

Изучение механических напряжений и состава пленок плазмохимического нитрида кремния SiN_x от соотношения расходов реагирующих газов

А.В. Новак^{1,2}, В.Р. Новак³, А.А. Дедкова¹, Е.Э. Гусев¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²ОАО «Ангстрем»

³ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В.Лукина»

Пленки плазмохимического нитрида кремния (SiN_x), получаемые методом химического осаждения из газовой фазы с активацией плазмой (PECVD), из смеси газов моносилана SiH_4 и аммиака NH_3 при температурах 300 – 450°C широко используются в микроэлектронике, микро- и наномеханических системах [1,2]. Для многих практических применений одной из важных характеристик пленок SiN_x является величина остаточных механических напряжений [3,4]. Согласно опубликованным данным состав и физико-химические свойства пленок SiN_x , в частности величина механических напряжений, существенно зависят от условий получения: состава газовой смеси и соотношения расходов реагирующих газов, мощности разряда и вида (высокочастотной, низкочастотной) плазмы, температуры и давления при осаждении. Отношение расходов реагирующих газов является одним из критических параметров, влияющим на состав и величину механических напряжений в осаждаемых пленках SiN_x .

В данной работе для пленок плазмохимического SiN_x изучается состав и механические напряжения от соотношения расходов реагирующих газов R моносилана SiH_4 к аммиаку NH_3 .

Пленки SiN_x получали методом PECVD, при различном отношении расходов $R = (\text{расход } \text{SiH}_4) / (\text{расход } \text{NH}_3)$, изменяющимся от 0,016 до 0,25. Температура осаждения составляла 350°C, давление 1,4 Торр, мощность ВЧ-генератора плазмы 50 Вт. Механические напряжения в пленках SiN_x определяли из изгиба кремниевой пластины, к которому приводит осажденный на лицевую сторону слой нитрида. Состав пленок определяли при помощи ИК-Фурье спектроскопии. Из анализа полос поглощения, соответствующих связям Si-N, Si-H и N-H рассчитывали концентрацию этих связей.

На рис. 1 приведена зависимость механических напряжений σ в пленках SiN_x от отношения расходов реагирующих газов $R = (\text{расход } \text{SiH}_4) / (\text{расход } \text{NH}_3)$.

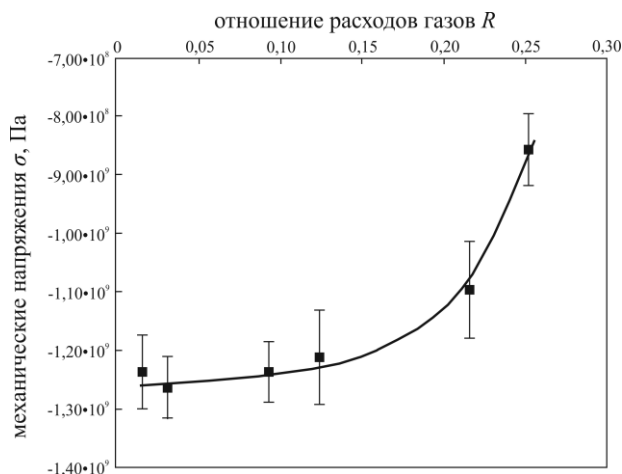


Рис. 1. Зависимость величины механических напряжений σ в пленках плазмохимического SiN_x от отношения расходов газов R .

Из найденной зависимости механических напряжений σ от отношения R (рис. 1) видно, что с ростом отношения R происходит уменьшение величины сжимающих (отрицательных) механических напряжений σ в пленках SiN_x . Так в интервале R от 0,016 до 0,12 величина σ незначительно уменьшается от $-1,25 \cdot 10^9$ до $-1,21 \cdot 10^9$ Па, далее с увеличением отношения R от 0,12 до 0,25 происходит более резкое уменьшение величины σ от $-1,21 \cdot 10^9$ до $-8,57 \cdot 10^8$ Па.

На рис. 2а показаны ИК-спектры пропускания кремниевых пластин с осажденными пленками SiN_x , измеренные при различных R (0,016 ÷ 0,25). На рис. 2б приведены зависимости концентрации N-H, Si-H связей и водорода от отношения R , рассчитанные из ИК-спектров.

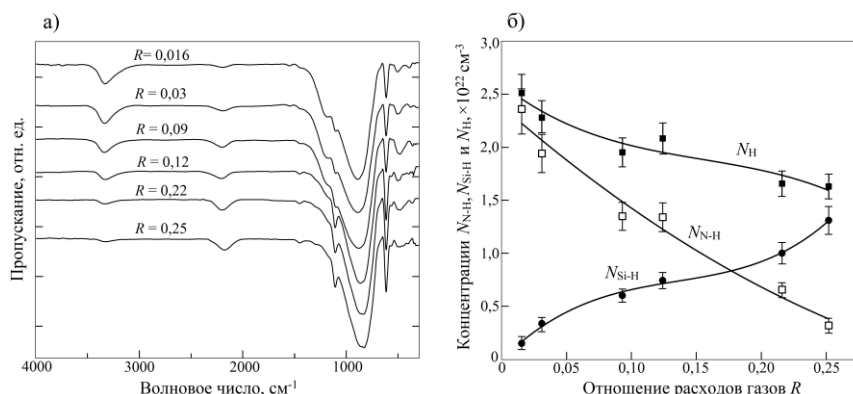


Рис. 2. а) – ИК-спектры пропускания кремниевых пластин с осажденными пленками SiN_x при различных R ; б) – зависимости концентрации N-H, Si-H связей и водорода от отношения R .

Для всех образцов пленок SiN_x , полученных при различных R , на ИК-спектрах наблюдаются характерные пики поглощения. Самый большой пик соответствующий Si-N связи при ~ 880 см⁻¹, пик соответствующий Si-H связи при ~ 2180 см⁻¹ и пик N-H связи при ~ 3320 см⁻¹. Видно, что с увеличением отношения R на ИК-спектрах пленок плазмохимического SiN_x интенсивность пика поглощения для Si-N связи практически не меняется, интенсивность пика N-H связи убывает, а для Si-H связи наоборот возрастает. Концентрация Si-N связи для всех образцов пленок SiN_x при изменении отношения R в интервале (0,016 ÷ 0,25) меняется незначительно $N_{\text{Si-N}} = (9,70 \cdot 10^{22} \div 8,72 \cdot 10^{22}$ см⁻³), концентрация N_{N} убывает от $4,02 \cdot 10^{22}$ см⁻³ до $3,01 \cdot 10^{22}$ см⁻³. Для образца пленки SiN_x , полученной при отношении $R = 0,016$ наблюдается хорошо выраженный пик N-H связи, совсем слабый пик соответствующий Si-H связи и соответственно концентрации N-H и Si-H связей равны $N_{\text{N-H}} = 2,36 \cdot 10^{22}$ см⁻³ и $N_{\text{Si-H}} = 1,50 \cdot 10^{21}$ см⁻³, концентрация водорода составляет $N_{\text{H}} = 2,51 \cdot 10^{22}$ см⁻³. На ИК-спектре пленки SiN_x , полученной при $R = 0,09$ оба пика для N-H и Si-H связей хорошо выражены, соответственно концентрации равны $N_{\text{N-H}} = 1,35 \cdot 10^{22}$ см⁻³ и $N_{\text{Si-H}} = 6,01 \cdot 10^{21}$ см⁻³, концентрация водорода $N_{\text{H}} = 1,95 \cdot 10^{22}$ см⁻³. Для пленки SiN_x с $R = 0,25$ пик соответствующий N-H связи очень слабый, в то же время наблюдается большой пик для Si-H связи, концентрации N-H и Si-H связей и водорода равны: $N_{\text{N-H}} = 3,20 \cdot 10^{21}$ см⁻³, $N_{\text{Si-H}} = 1,31 \cdot 10^{22}$ см⁻³ и $N_{\text{H}} = 1,63 \cdot 10^{22}$ см⁻³, соответственно.

Таким образом найдено, что с ростом отношения расходов газов R (моносилана SiH_4 к аммиаку NH_3) от 0,016 до 0,25 в пленках плазмохимического SiN_x величина сжимающих механических напряжений σ уменьшается от $-1,25 \cdot 10^9$ до $-8,57 \cdot 10^8$ Па и изменяются концентрации N-H и Si-H связей, соответственно $N_{\text{N-H}}$ убывает от $2,36 \cdot 10^{22}$ до $3,20 \cdot 10^{21}$ см⁻³, $N_{\text{Si-H}}$ возрастает от $1,50 \cdot 10^{21}$ до $1,31 \cdot 10^{22}$ см⁻³, концентрация водорода N_{H} убывает от $2,51 \cdot 10^{22}$ см⁻³ до $1,63 \cdot 10^{22}$ см⁻³, концентрация азота N_{N} убывает от $4,02 \cdot 10^{22}$ см⁻³ до $3,01 \cdot 10^{22}$ см⁻³, тогда как концентрация $N_{\text{Si-N}}$ меняется незначительно ($9,70 \cdot 10^{22} \div 8,72 \cdot 10^{22}$ см⁻³).

Литература

1. Cote D.R., Nguyen S.V., Stamper A.K. et al. Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits // IBM Journal of Research and Development. 1999. V. 43. № 1/2. P. 5 – 38.
2. LIU Liang, LIU Wei-guo, CAO Na, CAI Chang-long. Study on The Performance of PECVD Silicon Nitride Thin Films // Defence Technology. 2013. V. 9. № 2. P. 121 – 126.
3. Thompson Scott E., Sun Guangyu, Choi Youn Sung and Nishida Toshikazu. Uniaxial-Process-Induced Strained-Si: Extending the CMOS Roadmap // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. V. 53. № 5. P. 1010 – 1020.
4. LI Dong-ling, FENG Xiao-fei, WEN Zhi-yu, SHANG Zheng-guo et al. Stress control of silicon nitride films deposited by plasma // Optoelectron. Lett. 2016. V.12. № 4. P. 0285 – 0289.