

УДК 621.3.049.772

ПЛЕНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ С НИЗКИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.С. КОВАЛЬЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 9 июля 2008

Рассмотрены особенности технологии, позволяющей получать пленки нитрида кремния, имеющие низкие значения остаточных механических напряжений (170–200 МПа) с целью их применения в качестве мембран микроэлектромеханических систем. Получены экспериментальные зависимости остаточных механических напряжений пленок нитрида кремния от их толщины и соотношения используемых в процессе осаждения газов — дихлорсилана и аммиака.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, механические напряжения, диэлектрические пленки нитрида кремния, дихлорсилан, аммиак.

Введение

Последнее десятилетие характеризуется появлением и быстрым развитием нового класса изделий микроэлектромеханических систем (МЭМС). Применение технологий формирования объемных структур позволяет получать изделия микросистемной техники с высокими техническими характеристиками (масс-габаритными, весовыми, энергетическими и др.). В настоящее время для производства МЭМС, имеющих трехмерную структуру в виде мембран и балок необходимо решить проблему получения прочных, с небольшими значениями остаточных механических напряжений диэлектрических и полупроводниковых пленок, составляющих мембрану.

Для получения на изделиях МЭМС низкого энергопотребления, высокой чувствительности и обеспечения их быстродействия они, как правило, изготавливаются на тонких мембранах из нитрида кремния. Диэлектрические пленки нитрида кремния используются как структурные компоненты в МЭМС благодаря своим высоким электрическим и механическим характеристикам. Такие пленки используются как стойкие маски при химическом и плазменном травлении, как материал диэлектрической мембраны и изолятор для поликристаллической мембраны [1].

Пленки нитрида кремния, осаждаемые методом химического вакуумного осаждения при пониженном давлении (LPCVD), обладают механическими напряжениями растяжения различной степени в зависимости от режимов нанесения, в первую очередь от температуры осаждения, рабочего давления и состава газовой среды [2]. Стандартные же процессы микроэлектроники не позволяют получить полупроводниковые и диэлектрические пленки, составляющие мембраны и балки датчиков, с необходимыми механическими свойствами.

Необходимо получить пленки нитрида кремния с механическими напряжениями 170–200 МПа, которые возможно использовать в качестве диэлектрических мембран МЭМС [3, 4], что требует существенной оптимизации процесса их получения. Достижение низких значений механических напряжений в пленках нитрида кремния является важной задачей не только применительно к МЭМС, но и для целого ряда других изделий микроэлектроники, а именно:

- тонкопленочных транзисторов, например, на основе ZnO с двойным подзатворным диэлектриком оксид / нитрид кремния [5], для которых предельно важной задачей является достижение высокой воспроизводимости процесса и стабильности формируемых структур;
- МНОП-структур, являющихся основой ячеек памяти с плавающим потенциалом затвора [6], которые могут иметь до двух слоев нитрида в многослойном подзатворном диэлектрике;
- конденсаторов в составе интегральных микросхем;
- маскирующих покрытий в технологии полупроводниковых приборов и микросхем на основе GaAs;
- интегральных транзисторов с напряженным кремнием [7], для различных вариантов которых требуется иметь пленки нитрида кремния с механическими напряжениями, как растяжения (около 130 МПа), так и сжатия (до 1000 МПа) и др.

Помимо изделий микроэлектроники наносимые методом LP CVD пленки нитрида кремния получают широкие перспективы применения в изделиях оптоэлектроники в связи с расширением возможностей кремния для этих изделий. Если на рубеже веков возможность их использования ограничивалась, главным образом, фотоприемниками, то сравнительно недавно было показано, что при использовании нанокристаллических слоев кремния в твердотельных структурах на одноименной основе, содержащей ионы редкоземельных металлов, можно изготовить светоизлучающие диоды [8], на базе кремниевых *pin*-диодов создать лазеры, получать интегрированные оптические волокна [9] при использовании оборудования и технологических методов, характерных для производства традиционных изделий микроэлектроники. Пленки нитрида кремния, как защитные пассивирующие покрытия в таких изделиях, несомненно, окажутся востребованными.

Кроме того, от показателей качества пленок нитрида кремния в указанных выше изделиях зависит уровень надежности и безотказности при эксплуатации, так как принципиально важные для обеспечения надежности характеристики пленок (плотность дефектов структуры, величина связанных зарядов и др.) во многом определяются уровнем остаточных механических напряжений.

Методика эксперимента

Осаждение пленок нитрида кремния осуществлялось аммонолизом дихлорсилана (SiH_2Cl_2) в промышленном реакторе пониженного давления с горячими стенками горизонтального типа "Изотрон-4-150" (рис. 1). В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-12 диаметром 100 мм.

Давление в реакторе изменялось в пределах 20–70 Па. Температура осаждения составляла 1043–1083 К. Температурный профиль по зонам осаждения поддерживался с точностью ± 1 К. Соотношение объемных источников дихлорсилана к аммиаку ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$) изменялось от 0,25 до 10. Использовались дихлорсилан и аммиак электронного класса чистоты. Толщина пленок нитрида кремния определялась с помощью многоуровневой эллипсометрии на установке ЛЭФ-2. Механические напряжения σ измеряли по смещению дифракционного пика отражения от системы атомных плоскостей на рентгеновской двухкристалльной топографической установке типа РДТ.

Результаты и их обсуждение

Стехиометрические пленки Si_3N_4 получаемые при температуре осаждения 1073 К, общем давлении ~ 40 Па и соотношении дихлорсилана (SiH_2Cl_2) и аммиака (NH_3) 1/4 имели высокие механические напряжения растяжения $\sim 1,3$ ГПа при толщине 0,15–0,2 мкм, что приводит к растрескиванию пленки [3]. Высокие механические напряжения не позволяют использовать их в качестве элементов МЭМС из-за низкой механической прочности разрушения. Для получения низких механических напряжений исследовались пленки нестехиометрического нитрида кремния, осажденного при $T=1043$ К, 1063 К, 1073 К, 1083 К, общем давлении 40 Па и соотношении газов ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$) 1/1, 3/1, 4/1, 5/1.

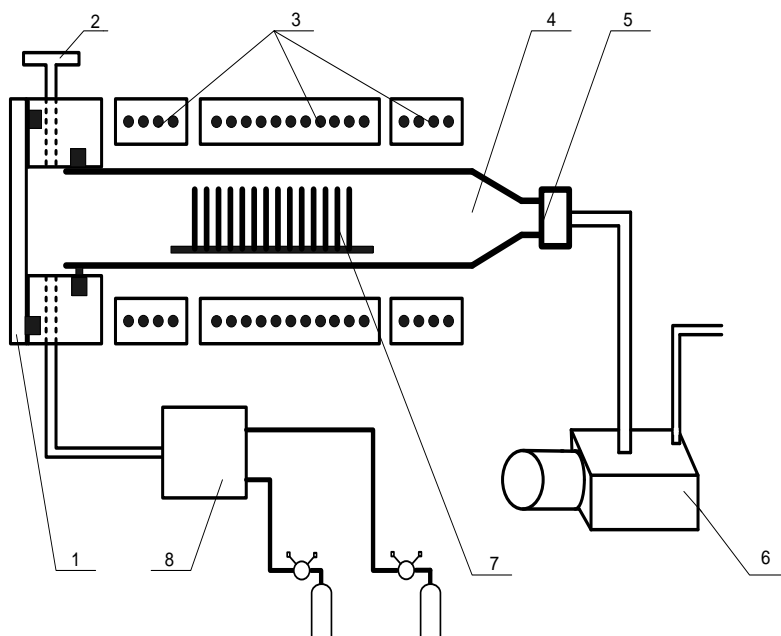


Рис. 1. Схема установки нанесения пленок Si_3N_4 , SiO_2 и поликристаллического кремния (ПКК): 1 — загрузочный люк; 2 — датчик давления; 3 — трехзонный резистивный нагреватель; 4 — кварцевая труба; 5 — ловушка; 6 — вакуумный насос; 7 — кремниевые пластины; 8 — регулятор расхода газа

На рис. 2 показана зависимость механических напряжений в пленке нитрида кремния Si_xN_y толщиной 0,6 мкм при различных соотношениях газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ — от 1 до 7, при температурах 1063, 1073, 1083 К. Величина напряжений уменьшается при увеличении соотношения рабочих газов.

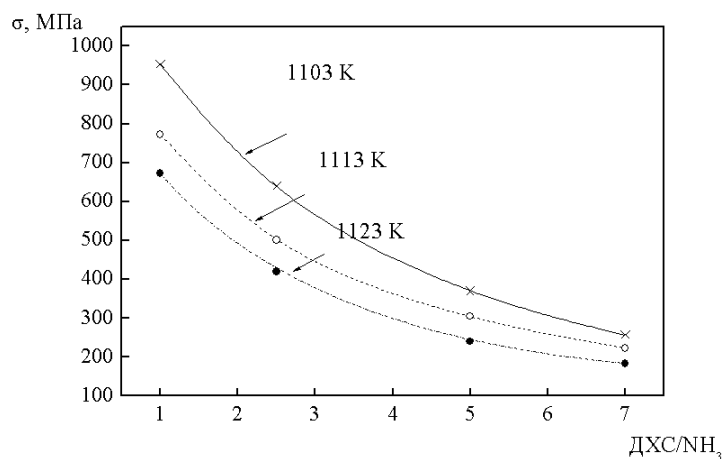


Рис. 2. Зависимость механических напряжений от соотношения дихлорсилана и аммиака ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$, толщина $\text{Si}_x\text{N}_y \sim 0,6$ мкм)

При постоянном соотношении $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ увеличение температуры осаждения от 1043 К до 1073 К приводит к уменьшению механических напряжений в 1,5 раза при толщине пленки нитрида кремния 0,2 мкм (рис. 3).

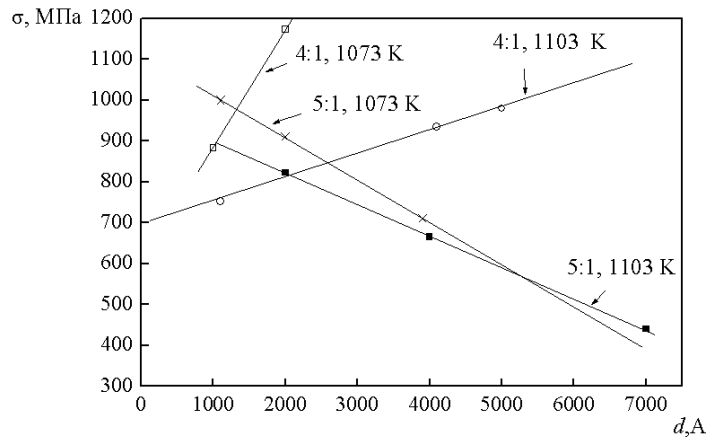


Рис. 3. Зависимость механических напряжений от толщины пленки при различных соотношениях $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ и температурах осаждения

Изменения в механических напряжениях пленки нитрида кремния можно объяснить влиянием газов, которые присутствуют в процессе осаждения методом LPCVD. Уменьшение напряжения растяжения с увеличением толщины пленки нитрида кремния объясняется увеличением времени воздействия повышенной температуры на пленку во время осаждения и соответствующим снижением составляющей σ_i , входящей в выражение [10]

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_{th},$$

где σ_i — внутренние напряжения в пленке, обусловленные условиями ее нанесения; σ_{th} — термические напряжения, обусловленные различием термических коэффициентов расширения кремниевой подложки и наносимой пленки, величина которых применительно к пленкам, формируемым из смеси силана (SiH_4) и аммиака (NH_3), численно определена в [11] пропорциональной 0,1 от температуры осаждения пленки.

При этом также в меньшей степени проявляется эффект гидрогенизации, т.е. наличия в пленке связанного водорода и образования химических связей Si–H и N–H в процессе роста, что соответствует выводам работы [11].

При отношении $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3 = 5/1$ ($T = 1063 \text{ K}$) увеличение толщины пленки нитрида кремния Si_xN_y от 1000 до 4000 Å приводит к уменьшению механических напряжений в 2 раза.

Таким образом, выбрав оптимальный режим осаждения нестехиометрического нитрида кремния Si_xN_y , можно получить пленки с механическими напряжениями в несколько раз ниже, чем у стехиометрического нитрида кремния.

При соотношении $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3 = 5/1$ и температуре осаждения 1063 K увеличение толщины пленки нитрида кремния Si_xN_y приводит к уменьшению механических напряжений, поэтому оптимальный диапазон значений толщины составляет 0,5–0,7 мкм (рис. 3).

Также была выявлена зависимость коэффициента преломления n от соотношения $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ (рис. 4). При увеличении соотношения $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3$ от 0,25 до 10 наблюдается увеличение коэффициента преломления n от 2,0 до 2,9. По коэффициенту преломления n можно контролировать режим нанесения пленок нестехиометрического нитрида кремния Si_xN_y .

Зависимость скорости осаждения пленок нестехиометрического нитрида кремния Si_xN_y при общем давлении 30 Па и соотношении газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ представлена на рис. 5. Видно, что скорость осаждения монотонно возрастает при увеличении температуры осаждения, однако понижение температуры способствует улучшению однородности пленок нитрида кремния по толщине.

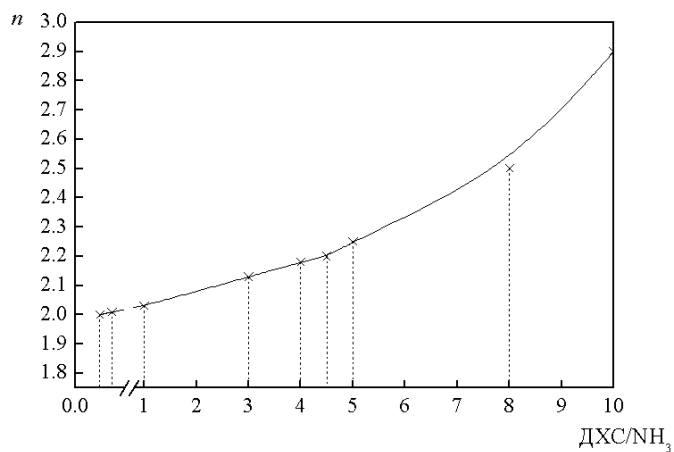


Рис. 4. Зависимость показателя преломления Si_xN_y от соотношения дихлорсилана и аммиака в процессе осаждения

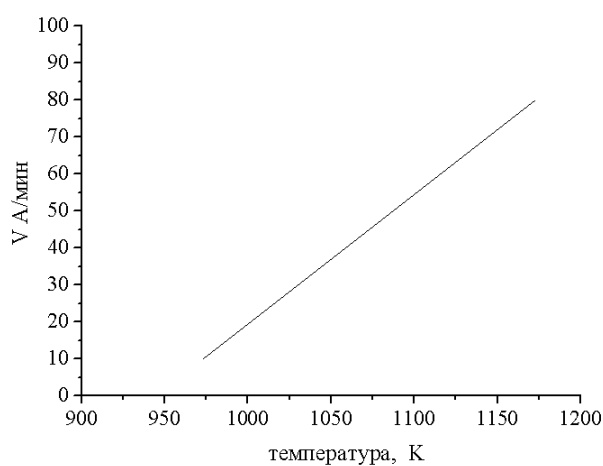


Рис. 5. Скорость осаждения пленки Si_xN_y от температуры при давлении 30 Па и соотношении газов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ равном 5:1

Пленки нитрида кремния, нанесенные по данной технологии, используются в качестве мембраны в конструкции датчика потока газа (рис. 6).

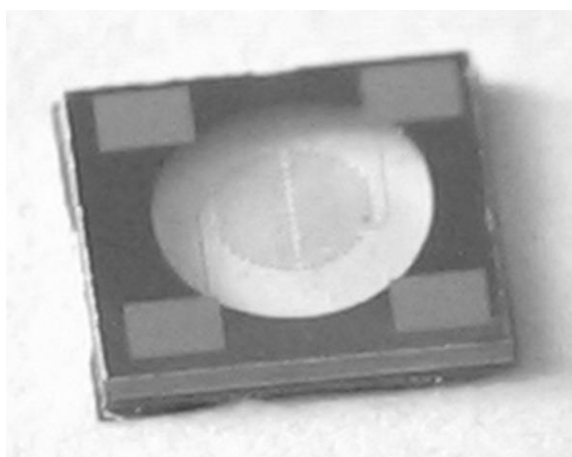


Рис. 6. Общий вид датчика потока газа

Заклучение

Полученные зависимости можно использовать при оптимизации процесса получения пленок нитрида кремния для использования в качестве мембран и балок в МЭМС структурах.

Таким образом, для получения небольших значений механических напряжений в пленках нитрида кремния наилучшим режимом получения пленок нитрида кремния методом химического осаждения (LPCVD) будет следующий: температура осаждения 1063 К, общее давление 30 Па, отношение $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3 = 1/5$, скорость нанесения 0,2 мкм/ч, толщина пленки 1 мкм. При таком режиме осаждения полученные пленки будут иметь механические напряжения растяжения 200 МПа. Требования по контролю внутренней структуры нестехиометрической пленки нитрида кремния: коэффициент преломления пленки должен лежать в интервале 2,1–2,3.

SILICON NITRIDE FILMS WITH LOW MECHANICAL STRESSES FOR MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS APPLICATIONS

N.S. KOVALCHUK

Abstract

The particularities of silicon nitride thin films technology are described in the paper. The target of the research is obtaining silicon nitride thin films with low level of mechanical stresses (170–200 MPa) in order to use them as membranes in microelectromechanical systems (MEMS). The experimental dependences of residual stresses in silicon nitride thin films on their thickness and ratio of the used active gases (dichlorosilane and ammonia) have been presented.

Литература

1. Rosler R.S. // Solid-State Technology. 1977. Vol. 20, N 4. P. 63–70.
2. French P.J. // J. Micromech. Microeng. 1996. N 6. P. 197–211.
3. Wen-Hsien Chuang, Rainer K. // Sensor and actuators. 2005. A. N 121. P. 557–565.
4. Penza M., Aversa P., Cassano G. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55, N 5. P. 1237–1239.
5. Cross R.B.M., De Souza M.M., Deane S.C., Young N.D. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55. N 5. P. 1109–1115.
6. Arreghini A., Driussi F., Vianello E. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55, N 5. P. 1211–1219.
7. Han I.-S., Ji H.-H., You O.-S. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55, N 6. P. 1352–1358.
8. Coffa S. // IEEE Spectrum. 2005. N 10. P. 36–41.
9. Paniccia M., Koehl S. // IEEE Spectrum. 2005. N 10. P. 30–35.
10. Технология СБИС / Под ред. С. Зи. М., 1986. Т. 2.
11. Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., Scheid E. // J. Vac. Sci. Technol. A 16 (4). 1998. N 7–8. P. 2003–2007.