

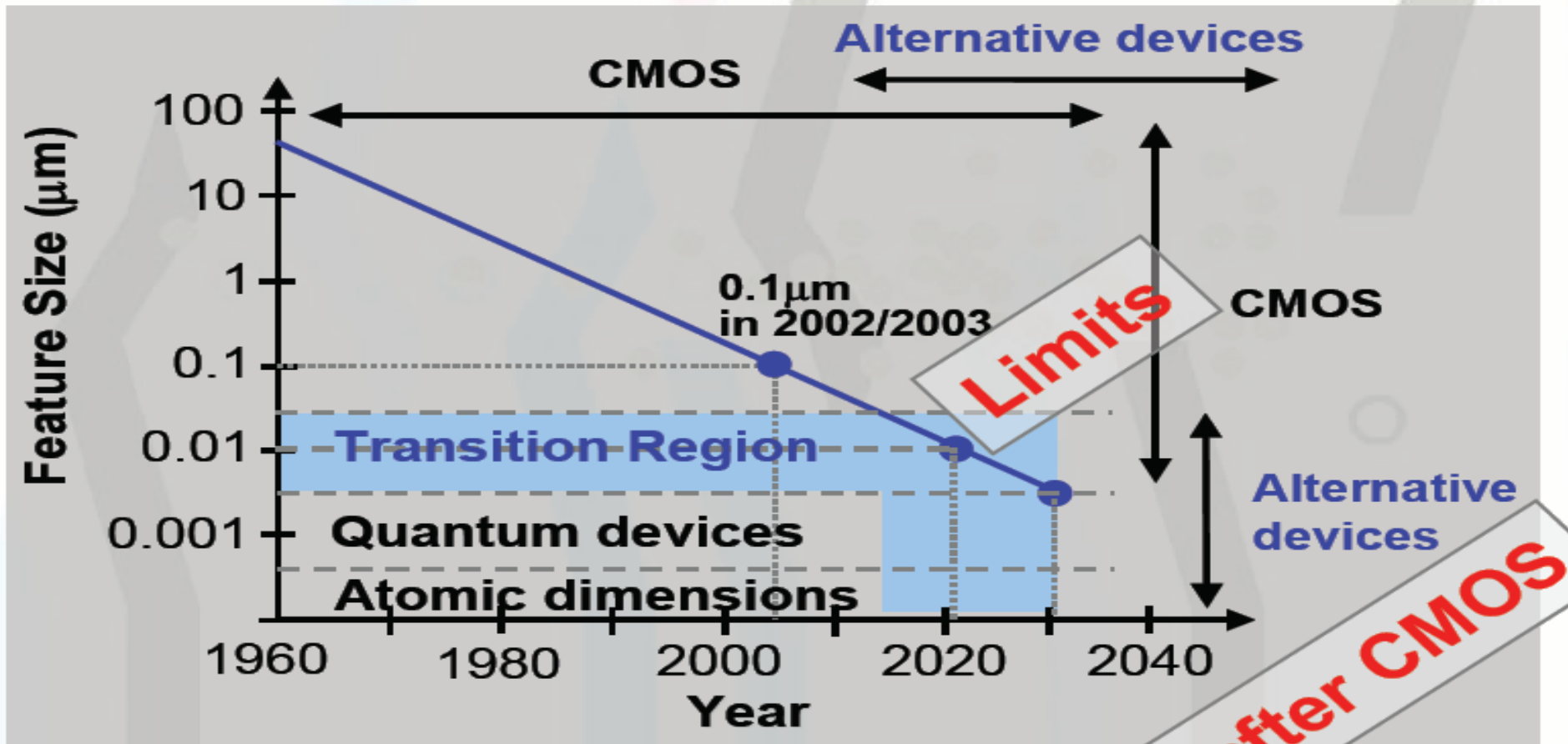
Материалы и пленочные структуры спинтроники и стрейнтроники

В.А. Кецко



**Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова Российской Академии Наук
(ИОНХ РАН)**

Размеры элементов электронных устройств

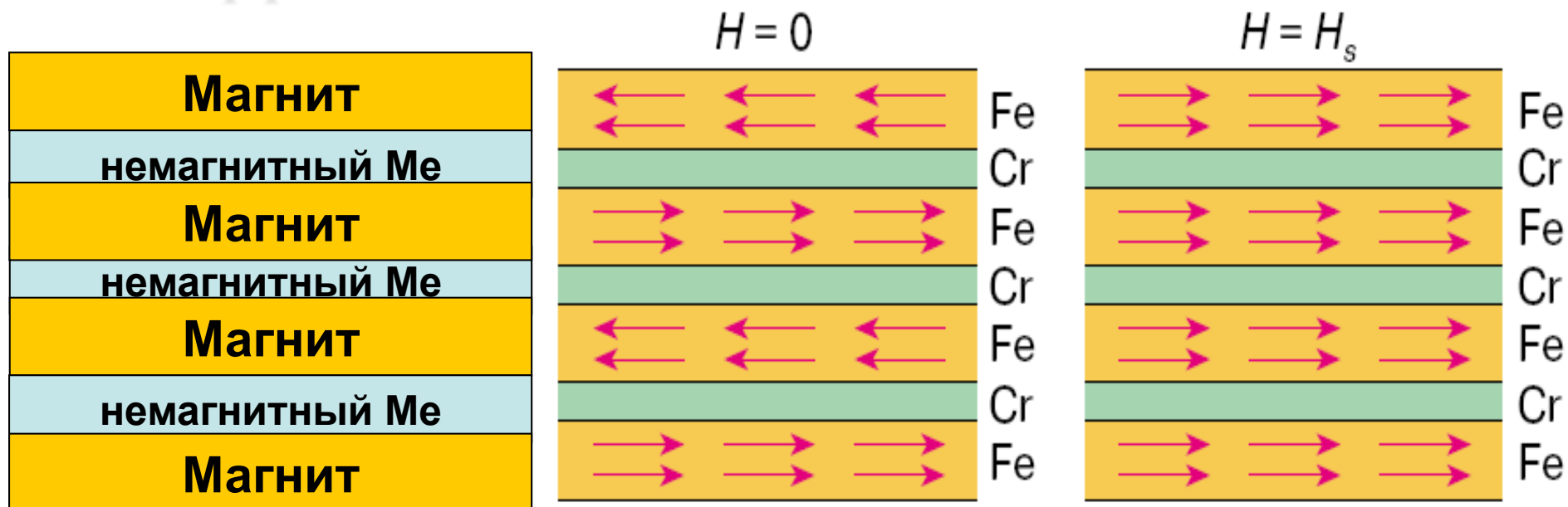




Нобелевские лауреаты по спинтронике



Альбер Ферт и Петер Грюнберг обнаружили эффект ГМС в многослойных структурах Fe/Cr



НАПРАВЛЕНИЯ СПИНТРОНИКИ

Композитные структуры

ферромагнетик/полупроводник

Гомогенные ферромагнитные полупроводники

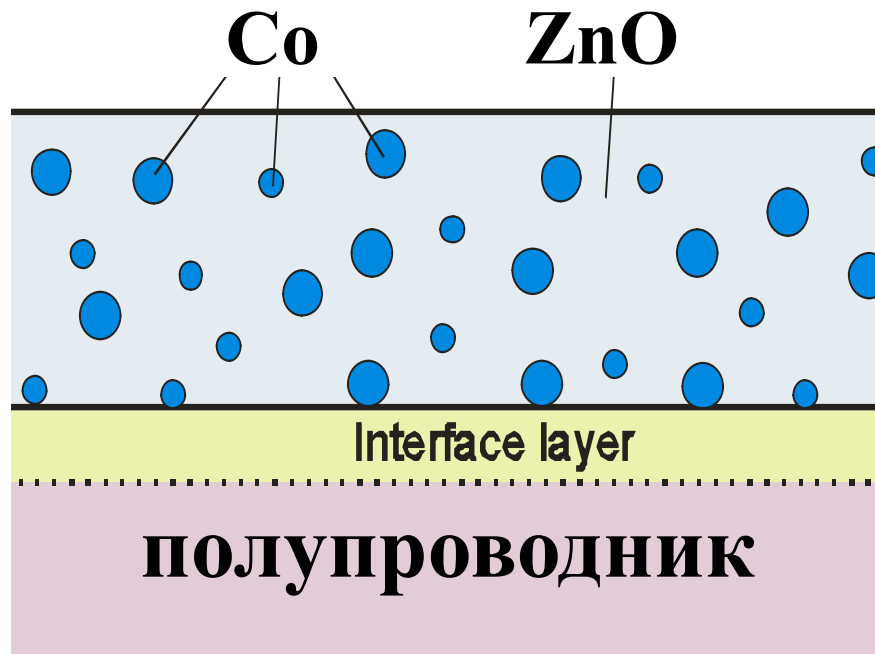
Требования к материалам

- простота методик синтеза материалов, возможность включения изделий, полученных на их основе, в стандартные полупроводниковые схемы на основе Si, GaAs, GaN
- сохранение в полученных магнитных полупроводниковых материалах структуры и физико-химических свойств исходных полупроводниковых матриц без ухудшения их функциональных характеристик
- сохранение магнитной ориентации в полупроводниках с n- и p-подвижными носителями тока при температурах выше комнатных

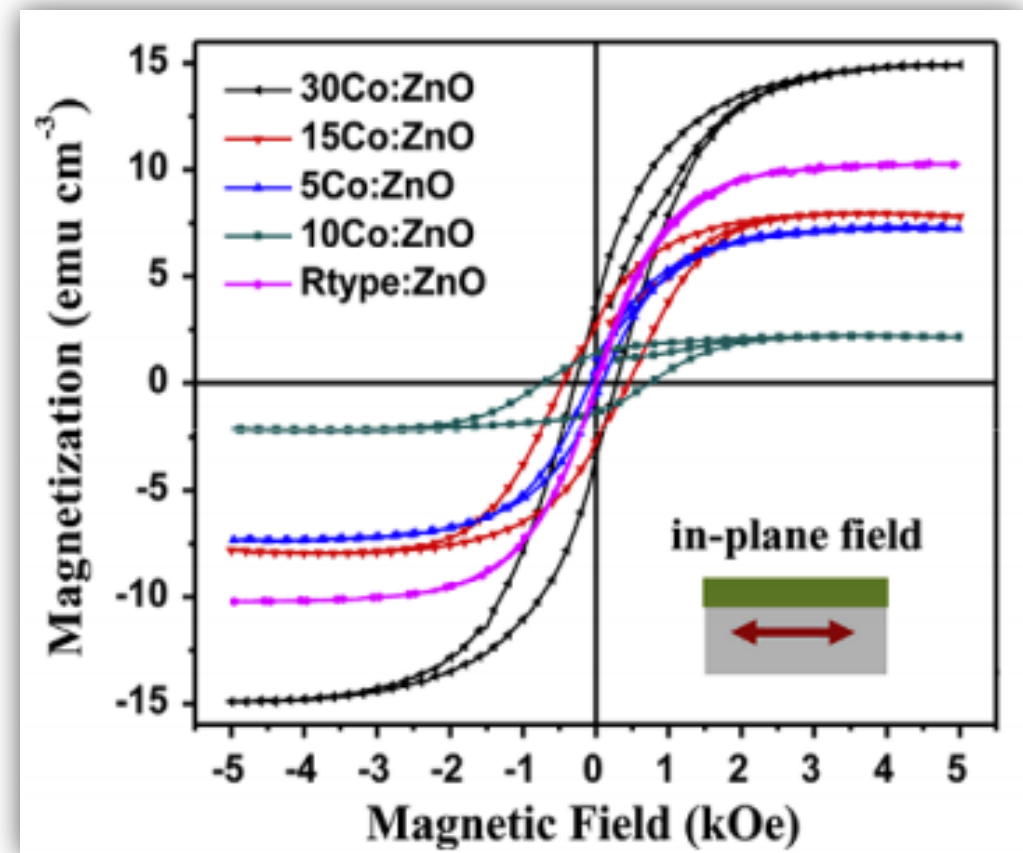
EuO – ферромагнитный полупроводник

Материал	Температура Кюри, К
EuO	69,4
EuO – CaO	69,4
EuO-SmO	130
EuS	16,5
EuSe	3,8

Пленочные композитные структуры



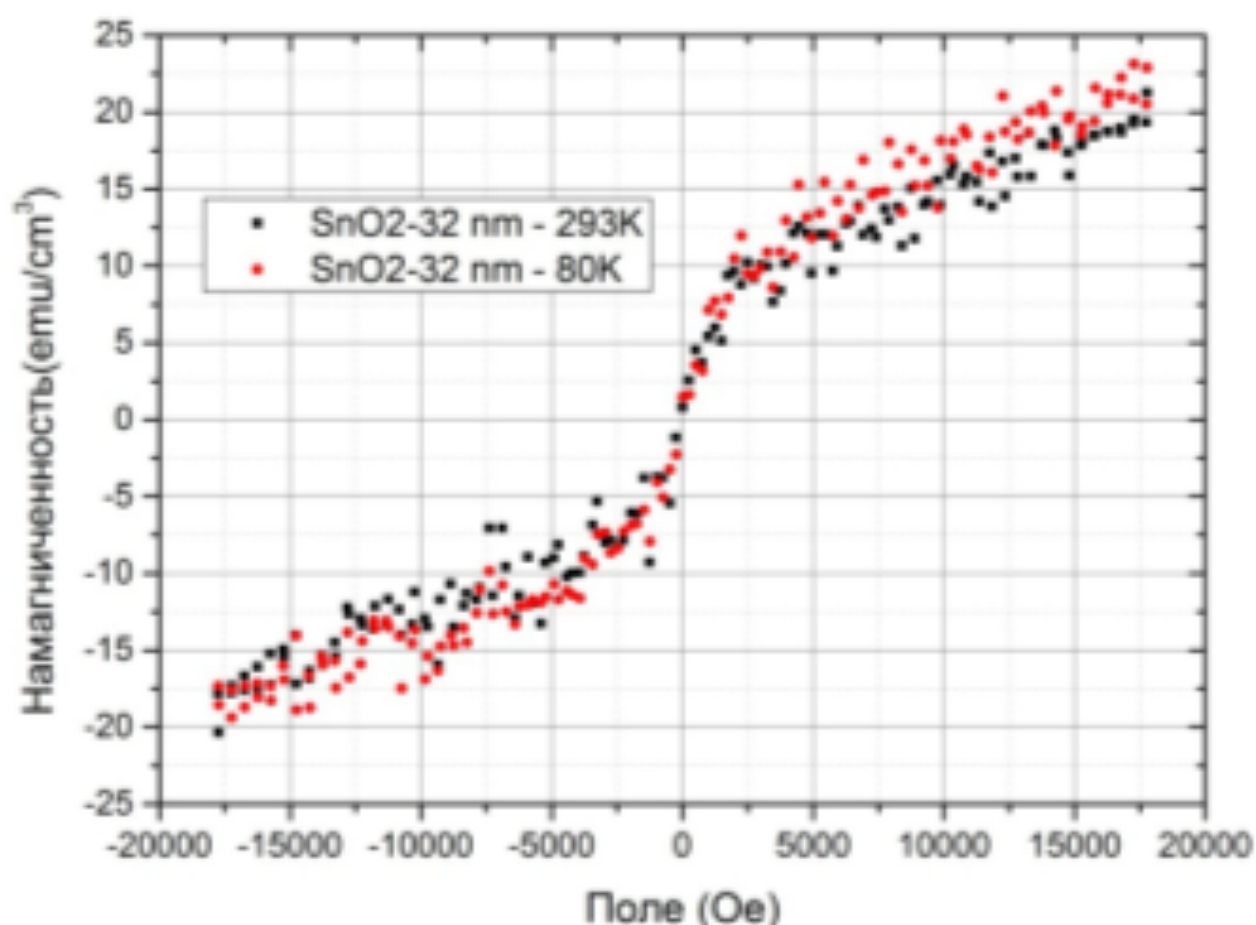
Материал	T_c , К
SiO ₂ – Co	> 350
ZnO – Ni, Co	
TiO ₂ – Co (Fe)	
EuO – Fe (Co)	



Kim, J.H. *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 92. – P. 6066-6071.

Loukya B. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2013. – T. 345. – C. 159-164

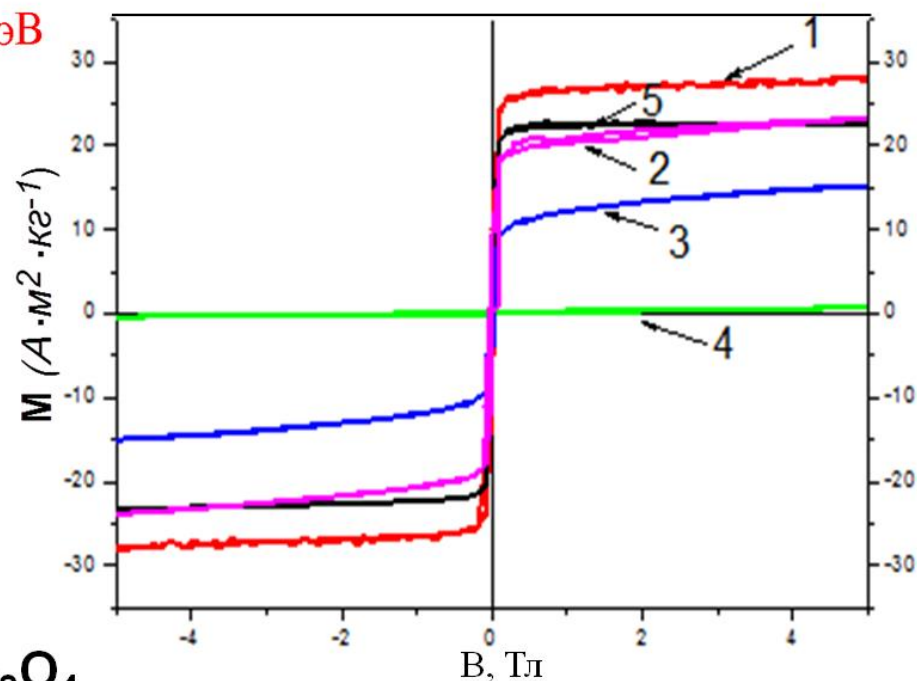
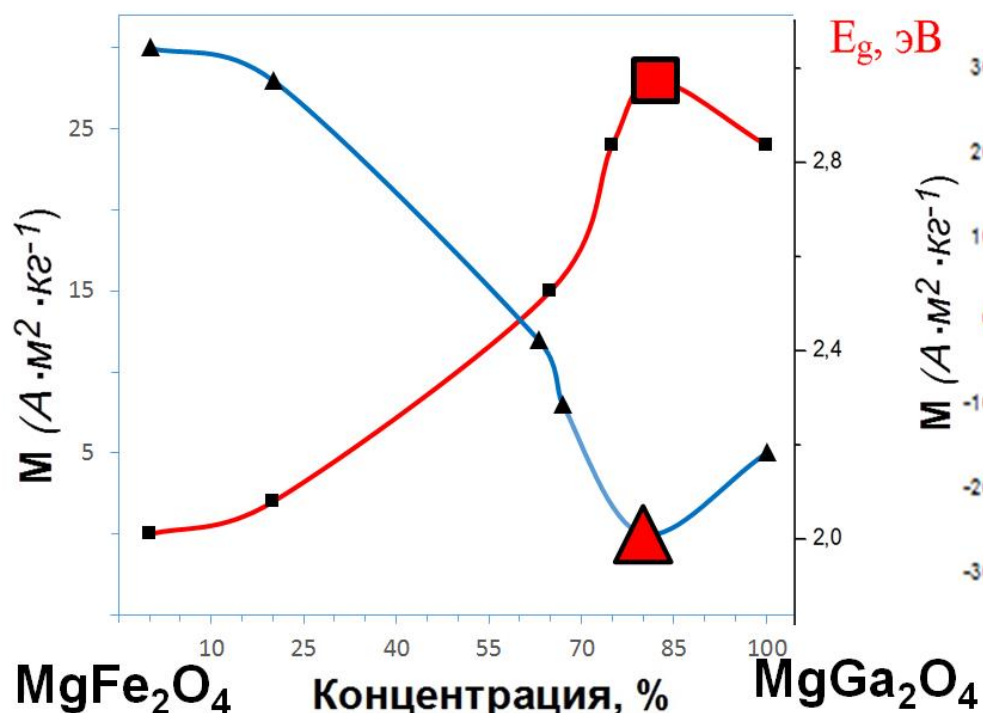
Ферромагнетизм SnO₂



Ферромагнитные свойства таких соединений определяются большим количеством кислородных дефектов в поверхностных областях наночастиц

Назаров Д.В. и др./ Сб. трудов 17-й межд. конф. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». - Ростов-на-Дону - 2014. - С. 199-200

Физико-химические свойства шпинели состава $\text{Mg}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_2\text{O}_4$

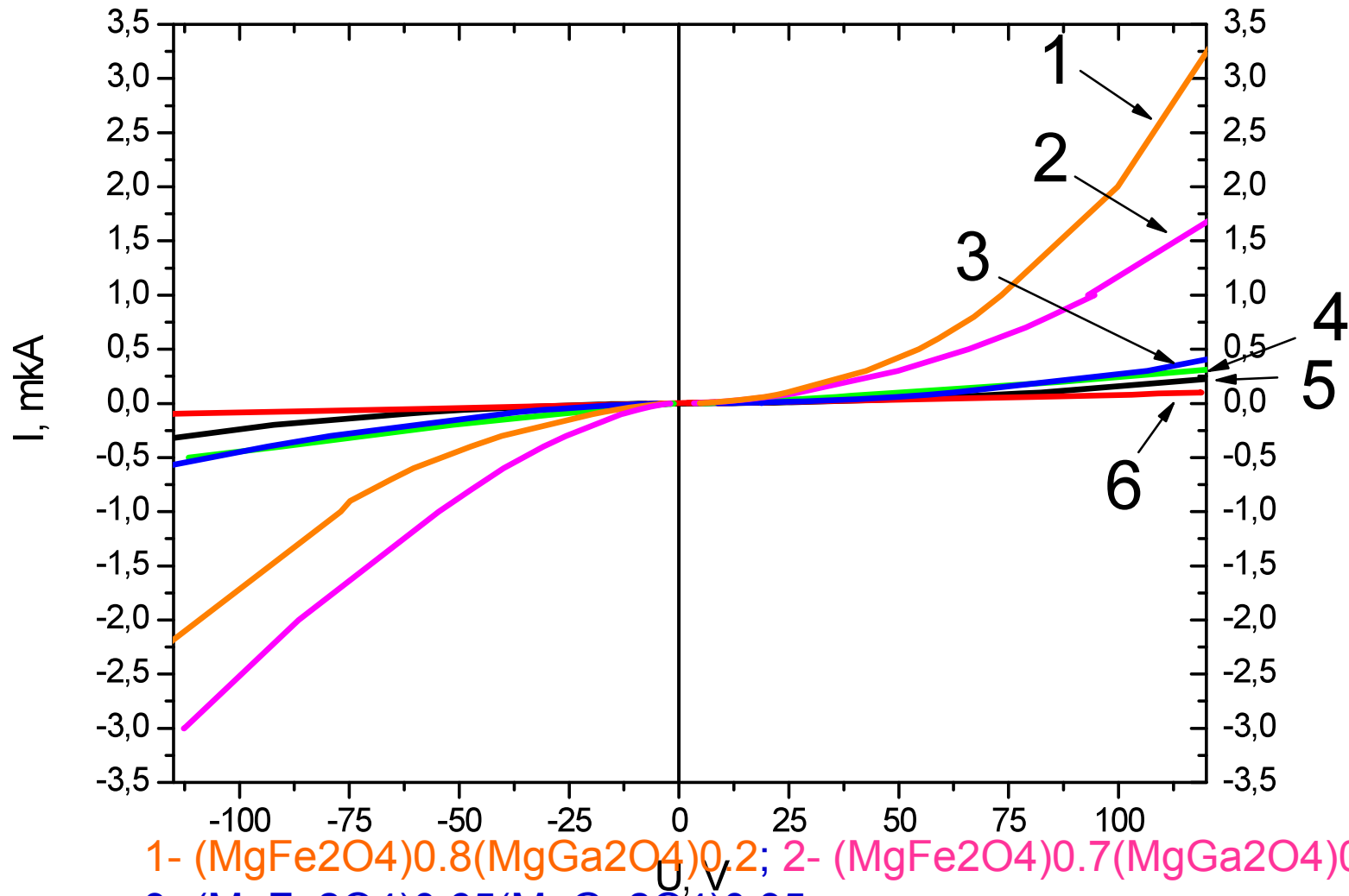


Зависимость намагниченности насыщения и ширины запрещенной зоны $\text{Mg}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_2\text{O}_4$ от состава

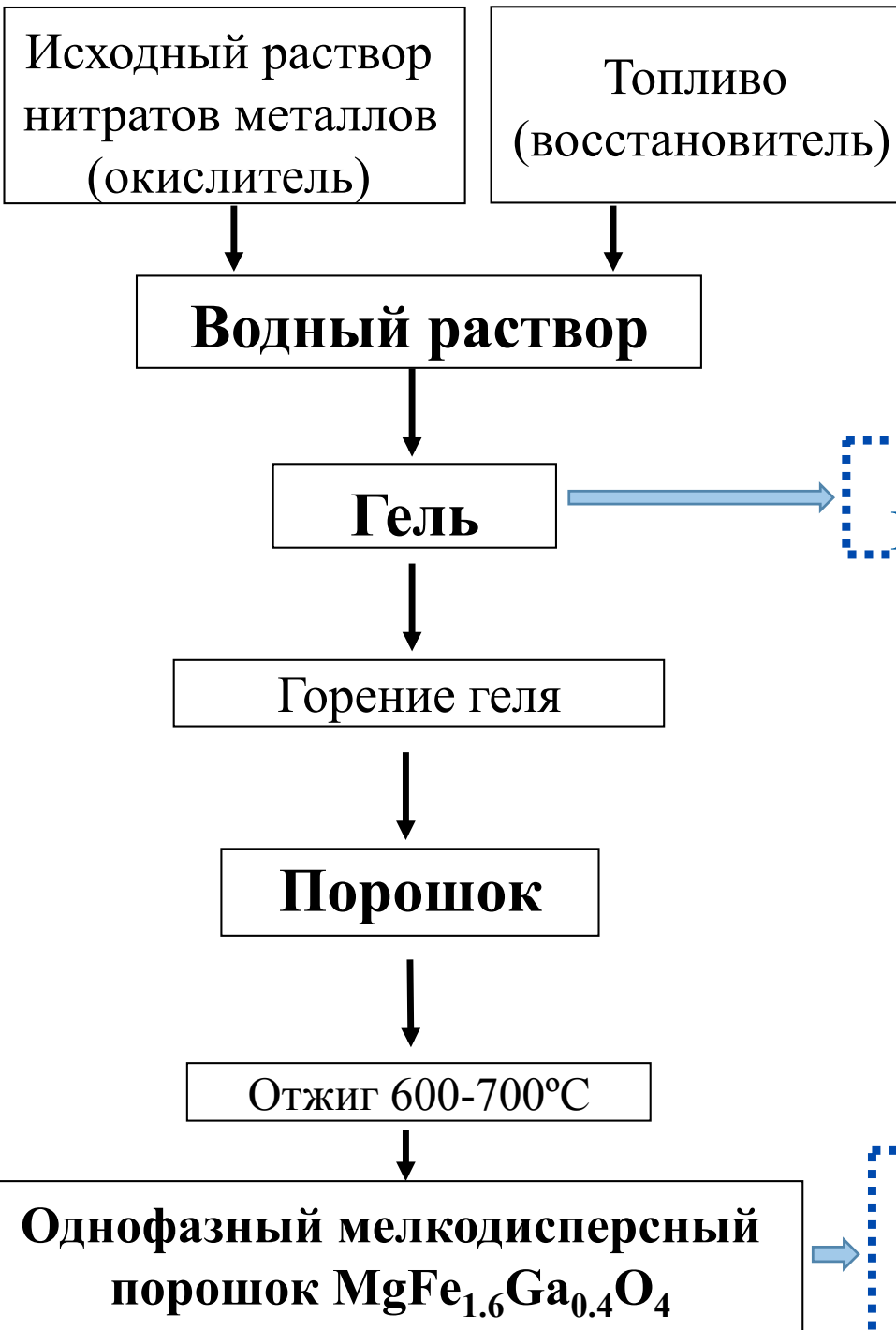
- 1 – $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.8}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.2}$
- 2 - $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.7}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.3}$
- 3 - $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.65}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.35}$
- 4 - $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.2}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.8}$
- 5 - MgFe_2O_4

Наиболее перспективной является шпинель состава $\text{Mg}(\text{Fe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_2\text{O}_4$

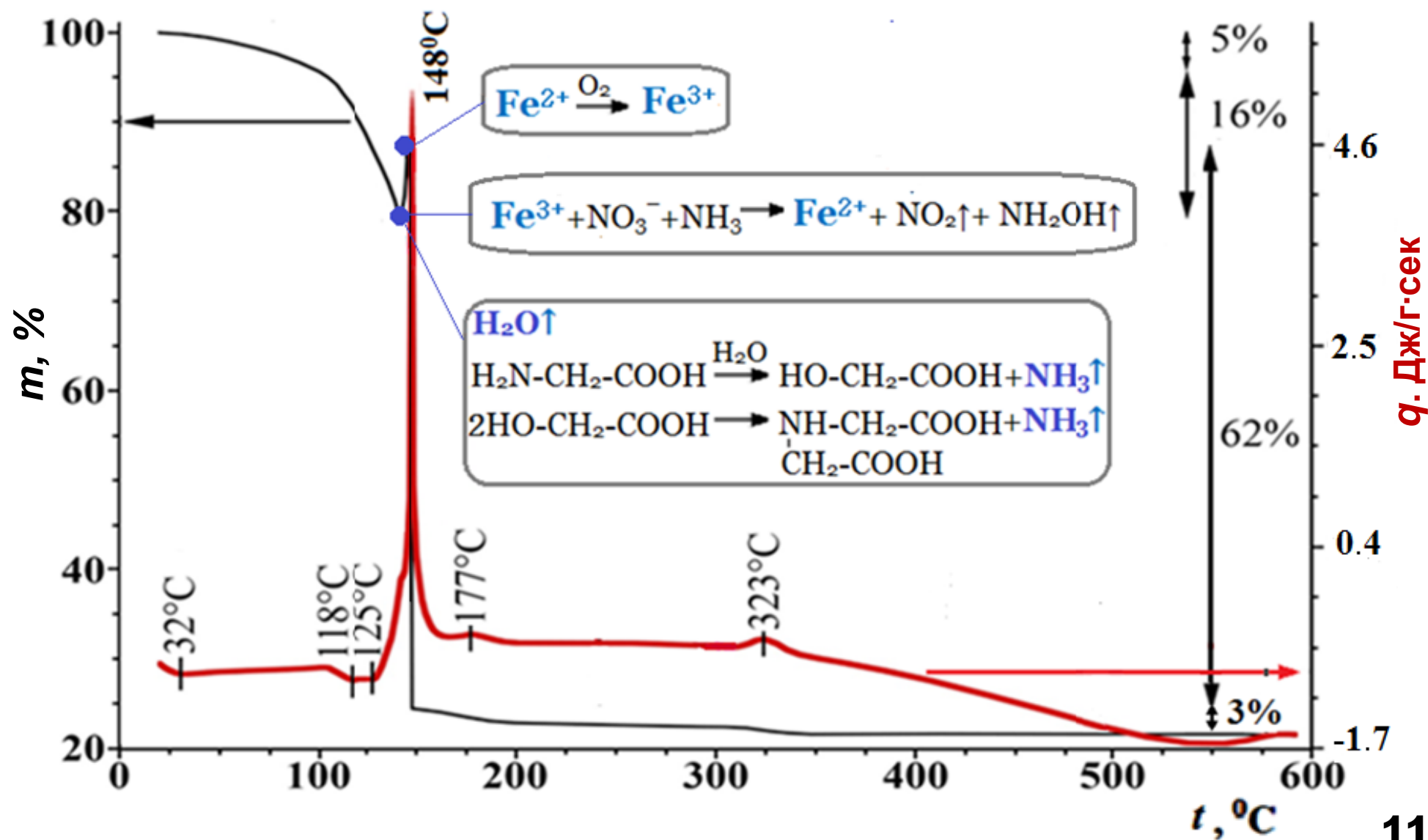
Вольтамперные характеристики



1- $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.8}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.2}$; 2- $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.7}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.3}$;
3- $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.65}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.35}$;
4- $(\text{MgFe}_2\text{O}_4)_{0.2}(\text{MgGa}_2\text{O}_4)_{0.8}$; 5- MgFe_2O_4 ; 6- MgGa_2O_4



ТГА-ДСК (поток воздуха) геля (глицин-нитратный метод)



Термические характеристики гелей

Восстановитель	Время горения, сек.	t_r , °C	t_{ad} , °C
глицин	130	1100	3000
глицин + уротропин	78	1040	3250
глицин + крахмал	112	920	2900
глицин + мочеви́на	154	815	2600

t_r – температура горения геля

t_{ad} – температура адиабатического горения

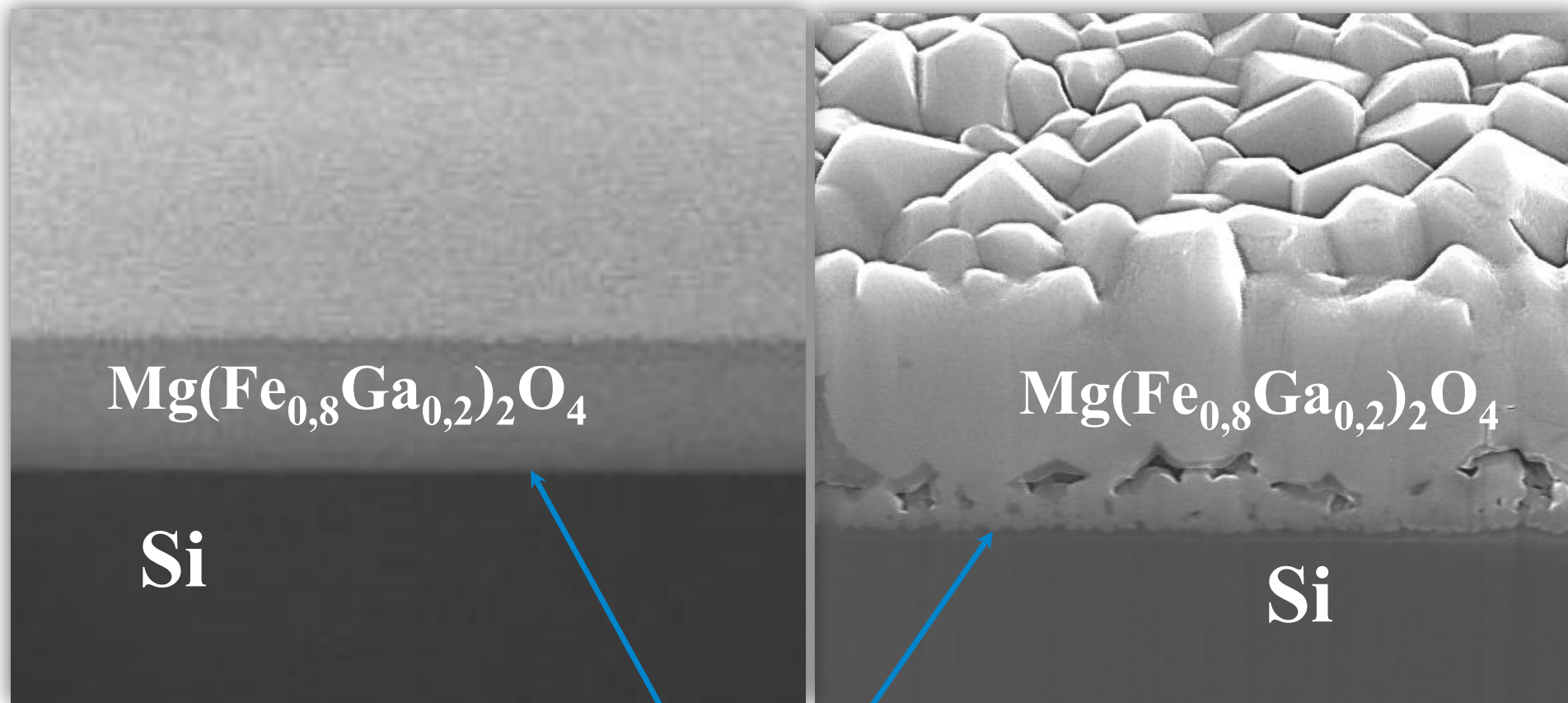
Параметры компонентов структур

Подложка	Параметр решётки (Å)	Коэффициент термического расширения ($10^6/^\circ\text{C}$)	Особенности кристаллизации
Si	5,43	2,6	SiO ₂ , силициды
GaN	3,19	5,6	дефекты ($>10^7 \text{ см}^{-2}$)
GaAs	5,65	6,4	$T_p \geq 550^\circ\text{C}$, активен As↑
MgFe ₂ O ₄	8,36	10,0	
GGG	12,37	8,2	Нет проблем
YIG	12,38	10,4	

РЭМ изображение поперечного среза пленки $\text{Mg}(\text{Fe}_{0,8}\text{Ga}_{0,2})_2\text{O}_4$ с буферным слоем SiO_2 на Si

Свеженанпыленные пленочные образцы

Пленочные образцы после отжига при 950°C



Буферный слой SiO_2

Комплекс локальной ионно-лучевой обработки на базе Helios NanoLab (FEI Company, США)

Фокусированные до $\varnothing 7$ нм пучки ионов галлия, 30 кэВ, 10-60
пА



Внешний вид комплекса
Helios NanoLab

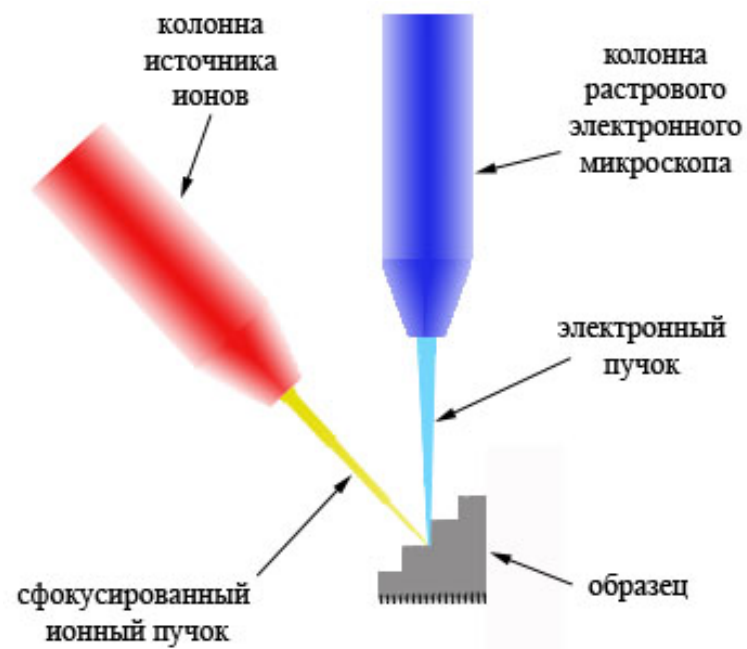
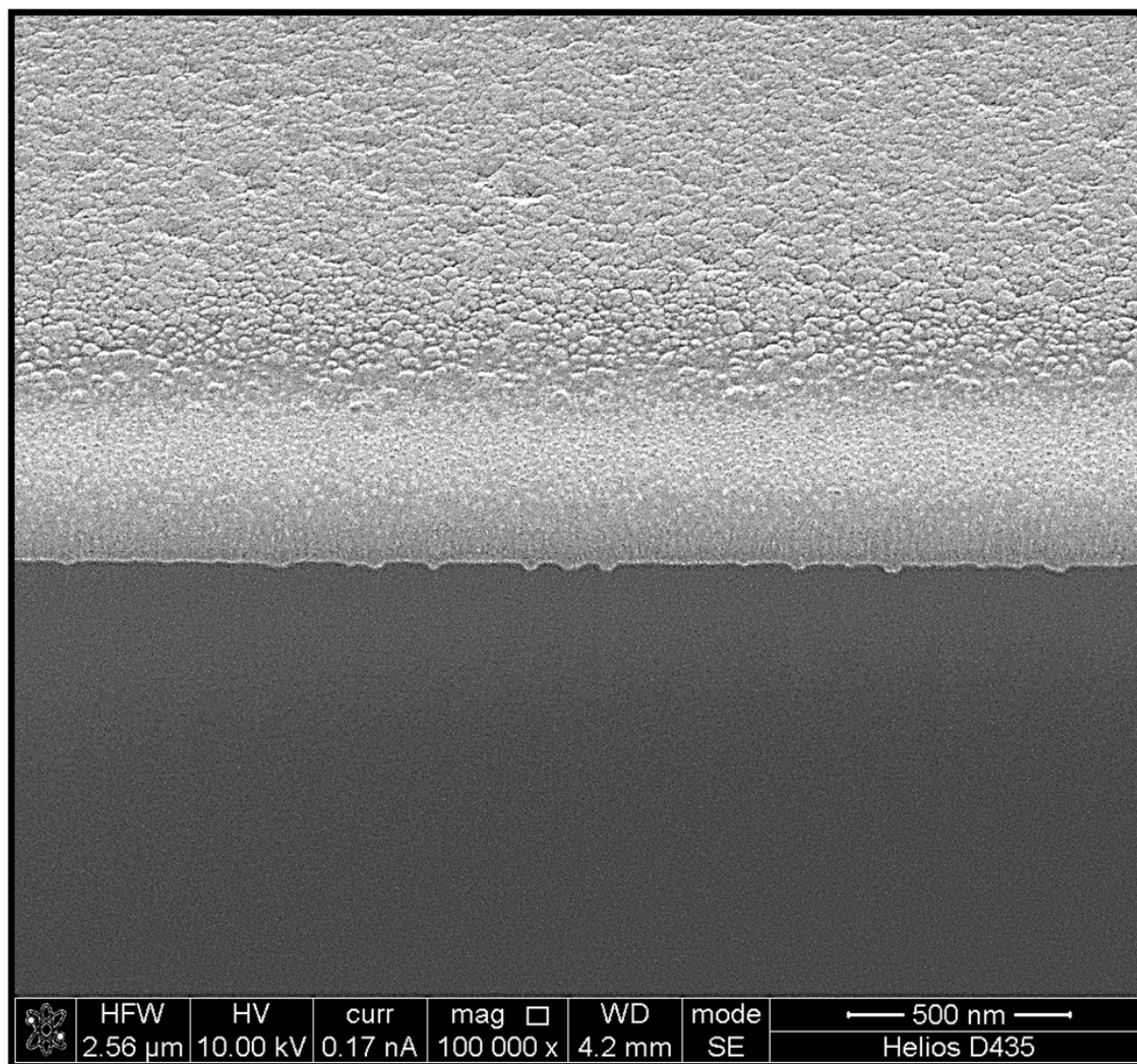
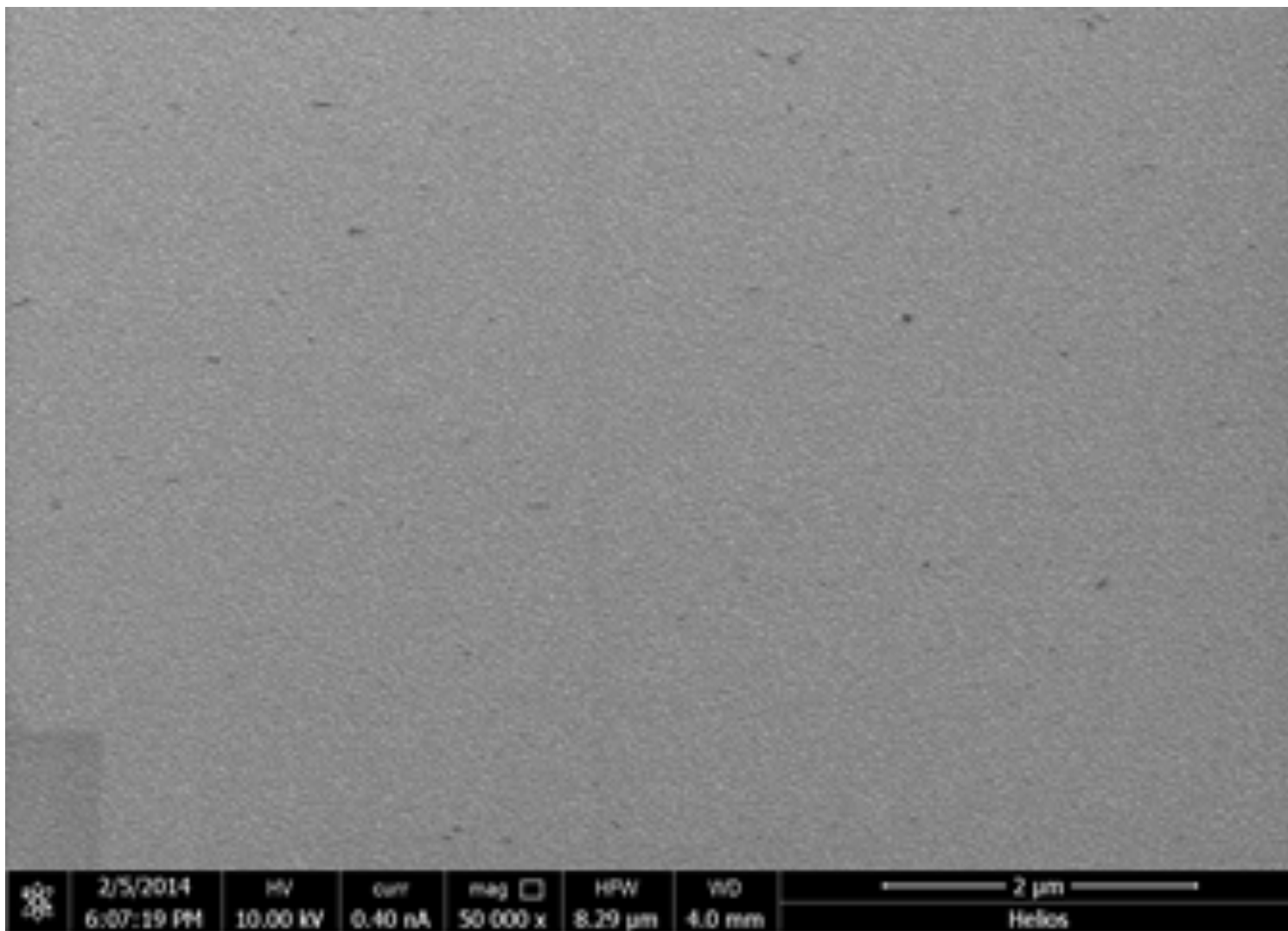


Схема получения поперечных
сечений с помощью
фокусированных ионных пучков

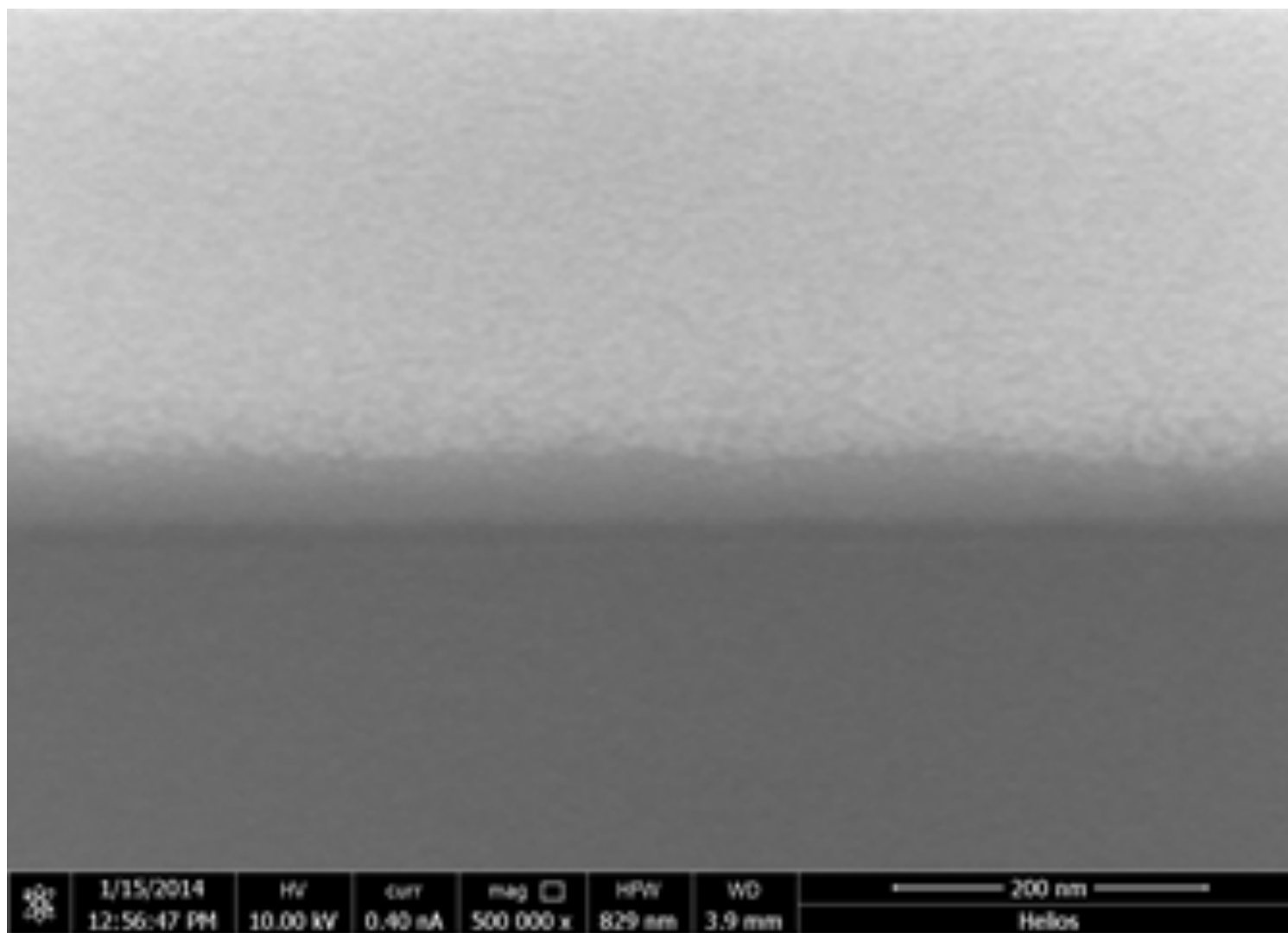
РЭМ изображение поперечного среза гетероструктуры $\text{Mg}(\text{Fe}_{0,8}\text{Ga}_{0,2})_2\text{O}_4 / \text{Si}$



Поверхность $\text{MgFe}_{1.6}\text{Ga}_{0.4}\text{O}_4$ на Si после кристаллизации в изотермическом режиме



Поперечное сечение $\text{MgFe}_{1.6}\text{Ga}_{0.4}\text{O}_4/\text{Si}$ после кристаллизации в квазиимпульсном режиме



Поверхность $\text{MgFe}_{1.6}\text{Ga}_{0.4}\text{O}_4$ на Si после кристаллизации в квазиимпульсном режиме

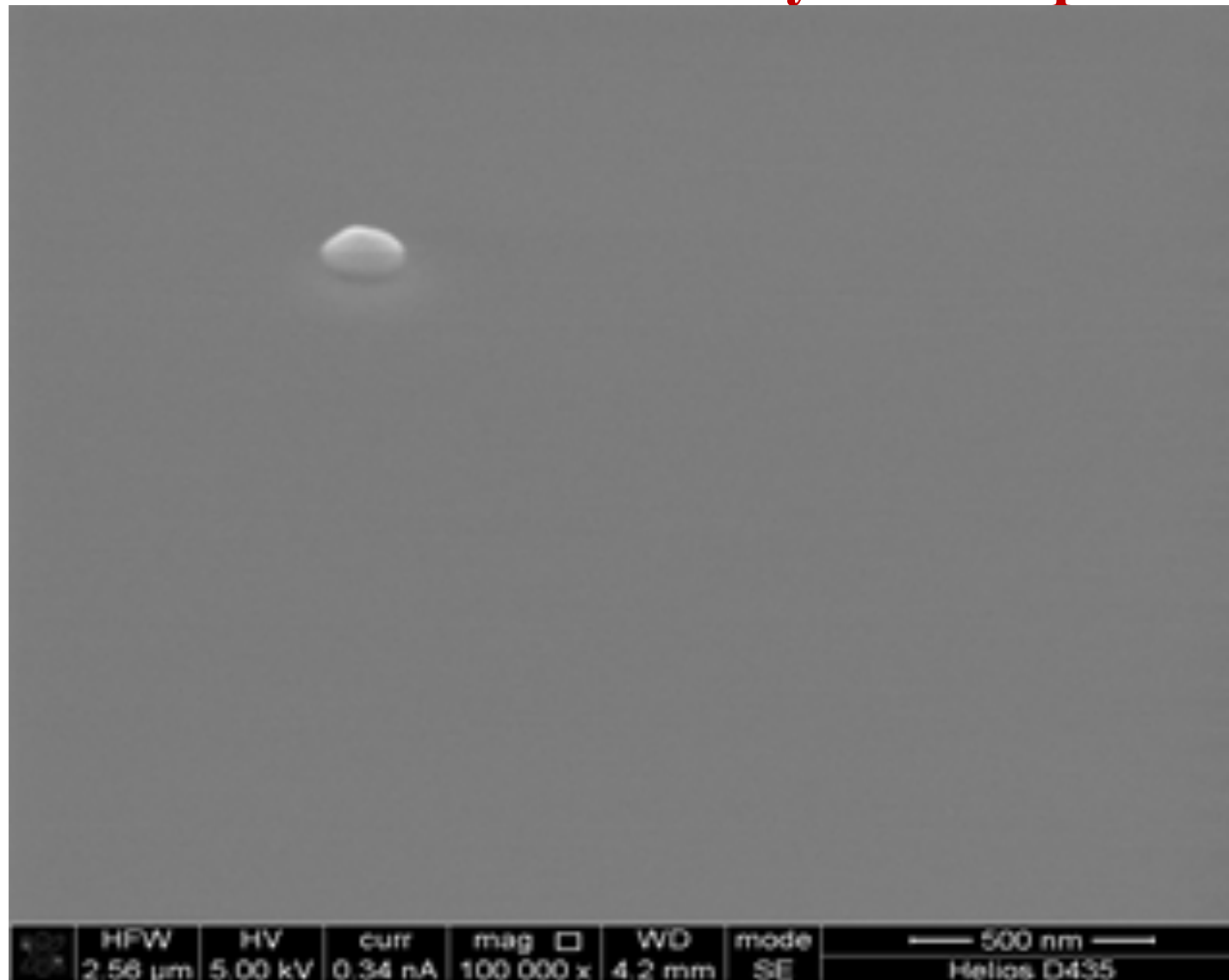
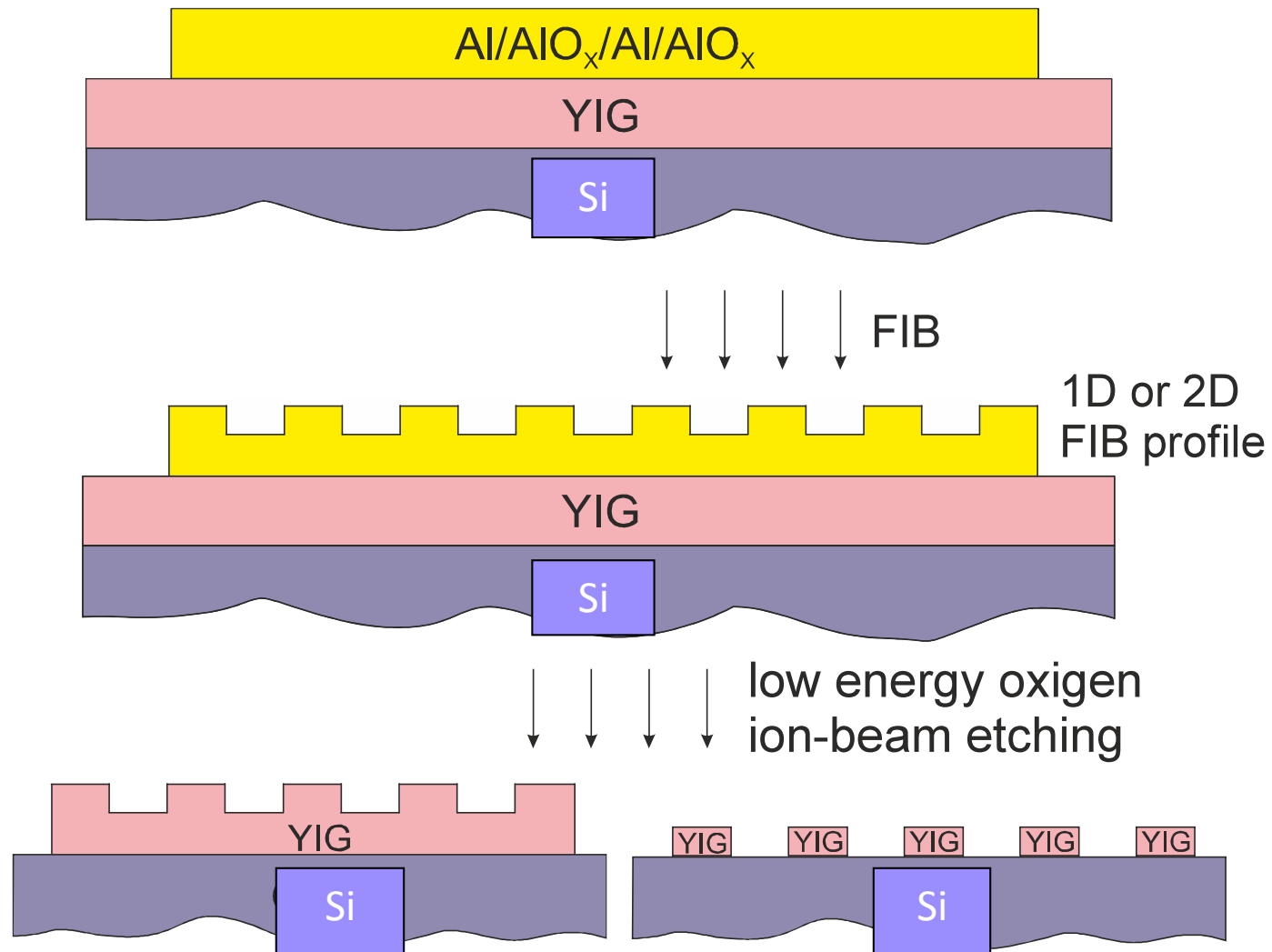
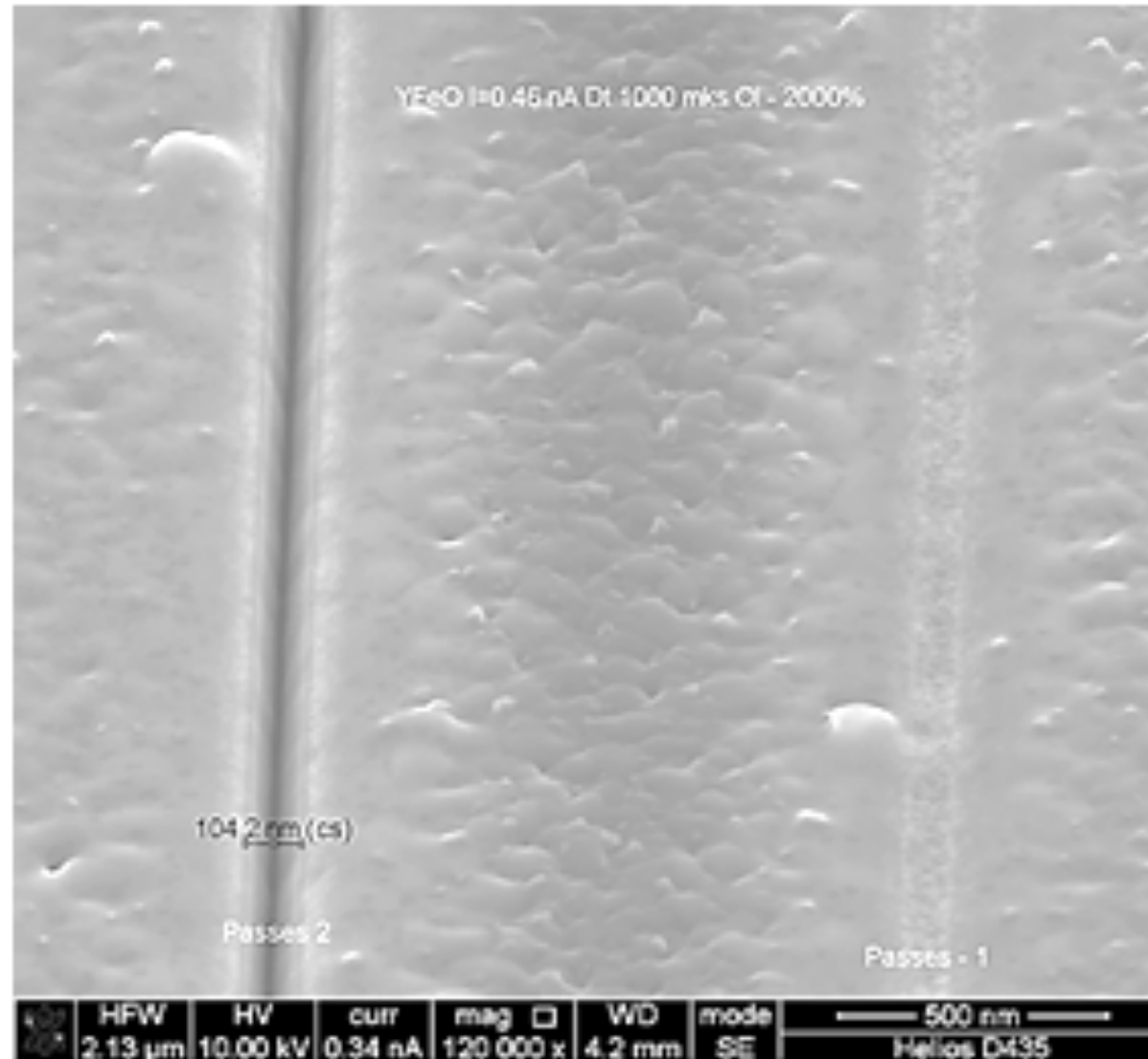


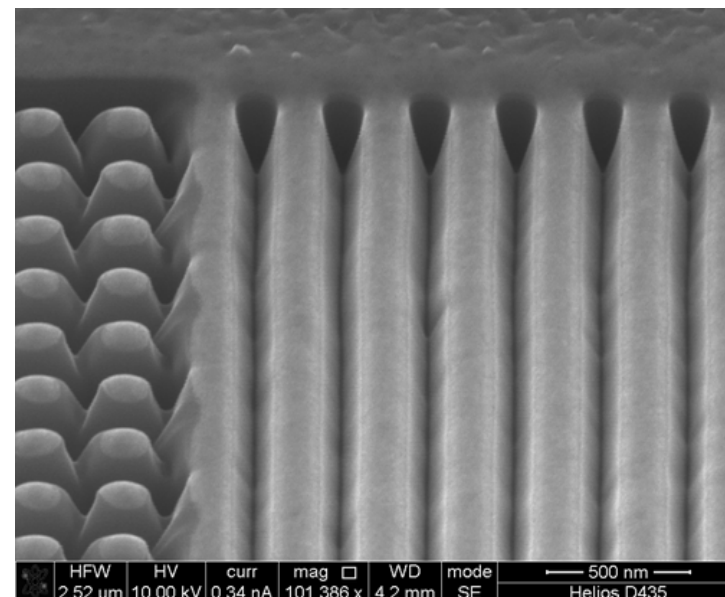
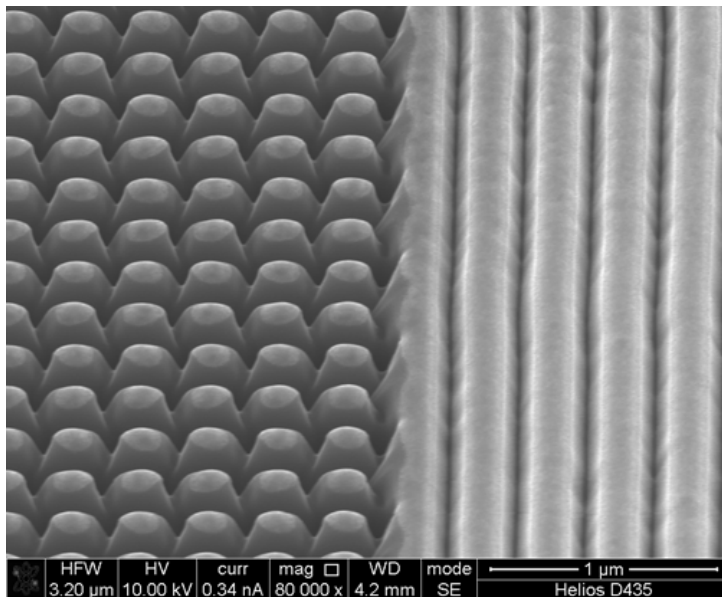
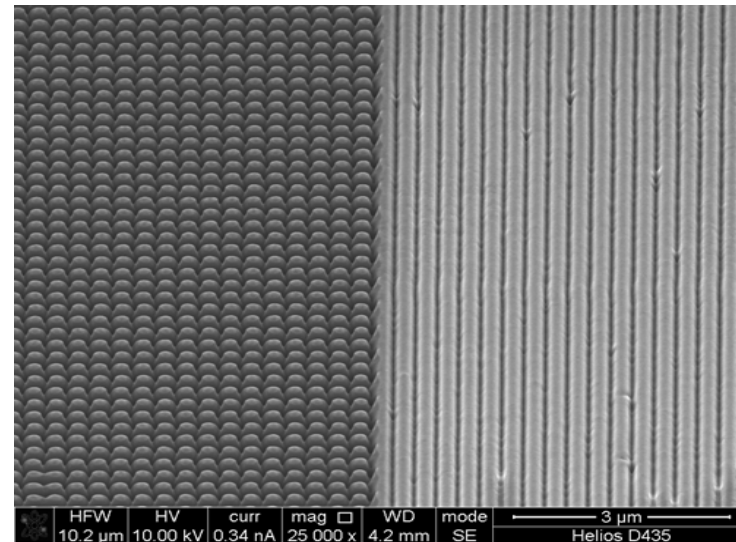
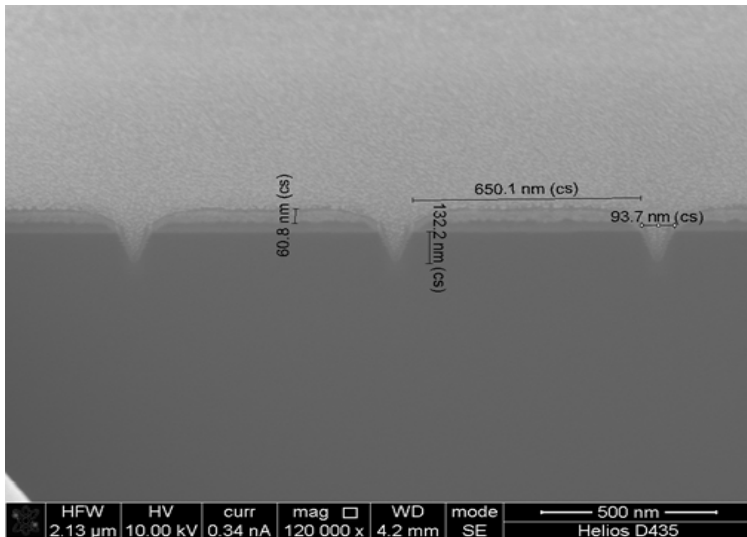
Схема процесса формирования носителей информации



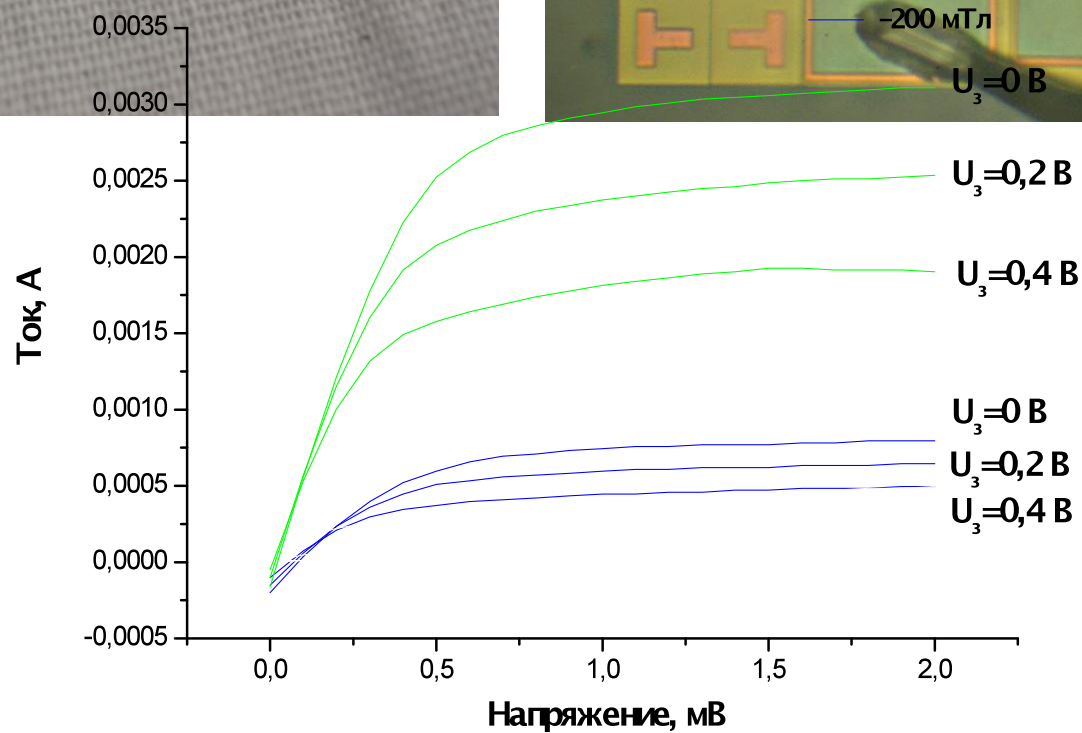
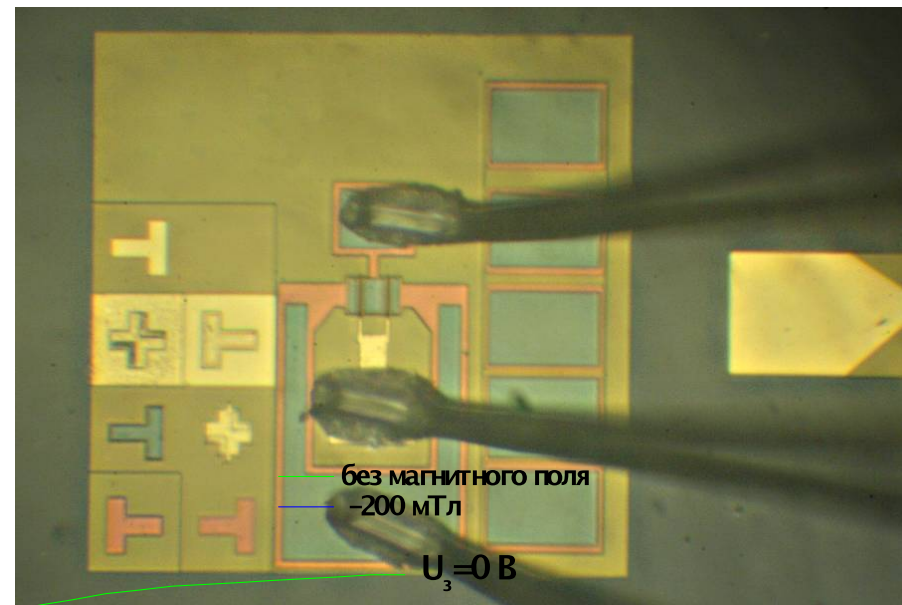
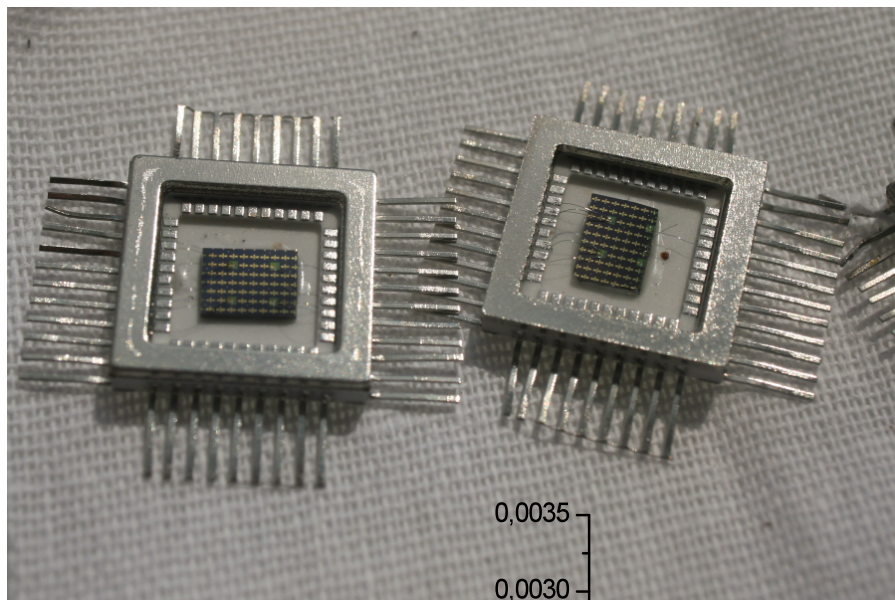
Основные стадии процесса травления структуры



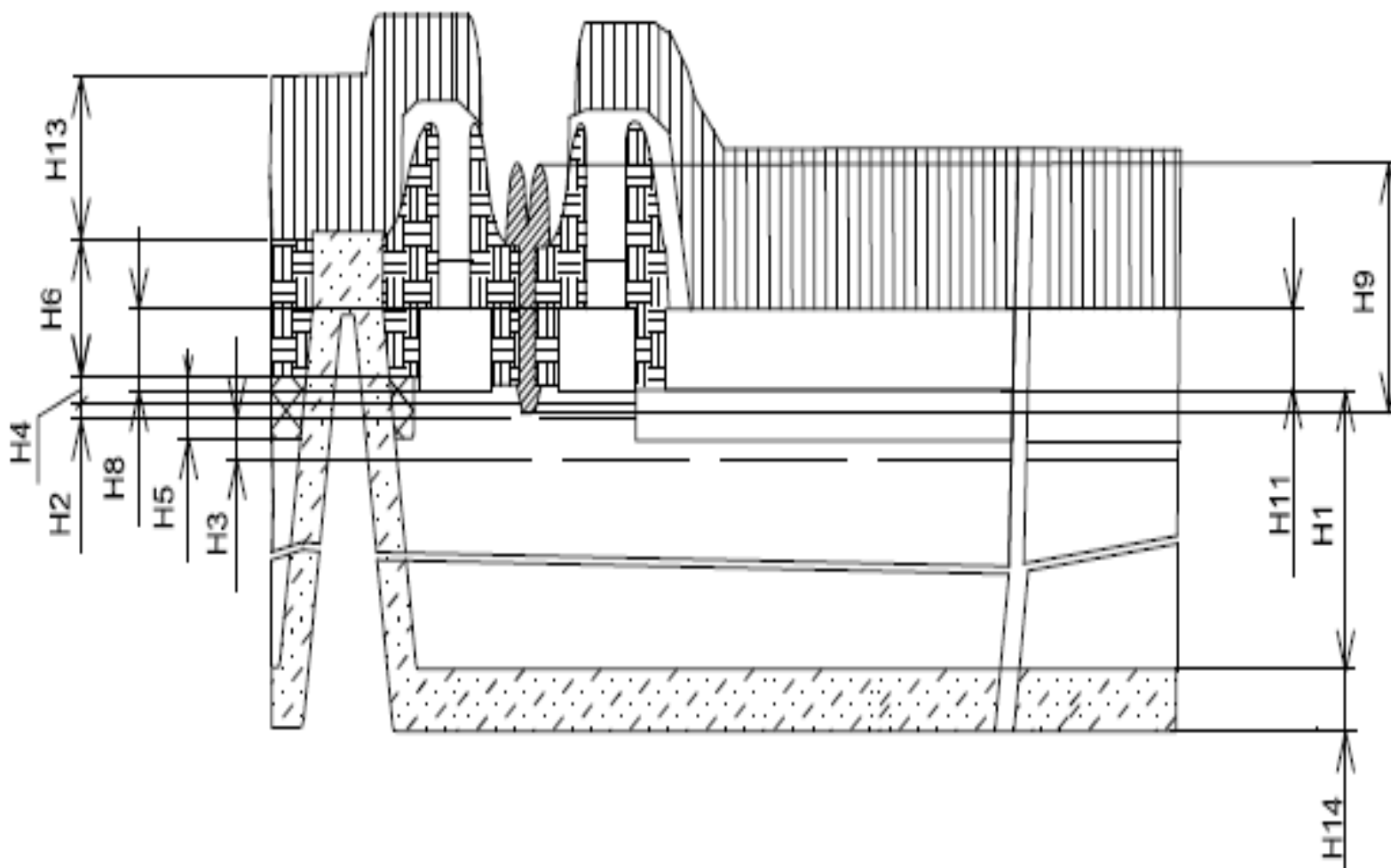
Сформированные гетероструктуры YIG/Si



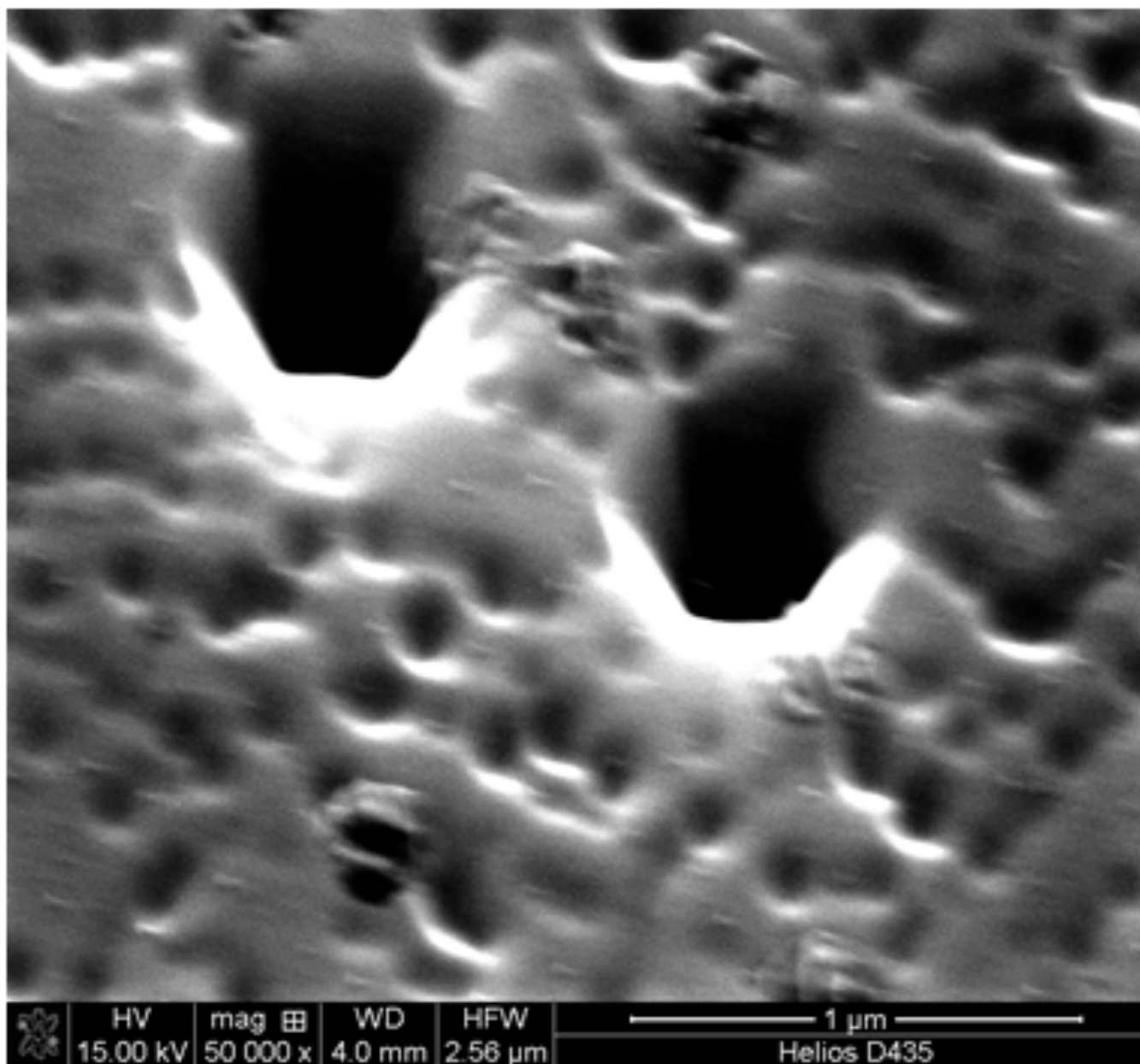
Спиновый полевой транзистор



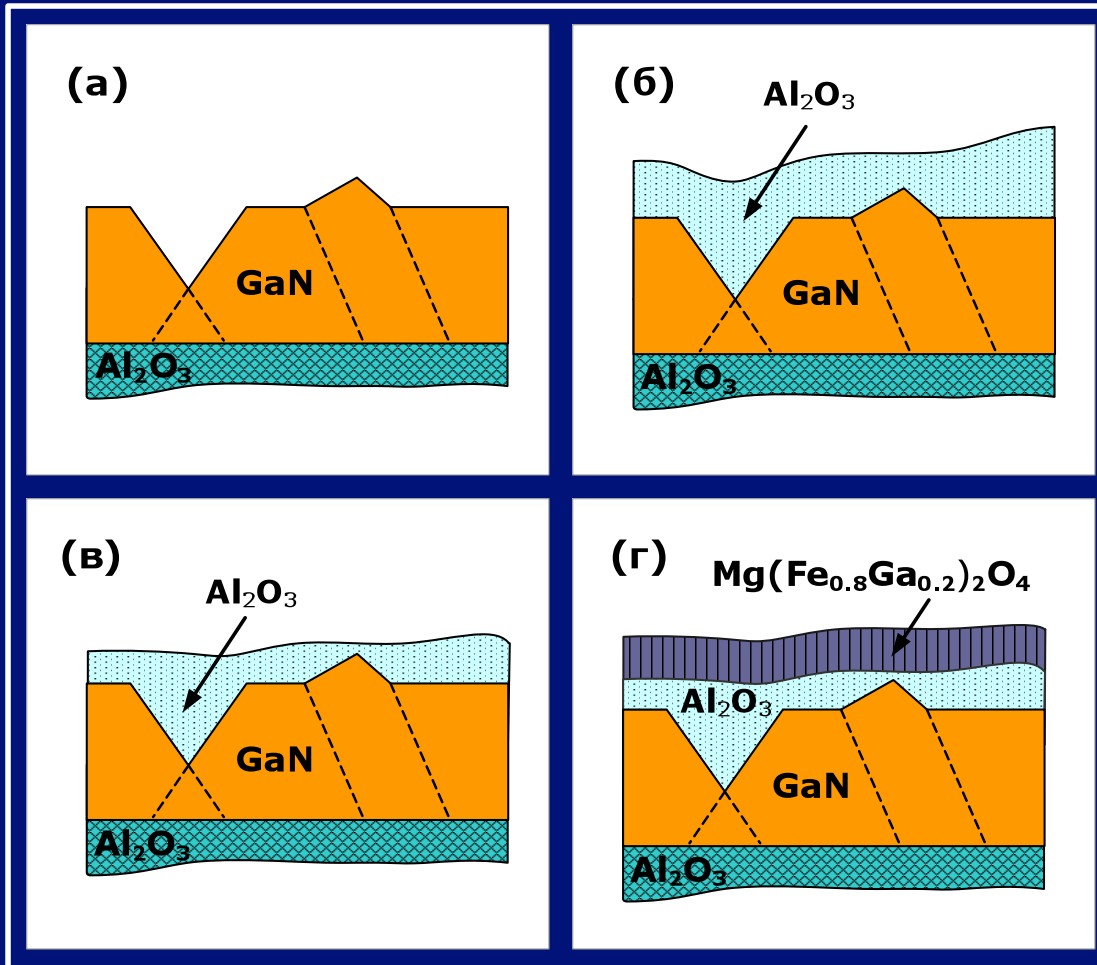
Структура транзистора на основе $\text{MgFe}_{1.6}\text{Ga}_{0.4}\text{O}_4$ в разрезе



Исходная поверхность GaN



Ионно-лучевой процесс сглаживания рельефа поверхности



Постростовое
заращивания дефектов в
эпитаксиальном слое
GaN:

а) исходное состояние
подложки;

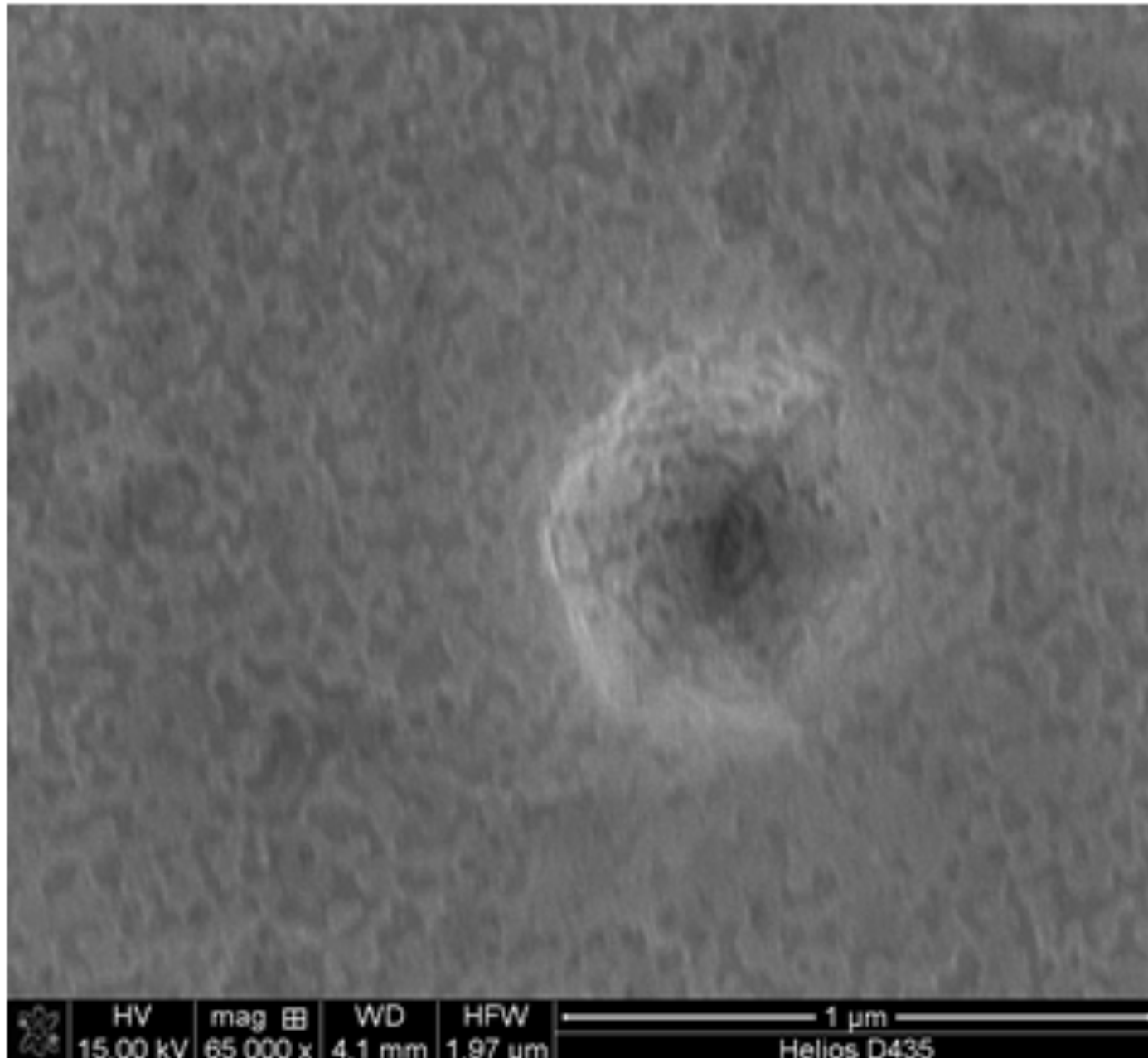
б) осаждение Al_2O_3 ;

в) распыление Al_2O_3 ;

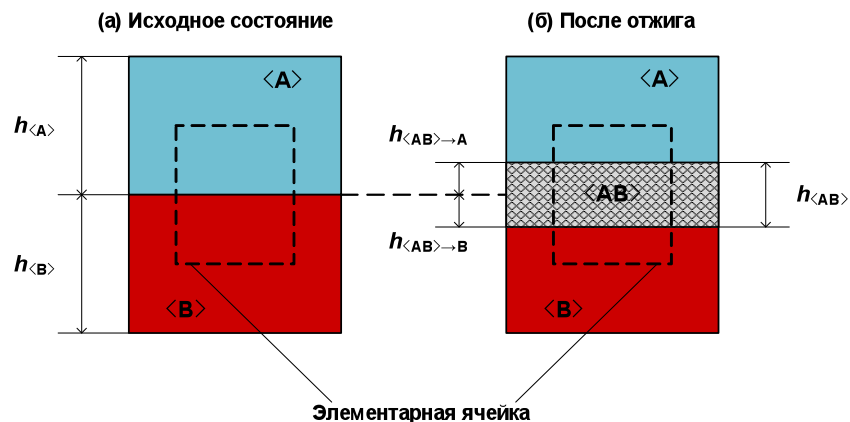
г) осаждение
 $\text{Mg}(\text{Fe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_2\text{O}_4$.

Стадии б и в
повторяются
многократно.

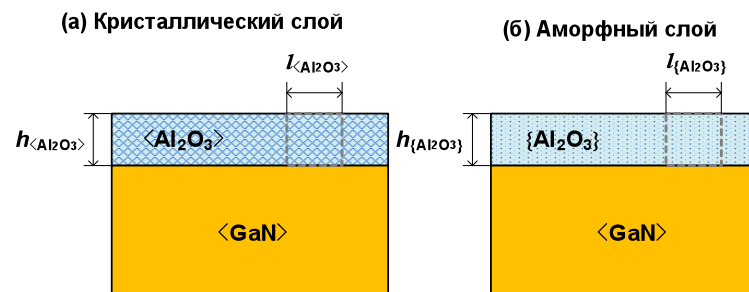
Поверхность GaN после обработки



Расчет толщины барьерного слоя $h^{cr} Al_2O_3$



Схематичное изображение межфазной границы **A/B** до (а) и после (б) образования слоя продукта.



Схематичное изображение сглаживающего слоя оксида алюминия заданной толщины (<math><10\text{ нм}</math>) на поверхности GaN:

а) однородный, аморфный слой $\{Al_2O_3\}$ заданной толщины, $h_{\{Al_2O_3\}}$;
 б) кристаллический слой $\langle Al_2O_3 \rangle$ заданной толщины, $h_{\langle Al_2O_3 \rangle}$.

Данные элементарные ячейки объемом $h_{\{Al_2O_3\}} \times l_{\{Al_2O_3\}}$ и $h_{\langle Al_2O_3 \rangle} \times l_{\langle Al_2O_3 \rangle}$ содержат одинаковое количество молей $\{Al_2O_3\}$ и $\langle Al_2O_3 \rangle$ соответственно.

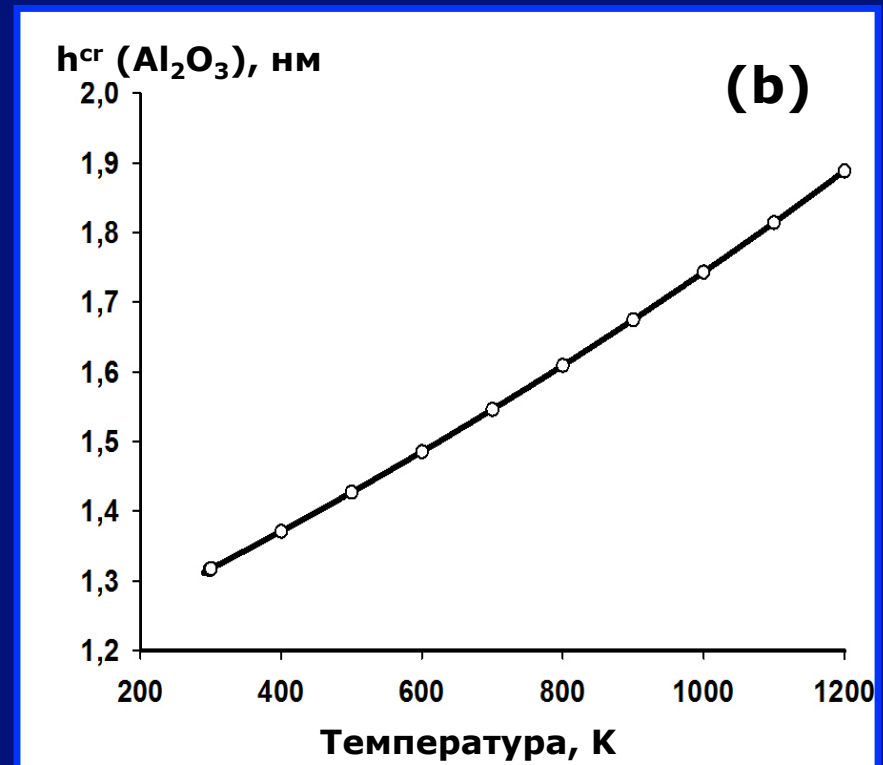
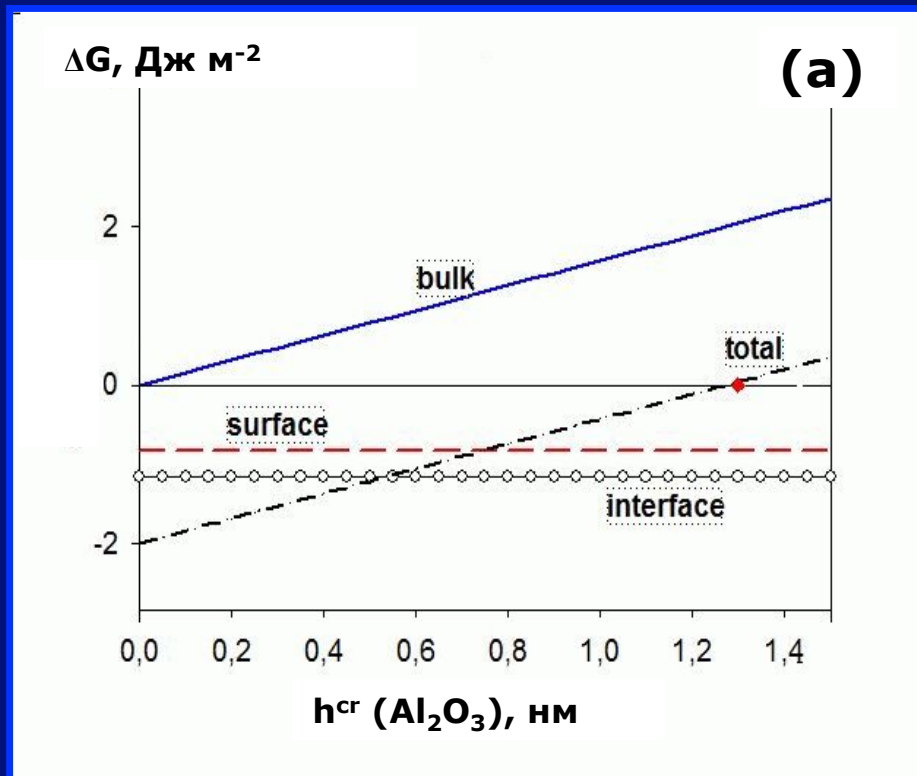
$$\Delta G^{cell} = \Delta G_{\{Al_2O_3\}}^{cell} - \Delta G_{\langle Al_2O_3 \rangle}^{cell} = h_{\{Al_2O_3\}} \cdot \left(\underbrace{\frac{\Delta G_{\{Al_2O_3\}}^f - \Delta G_{\langle Al_2O_3 \rangle}^f}{V_{\{Al_2O_3\}}}}_{\text{Энергия Гиббса объемной фазы}} \right) + \underbrace{\gamma_{\{Al_2O_3\}}^S - \chi \cdot \gamma_{\langle Al_2O_3 \rangle}^S}_{\text{Поверхностная энергия}} + \underbrace{\gamma_{\langle GaN \rangle \{Al_2O_3\}} - \chi \cdot \gamma_{\langle GaN \rangle \langle Al_2O_3 \rangle}}_{\text{Межфазная энергия}}$$

$$\Delta G^{cell} = \Delta G_{\{Al_2O_3\}}^{cell} - \Delta G_{\langle Al_2O_3 \rangle}^{cell} = 0 \Rightarrow h_{\{Al_2O_3\}}^{cr}$$

$$\Delta G^{cell} = \Delta G_{\{Al_2O_3\}}^{cell} - \Delta G_{\langle Al_2O_3 \rangle}^{cell} > 0 \Rightarrow \text{кристаллический слой}$$

$$\Delta G^{cell} = \Delta G_{\{Al_2O_3\}}^{cell} - \Delta G_{\langle Al_2O_3 \rangle}^{cell} < 0 \Rightarrow \text{аморфный слой}$$

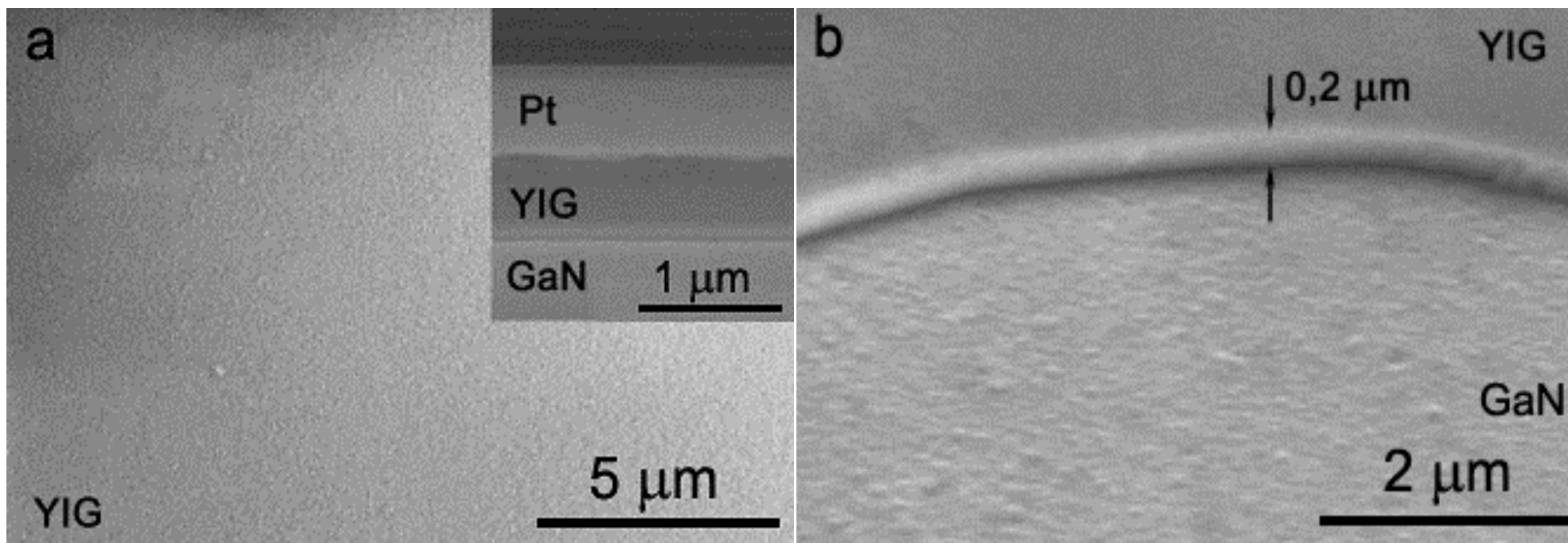
Расчет толщины барьерного слоя Al_2O_3



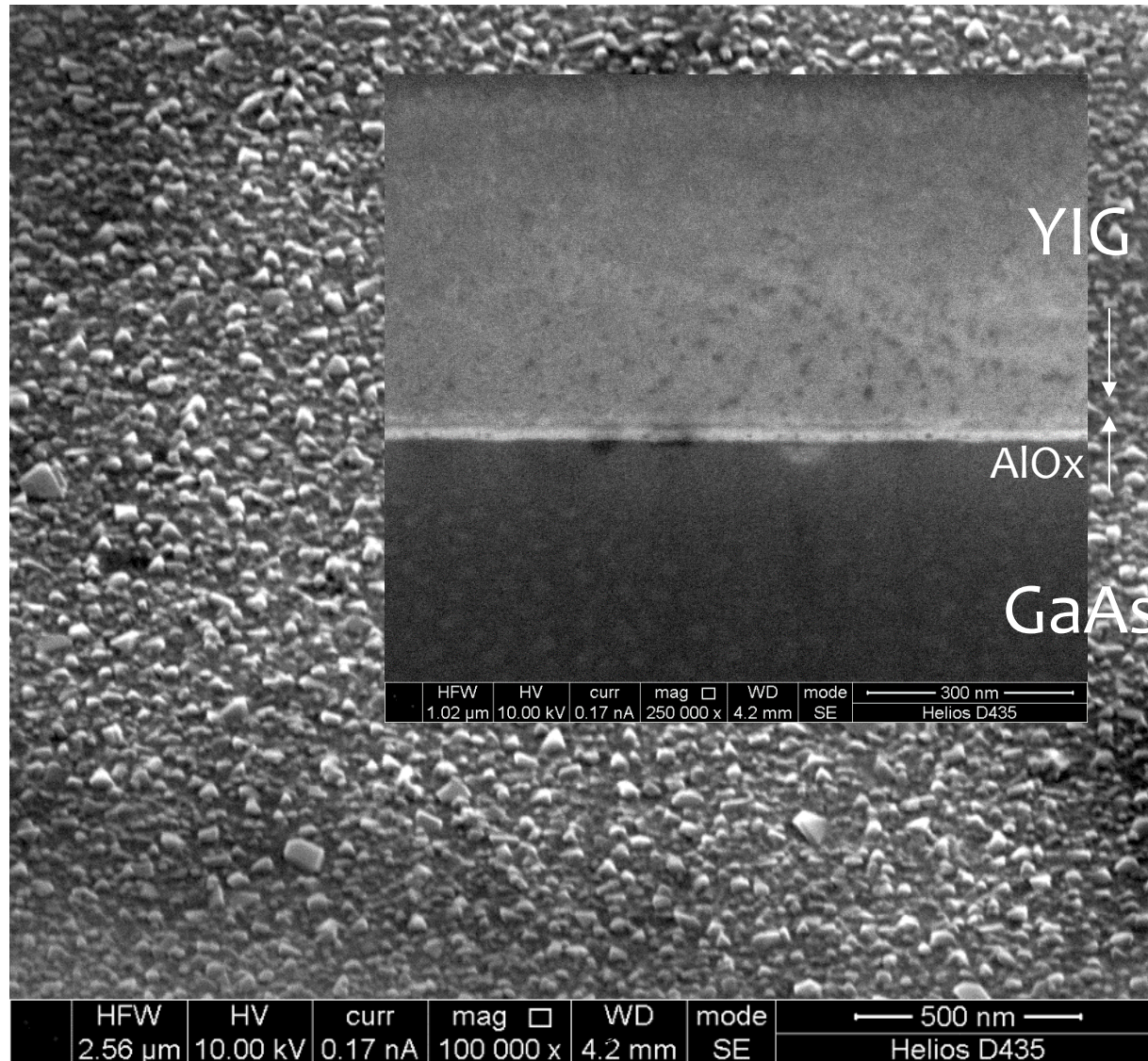
(а): Зависимость полной, объемной свободной энергии, а также поверхностной ("surface") и межфазной энергий ("interface") Гиббса от толщины барьерного слоя $h^{cr}(\text{Al}_2\text{O}_3)$;

(б): Зависимость толщины барьерного слоя $h^{cr}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ от температуры T

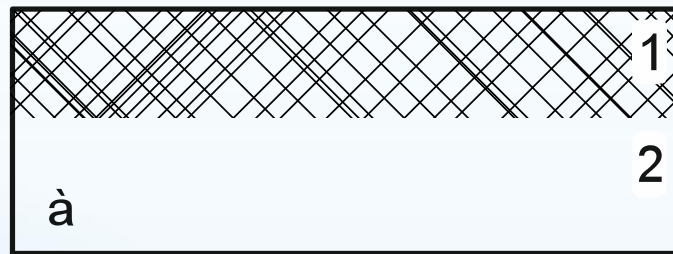
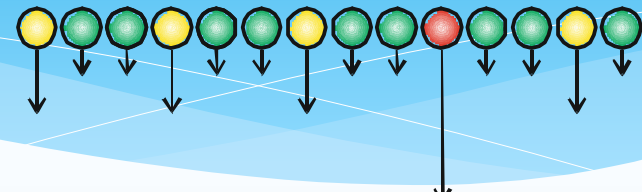
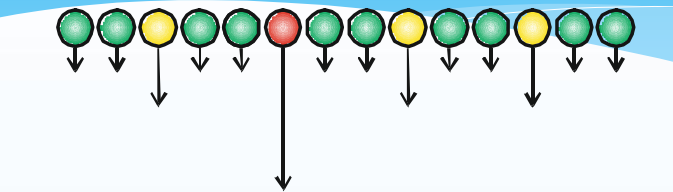
Структура YIG/GaN



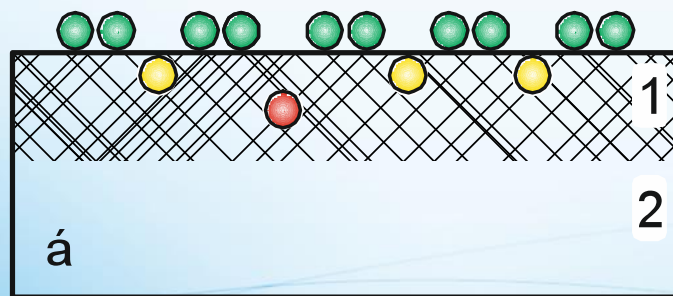
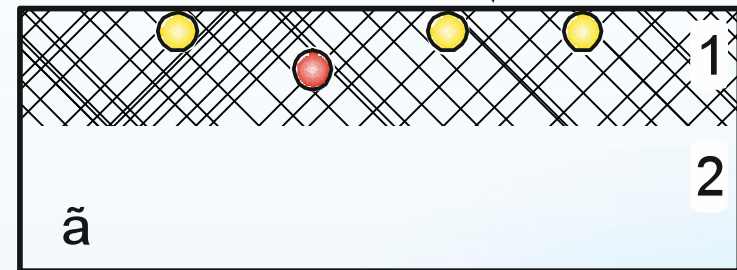
Y₃Fe₅O₁₂ на GaAs



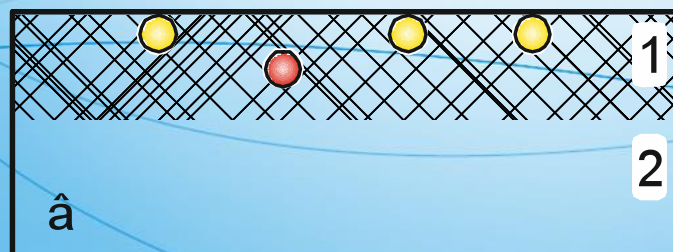
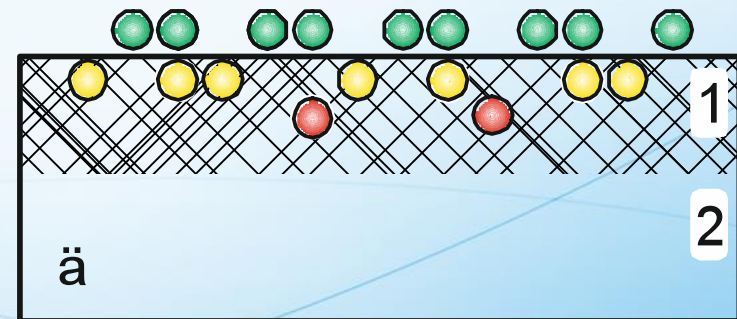
Адгезия золота – повторное осаждение



3 nm



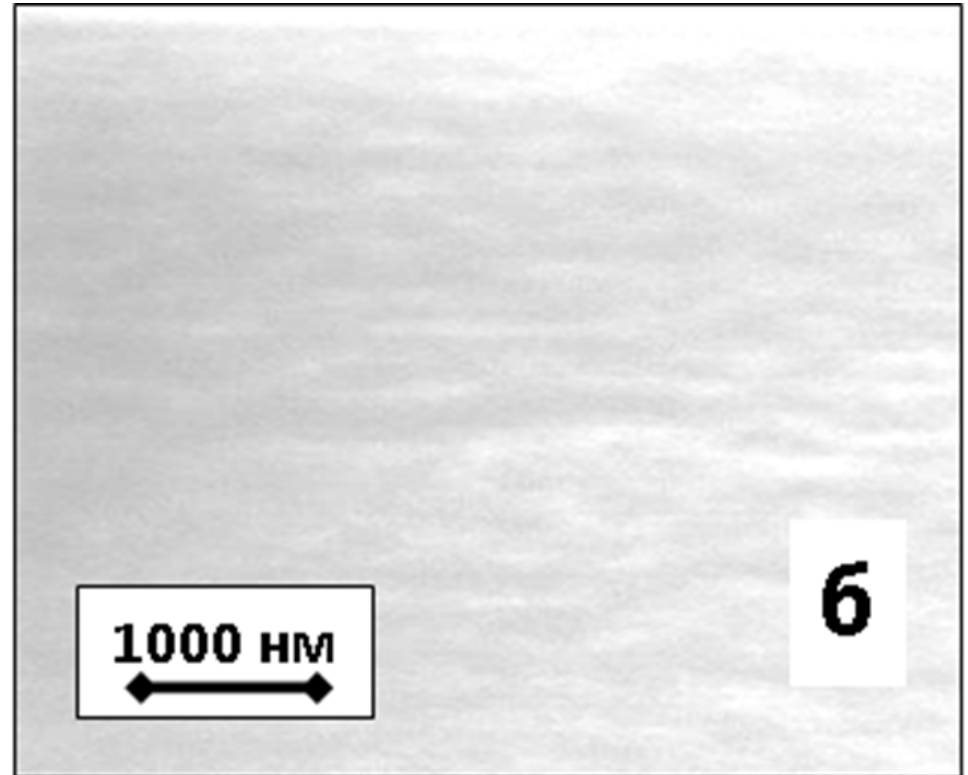
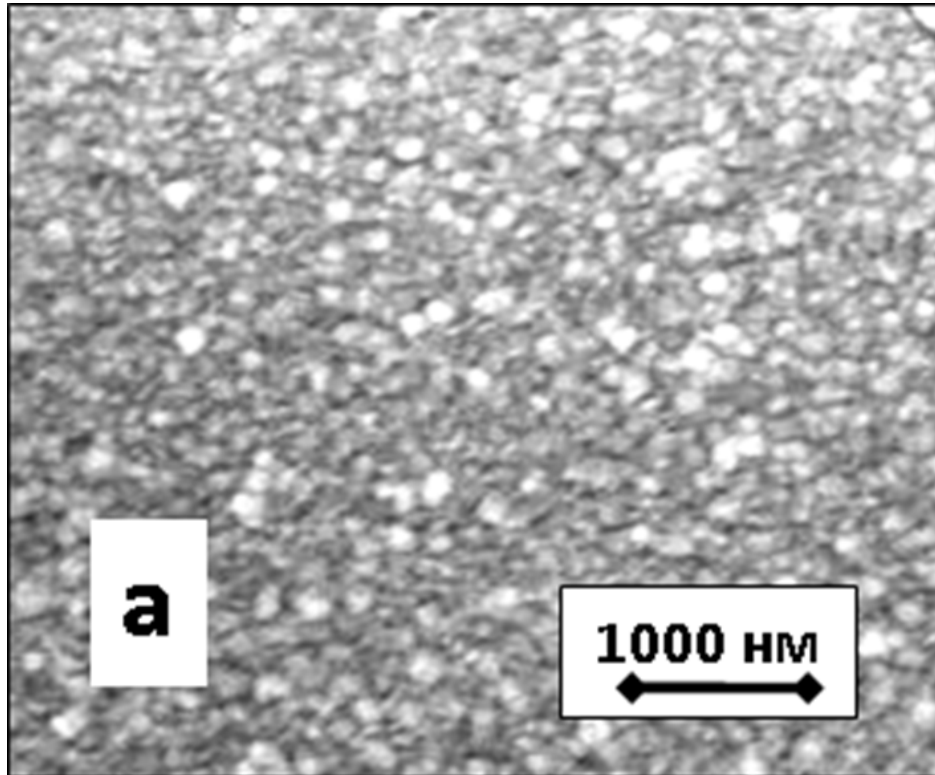
3 nm



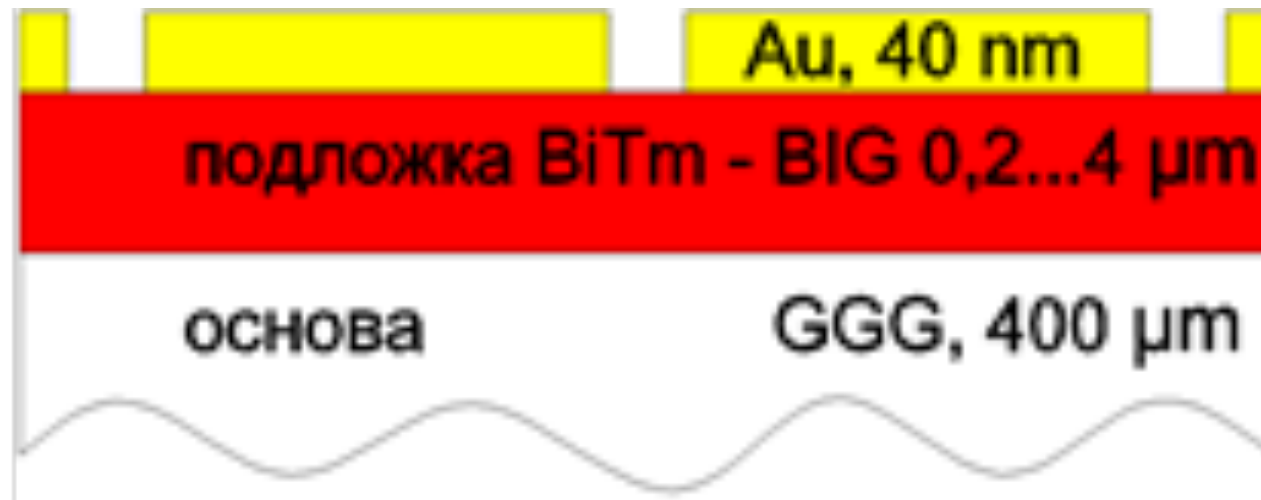
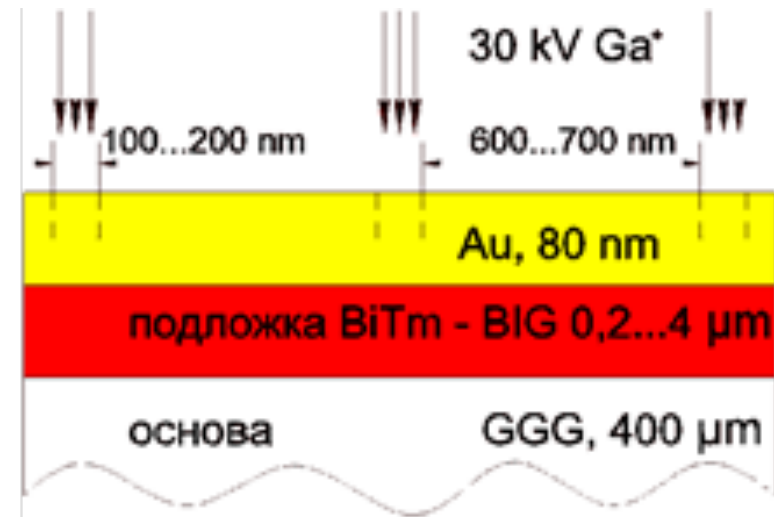
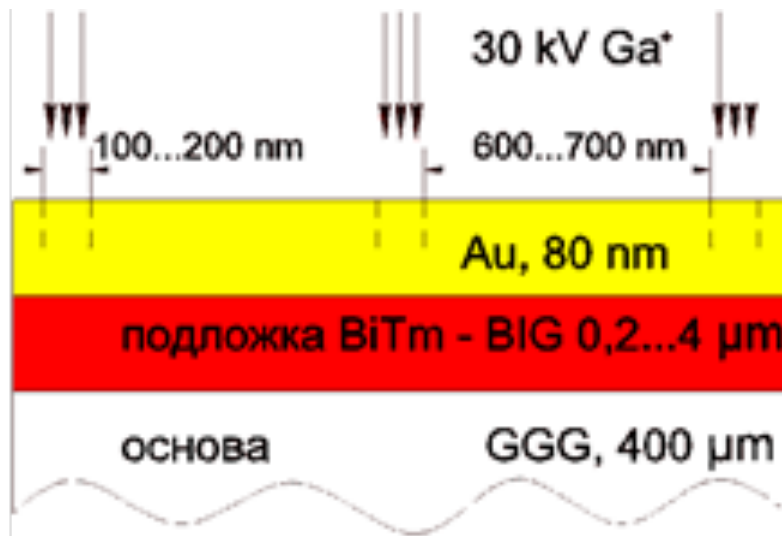
3 nm

Поток Au {
 ● - 2 эВ >80%
 ● - 5 эВ <15%
 ● - 12 эВ <5%

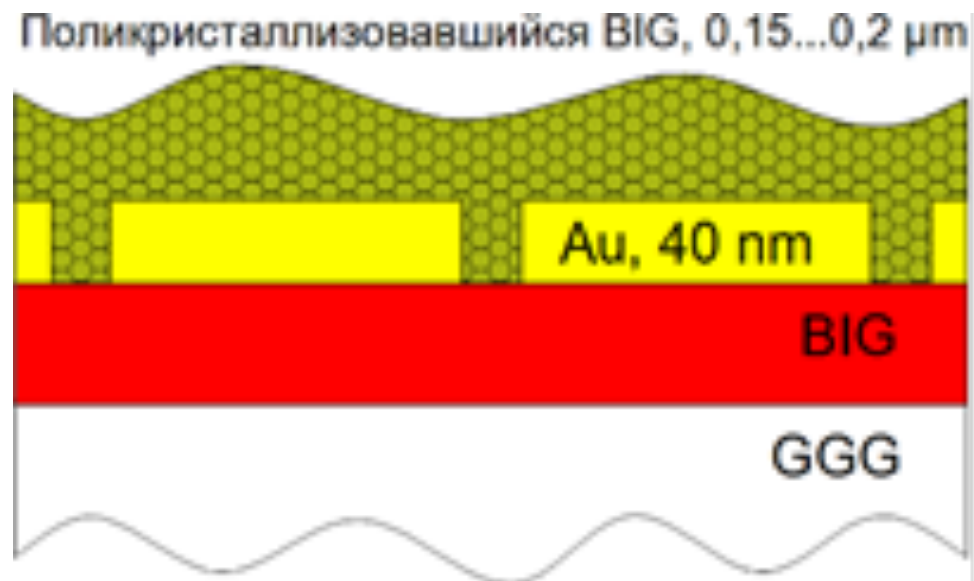
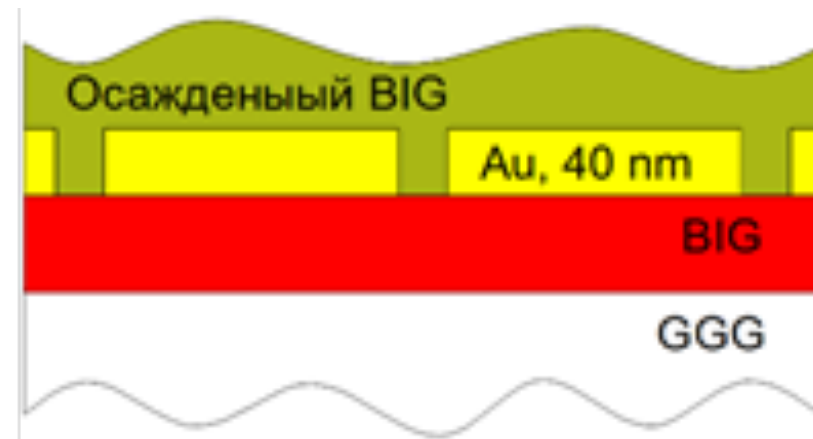
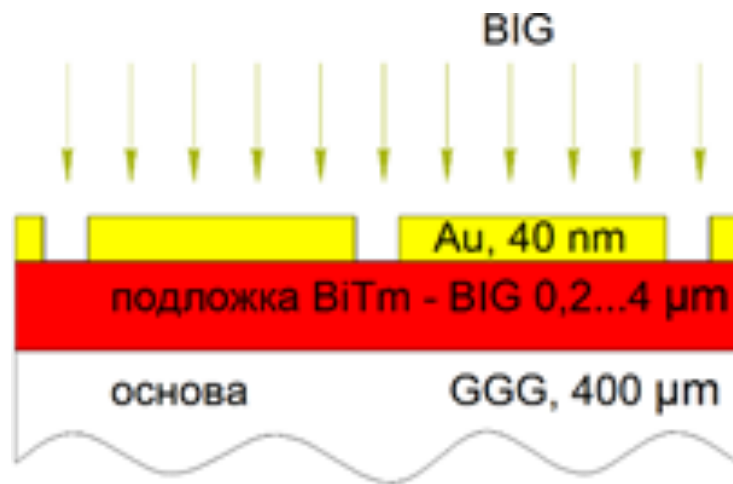
Изображение прозрачной пленки золота на ЖИГ



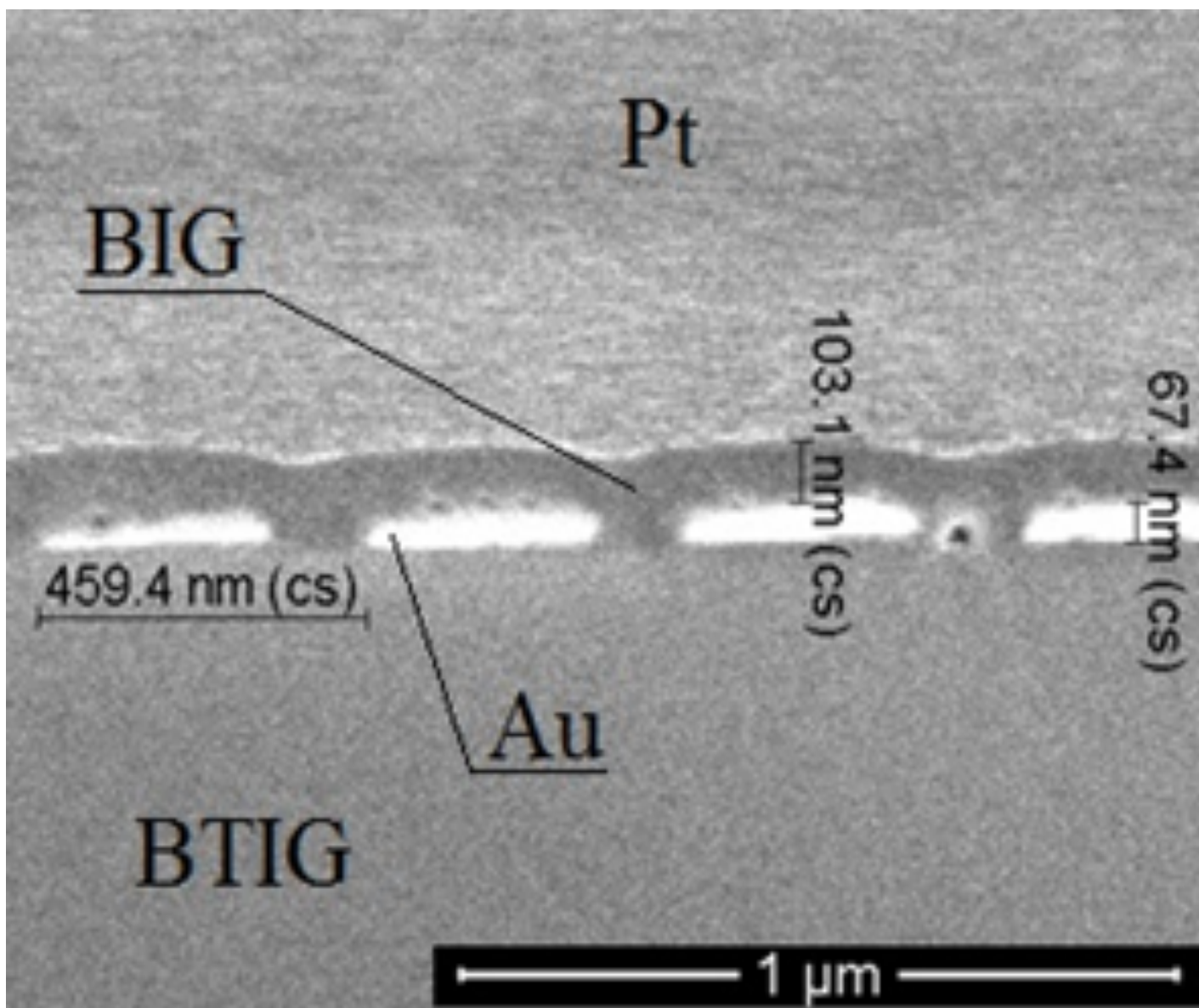
Основные процессы синтеза МПК



Основные процессы капсуляции МПК

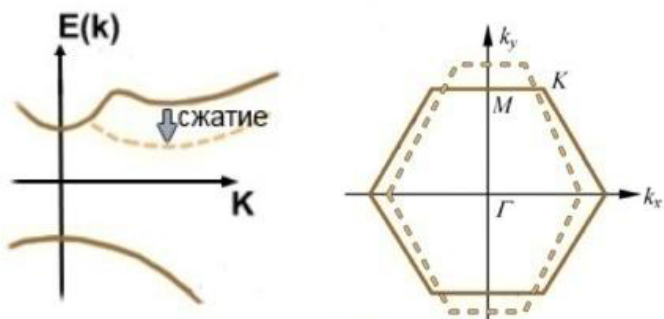


Поперечное сечение капсулированного МПК

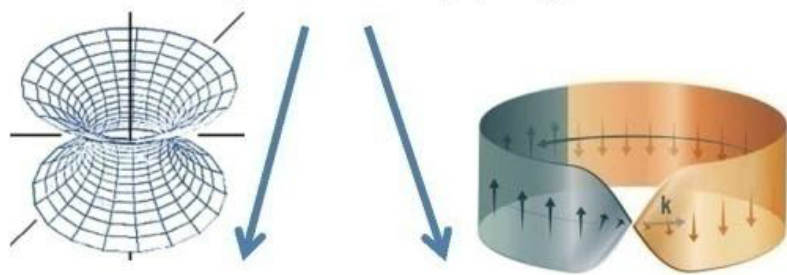


Стрейнтроника

Стрейнтроника полупроводников и 2D материалов



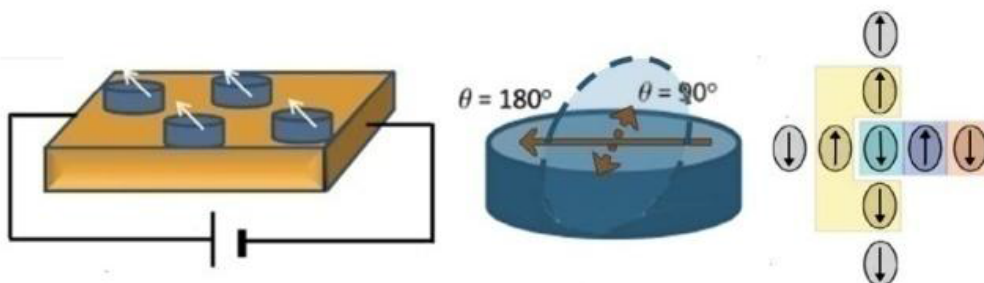
Механическая модификация электронной структуры



Физ. моделирование ОТО

Геометрическая фаза, топология

Магнитная стрейнтроника

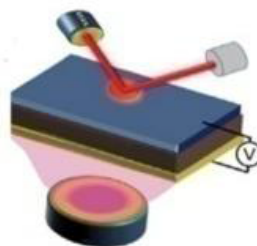


Устройства магнитной памяти

Магнитные логические схемы

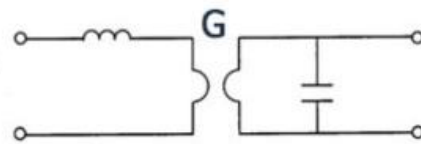
Гибридная спинтроника-стрейнтроника

Фото-стрейнтроника (light mediated)



Новые электр. компоненты

$$d\varphi = Tdq$$



Нейроморфная стрейнтроника

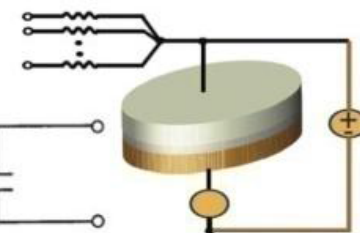
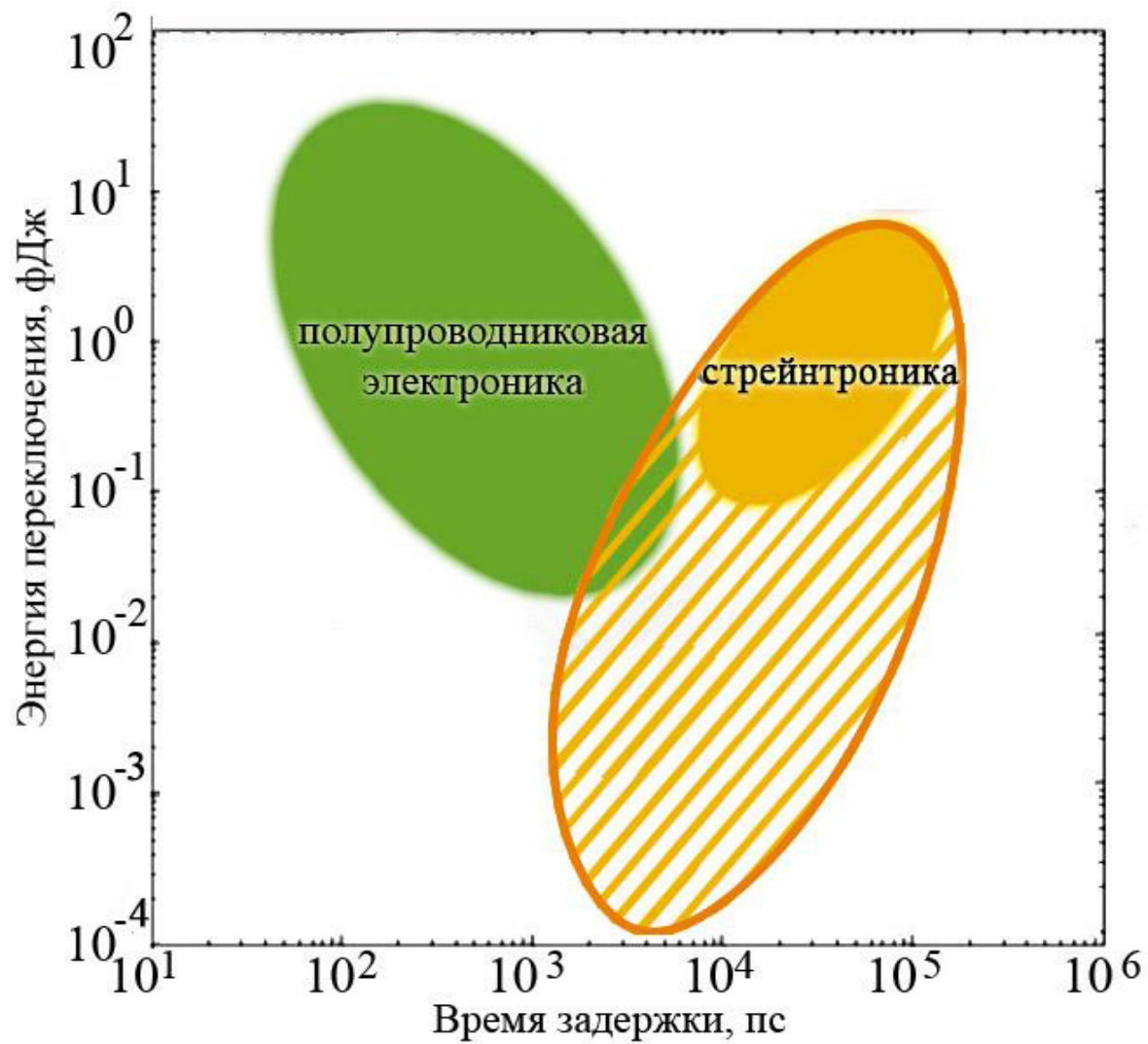
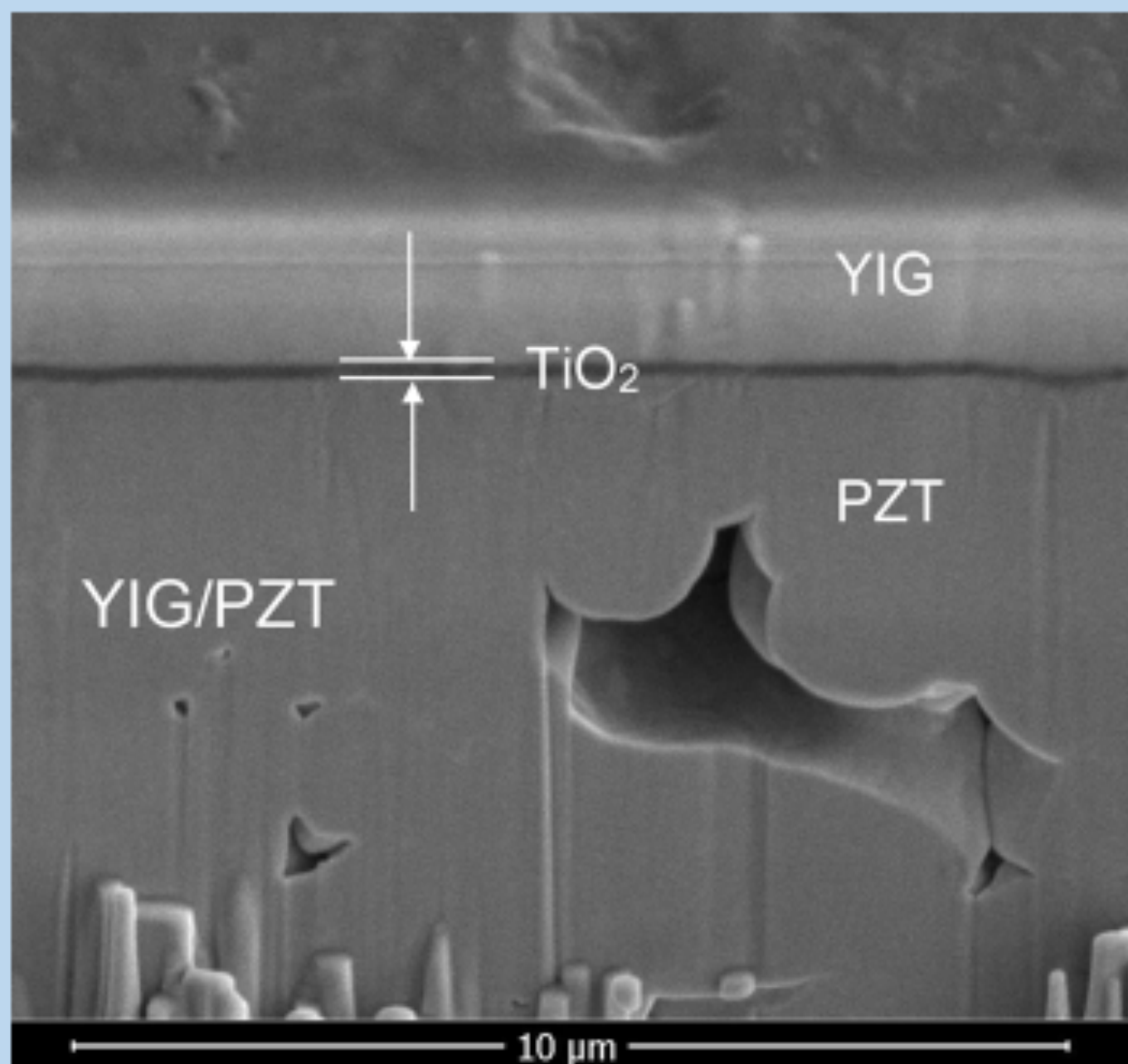


Диаграмма «рассеиваемая энергия переключения – время задержки»

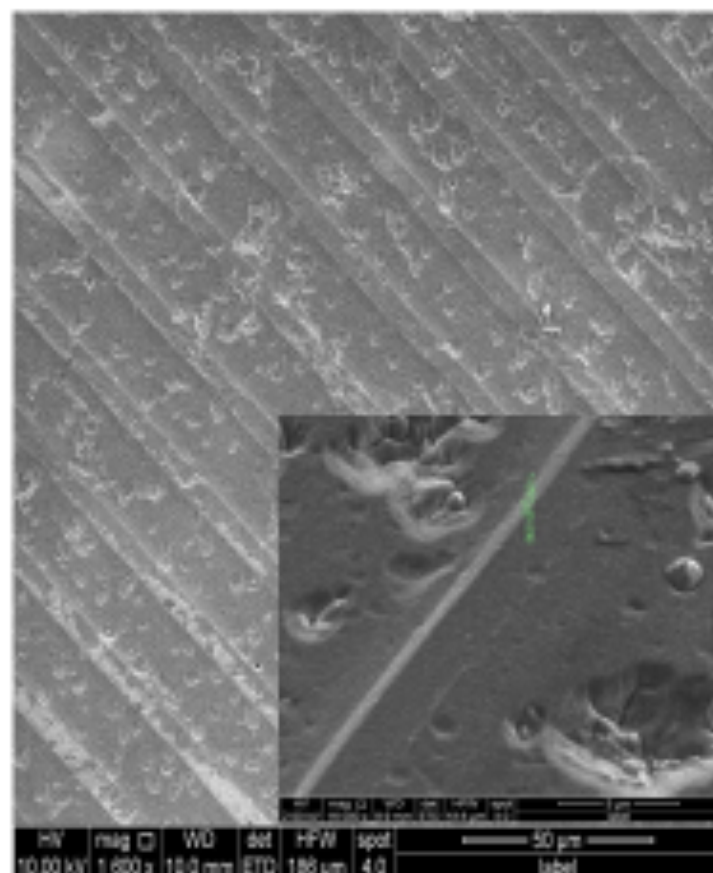


SEM cross section of YIG/TiO_x/PZT

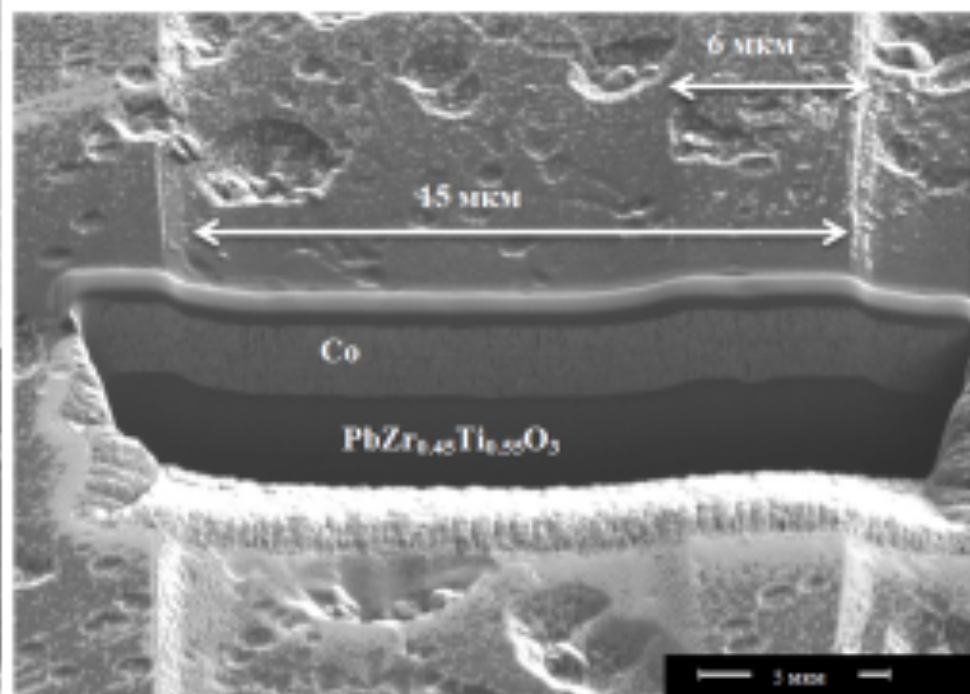


Пленка Co на профилированной поверхности PZT

6



Общий вид гетероструктуры Co/PZT с профилированной поверхностью PZT подложки.



Поперечное сечение гетероструктуры Co/PZT с профилированной поверхностью PZT подложки.

Стрейтроника: механический контакт пленки YIG с керамикой PZT. Нет перспективы развития.

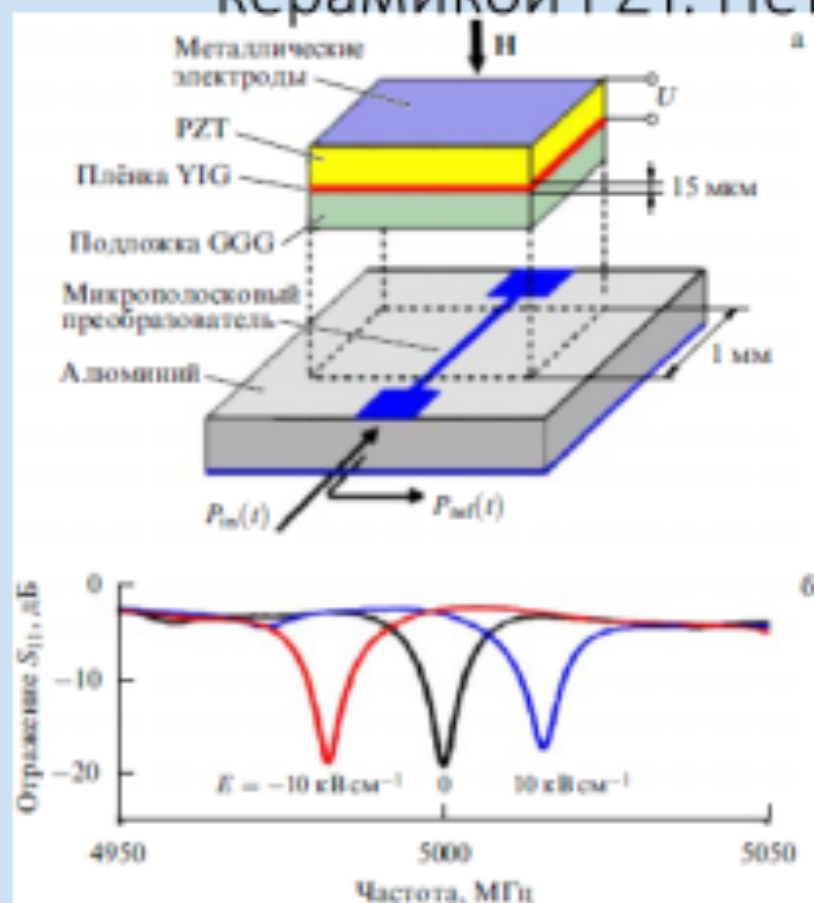


Рис. 1. СВЧ-резонатор на основе YIG - PZT-структуры, перестраиваемый магнитным и электрическим полями. (а) Схема устройства; GGG - гадолиний-галлиевый гранат. (б) Смещение линии ферромагнитного резонанса под действием электрических полей различной полярности.

Одно из перспективных направлений магнитной стрейтроники - электрически управляемые устройства СВЧ-диапазона. Принцип их действия основан на индуцированном в ФМ-слое эффективном поле магнитной анизотропии с помощью деформаций, созданных ПЭ-слоем. Поле одноосной анизотропии может приводить к существенному изменению ориентации намагниченности магнитного слоя и, как следствие, к управляемому сдвигу частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) структуры. На рисунке изображён СВЧ-резонатор/фильтр, перестраиваемый по частоте магнитным и электрическим полями. Резонатор содержит пластину PZT, к которой **приклеена** эпитаксиальная плёнка железиттриевого граната (YIG). Структура помещена в поле H , направленное перпендикулярно её плоскости. С помощью микрополоскового преобразователя в плёнке YIG возбуждают ФМР на частоте $f = \gamma(H - 4\pi M)$, где $\gamma = 2,8$ МГц Э-1 и $4\pi M = 1750$ Гс - гиромагнитное отношение и намагниченность YIG. PZT-пластина при приложении электрического напряжения к её электродам деформируется, эта деформация передаётся YIG-плёнке, что приводит к изменению поля анизотропии и сдвигу частоты ФМР. Одновременно этот резонатор можно перестраивать (но достаточно медленно) в широком диапазоне частот 2 - 10 ГГц, изменяя внешнее намагничивающее поле H .

Стрейтроника: механический контакт 1D магнонного кристалла YIG с керамикой PZT. Где клей и где контакт?

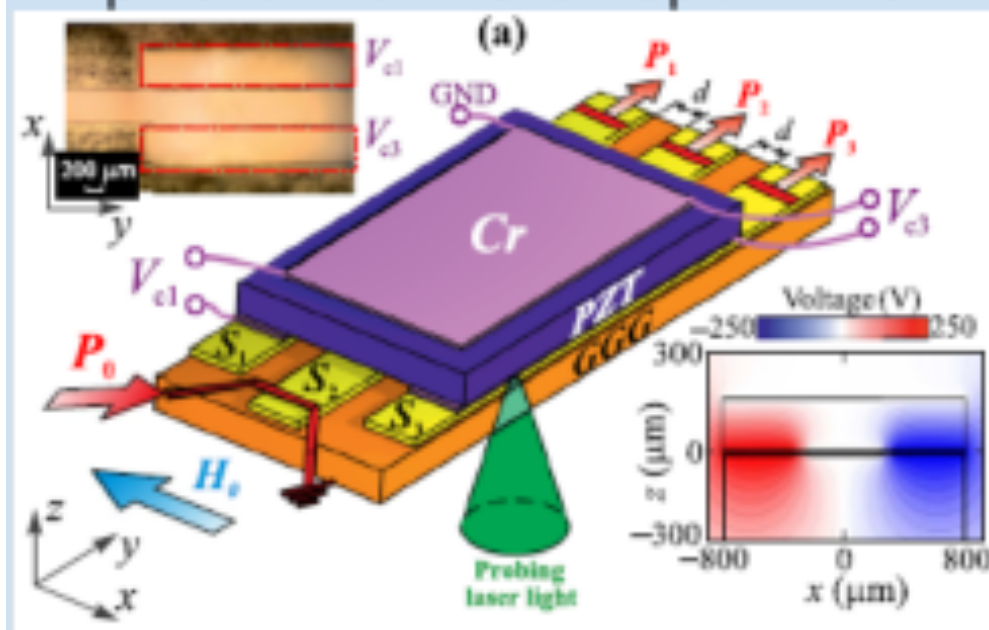


Рис. 2 Микрофотография изготовленных полос YIG. Красные пунктирные прямоугольники обозначают электроды.

Комбинация деформации и спин-волновой связи может лежать в основе новой ветви функциональной магноники - магнон-стрейтроники. Таким образом, управляемая напряжением спиновая волна может потенциально использоваться для логических схем на основе спиновых волн с малым рассеиванием и элементов памяти.

Структура, описанная в работе [2] состоит из трех полос YIG толщиной 10 мкм, шириной 500 мкм, помещенных на подложку GGG толщиной 500 мкм. Намагниченность насыщения YIG составляет $M=139$ Гс. На рисунке эти полосы обозначены S1, S2 и S3.

Хромовый (Cr) электрод толщиной 500 нм был нанесен на поверхность пьезоэлектрика из титаната цирконата свинца (PZT). Из-за достаточно толстого слоя PZT верхний электрод не влияет на распространение спиновых волн в YIG. Чтобы пренебречь влиянием металлического слоя на динамику спиновых волн, на другой стороне PZT были нанесены два Cr-электрода толщиной 50 нм. Механическая связь полос PZT и YIG была достигнута с использованием термоотвержденного двухкомпонентного **эпоксидного клея**. В работе показано, что такая композитная магнон-стрейтронная структура дает возможность для изготовления магноновых платформ для энергоэффективной обработки сигналов.

Спасибо за внимание

