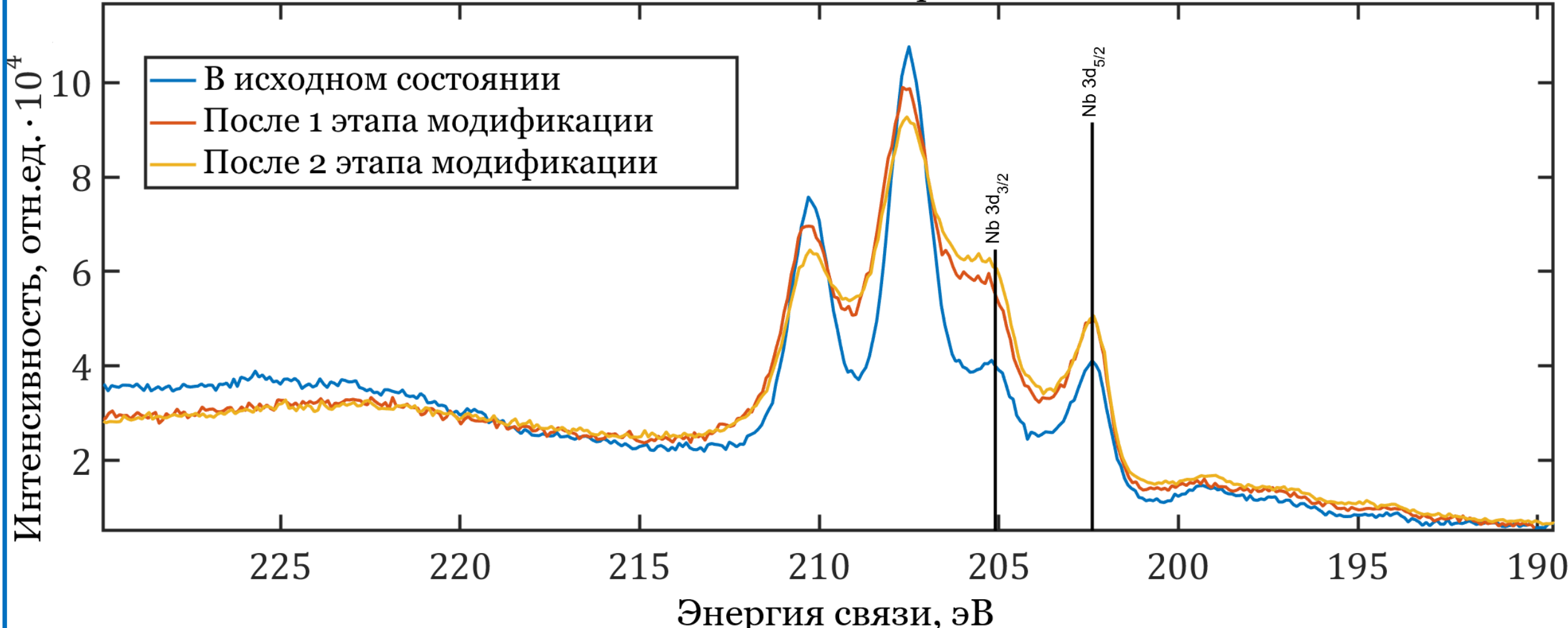


Д.С. Лукьянцев*, А.В. Лубенченко, Д.А. Иванов, О.Н. Павлов

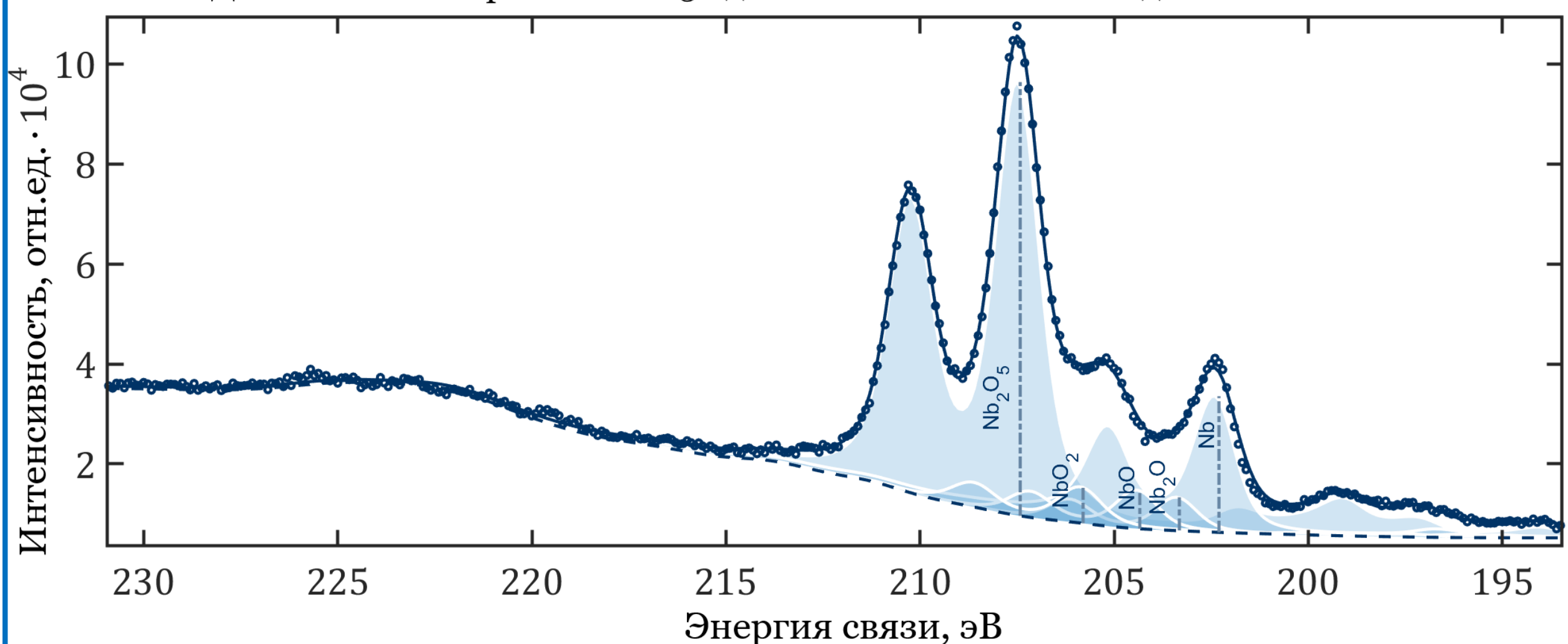
*LukyantsevDS@mpei.ru

Влияние слаботочного ионного распыления неоднородных металл-оксидных плёнок на их послойный химический состав

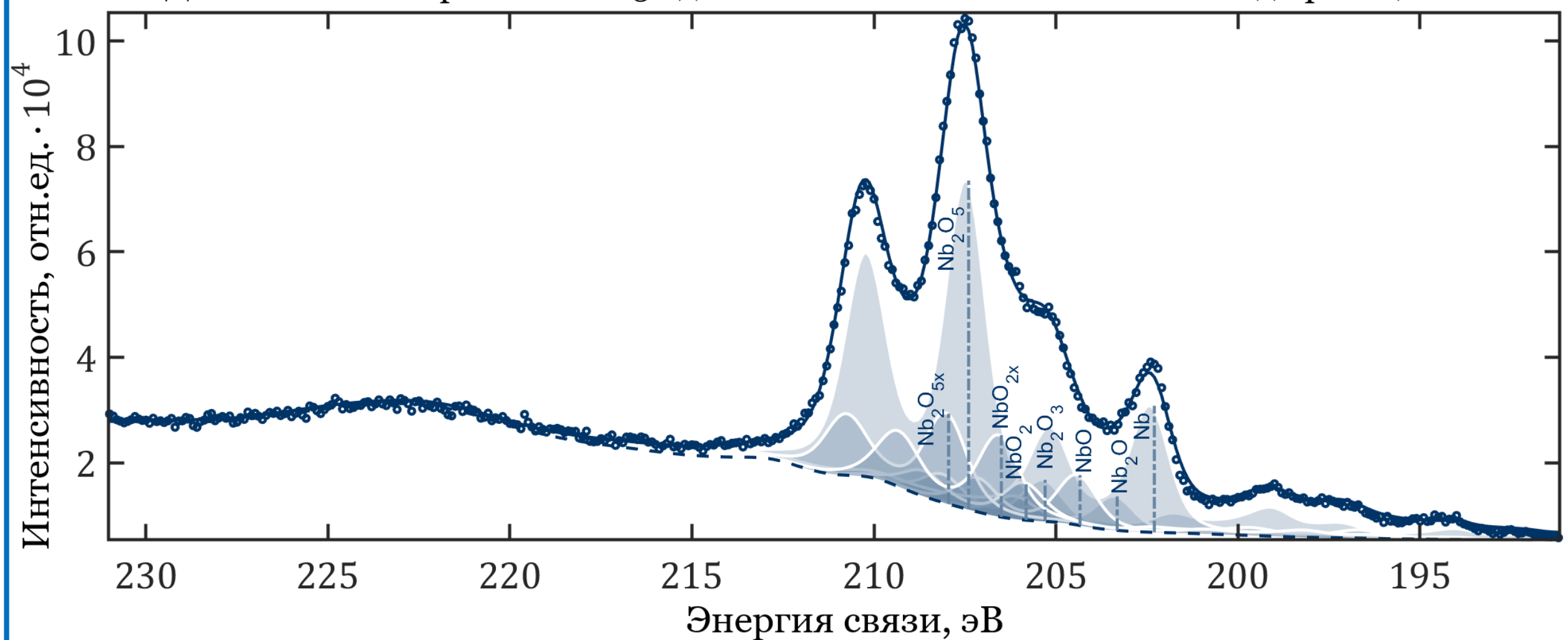
РФЭС-спектры пленки ниобия на линии Nb 3d в исходном состоянии, после 1 и 2 этапа модификации



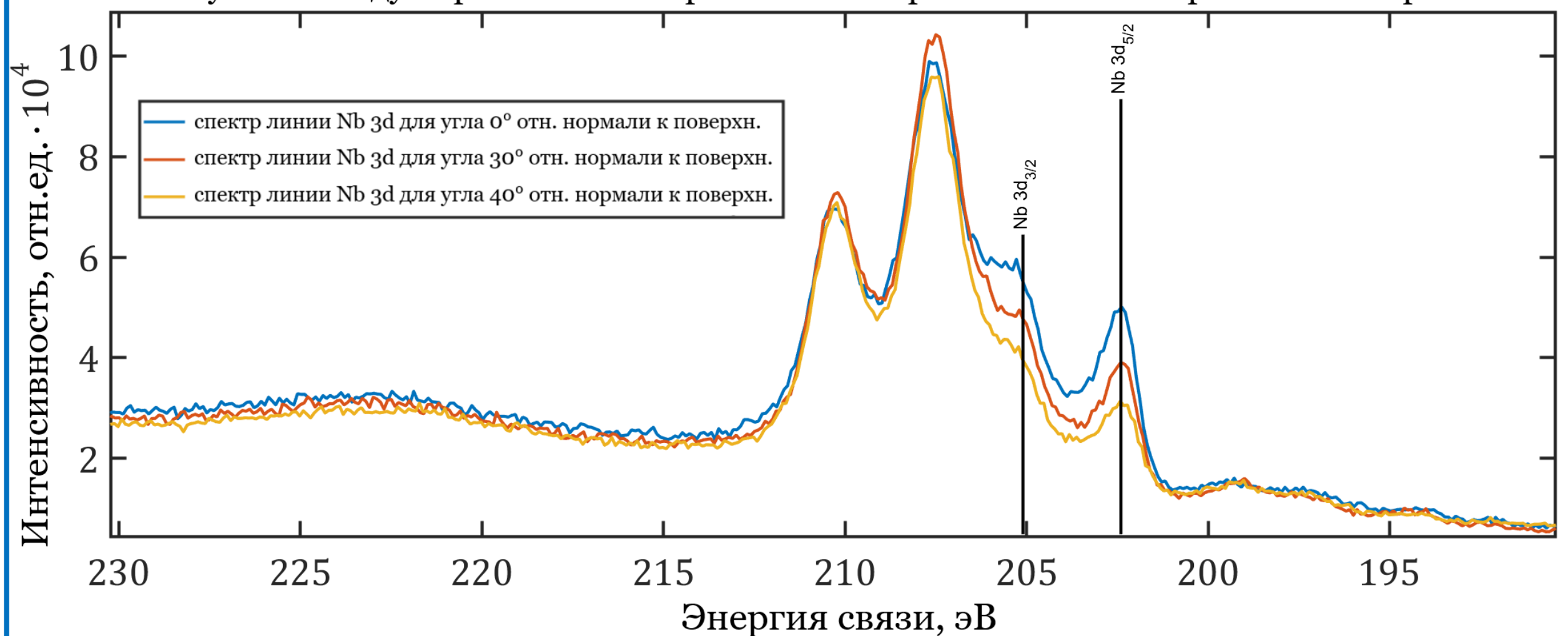
Детальный спектр линии Nb 3d для пленки ниобия в исходном состоянии



Детальный спектр линии Nb 3d для пленки ниобия после 1 этапа модификации



РФЭС-спектры пленки ниобия на линии Nb 3d после 1 этапа модификации для разных углов между нормалью к поверхности и направлением на энергоанализатор



Результаты.

В работе исследовано формирование многослойных оксидных и субоксидных слоев на ультратонкой металлической пленке ниобия в несколько этапов ионной модификации её поверхности слаботочным пучком ионов Ar. После каждого этапа проведен послойный фазовый анализ состава поверхности пленки, рассчитаны относительные концентрации хим.элементов, толщины слоёв. Результаты данной работы в последствии могут быть использованы для контролируемого формирования необходимых субоксидных слоёв тонкой плёнки.

Окисленные многослойные тонкие плёнки ниобия применяются для создания мемристивных устройств [1]. Функциональность их работы определяется послойным химическим составом неоднородной окисленной тонкой плёнки, который можно определить с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (РФЭС УР). Одним из перспективных способов формирования различных поверхностных слоёв плёнки является пучковое ионное травление [2]. При слаботочном ионном облучении металл-оксидной плёнки происходит преимущественное распыление кислорода, что, в свою очередь, приводит к модификации приповерхностных оксидных слоёв и образования различных субоксидных структур. Подбрав параметры распыления для выбранной плёнки, можно сформировать субоксидные слои на её поверхности, необходимые для корректной работы мемристора.

В настоящей работе исследуется подход формирования субоксидных слоёв тонкой плёнки ниобия посредством многократной модификации её поверхности слаботочным пучком ионов Ar. Пленка ниобия толщиной 50 нм были нанесена на кремниевую подложку методом магнетронного напыления.

Проведено два этапа ионного воздействия длительностью по 20 минут каждый. Модификация пленки проводилась направленными ионными пучками Ar в вакуумных условиях с помощью ионной пушки SPECS Ion Source IQE 12/38 (энергия ионов — 0.5 кэВ, угол падения — 70° к нормали, ионный ток — 0.5мкА). Процесс изменения стехиометрии и порядка слоёв контролировался методом РФЭС УР (in situ) для различных углов зондирования 0°, 30° и 40°, отсчитанных от нормали к мишени. Также проведено моделирование процесса взаимодействия ионного пучка с поверхностью плёнки в программном комплексе SRIM [3]. Для разложения рентгеновской фотоэлектронной линии мы использован метод, описанный в [4].

Послойный анализ показывает, что при атмосферном окислении пленок под слоем из высшего оксида формируется переходной слой между высшим оксидом и металлом толщиной порядка 1.5-2 нм. Толщина высшего оксида имеет толщину порядка 4 нм. По результатам послойного анализа методом РФЭС УР и расчета глубины проникновения ионов в программе SRIM определено, что модификация ионами аргона затрагивает только верхний слой высшего оксида, что приводит к образованию на его поверхности субоксидного слоя ниобия. После второго этапа модификации толщина субоксидного слоя возросла пропорционально времени воздействия.

Послойный фазовый анализ плёнки ниобия до и после модификации (Угол зондирования 0°)

№	До модификации			После I цикла модификации (20 мин)			После II цикла модификации (40 мин)		
	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ
6				0.4	0.38 Nb ₂ O ₃ + 0.62 NbO _{2x}	205.3 206.5	0.7	0.32 Nb ₂ O ₃ + 0.57 NbO _{2x} + 0.11 NbO ₈	205.3 206.5 204.4
5	3.7	Nb ₂ O ₅	207.4	1.1	Nb ₂ O _{5x}	207.9	1.5	Nb ₂ O _{5x}	—//—
4				2.5	Nb ₂ O ₅	207.4	2.3	Nb ₂ O ₅	—//—
3	0.6	0.5 NbO+ 0.5 NbO ₂	204.3 205.8	0.6	0.42 NbO+ 0.58 NbO ₂	—//—	0.5	0.42 NbO+ 0.58 NbO ₂	—//—
2	0.8	Nb ₂ O	203.3	0.9	Nb ₂ O	—//—	0.8	Nb ₂ O	—//—
1	—	Nb (3d 5/2)	202.4	—	Nb (3d 5/2)	—//—	—	Nb (3d 5/2)	—//—
Sub.	—	SiO ₂ /Si	—	—	SiO ₂ /Si	—	—	SiO ₂ /Si	—

Послойный фазовый анализ плёнки ниобия после I этапа модификации для различных углов зондирования

№	Угол зондирования 0°			Угол зондирования 30°			Угол зондирования 40°		
	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ	d (нм)	Хим.соед.	E _{ср} , эВ
6	0.4	0.38 Nb ₂ O ₃ + 0.62 NbO _{2x}	205.3 206.5	0.5	0.33 Nb ₂ O ₃ + 0.67 NbO _{2x}	—//—	0.4	0.33 Nb ₂ O ₃ + 0.67 NbO _{2x}	—//—
5	1.1	Nb ₂ O _{5x}	207.9	1.0	Nb ₂ O _{5x}	—//—	1.0	Nb ₂ O _{5x}	—//—
4	2.5	Nb ₂ O ₅	207.4	2.8	Nb ₂ O ₅	—//—	2.8	Nb ₂ O ₅	—//—
3	0.6	0.42 NbO+ 0.58 NbO ₂	204.3 205.8	0.6	0.42 NbO+ 0.58 NbO ₂	—//—	0.5	0.42 NbO+ 0.58 NbO ₂	—//—
2	0.9	Nb ₂ O	203.3	0.8	Nb ₂ O	—//—	0.7	Nb ₂ O	—//—
1	—	Nb (3d 5/2)	202.4	—	Nb (3d 5/2)	—//—	—	Nb (3d 5/2)	—//—
Sub.	—	SiO ₂ /Si	—	—	SiO ₂ /Si	—	—	SiO ₂ /Si	—

Список литературы

- Hota M.K. // J. of Nanosc. and Nanotechn., № 5 (14), С. 3538-3544, 2014.
- Miao F. // ACS nano, T. 6, №. 3, С. 2312-2318, 2012.
- Ziegler J. F. // N. Instr. and Meth. in Ph. Res., 2010, T. 268, №.11-12, С. 1818-1823.
- Lubenchenko A.V. et al. // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 427. P. 711-721