

Процесс осаждения плёнок аморфного кремния, интегрированный в технологию многоуровневой металлизации КМОП БИС

Бабкин С. И., Трохин А. С., Новосёлов А. С.

Исследован процесс осаждения плёнок аморфного кремния в реакторе, используемом при осаждении плёнок вольфрама в межуровневых соединениях КМОП БИС. Показано, что полученные плёнки $a-Si_xH_yN_z$ по своим электрофизическим параметрам могут быть использованы для формирования перемычек типа antifuse Me-a-Si-Me.

Введение

Плёнки аморфного гидрогенизированного кремния a-Si:H нашли широкое применение в фотоэлектронных преобразователях различного типа [1]. Для их получения наиболее часто используется метод плазмохимического осаждения (PECVD) из газовой смеси SiH_4-H_2-AR в диапазоне температур 150-300 °С и давлений 0,1-1,0 торр при удельной мощности плазмы 50-100 мВт/см² [2]. В настоящее время существует как лабораторное оборудование фирмы Oxford instruments, так и промышленное фирмы Applied Materials.

В сочетании с технологией КМОП БИС плёнки a-Si:H применяются для получения элементов необратимого порогового переключения, характеризующихся сопротивлениями в выключенном состоянии $R_{off} \sim 10^9$ Ом и в включённом состоянии $R_{on} < 100$ Ом. Для этих элементов в литературе общепринятым является термин antifuse. На основе antifuse типа Metal to Metal создаются элементы памяти однократно программируемых ПЗУ и элементы коммутации программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Наиболее известной в плане использования технологии данного типа является фирма Actel. Для обеспечения относительно малых напряжений пробоя (< 10 В) в режиме программирования используются плёнки a-Si:H с толщиной до 1000 Å. Для antifuse основным требованием является однородность напряжения пробоя и тока утечки конденсаторов со структурой Me-a-Si-Me [3]. Это в большей степени достигается при использовании аморфных плёнок, так как исключается влияние границ кристаллитов. Процесс осаждения a-Si:H проводится на специализированном оборудовании-реакторе.

В данной работе исследуется возможность получения плёнок a-Si:H, предназначенных для формирования antifuse с использованием оборудования, применяемого в технологии многоуровневой металлизации КМОП БИС, включающей проводящие шины на основе многослойной структуры Ti-Al-Ti-TiN и межуровневые соединения на основе плёнок Ti-TiN-W.

Методика проведения эксперимента

Плёнки a-Si:H осаждались в реакторе диодного типа WxZ, размещённом на платформе Endura PVD 5500 фирмы Applied Materials, изначально предназначенном для осаждения плёнок вольфрама методом осаждения из газовой фазы (WCVD) $WF_6+H_2+Ar+N_2$. При осаждении существует ряд конструктивно-технологических ограничений камеры, влияющих на процесс осаждения:

- большие значения стабилизированной температуры подложкодержателя (425-475 °С), плотности устойчивого горения плазмы (0,22 Вт/см²) и минимального давления в камере (1,5 торр);
- наличие экранирующего кольца, обеспечивающего в стандартном процессе

осаждения вольфрама отсутствие осаждаемой плёнки в краевой зоне (8 мм).

Высокая температура и большая удельная мощность способствуют образованию микрокристаллической фазы $\mu\text{-Si}$ в плёнках a-Si:H с достаточно низким содержанием водорода ($\sim 2\%$) [5,6,7]. Минимизации эффекта образования $\mu\text{-Si}$ способствует добавка в газовую смесь аргона [8] и азота [10].

При исследовании процесса ставилась задача минимизировать необходимые настройки камеры при переходе от процесса осаждения вольфрама к процессу осаждения a-Si:H . Температура подложкодержателя была зафиксирована на уровне $450\text{ }^\circ\text{C}$, а снижение температуры подложки до $380\text{ }^\circ\text{C}$ достигалось за счёт достаточно большого суммарного газового потока (см. ниже). Остальные параметры (давление в реакторе, расходы газов, межэлектродное расстояние) программировались в режимах обработки (recipe).

Исследовались процессы осаждения плёнок с использованием двух вариантов газовой смеси:

- 1) $\text{SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar}$ с суммарным расходом $880\text{ см}^3/\text{мин}$;
- 2) $\text{SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar+N}_2$ – $50\text{-}200\text{ см}^3/\text{мин}$.

Потоки Ar и H_2 в камеру распределялись между зазором экранирующего кольца и подложкодержателя и верхним душем-электродом, что обеспечивало наличие краевой зоны, стабилизацию и однородность плазменного разряда.

Толщины плёнок a-Si:H , осаждённых на структуру SiO_2/Si на кремниевых подложках $D = 150\text{ мм}$, измерялись на спектроскопическом эллипсометре APECS 3020. В программе измерений использовалась модель AT Si Leng Lorenz Oscillator с набором настроечных коэффициентов, что позволяло измерять толщины a-Si:H в диапазоне $50\text{-}1100\text{ \AA}$ с определением оптических констант в диапазоне длин волн $\lambda = 320\text{-}800\text{ нм}$.

Исследовались ВАХ конденсаторов со структурой W-a-Si:H-TiN на измерительном комплексе Agilent Technologies B 1500.

Основные результаты

В условиях зафиксированных минимальных значений удельной мощности плазмы и давления в реакторе одним из определяющих факторов устойчивости процесса осаждения является межэлектродное расстояние Z . Исследования зависимостей скорости осаждения плёнок V_d и неоднородности осаждения $\text{Std } V_d$ от Z показали, что оптимальным является значение $Z = 15\text{ мм}$.

Другим фактором, способствующим улучшению равномерности осаждения, является разбавление SiH_4 в газовой смеси. При этом учитывалось, что увеличение соотношения потоков $\text{H}_2/\text{SiH}_4 > 30$ способствует образованию кристаллической фазы в плёнке [9]. С учётом вышеизложенного наилучшие результаты $\text{Std } V_d < 2\%$ были достигнуты для газовой смеси типа $\text{SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar+N}_2$ при потоках $\text{H}_2 - 600\text{ см}^3/\text{мин}$, $\text{N}_2 - 150\text{ см}^3/\text{мин}$ и $\text{SiH}_4 - 25\text{ см}^3/\text{мин}$.

Оценка степени аморфности получаемых плёнок проводилась на основании данных, полученных в [10]. Из них следует, что для a-Si:H граница перехода от смешанной структуры, содержащей аморфную и кристаллическую фазы, к полностью аморфной фазе характеризуется величиной оптической энергетической щели E_0 в пределах $1,8\text{-}1,9\text{ эВ}$.

Значение E_0 определялось из соотношения 1 [11] для аморфных полупроводников:

$$(k \cdot n)^{1/2} / \lambda = B(h\nu - E_0), \quad (1)$$

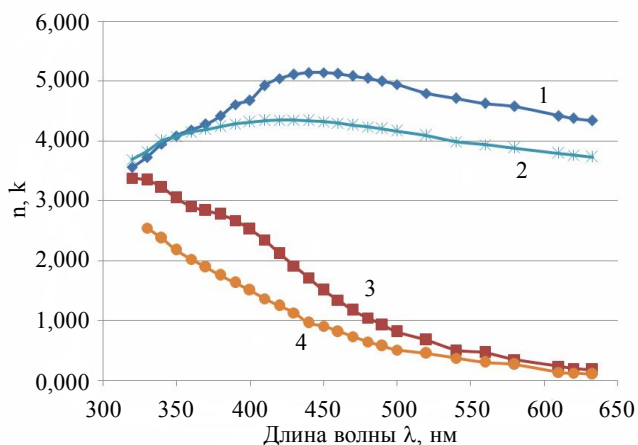


Рис. 1

Зависимость n (1,2) и k (3,4) от длины волны для плёнок типа $\text{SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar}$ (1,3) и $\text{SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar+N}_2$ (2,4)

Влияние содержания азота в газовой смеси на оптические свойства плёнок a-Si:H иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1

Значения оптических констант плёнок a-Si:H при $\lambda = 633$ нм в зависимости от потока азота в газовой смеси

Оптические константы	Поток азота, $\text{см}^3/\text{мин}$				
	0	50	100	150	200
n	4,39	4,15	3,95	3,80	3,67
k	0,14	0,14	0,11	0,10	0,09

На основе изложенных результатов в табл. 2 представлены сравнительные характеристики процесса осаждения в камере WxZ с процессом фирмы HTE Labs, используемым в технологии TFT матриц [12].

Таблица 2

Параметры процесса осаждения и плёнок аморфного кремния, полученных в указанных камерах

Характеристика	WxZ	HTE Labs	Примечание
Скорость осаждения, $\text{Å}/\text{с}$	2,2-3,2	6-7	Для RFPECVD процесса с $f = 13,56$ мГц
Неравномерность толщины плёнки по пластине, %	< 5	< 7	
Показатель преломления	3,67-3,80	3,65-3,85	

Электрофизические параметры плёнок $\text{a-Si}_x\text{H}_y\text{N}_z$ с показателем преломления $n = 3,8$ исследовались с использованием тестового элемента, конструкция которого показана на рис. 2. Измерялись напряжение пробоя, фиксируемое по уровню тока 1 мА, и ток утечки I при напряжении 3,3 В.

Зависимость указанных параметров для конденсаторов с различной толщиной плёнки $\text{a-Si}_x\text{H}_y\text{N}_z$ в качестве диэлектрика представлена на рис. 3, критическое поле пробоя для полученного a-Si:H составляет порядка $E = 1 \cdot 10^6$ В/см, а проводимость

где k, n – оптические константы для данной длины волны λ , B – константа.

Полученные зависимости n и k от длины волны для плёнок a-Si:H , осаждённых из газовой смеси различного состава, показаны на рис. 1, из которого с учётом (1) следует, что для плёнки типа a-Si:H величина E_0 составляет $\sim 1,65$ эВ, а для плёнок типа $\text{a-SiH}_4\text{-H}_2\text{-Ar+N}_2$ E_0 находится в пределах 1,8-1,85 эВ. Согласно [10] значение $E_0 = 1,84$ эВ достигается при концентрации в плёнке азота и водорода около 10 % и предполагает образование аморфной плёнки сложного состава $\text{Si}_x\text{H}_y\text{N}_z$.

$\sigma = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Данное значение σ существенно больше типичных значений темновой проводимости для a-Si:H, что может быть связано с примесью азота в плёнках.

Полученные данные соответствуют характеристикам antifuse типа Metal to Metal [3].

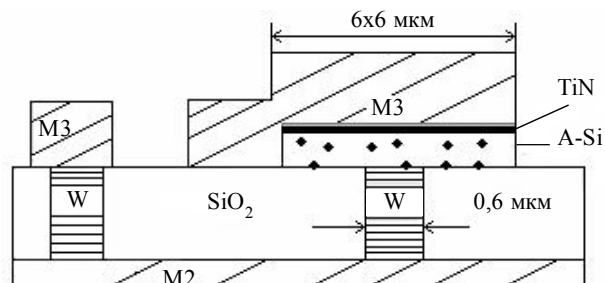


Рис. 2

Конструкция конденсатора на основе плёнок a-Si:H

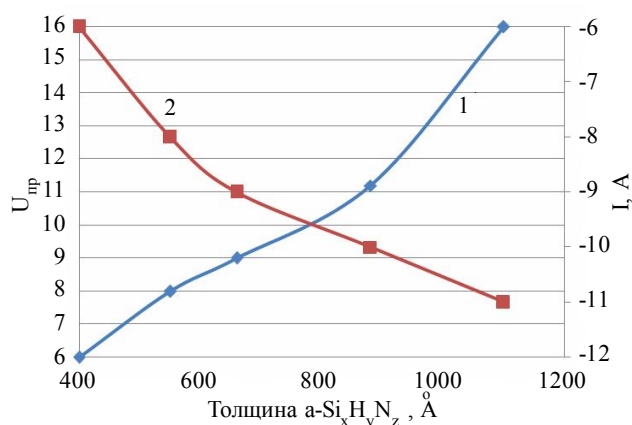


Рис. 3

Зависимость напряжения пробоя (1) и тока утечки (2) конденсатора от толщины аморфного кремния

Заключение

Исследован процесс осаждения плёнок аморфного кремния толщиной 100-1100 Å в реакторе диодного типа при температуре подложкодержателя 450 °С, используемом в технологии многоуровневой металлизации КМОП БИС для осаждения плёнок вольфрама в межуровневых соединениях. Осаждаемые плёнки характеризуются преимущественно аморфным фазовым составом и сложной стехиометрией a-Si_xH_yN_z с содержанием азота и водорода порядка 10 %. Критическое поле пробоя и проводимость составили $E = 1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ и $\sigma = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ соответственно. Неоднородность по толщине и электрофизическим свойствам не превышает 5 % на подложках окисленного кремния Ø150 мм.

Полученные плёнки аморфного кремния могут быть использованы для формирования элементов переключения типа antifuse.

Литература

1. А. Меден, М. Шо. Физика и применение аморфных полупроводников // Перевод с английского. – М.: Мир. – 1991. – 470 с.
2. Y. Kuo, K. Okajima and M. Takeichi. Plasma processing in the fabrication of amorphous silicon thin-film transistor arrays // IBM J. Res. Develop. – Vol. 43. – N 112. – January/March 1999. – P. 73-88.
3. Chih-Ching Shih and et. al. Characterization and Modeling of a Highly Reliable Metal-to-Metal Antifuse for High-Performance and High-Density Field Programmable Gate Arrays // Reliability Physics Symposium 8-10 Apr 1997 Annual Proceedings, IEEE International. – P. 25 -33.
4. Actel Guide Quality & Reliability February. – 2001. – P. 78-90.
5. Chandan Das and Swati Ray. Power density in RF PECVD: a factor for deposition of amorphous silicon thin films and successive solid phase crystallization // J. Phys. D: Appl. Phys. – 35 (2002). – P. 2211-2216.
6. Se-Won Ryu, Do-Hyun Kwon, Sung-Gye Park and Hyoung-June Kim. The Properties of Low Hydrogen Silicon Thin Films Deposited by Mesh-type PECVD // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – Vol. 664 © 2001 Materials Research Society. – P. A5.8.1-A5.8.6.
7. Arno Hendrikus Marie Smets. Growth Related Material Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon // Eindhoven University of Technology. – 2002. – ISBN 90-386-1969-3.
8. J. Löffler, C. Devilee, M. Geusebroek, W. J. Soppe and H.-J. Muffler. Deposition of µc-SI:H by microwave PECVD – influence of process conditions on layer properties // Presented at the 21st European Photovoltaic Solar

Energy Conference and Exhibition. – 4-8 September 2006. – Dresden, Germany.

9. Veronika Vavru_ková, Jarmila Müllerová, Pavel Šutta. Microstructure related characterization of a-Si:H thin films PECVD deposition under varied hydrogen dilution // Advances in Electrical and Electronic Engineering 2007-6-3. – P. 108-111.

10. Takashi Ehara. Hydrogen bonding properties in nitrogen doped microcrystalline silicon and amorphous silicon prepared using highly diluted silane // Thin Solid Films 379 (2000). – P. 292-296.

11. D R McKenziei and al. Optical properties of a-Si and a-Si:H prepared by DC magnetron techniques // J. Phys. C: Solid State Phys. – Vol. 16. – 1983. – P. 4933-4944.

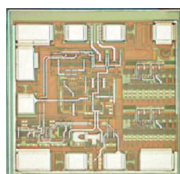
12. Проспект фирмы HTE Labs «Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition». – 1990-2012.

СВЧ МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

производства ОАО «НПП «ПУЛЬСАР»

1324ПЦ1 / 1324ПЦ2 / 1324ПЦ3У

СВЧ делители частоты с фиксированным коэффициентом деления



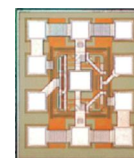
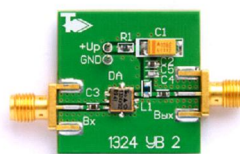
1324ПЦ1(1324ПЦ2, 1324ПЦ3) - СВЧ МИС широкополосного статического делителя частоты с фиксированным коэффициентом деления 2 (4, 8) в диапазоне рабочих частот до 3,8 ГГц, согласованная по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом, обладает широким динамическим диапазоном по входу от -10 дБм до +10 дБм. Имеет вход для подачи сигнала отключения питания. СВЧ МИС изготавливается в миниатюрном металлокерамическом корпусе с размерами 5x5 мм² и в виде кристаллов.

Основные характеристики

Диапазон рабочих частот	3,8	ГГц
Динамический диапазон	-20..+10	дБм
Уровень фазовых шумов	-147	дБ/Гц
Выходное напряжение	350	мВ
Однополярное питание	+5	В
Потребляемый ток	45	мА
Диапазон рабочих температур	-60...+85	°С

1324УВ2 / 1324УВ3

СВЧ усилители



1324УВ2 (1324УВ3) - СВЧ МИС широкополосного усилителя с диапазоном рабочих частот до 3,5 ГГц и выходной мощностью до 100 мВт, согласованная по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом, обеспечивает возможность изменения тока потребления в широких пределах для получения заданной выходной мощности. СВЧ МИС изготавливается в миниатюрном металлокерамическом корпусе с размерами 5x5 мм² и в виде кристаллов.

Основные характеристики

Диапазон рабочих частот	3,5	ГГц
Коэффициент усиления	21 / 19	дБ
Коэффициент шума	2,7 / 2,9	дБ
Выходная мощность	100 / 30	мВт
Диапазон рабочих температур	-60...+85	°С