

УДК 537:621.3.049.774

Повышение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния субмикронных интегральных схем

В.В. ЕМЕЛЬЯНОВ

В работе представлены решение для повышения селективности травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому диоксиду кремния.

Ключевые слова: реактивно-ионное травление, нитрид кремния, диоксид кремния, микроэлектроника.

The paper presents a solution for increasing the selectivity of etching of silicon nitride obtained by chemical vapor deposition with respect to thermal silicon dioxide.

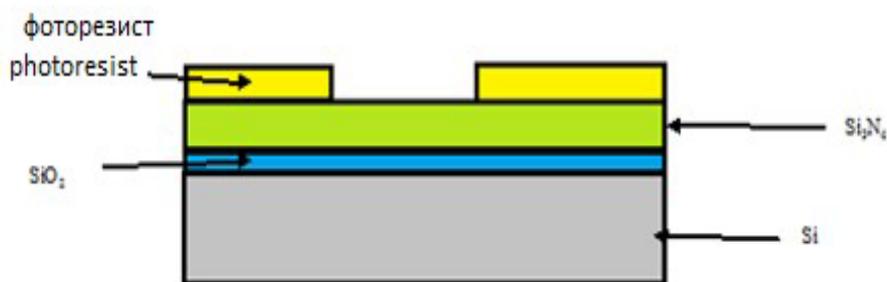
Keywords: reactive ion etching, silicon nitride, silicon dioxide, microelectronics.

Введение. Поставленная задача решается тем, что в способе формирования рисунка в пленке нитрида кремния, включающем формирование на полупроводниковой подложке с топологическими элементами интегральных схем пленки диоксида кремния, формирование пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, формирование фоторезистивной маски методами стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния во фторсодержащей плазме и удаление фоторезистивной маски, после формирования пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы проводят обработку полученной пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при экспозиции от 0,2 до 1,0 Дж/см².

Методика. Предлагаемое техническое решение заключается в снижении скорости травления диоксида кремния за счет повышения энергии химической связи в его решетке. Исходный монокристаллический кремний является достаточно прозрачным в ИК-области. Термообработанный кремний содержит большое количество точечных дефектов, являющихся центрами поглощения. Поэтому кремниевые пластины, на которых сформированы топологические элементы с использованием термообработки, практически непрозрачны. Все ИК-излучение при этом поглощается в поверхностной области. При использовании излучения большей длины волны кремниевая подложка соответственно прогревается на большую глубину. В этом случае для достижения сравнимого положительного эффекта требуется пропорциональное увеличение мощности излучателей, что экономически нецелесообразно.

Источники ближнего ИК-излучения широко распространены и используются в технологии микроэлектроники [1]. К ним, в частности, относятся галогенные кварцевые лампы, дающие максимум излучения на длине волны порядка 1,1 мкм. Невысокая глубина поглощающей области приводит к концентрации поглощенной энергии в активной области полупроводниковой структуры, не затрагивая объем кремниевой пластины. Однако в связи с высокой теплопроводностью кремния эта поглощенная энергия довольно быстро распределяется по всему объему, приводя к быстрому охлаждению поверхностного слоя. Поэтому импульс ИК-излучения должен быть достаточно мощным для достижения требуемого эффекта в активной области и достаточно коротким, чтобы предотвратить нагрев всего объема пластины. Только в этом случае достигается эффект релаксации напряжений с соответствующими структурно-фазовыми изменениями и эффект «закалки» генерируемых и высвобождаемых точечных дефектов, стабилизирующих достигнутое состояние.

Нагреву при реализации предлагаемого способа подвергаются пленка нитрида кремния, пленка диоксида кремния и приповерхностная область кремниевой подложки толщиной порядка 1 мкм (рисунок 1).

Рисунок 1 – Поперечное сечение сформированной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$

После прекращения ИК-импульса поглощенное этой частью структуры тепло в результате теплопроводности распределяется по всему объему подложки. Поскольку толщина подложки (600–800 мкм) неизмеримо больше нагреваемой области, а ее температура равна комнатной, вследствие высокой теплопроводности кремния происходит «закалка» пленок диоксида и нитрида кремния. В течение действия ИК-импульса происходит быстрая релаксация растягивающих напряжений в нитриде кремния за счет генерации и взаимодействия точечных дефектов, которая сопровождается соответствующей релаксацией сжимающих напряжений в его диоксиде. При этом нестабильный стишовит под воздействием высокой температуры в условиях существенного снижения напряжений переходит в более стабильный коэзит и другие полиморфные модификации SiO_2 , энергия химической связи в которых существенно выше. Охлаждение поверхностного слоя структуры за счет теплопроводности кремния после прекращения ИК импульса способствует фиксации образовавшихся фаз диоксида кремния до непосредственно процесса травления нитрида. Стойкость SiO_2 к воздействию фторсодержащей плазмы за счет повышения энергии химической связи повышается. Одновременно высвобождение большого количества точечных дефектов в Si_3N_4 в результате релаксации растягивающих напряжений способствует повышению скорости его травления. Таким образом, селективность травления нитрида кремния по отношению к его диоксиду существенно возрастает.

Выбор режимов обработки структур определяется наличием и полнотой протекания рассматриваемых полиморфных превращений. Минимальная длительность ИК-импульса определена экспериментально на основании реальных возможностей технологического оборудования по набору экспозиции. При длительности импульса менее 0,05 с для достижения требуемой экспозиции необходимо использовать специализированное оборудование высокой мощности, что экономически не обосновано. А при длительности импульса более 0,5 с вследствие высокой теплопроводности кремния происходит чрезмерный преждевременный разогрев объема полупроводниковой подложки, что не позволяет в должной мере осуществить «закалку» пленок.

При экспозиции менее $0,2 \text{ Дж/см}^2$ поверхностная область обрабатываемой структуры не нагревается до требуемой температуры полиморфных превращений во всем временном интервале предложенного способа, а при экспозиции более $1,0 \text{ Дж/см}^2$ в заданном временном интервале в структуре вероятно возникновение дефектов, связанных с особенностями релаксации механических напряжений.

Экспериментально установлено, что повышение селективности травления достигается после обработки структур хотя бы одним ИК-импульсом с заявленными характеристиками. При этом использование более 5 импульсов нецелесообразно как в связи с необоснованным увеличением длительности процесса, так и в связи с накоплением подложкой тепла и связанной с этим потерей эффекта «закалки».

Данный способ реализован при изготовлении интегральных схем типа IZ33567В. На пластинах 150 КДБ-12 (100) стандартными методами химической обработки, окисления, термообработки, ионного легирования, диффузии, фотолитографии, травления формировали области кармана. Затем на поверхности полученных структур формировали методом термического окисления поднитридный диоксид кремния толщиной 25 нм. Пленку нитрида кремния толщиной 200 нм осаждали из парогазовой фазы при температуре 780°C за счет реакции моносилана с аммиаком [2]. Импульсную ИК-обработку структур проводили на установке оптического отжига с модернизированным таймером, обеспечивающим получение ИК-импульсов с шагом 0,01 с. Режимы ИК-обработки приведены в таблице. Методами стандартной фотолитографии

на поверхности полученных структур формировали маску фоторезиста, после чего структуры подвергали плазмохимическому травлению во фторсодержащей плазме [3] на установке плазмохимического травления GIR 260S компании Alcatel, которая представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Установка реактивно-ионного травления GIR 260S

После удаления фоторезиста проводили контроль полученного фотолитографического рисунка на соответствие требованиям действующей на данное изделие технической документации. Селективность травления определяли на тестовых структурах, изготовленных в одном технологическом цикле с рабочими. По окончании технологического цикла изготовления структур проводили контроль их функционирования [4]–[5]. Результаты контроля приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что данный способ в совокупности отличительных признаков позволяет повысить селективность травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвратить появление микротрещин, что повышает качество фотолитографического рисунка и увеличивает выход годных кристаллов на операции контроля функционирования ИС [6].

Таблица 1 – Влияние режимов ИК-обработки на селективность травления нитрида кремния и выход годных ИС

п/п	Количество импульсов, шт.	Длительность импульса, с	Экспозиция, Дж/см ²	Селективность травления	Выход годных кристаллов, %	Примечание
1	1	0,2	0,5	3,3	85,3	
2	3	0,2	0,5	3,5	88,8	
3	5	0,2	0,5	3,6	90,1	
4	8	0,2	0,5	2,8	89,1	Необоснованное увеличение продолжительности процесса
5	3	0,03	0,5	2,7	72,6	Неполное полиморфное превращение
6	3	0,05	0,5	3,5	89,0	
7	3	0,50	0,5	3,7	92,6	
8	3	0,80	0,5	2,6	81,8	Перегрев структур, нивелирование «заковки»
9	3	0,2	0,1	2,5	78,2	Неполное полиморфное превращение
10	3	0,2	0,2	3,5	88,1	
11	3	0,2	1,0	3,7	91,0	
12	3	0,2	1,5	2,5	84,3	Перегрев структур, нивелирование «заковки»
13	прототип			2,2	68,7	Отдельные микротрещины

Заключение. Введение дополнительной операции инфракрасного (ИК) облучения формируемой структуры в соответствии с заявляемыми длительностью и экспозицией обеспечивает нагрев поверхностной области на глубину, соизмеримую с длиной волны используемого излучения ($\sim 0,7\text{--}2,0$ мкм), до температур порядка $700\text{--}1000^\circ\text{C}$. Это приводит к релаксации механических напряжений и полиморфным превращениям в структуре поднитридного диоксида кремния с повышением энергии химической связи. Стишовит, образовавшийся под действием высоких сжимающих напряжений в пленке SiO_2 и обладающий сравнительно невысокой энергией химической связи, превращается в коэсит и другие полиморфные модификации, энергия химической связи и устойчивость к воздействию фторсодержащей плазмы которых заметно выше. Таким образом, скорость травления пленки SiO_2 снижается, а селективность травления пленки Si_3N_4 по отношению к SiO_2 возрастает.

Литература

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко, В. В. Емельянов, С. И. Мадвейко [и др.] ; под ред. акад. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.
2. Турцевич, А. С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А. С. Турцевич, В. А. Емельянов. – Минск : «Интегралполиграф», 2007. – 224 с.
3. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. – М. : МГИЭИМ, 2003. – 48 с.
4. Емельянов, В. В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2020. – № 1. – С. 152–159.
5. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Вес. Нац. Акад. наук Беларуси. Сер., Физ-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176.
6. Абдуллаев, Д. А. Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния / Д. А. Абдуллаев, А. А. Зайцев, Е. А. Кельм // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 17–19.