

НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

АО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»

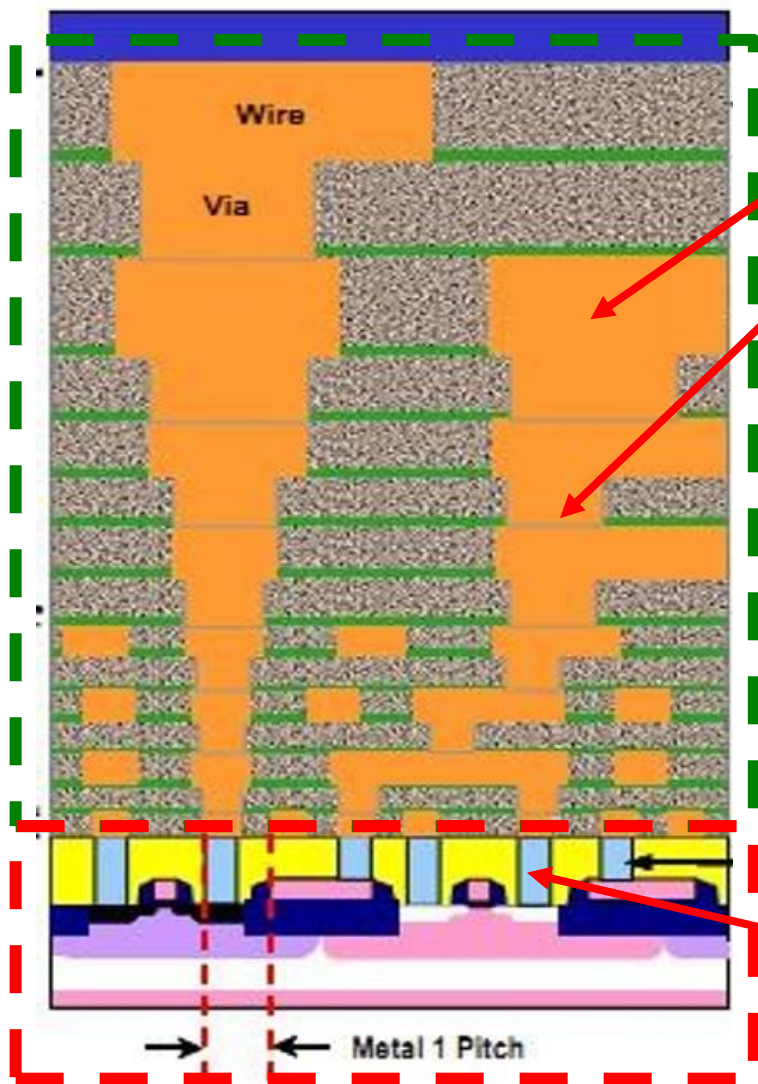
Перспективные материалы для микроэлектроники и их применение

В рамках научной сессии: «Новые материалы с заданными функциями и
высокочистые наноматериалы для создания элементной базы
информационно-вычислительных и управляющих систем»

Академик РАН Красников Г.Я., д.т.н. Горнев Е.С, Резванов А.А.

- Перспективные металлы для межсоединений
- Новое поколение low-k диэлектриков. Проблемы в интеграции
- Селективное осаждение материалов
- Материалы группы MX₂
- Заключение

Структура интегральной схемы



BEOL – Back End Of Line

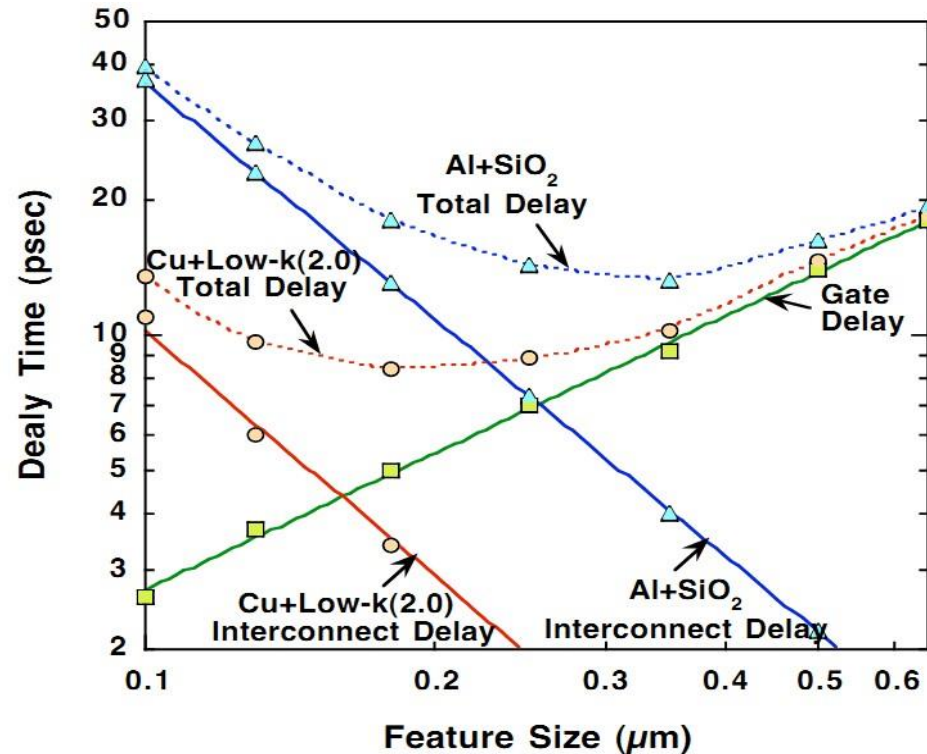
Линии (Trench)

Переходные окна (Via)

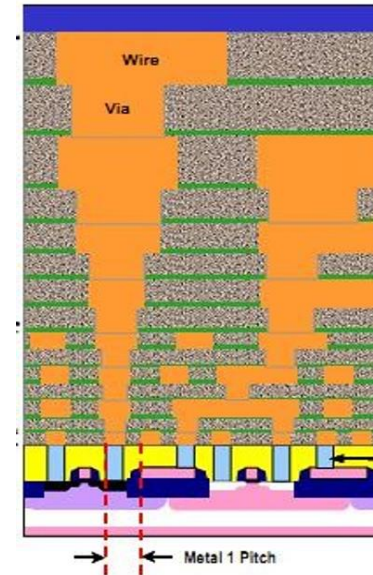
Контактные окна

FEOL – Front End Of Line





V. Jousseume et al., *J. Electrochem. Soc.*, 159, G49 (2012).

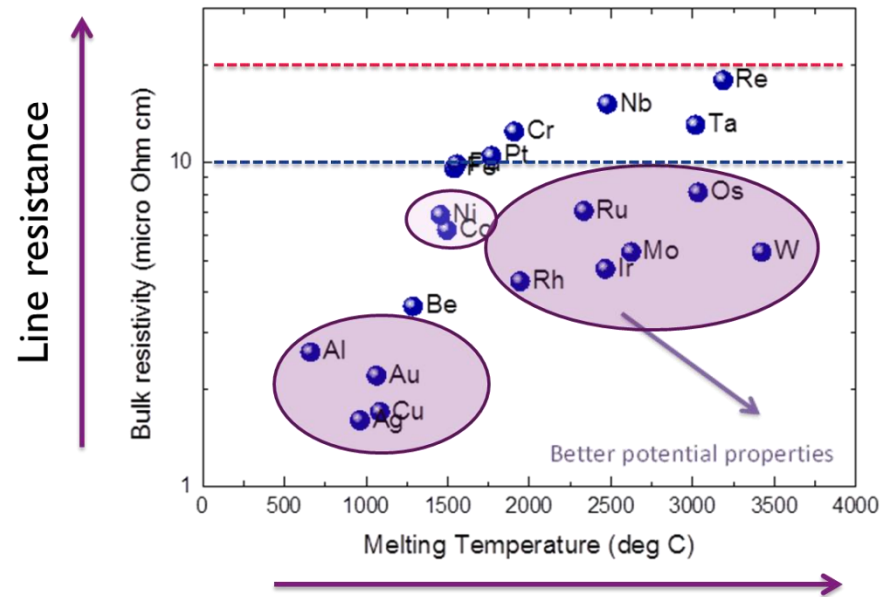
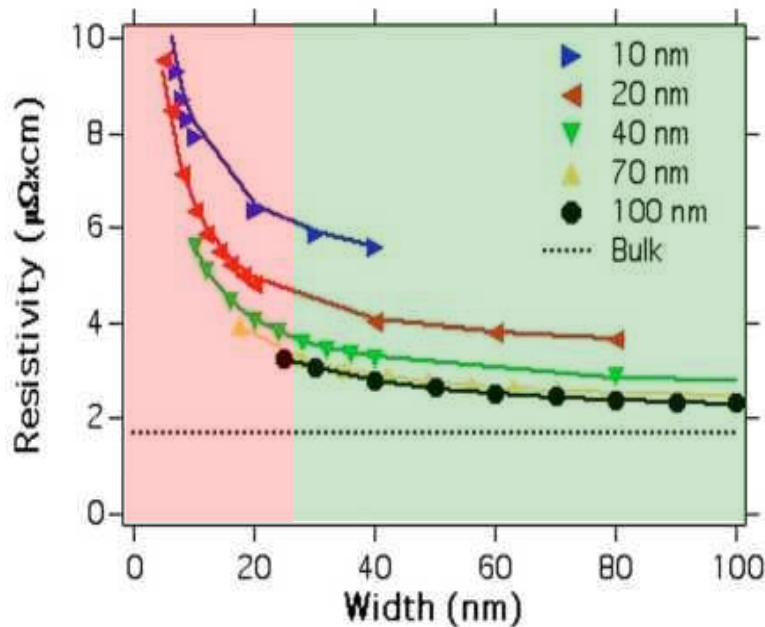


$$\tau = RC = \left(\frac{\rho L_m}{W_m T_m} \right) \cdot \left(\frac{k \epsilon_0 W_m L_m}{T_d} \right) = \frac{k \epsilon_0 \rho L_m^2}{T_d T_m}$$

- С уменьшением технологической нормы RC задержки начинают превалировать над временем переключения транзистора (к примеру, переход из состояния логического «0» в логическую «1»).

Переход к новым металлам

- Вплоть до технологии 90 нм в качестве основного металла в системе металлизации использовался Al
- Начиная с технологии 90 нм Al был заменен Cu, так как медь имеет меньшее удельное сопротивление.



- Удельно сопротивление меди ρ_{Cu} начинает резко возрастать при ширине линии меньше 30 нм.
- Можно снизить рост ρ_{Cu} за счет увеличения высоты проводников, однако, при этом возникают технологические сложности связанные с травление диэлектрика и ХМП меди.
- Необходимо производить поиск альтернативных металлов.

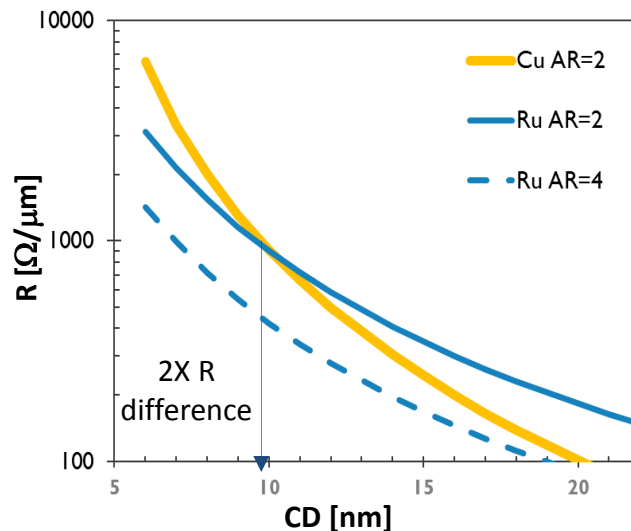
Альтернативные металлы

Дорожная карта для металлов

Удельное сопротивление

Соединения

Layer	N5 MP32-28	N3 MP24-20	N2 MP18-14	<N2
L11/LI 2	Co	Co or Ru	Ru (or Co)	Binary compounds: NiSi, CoSi ₂ , Cu ₃ Ge, ...
Vint	Co	Co or Ru	Ru (or Co)	
Mint	Co	Co or Ru	Ru (or Co)	
V0	Cu or Co	Cu or Co or Ru	Co or Ru	Ternary compounds: TiSiC, TiAlN, ... Nb, graphene
M1	Cu	Cu or Ru	Cu or Ru	
V1	Cu or Co	Cu or Co or Ru	Co or Ru	
M2	Cu	Cu or Ru	Cu or Ru	
V2	Cu or Co	Cu or Co or Ru	Co or Ru	
M3	Cu	Cu or Ru	Cu or Ru	

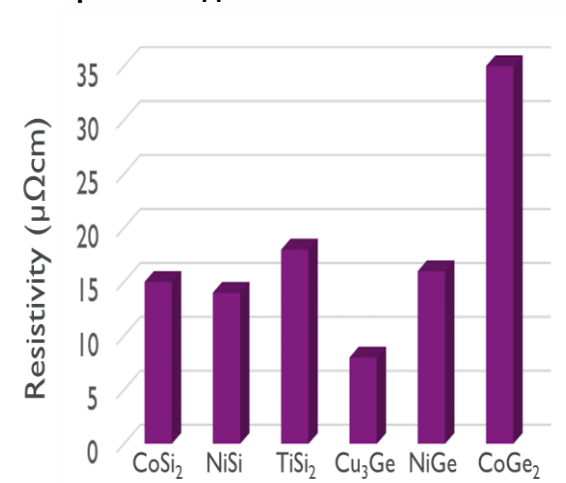


Соединения Ru Co Cu

Не требуют барьера Требуют барьера

При использовании альтернативных металлов удастся значительно снизить удельное сопротивления при увеличении AR

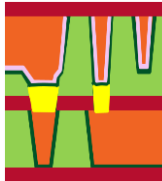
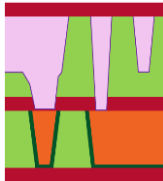
Бинарные соединения



Бинарные соединения могут быть использованы для суб-10 нм технологических норм

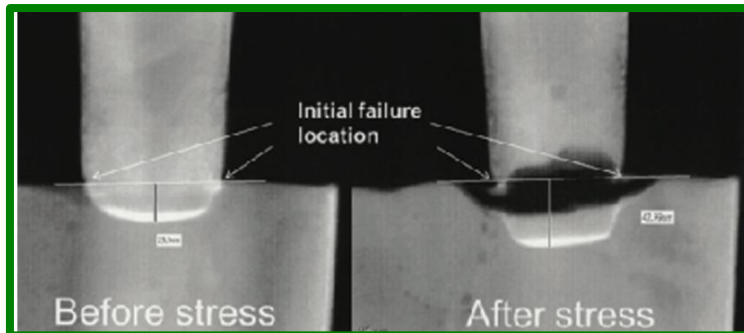
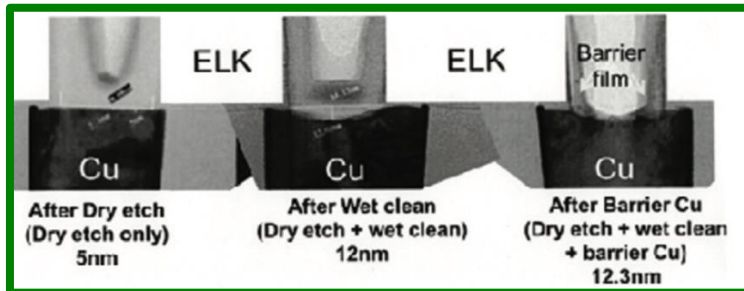
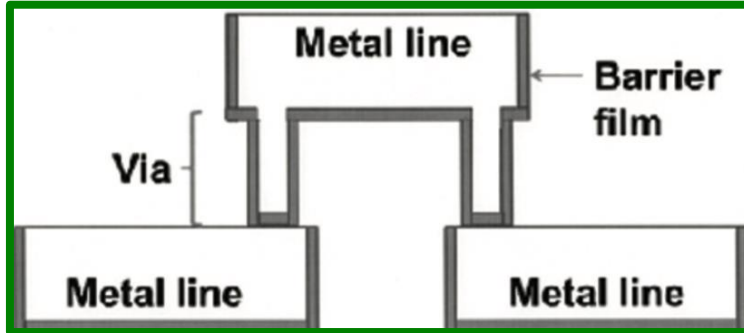
- Контактные окна
W => Co => Ru => Соединения
- Линии (Trench)
Cu => Co => Ru => Соединения
- Переходные окна (Via)
Cu => Co => Ru => Соединения

Развитие BEOL металлизации

Вид	TaNCo	TaNRu	Co via	Mn-based/Ru	Co-fill	Ru-fill	Metal-etch	CVD-Cu
Полушаг	22 нм	14 - 16 нм линии и Via			10 - 12 нм линии и Via		< 10 нм линии и Via	
Схематическое изображение								
Заполнение В/Л/С/	TaNCo/Cu/ Cu plate	TaNRu/(Cu)/ Cu reflow, plate	any metal selective, prefill	MnRu/(Cu)/ Cu reflow, plate	Mn, .. /Co Co plate, CVD	adhesion flash Ru ALD/CVD	SiCN/ Ru/ cap	Mn, ... CVD-Cu

- С переходом на новые технологические нормы, начинают использовать, частично или полностью, новые металлы – Co, Ru, новые барьерные слои – Mn, Ru и их комбинация.

Однородность заполнения и надежность структур

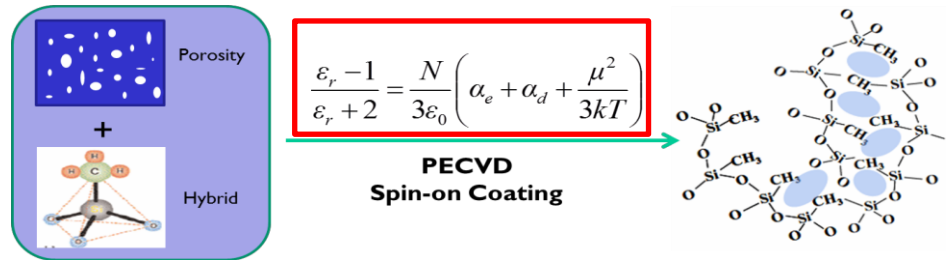


- ❑ При введении новых материалов проявляются метрологические проблемы – контроль состава, легирующие примеси, механические напряженности, электрические параметры;
- ❑ Проблемы с электромиграцией при уменьшении линейных размеров – electron migration, stress migration;
- ❑ Необходимые новые методики контроля:
 - XPS (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия);
 - XRR (рентгеновская рефлектометрия);
 - XRD (рентгеновская дифрактометрия);
 - XRF (рентгеновская флуоресценция);
 - LEXES (рентгеновская эмиссионная спектроскопия на низкоэнергетических электронах).

- Перспективные металлы для межсоединений
- Новое поколение low-k диэлектриков. Проблемы в интеграции
- Селективное осаждение материалов
- Материалы группы MX₂
- Заключение

Пористые Low-k диэлектрики

- Low-k диэлектрики – это класс материалов, у которых диэлектрическая проницаемость меньше, чем у классического SiO_2 ($k=4$).



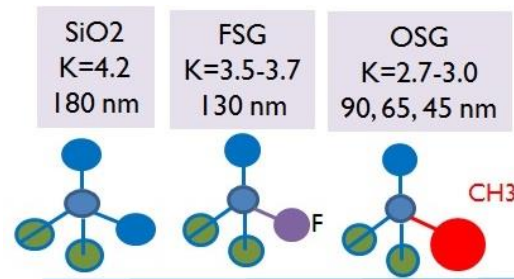
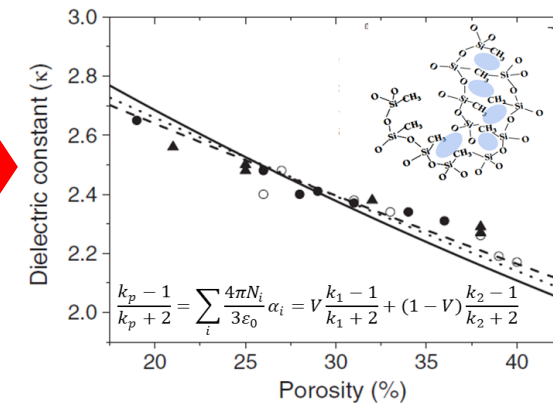
Замещение атомов кислорода

Снижение диэлектрической проницаемости

Уменьшение
поляризуемости

Внедрение
пористости

Пористость ~ 20-50%,
гибридные композиции

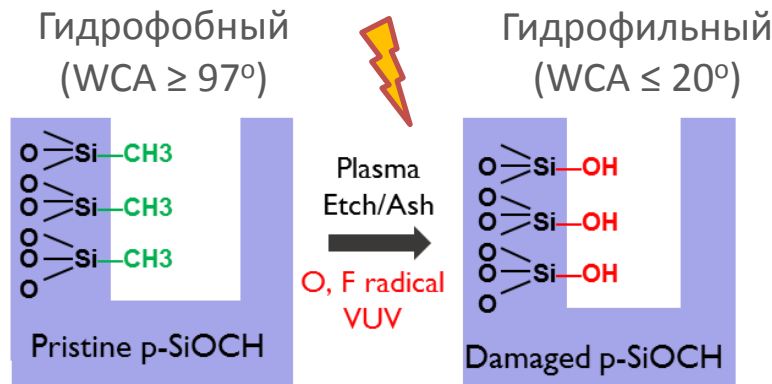


➤ Интеграция высокопористых диэлектриков – сложная задача.

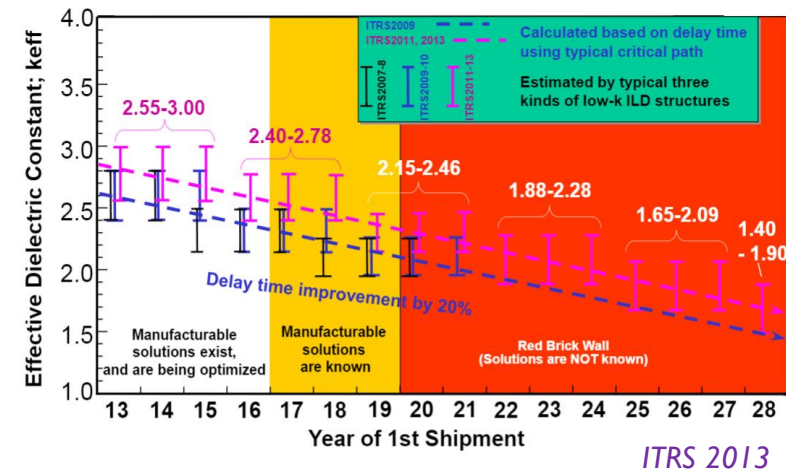
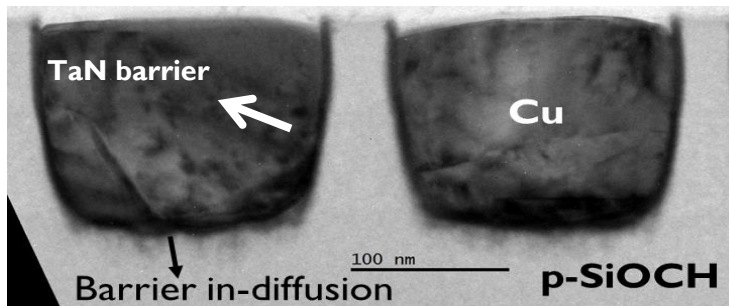
Проблемы в интеграции Low-k диэлектриков

- Диэлектрические свойства деградируют при интеграции (травлении) и формировании металлической разводки.

Дегradация
в процессе
травления

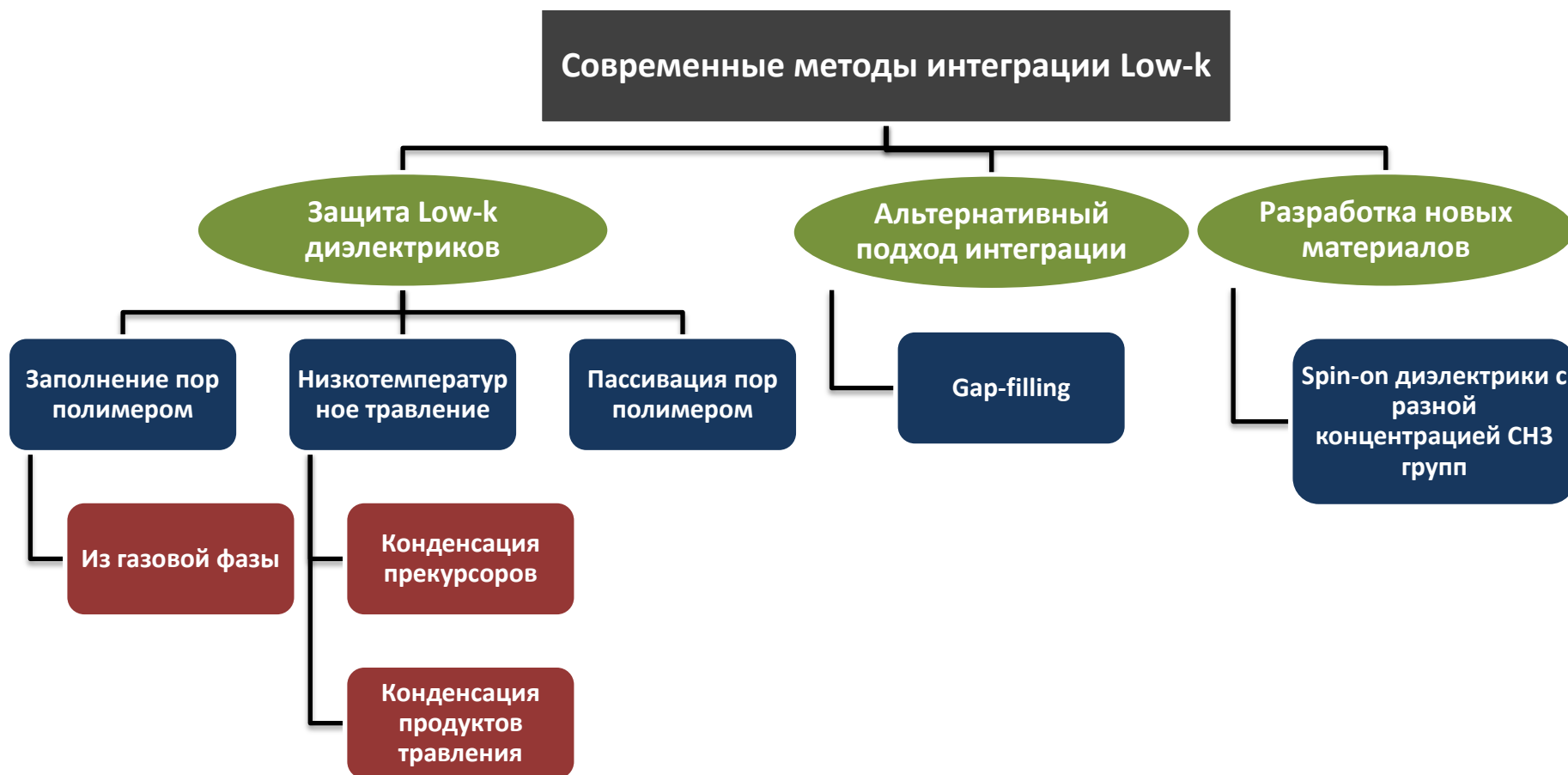


Диффузия
металла



- Дегradация возрастает с повышением пористости ($> 30\%$) и радиуса пор (> 1 нм).
- Масштабирование k значительно ниже ожидаемого (ITRS). Нет решения по интеграции low- k со значением $k < 2.4$.

Исследуемые методы интеграции высокопористых Low-k материалов



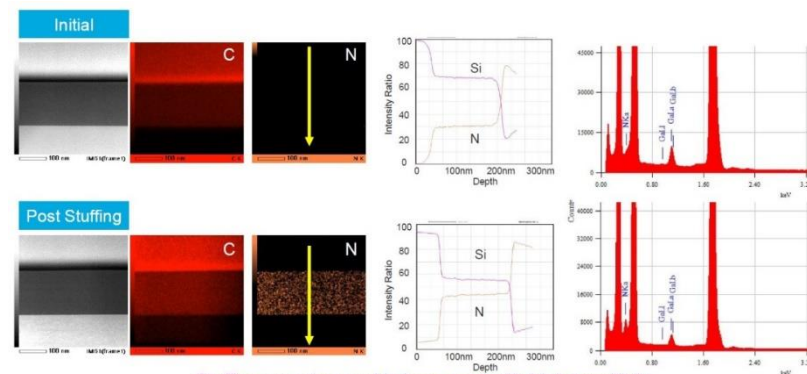
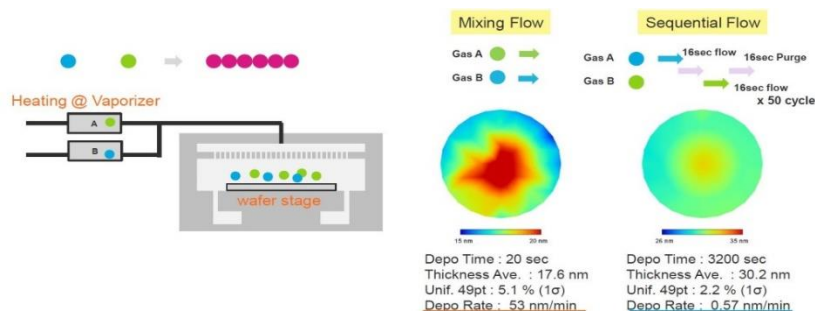
Защита Low-k диэлектриков

Заполнение пор полимером

Запуск двух мономеров
поочередно или одновременно

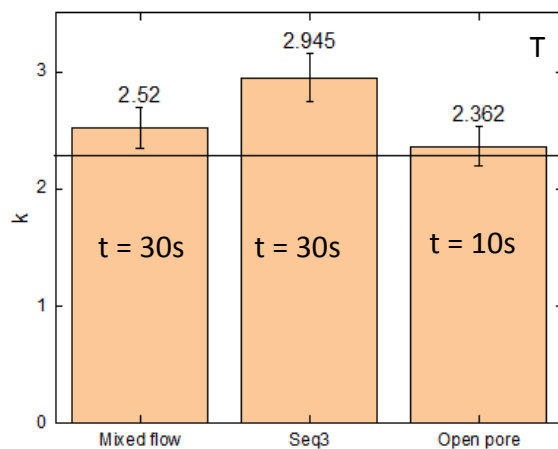


Анализ эффективности
заполнения (EDX, FTIR, EP, SE, ToF-

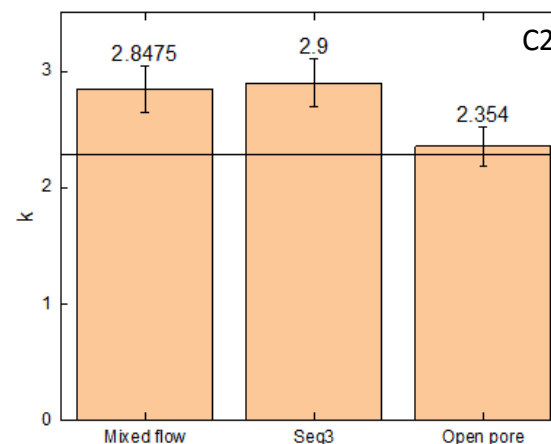


Stuffing was observed in large area with high sensitivity

C_4F_8 плазма



CO_2 плазма

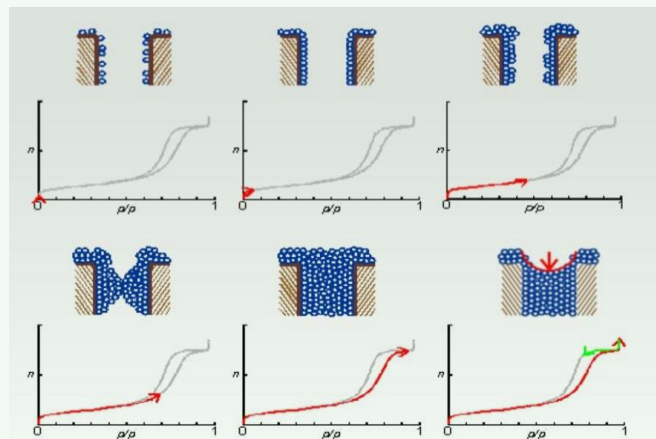


Защита Low-k диэлектриков

Низкотемпературное травление

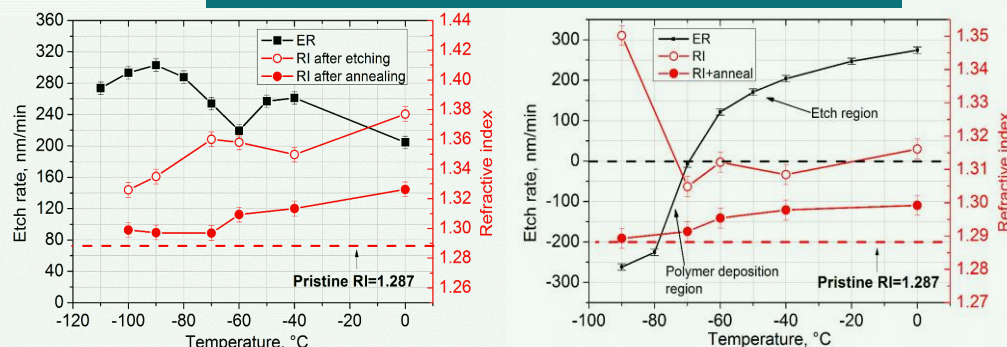
Конденсация газа зависит от размера пор, давления, температуры (ур. Кельвина)

$$\frac{2}{r} = - \frac{RT}{\sigma V_m \cos \theta} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)$$



A. Rezvanov et al., MAM-2016, MRS-2017; A. Rezvanov et al, J. Vac. Sci. Technol B 35 (2), 2017; A. Miakonkikh et al., PESM-2016

Результаты травления в плазме газов CF₃Br, CF₄



Температура, C	EDL, нм	
	CF ₃ Br	CF ₄
-40	42	40
-60	38	36
-80	35	33

Разработан метод по расчету температуры конденсации газов в зависимости от давления процесса и размера пор. (А. Резванов и др., «Электронная техника, серия 3, микроэлектроника», выпуск 1(157), с. 49 2015; A. Rezvanov et. al, PESM-2015, MRS-2105; Патент РФ №2602421)

Газ	CF ₄	CHF ₃	CF ₃ Br	C ₄ F ₈	C ₇ F ₈	C ₂ F ₄ Br ₂
Температура конденсации (50 мТорр), °C	-192	-153	-135	-110	-85	-75

Защита Low-k диэлектриков

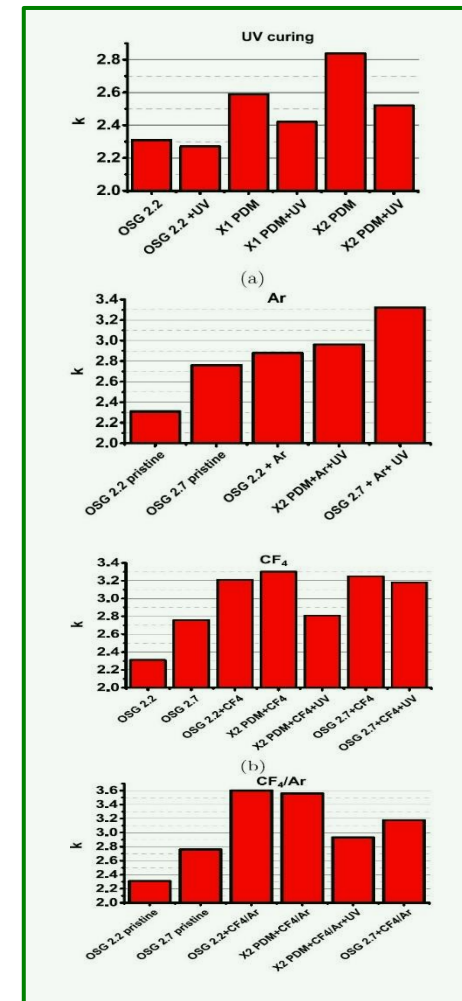
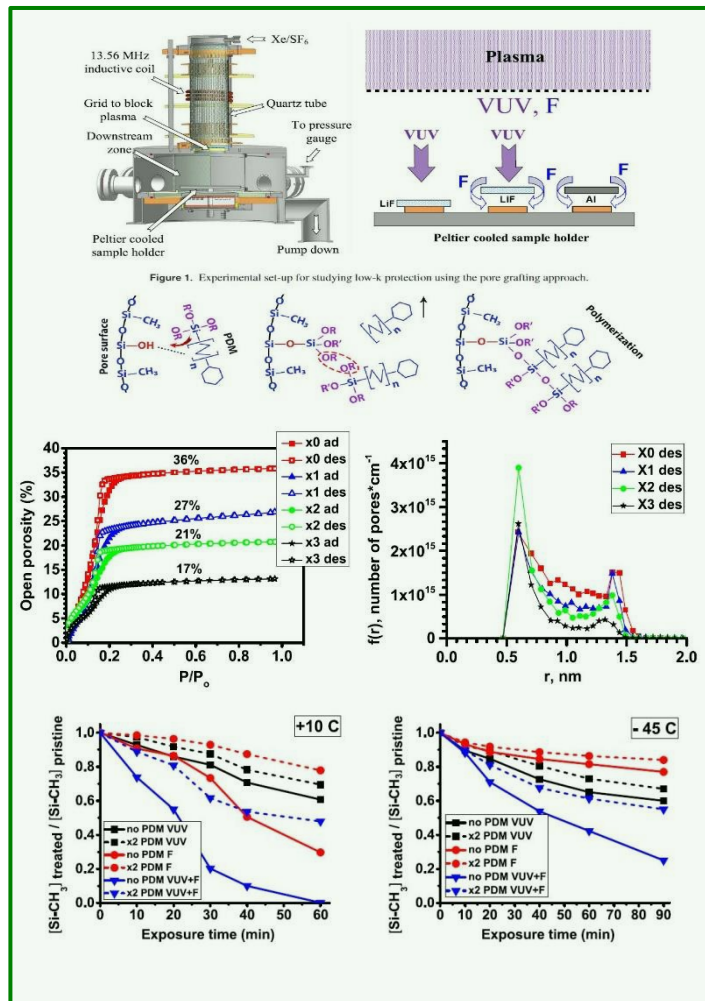
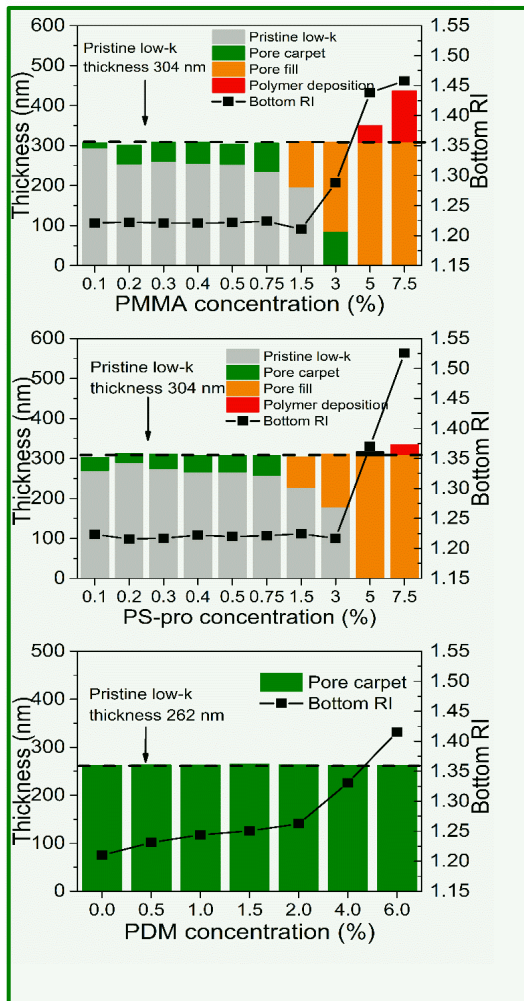
Пассивация пор полимером



Селекция полимеров

Многослойное осаждение и исследование защитных свойств пассивации

Оценка результатов

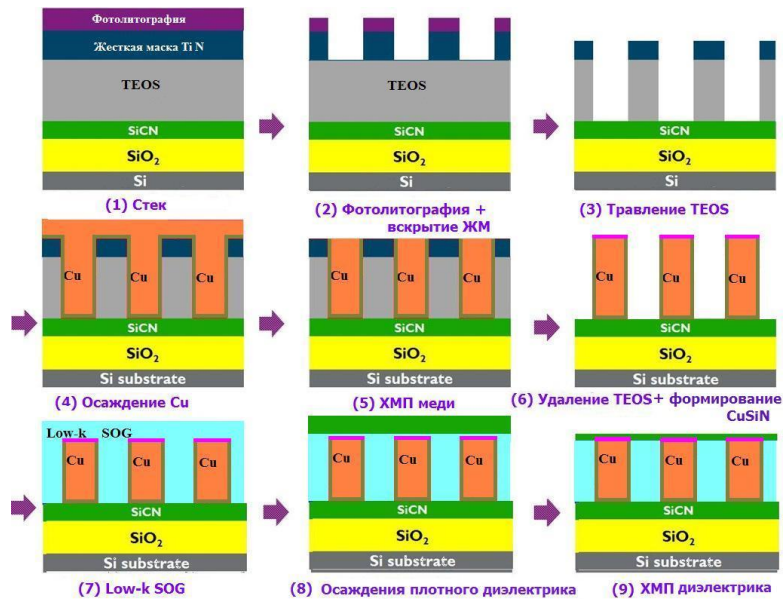


Новые подходы для интеграции Gap-filling

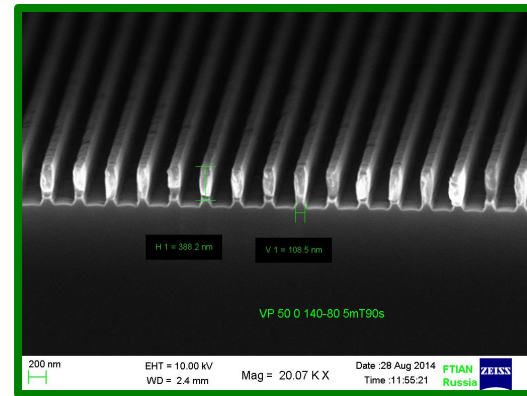


НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

Технологический маршрут формирования металлизации

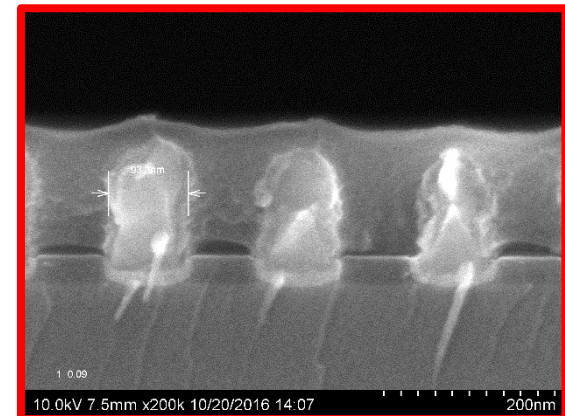


Сформированные медные проводники

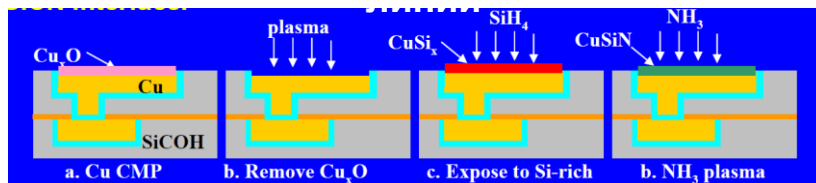


Заполнение промежутков Low-k диэлектриком

Проблема диффузии Cu с вершешек линий



Вариант формирования CuSiN барьерного слоя на вершушках

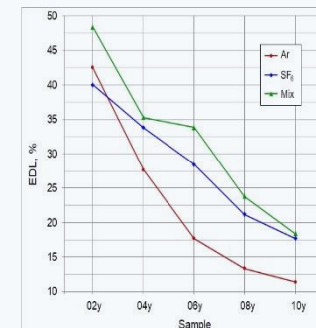
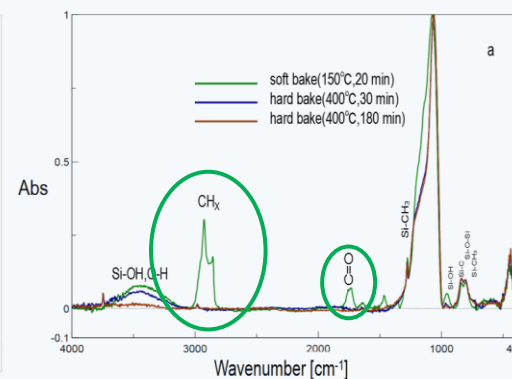
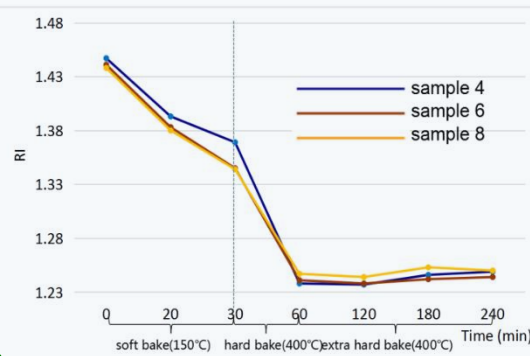
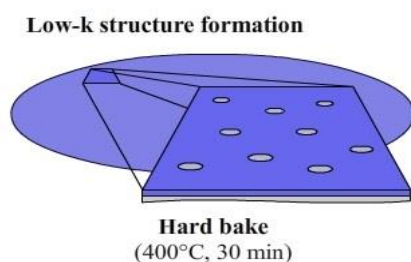
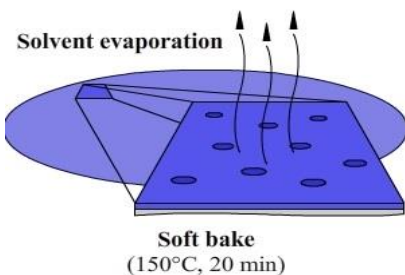
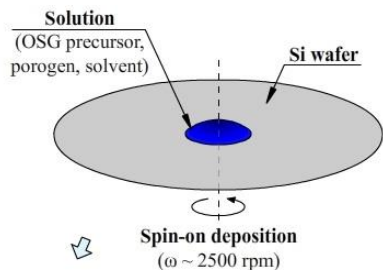
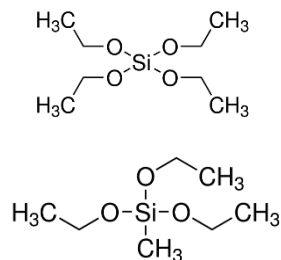


V. Gvozdev et al., ICMNE-2018

Spin-on Low-k с разным содержанием CH3 групп



НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ



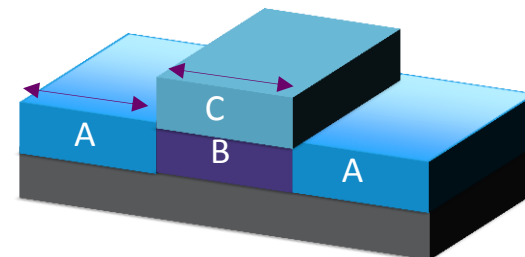
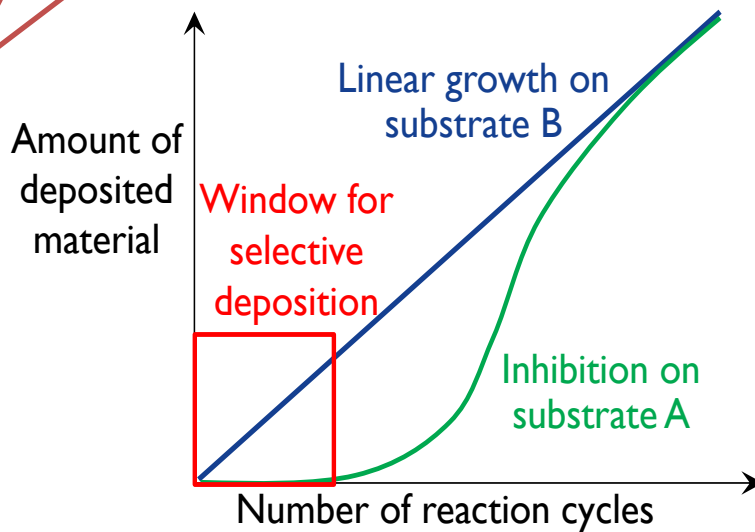
Ar (ионы, эмиссия ВУФ @105, 107, 120 нм Si-CH₃ хорошо поглощают до 190 нм), **SF₆** (F* радикалы), **Ar/SF₆** (совместное воздействие)

Образец	TEOS/MTEOS, %	EDL, %	Модуль Юнга, ГПа	Открытая пористость, %	Средний радиус пор, нм
00y	100/0	-	8.9	51.8	0.95
02y	80/20	48.4	6.9	49.7	1.10
04y	60/40	35.3	6.2	44.2	1.12
06y	40/60	27.8	5.6	42.3	1.61
08y	20/80	23.8	3.6	39.1	1.82
10y	0/100	18.4	2.9	33.1	1.94

A. Rezvanov et al., ICMNE-2018

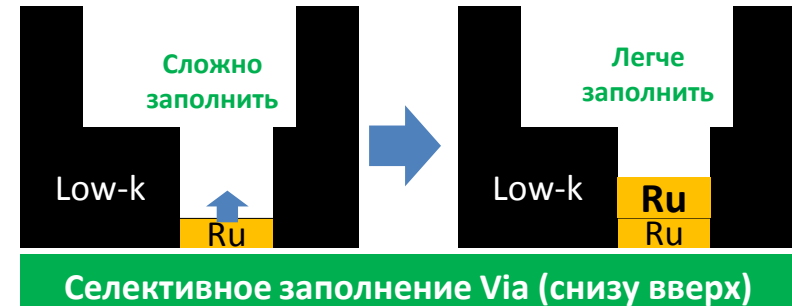
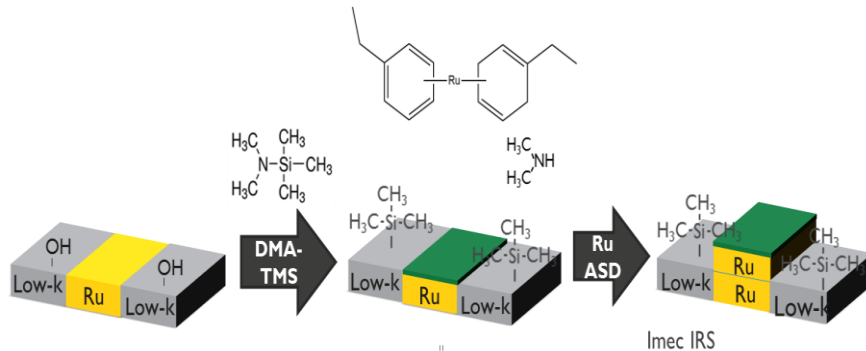
- Перспективные металлы для межсоединений
- Новое поколение low-k диэлектриков. Проблемы в интеграции
- Селективное осаждение материалов
- Материалы группы MX₂
- Заключение

Селективное осаждение материалов

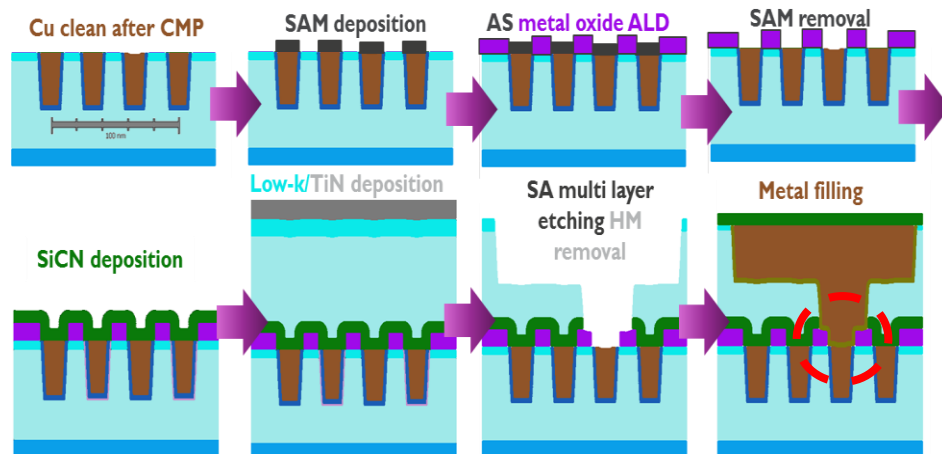
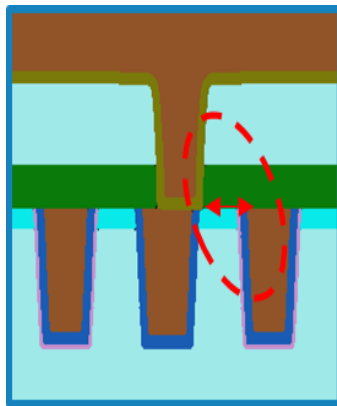


Применение селективного осаждения

- Селективное осаждение металла на металл при заполнении Via – помогает избежать образование пустот и повышает однородность заполнения

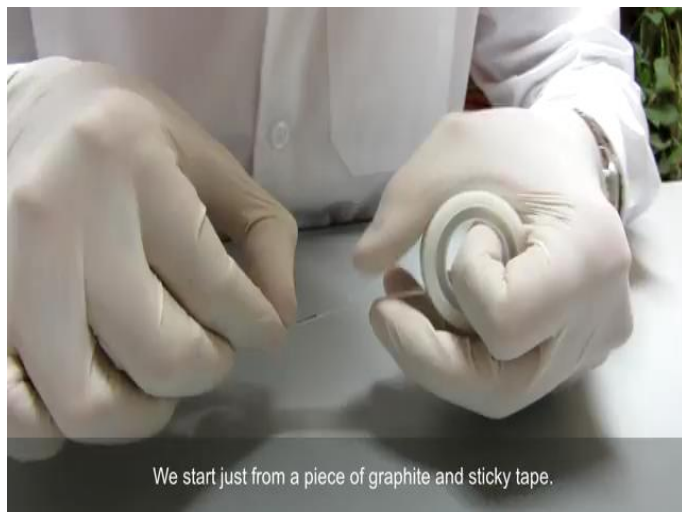


- Селективное осаждение диэлектрик на диэлектрик чтобы избежать рассовмещения переходных окон Via.

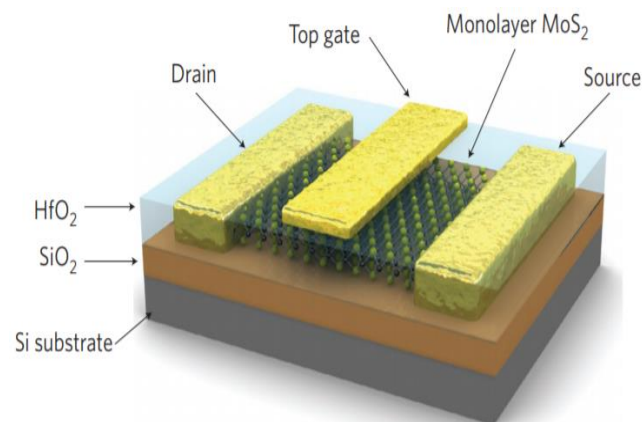
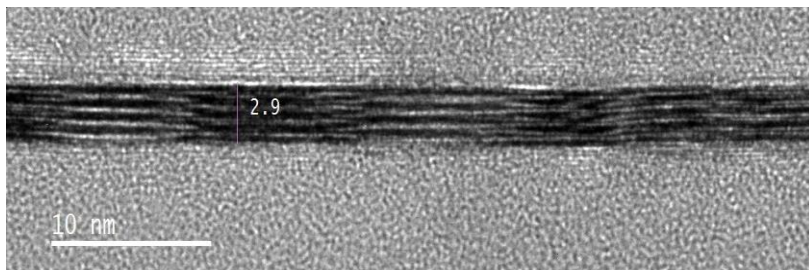


- Перспективные металлы для межсоединений
- Новое поколение low-k диэлектриков. Проблемы в интеграции
- Селективное осаждение материалов
- Материалы группы MX₂
- Заключение

2D материалы для микроэлектроники



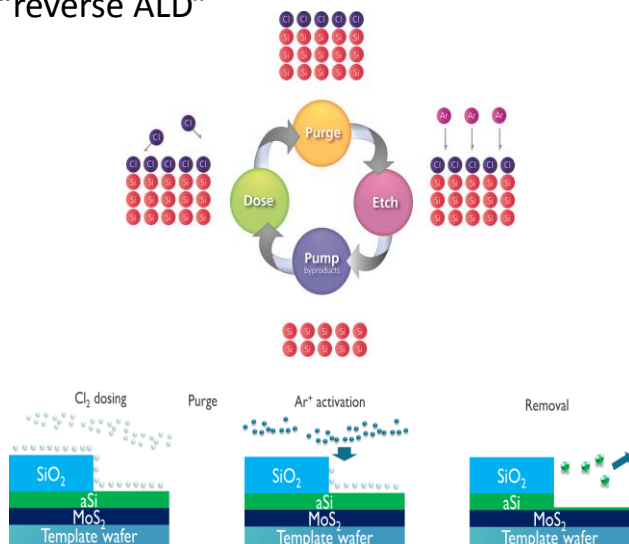
- Потенциальное использование для GAA транзисторов
- Исследование 2D материалов для их применения в девайсах
 - 2D-FET
 - TFET
- Свойства (MoS_2)
 - Нет оборванных связей
 - Значение диэлектрической постоянной ниже, чем для Si
 - Подвижность сравнима с подвижностью в Si



Формирование 2D материалов

Atomic Layer Etching - ALE

“reverse ALD”

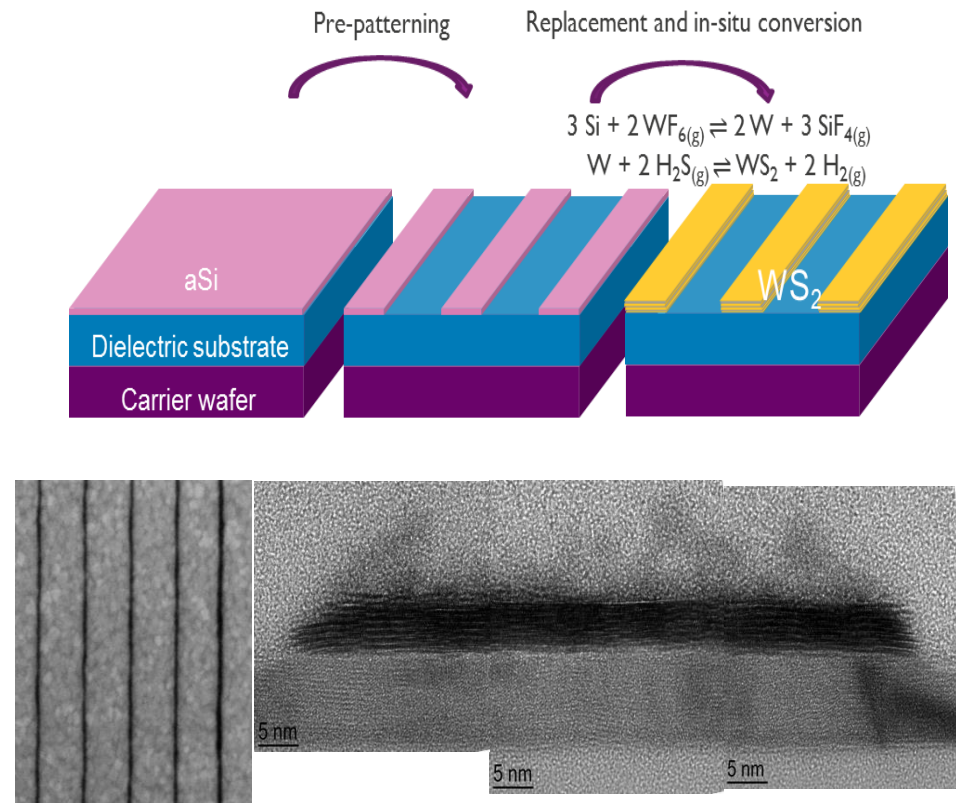


Контроль адсорбции до суб-нм диапазона
Control of ADSORPTION to sub-nm scale

Основные особенности:
самоограничение/однородность/послойнос
ть/не повреждающее/**МЕДЛЕННОЕ**

Goodyear, A. et. al, *Journal of Vac. Sc. Technol. A* 2017, 35 (1), 01A105
Patent EP3139403A1 US 20170069469

Конверсия



Heyne, M. H. et. al, *Nanotechnology* 2017, 28 (4), 04LT01.
Patent US 20170178905, CN 106898542

- Перспективные металлы для межсоединений
- Новое поколение low-k диэлектриков. Проблемы в интеграции
- Селективное осаждение материалов
- Материалы группы MX₂
- Заключение

- С масштабированием элементов ИС возникает необходимость применения новых материалов;
- На замену классической медной металлизации приходят такие материалы как Co, Ru и различные соединения;
- Интеграция высокопористых диэлектриков является сложной задачей, которая требует, как глубокого теоретического исследования, так и практической реализации;
- Селективные процессы осаждения становятся актуальными для суб-10 нм технологических норм;
- 2D материалы группы MX₂ широко исследуются для различных применений, что ведет за собой разработку новых подходов травления и формирования.

Спасибо за внимание!