

Процессы взаимодействия плазмы с нанопористыми пленками с низкой диэлектрической проницаемостью

А. Т. Рахимов (НИИЯФ МГУ)
М. Р. Бакланов
(Северно-Китайский Технологический Университет (Пекин),
РТУ МИРЭА),
С. М. Зырянов (НИИЯФ МГУ)



Фундаментальные исследования

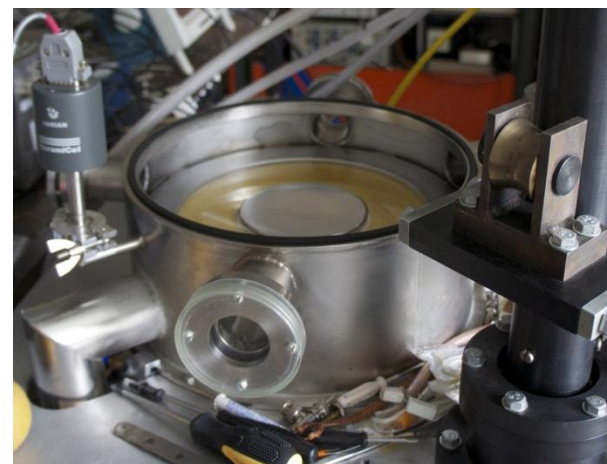
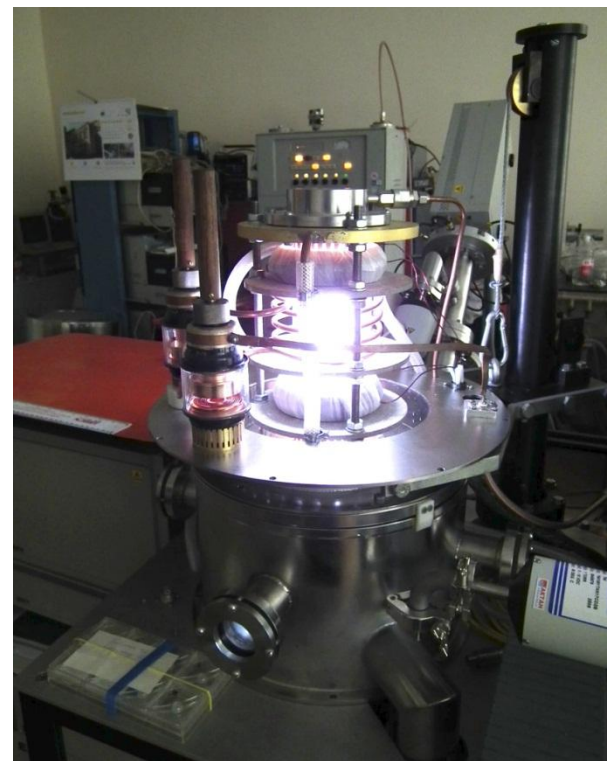
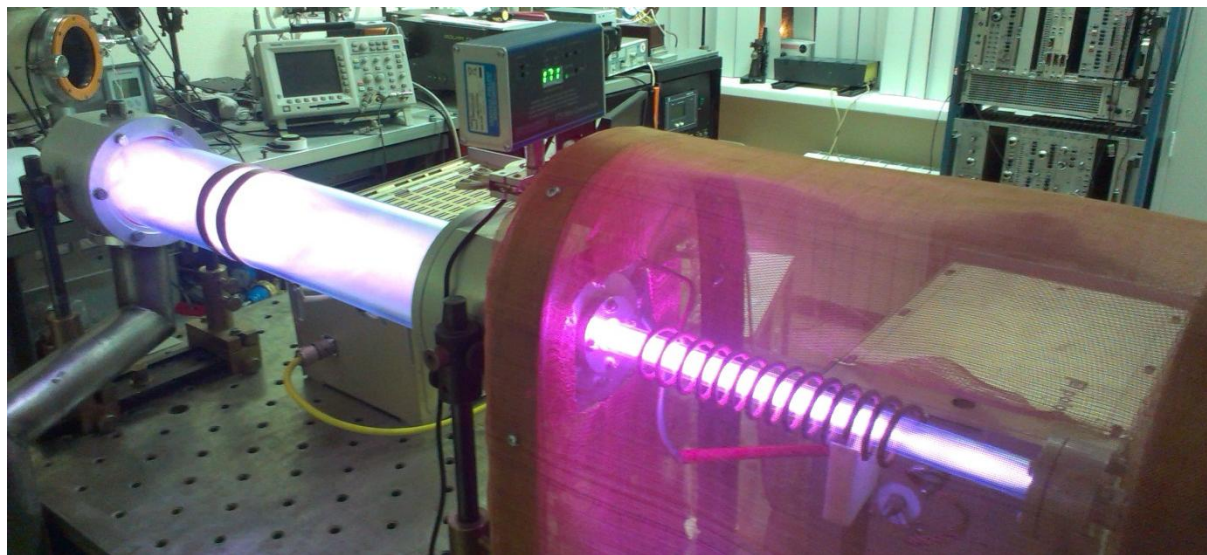
- 1. Плазменная кинетика и плазмохимия**
- 2. Взаимодействие плазмы с поверхностью**
- 3. Диагностика плазмы**

Прикладные исследования

- 1. Плазмохимическое травление и распыление**
- 2. Модификация поверхности в плазме**
- 3. In situ диагностики для плазменных реакторов**

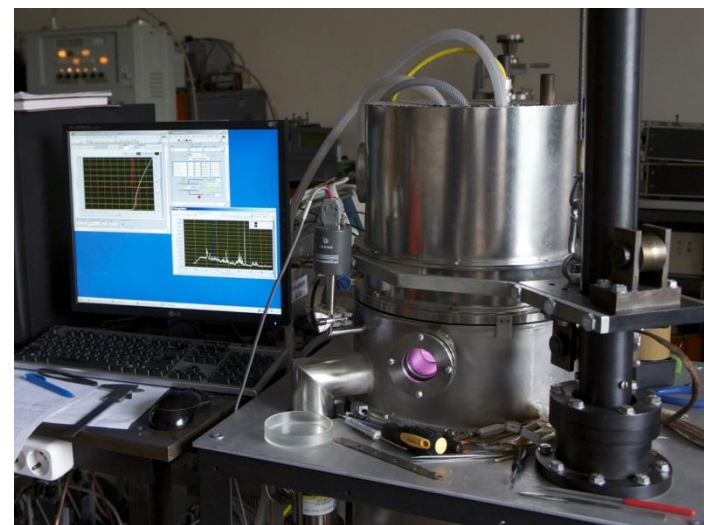
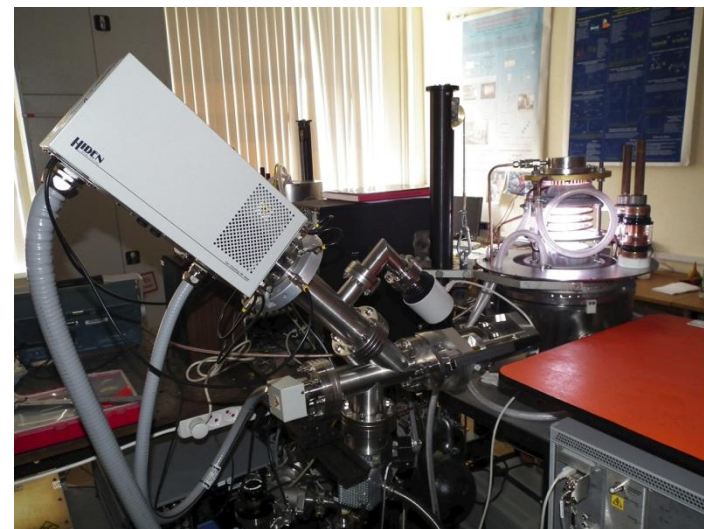


- двухчастотные емкостные и индукционные реакторы
- реакторы плазменного послесвечения
- специализированные плазменные установки, спроектированные под конкретные задачи



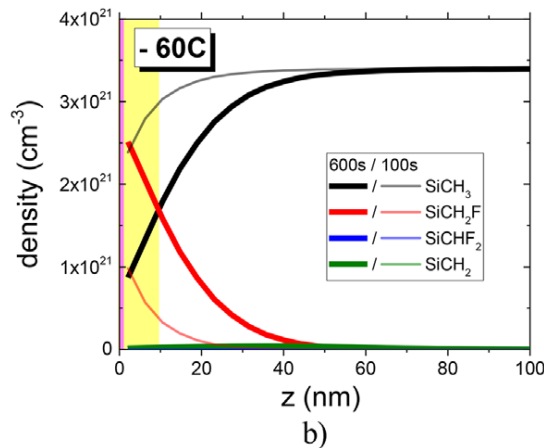
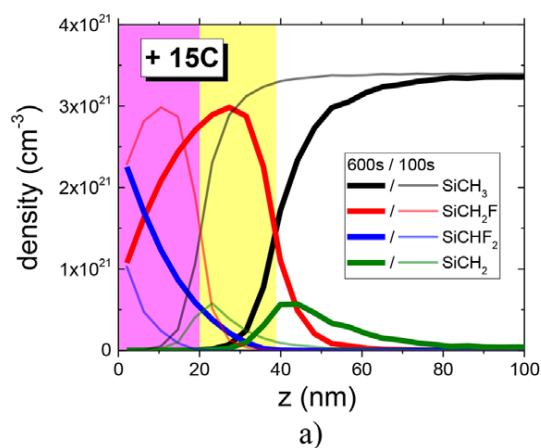


- измерения постоянных и ВЧ токов, напряжений и вложенной мощности
- измерение плотности плазмы (Hairpin зонд)
- измерение функции распределения электронов по энергиям (ВЧ-компенсированный зонд Ленгмюра)
- измерение энергетического спектра ионов (RFEA)
- измерение потока ионов (зонды и модуляция ВЧ-смещения)
- масс-спектрометрия
- спектроскопия (эмиссионная, абсорбционная, лазерная, актинометрия)
- in situ эллипсометрия
- ex situ диагностики образцов (SEM, EDS, XPS, SIMS, FTIR, SE ...)

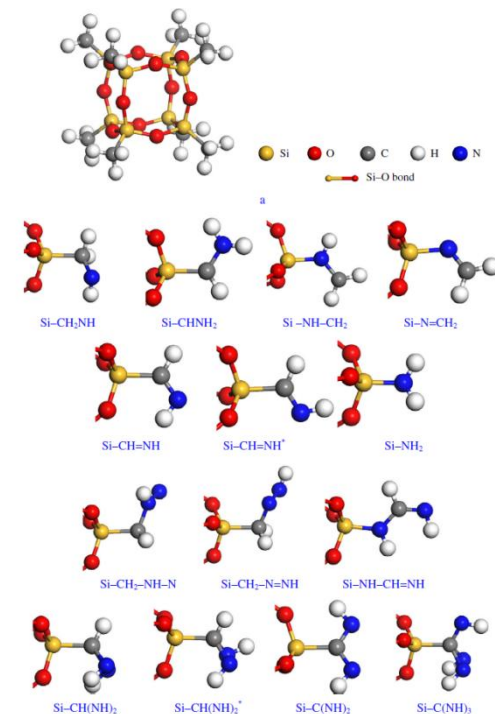




- аналитическое моделирование
- самосогласованные PIC MCC модели плазмы
- квантово-механические DFT модели для определения механизмов процессов на поверхности
- 1-D Монте Карло модель кинетики радикалов в пленках
- методы молекулярной динамики
- “виртуальные” датчики



Reaction	Type of collision	Rate constant (cm ³ s ⁻¹) or energy threshold (eV)
R1 e + Ar → e + Ar	elastic collision	0
R2 e + Ar → e + Ar [*]	electronic excitation to metastables	11.55
R3 e + Ar → e + Ar ⁺	electronic excitation to upper states	11.8
R4 e + Ar → e + Ar ⁺	ionization	15.76
R5 e + Ar ⁺ → e + Ar ⁺	stepwise ionization	4.21
R6 e + CF ₄ → e + CF ₄ [*]	elastic collision	0
R7 e + CF ₄ → e + CF ₄ ⁺	vibrational excitation	0.159
R8 e + CF ₄ → e + CF ₄ ⁺	vibrational excitation	0.078
R9 e + CF ₄ → e + CF ₄ ⁺	indirect vibrational excitation	0.58
R10 e + CF ₄ → e + CF ₃ + F	neutral dissociation	12
R11 e + CF ₄ → e + CF ₂ + F ₂	neutral dissociation	15
R12 e + CF ₄ → e + CF + F ₂ + F	neutral dissociation	20
R13 e + CF ₄ → e + F ⁻ + CF ₃	dissociative electron attachment	4.3
R14 e + CF ₄ → 2e + CF ₃ + F	total dissociative ionization	15.9
R15 e + CHF ₃ → e + CHF ₃	total elastic collision	0
R16 e + CHF ₃ → e + CHF ₃ [*]	vibrational excitation	0.14
R17 e + CHF ₃ → e + CHF ₃ ⁺	vibrational excitation	0.18
R18 e + CHF ₃ → e + CHF ₃ ⁺	vibrational excitation	0.37
R19 e + CHF ₃ → e + CHF ₃ ⁺	vibrational excitation	0.06
R20 e + CHF ₃ → e + CHF ₃ ⁺	indirect vibrational excitation	0.14
R21 e + CHF ₃ → e + CF ₃ + H	neutral dissociation	12.2
R22 e + CHF ₃ → e + CHF ₂ + F	neutral dissociation	13
R23 e + CHF ₃ → e + CF + HF + F	neutral dissociation	19
R24 e + CHF ₃ → e + CF ₂ + HF	neutral dissociation	25
R25 e + CHF ₃ → F ⁻ + CHF ₂	electron attachment	0
R26 e + CHF ₃ → 2e + CF ₃ + H	dissociative ionization	14.4
R27 e + CHF ₃ → 2e + CHF ₂ + F	dissociative ionization	15.2
R28 e + CHF ₃ → 2e + CF ₂ + HF	dissociative ionization	15.23
R29 e + CHF ₃ → 2e + CHF ⁺ + F + F	dissociative ionization	19.8
R30 e + CHF ₃ → 2e + CF ⁺ + HF + F	dissociative ionization	17.8





Фундаментальная проблема

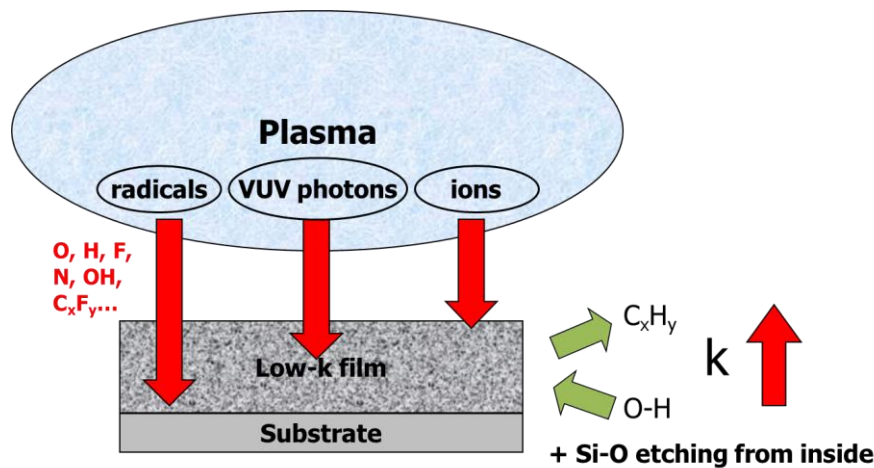
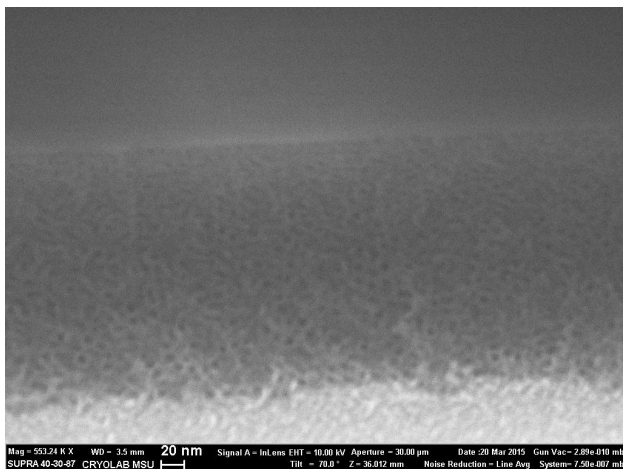
Low-k материалы повреждаются при травлении во фторуглеродной плазме и при удалении резиста в кислородной плазме. Механизм повреждения неясен.

Прикладная проблема

Невозможность интеграции Ultra low-k материалов с $k < 2.5$ в производство микроэлектронных устройств с применением существующих технологий травления и удаления резиста.

Цель

Исследовать механизм повреждения low-k материалов ВУФ фотонами, ионами и нейтральными радикалами и предложить рецепт процесса бездефектного травления.





Low-k материал	k	Пористость, %	R _{pore} , нм	Толщина, нм
CVD1	2.5	24	0.8	500
CVD3	2.3	28	0.75	185
NCS	2.2	35	1.5	200
ALK B	2.1	46	1.5	105
SOG 2.2	2.2	39	2.1	218
SOG 2.0	2.0	44	2.1	218
SOG 1.8	1.8	51	2.7-2.8	214



План исследования

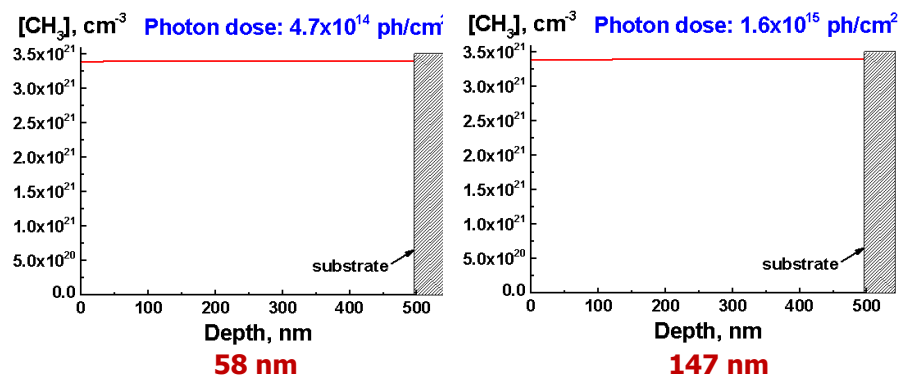
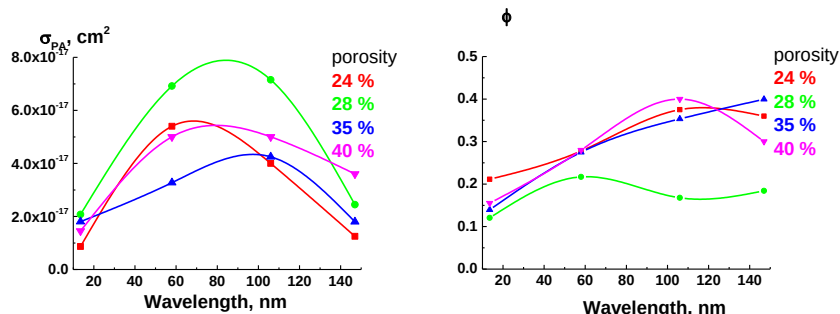
- 5 типов low-k пленок (пористость: 24...40 %, k : 2.1...2.5)
- источники света на длинах волн 13.5, 58, 106, 147, 193 нм, варьируемая доза фотонов
- FTIR спектроскопия для диагностики повреждения материалов
- моделирование поглощения ВУФ излучения

Фундаментальный результат

- зависимости сечения ВУФ поглощения в low-k и квантового выхода $-\text{CH}_3$ от длины волны
- механизм повреждения ВУФ фотонами: удаление $-\text{CH}_3$ групп из low-k пленок

Прикладные рекомендации

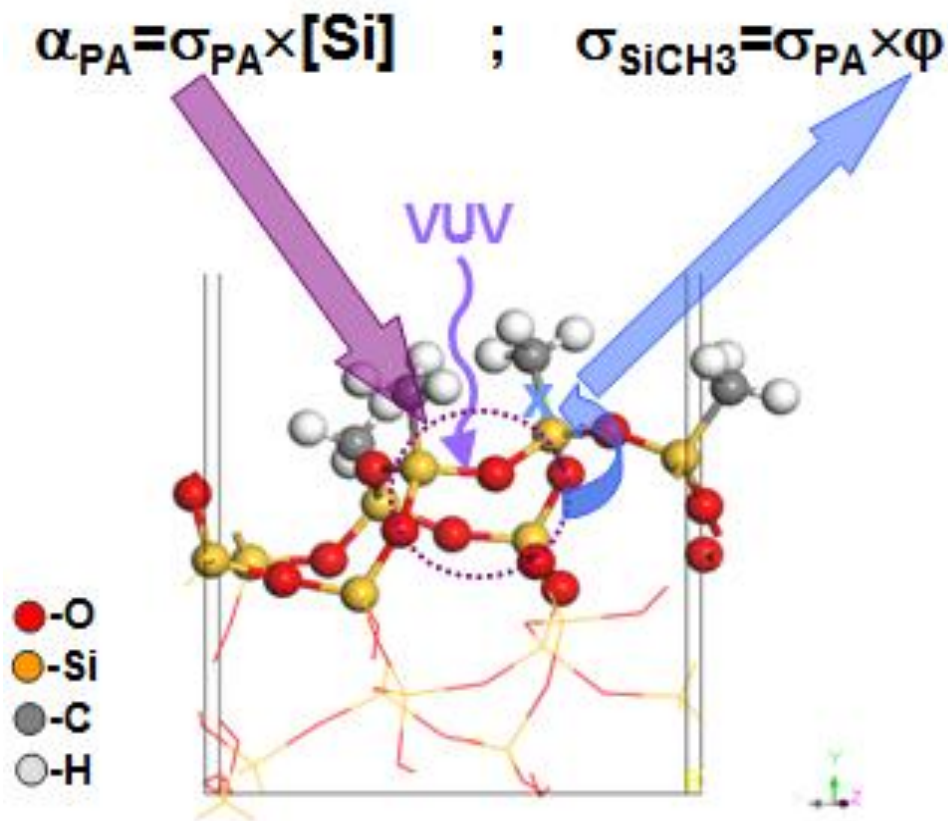
Использование газовых разрядов в смесях с низкой интенсивностью излучения в ВУФ диапазоне (при возможности без благородных газов и с заменой CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 на CF_3I)





1. Low-k пленки поглощают ВУФ излучение O_xSiCH_3 and SiO_x группами

2. Процесс фотодиссоциации (удаление CH_3 групп) – один из каналов релаксации возбужденного комплекса: $O_xSiCH_3 + h\nu \rightarrow (O_xSiCH_3)^* \rightarrow SiO_x + CH_3$





План исследования

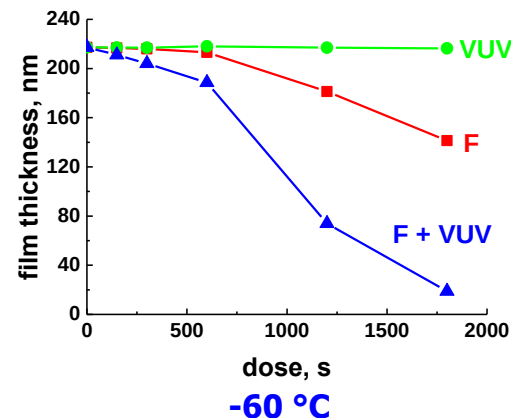
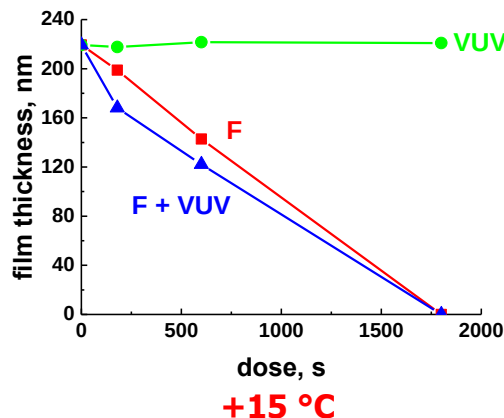
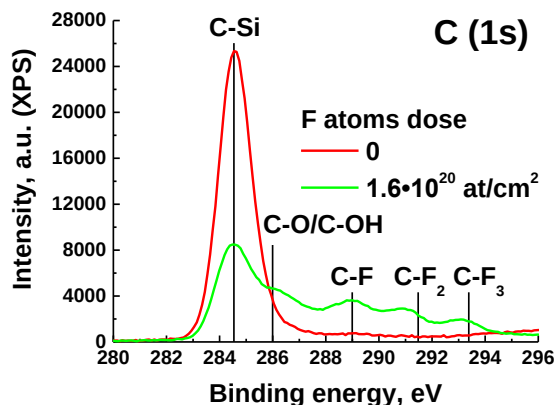
- разряды в O_2 , H_2 , N_2 , SF_6 с областью плазменного послесвечения
- добавление Xe для получения ВУФ излучения на длине волны 147 нм
- охлаждение образцов до $-60\text{ }^\circ\text{C}$
- моделирование проникновения нейтральных атомов в пористую структуру low-k

Фундаментальный результат

- быстрые реакции удаления $-CH_3$ групп атомами O и F; травление фтором
- степень повреждения снижается при снижении температуры, однако реакции могут быть простимулированы ВУФ излучением

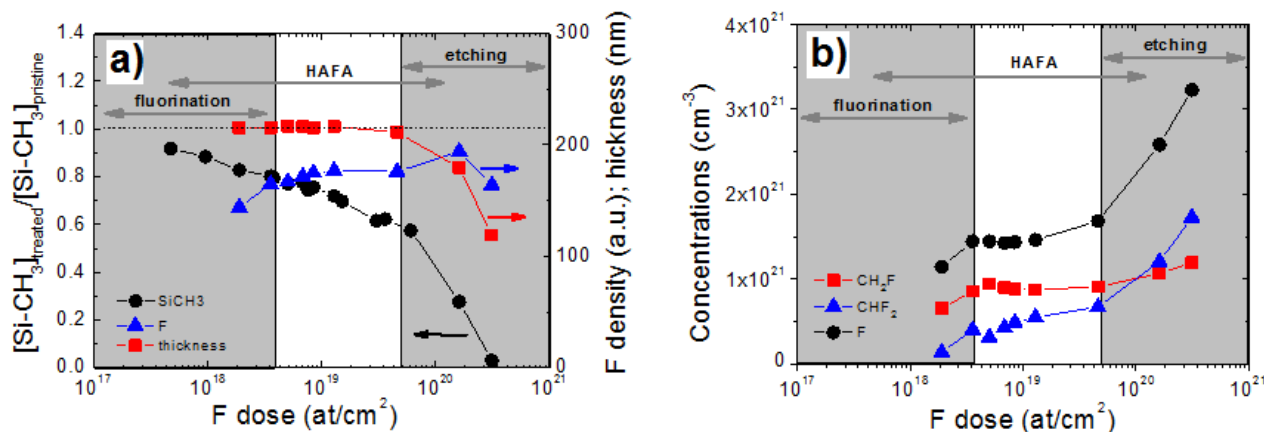
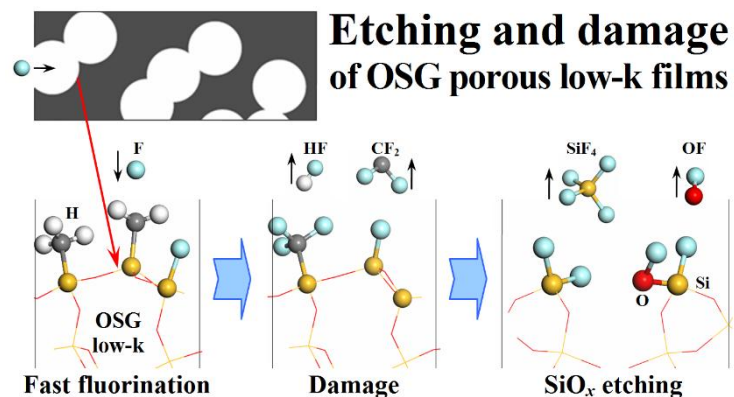
Прикладные рекомендации

Использование бескислородных газовых смесей, снижение температуры и интенсивности ВУФ





С помощью *ab initio* DFT моделирования и 1-D Монте Карло модели выявлен многоступенчатый механизм травления low-k пленок фтором.



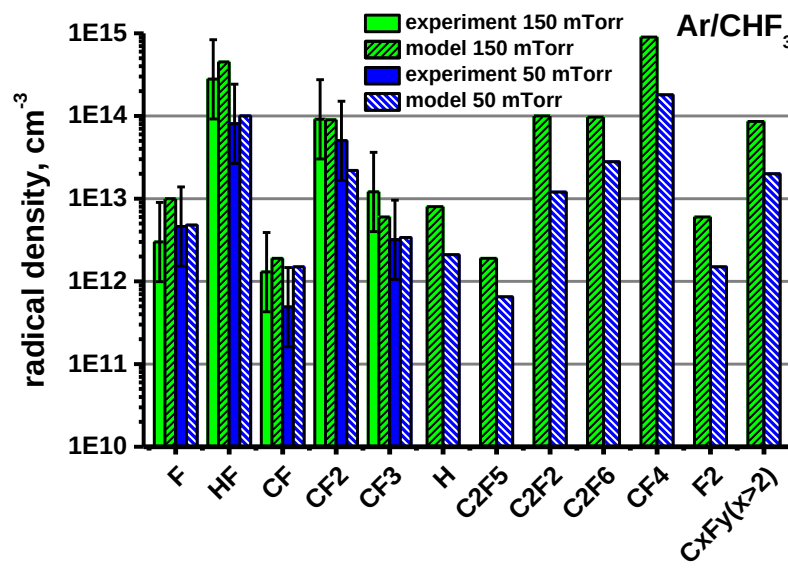
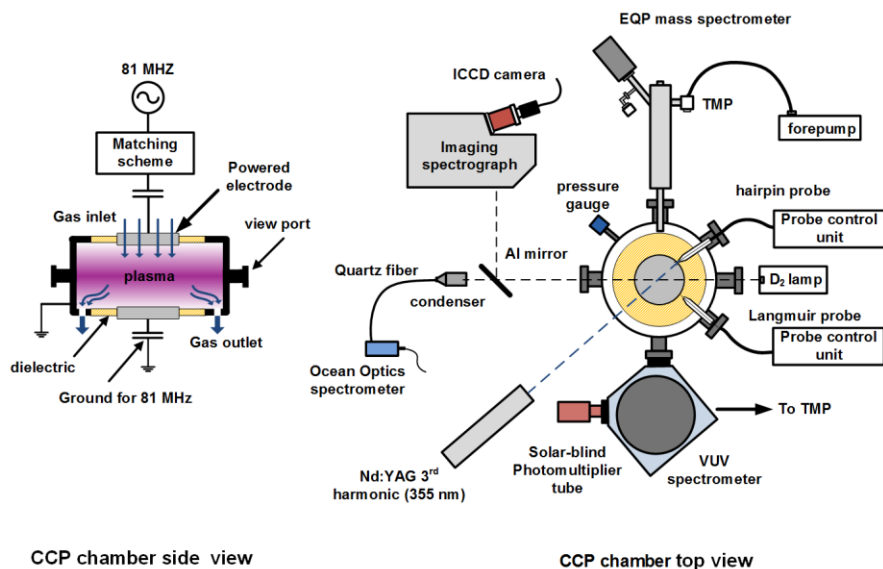


План исследования

- емкостной двухчастотный разряд в CF_4/Ar и CHF_3/Ar
- измерение ВУФ спектров, концентрации радикалов, концентрации электронов, отрицательных ионов, ионного состава
- расчет разряда методом PIC MC

Фундаментальный результат

- получены концентрации основных радикалов, ВУФ спектры и поток ВУФ фотонов на электрод в типичных для травления low-k диэлектриков смесях и режимах
- экспериментальные данные позволили валидировать константы скоростей реакций и отношения ветвления для основных плазмохимических процессов в данных смесях





План исследования

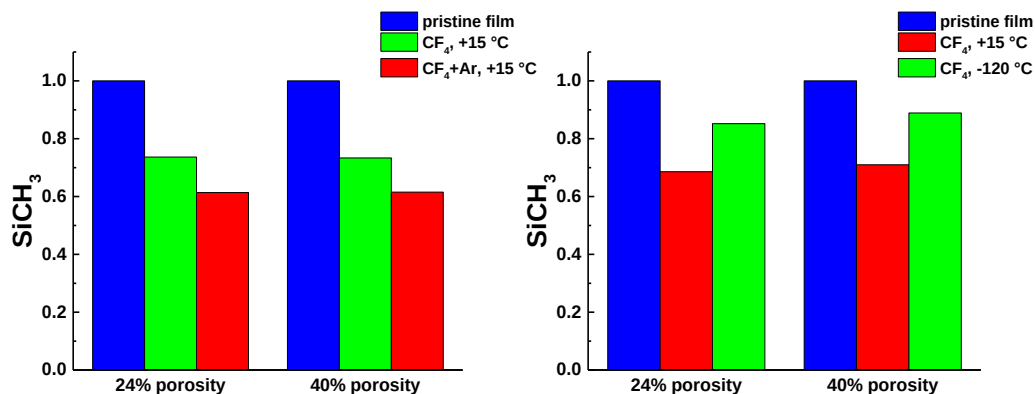
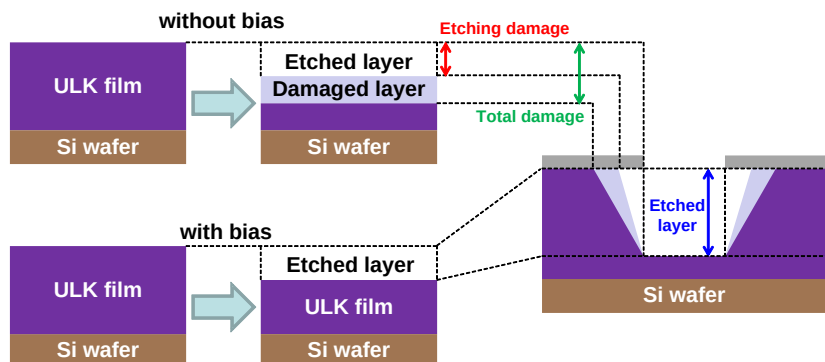
- двухчастотный индукционный разряд в CHF_3 , CHF_3/Ar , CF_4 , CF_4/Ar , Ar
- изменение температуры образца от $+15$ до -120 °C
- обработка материалов с и без ВЧ смещения для оценки отношения скорости повреждения боковых стенок к скорости травления

Фундаментальный результат

- использование CHF_3 проблематично при низких температурах из-за сильной полимеризации
- образцы при обработке в безаргоновой плазме повреждаются меньше из-за меньшего потока ВУФ излучения

Прикладные рекомендации

Снижение температуры и исключение аргона из газовой смеси существенно снижают боковой растрав и объемное повреждение low-k материалов





План исследования

- в ряде работ была предложена замена CF_4 на CF_3I при травлении low-k
- двухчастотный емкостной разряд в $\text{CF}_3\text{I}/\text{Ar}$ и CF_4/Ar смесях
- измерение ВУФ спектров излучения плазмы в индустриальном реакторе

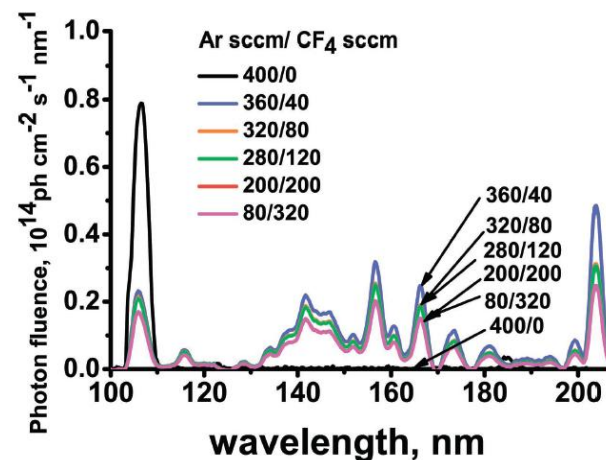
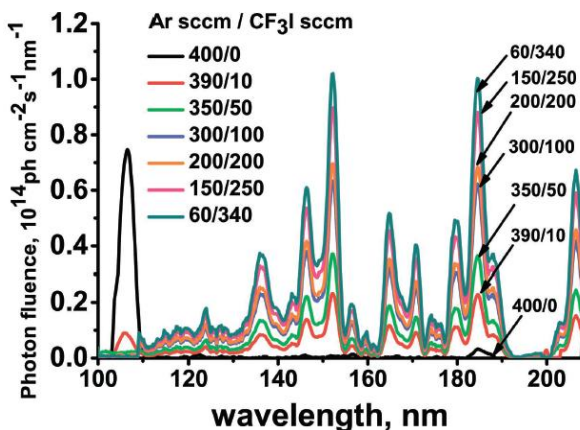
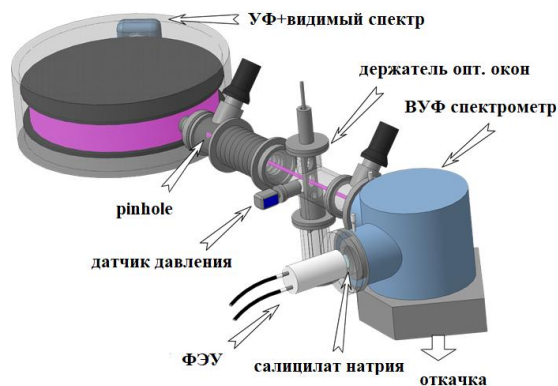
Фундаментальный результат

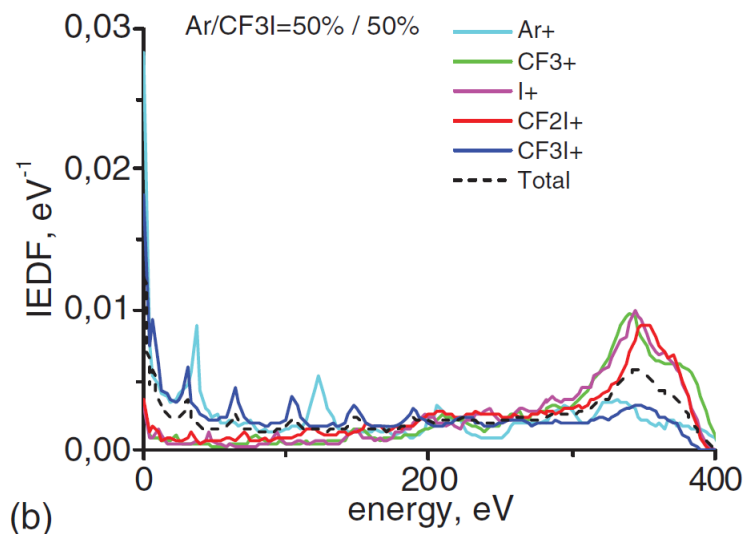
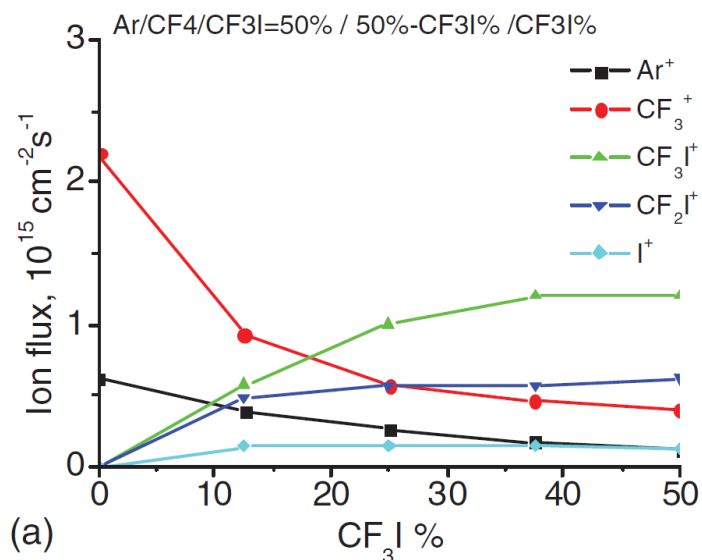
- замена CF_4 на CF_3I в травильной смеси приводит к небольшому увеличению ВУФ излучения из-за излучения I^*
- излучение аргона в типичных травильных условиях играет определяющую роль в деградации диэлектриков

Прикладные рекомендации

Необходимо использовать травильные смеси без аргона

ДЧ ВЧ емкостной реактор (27&2 МГц)





Разработаны самосогласованные кинетические модели на основе метода частиц в ячейке с Монте Карло столкновениями для описания процессов в плазме в Ar/CF₄/CHF₃/CF₃I смесях. Модели успешно протестированы на масштабных экспериментальных данных НИИЯФ МГУ и на данных по потокам ионов на образец, полученных совместно с IMEC в промышленном реакторе Lam Exelan™ (IMEC).

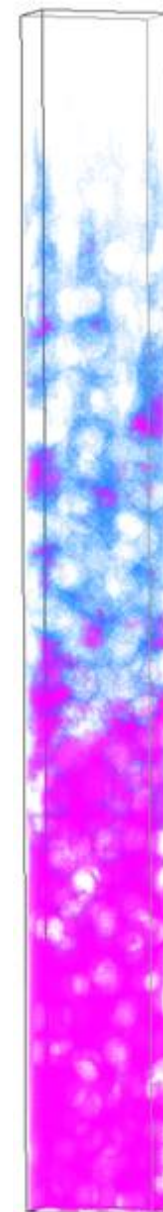
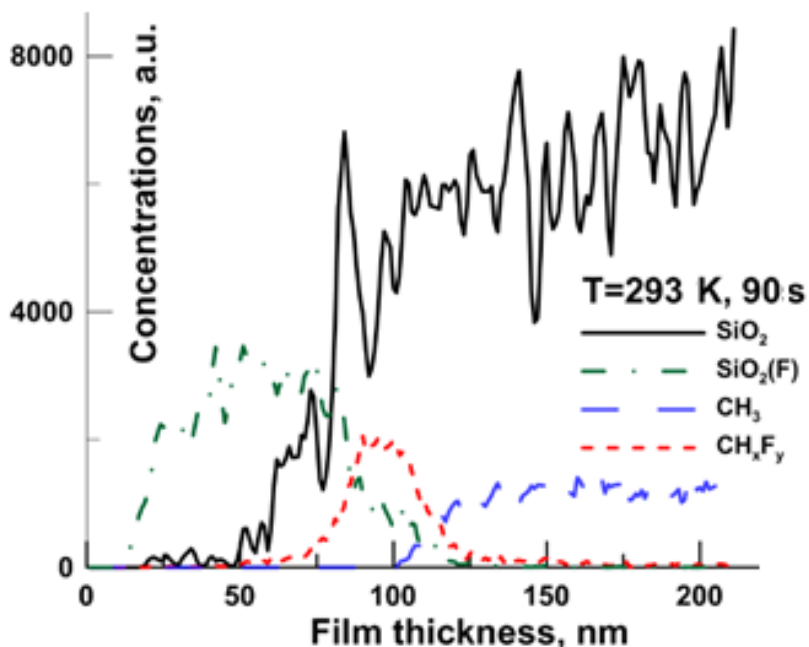
Развитые в НИИЯФ МГУ модели могут обеспечить детальную информацию по процессам в сложных смесях, которую невозможно получить в промышленных реакторах экспериментально. Потоки активных радикалов и излучения, полученные в модели, могут быть использованы как входные данные для анализа механизмов повреждения low-k материалов.



3-D Монте Карло программа для расчетов скоростей травления и повреждения SiOCH пленок (при различных температурах, потоках ионов, VUV излучения и F атомов).

Используются данные *ab initio* расчетов по поверхностным реакциям, а также экспериментальные и теоретические данные по потокам из плазмы.

Создается 3-D карта нанопористой структуры пленки с заданными свойствами (коэффициентом диэлектрической проницаемости, размером пор, плотностью пленки).



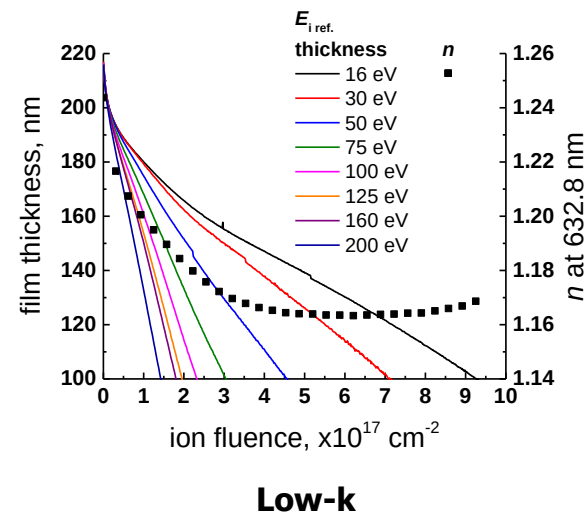
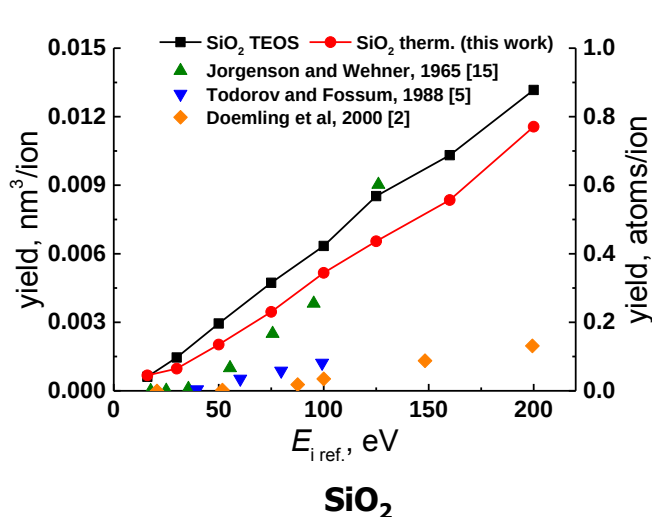
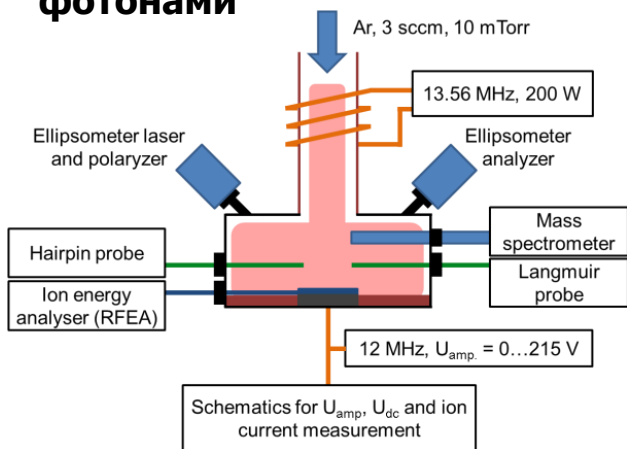


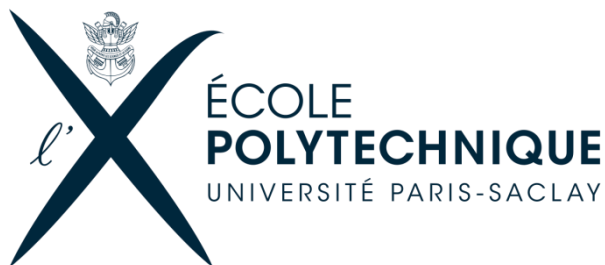
План исследования

- распыление SiO₂ и low-k пленок ионами Ar с энергией от 16 до 200 эВ в DFICP разряде
- использование in situ эллипсометрии для in-situ измерений толщины пленки и коэффициента преломления

Результат

- порог распыления SiO₂ оказался значительно ниже, чем измеренный в экспериментах с ионными пучками
- скорость распыления low-k выше, чем скорость распыления SiO₂ и процесс нелинеен, так как помимо поверхностного распыления происходит объемная модификация пленки ВУФ фотонами







Спасибо за внимание