидных структур в кремнии наиболее перспективным методом является глубокое реактивно-ионное травление (англ. deep reactive-ion etching, DRIE). Данный процесс позволяет получать каналы с высоким соотношением глубины травления к ширине структуры (>10:1), вертикальными боковыми стенками и контролируемой глубиной от десятков до сотен микрон.

DRIE представляет собой циклический процесс, чередующий стадии изотропного травления (SF₆) и пассивации боковых стенок (C₄F₈). Это обеспечивает анизотропность травления и позволяет достигать глубин, недоступных для стандартных методов плазмохимического травления.

Несмотря на преимущества реализация метода требует использования маски с высокой устойчивостью к плазме процессных газов. Традиционно в качестве маски применяется фоторезист, однако он обладает низкой стойкостью к ионной бомбардировке. В процессе травления происходит эрозия фоторезиста, что приводит к потере критических размеров маски. Повышение температуры из-за экзотермической реакции усугубляет эффект [1]. Селективность травления кремния к фоторезисту в зависимости от режима может достигать 50:1, но на практике она обычно составляет 15:1 [2]. Это означает, что при травлении кремния на 150 микрон потребуется слой резиста толщиной 10-30 микрон, что технологически сложно реализовать для жидких резистов. Кроме того, высокая толщина маски дополнительно увеличивает аспектное соотношение структур, что критично для высокоаспектных элементов.

В качестве альтернативы фоторезисту предлагается использовать жёсткую маску из диоксида кремния толщиной 2,5 мкм, полученную методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (англ. plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD). Селективность травления кремния для такого материала маски составляет от 1:75 до 1:200 и более, что значительно превосходит показатели фоторезиста [2]. Максимальная глубина травления с жёсткой маской превышает 300 микрон [1]. После оптимизации технологического процесса, профиль стенок получается вертикальным, без дефектов.

Цель работы – экспериментальное исследование плазмохимического травления оксида кремния через фоторезистивную маску для оптимизации параметров

технологического процесса бездефектного переноса топологии из фоторезиста в жесткую маску и травления профиля в SiO_2 .

На сегодняшний день распространение получило оборудование для плазмохимического (сухого) травления с двумя источниками плазмы, что обусловлено возможностью независимого контроля количества активных частиц и их направленности на обрабатываемую пластину или образец.

Известно, что для травления диоксида кремния используются газы на основе соединений фтора (C_4F_8 , CHF_3 , CF_4 и др.). Чем меньше соотношение фтора к углероду в газовой смеси, тем сильнее баланс смещается в сторону полимеризации и образования пленки мономера CF_x [4-5]. Таким образом, в качестве основной газовой смеси для травления SiO_2 был выбран CHF_3 , который занимает промежуточное положение между чисто травящим газом (CF_4) и пассивирующим (C_4F_8), что позволяет проще находить оптимальный баланс. Дополнительно в смесь вводится газ аргон (Ar) для увеличения общего количества активных частиц и плотности ионов в плазме.

Формирование окон в плёнках SiO_2 осуществлялось методом плазмохимического травления в реакторе с индуктивно-связанной плазмой (англ. inductively coupled plasma, ICP) в газовой смеси CHF_3/Ar . При варьировании мощности высокочастотного (ВЧ) генератора и соотношения газов были получены режимы с различной скоростью травления и селективностью к фоторезисту.

В ходе отработки режимов выявлена обратная зависимость между скоростью травления и селективностью к фоторезисту: увеличение мощности ВЧ-генератора и доли аргона в газовой смеси повышает скорость травления за счёт усиления ионной бомбардировки, но снижает стойкость фоторезистивной маски.

При низкой скорости травления обеспечивалась высокая селективность, однако полный протрав оксидного слоя толщиной 2,5 мкм до кремния не достигался за отведенное время. Это критично для последующего DRIE, так как остаточный оксид будет препятствовать травлению кремния в открытых окнах. Оптимальный режим был найден при балансе параметров, обеспечивающем полный протрав SiO_2 . Селективность фоторезиста к SiO_2 в этом режиме составила 1:1,2, скорость травления — 250 нм/мин.

Исследование размеров и однородности пленок SiO_2 проводилось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Полученные структуры характеризуются вертикальным профилем стенок и точным переносом топологии с фоторезиста на слой SiO_2 .

В ходе экспериментальной работы были успешно отработаны режимы плазмохимического травления оксида кремния, что позволило сформировать жесткую маску высокого качества, обеспечивающие полный протрав оксидного слоя до кремния. Полученная маска готова для использования в процессе DRIE кремния. Разработанная технология решает проблему низкой селективности органических фоторезистов и открывает возможность изготовления микрофлюидных структур с высоким соотношением сторон. Таким образом, достигнута основная цель этапа формирования маски, что создаёт технологическую базу для последующего высокоаспектного травления кремниевых каналов и создания функциональных микрофлюидных устройств.

Литература

1. Laemer T., de Boer M., Jansen H. Ultra Deep Reactive Ion Etching of High Aspect-Ratio and Thick Silicon Using a Ramped-Parameter Process // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2020. Vol. 30. № 5. P. 055005.

2. Jansen H. V., de Boer M. J., Ma K., Girones M. Recent Advances in Reactive Ion Etching and Applications of High-Aspect-Ratio Microfabrication // *Microelectronic Engineering*. 2021. Vol. 235. P. 111488.
3. Панфилов Ю. В. Формирование функциональных слоёв: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. 150 с.
4. Hayashi S., Mizutani F., Abe Y., Kawamura H., Nagai H. SiO₂ Etching Using Inductively Coupled Plasma // *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*. 1998. Vol. 81. № 9. P. 21–29.
5. Selective and deep plasma etching of SiO₂: Comparison between different fluorocarbon gases (CF₄, C₂F₆, CHF₃) mixed with CH₄ or H₂ and influence of the residence time / Gaboriau F. [et al.] // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 2002. V. 20, № 4. P. 1514–1521.