

УДК 539.25; 538.91; 538.97

**ПЛЕНКИ SiN_x С НИЗКИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ
ДЛЯ МИКРОСИСТЕМНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ICP-РЕАКТОРЕ**

Ковальчук Н.С.¹, Демидович С.А.¹, Комаров Ф.Ф.², Власукова Л.А.³, Пархоменко И.Н.³

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

²НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ

³Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Пленки SiN_x с механическими напряжениями в диапазоне от -10 до -625 МПа синтезированы в реакторе индуктивно-связанной плазмы (ICP) из смеси « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ ». Обогащение нитридных пленок азотом приводит к снижению механических напряжений до -10 МПа. При подъеме мощности ICP-источника механические напряжения возрастают вплоть до -625 МПа при 800 Вт. Варьирование температуры осаждения от 25 до 350 °С существенно не влияет на уровень напряжений и показатель преломления, а также на скорость роста SiN_x . Оценен дрейф остаточных напряжений в течение трех недель после осаждения, а также содержание кислорода в пленках SiN_x в зависимости от режима осаждения.

Ключевые слова: пленки SiN_x , смесь « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ », индуктивно-связанная плазма, механические напряжения, показатель преломления.

**LOW STRESS SiN_x FILMS FOR APPLICATIONS IN MICROSYSTEMS
SYNTHESIZED IN ICP-REACTOR**

Kovalchuk N.¹, Demidovich S.¹, Komarov F.², Vlasukova L.³, Parkhomenko I.³

¹Joint Stock Company "Integral"

²A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU

³Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. SiN_x films with the residual mechanical stresses from -10 to -625 MPa have been synthesized using « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ » mixture in the inductively-coupled plasma (ICP) reactor. An enrichment of nitride films with nitrogen leads to a stress decrease to -10 MPa. An increase of ICP-source power results in a residual stress increase until to -625 MPa at 800 W. A deposition temperature variation from 25 to 350 °C does not affect substantially a stress level and refractive index as well as SiN_x growth rate. A stresses drift in SiN_x films measured during three weeks after deposition has been evaluated as well as the oxygen content in films deposited in different regimes.

Key words: SiN_x films, « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2 - \text{Ar}$ » mixture, inductively-coupled plasma, residual mechanical stresses, refractive index.

*Адрес для переписки: Власукова Л.А., ул. Кижеватова, 5, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: vlasukova@bsu.by*

Введение. Нитрид кремния широко применяется в технологии интегральных микросхем и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Для ряда применений важно знать уровень остаточных механических напряжений в нитридных пленках. Так, для диэлектрических мембран МЭМС необходимы пленки с напряжениями ниже 200 МПа [1]. Пассивация структуры « $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ » для мощных СВЧ-транзисторов пленкой нитрида кремния позволяет уменьшить ток утечки по поверхности AlGaIn на несколько порядков [2]. Однако нанесение нитрида кремния приводит к сдвигу C-V характеристик композиции « $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ » что негативно влияет на управляющие свойства затворов транзисторов. По данным [3] этот сдвиг обусловлен механическими напряжениями в нитридной пленке. Поэтому актуальным является установление зависимости между параметрами осаждения SiN_x и механическими напряжениями, а также оценка возможности регулирования напряжений.

Целью данной работы было исследование уровня механических напряжений в пленках SiN_x ,

полученных из смеси « $\text{SiH}_4 - \text{N}_2$ », в зависимости от состава газовой смеси, мощности источника плазмы, температуры осаждения.

Материалы и методы исследования.

Пленки SiN_x выращивались на установке STE ICP200D (SemTEq, Санкт-Петербург). Перед осаждением пластины кремния обрабатывались в смесях КАРО и ПАР-5 и дополнительно очищались в реакторе в плазме Ar. Давление в камере было 2,5 Па. Поток SiH_4 (100 %) варьировался от 7,5 до 9,0 станд. см³/мин (sccm), поток азота – от 4,5 до 14,5 sccm. В качестве газа-носителя использовался Ar или смесь Ar-He. Мощность ICP-электрода изменялась от 300 до 800 Вт при частоте 13,56 МГц, температура осаждения варьировалась от 25 до 350 °С.

Контролировались толщина пленки, механические напряжения (σ) и показатель преломления (n). Толщина измерялась на оптическом тонкопленочном рефлектометре FTR, механические напряжения оценивались на хроматическом датчике белого света CWL, коэффициент преломления измерялся на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3

M1. Показатель преломления позволяет косвенно оценить химический состав SiN_x . Для стехиометрического материала $n = 2,02 \pm 0,02$. Более высокие значения n соответствуют обогащению пленки кремнием, значения ниже – обогащению пленки азотом. Содержание кислорода в SiN_x определялось на рентгеновском микроанализаторе (EDX Bruker), совмещенном со сканирующим электронным микроскопом Hitachi S 4800.

Результаты и обсуждение. При варьировании температуры осаждения σ и n пленок изменялись незначительно, как и скорость роста нитрида, которая составляла 23–26 нм/мин. В то же время состав газовой смеси и уровень мощности генератора плазмы сильно влияют на свойства SiN_x . На рис. 1 представлены зависимости σ и n пленок SiN_x от соотношения расходов моносилана и азота (R) и мощности ICP-источника.

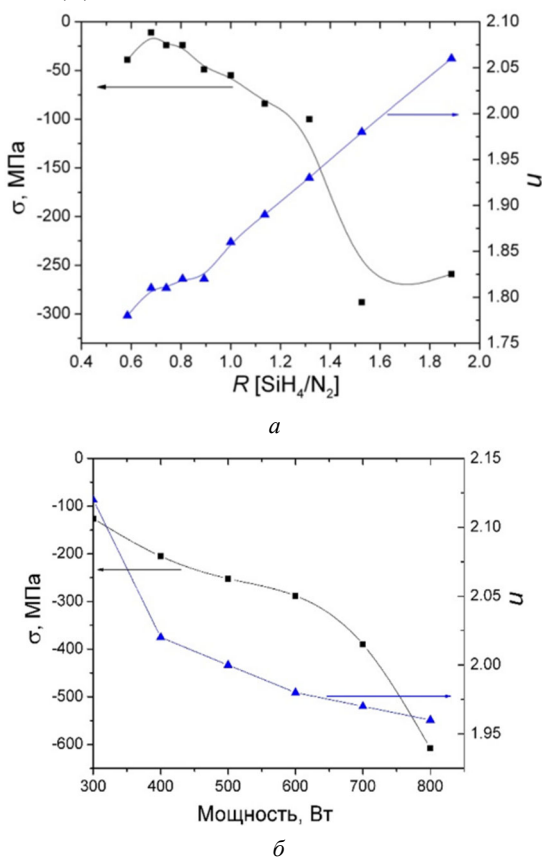


Рисунок 1 – Зависимости σ и n в пленках SiN_x от отношения расходов реагирующих газов R (а) и мощности ICP-источника (б) при расходе Ar 155 sccm

Измерения проводились для пленок толщиной 100–120 нм, осажденных при 300 °С. Все пленки характеризуются сжимающими напряжениями. При малых R (дефицит моносилана в газовой смеси) при прочих равных условиях напряжения минимальны и варьируют от –10 до –50 МПа. Подъем мощности ICP-источника от 300 до 800

Вт приводит к пятикратному увеличению напряжений. Для показателя преломления характерна обратная тенденция. При минимальном значении мощности $n = 2,12$. При возрастании мощности n снижается и достигает минимального значения 1,96 при мощности 800 Вт.

Дрейф остаточных напряжений в течение трех недель после осаждения оценивался для двух групп образцов нитрида с различным уровнем σ . Обнаружено, что остаточные напряжения заметно возрастают со временем для пленок с изначально низкими σ . В пленках с высокими остаточными напряжениями, полученных при высоком давлении в камере и/или высокой мощности ICP-источника, заметного дрейфа σ не наблюдается. Изменений показателя преломления SiN_x при хранении не выявлено.

Проведена оценка содержания в SiN_x примеси кислорода, который влияет на показатель преломления, устойчивость к фтористоводородной кислоте и др. В табл. 1 представлены данные по содержанию кислорода в пленках, полученных в различных режимах.

Таблица 1. Содержание кислорода в пленках SiN_x , осажденных в различных режимах

Давление в камере, Па	Мощность ICP, Вт	Температура осаждения, °С	Содержание кислорода, ат. %
1,5	700	150	4,32
1,5	700	250	4,19
2,5	700	150	2,24
1,5	1000	150	1,88

Примечание. Состав газовой смеси во всех случаях одинаков: $[\text{SiH}_4] = 15 \text{ sccm}$, $[\text{N}_2] = 11 \text{ sccm}$, $[\text{Ar}] = 75 \text{ sccm}$, $[\text{He}] = 120 \text{ sccm}$.

Измерения проводились через сутки после осаждения. Как видно, при увеличении давления и/или мощности ICP содержание кислорода в нитриде снижается. Повышение температуры подложки на уровень кислорода не влияет.

Благодарности. Работа поддержана ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.8.1).

Литература

- Zheng, Y. Deposition of Low Stress Silicon Nitride Thin Film and Its Application in Surface Micromachining Device Structures / Y. Zheng // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2013. – Vol. 1.
- Cho, S.-J. Impact of Stress in ICP-CVD SiN_x Passivation Films on the Leakage Current in AlGaIn/GaN HEMTs / S.-J. Cho // *Electron. Lett.* – 2018. – Vol. 54. – P. 947–949.
- Сейдман, Л. А. Плёнки SiN_x , полученные методом PECVD, в качестве пассивации AlGaIn/GaN HEMT / Л. А. Сейдман // *Электронная техника. Сер. 2.* – 2020. – Вып. 3. – С. 22–33.