



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.2>

УДК: 53.096: 621.793.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СЛОЕВ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОРМИРОВАНИЯ

Н.А. Чириков^{1,2}, Т.Н. Улаева^{1,2}, А.Н. Кузнецов^{1,2}, Н.М. Жилин^{1,2}

¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники),
644024, Омск, пр. Маркса, 15

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
644071, Омск, ул. Масленникова, 231

Статья поступила в редакцию 6 октября 2025 г.

Аннотация. Исследованы тонкие пленки молибдена, алюминия, диоксида кремния и нитрида алюминия, полученные методом магнетронного распыления, предназначенные для использования в качестве слоев микроэлектронного резонатора на объемных акустических волнах. Определено влияние температуры подложки в процессе магнетронного распыления на механические напряжения в пленках. Выбраны оптимальные технологические режимы магнетронного распыления, при которых получены минимальные значения механических напряжений в пленках. На их основе изготовлены опытные образцы микроэлектронных резонаторов, работающие на частоте 3,9 ГГц с добротностью 573 единицы.

Ключевые слова: ОАВ-резонатор, брэгговский отражатель, температурная зависимость, механические напряжения, тонкие пленки.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20010).

Автор для переписки: Улаева Татьяна Николаевна, tanskaya-89@mail.ru

Введение

Стремительное развертывание сетей 5G во всем мире поддерживает устойчивый рост спроса на сверхвысокочастотные резонаторы и фильтры [1-6]. Среди доступных технологий именно устройства на объемных акустических волнах (ОАВ) выделяются сочетанием высокой частотной избирательности, низких вносимых потерь и компактности, особенно в диапазоне выше 2 ГГц, где они превосходят резонаторы на поверхностных акустических волнах [6-7]. Конструктивно ОАВ-резонатор представляет собой многослойную тонкопленочную структуру, состоящую из пьезоэлектрической пленки, помещенной между двумя металлическими электродами. На практике применяются два основных типа ОАВ-резонаторов: мембранный резонатор и резонатор с брэгговским отражателем. Брэгговский отражатель состоит из чередующихся слоев со значительно отличающимися акустическими импедансами, например, молибден и диоксид кремния (Mo-SiO_2) [8] или молибден и алюминий (Mo-Al) [9]. Толщина каждого слоя в отражателе равна четверти длины объемной акустической волны. Количество пар слоев в отражателе подбирается в зависимости от соотношений акустических импедансов и обычно лежит в диапазоне от 4 до 6. Пара Mo-SiO_2 является акустически более выгодной, так как обеспечивает эффективную работу брэгговского отражателя уже при четырех парах слоев [10]. Тем не менее, в такой конструкции микрорезонатора, состоящего из большого числа слоев, существует серьезная проблема – обеспечение высокой адгезии пленочных слоев как между собой, так и с подложкой. Недостаточная адгезия нарушает акустический контакт, усиливает затухание продольной акустической волны и снижает добротность резонатора. Существенный вклад в ухудшение адгезии вносит уровень механических напряжений (σ). Дополнительно ситуацию усугубляет значительная разница в температурных коэффициентах линейного расширения пленок Mo , Al и SiO_2 , которые критически влияют на работоспособность готового устройства. Совокупность этих факторов может привести к разрушению тонкопленочных слоев и, как следствие, к выходу из строя резонатора.

Целью данной работы является исследование механических напряжений тонких пленок молибдена (Mo), алюминия (Al), диоксида кремния (SiO₂) и нитрида алюминия (AlN) от температуры формирования для определения воздействия на ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем и его работоспособность.

1. Методика эксперимента

Исследование механических напряжений тонкой пленки является относительно длительным процессом, которое основано на формуле Стоуни [11]:

$$\sigma = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\gamma_s)h_f} \left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_s} \right), \quad (1)$$

где E_s – модуль Юнга подложки, h_s – толщина подложки, γ_s – коэффициент Пуассона подложки, h_f – толщина пленки, R_s – радиус кривизны подложки без пленки, R_f – радиус кривизны подложки с пленкой. Радиус кривизны подложек измеряли на микроинтерферометре Линника МИИ-4 до и после напыления пленок по методике, описанной в работе [12]. Для подложек из ситалла отношение $E_s / (1-\gamma_s)$ составляло примерно 130 ГПа [13].

Основной сложностью расчета является вычисление радиуса кривизны тонких пленок. В первую очередь подложки отмывают от загрязнений химическим методом. Затем чистую подложку устанавливают на размеченный столик микроинтерферометра. На подложке отмечают точку «0» относительно столика, для точного позиционирования при последующих измерениях. Измеряют радиус кривизны подложки путем отсчета интерференционных полос по оси ординат в контрольных точках микровинта – 2,5; 5; 7,5; 10 мм. Затем образец помещают в вакуумную камеру и формируют тонкую пленку методом магнетронного распыления в соответствии с технологическими режимами (W – мощность, Вт; P – давление, Па; Ar, N₂, O₂ – газовые потоки, ссст; h_f – толщина пленок, мкм). Образец выгружают из вакуумной камеры и повторно измеряют радиус кривизны пленки с подложкой при помощи МИИ-4.

Вычитают значения первого измерения из второго, таким образом, по координатам строится радиус кривизны, для определения характера напряжений (сжимающие или растягивающие) и формулы расчета радиуса, соответственно. Полученные значения подставляют в формулу радиуса кривизны, методика расчета которых описана в работе [12].

Зная толщины пленок и радиусы кривизны, в соответствии с формулой Стоуни, рассчитывают механические напряжения.

2. Результаты и их обсуждение

Влияние температуры подложки на величину механических напряжений в пленках молибдена при их формировании методом магнетронного распыления представлено на рис. 1.

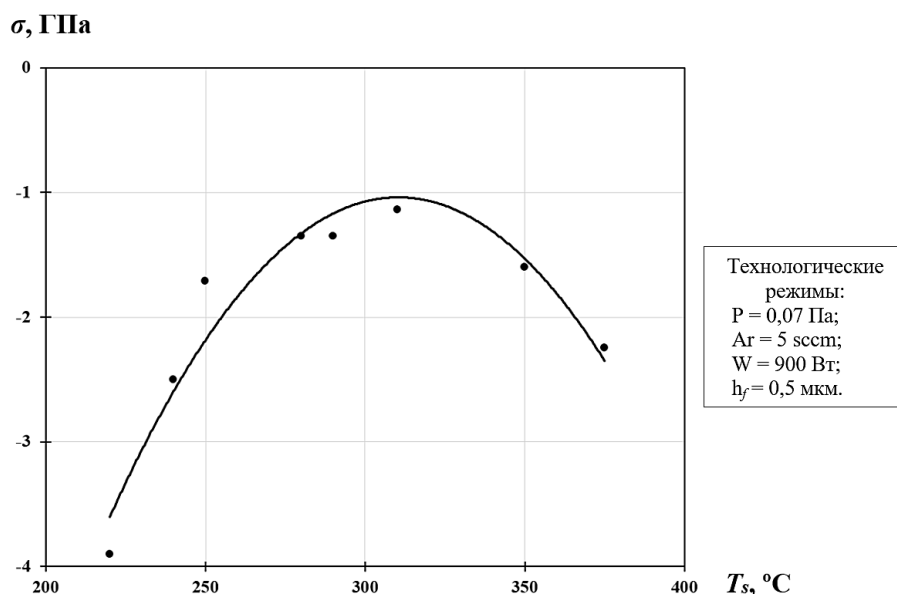


Рис. 1. Зависимость механических напряжений в пленках молибдена от температуры подложки.

Во всем исследованном диапазоне температур механические напряжения пленок молибдена носят сжимающий характер. С ростом температуры подложки механические напряжения незначительно уменьшаются и имеют минимальное значение по модулю равное 1,1 ГПа при значении температуры подложки $T_s = 310 ^\circ\text{C}$. При дальнейшем повышении температуры подложки сжимающие механические напряжения увеличиваются по модулю до 2,25 ГПа при

температуре подложки $T_s = 375$ °C. Такое поведение механических напряжений может быть связано с формированием столбчатой структуры пленок молибдена и увеличением ее плотности [14,15].

Влияние температуры подложки при формировании на величину механических напряжений в пленках Al представлено на рис. 2. Во всем исследованном диапазоне температур наблюдается линейное возрастание растягивающих механических напряжений пленок алюминия. Минимальное значение механических напряжений равно 0,035 ГПа и соответствует температуре подложки $T_s = 50$ °C. Характер изменения механических напряжений для пленок алюминия согласуется с работой [16].

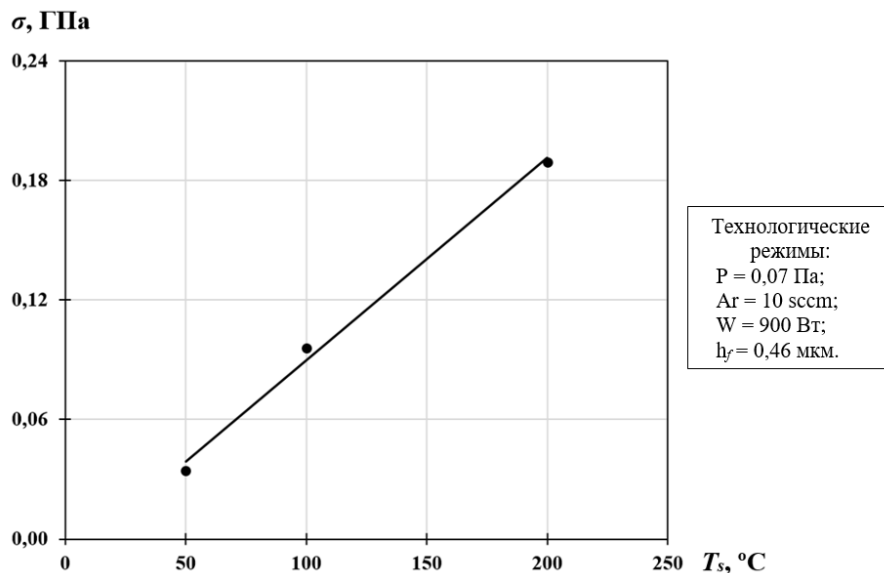


Рис. 2. Зависимость механических напряжений в пленках алюминия от температуры подложки.

Влияние температуры подложки при напылении на величину механических напряжений в пленках SiO_2 представлено на рис. 3. Во всем исследованном диапазоне температур наблюдаются сжимающие напряжения. При температуре $T_s = 100$ °C достигаются минимальные механические напряжения по модулю, равные 0,13 ГПа. По мере роста температуры до 200-250 °C механические напряжения по модулю увеличиваются и достигают значений 0,5-0,6 ГПа. При дальнейшем повышении температуры

($T_s = 320-330$ °C) наблюдается уменьшение значений механических напряжений по модулю до 0,3-0,35 ГПа. Полученные результаты согласуются с работой [17].

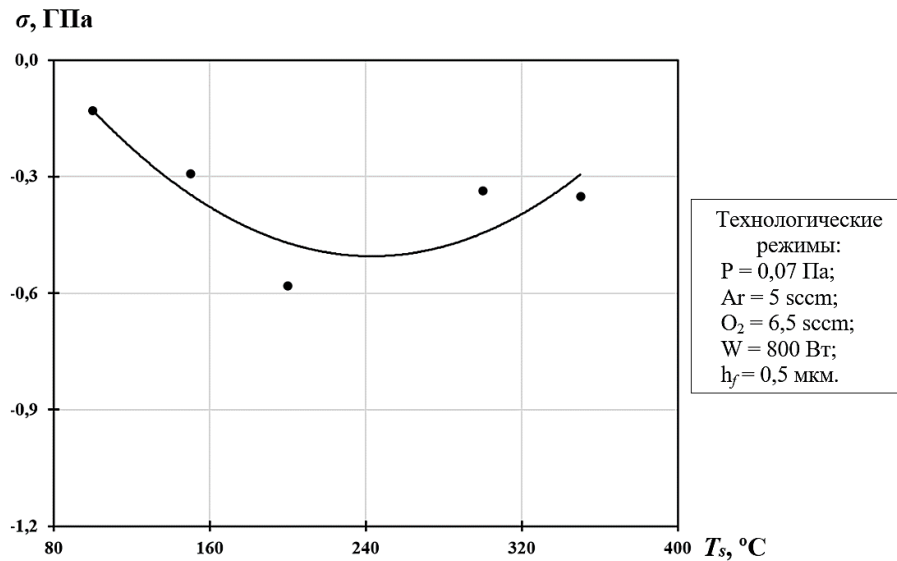


Рис. 3. Зависимость механических напряжений в пленках диоксида кремния от температуры подложки.

Влияние температуры подложки при напылении на величину механических напряжений в пленках AlN представлено на рис. 4.

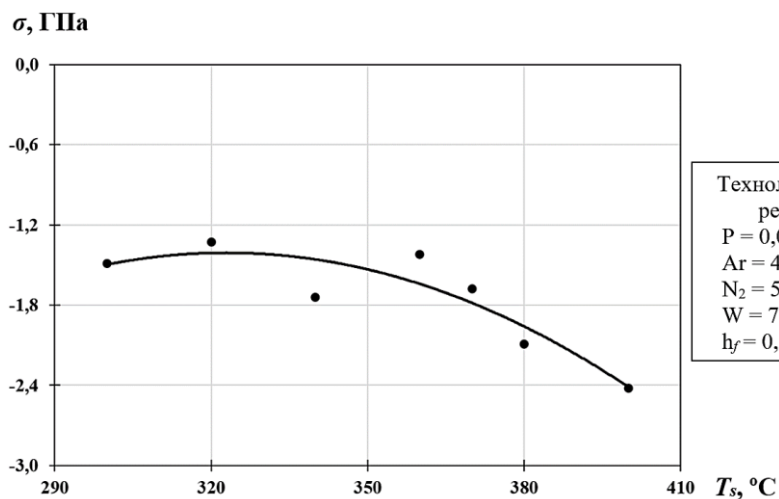


Рис. 4. Зависимость механических напряжений в пленках нитрида алюминия от температуры подложки.

Пленки нитрида алюминия были получены с использованием алюминиевой мишени с составом Al 95 %, Cu 4 % и Si 1 %. Полученные образцы пленок нитрида алюминия в исследованном диапазоне температур имеют сжимающие механические напряжения. При $T_s = 315-325$ °C величина

механических напряжений минимальна и равна по модулю 1,3-1,6 ГПа. С дальнейшим ростом температуры подложки наблюдается монотонное увеличение модуля сжимающих напряжений. Характер изменения механических напряжений для пленок нитрида алюминия согласуется с работой [18].

По результатам исследований свойств пленок молибдена (Mo), алюминия (Al), диоксида кремния (SiO_2) и нитрида алюминия (AlN) были изготовлены опытные образцы микроволновых резонаторов с брэгговским отражателем на основе 3 пар слоев пленок Mo-Al и одной пары Mo- SiO_2 . На рис. 5 представлены измеренные электрические характеристики резонатора: диаграмма Вольперта-Смита, частотные зависимости активной проводимости, модуля электрического импеданса и коэффициента отражения резонатора. Частота последовательного резонанса составила примерно 3,9 ГГц, а добротность последовательного резонанса Q равна 573 единицы.

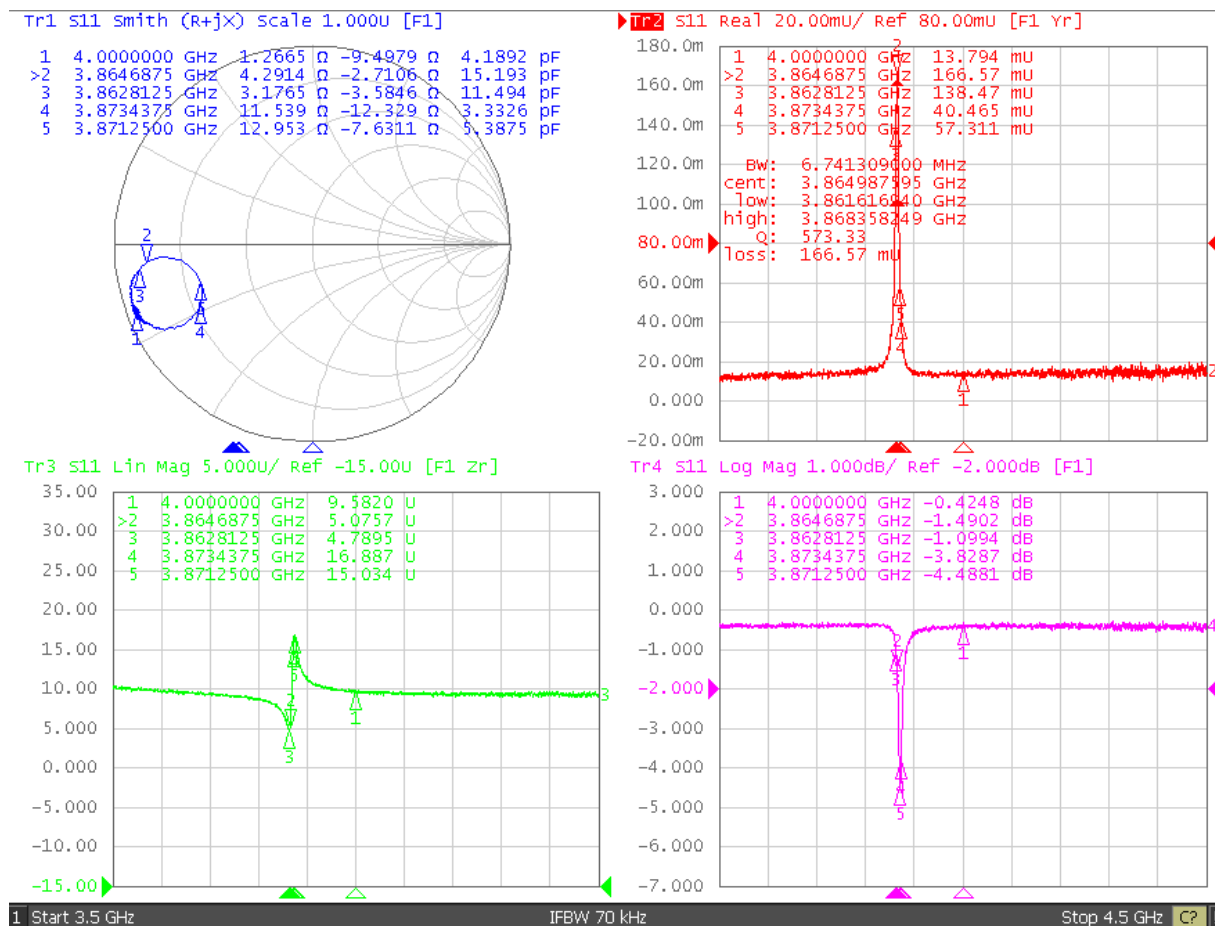


Рис. 5. Измеренные электрические характеристики микроволнового ОАВ-резонатора на основе пленок нитрида алюминия, алюминия, молибдена и диоксида кремния.

Заключение

В работе рассмотрены результаты исследований механических напряжений от температуры формирования тонких пленок молибдена, алюминия, диоксида кремния и нитрида алюминия толщиной 0,46-0,5 мкм, сформированных на ситалловых подложках методом магнетронного распыления.

Установлено, что пленки молибдена, диоксида кремния и нитрида алюминия на ситалловых подложках имеют сжимающий характер механических напряжений, а пленки алюминия – растягивающий характер. Минимальные механические напряжения по модулю наблюдаются: для пленок молибдена 1,1 ГПа при температуре 310 °С, для пленок алюминия 0,035 ГПа при 50 °С, для пленок диоксида кремния 0,13 ГПа при 100 °С и для пленок нитрида алюминия 1,3-1,6 ГПа при температурах 315-325 °С.

По результатам исследования механических напряжений была изготовлена структура ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе трех пар слоев Mo-Al и одной пары Mo-SiO₂ со следующими электрическими характеристиками: частота последовательного резонанса порядка 3,9 ГГц, добротность 573 единицы.

Полученные результаты исследований имеют важное значение для проектирования и изготовления ОАВ-резонаторов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20010).

Литература

1. Ruppel C. C. W. Acoustic wave filter technology—a review // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2017. – Т. 64. – №. 9. – С. 1390-1400.
2. Y. Liu Y. et al. Materials, design, and characteristics of bulk acoustic wave resonator: A review //Micromachines. – 2020. – Т. 11. – №. 7. – С. 630.
3. Ha T. D. Effects of material and dimension on TCF, frequency, and Q of radial contour mode AlN-on-Si MEMS resonators //Journal of Electronic Science and Technology. – 2021. – Т. 19. – №. 4. – С. 100120.
4. Li C. et al. Advancements in Super-High Frequency Al (Sc) N BAW Resonators for 5G and Beyond //Acoustics. – MDPI, 2025. – Т. 7. – №. 3. – С. 58.
5. Sun S. J., Lin R. C. Topological effect design for enhancing solidly mounted resonators performance //Journal of Applied Physics. – 2025. – Т. 138. – №. 9.
6. Zha X. H. et al. Surface and bulk acoustic wave resonators based on aluminum nitride for bandpass filters //AAPPS Bulletin. – 2024. – Т. 34. – №. 1. – С. 14.
7. Bi F. Z., Barber B. P. Bulk acoustic wave RF technology // IEEE microwave magazine. – 2008. – Т. 9. – №. 5. – С. 65-80.
8. Villa-López F. H. et al. Design and modelling of solidly mounted resonators for low-cost particle sensing //Measurement Science and Technology. – 2015. – Т. 27. – №. 2. – С. 025101.
9. Enlund J., Katardjiev I., Martin D. M. Fabrication and evaluation of an" electrodeless" solidly mounted thin film electroacoustic resonator //IEEE Ultrasonics Symposium, 2005. – IEEE, 2005. – Т. 3. – С. 1837-1839.
10. Mansfeld G. D., Alekseev S. G., Kotelyanskii I. M. Bulk acoustic wave microwave composite resonators and filters with acoustic isolation of resonating layers //1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings (Cat. No. 98CH36102). – IEEE, 1998. – Т. 1. – С. 963-966.
11. Stoney G. G. The tension of metallic films deposited by electrolysis //Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1909. – Т. 82. – №. 553. – С. 172-175.

12. Зима В. Н. Измерение механических напряжений в тонких пленках с помощью интерферометра МИИ-4 //Техника средств связи. – 1986. – №. 1. – С. 49-51.
13. Раскатов В. М. и др. Машиностроительные материалы: Краткий справочник. Изд. 3-е //М.: Машиностроение. – 1980.
14. Shen Y. G. Effect of deposition conditions on mechanical stresses and microstructure of sputter-deposited molybdenum and reactively sputter-deposited molybdenum nitride films //Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Т. 359. – №. 1-2. – С. 158-167.
15. Thornton J. A., Hoffman D. W. Stress-related effects in thin films //Thin solid films. – 1989. – Т. 171. – №. 1. – С. 5-31.
16. Vovk T. and Youssfi A. Dependence of stress in thin Al films on deposition and post-deposition temperature conditions // Zenodo, 2020.
17. Choi J. K. et al. Residual stress analysis of SiO₂ films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition //Surface and Coatings Technology. – 2000. – Т. 131. – №. 1-3. – С. 153-157.
18. Panda P. et al. Reduction of residual stress in AlN thin films synthesized by magnetron sputtering technique //Materials Chemistry and Physics. – 2017. – Т. 200. – С. 78-84.

Для цитирования:

Чириков Н.А., Улаева Т.Н., Кузнецов А.Н., Жилин Н.М. Исследование механических напряжений конструкционных слоев микроэлектронного ОАВ-резонатора от температуры формирования. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.2>