

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

© 2016 г. М.А. МАХИБОРОДА, Е.Э. ГУСЕВ, Т.А. ГРЯЗНЕВА

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва
e-mail: tanushkaz5@mail.ru

Аннотация

Исследовано влияние температурной обработки на планарность поверхности структуры Si/SiO₂. Апробирована методика измерения механических напряжений в плёнке плазмохимического SiO₂ на кремниевой пластине. Определен оптимальный режим термообработки.

Введение

В настоящее время, в области современной микро- и нанoeлектроники одной из актуальных проблем является создание миниатюрных рентгеновских источников излучения, обладающих низким энергопотреблением, а также возможностью вариации частоты излучения. Это связано с совершенствованием рентгеновских методов и широким диапазоном практических применений в различных областях науки и техники, медицины, аналитическом оборудовании, системах безопасности. Этим обусловлена необходимость непрерывного улучшения его основного элемента – рентгеновской трубки. Решение данной проблемы возможно за счет использования автоэмиссионных катодов.

Постановка задачи

В работе [1] предложен технологический маршрут создания катодно-сеточного узла (КСУ), состоящего из автоэмиссионного катода и сеточных управляющих электродов, позволяющий изготовление матрицы автоэмиссионных катодов посредством группой кремниевой технологии. Особенность представленного маршрута создания КСУ заключается в возможности проведения вскрытия самосовмещенных эмиттерных областей в сеточном слое без дополнительных дорогостоящих операций фотолитографии либо химико-механической полировки.

Одним из ключевых параметров, который существенно влияет на качество проведения операции вскрытия эмиттерных областей, является механическое напряжение.

Механические напряжения могут приводить к гофрированию, растрескиванию и отслаиванию нанесенных пленок, что может привести к деформации структуры КСУ. Кроме того, с увеличением стрелы прогиба образца уменьшается равномерность осаждения плёнки. В связи с этим необходимо постоянное совершенствование способов контроля и прогнозирования механических напряжений.

Целью данной работы было исследовать влияние температурной обработки на рельеф поверхности и определить величину механических напряжений.

Эксперимент

На пластину монокристаллического кремния с ориентацией (100), диаметром 150 мм и толщиной 670 мкм осажден 1.5 мкм слой PECVD SiO₂ с использованием газа силана и закиси азота. После каждой технологической операции осуществляли изменение рельефа посредством оптического профилометра Veeco WykoNT 9300 в двух

направлениях перпендикулярно или параллельно базовому срезу. Образец последовательно подвергали температурным воздействиям. Вначале структуру Si-SiO₂ поместили в камеру холода при температуре -70°С в течение 6 часов. Затем была проведена термообработка в течение 30 минут при температуре 700°С в атмосфере 5% водорода и 95% азота (формер газ). После этого, был сделан быстрый термический отжиг при температуре 1150°С в атмосфере азота. Время активной стадии составило 15 секунд.

Профиль поверхности в направлении перпендикулярном базовому срезу показан на рис. 1.

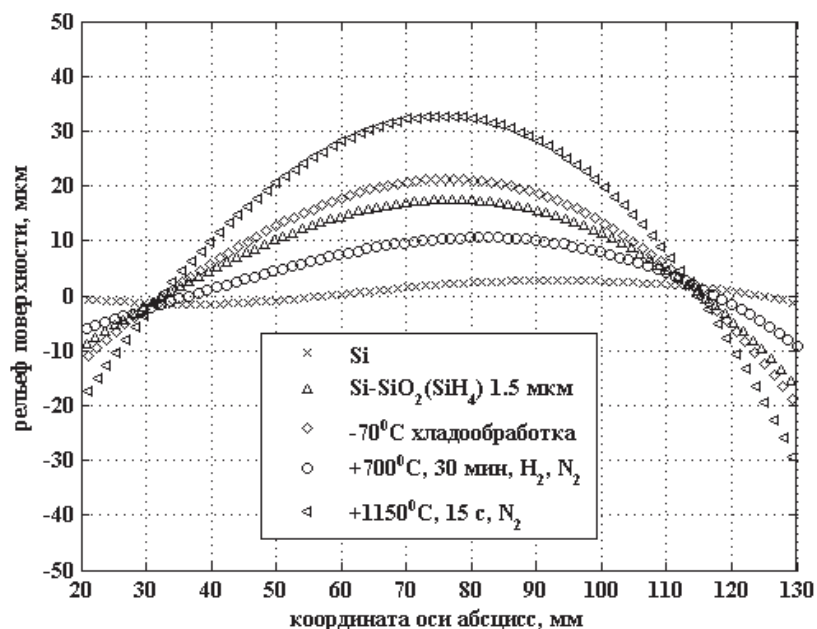


Рис. 1. Профиль поверхности в перпендикулярном базовому срезу направлении после проведение различных термообработок.

Из графика можно заключить, что после осаждения плёнки оксида кремния пластина стала более изогнутой. Также заметно, что наилучшим режимом обработки образца является проведение отжига в формер газе (минимальная стрела прогиба). Как известно, что большой вклад вносят поверхностные дефекты [2]. Кроме того, глубина проникновения в процессе диффузии зависит от размера и массы атомов. Учитывая, что атомы H₂ достаточно лёгкие (атомная масса 1.0078) и имеют малый размер, то механизм диффундирования к границе Si/SiO₂ через 1.5 мкм плёнку является очевидным. Тем самым, образуются Si-H связи, в результате чего уменьшается величина стрелы прогиба. Увеличение стрелы прогиба после быстрого отжига объясняется тем, что при высоких температурах связи Si-H и N-H разрываются, и атомы водорода покидают структуру [3].

Расчёт механических напряжений проводили по ранее разработанной методике [4,5] с использованием формулы (1) Стони:

$$\sigma_f = \frac{E_s \cdot d_s^2}{6(1-\nu_s)} \cdot \frac{1}{d_f} \cdot \frac{1}{R_{after}}, \quad (1)$$

где σ_f – величина механических напряжений, вносимых проведением технологической операции, E_s – модуль Юнга материала подложки, d_s – толщина пластины, ν_s – коэффициент Пуассона подложки, d_f – толщина нанесенного слоя, R_{after} – радиус кривизны после проведения технологической операции.

В результате получали величину текущих напряжений в локальной выбранной области, т.е. распределение σ_f по пластине пластины в выбранном направлении (рис. 2). При расчётах механических напряжений по формуле (1) величина постоянной двухосновного модуля ($E/(1-\nu_s)$) в кристаллографической плоскости образца (100) составляет 180,5 ГПа [6].

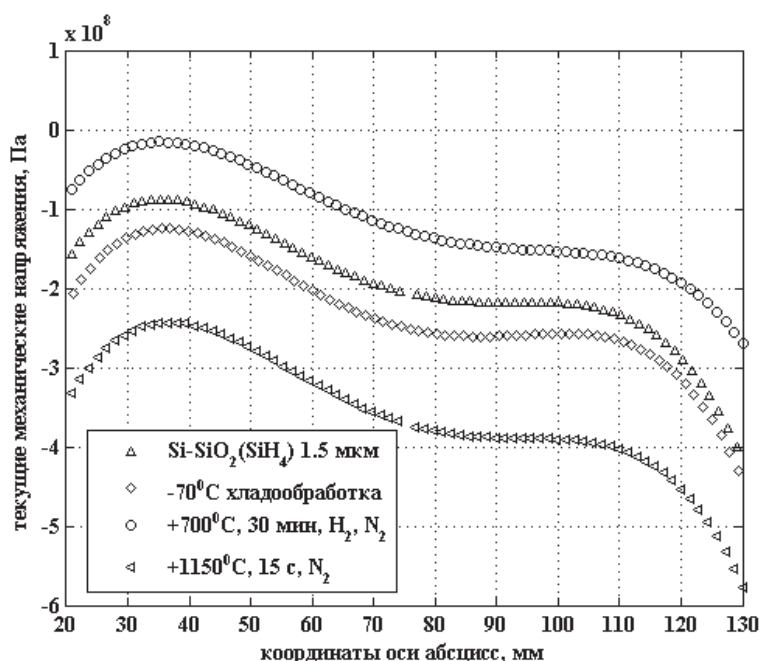


Рис. 2. Распределение механических напряжений по пластине.

Из рис. 2 видно, что в плёнке SiO_2 присутствуют сжимающие напряжения. При этом минимальное значение механического напряжения по модулю составляет около 100 МПа.

Вывод

Было выявлено, что наилучшим режимом термообработки образца является проведение отжига в формер газе, так как уровень напряжения в плёнке плазмохимического оксида кремния и величина стрелы прогиба образца минимальны.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП "МСТ и ЭКБ" при поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения № 14.578.21.0188, уникальный идентификатор RFMEFI57816X0188.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махиборода М.А., Гусев Е.Э., Преображенский Р.Ю., Грязнева Т.А. Численное моделирование технологического процесса формирования катодного узла с автоэмиссионным эмиттером на основе кремния // Микро- и нанотехника нового поколения: сб. науч. тр. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С. 79–81.
2. Астрова Е.В., Ратников В.В., Ременюк А.Д., Шульпина И.Л. Исследование деформаций и дефектов кристаллической решетки, возникающих при окислении макропористого кремния // Физика и техника полупроводников. – 2002. – том 36, вып. 9. – С. 1111-1121.
3. Feridun Ay. Silicon oxynitride layers for applications in optical waveguides. – 2000. – 126 p.
4. Дюжев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В.. Методика измерения механических напряжений в тонких плёнках на пластине с помощью оптического профилометра. Известия Вузов. Электроника. 2016, №4, с. 367–372.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611518. Программа анализа рельефа с целью расчета величины кривизны поверхности в выбранном направлении на кремниевой пластине. / Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Дедкова А.А., Чиненков М.Ю. Действует с 04.02.2016.
6. Sinha A.K., Levinstein H.J., Smith T.E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN , Si_3N_4 , and SiO_2) on Si substrates/ Journal of Applied Physics. – 1978. – 2423 p.