Отделение нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук. Научный совет РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационновычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания».

Консорциум «Перспективные материалы и элементная база информационных и вычислительных систем» ЗАСЕДАНИЕ НАУЧНОГО СОВЕТА И НАУЧНОГО СЕМИНАРА

по теме «Системы металлизации» 27 марта 2019 г., РТУ МИРЭА

Перспективные технологии для структур многоуровневой металлизации суб-10 нм УБИС: прецизионное плазмохимическое травление и плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение Мяконьких Андрей Валерьевич,

Рогожин А.Е., Руденко К.В.



Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук

Работа частично поддержана

грантами РФФИ:

- Альтернативная технологическая схема и процессы формирования структур многоуровневой металлизации УБИС на основе меди и кобальта (проект №18-29-27029мк)
- Исследование методов анизотропного плазмохимического травления lowk слоев с защитой пористой структуры материала (проект 18-29-27025мк)

План доклада

- Подходы к созданию структур многоуровневой металлизации
- В рамках традиционного Dual Damascene
 - Ключевая технология: травление low-k диэлектрика с сохранением структуры и є материала
- Альтернативный подход (маршрут)
 - Осаждение металла
 - Анизотропное плазменное травление металлических слоев (кобальт, рутений, медь)
 - Атомно-слоевое осаждение барьерных слоев
 - Spin-on нанесение диэлектрика и планаризация

Проблемы при создании систем

многоуровневой металлизации

<u>Диэлектрик</u>



M.R. Baklanov. Materials for Advanced Interconnects



Figure 1. Evolution of low-k materials since early 1990th. Materials for sub 7 nm technology nodes are under exploratory research and selection.

Baklanov, M. R., & Jing Zhang. (2016) Low-k dielectrics for sub 10 nm technology pode. 2016 13th IEEE ICSICT.



(Intel, IEDM 2017)

$$RC = 2\rho k\varepsilon_0 \left(\frac{4L^2}{P^2} + \frac{L^2}{T^2}\right)$$



Dual Damascene process (via first)





- 2. литография via



5. литография тренча



7. удаление резиста





 Формирование барьерного слоя и лайнера



3. травление via



6. травление тренча



9. Осаждение меди

Иллюстрация деградации low-k

диэлектрика – HF тест



- а Тренч в структуре SiCN/low-k/SiCN после анизотропного травления в плазме
- b тот же тренч после промывки в HF-буфере



Буферный раствор НF хорошо растворяет SiO₂, но не растворяет OSG, селективность 300:1

Методы исследования деградации low-k диэлектриков:

- С-V-метрия прямой метод измерения k;
- FTIR абсорбционная ИК-спектроскопия (средний ИК диапазон);

Количественный контроль связей Si-C, Si-O, -OH групп и т.п.

SE – спектральная эллипсометрия, эллипсометрическая порометрия;

Контроль пористости материала, значения n (т.е. ε в оптическом диапазоне)

K. Yonekura, K. Goto, M. Matsuura, N. Fujiwara, and K. Tsujimoto. "Low-damage damascene patterning using porous inorganic low-dielectric-constant materials," Jpn. J. Appl. Phys. 44, 2976 (2005).

Механизмы деградации

диэлектрика при травлении

Причины, вызывающие рост эффективного значения k в пористых диэлектриках:

Вакуумный ультрафиолет, излучаемый плазмой

Ионные потоки из плазмы

□ Химически активные радикалы, инициирующие реакции внутри пор



 Увеличение значения к обусловлено уплотнением поверхности, изменениями химического состава и конфигурации связей, разрушением связей Si-CH₃, образованием оборванных связей и последующей адсорбцией влаги из атмосферы.

Адсорбция паров в порах

- Наноразмерные поры могут быть заполнены жидкостью, конденсированной из паров низкого давления.
- Эффект можно использовать как для измерений «пористости» и сохранения структуры пористого материала при травлении



Brunauer–Emmett– Teller (BET) theory



Ellipsometric porosimetry

The dependence of ε film on the relative vapor pressure of the adsorbate

Effective medium approximations (EMA)

Adsorption and desorption isotherms



Pore size distribution

$$BET equation
$$t_0 \cdot C \cdot K \frac{P}{P_0} \left(1 - K \frac{P}{P_0}\right) \cdot \left(1 + (C - 1) \cdot K \frac{P}{P_0}\right)$$$$

t

BET theory was used to obtain values of the thickness of the layer adsorbed on the pore walls and make correct estimation of pore size distribution. BET parameters were estimated from direct ellipsometric measurements during adsorption on SiO₂, due to the fact that non-porous material was not available

$$r = r_m + t$$



Эллипсометрическая

порометрия



Спектральный эллипсометр M-2000X (J.A.Woollam Co. Inc., USA) 479 длин волн в диапазоне 246,3- 999,8 нм.

Поросиметр был реализован на основе спектроскопического эллипсометра М-2000Х во ФТИАН РАН. В качестве адсорбентов использованы: вода, изопропанол, этанол, толуол



The scheme of instrument for adsorption ellipsometric porosimetry

Изобары адсорбции CF₃Br и CF₄



 СF₃Br образуtт плазму с низкой концентрацией F*, основными частицами плазмы являются CF3 * и Br * в нейтральной и ионизированной формах. Нелетучие побочные продукты (SiBr_xF_y, HBr...) могут конденсироваться в порах, защищающих пленку ULK от повреждения плазмой.

Частица	В плазме CF ₄ , см ⁻³	В плазме CF ₃ Br, см ⁻³
F	$3.15E{+}10$	3.04E + 08
Br	0	2.26E+11



 СF₄, образует обогащенную фтором плазму, и не ожидается образования нелетучих побочных продуктов. Однако плазма содержит высокую концентрацию радикалов CF2, которые могут образовывать фторуглеродные полимеры на поверхности с низким k и защищать от проникновения радикалов F *.

ИЗОБАРЫ АДСОРБЦИИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫБРАННЫХ ДЛЯ КРИОГЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ LOW-К ДИЭЛЕКТРИКОВ Резванов А.А., Горнев Е.С., Красников Г.Я., Гущин О.П., Могильников К.П., Чанг Л., Марнефф Ж.Ф.Д., Бакланов М.Р., Дюссаррат К. 2015. № 1 (157). С. 49-57.

Травление пористых

диэлектриков в плазме



Образцы:

 spin on organosilicate glass (OSG) 200 нм на кремнии, k=2.3-2.6

Оборудование:

- ІСР 2МГц источник плазмы (пластины до 200 мм)
- 13.56 МГц ВЧ смещение (энергия ионов 130эВ)
- Давление в камере 20 мТорр
- Диапазон температур -120°C- +20°C
- Измерения (до и после процесса)
 - Spectroscopic ellipsometry (ER and RI)
 - Эллипсометрическая порометрия
 - FTIR
 - Интерферрометрия



PlasmaLab 100 Dual

Сравнение процессов травления в





• Похожее поведение наблюдалось при травлении в плазме CF3Br пористых РЕСVD пленок с низкой диэлектрической проницаемостью [1].

I. Clemente, N. Koehler, A. Miakonkikh, S. Zimmermann, S. E. Schulz, K. Rudenko, CF₃Br plasma cryo etching of low-k porous dielectric, Abstract book, 3rd International School and Conference Saint-Petersburg OPEN on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (SPbOPEN2016), p. 491, 2016

FTIR спектры исходных пленок



Криогенное травление в плазме CF₃Br





FTIR spectra of low-k after etching in CF_3Br plasma before (a) and after annealing (b).

EDL of low-k films after etching and additional annealing at 300°C for 30 min

Thickness, nm	EDL, nm
116.6 (±2 nm)	38.1 (±2 nm)
130.5 (±2 nm)	42.2 (±2 nm)
107.8 (±2 nm)	35.1 (±2 nm)
	Thickness, nm 116.6 (±2 nm) 130.5 (±2 nm) 107.8 (±2 nm)

Криогенное травление в плазме CF₄



Hydrophilic properties after etch

(water adsorption)



Pore size distribution of the initial film and after cryo etch (CF₃Br)



- Pristine film has ~1.2 nm mean pore size
- After etch in CF₃Br pore sizes decrease
- Not observed in case of CF₄ plasma



The process of low-temperature etching of porous low-k dielectrics in $C_2F_4Br_2$ plasma, <u>A. Miakonkikh</u>, A. Rezvanov, A.Vishnevskiy, K.Rudenko, PESM-2019, Grenoble, France

Альтернативные подходы

- Недостатки схемы, основанной на dual damascene для суб-10 нм УБИС
 - Деградация low-k при травлении
 - Сложности электрохимического осаждения металла в узкие тренчи
 - Необходимость химико-механической полировки избыточного металла, лежащего на low-k диэлектрике, сложности в определении момента окончания процесса СМР

• Преимущества альтернативной схемы

- Возможно магнетронное осаждение металлов
 - Низкое сопротивление
 - Сухой вакуумный процесс
 - Низкие температуры осаждения
- Травление металла, а не low-k диэлектрика
 - Нет проблемы повреждений диэлектрика
 - !!! Нужна низкотемпературная технология
 - Простая технология наненсения барьерного слоя методом ALD (Ru)
- CMP low-k диэлектрика с остановкой на металлической структуре
 - Простое определение момента окончания процесса

Применение кобальта в системах

металлизации

TechInsights has found the long-awaited Cannon Lake - the Intel 10 nm logic process inside the i3-8121U CPU, used in the Lenovo IdeaPad330.

This innovation boasts the following:

- Logic transistor density of 100.8 mega transistors per mm², increasing 10nm density 2.7X over the 14nm node
- Utilizes third generation FinFET technology
- Minimum gate pitch of Intel's 10 nm process shrinks from 70 nm to 54 nm
- Minimum metal pitch shrinks from 52 nm to 36 nm

Process Highlights:

- Deepest scaled pitches of current 10 nm and upcoming 7 nm technologies
- First Co metallization and Ru usage in BEOL
- New self-aligned patterning schemes at contact and BEOL

Design Highlights:

Tech

- Hyperscaling via 6.2-Track high density library
- Contact on active gate (COAG) cell-level usage



Metal level	Pitch (nm)	Lithography	Metal
MO	40	SAQP -	Со
		unidirectional	
M1	36	SAQP -	Со
		unidirectional	
M3/M4	44nm	SADP -	Cu with Co liner and cap
		unidirectional	
M5	52	SADP -	Cu with Co liner and cap
		unidirectional	
M6	84	Single -	Cu
		bidirectional	
M7/M8	112	Single -	Cu
		bidirectional	
M9/M10	160	Single -	Cu
		bidirectional	
TM0	1080	Single -	Cu
		bidirectional	
TM1	11,000	Single -	Cu
		bidirectional	



https://www.techinsights.com/technology-intelligence/overview/latest-reports/intel-10-nm-logic-process/

Необходимость перехода к новым





Fig. 2. Comparison of effective Cu resistivity with various liner to Cu volume ratios in damascene line with Co resistivity

Electromigration and resistivity in on-chip Cu, Co and Ru damascene nanowires, IITC 2017





IITC 2017, IMEC

Технологическая схема



Плазменное травление меди

- Высокотемпературный процесс в хлорсодержащей плазме:
 - CuCl₂
 - Т_{пл}=498 °С
 - Т_{кип}= 993 °С
 - CuCl
 - Т_{пл}= 423 °С
 - Т_{кип} =1,490 °С
- Не травится во фтор-содержащей плазме
 - CuF₂
 - T_{пл}= 836 °C
 - Т_{кип} =1,676 °С
 - CuF
 - Нестабильный
- Возможно травление в бромсодержащей плазме
 - CuBr₂
 - T_{пл}= 492 °C
 - Т_{кип} = 1345 °С
 - CuBr
 - Т_{пл}= 498 °С
 - Т_{кип} = 900 °С

Низкотемпературный процесс в плазме водорода



ACS Applied Materials & Interfaces VOL. 2, NO. 8, 2175–2179,2010

Низкотемпературный процесс

травления меди (ФТИАН)

- Водородсодержащая плазма
- Комнатная температура
- Селективность к HSQ-резисту более 20
- Селективность к SiO₂ более 30
- Скорость травления 30 нм/мин
- Отсутствие следов переосаждения
- Наклон боковой стенки не более 5 градусов
- Сечение проводника 35х35 нм
- Нет дрейфа процесса







Атомно-слоевое осаждение

- Конформные пленки в тренчах
- Пленки высокими барьерными свойствами
- Возможность управляемой стехиометрии
- Возможность низкотемпературного осаждения
- Монослойная точность контроля толщины покрытия







26

Атомно-слоевое осаждение TaN

- Нитриды тантала имеют сложную стехиометрию и огромные различия в проводимости в зависимости от кристаллической фазы
- В зависимости от условий осаждения (параметры и состав плазмы H₂/N₂/NH₃) различия в удельном сопротивлении могут быть значительными 400 – 5х10⁴ мкОм•см
- Достигнута высокая конформность осаждения в высокоаспектные структуры
- Получен нитрид тантала соответствующий кубической проводящей фазе TaN с периодом решетки a=4.33Å.





TEM изображение и структурный анализ в режиме микродиффракции электронов на ALD образце TaN

Rudenko K.V., Myakon'kikh A.V., Rogozhin A.E., et al, Atomic Layer Deposition in the Production of a Gate HkMG Stack Structure with a Minimum Topological Size of 32 nm (2018) Russian Microelectronics, 47 (1)

Атомно-слоевое осаждение Ru

- Возможно осаждение рутения методом ALD из металоорганических прекурсоров RuCp₂ and Ru(EtCp)₂
- Термический и плазмостимулированный процессы
- Низкие значения шероховатости и удельного сопротивления





Fig. 1. The dependence of the growth rate and resistivity of the PE-ALD Ru films deposited on SiO₂ at the deposition temperature (T_5) of 300 °C (a) from RuCp₂ and (b) from Ru(EtCp)₂.

S.-J. Park et al. / Microelectronic Engineering 85 (2008) 39-44

Возможности травления кобальта



Scheme 1. Schematic illustration of cobalt thermal dry etching after saturated with hfacH at room temperature.

J. Zhao et al. Applied Surface Science 455 (2018) 438-445



Magnetic metal etching with organic based plasmas. I J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 23, No. 4, Jul/Aug 2005

Metal etching with organic based plasmas. II. CO/NH 3 plasmas J. Vac. Sci. Technol. B 23, 1597 (2005); 10.1116/1.1935531



Plasma Chem Plasma Process (2008) 28:617-628

Выводы

- Исследуются два подхода к формированию многоуровневой металлизации суб-10 нм УБИС
- Травление пористых диэлектриков при пониженной температуре позволяет достичь снижения уровня повреждений за счет различных механизмов:
 - Конденсация плазмообразующего газа в порах
 - Конденсация продуктов травления
 - Осаждение фторуглеродного полимера
- Исследуется также альтернативный подход, для которого разрабатываются процессы травления меди и кобальта, процессы атомнослоевого осаждения барьерных слоев