

УДК 621.3.049.774

ФОРМИРОВАНИЕ РИСУНКА В ПЛЕНКЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

В.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, д-р техн. наук, проф. С.В. БОРДУСОВ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Формирование рисунка в пленке нитрида кремния включает нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, фоторезистивной маски методом стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния во фторсодержащей плазме и удаление фоторезистивной маски. Для повышения селективности травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвращения микротрещин и повышения качества фотолитографического рисунка после формирования пленки нитрида кремния проводят обработку пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при интенсивности от 0,2 до 1,0 Дж/см².

Ключевые слова: плазмохимическое травление, диоксид кремния, нитрид кремния, инфракрасное излучение.

Введение. Существующая технология формирования рисунка в пленке нитрида кремния включает плазмохимическую обработку газовой смесью, состоящей из хладона и кислорода при следующем соотношении компонентов: хладон – 7 л/ч, кислород – 0,6 л/ч, при рабочем давлении 20±5 Па и скорости травления 35±5 нм/мин. Методы формирования пленки и фотолитографического рисунка являются стандартными для микроэлектроники [1].

Данная технология предназначена для получения высоких скоростей травления, однородности и улучшения микрорельефа полученной структуры. Ее недостатком является значительная неопределенность режима травления, т.к. активным компонентом является хладон. Поскольку хладонов существует более 20 видов [2], отличающихся между собой количеством атомов углерода, водорода, а также количеством и конкретным типом атомов галогенов и строением углеродной цепи (цепные, циклические), то селективность травления по отношению к SiO₂ в данном случае остается величиной более чем неопределенной. При этом скорость травления зависит от множества технологических факторов, которые не всегда можно учесть, в связи с чем использование данной технологии является проблематичным.

Наиболее близким техническим решением является способ формирования рисунка в пленке нитрида кремния путем ее реактивно-ионного травления в плазме газовой смеси C₂H₂F₄-Ar-O₂ при следующем соотношении компонентов, об. %: 38–47% C₂H₂F₄, 4–8% O₂ и 45–58% Ar. При этом процесс травления пленки, не защищенной фоторезистом на поверхности SiO₂, ведут при плотности ВЧ мощности 0,2–0,7 Вт/см² и давлении в реакторе 1–8 Па [3] (рисунок 1).

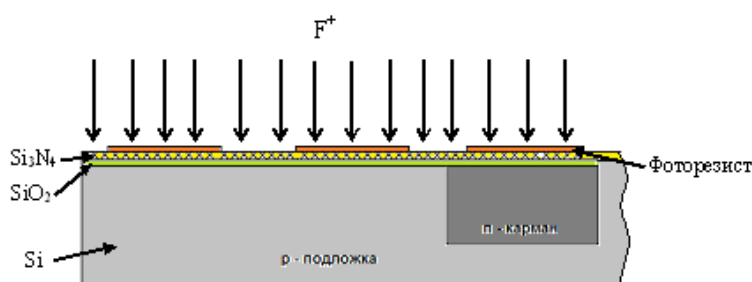


Рисунок 1. – Реактивно-ионное травление нитрида кремния

В этом случае достигнутая селективность травления нитрида кремния по отношению к его оксиду составляет 9:1. В современной технической литературе неизвестны случаи, когда указанная селективность травления достигалась по отношению к пленкам нитрида кремния, полученным химическим осаждением из парогазовой фазы. В то же время значения селективности, близкие к указанным, известны для пленок плазмохимического нитрида, используемого для пассивирующих и диэлектрических слоев [4]. В связи с тем, что особенности процесса формирования слоев диоксида и нитрида кремния на полупроводниковой подложке не раскрыты, но имеются конкретные указания на наличие этих слоев, следует предположить, что они являются стандартными для микроэлектронной технологии. Таким образом, процесс формирования рисунка в пленке нитрида кремния можно представить в виде следующей последовательности технологических операций: нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния, фоторезистивной маски методом стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния

в плазме газовой смеси $C_2H_2F_4$ -Ar- O_2 при соотношении компонентов, об. %: 38–47% $C_2F_4H_2$, 4–8% O_2 и 45–58% Ar, при плотности ВЧ мощности 0,2–0,7 Вт/см² и давлении в реакторе 1–8 Па. Зависимости скорости травления нитрида кремния и двуоксида кремния от давления смеси рабочих газов, содержания кислорода в смеси рабочих газов и мощности ВЧ генератора приведены на рисунках 2–4.

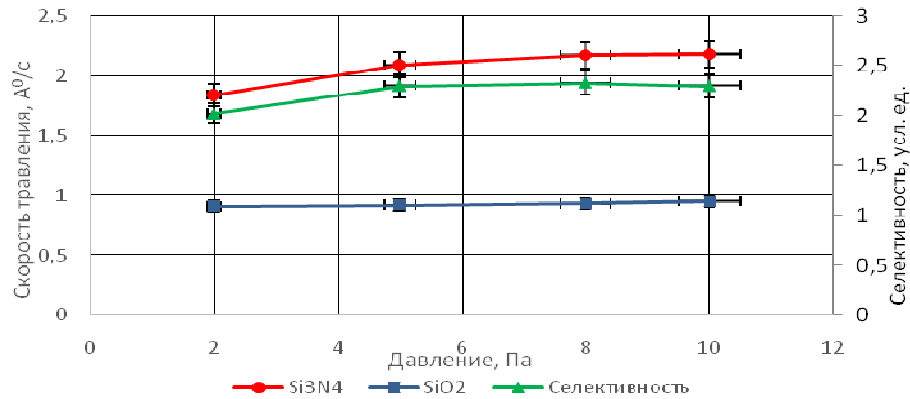


Рисунок 2. – Зависимости скорости травления от давления смеси рабочих газов

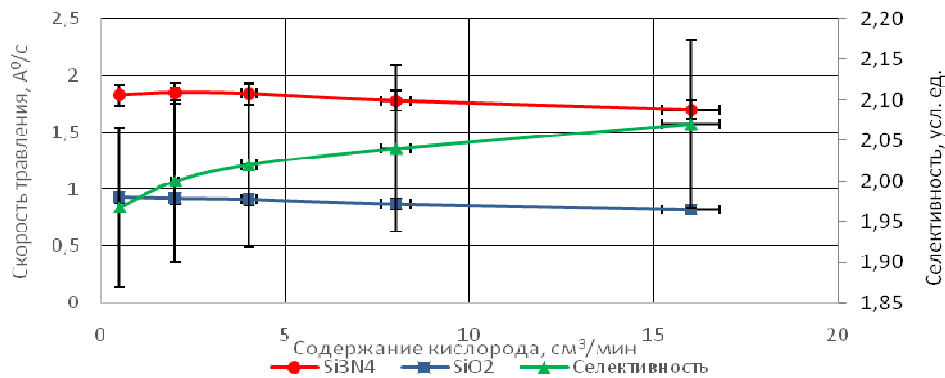


Рисунок 3. – Зависимость скорости травления от содержания кислорода в смеси рабочих газов

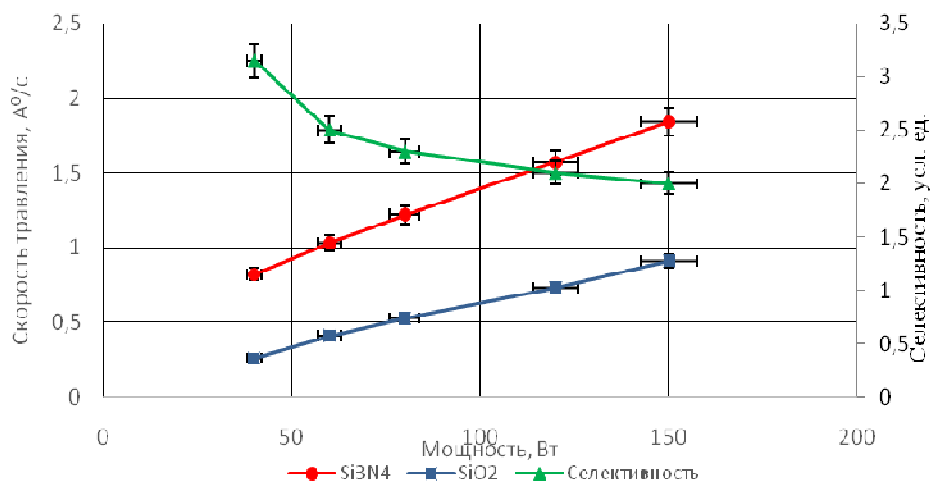
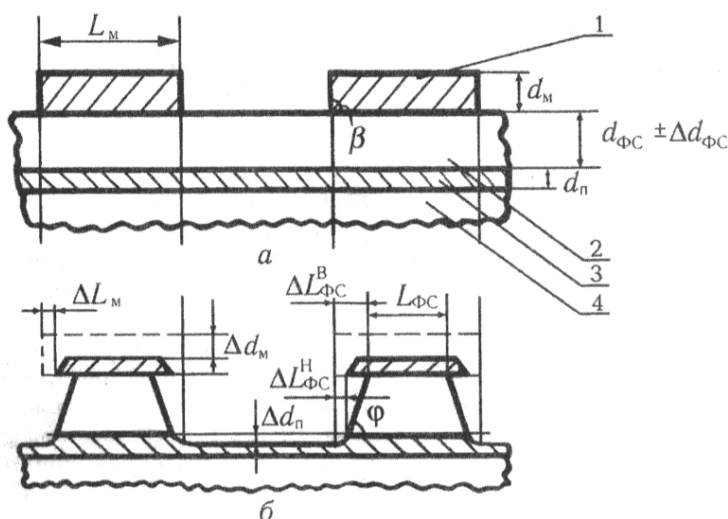


Рисунок 4. – Зависимость скорости травления от мощности ВЧ генератора

Как видно из рисунка 2, при повышении давления смеси рабочих газов растут скорости травления нитрида кремния и диоксида кремния, но из-за разницы в росте скорости наблюдается увеличение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния. Согласно рисунку 3, растет скорость травления нитрида кремния и снижается скорость травления диоксида кремния при увеличении содержания кислорода в смеси, что вызывает увеличение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния. По рисунку 4 – с повыше-

нием мощности ВЧ генератора возрастает скорость травления как нитрида кремния, так и диоксида кремния, но из-за более быстрого роста скорости травления диоксида кремния снижается селективность травления нитрида кремния при повышении мощности.

Операции формирования слоев диоксида кремния и его нитрида в данном случае следует рассматривать в связи с тем, что особенности характеристик этих слоев оказывают существенное влияние на решение поставленной задачи, а именно повышение селективности травления нитрида кремния по отношению к его диоксиду. Экспериментально установлено, что существующая технология характеризуется невысокой селективностью травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, к диоксиду кремния, используемому в качестве подслоя при формировании маски для локального окисления кремния. Достигнутые значения селективности составляют в лучшем случае 1,8:1. При этом существенно ухудшается профиль боковых стенок формируемого рисунка, вследствие низкой степени анизотропии травления появляется существенный подтрав под фоторезистивную маску, приводящий к невозможности линейных размеров формируемых топологических элементов интегральных схем (ИС) (рисунок 5).



1 – маска; 2 – функциональный слой; 3 – подслой; 4 – подложка

Рисунок 5. – Вид структуры до (а) и после (б) операции ПТ функционального слоя

Так, для пленки Si_3N_4 толщиной 200 нм величина бокового подтравки достигает 100 нм, что неприемлемо для ИС с субмикронными проектными нормами. Одним из известных способов повышения анизотропии травления является использование фторуглеродов с большим содержанием атомов углерода в молекуле, в частности замена CHF_3 на $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$. Однако при этом снижается скорость травления нитрида, т.к. полимер, образующийся из фторуглерода под воздействием плазмы, осаждается преимущественно на его поверхности, что повышает относительную скорость травления диоксида, но снижает селективность травления. Профиль сформированной структуры нитрида кремния представлен на рисунке 6.

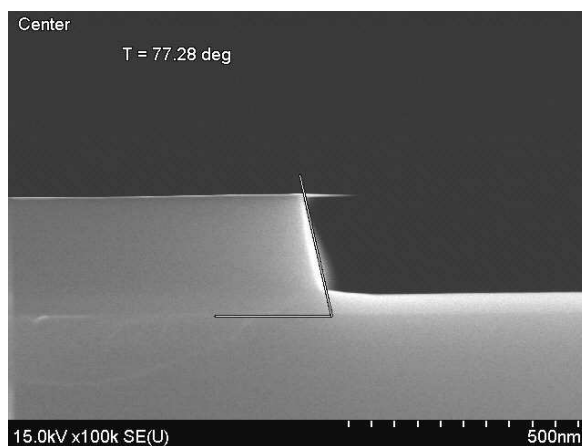


Рисунок 6. – Профиль сформированной структуры нитрида кремния

Повышение степени анизотропии травления может быть достигнуто повышением подаваемой ВЧ мощности, однако это приводит к другому нежелательному эффекту – возникновению канавок, иначе микротренчей (англ. *microtrench*), в диоксиде кремния вдоль вытравливаемого профиля в Si_3N_4 за счет отражения ионов, бомбардирующих поверхность, от боковых стенок вытравливаемого профиля. Наличие таких канавок при формировании локального оксида кремния приводит к повышению дефектности подложки по краю локального SiO_2 и ухудшению качества изоляции элементов ИС.

Таким образом, недостатком является невысокая селективность травления Si_3N_4 , полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому SiO_2 , которая приводит к невысокому качеству формируемого фотолитографического рисунка в пленке нитрида кремния и снижению выхода годных приборов.

Методика инфракрасного облучения. Основной задачей данной работы является повышение селективности травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому диоксиду кремния. Поставленная задача решается тем, что 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. Это приводит к снижению скорости травления диоксида кремния за счет повышения энергии химической связи в его решетке.

Введение дополнительной операции инфракрасного (ИК) облучения формируемой структуры обеспечивает нагрев поверхностной области на глубину, соизмеримую с длиной волны используемого излучения (0,7–2,0 мкм), до температуры 700–1000 °С. 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 [3].

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. 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 этом подвергаются пленки нитрида кремния, диоксида кремния и приповерхностная область кремниевой подложки толщиной порядка 1 мкм. 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 коэсит 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 [6]. 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 Дж/см² поверхностная область обрабатываемой структуры не нагревается до требуемой температуры полиморфных превращений во всем временном интервале заявляемого способа, а при экспозиции более 1,0 Дж/см² в заданном временном интервале в структуре вероятно возникновение дефектов, связанных с особенностями релаксации механических напряжений.

Результаты исследования и их обсуждение. 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».

Предложенный способ реализовали при изготовлении ИС 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 °С за счет реакции моносилана с аммиаком. 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 на установке плазмохимического травления GIR 260S компании Alcatel (рисунок 7).



Рисунок 7. – Установка ПХТ GIR 260S компании Alcatel

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. Результаты контроля приведены в таблице.

Как видно из таблицы, предложенный способ 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.

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

№ партии	Количество импульсов	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 «закалки»
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 «закалки»
13	Существующая технология			2,2	68,7	Отдельные микротренчи

Заключение. Поставленная задача повышения селективности травления нитрида кремния решена тем, что в процессе формирования рисунка в пленке нитрида кремния, включающем нанесение на полупроводниковую подложку с топологическими элементами пленок диоксида кремния и нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, фоторезистивной маски методом 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 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

Это приводит к снижению скорости травления диоксида кремния за счет его полиморфного превращения в модификацию с большей энергией химической связи, а именно из стишовита в коэсит, повышает селективность травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвращает появление микротренчей и в конечном итоге повышает качество фотолитографического рисунка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин, Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин., Л.А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2010. – 528 с.
2. Обижаев, Д.Ю. Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии устройств нано- и микросистемной техники / Д.Ю. Обижаев. – М. : МАТИ, 2008. – 151 с.
3. Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, В.А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2007. – 224 с.
4. 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.
5. Формирование стабильной дефектной структуры в кремниевых диодах генератора шума/ В.В. Емельянов [и др.] // Изв. НАНБ. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – № 2. – С. 145–153.
6. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. А.П. Достанко. – Минск : Беларус. навука, 2020. – 260 с.

REFERENCES

1. Berlin, Ye.V. & Seydman, L.A. (2010). *Ionno-plazmennyye protsessy v tonkopenochnoy tekhnologii* [Ion-plasma processes in thin-film technology]. Moscow: Tekhnosfera. (In Russ.).
2. Obizhayev, D.YU. (2008). *Struktura i svoystva funktsional'nykh sloyev nitrida kremniya na razlichnykh stadiyakh ikh formirovaniya v tekhnologii ustroystv nano- i mikrosistemnoy tekhniki* [Structure and properties of silicon nitride functional layers at various stages of their formation in the technology of nano- and microsystem technology devices]. Moscow: MATI. (In Russ.).
3. Turtsevich, A.S. & Yemel'yanov, A.S. (2007). *Formirovaniye iz gazovoy fazy funktsional'nykh sloyev integral'nykh mikroskhem* [Formation of functional layers of integrated circuits from the gas phase]. Minsk: Integralpoligraf. (In Russ.).
4. Abdulayev, D.A., Zaytsev, A.A. & Kel'm, Ye.A. (2014). *Selektivnoye plazmokhimicheskoye travleniye nitrida kremniya otноситel'no oksida kremniya* [Selective plasma-chemical etching of silicon nitride relative to silicon oxide]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology], (2), 17–19. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Yemel'yanov, V.V., Yemel'yanov, V.A., Baranov, V.V. & Buslyuk, V.V. (2021). *Formirovaniye stabil'noy defektnoy struktury*

- v kremniyevykh diodakh generatora shuma [Formation of a stable defect structure in silicon diodes of a noise generator]. *Izvestiya NANB. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk [Izvestiya NASB. Series of physical and technical sciences]*, (2), 145–153. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Dostanko, A.P., Avakov, S.M., Golosov, D.A., Yemel'yanov, V.V., Zavadskiy, S.M., Kolos, V.V. ... Shershnev, Ye.B. (2020). In A.P. Dostanko (Eds.) *Innovatsionnyye tekhnologii i oborudovaniye submikronnoy elektroniki [Innovative technologies and equipment for submicron electronics]*. Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ.).

Поступила 23.03.2022

PATTERN FORMATION IN SILICON NITRIDE FILM

V. EMELYANOV, S. BORDUSOV

The formation of a pattern in a silicon nitride film includes the application of a silicon dioxide film, a silicon nitride film by chemical vapor deposition from a vapor phase, a photoresistive mask by the method of standard photolithography, reactive-ion etching of silicon nitride in a fluorine-containing plasma, and the removal of a photoresistive mask on a semiconductor substrate with topological elements. To increase the selectivity of silicon nitride etching with respect to dioxide, prevent microtrenching and improve the quality of the photolithographic pattern after the formation of a silicon nitride film, the film is treated with 1–5 pulses of near infrared radiation with a duration of 0,05 to 0,5 s at an intensity of 0,2 to 1,0 J/cm².

Keywords: *plasma chemical etching, silicon dioxide, silicon nitride, infrared radiation.*