

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY

УДК 531.78

Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра

Н.А. Дюжев¹, А.А. Дедкова¹, Е.Э. Гусев¹, А.В. Новак²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²ОАО «Ангстрем» (г. Москва)

Method for Measurement of Mechanical Stresses in Thin Films on Wafer Using an Optical Profilometer

N.A. Djuzhev¹, A.A. Dedkova¹, E.E. Gusev¹, A.V. Novak²

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow

²JSC «Angstrom», Moscow

Разработан и реализован алгоритм анализа рельефа для расчета механических напряжений в выбранном направлении на пластине в программной среде Matlab. Методика предусматривает возможность проведения измерений в каждой точке образца, что обеспечивает наглядное представление данных и позволяет получить распределение механических напряжений по поверхности пластины. С помощью данной методики измерены механические напряжения в пленке плазмохимического нитрида кремния на кремниевой подложке. Проведен анализ в среде приборно-технологического моделирования TCAD.

Ключевые слова: механические напряжения; кривизна поверхности; моделирование; TCAD.

An algorithm of the relief analysis for the purpose of calculating the mechanical stresses in selected direction on a wafer in the form of a program package Matlab has been designed and implemented. The method provides the possibility of measurement at each point of the sample that delivers a visual picture of the data to obtain the distribution of mechanical stresses on the wafer surface. Using this technique the measurement of mechanical stresses in the film of plasma chemical silicon nitride has been conducted. The analysis in the environment of the device-technological simulation TCAD has been performed.

Keywords: mechanical stresses; curvature of the surface; simulation; TCAD.

Введение. В настоящее время технологии микромеханики, или микроэлектромеханических систем (МЭМС), быстро развиваются [1, 2]. Величина механических напряжений при изготовлении ИС и МЭМС-устройств на Si-пластинах оказывает сильное влияние на надежность и динамические характеристики [3, 4].

Деформация возникает при градиенте температуры в структуре вследствие разницы между температурными коэффициентами линейного расширения различных слоев. На деформацию влияют эффект магнитострикции, обратный пьезоэлектрический эффект или результат действия внешних сил. Напряжение растяжения в пленке структуры, как правило, приводит к растрескиванию пленки или отслаиванию. Однако наличие напряжения может повысить предел упругости системы, предел выносливости, коррозионно-механическую стойкость, быстродействие транзистора. Поэтому важно правильно оценивать и контролировать величину напряжений, чтобы не только избежать поломки прибора [3], но и улучшить параметры изделия.

Постановка задачи. Существуют различные методики измерения механических напряжений, основанные на деформации пластины, использовании колец Ньютона, формулы Стони, спектроскопии комбинационного рассеяния света. Методики делятся на прямые (рентгеновская дифрактометрия) и косвенные (например, расчет радиуса кривизны [3]).

В настоящей работе используется формула Стони [3], согласно которой механические напряжения рассчитываются по изгибу пластины с учетом изменения радиуса кривизны локализованной части поверхности пластины:

$$\sigma_f = \frac{E_s d_s^2}{6(1-\nu_s)} \frac{1}{d_f} \left(\frac{1}{R_{\text{п}}} - \frac{1}{R_{\text{д}}} \right), \quad (1)$$

где σ_f – величина механических напряжений, вносимых при проведении технологической операции; E_s – модуль Юнга материала пластины; d_s – толщина пластины; ν_s – коэффициент Пуассона материала пластины; d_f – толщина нанесенного слоя; $R_{\text{п}}$, $R_{\text{д}}$ – радиус кривизны поверхности пластины после и до проведения технологической операции соответственно.

Одним из способов определения радиуса кривизны (рельефа) является сканирование поверхности пластины оптическим профилометром. При расчете напряжений в программном обеспечении для современных приборов часто заложено упрощение, которое заключается в том, что радиус кривизны гораздо больше расстояния между соседними точками [4]. Следовательно, при увеличении длины шага сканирования возникает вероятность ошибки. Также программное обеспечение современных оптических профилометров обычно не предоставляет возможности автоматического расчета радиуса кривизны для всех точек профиля поверхности. Поэтому возникает необходимость разработки специализированной методики.

Разработанная методика включает проведение измерений с помощью бесконтактного оптического профилометра и интерпретацию полученных данных: расчет радиуса кривизны поверхности исходя из модельного представления и последующее вычисление значения механических напряжений в локально выбранной области. В результате достигается наглядное представление полученных данных.

На рис.1 представлена геометрия поверхности рабочей пластины.

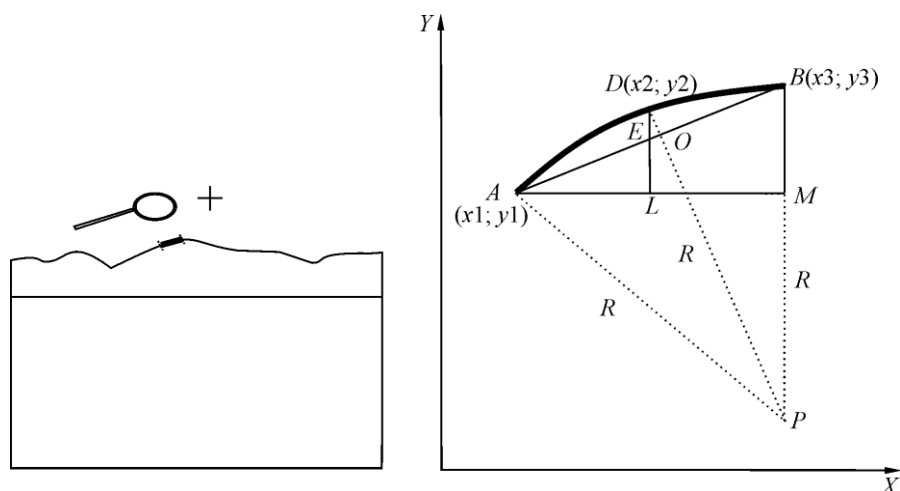


Рис. 1. Геометрия поверхности для расчета радиуса кривизны

В результате тривиальных геометрических преобразований получена формула для расчета радиуса кривизны поверхности:

$$R = \left[\left\{ \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1) \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}\right)\right)} \right\}^2 + \left\{ \left\{ (y_2 - y_1) - \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} \right\} \cdot \sin\left\{ \arctg\left(\frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}\right) \right\} \right\}^2 \right] \times (2) \\ \times \left[2 \cdot \left\{ (y_2 - y_1) - \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} \right\} \cdot \sin\left\{ \arctg\left(\frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}\right) \right\} \right]^{-1}.$$

Достоверность формулы (2) проверена в программной среде SolidWorks. Построена дуга ADB (см. рис.1) с произвольными значениями координат точек (x_i, y_i) . Далее рассчитан радиус R по формуле (2). После этого проведены отрезки BP , AP длиной R так, что длина отрезков AP , DP и BP одинаковая. Замкнутость полученного контура $ADBP$ доказывает достоверность формулы (2).

Программирование. Алгоритм вычисления локального радиуса кривизны поверхности по формуле (2) разработан в программной среде Matlab. Алгоритм состоит из нескольких этапов. На первом этапе находится полиномиальная функция, которая максимально корректно описывает полученный рельеф. Затем сравниваются значения двух ближайших точек рельефа. Если функция, описывающая рельеф поверхности, возрастает, то проводится вычисление по формуле (2). В случае убывания функции знак рассчитанной величины изменяется на противоположный. В завершение значения радиусов подставляются в формулу (1) для расчета механических напряжений.

На заключительном этапе программирования составляется алгоритм вычисления механических напряжений по формуле (1), исходя из рассчитанных значений радиуса кривизны поверхности.

Эксперимент. На лицевую сторону Si-пластины с кристаллографической ориентацией (100), диаметром 100 мм и толщиной 460 мкм осаждался плазмохимический слой нитрида кремния Si_3N_4 . Пленка получена методом химического парофазного осаждения. Процесс проводился по технологии PECVD из газовой смеси силана SiH_4 , аммиака NH_3 и закиси азота N_2O в трубчатом горизонтальном реакторе (ASM-PECVD). Температура осаждения составляла 350 °С, давление 1,4 торр, время осаждения 55 мин. Толщина осажденной пленки определялась рефлектометром Leitz MPV-SP и

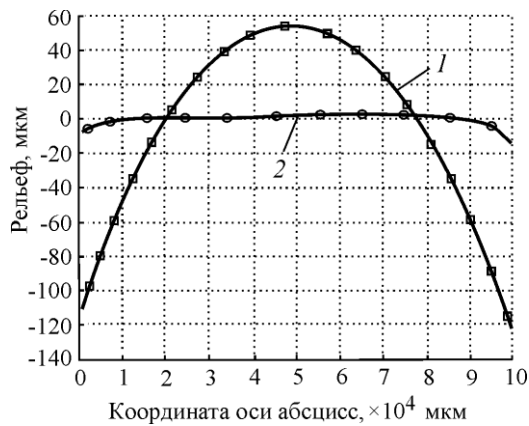


Рис.2. Профиль поверхности в параллельном базовому срезу направлении: 1 – после осаждения; 2 – до осаждения

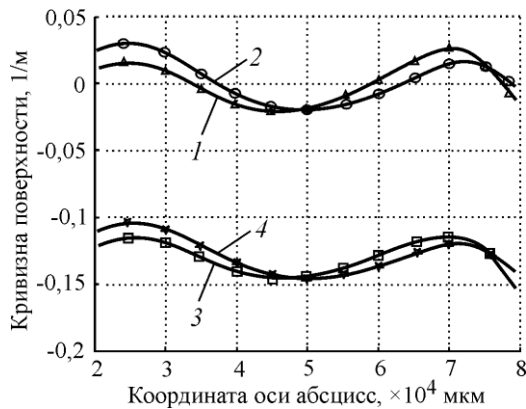


Рис.3. Результат вычисления кривизны поверхности до и после осаждения слоя: 1, 2 – перпендикулярно и параллельно базовому срезу до осаждения; 3, 4 – перпендикулярно и параллельно базовому срезу после осаждения

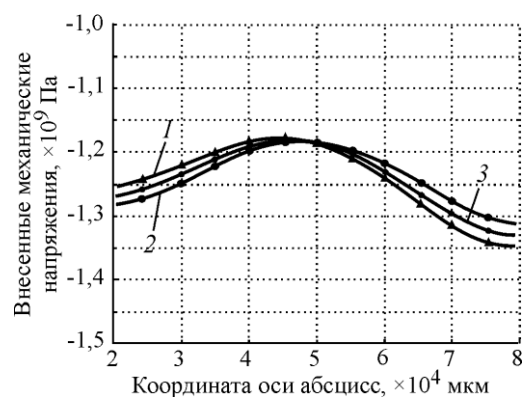


Рис.4. Распределение механических напряжений по пластине: 1, 2 – перпендикулярно и параллельно базовому срезу; 3 – среднее значение

составила 672 нм. Рельеф измерялся в двух направлениях: параллельно и перпендикулярно базовому срезу до и после осаждения. Рельеф поверхности определялся с помощью бесконтактного оптического профилометра Veeco Wyko NT9300. Результаты измерения рельефа поверхности в параллельном базовому срезу направлении представлены на рис.2.

Из представленного графика можно сделать вывод, что после осаждения пленки Si_3N_4 пластина стала более изогнутой. Учитывая, что в исходной пластине монокристаллического кремния с ориентацией (100) имеются незначительные положительные механические напряжения, величина напряжений увеличилась. Для состояния равновесия системы подложка–пленка результирующая силы сжатия–растяжения должна быть равна нулю, поэтому в пленке Si_3N_4 отрицательные сжимающие напряжения равны по величине напряжениям в кремнии.

С помощью разработанного алгоритма в Matlab выполнен расчет кривизны поверхности до и после плазмохимического осаждения пленки. Результаты представлены на рис.3. Видно, что после осаждения пленки Si_3N_4 кривизна поверхности возросла по модулю.

С помощью алгоритма по формуле (1) определены механические напряжения (рис.4), внесенные операцией плазмохимического осаждения 672-нм пленки SiN_x . Значение постоянной двухосновного модуля упругости $E/(1-\nu_s)$ в кристаллографической плоскости образца (100) составляет 180,5 ГПа [4, 5].

Из графика на рис.4 видно, что максимальное напряжение на пластине составляет $-1,35$ ГПа. Результаты позволяют локализовать области с максимальной величиной напряжения. Сравнивая значения полученного максимального напряжения и критического напряжения для данного материала, можно предотвратить растрескивание структуры, например провести термообработку [6] структуры с

целью минимизации напряжений. Среднее значение напряжения по пластине в целом составляет $-1,25$ ГПа, что по порядку величины сопоставимо с приведенным в [3, 4, 7, 8].

С целью определения природы возникновения механических напряжений проводился сравнительный анализ полученных с помощью разработанной методики значений механических напряжений и значений термических напряжений, рассчитанных в среде TCAD.

Численное моделирование термического напряжения в среде TCAD. Проведено моделирование термического напряжения в пленке Si_3N_4 на кремниевой подложке с кристаллографической ориентацией (100) на базе пакета программ приборно-технологического моделирования TCAD.

В программной среде TCAD в разделе `sprocess` не предусмотрена возможность задания модуля Юнга E и коэффициента Пуассона u пленки. Однако, присвоив значения модуля объемной упругости K и модуля сдвига G материала пленки, можно рассчитать требуемые величины, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} K = \frac{E}{3(1-2 \cdot u)}, \\ G = \frac{E}{2(1+u)}. \end{cases} \quad (3)$$

Параметры материала пленки взяты из библиотеки TCAD: $K = 3,240 \cdot 10^{11}$ Па, $G = 1,495 \cdot 10^{11}$ Па. Решая систему уравнений (3), получаем значение модуля Юнга для Si_3N_4 , равное $3,888 \cdot 10^{11}$ Па. При вычисления в TCAD разница температурных коэффициентов линейного расширения $\Delta\alpha$ материалов Si_3N_4 и Si с кристаллографической ориентацией (100) принималась равной $0,9 \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ [3]. Разница температуры осаждения пленки Si_3N_4 и измерения ΔT равна 330 $^\circ\text{C}$. В результате моделирования получено значение напряжения в пленке Si_3N_4 , равное 110 МПа.

С целью анализа корреляции результатов численного моделирования с данными аналитического расчета вычислено значение термического напряжения в пленке SiN_x по формуле [9]:

$$\sigma_{\text{терм}} = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T,$$

которое составило 115 МПа.

Анализ результатов численного моделирования и аналитических расчетов показал хорошую их сопоставимость. При этом полученные с помощью моделирования значения термических напряжений существенно меньше значений механических напряжений, полученных экспериментально с помощью описанной методики. Разница с экспериментальными данными свидетельствует о многогранной природе механических напряжений [10], которая включает в себя термические напряжения, но не ограничивается ими.

Заключение. Представленная методика позволяет проводить анализ рельефа поверхности, расчет механических напряжений, а также получить распределение механических напряжений по поверхности пластины. Анализ результатов показал объективность и достоверность расчетов. Данная методика может использоваться для выбора режимов осаждения материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0059 от 08.04.2013 г.) с использованием оборудования ЦКП МСТ и ЭКБ МИЭТ.

Литература

1. Моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа / **В.А. Беспалов, И.А. Васильев, Н.А. Дюжнев и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – №3(107). – С. 50–56.
2. **Дюжнев Н.А., Королёв М.А., Катеев М.В., Гусев Е.Э.** Моделирование зависимости выходных характеристик первичного преобразователя датчика потока мембранного типа от его конструктивных параметров // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 6. – С. 644–647.
3. **Veikko Lindroos, Markku Tilli, Ari Lehto, Teruaki Motooka.** Handbook of silicon based mems materials and technologies. – Burlington, Elsevier, 2010.
4. **Laconte J., Flandre D., Raskin J.-P.** Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS Co-integration. – Dordrecht: Springer, 2006. – 290 p.
5. **Sinha A. K., Levinstein H. J., Smith T. E.** Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates // J. of Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49. – P. 2423.
6. Способ обработки пластин кремния / **Н.И. Петуров, В.Д. Скупов, Л.А. Синегубко и др.** // Патент России № 2105381. – 1998.
7. **Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А.** Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1. – М.: БИНОМ, 2007.
8. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку / **И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.Б. Высоцкий и др.** // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 4. – С. 29–32.
9. Физика тонких пленок. Т. 3. / **Под ред. Г. Хассы, Р.Э. Туна:** пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 331 с.
10. **Майссел Л., Глэнз Р.** Технология тонких плёнок. Т. 2: пер. с англ. – М.: Советское радио, 1977.

Статья поступила
11 декабря 2015 г.

Дюжнев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, директор научно-технологического центра «Нано- и микросистемной техники» (НТЦ «НМСТ») МИЭТ. *Область научных интересов:* МЭМС- и НЭМС-технология, вакуумная и плазменная электроника, СВЧ-электроника, нано- и микроструктуры.

Дедкова Анна Александровна – инженер НТЦ «НМСТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* эллипсометрия, оптика, МЭМС, профилометрия, углеродные нанотрубки, нанокompозиты.

Гусев Евгений Эдуардович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ, инженер НТЦ «НМСТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* МЭМС- и НЭМС-технология, расчет механических напряжений, моделирование в среде TCAD, тепловые сенсоры расхода газа. **E-mail: bubbledouble@mail.ru**

Новак Андрей Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Ангстрем» (г. Москва). *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, перспективные технологические процессы микро- и наноэлектроники, атомно-силовая микроскопия.