

УДК.621.382.002

ПЛЕНКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ЗЕРНАМИ

А.С. ТУРЦЕВИЧ, Л.П. АНУФРИЕВ, О.Ю. НАЛИВАЙКО, В.П. ЛЕСНИКОВА

НПО "Интеграл"

пл. Казинца, 1, Минск, 220108, Беларусь

Поступила в редакцию 5 марта 2005

Проведено исследование влияния условий получения пленок кремния на его структуру и морфологию. Установлено, что в узких диапазонах температуры осаждения и парциального давления моносилана наблюдается осаждение аморфно-кристаллических пленок с кристаллитами полусферической формы. Предложен механизм, объясняющий полученные результаты. Показано, что использование пленок поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами в качестве нижней обкладки конденсатора позволяет увеличить эффективную площадь конденсатора хранения ДОЗУ в 1,5–2,0 раза. Причем применение таких пленок возможно в стекловых, этажерочных конденсаторах и конденсаторах в виде простой и сложной короны.

Ключевые слова: интеллектуальные права, программное обеспечение, водяной знак.

Введение

Продолжающееся пропорциональное уменьшение размеров элементов ДОЗУ требует использования ячеек памяти со все более меньшей площадью при поддержании емкости конденсатора ячейки памяти, равной 25–35 фФ для обеспечения надежности сохраненных данных [1]. Емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_d S_{\text{обкл}} / d_d \quad (1),$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума ($8,85 \cdot 10^{-17}$ Ф/см); ε_d — диэлектрическая проницаемость конденсаторного диэлектрика; $S_{\text{обкл}}$ — площадь обкладок конденсатора; d_d — толщина конденсаторного диэлектрика.

Как видно из формулы (1), увеличение емкости может быть достигнуто тремя способами: уменьшением толщины конденсаторного диэлектрика, использованием диэлектрика с более высокой диэлектрической проницаемостью и увеличением эффективной площади обкладок конденсатора без увеличения топологической площади конденсатора. Поэтому в настоящее время наряду с проведением активных работ по созданию накопительных конденсаторов ячеек памяти с использованием диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью (high k), таких как оксид алюминия, алюминаты (например, HfAlO_x), титанат бария и оксид тантала (рис. 1) [1–7], ведутся разработки по созданию и совершенствованию трехмерных (3D) накопительных конденсаторов ячеек памяти (канавочных или стекловых) с увеличенной эффективной площадью обкладок [2–4, 8, 9] (рис. 2), а также использованию поликремниевых нижних обкладок конденсатора с развитой поверхностью [2, 3, 9–15]. Причем применение поликремниевых нижних обкладок конденсатора с развитой поверхностью возможно как в стекловых и этажерочных конденсаторах, так и в конденсаторах, имеющих форму простой и сложной короны.

Переход к использованию диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью возможен при обеспечении требуемой емкости и пробивных напряжений конденсатора, т.е. при выполнении условия, что произведение $E_{пр} \cdot \epsilon_d$ (где $E_{пр}$ — напряженность пробоя конденсаторного диэлектрика, а ϵ_d — диэлектрическая проницаемость конденсаторного диэлектрика) для перспективного диэлектрика, по крайней мере не ниже, чем для традиционно используемого диэлектрика. Во избежание проблем, связанных с хранением заряда и утечками через диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью, структура конденсатора может претерпевать изменения от полупроводник–диэлектрик–полупроводник (SIS) на метал–диэлектрик–полупроводник (MIS) и метал–диэлектрик–метал (MIM) (рис. 1) [1, 3]. Характеристики и типы конденсаторов ДОЗУ различных фирм приведены в табл. 1.

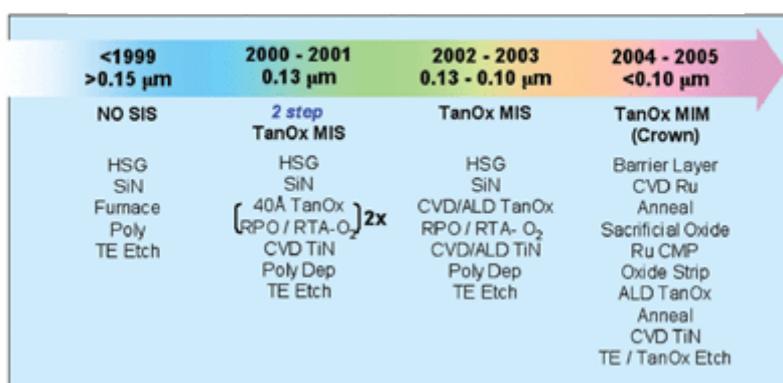


Рис. 1. Тенденции развития конденсаторов ячеек памяти ДОЗУ [3]

Таблица 1. Характеристики конденсаторов ДОЗУ [2].

Фирма	Плотность	Площадь ячейки, мм ²	Площадь кристалла, мм ²	Длина затвора, мкм	Тип ячейки
Fujitsu	16 М	1,4	97,8	0,30	Стековая
Mosel-Vitelic	4 М	4,0	65,0	0,55	Стековая
NEC	64 М	1,0	161,0	0,35	Стековая
IBM/Siemens	64 М	1,5	197,0	0,25	Канавка
Samsung	64 М	1,2	159,3	0,35	Корона
Mitsubishi	16 М	3,0	100,1	0,45	Стековая
Hitachi	64 М	1,6	229,4	0,35	Стековая

В настоящей работе исследовалось влияние режимов формирования пленок кремния на структурно-морфологические свойства с целью получения развитой поверхности поликристаллического кремния нижней обкладки накопительного конденсатора ячейки памяти ДОЗУ.

Методика эксперимента

Осаждение пленок кремния осуществляли термическим разложением моносилана в промышленном горизонтальном реакторе пониженного давления с горячими стенками, аналогичном [16]. Температура осаждения изменялась в диапазоне 550–670°С. Парциальное давление моносилана варьировалось от 4,1 до 33,3 Па, а общее давление в реакторе составляло 33,3 Па. В качестве подложек использовались кремниевые пластины, легированные бором, диаметром 100 мм с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 Ом·см, на которых предварительно выращивали термический оксид кремния толщиной 42,5±2,5 нм. Процесс осаждения включал следующие основные стадии:

загрузка подложек в реактор, нагретый до температуры осаждения;
откачку реактора до давления меньше 0,65 Па;
осаждение поликристаллического кремния до требуемой толщины;
откачку реактора;
напуск азота и выгрузку подложек из реактора.

Толщина пленок определялась при помощи спектрофотометра. Структурно-морфологические свойства пленок кремния исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с применением угольных реплик.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований представлены в табл. 2. Видно, что структура осаждаемых пленок зависит от температуры осаждения и от парциального давления моносилана. При температуре 550°C во всем исследованном диапазоне парциальных давлений моносилана образуются аморфные пленки кремния. При температуре 560°C и парциальном давлении моносилана

16,5–33 Па происходит осаждение аморфных пленок кремния, а при парциальном давлении моносилана 8,25 и 4,1 Па — аморфно-кристаллических пленок, представляющих собой аморфную матрицу с локальными вкраплениями полусферических кристаллитов диаметром до 0,13 и 0,15 мкм соответственно (рис. 3).

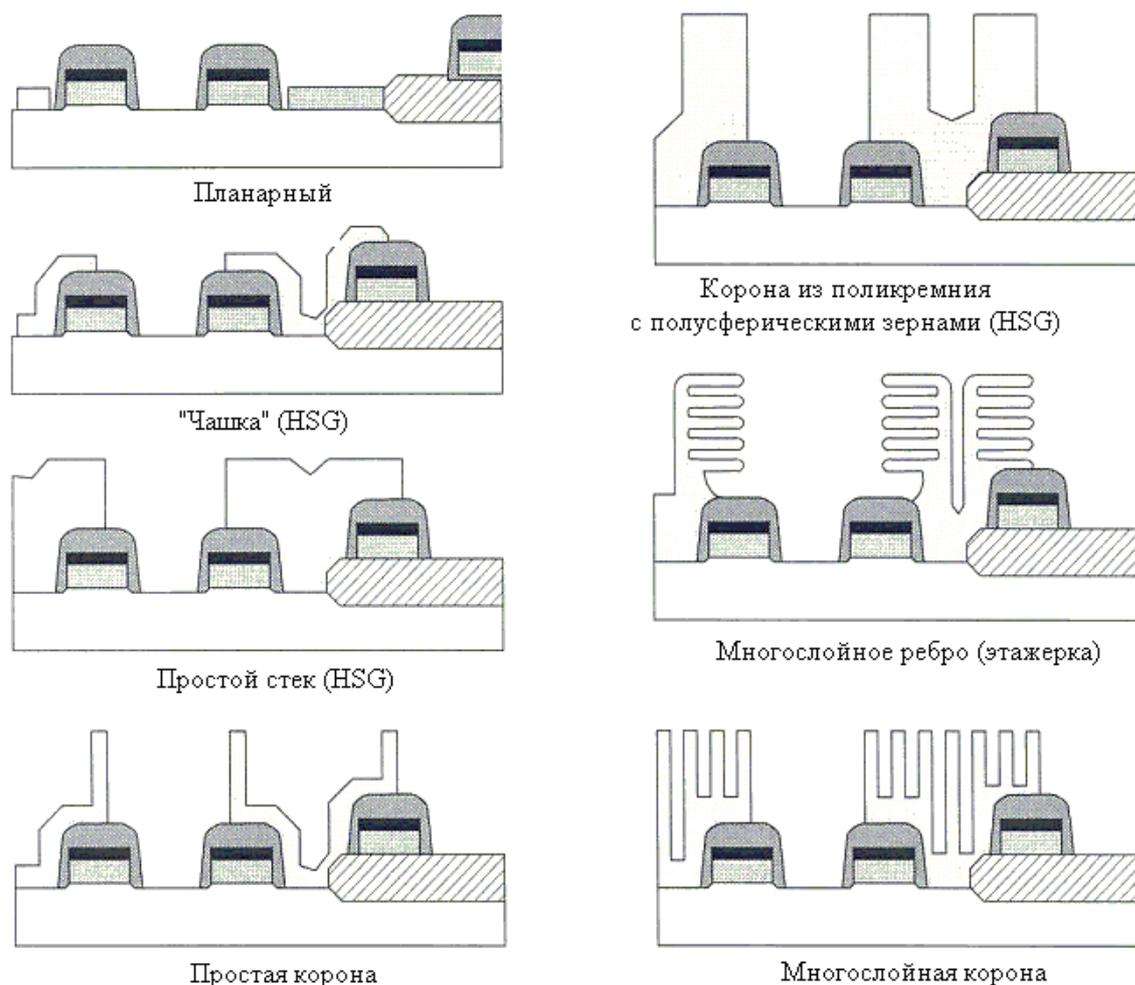


Рис. 2. Развитие конденсаторов для ДОЗУ [2]

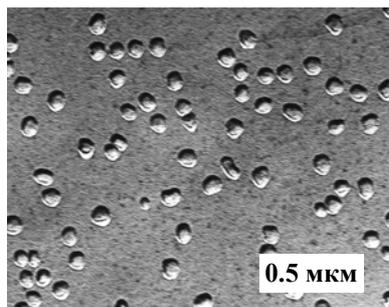


Рис. 3. Аморфная пленка с полусферическими кристаллитами

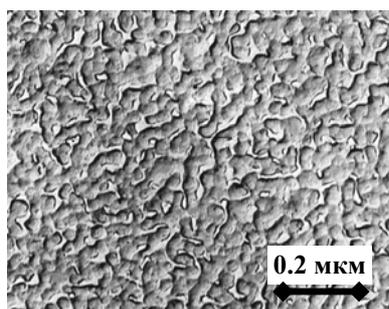


Рис. 4. Образование островков поликристаллического кремния.

При температуре осаждения 580–670°C в диапазоне парциальных давлений моносилана 4,1–33 Па наблюдается осаждение поликристаллических пленок кремния (ПК). Причем по мере уменьшения парциального давления моносилана от 33 до 4,1 Па средний размер зерен при температуре осаждения 610°C увеличивается от 0,16 до 0,25 мкм, а при температуре 670°C — от 0,12 до 0,27 мкм. При низких парциальных давлениях моносилана (4,1–8,25 Па) преимущественная ориентация зерен описывается совокупностью ориентировок $\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$, а с его увеличением - $\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$, причем наблюдается усиление составляющей $\langle 110 \rangle$ по мере дальнейшего увеличения давления моносилана [17].

Температура 560°C является пороговой температурой, при которой происходит переход от роста пленок аморфного кремния к росту пленок поликристаллического кремния. Как показано в работе [18], уменьшение давления приводит к смещению этой границы.

Полученные результаты можно объяснить с учетом особенностей зародышеобразования и соотношения между скоростью осаждения (V_{oc}) и скоростью роста кристаллов ($V_{кр}$), выделив при этом, три характерные области:

I — $V_{oc} \gg V_{кр}$; II — $V_{oc} = V_{кр}$; III — $V_{oc} < V_{кр}$;

В области низких температур ($T_{oc} < 560^\circ\text{C}$) в широком диапазоне давлений $V_{oc} \gg V_{кр}$, поэтому происходит осаждение слоев аморфного кремния. При длительном осаждении на границе раздела SiO_2 -подложки образуются центры кристаллизации. Плотность кристаллитов на границе раздела невелика, что связано с понижением скорости зародышеобразования при уменьшении температуры осаждения [19]. Фронт кристаллизации, как и в работе [20], движется от границы раздела пленка-подложка к поверхности пленки.

Таблица 2. Влияние параметров процесса осаждения на структурно-механические свойства пленок кремния.

Температура осаждения, °C	Парциальное давление силана, Па	Средний размер зерен, мкм	Текстура после осаждения	Структура пленки
550	33	---	---	A
	16,5	---	---	A
	8,25	---	---	A
	4,1	---	---	A
560	33	---	---	A
	16,5	---	---	A
	8,25	0–0,13	---	A-K
	4,1	0–0,15	---	A-K
580	33	0,12	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	16,5	0,15	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	8,25	0,18	$\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$	П
	4,1	0,20	$\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$	П
610	33	0,16	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	16,5	0,17	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	8,25	0,23	$\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$	П
	4,1	0,25	$\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$	П
670	33	0,12	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	16,5	0,17	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	8,25	0,25	$\langle 110 \rangle + \langle 331 \rangle$	П
	4,1	0,27	$\langle 110 \rangle + \langle 100 \rangle$	П

Примечания: А — аморфная; А-К — аморфно-кристаллическая; П — поликристаллическая.

При температуре осаждения 580°C и выше $V_{\text{ос}}$ сопоставима с $V_{\text{кр}}$ и происходит осаждение поликристаллического кремния. Диапазон скоростей роста пленок кремния на начальных стадиях процесса при таких температурах представлен в [21]. Исследование динамики роста пленок показало, что зародышеобразование происходит следующим образом. Первоначально образуются центры кристаллизации с размерами $1,5\text{--}2,0$ нм. Затем происходит образование "островковой пленки" с размером отдельных островков $20\text{--}100$ нм (рис. 4). На дальнейших этапах роста наблюдается коалесценция островков и образование сплошного слоя. Толщина, соответствующая окончанию процесса коалесценции островков, составляет 22 ± 4 нм, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [22]. Такие однокристаллитные по толщине пленки ПК характеризуются средним размером зерен 25 нм, сопоставимым с величиной толщины пленки. Пленка, осажденная при таких давлениях, с толщиной, большей вышеуказанной, полностью поликристаллическая с волокнистой структурой, так как при этих условиях горизонтальный рост кристаллитов ограничен [23]. Повышение парциального давления моносилана способствует усилению явления



Рис. 5. Пленка поликристаллического кремния с полусферическими зернами

спонтанного зародышеобразования, что приводит к увеличению числа зародышей на поверхности подложки и формированию более мелкозернистых пленок. Появление в данных условиях кристаллитов, превышающих размеры основных зерен в $3\text{--}5$ раз, вызвано, вероятно, интенсификацией процессов гомогенного образования зародышей в газовой фазе при увеличении давления моносилана. Эти зародыши и их конгломераты, достигающие подложки, служат центрами роста аномально больших зерен кремния.

С уменьшением давления моносилана поверхность растущей пленки становится более "чистой", что обусловлено уменьшением количества адсорбированных на ней побочных продуктов реакции и неконтролируемых примесей. Это способствует снижению плотности зародышей [24, 25] и благоприятно сказывается

на разрастании кристаллитов в горизонтальной плоскости и увеличении размеров зерен.

И, наконец, при температуре осаждения около 560°C и относительно низких давлениях плотность зародышей относительно невелика, а длина поверхностной диффузии адатомов достаточно большая, что способствует усилению вертикального роста кристаллитов. При этом коалесценция полусферических кристаллитов не наблюдается, что обуславливает высокую шероховатость поверхности осаждаемой пленки. В то же время между полусферическими кристаллитами происходит осаждение аморфной пленки. В результате происходит осаждение аморфно-кристаллических слоев, представляющих собой аморфную матрицу, в которую встроены полусферические зерна (рис. 5).

Использование запатентованных комбинированных методов формирования пленок ПК позволяет получать пленки с полусферическими зернами (рис. 5). Как показывает оценка, использование пленок с полусферическими зернами позволяет увеличить эффективную площадь конденсатора в $1,5\text{--}2,0$ раза [26, 27] без увеличения топологической площади ячейки (отношение площади идеальной полусферы и площади круга равно 2). При этом применение таких пленок возможно как в стековых и этажерочных конденсаторах, так и в конденсаторах, имеющих форму простой и сложной короны (рис. 2).

Заключение

Проведено исследование влияния условий получения пленок кремния на его структуру и морфологию. Установлено, что в узких диапазонах температуры осаждения и парциального давления моносилана (560°C и $4,1\text{--}8,25$ Па соответственно) наблюдается осаждение аморфно-кристаллических пленок, в аморфную матрицу которых вкраплены кристаллиты полусферической формы. Оценочные расчеты показывают, что эффективная площадь НК элемента ДОЗУ при использовании поликремния с полусферическими зернами в качестве нижней обкладки конденса-

тора увеличивается в 1,5–2,0 раза. Предложен механизм, объясняющий полученные результаты на основе изменения динамики зародышеобразования и соотношения скоростей осаждения и роста кристаллитов при варьировании условий осаждения.

POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS WITH HEMISPHERICAL GRAINS

A.S. TURTSEVICH, L.P. ANUFRIEV, O.Y. NALIVAICO, V.P. LESNIKOVA

Abstract

The effect of the conditions of polycrystalline silicon film deposition on the structural and morphological properties of polysilicon has been investigated. It was found that the deposition of the amorphous-crystalline silicon films with hemispherical crystallites is observed in the narrow range of the deposition temperature and the partial silane pressure. The mechanism, explaining the obtained results has been proposed. It has been shown that using the hemispherical grain (HSG) polysilicon films as a lower capacitor electrode allow to increase the effective area of the DRAM storage capacitor electrode in 1.5÷2.0 times. The HSG polysilicon films can use in the simple stack or the multilayer fin capacitors and also in capacitors like as the simple or multilayer crown.

Литература

1. The International Technology Roadmap for Semiconductor: 2003 Edition, P. 12.
2. Griffin B., Matas B., Suberbasaux C. Complete coverage of DRAM, SRAM, EEPROM and Flash memory ICs. Chapter 7. DRAM Technology. Integrated circuit engineering corporation. 1997. P. 5–8.
3. Somekh S. // Future Fab Intl. 2001. Vol. 11. Chapter 1.
4. Tasch A.F., Parker L.H. // Proceeding of the IEEE, 1989. Vol. 77, № 3. P. 374–388.
5. Girardie L. // Solid State Technology. 2004. No. 5. P. 75–80.
6. Colombo L., Seidel T. // Solid State Technology. 2004. No. 5. P. 112.
7. Пат. № 6548351 США.
8. Inoue S., Nitagata A., Hieda K., Horiguchi F. // Extended Abstracts of the 21st Conference on Solid State Device and Materials. Tokyo, Aug 28–30, 1989. P. 141–144.
9. Watanabe H., Poto N., Adachi S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 58. № 3. P. 251–253.
10. Fazan P., Lee R. // IEEE Trans. Electron Devices Letter. 1990. Vol. 11, № 7. P. 279–281.
11. Saida S. et al. // Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on, Tokyo, Aug 2001, Vol. 14, № 4, P. 196–201.
12. Watanabe H., Saka A., Tatsumi T., Niiko I. // Solid State Technology. 1992. Vol. 35. № 7. P. 29–33.
13. Mine T., Iigima S., Yugami J. et al. // Extended Abstracts of the 21st Conference on Solid State Device and Materials. Tokyo, Aug 28–30, 1989. P. 137–140.
14. Yoshimuru M., Miano J., Inoue N. et al. // IEDM-90 (27.4.1-27.4.4). P. 654–662.
15. Пат. №2199168 РФ.
16. Mulder J.G.M., Eppenda P., Hendrics M., Tong J.E. // J. Electrochemical Society. 1990. Vol. 137, № 1. P. 273–279.
17. Румак Н.В., Лесникова В.П., Турцевич А.С., Буйко Л.Д. // Докл. АН БССР. 1989. Т. 33, № 11. С. 1005–1007.
18. Bisaro R., Managino J., Proust W. // J. Applied Physics. 1986. Vol. 59, № 4. P. 1167–1177.
19. Cerva H., Oppolzer H. // Springer Proceedings in Physics. Vol. 35. Berlin, 1982. P. 354–365.
20. Kinsbron E., Sternheim M., Knoell R. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42. P. 835–837.
21. Турцевич А.С., Гранько В.И., Наливайко О.Ю., Макаревич И.И. // Вакуумная техника и технология, 1992. Т. 2, № 2. С. 27–30.
22. Пуга В.А., Репинский С.М. // Поверхность. 1986. № 12. С. 44–47.
23. Lee E.G., Im N.B. // J. Electrochemical Society. 1991. Vol. 138, № 11. P. 3465–3469.
24. Meakin D.B., Stoemenos J., Migliorato P., Economou N.A. // J. Applied Physics. 1987. Vol. 61, № 11. P. 5031–5037.
25. Beers A.M., van der Linder H.A., Bloem J. // J. of Crystal Growth. 1983. Vol. 65. P. 411–414.
26. А.с. № 1814468 от 10.08.1996 г.
27. Пат. № 2075134 РФ.