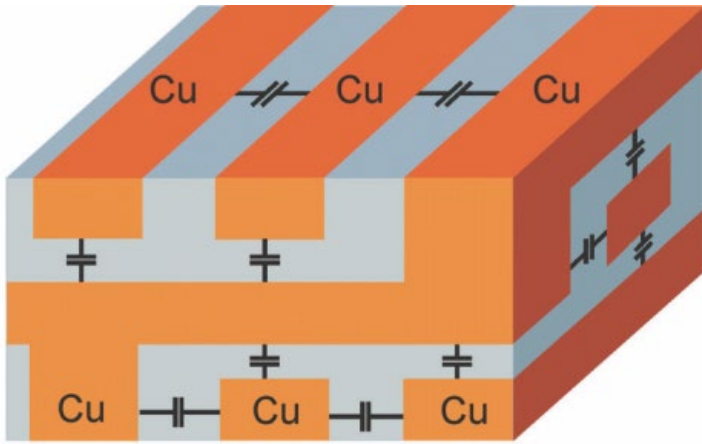


Воздействие вакуумного УФ  
излучения плазмы на low-k  
диэлектрики в процессе осаждения  
барьерных покрытий

Рябинкин А.Н.

# Low-k диэлектрики в микроэлектронике



Снижение диэлектрической проницаемости  $k$  увеличивает производительность в результате:

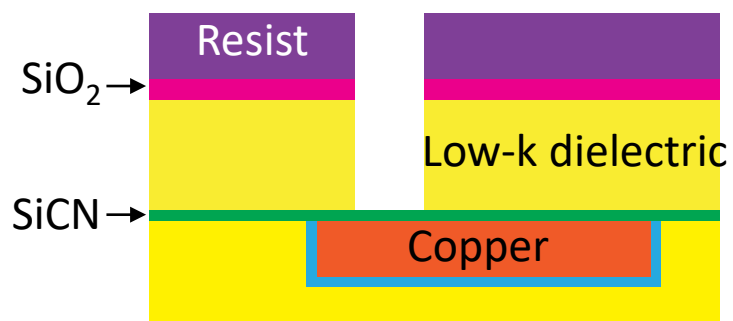
- Уменьшения RC задержки,
- Снижения энергопотребления,
- Уменьшения перекрёстных помех.

Но при этом уменьшается прочность и возникают сложности интеграции.

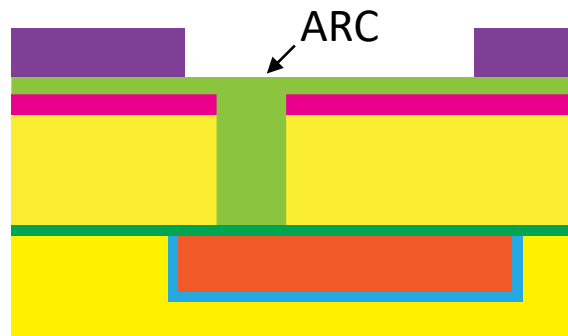
Fluorosilicate glass (FSG), 2000 →  
 Organosilicate glass (OSG), 2004 →  
 Porous OSG, 2008 →

Node (nm)	Dielectric	$k$	Modulus (GPa)	Thermal Conductivity	Porosity (%)
180	SiO <sub>2</sub>	4	60	1.0 W/m per K	0
130	FSG	3.6	60	1.0 W/m per K*	0
90	SiCOH	3	15	0.59 W/m per K*	0
65	SiCOH	2.7	8.0		7
45	p-SiCOH	2.45	6.6		19
32	p-SiCOH	2.55	6.6		14
22	p-SiCOH	2.55	6.6		14
14	p-SiCOH	2.55	6.6		14
14	Air gap	2.1*			
10	p-SiCOH	2.4	7.0		20

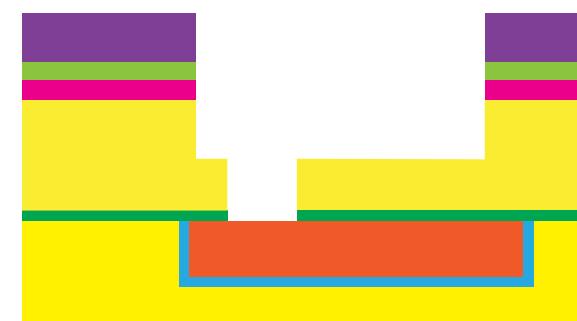
# Имплантация медных проводников в low-k диэлектрик



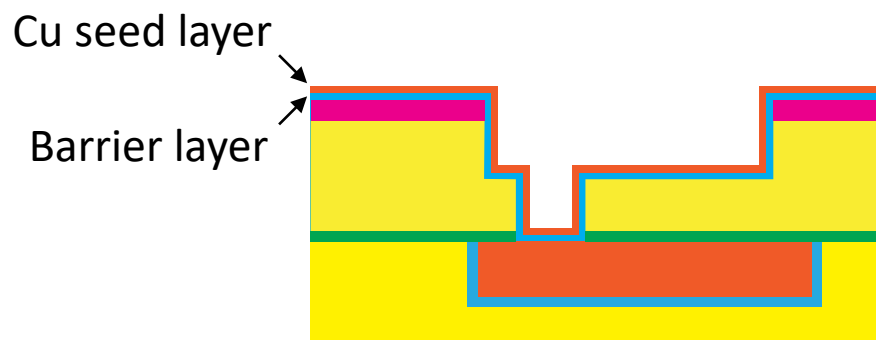
1. Фотолитография и травление



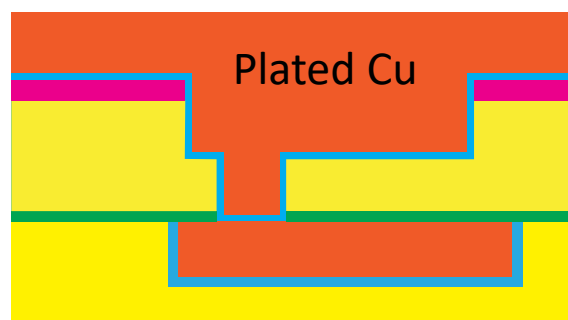
2. Фотолитография



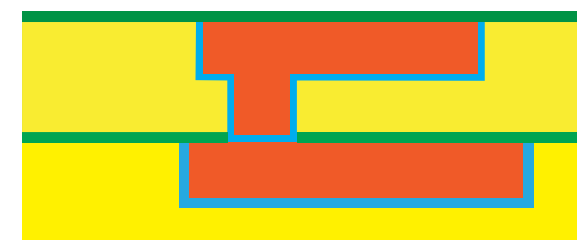
3. Травление



4. Осаждение барьерного (TaN/Ta) и затравочного (Cu) слоев



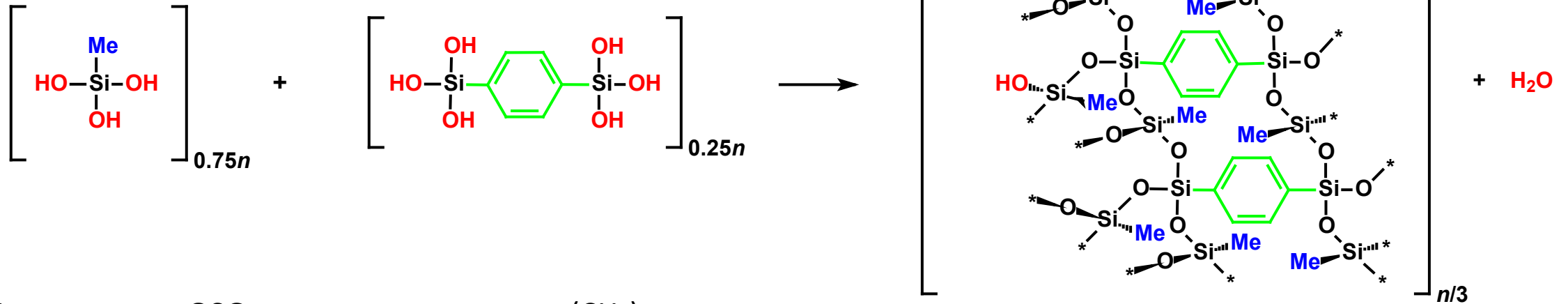
5. Электрохимическое осаждение меди



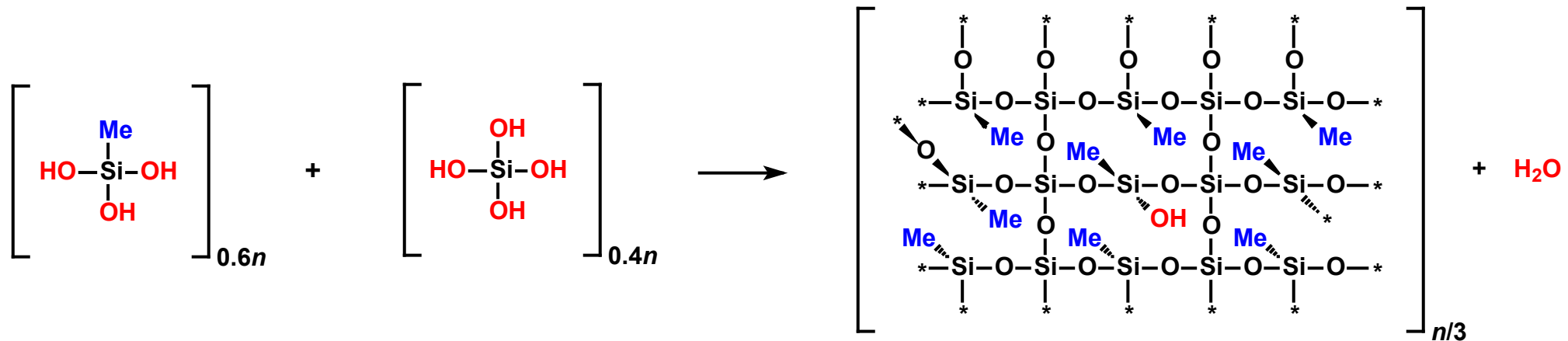
6. Химико-механическая планаризация, осаждение защитного слоя (SiCN)

# Два типа low-k диэлектриков, исследованных в работе

1. OSG диэлектрики с метильными (CH<sub>3</sub>) группами и бензольными мостиками (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>):




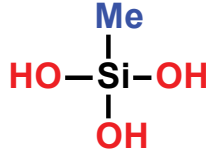
2. Классические OSG только с метильными (CH<sub>3</sub>) группами:



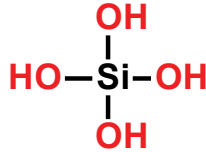
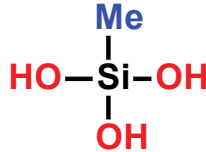
Обозначения: Me — метильная группа (CH<sub>3</sub>)

# Образцы low-k диэлектриков

## 1. OSG с метильными группами и бензольными мостиками

Название			Пористость [%]	$k$	$[\text{CH}_3]/[\text{Si}]$	$[\text{C}_6\text{H}_4]/[\text{Si}]$
p25	25%	75%	37	2.3	0.6	0.2
p45	45%	55%	38	2.6	0.38	0.31
p100	100%	0	26	5.2	0	0.5
d100	100%	0	5	16.3	0	0.5

## 2. Классические OSG с метильными группами $\text{CH}_3$

Название			Пористость [%]	$k$	$[\text{CH}_3]/[\text{Si}]$
pST	40%	60%	36	2.3	0.6
dST	40%	60%	9	3.0	0.6

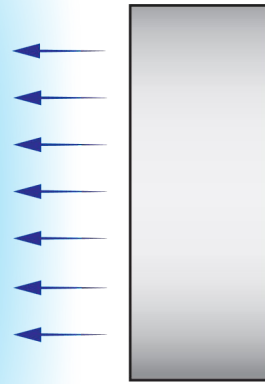
# IPVD схема осаждения барьерных покрытий

подложки с low-k плёнками



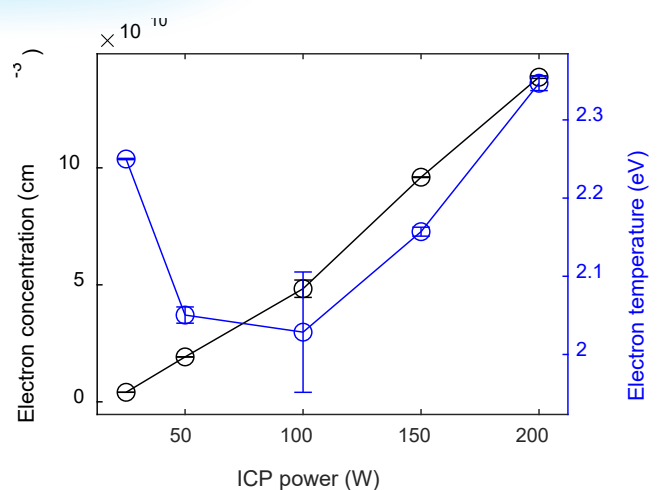
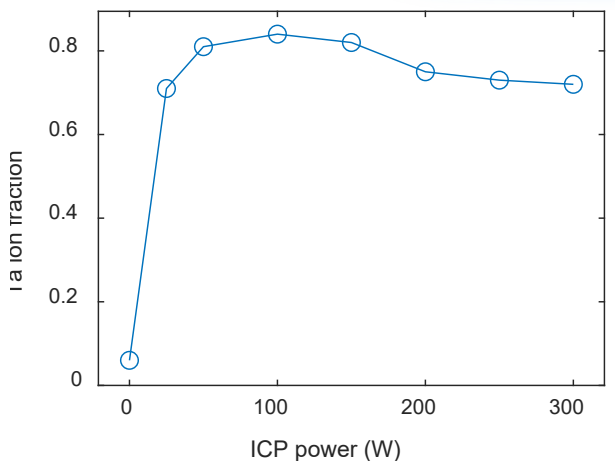
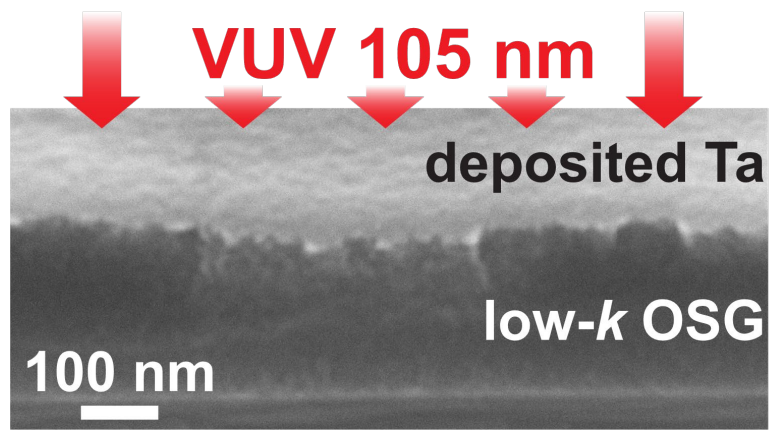
ICP plasma

магнетронный распылитель с Ta мишенью



$p = 35$  мТорр (аргон)  
 $V_f \approx 8$  В,  
 $V_p = 16-19$  В

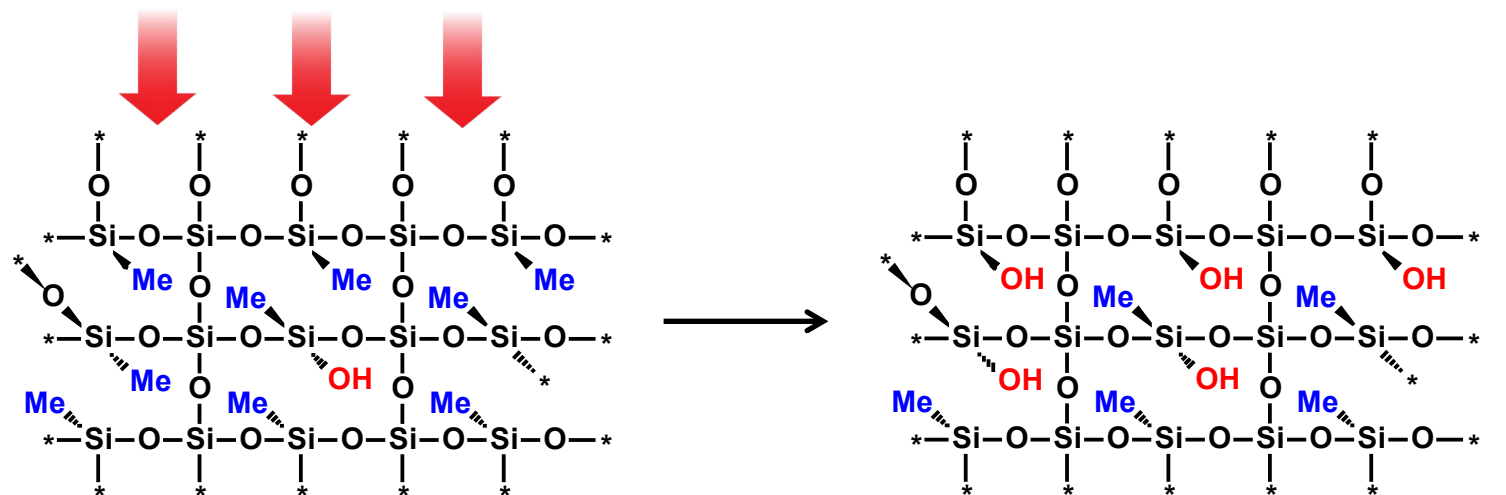
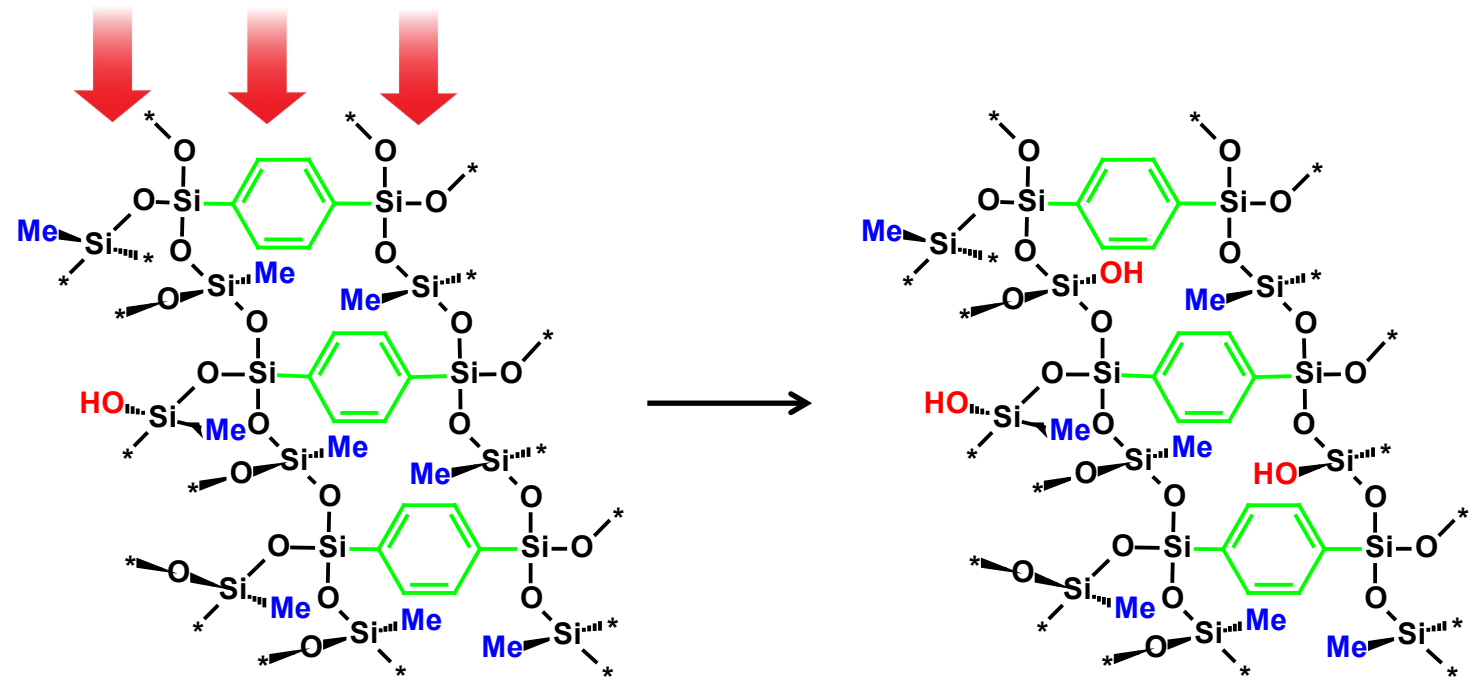
IPVD plasma



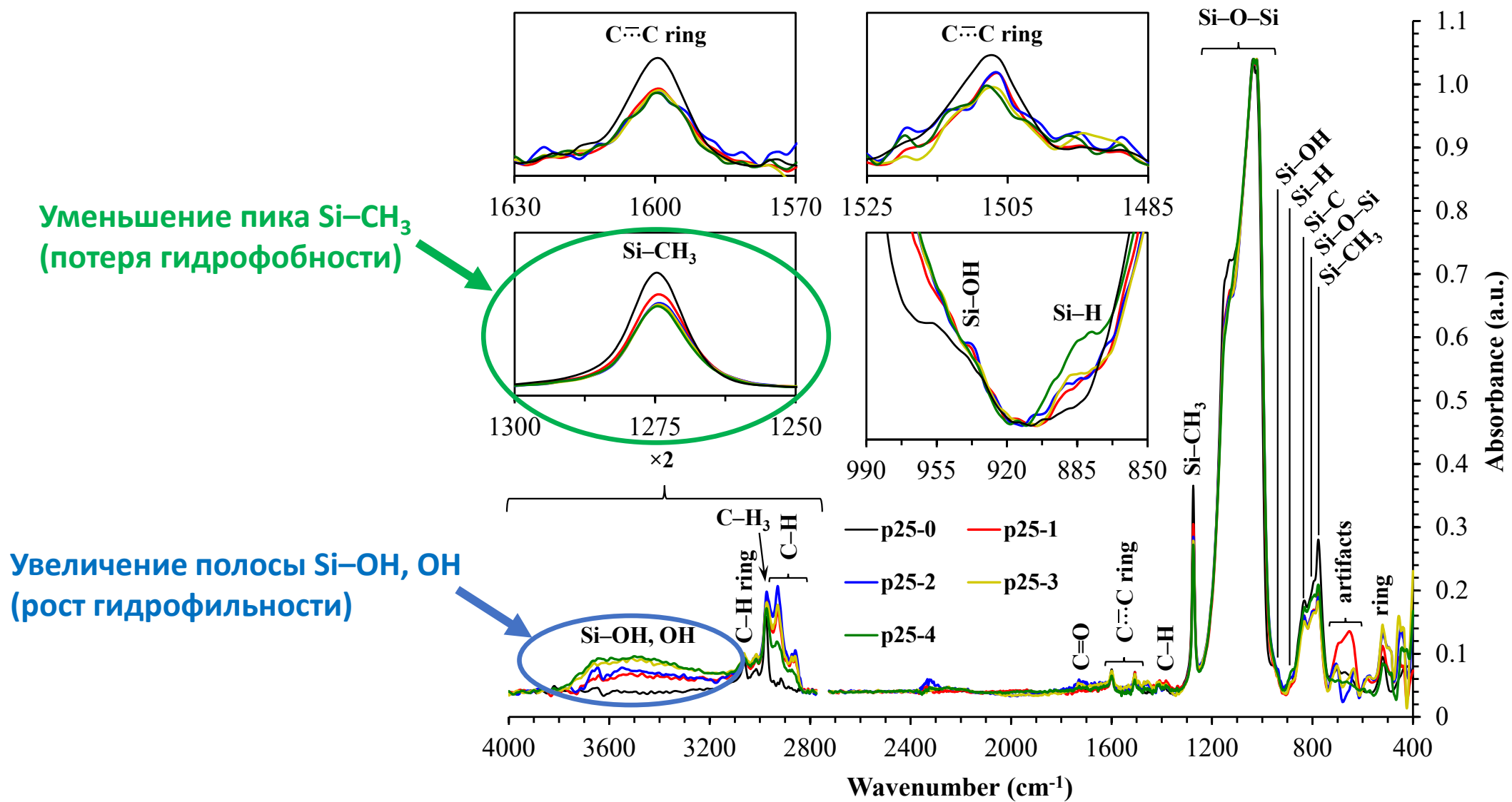
Режимы обработки	Мощность ICP [Вт]	Магнетронный распылитель
0 (исх. обр.)	—	—
1	50	Вкл.
2	150	Вкл.
3	300	Вкл.
4	300	Выкл.

# Основной механизм повреждений ВУФ излучением 105 нм (11.8 эВ)

- Излучение  $> 190$  нм не повреждает low-k диэлектрики [1].
- ВУФ ( $< 200$  нм) излучение аргоновой плазмы состоит из резонансного излучение атомов (104.8 и 106.7 нм) и ионов (92.0 и 93.2 нм).
- Излучение 105 нм может разрывать любые связи, показанные на рисунке, кроме бензольных колец.
- Наиболее вероятен отрыв концевых метильных групп связей Si-CH<sub>3</sub>.



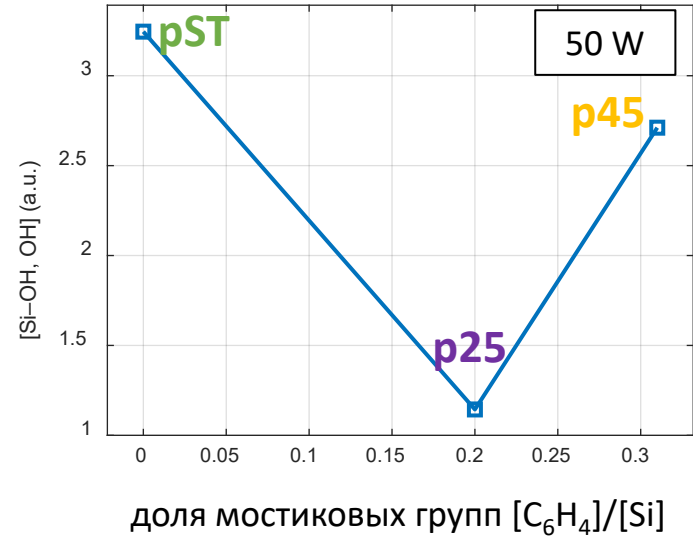
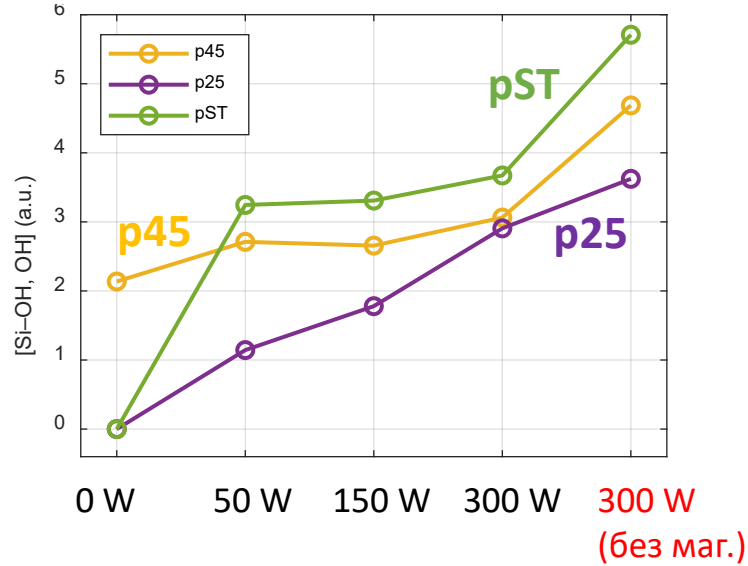
# ИК спектры low-k плёнок после IPVVD процесса



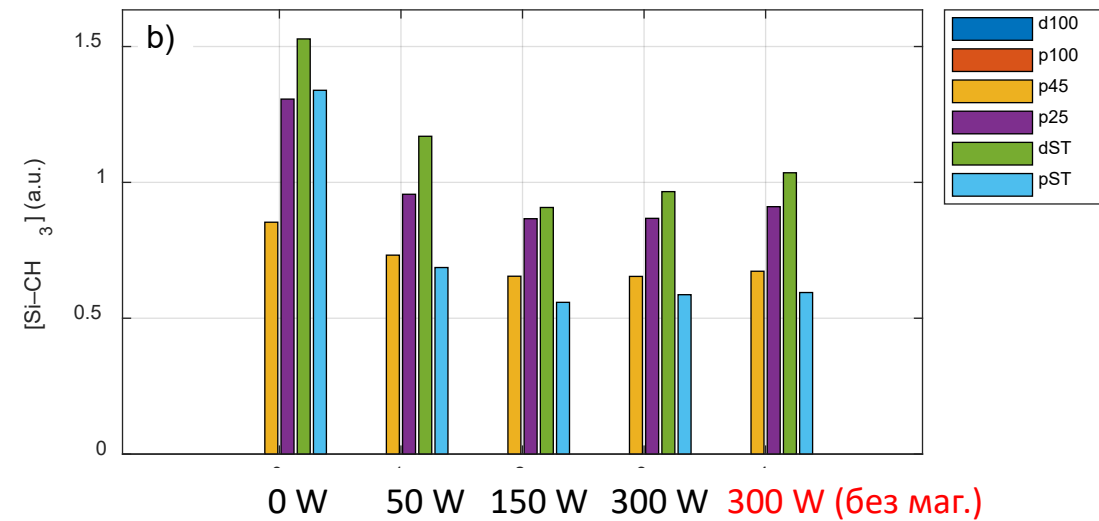
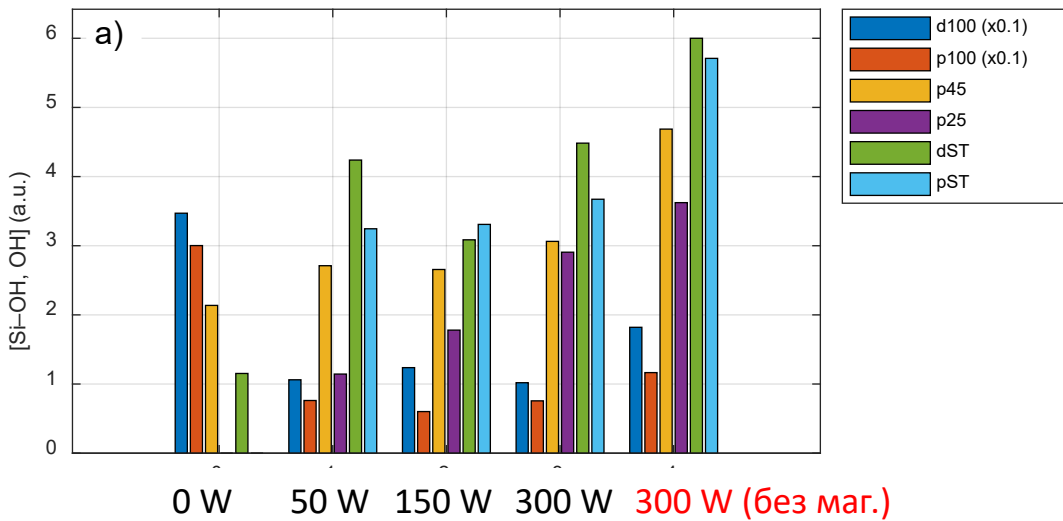
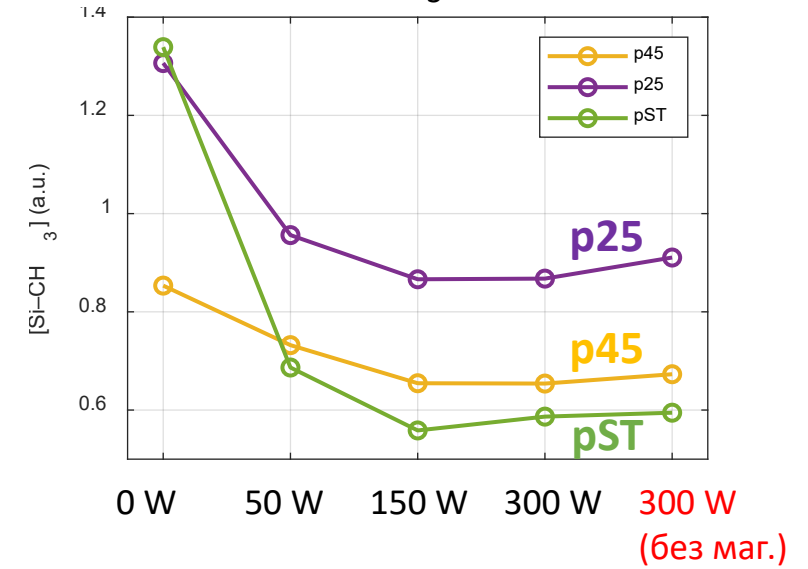


# Устойчивость low-k плёнок к ВУФ излучению

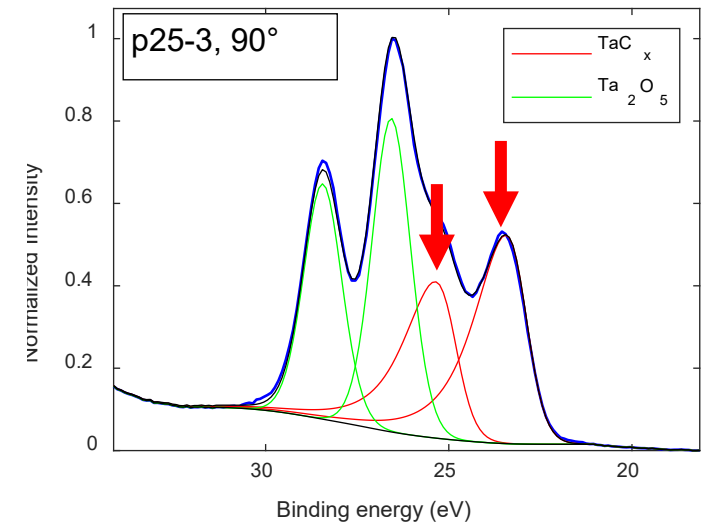
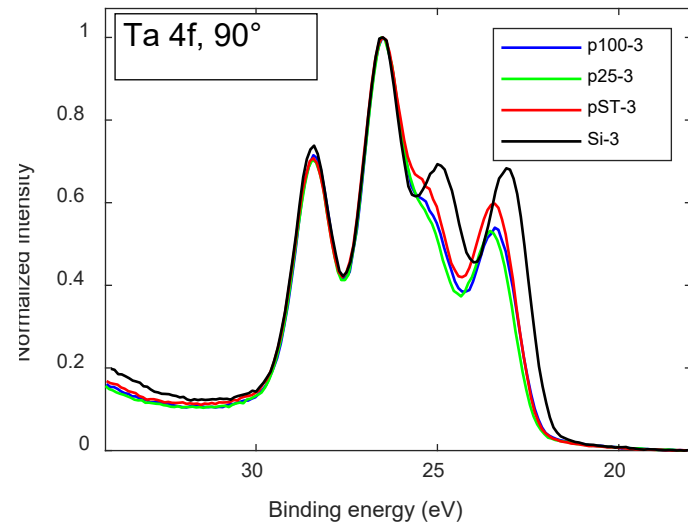
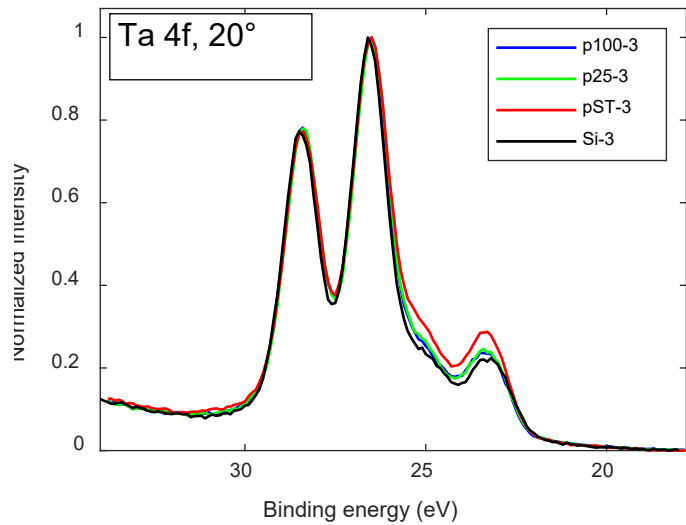
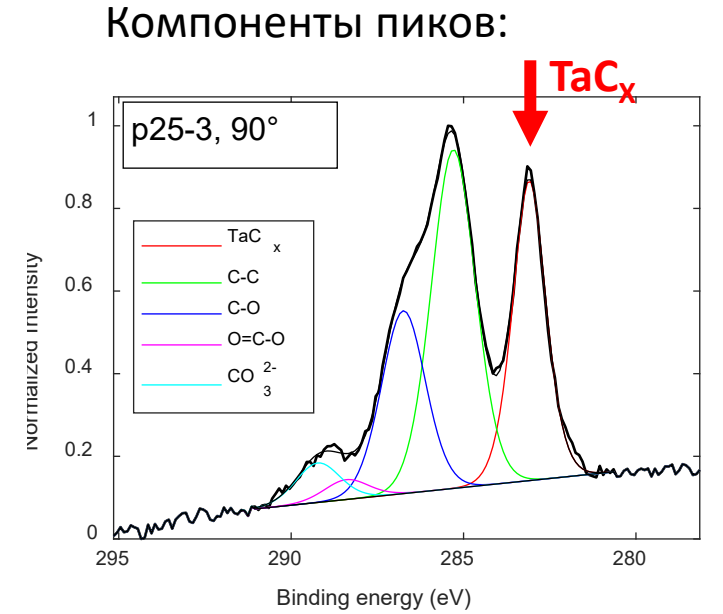
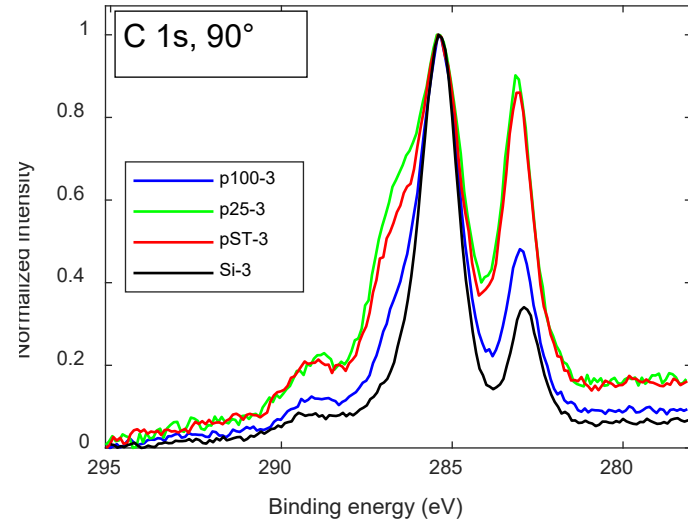
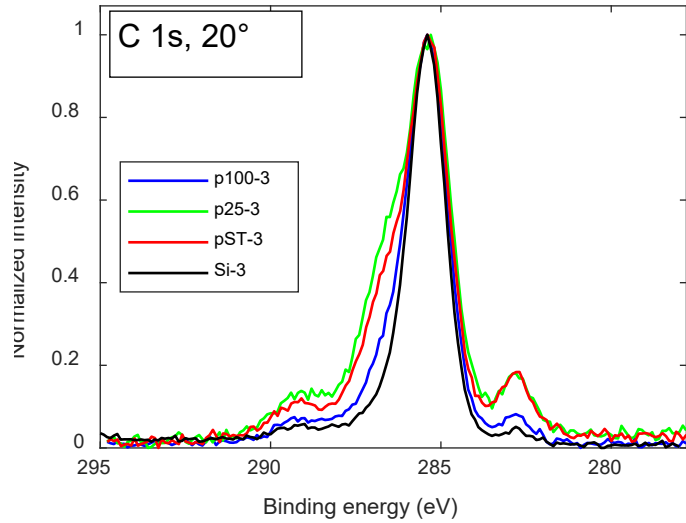
а) Содержание Si-OH, OH (гидрофильность):



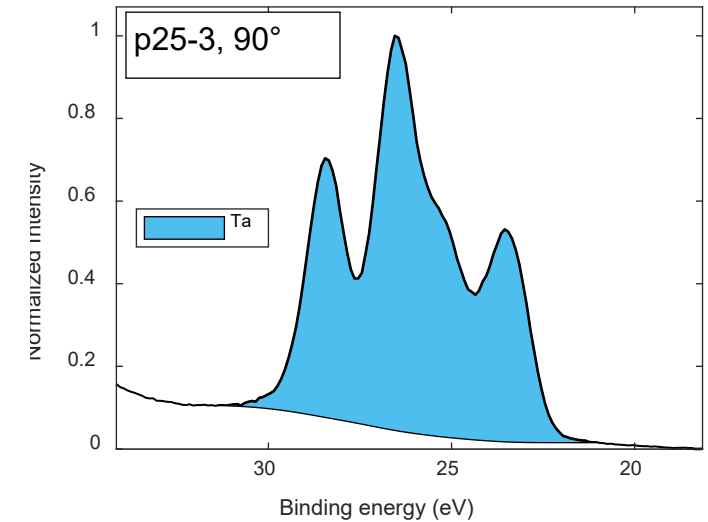
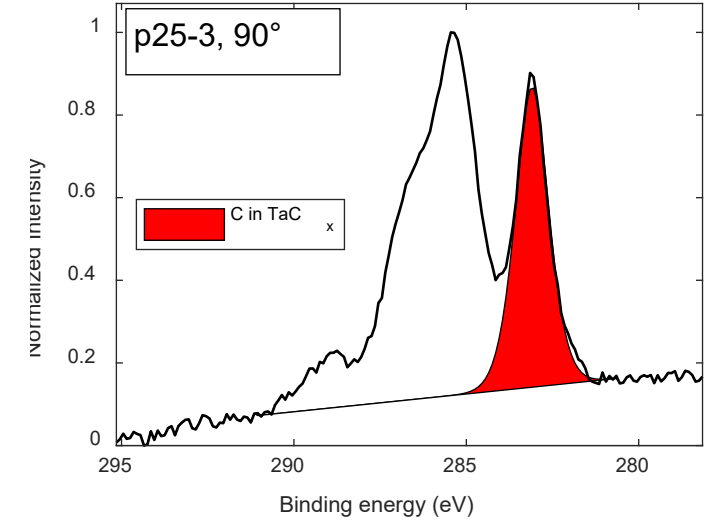
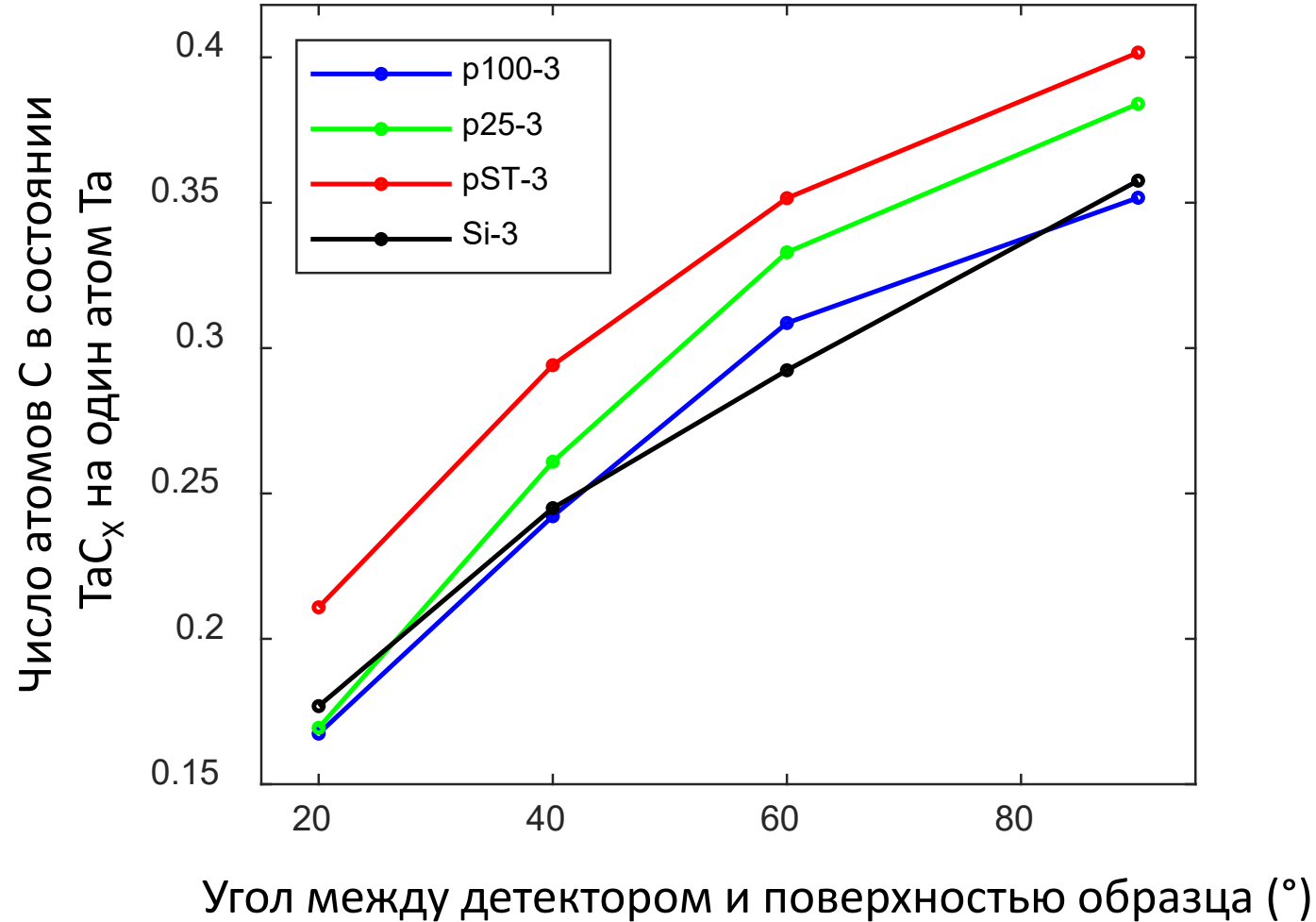
б) Содержание Si-CH<sub>3</sub> (гидрофобность):



# XPS (РФЭС) анализ Ta покрытий



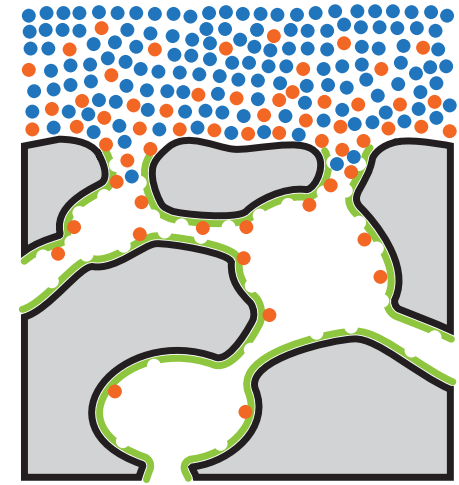
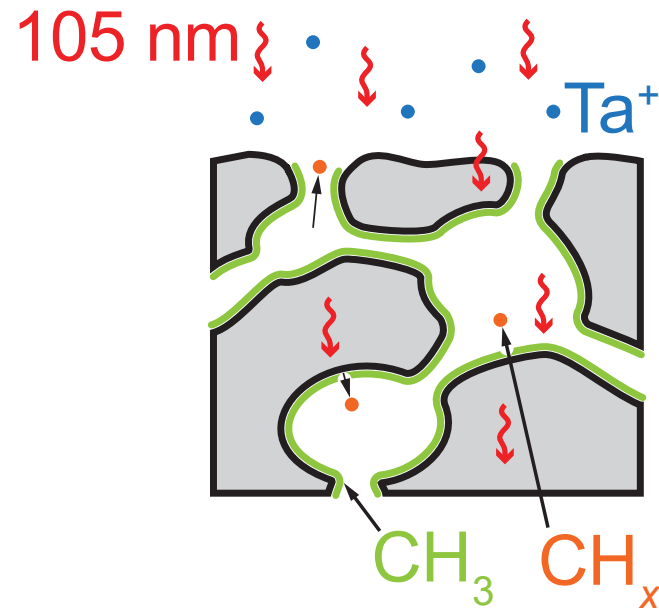
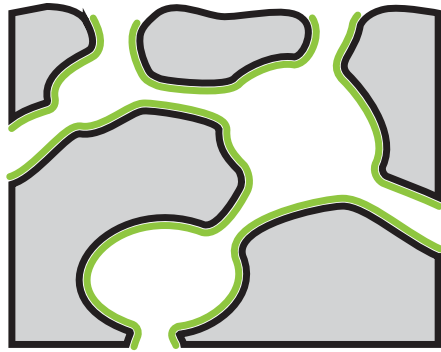
# Карбидизация покрытий (TaC<sub>x</sub>)



Для образования карбида тантала нужны высокие температуры, поэтому карбидизация возможна только во время IPVD процесса в присутствии ионов Ta<sup>+</sup>, поскольку атомы Ta термализованы.

# Механизм карбидизации покрытий

Исходный образец  $\Rightarrow$  IPVD процесс  $\Rightarrow$  Покрытие  $\text{TaC}_x$



# Основные результаты

1. Добавление бензольных мостиков к OSG диэлектрику с метильными группами повышает его устойчивость к ВУФ излучению, но может уменьшать гидрофобность.
2. Образец с оптимальным соотношением  $[C_6H_4]/[Si] \approx 0.2$  показал лучшую устойчивость к ВУФ излучению по сравнению с классическим OSG с метильными группами при одинаково высокой гидрофобности исходных образцов.
3. Образующиеся под действием ВУФ излучения  $CH_x$  радикалы приводят к карбидизации барьерных покрытий (образованию  $TaC_x$ ).

Результаты опубликованы в работах:

[1] A.N. Ryabinkin, *et al.*, *Plasma Processes and Polymers*. **2024**. DOI: 10.1002/ppap.202300206

[2] А.Ф. Паль, *и др.*, *Письма в ЖТФ*. **2024**, 50, 34. DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57099.19711

[3] A.O. Serov, *et al.*, *Plasma Processes and Polymers*. **2023**, 20, 2200169. DOI: 10.1002/ppap.202200169