

РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Введение в электронную микроскопию

1. История развития и назначение растровой электронной микроскопии
2. Принципы работы растрового электронного микроскопа (РЭМ)
3. Устройство РЭМ:
 1. Электронная пушка
 2. Осветительная система
 3. Фокусирующая система
 4. Отклоняющая система и стигматор
 5. Детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов (ВЭ и ОРЭ)

История электронной и зондовой микроскопии

1931 г. Первый просвечивающий электронный микроскоп, Э. Руска и М. Кноль

1938 г. Сканирующий просвечивающий микроскоп, М. фон Ардене

1939 г. Первый коммерческий просвечивающий электронный микроскоп

1942 г. Сканирующий электронный микроскоп, В. Зворыкин

1948-1960 гг. Работы Ч. Отли по сканирующей электронной микроскопии 1960 г. Детектор Эверхарта-Торнли

1965г. Первый коммерческий сканирующий электронный микроскоп

1981г. Первый сканирующий туннельный микроскоп, Г.К. Биннинг и Г. Рорер 1982г. Атомно-силовой микроскоп, Г.К. Биннинг и др.

1986г. Нобелевская премия Э.Руска, Г.К. Биннинг и Г. Рорер



Почему электронный микроскоп дает такое пространственное разрешение?

- Важна длина волны опорного излучения.

В оптической микроскопии используются волны видимого света (λ – 380-780 нм), в то время как в электронной микроскопии используются значительно более короткие волны ($\lambda \sim 0.0025$ нм при ускоряющем напряжении 200kV) .

- Длина волны в электронном микроскопе на 5 порядков меньше, чем длина волны видимого света и примерно на два порядка меньше, чем обычный размер атома, поэтому с помощью обычного света нельзя «увидеть» атомы – «не разрешаются детали мельче, чем половина длина волны излучения»

Длина волны электронов зависит от ускоряющего напряжения

кВ	Длина волны λ (пм)
20	8.588
100	3.702
200	2.508
300	1.968

Что такое *микроскопия*?

Микроскопия (образовано словами микро - мелкий, маленький и скоп - вижу, смотрю) — изучение объектов с использованием микроскопа.

Микроскоп – прибор, предназначенный для получения увеличенных изображений, а также измерения объектов или деталей структуры, невидимых или плохо видимых невооружённым глазом. Микроскоп представляет собой совокупность линз.

Микроскопия *подразделяется* на несколько видов:

- оптическая микроскопия
- электронная микроскопия
- сканирующая зондовая микроскопия
- другие.



История становления и развития электронной микроскопии



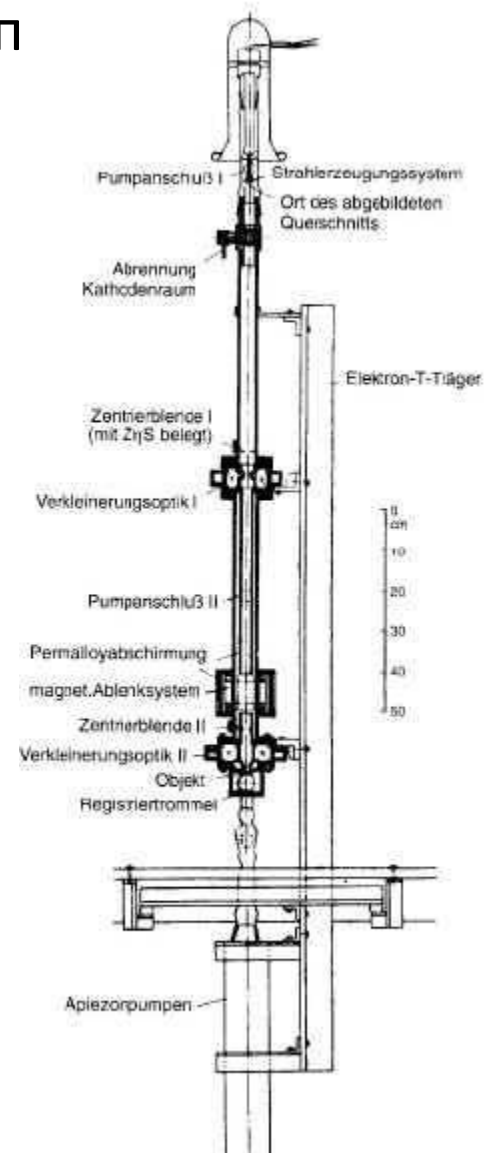
**Кнолл и Руска -
первый
просвечивающий
электронный
микроскоп, 1927 - 1931.**



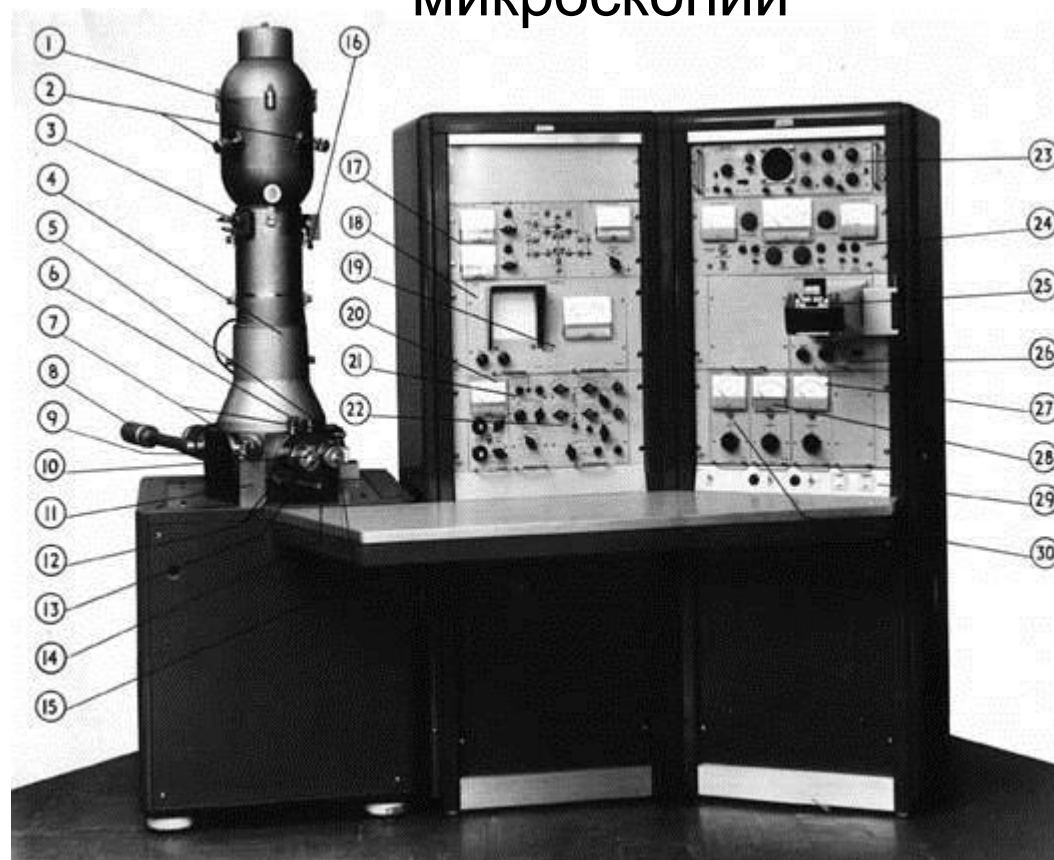
**Первый практический ПЭМ,
на экспозиции в немецком
музее в Мюнхене, Германия,
1933**

История становления и развития растровой электронной микроскоп

**1938. Манфред фон Арденне
- первый сканирующий
просвечивающий
электронный микроскоп**

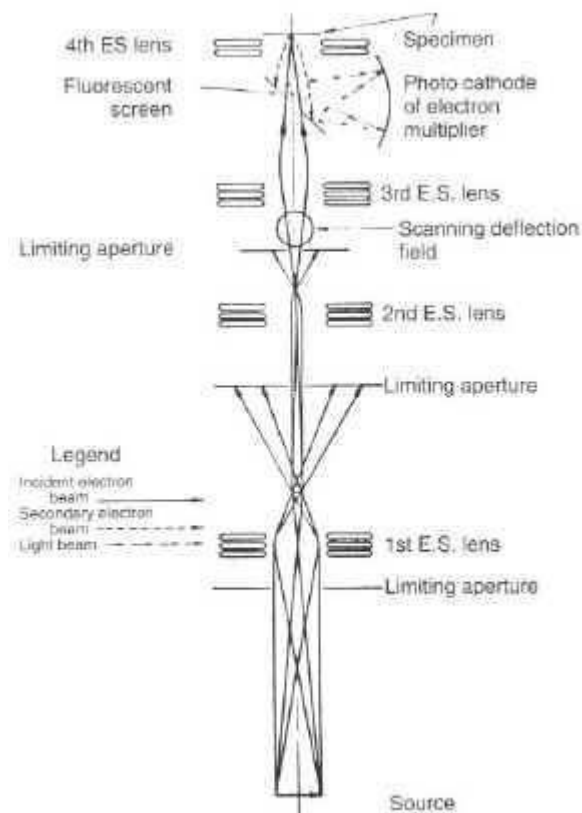
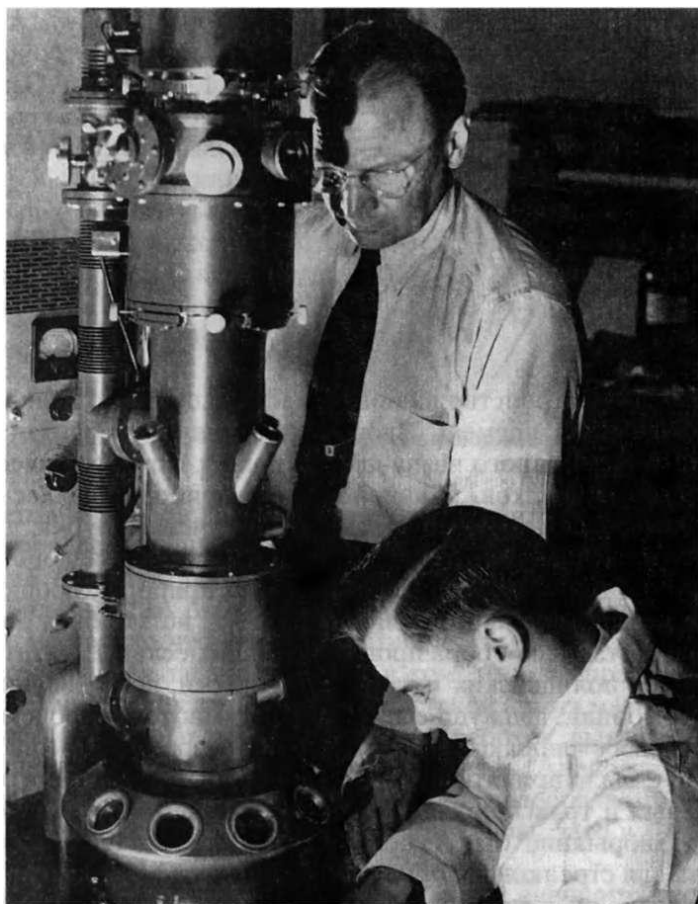


История становления и развития электронной микроскопии



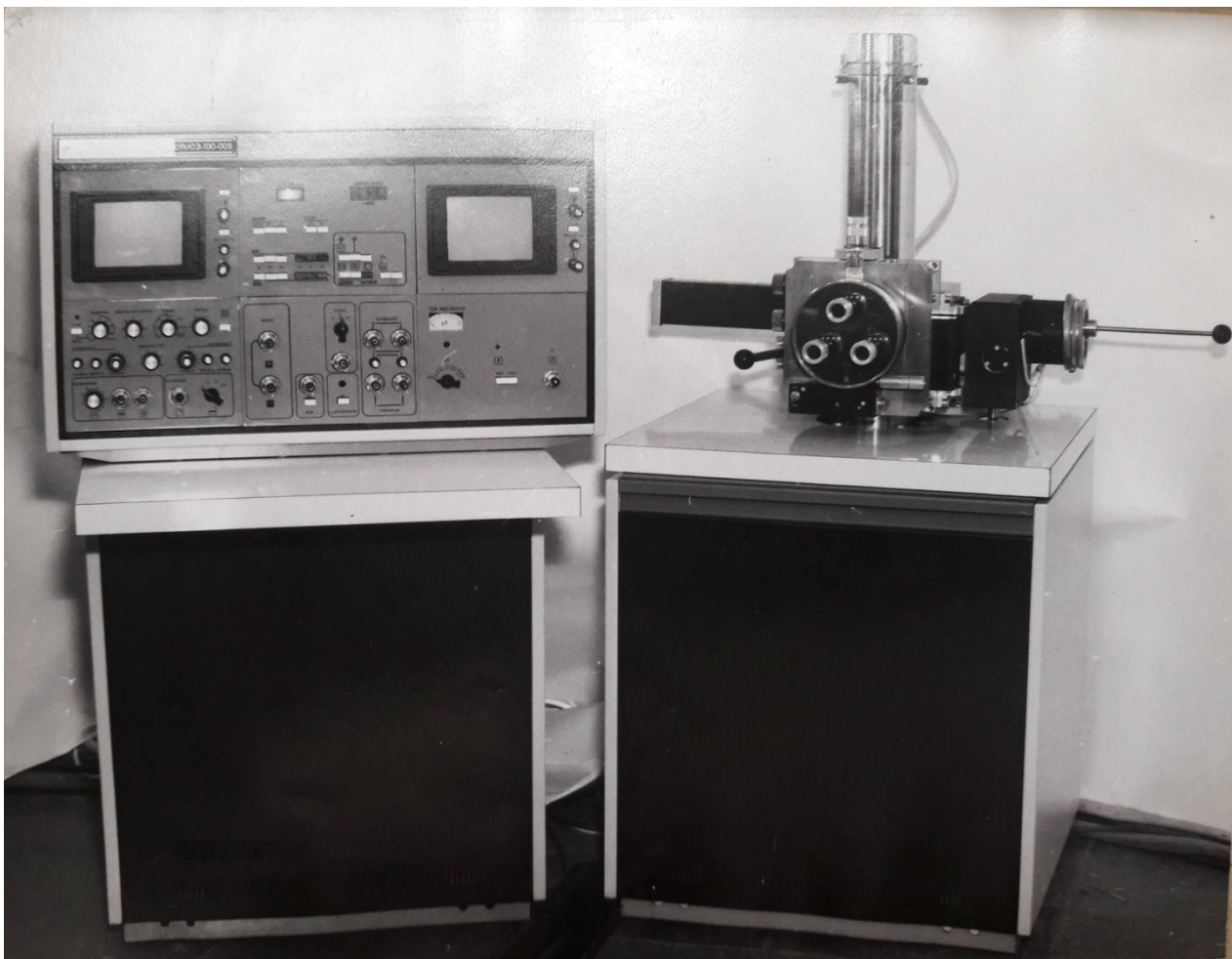
1965. Cambridge Instrument Co. и JEOL - первый коммерческий сканирующий электронный микроскоп — Stereoscan

История становления и развития растровой электронной микроскопии



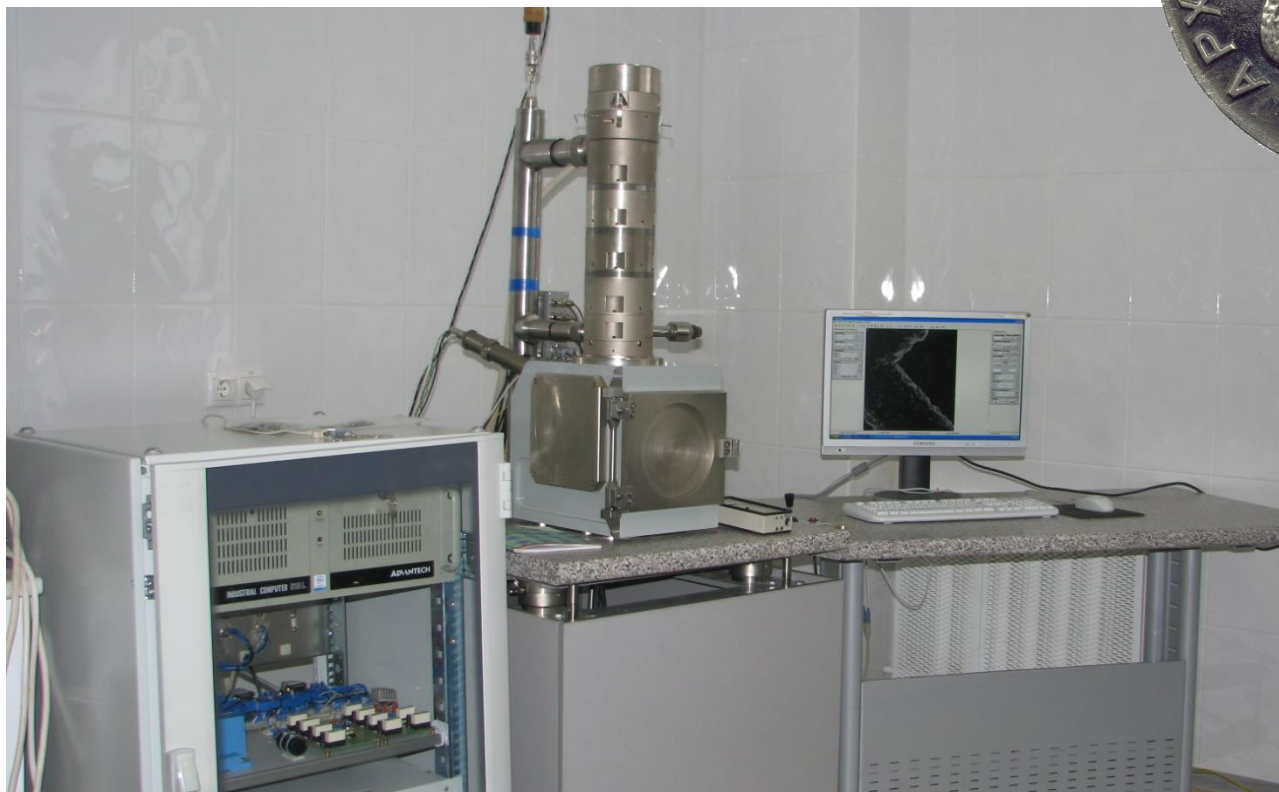
1942. русский физик и инженер Владимир Зворыкин - сканирующий электронный микроскоп, позволяющий анализировать поверхность

МРЭМ 100



МС20.1

Базовая модель

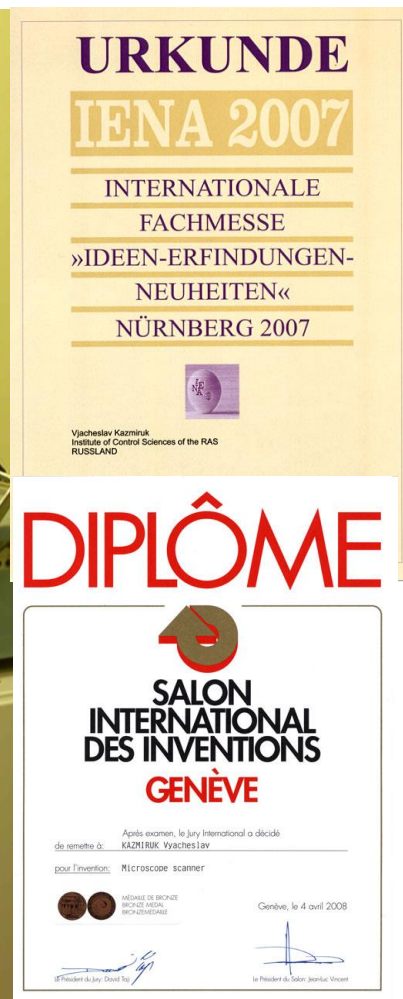


Академия химзащиты г. Кострома

МС20.2

РЭМ-нанолитограф

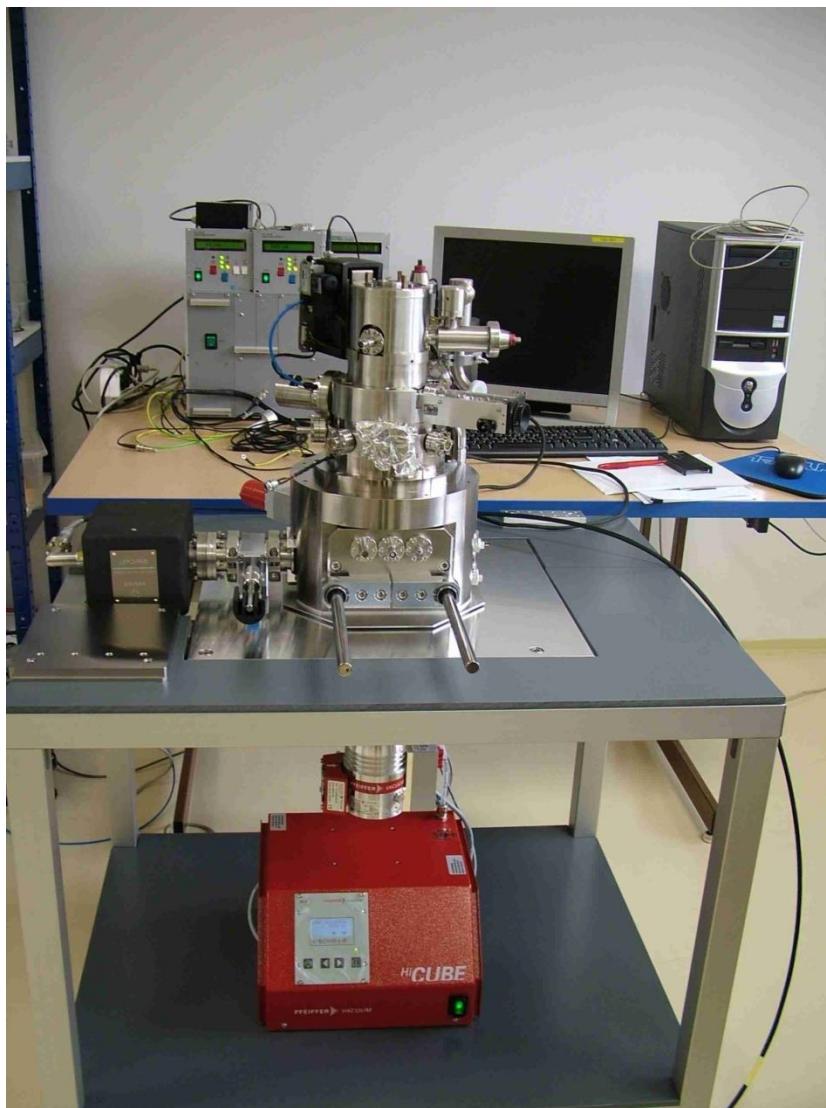
•РАЗРАБОТКИ ИПТМ



ПетрГУ г. Петрозаводск

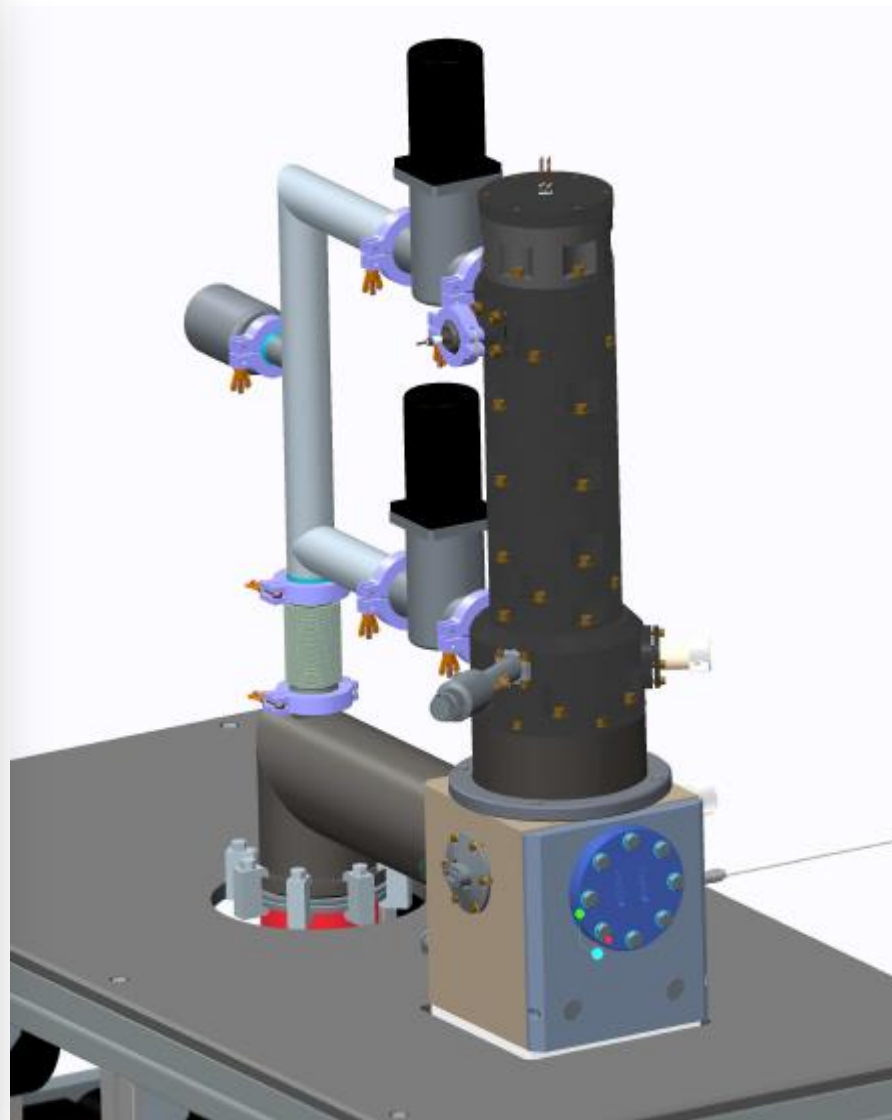
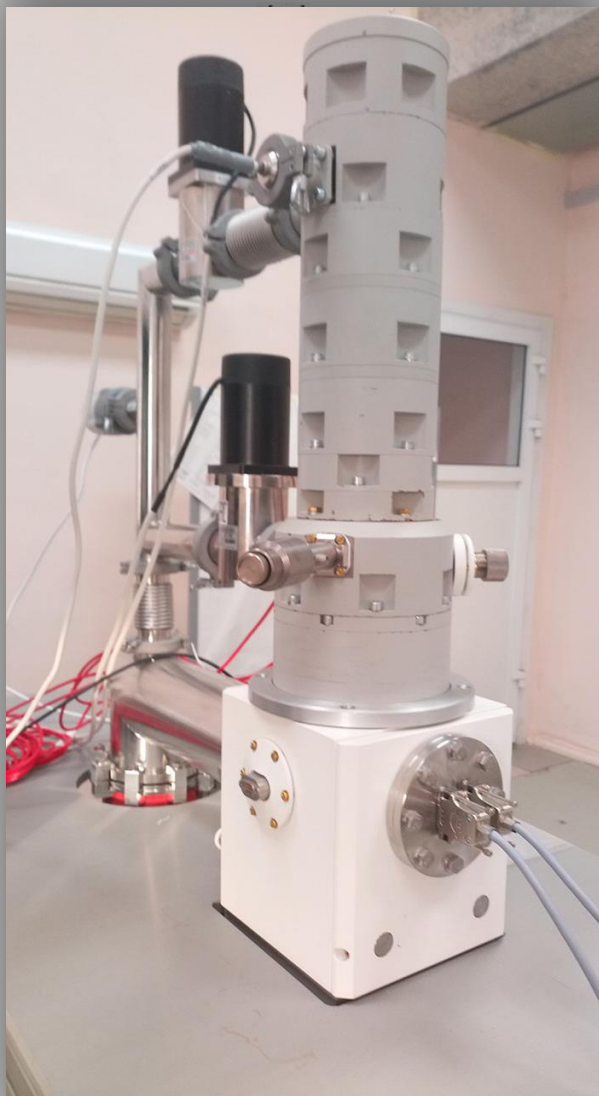
БАЗОВАЯ ЧАСТЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ

•РАЗРАБОТКИ ИПТМ



Самсунг Электроникс, г. Сувон, Ю. Корея

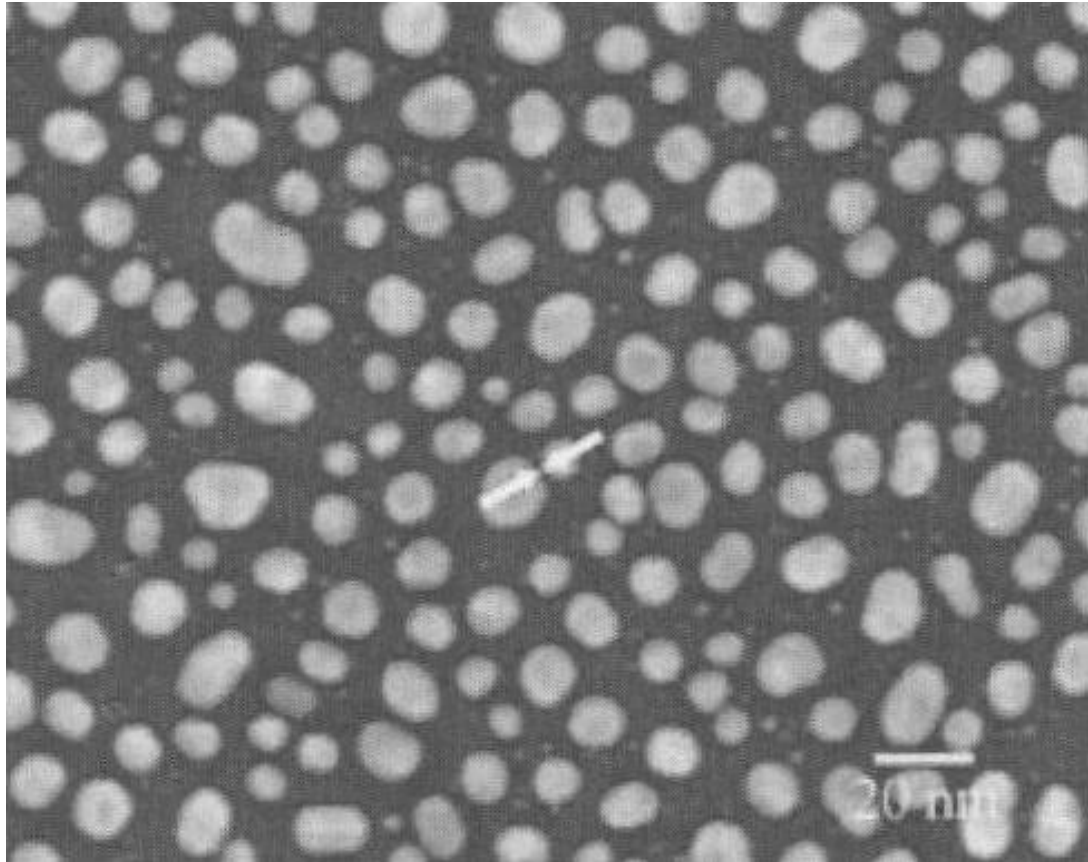
Растровый электронный микроскоп МС30



Разрешающая способность в микроскопии

Главной характеристикой любого оптического прибора является разрешающая способность. Это относится и к РЭМ.

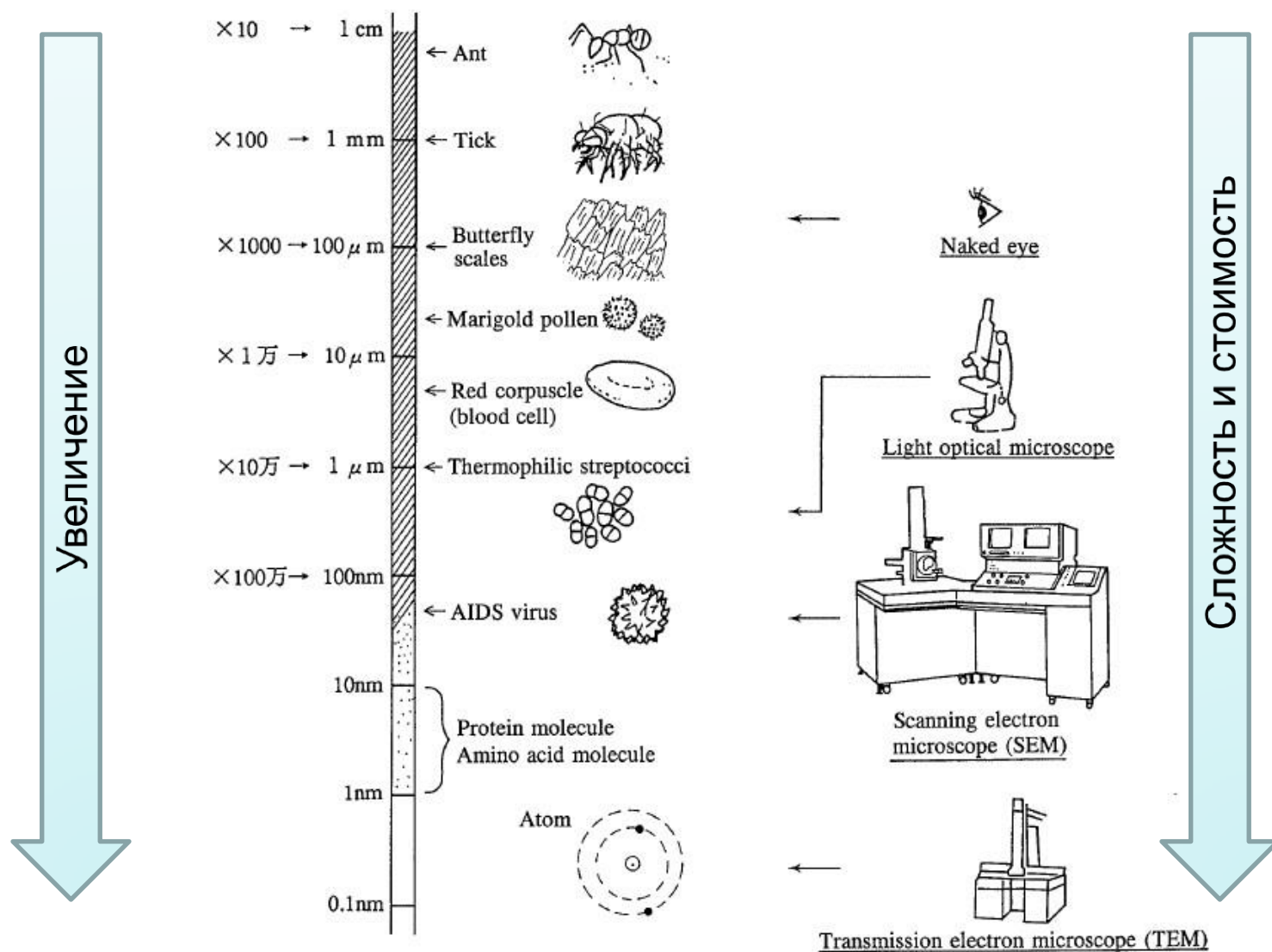
Разрешающая способность микроскопа - это способность микроскопа выдавать чёткое раздельное изображение двух близко расположенных точек объекта



Частицы золота на углеродной подложке. Расстояние между наиболее близкими частицами около 1 нм

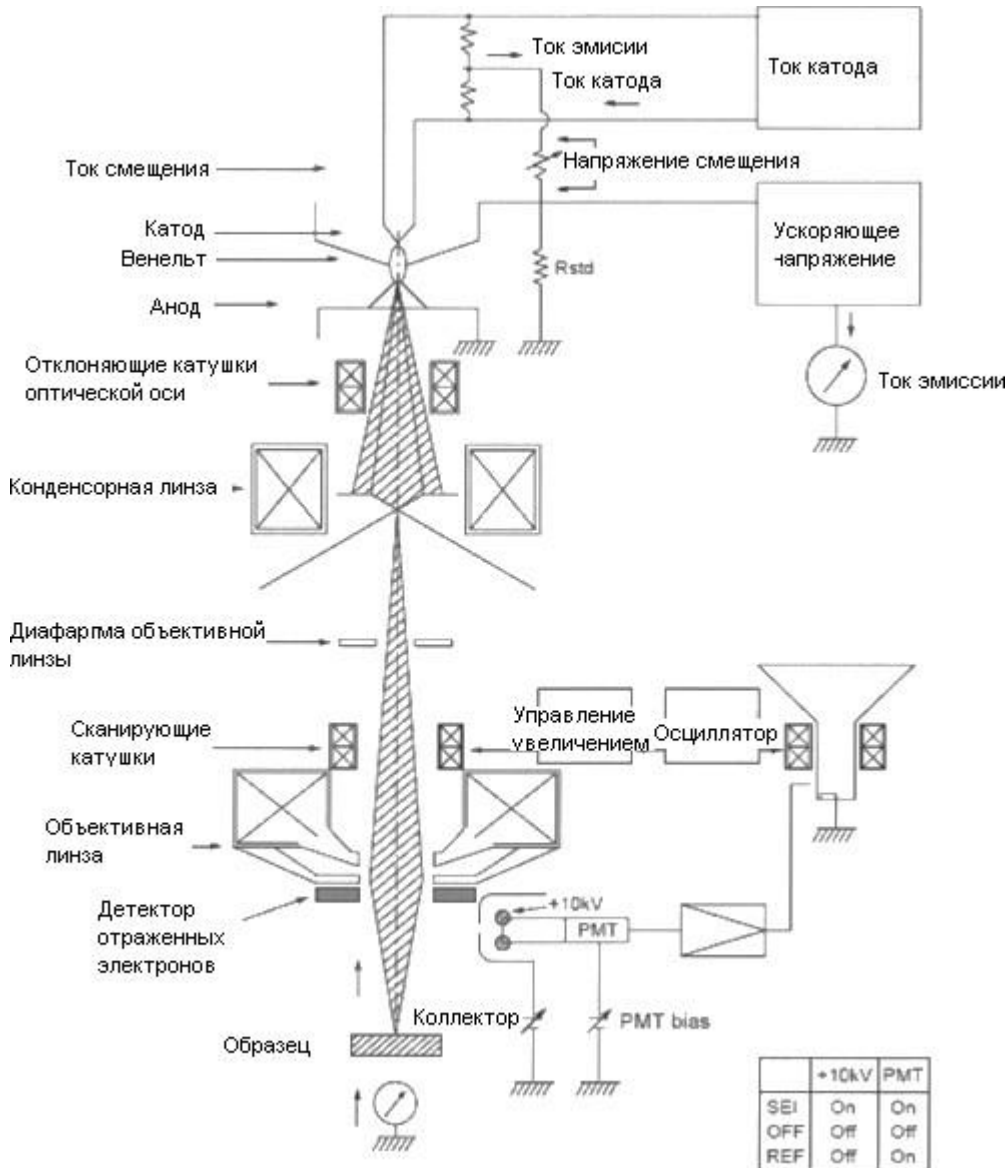


Место РЭМ в микроскопических исследованиях



Принцип работы РЭМ

Схема растрового электронного микроскопа



Электронная пушка генерирует тонкий электронный пучок (зонд).

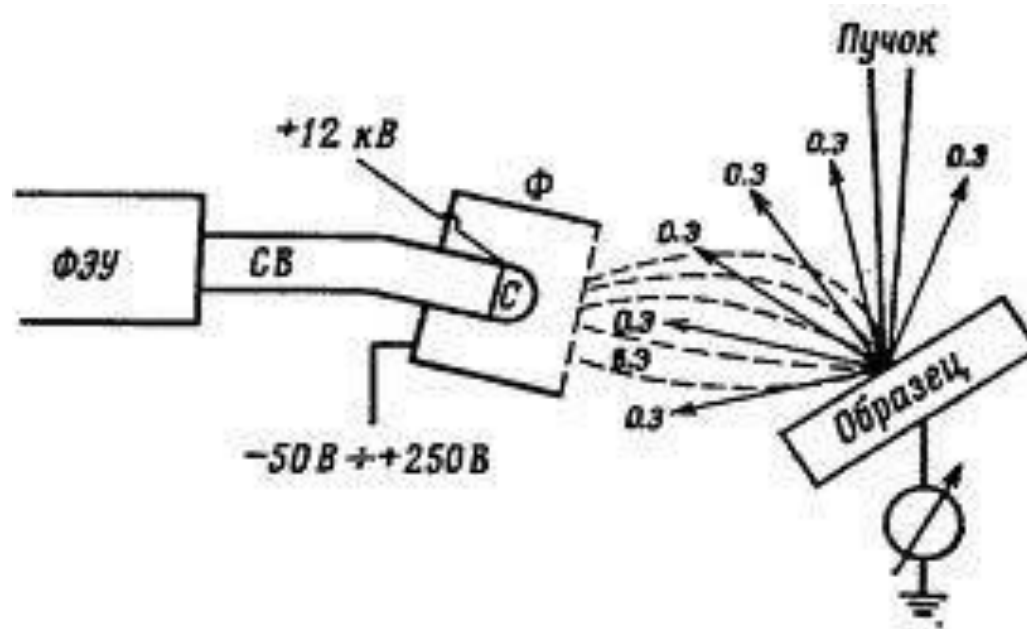
Электромагнитные линзы служат для фокусировки электронов.

Сканирующие катушки подвергают пучок сканированию.

Детекторы позволяют отобрать и проанализировать излучение возникшее в процессе взаимодействия и частицы изменившие энергию в результате взаимодействия электронного зонда с образцом

Предметный столик позволяет перемещать образец в трех направлениях, наклонять, вращать.

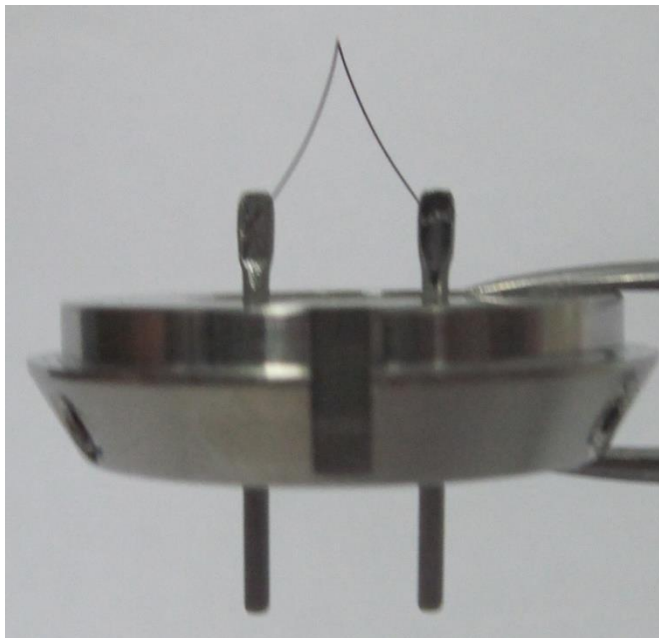
История становления и развития растровой электронной микроскопии



1960. Томас Эверхарт и Ричард Торнли, - детектор как вторичных,
так и
отражённых электронов («детектор Эверхарта-Торнли»)

Катоды и катодные узлы

Составляющие электронной пушки



Като
Д



Цилиндр
Венельта

Электронная пушка – источник электронного пучка



Термоэлектронная эмиссия.

Автоэлектронная эмиссия

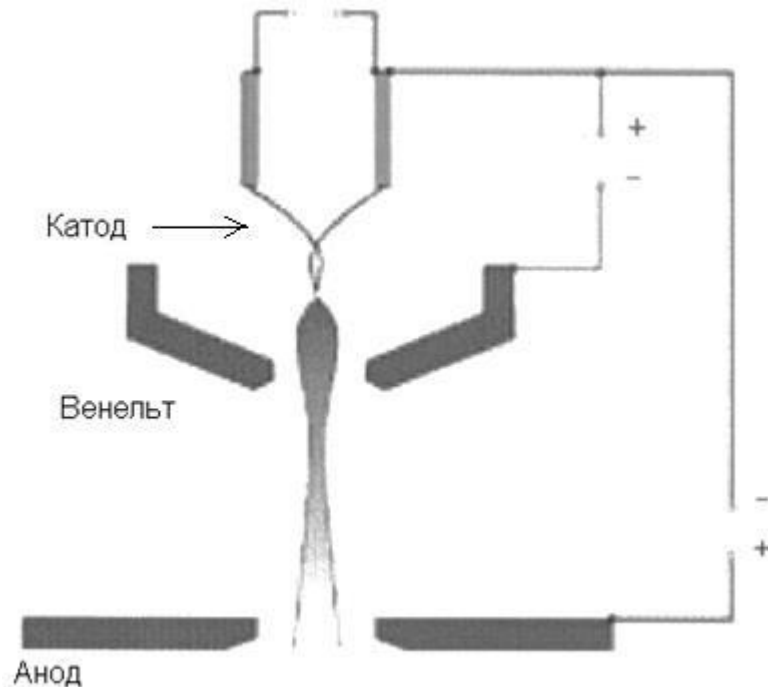
Термоэлектронная эмиссия (эффект Ричардсона, эффект Эдисона)

— явление испускания электронов нагретыми телами. Некоторые электроны обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе металла. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным. При увеличении напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения, называемого током насыщения.

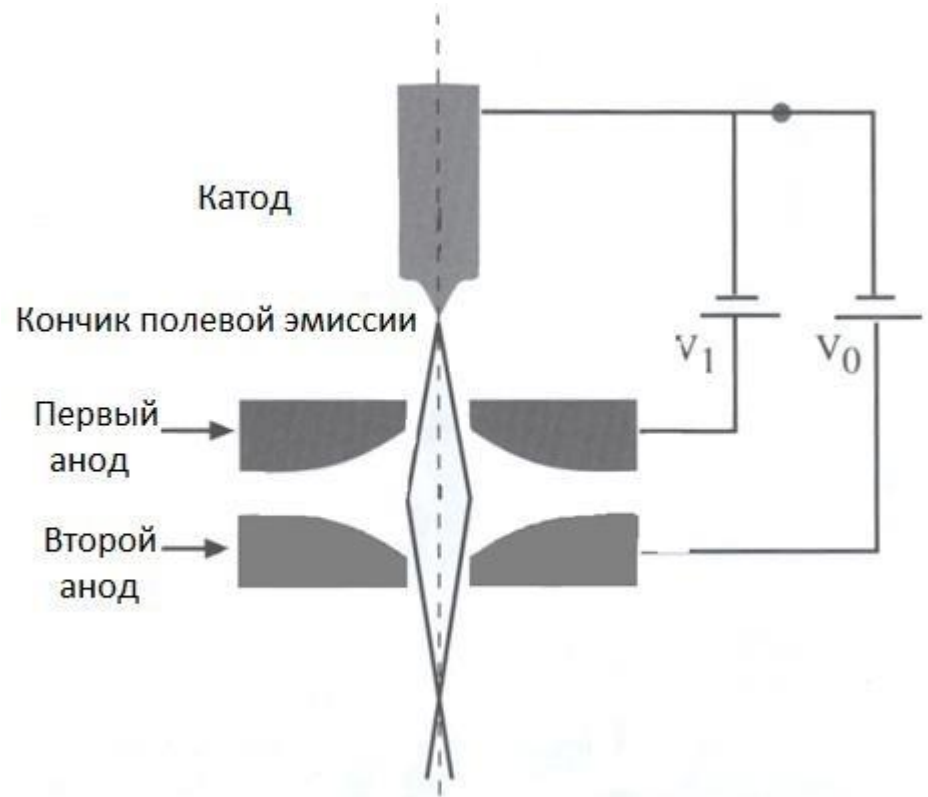
Автоэлектронная эмиссия - это испускание электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля без предварительного возбуждения этих электронов. Суть явления состоит в туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер на поверхности тела. Такое туннелирование становится возможным за счет искривления потенциального барьера при приложении внешнего поля.

Варианты катодов

Пространственное разрешение РЭМ определяется диаметром пучка электронов, поэтому разрешающая способность ограничивается величиной тока пучка при его маленьком диаметре.



Термоэмиссионный



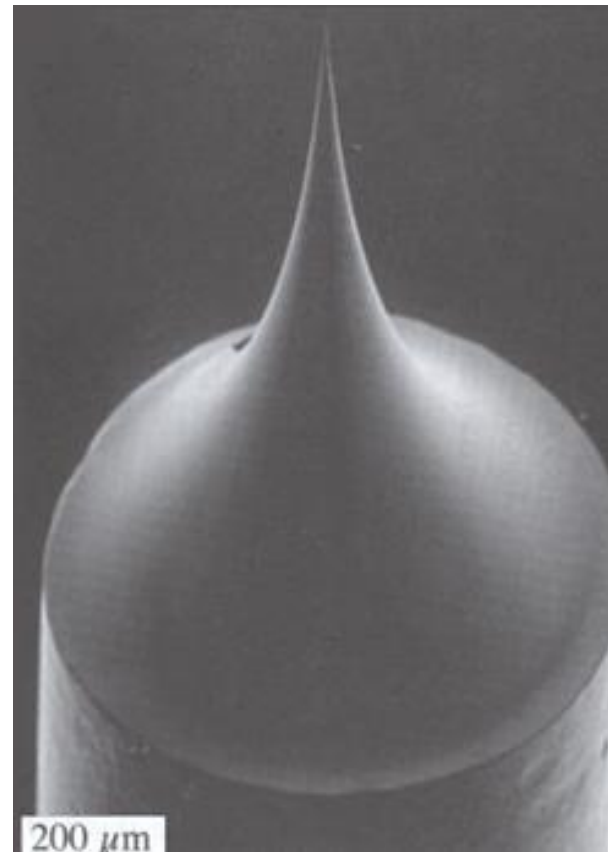
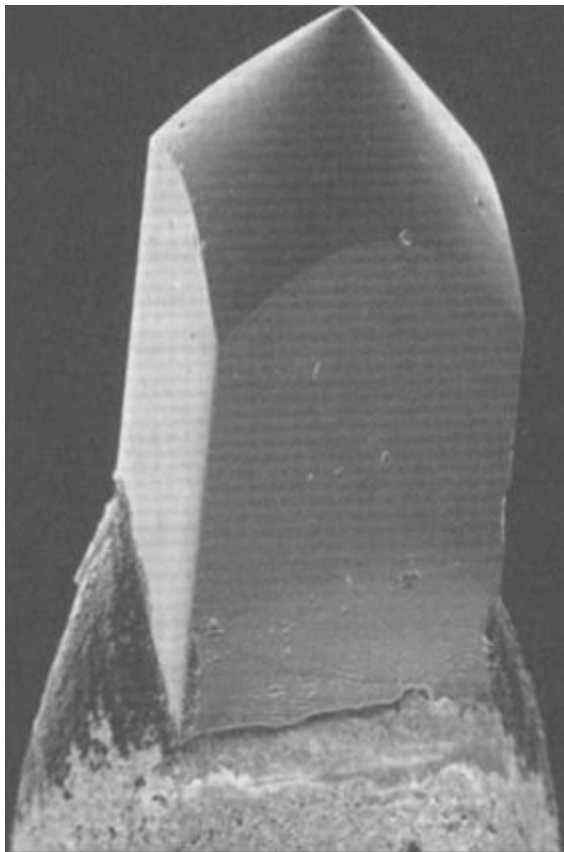
Автоэмиссионный (электроны
вырываются сильным
электромагнитным полем)

Варианты катодов

W

LaB₆

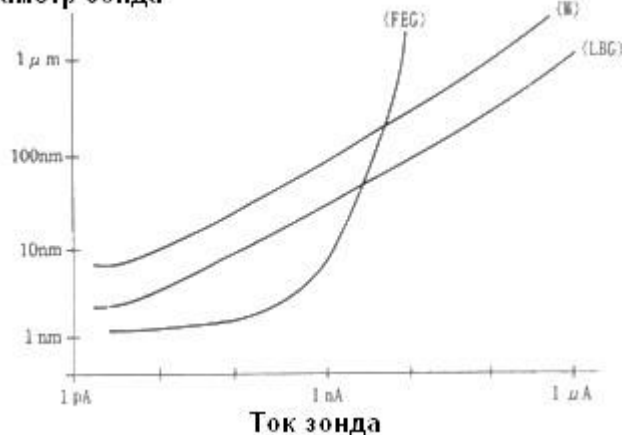
FE (W, покрытый
ZnO)



Сопоставление катодов

	Hairpin filament (W)	LaB ₆ filament (LBG)	Field emission (Cold cathode FEG)
Форма			
Яркость (A/cm ² sr) (Acc. volt. 20 kV)	5×10^4	$2 \sim 3 \times 10^5$	$\sim 10^7$
Размер источника электронов	20 μ m	10 μ m	5 ~ 10 nm
Стабильность по току	0.5% or less	1% or less	5% (10 ⁻⁸ Pa)
	1% or less/hr	2 to 3% or less/hr	5% or more/15 min
Срок службы	50 to 100 hr	300 to 500 hr	One year or more
Рабочий вакуум (Па)	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁸
Рабочая температура (К)	2800	1800	Room temperature
Основные свойства	Stability Large current	High resolution at large current	High resolution

Диаметр зонда



Яркость пучка

Срок службы катода

Размер источника электронов

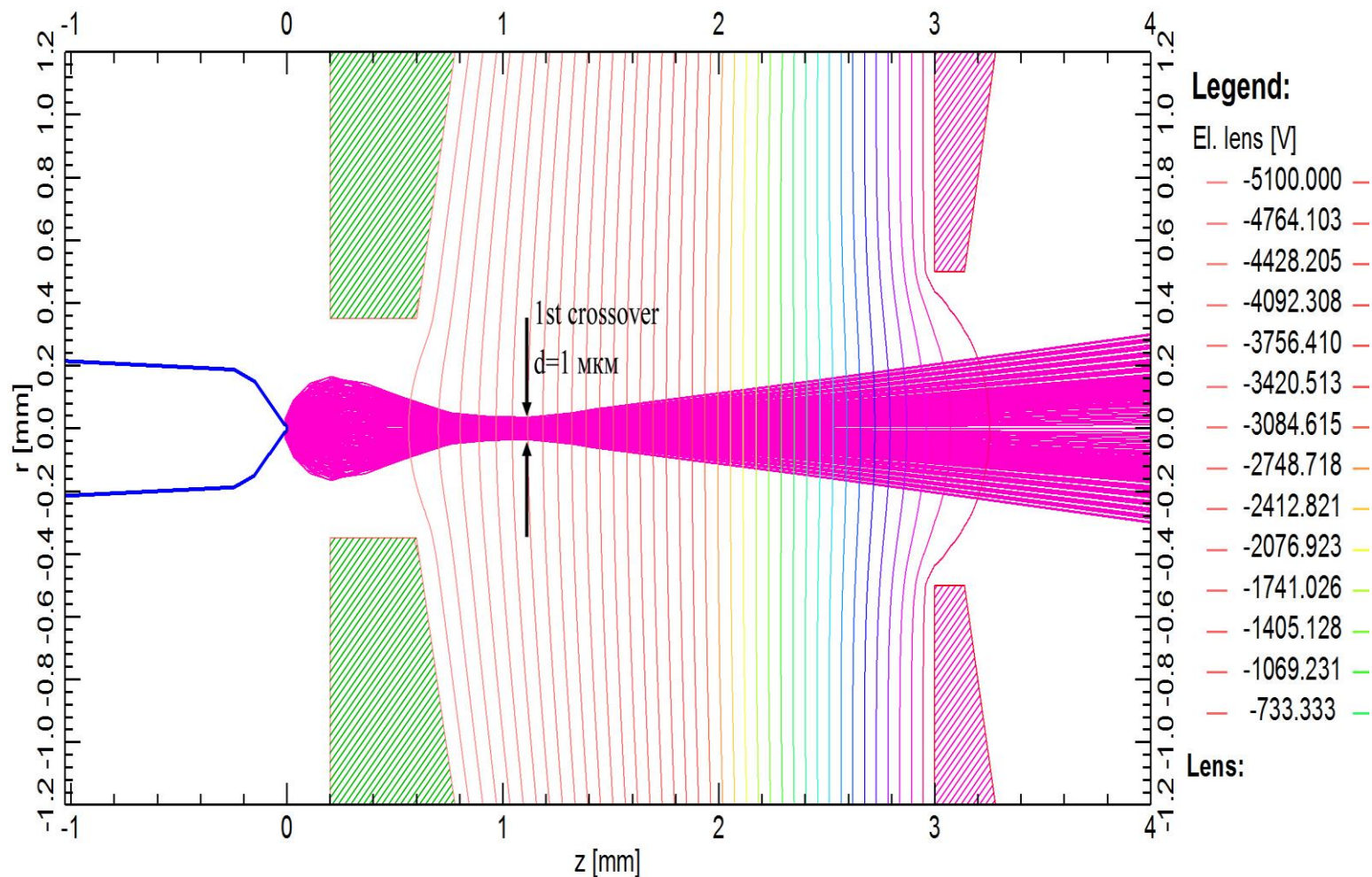
Advantageous

Стабильность электронного пучка

Экономичность

Thermionic emission gun (W, LaB₆)
Field emission gun (FEG)

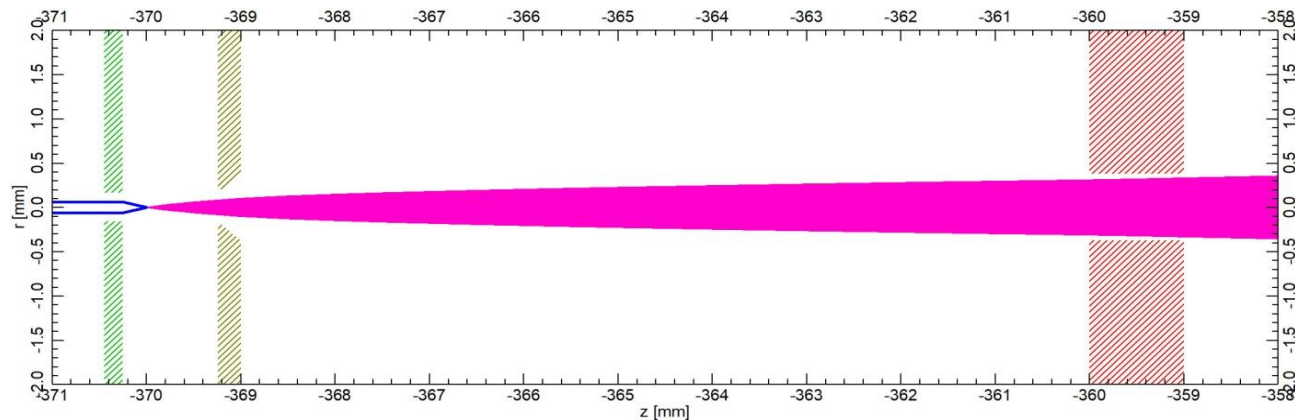
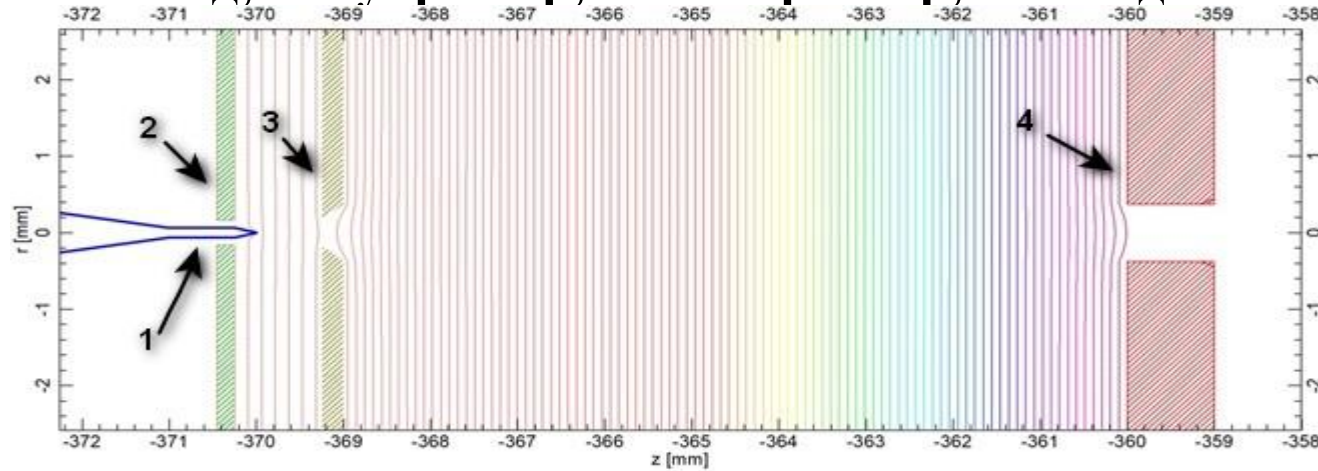
ФОРМИРОВАНИЕ КРОССОВЕРА



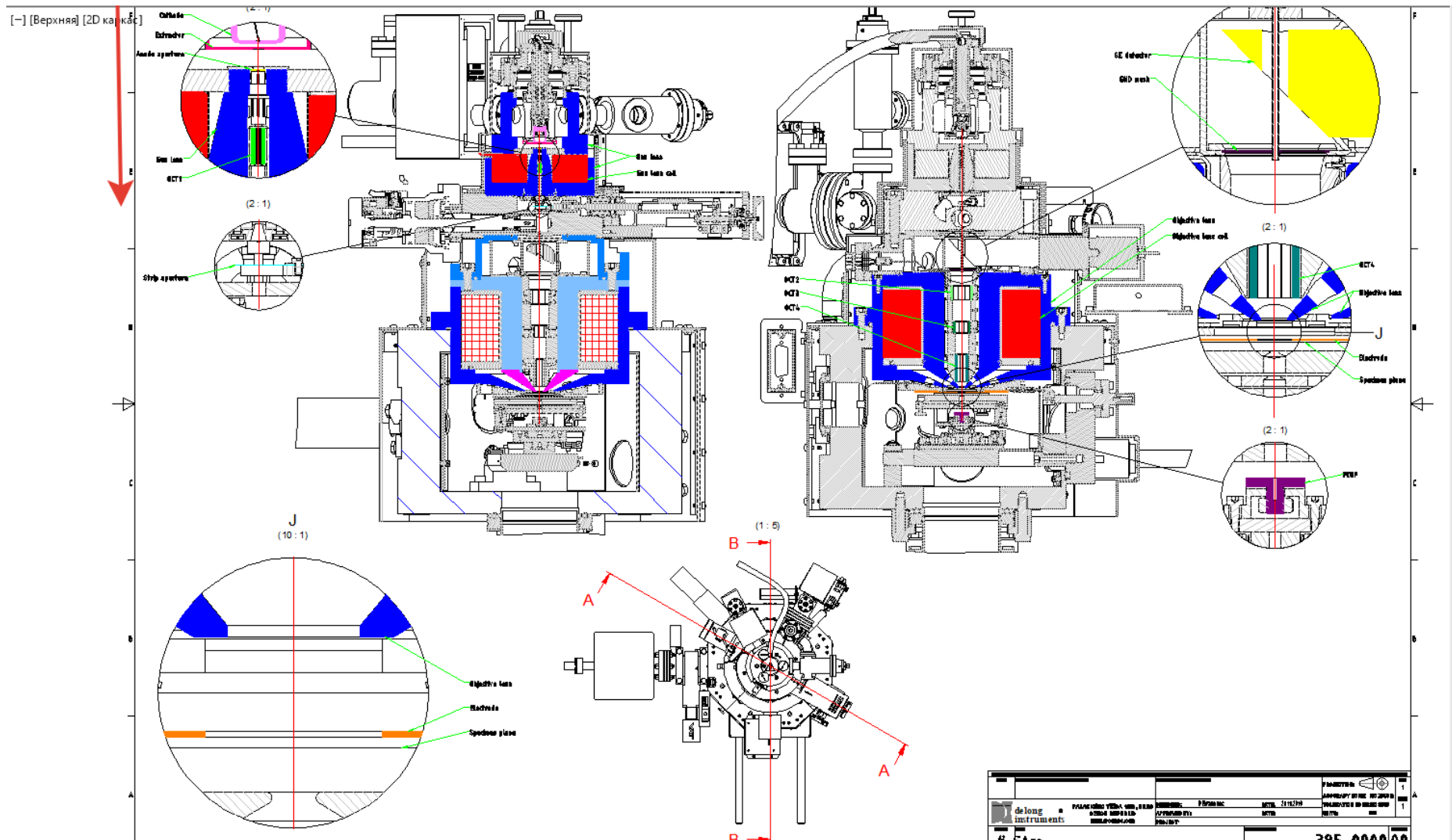
Электронная пушка с катодом Шоттки



1 – катод, 2 – супрессор, 3 – экстрактор, 4 – анод.

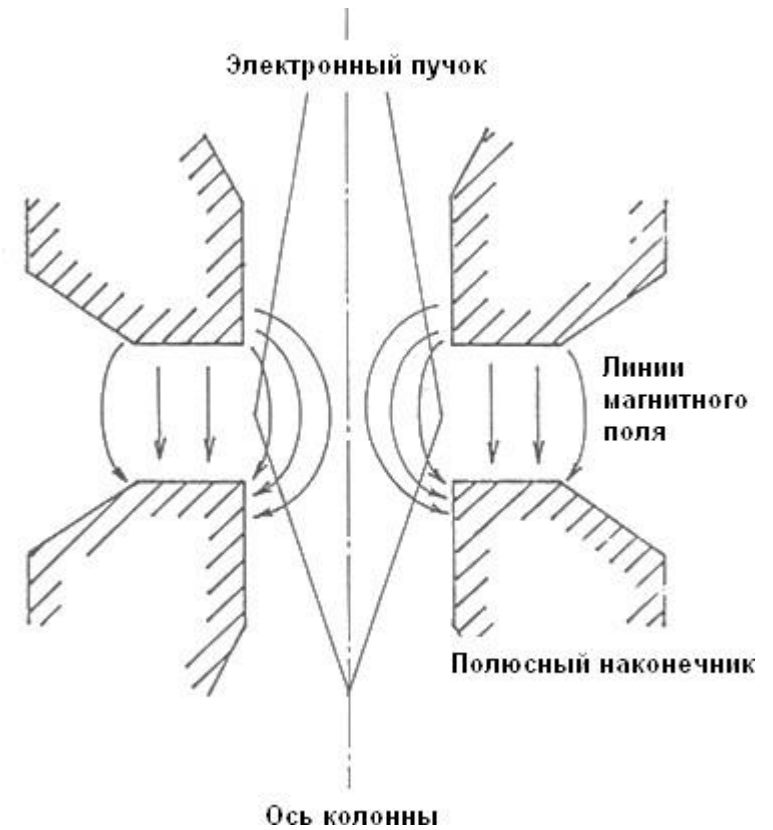
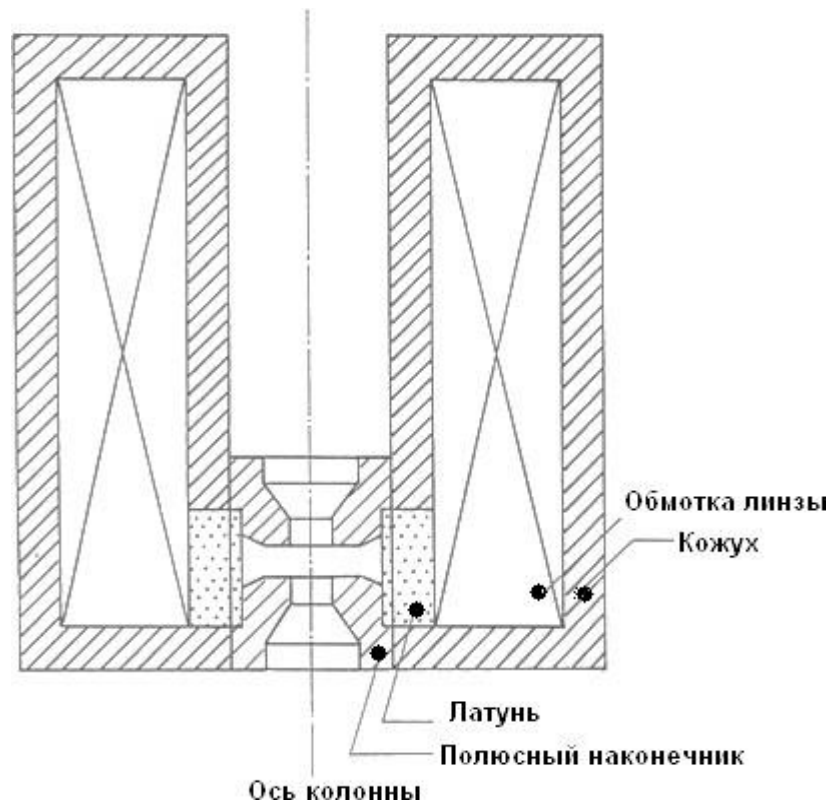


КОЛОННА САМСУНГ

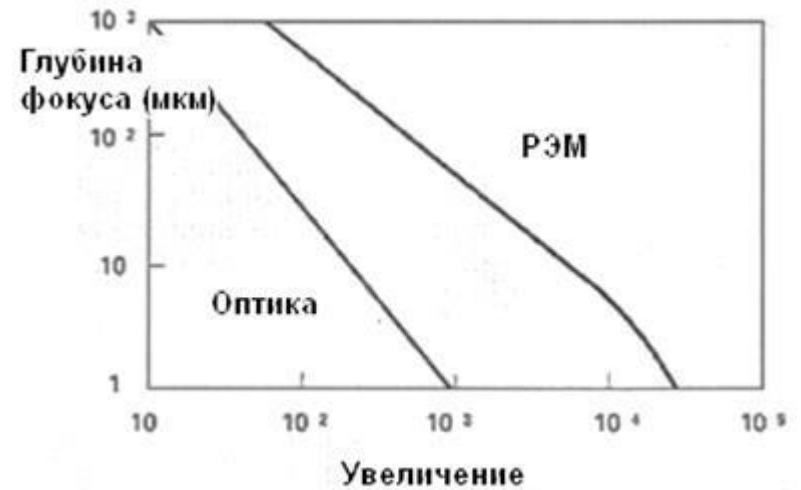
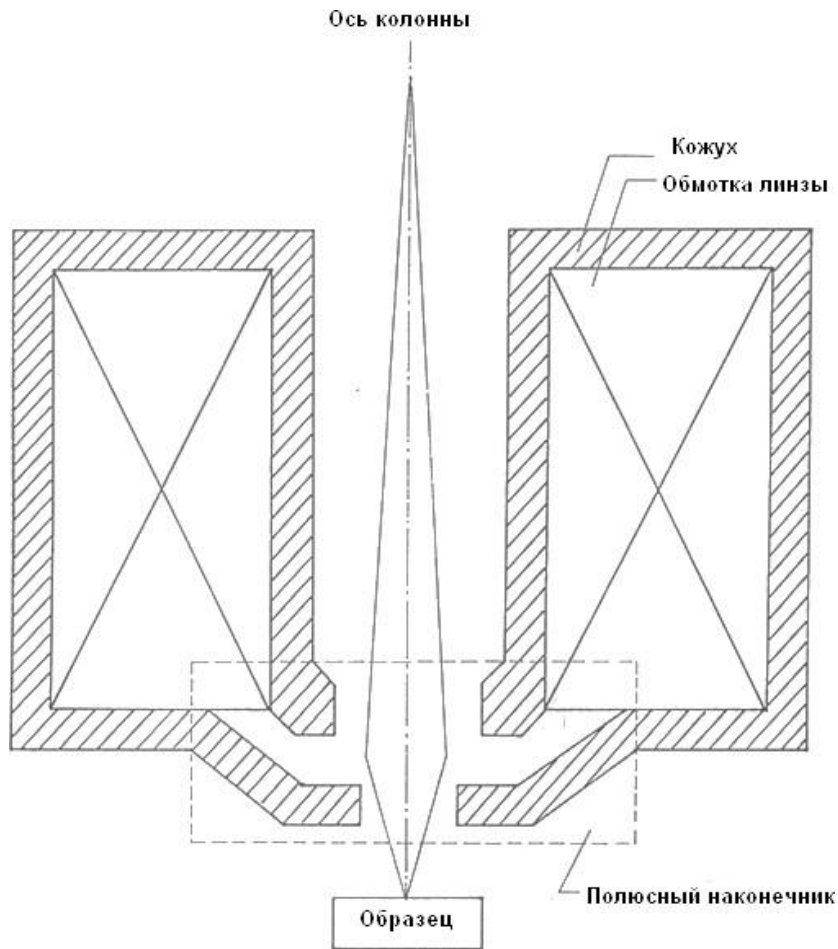


Линзы

Конденсорная линза



Объективная линза



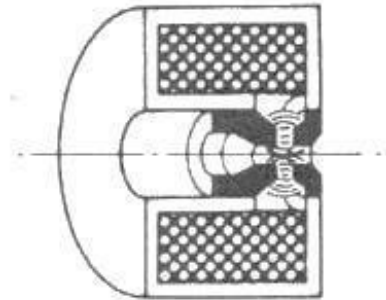
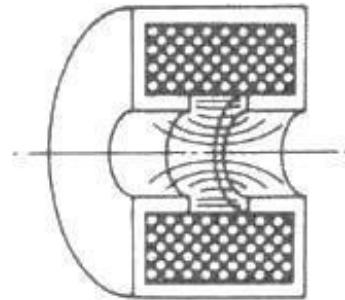
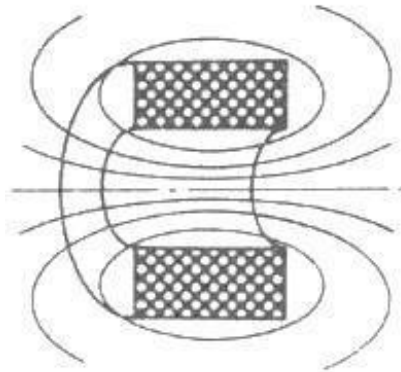
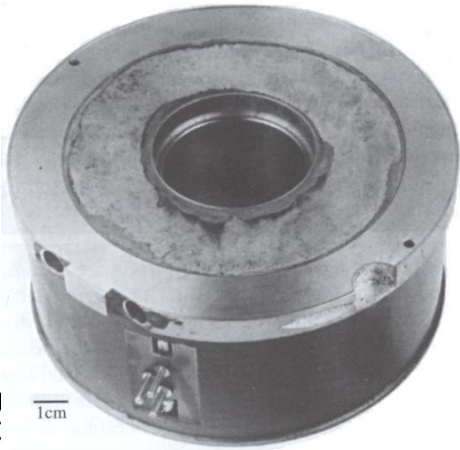
Электромагнитные линзы

Конденсорная и объективная линзы служат для фокусировки электронного пучка (при этом диаметр пучка электронов снижается в 100-10000 раз).

Фокусировка потока электронов осуществляется магнитным полем, имеющим осевую симметрию. Оно создается электромагнитной катушкой, которая представляет собой соленоид.

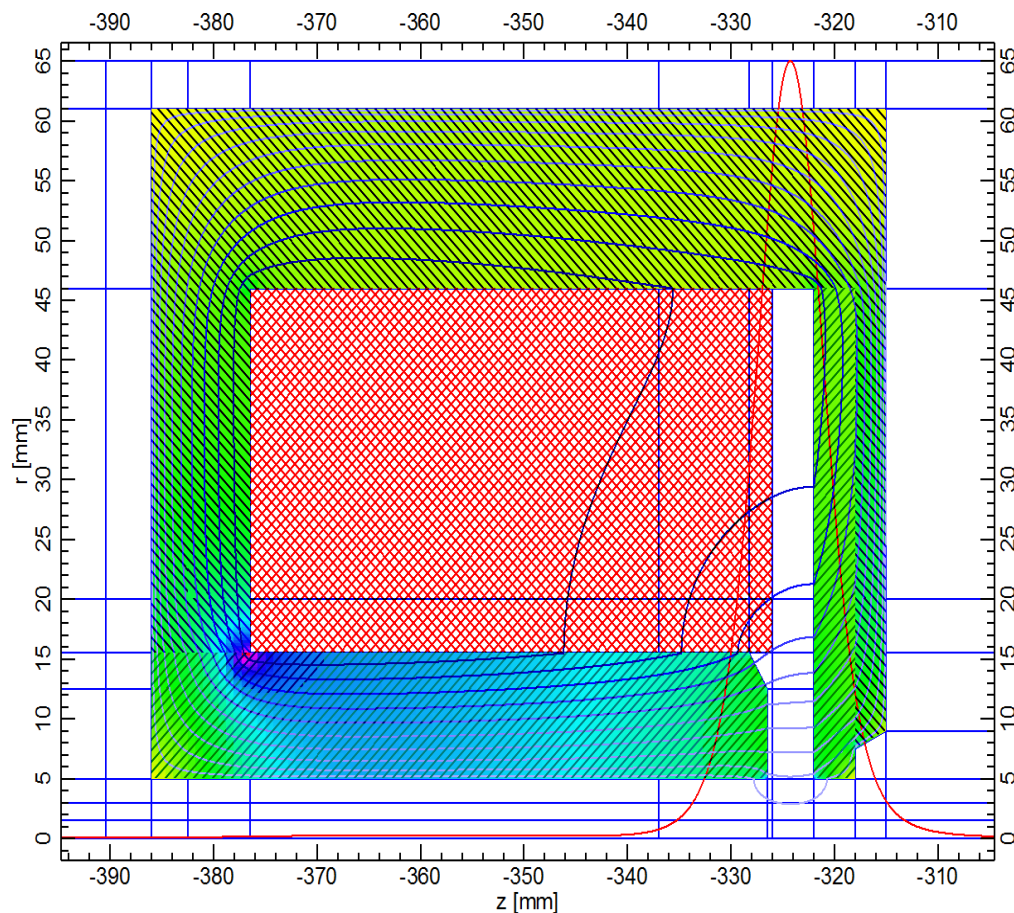
Магнитное поле возникает при пропускании электрического тока через обмотку соленоида, концентрируется с помощью так называемого полюсного наконечника и сжимает к оси проходящий через него поток электронов.

Фокусное расстояние линзы можно плавно регулировать путем изменения силы тока в обмотке соленоида. Форма объективной линзы обусловлена расположением электронных детекторов.



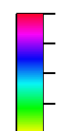
Расчет линз

Конденсорная линза № 1



Legend:

Saturation [T] — Magnetic mesh



Magnetic flux [μWb]

1.42	4.081	102.026	330.565
1.06	16.324	146.918	408.106
0.71	36.729	199.972	
0.35	65.297	261.188	

Lens: MagneticCondenser, 1320 At

— Axial magnetic flux density

Min. 0.000E+00, max. 1.415E-01 T, $z_{\text{max}} = -324.260$ mm, $\Delta z = 7.750$ mm

Magnetic

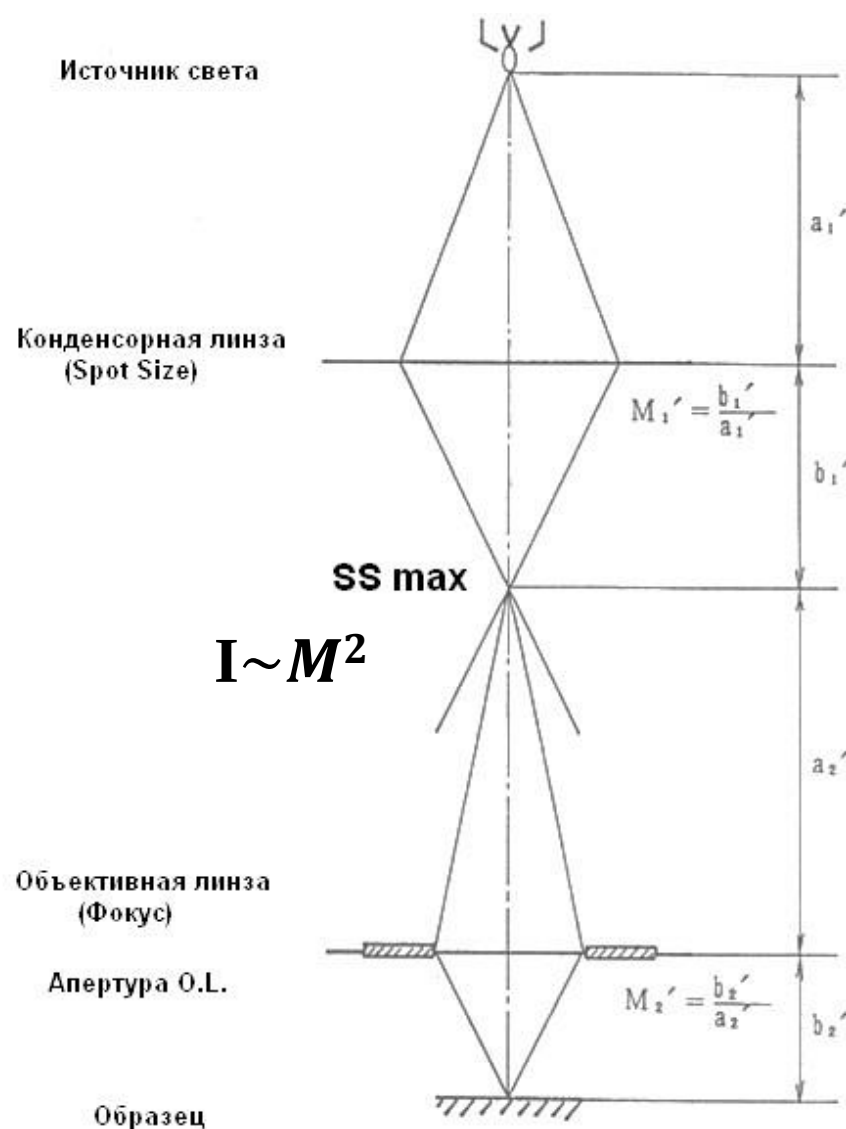
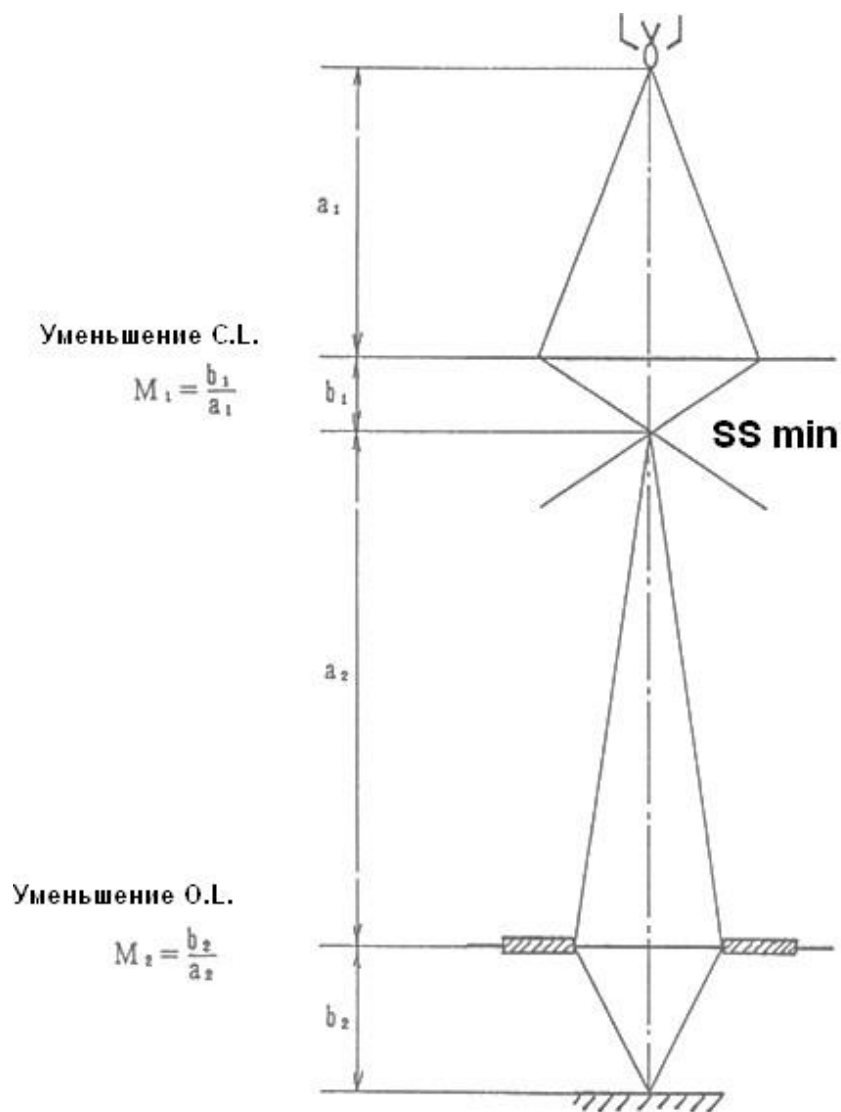
- Iron
- Permendur

Coils

- 0.000 A/mm² (inp) Coil 1
- 0.000 A/mm² (inp) Coil 2
- 0.649 A/mm² (inp) Coil 3

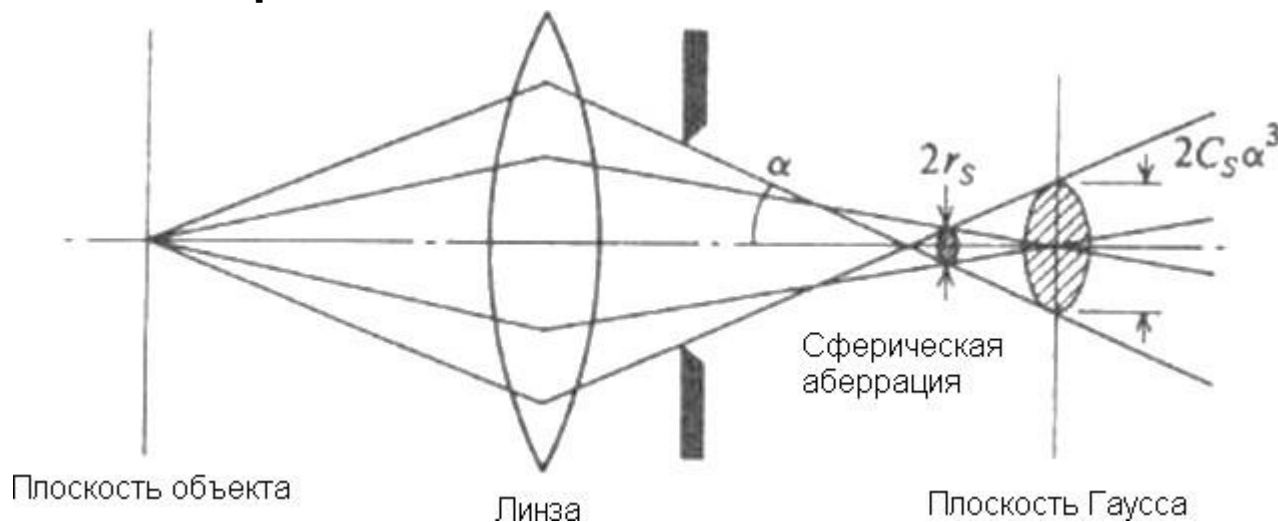
Total: 1000.000 At

Уменьшение диаметра пучка с помощью электромагнитных линз



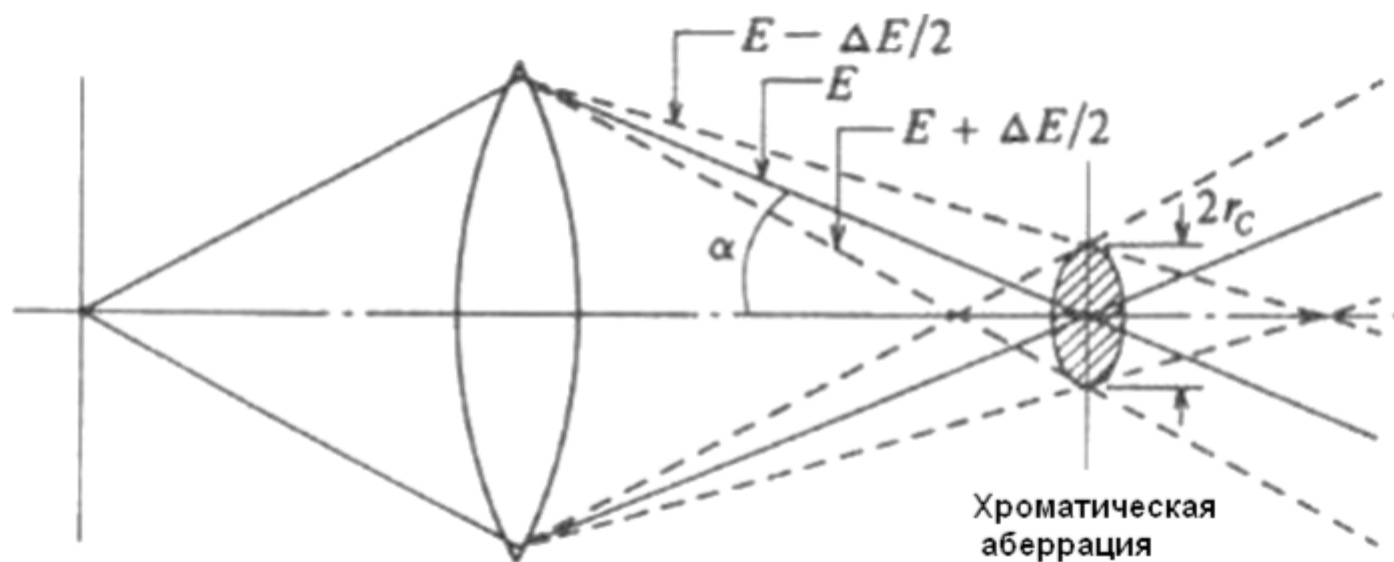
Аберрации оптических систем — ошибки или погрешности изображения в оптической системе, вызываемые отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе. **Они являются главным врагом линз.**

Сферическая аберрация связана с тем, что внешняя часть широкого пучка излучения фокусируется сильнее, чем осевая. Вызвана радиальной неоднородностью магнитного поля линзы. Она уменьшается с уменьшением фокального расстояния объективной линзы и применением апертурной диафрагмы объективной линзы меньшего диаметра.



Хроматическая aberrация

Хроматическая aberrация связана с разбросом электронов по энергиям вследствие нестабильности ускоряющего напряжения и тепловой энергии изучаемых источником электронов. Достаточно велика при работе при низких ускоряющих напряжениях.

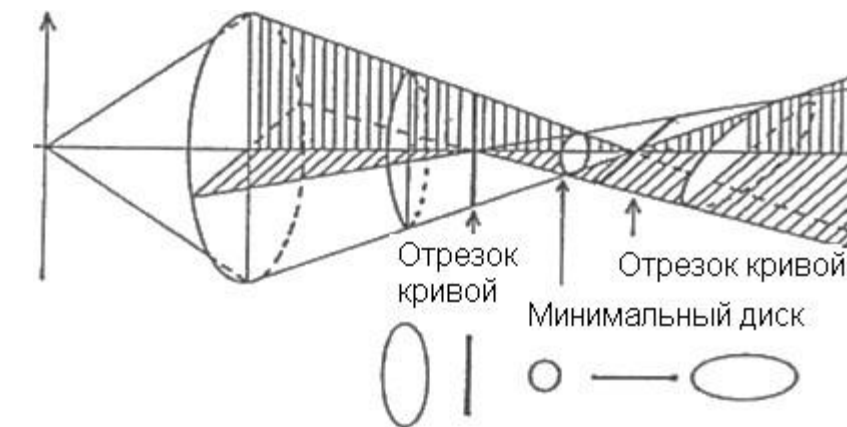


Ускоряющее напряжение выше, длина волны меньше, фокус короче

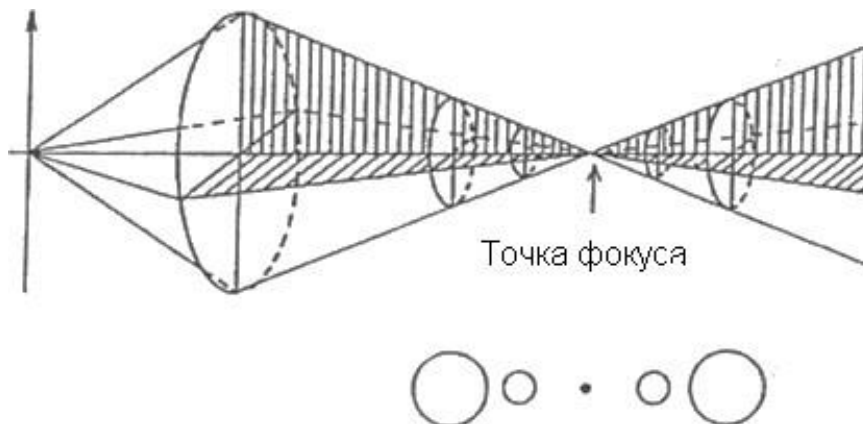
Астигматизм

Астигматизм связан с несовершенством линз (их локальной неоднородностью) или наличием мелких загрязнений на внутренних поверхностях деталей электронной колонны.

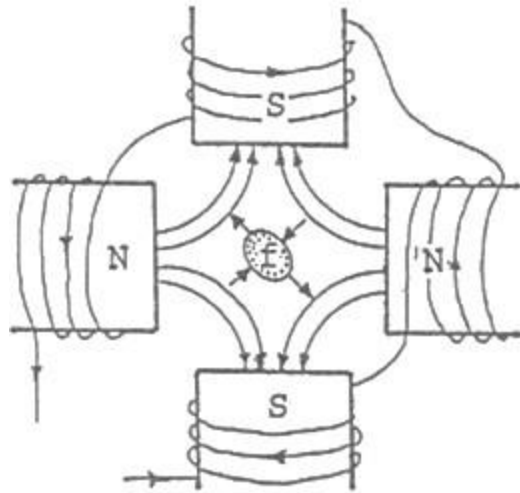
**До
устранения
астигматизма**



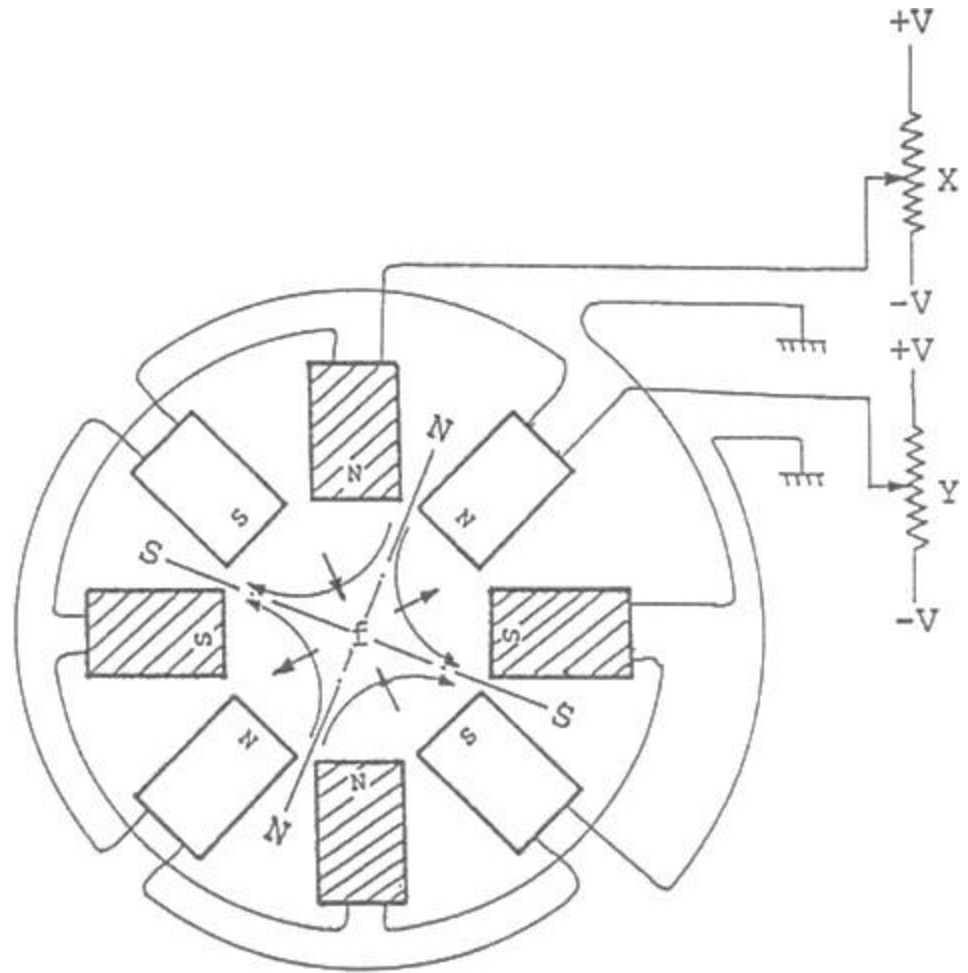
**После
устранения
астигматизма**



Устранение астигматизма. Стигматоры.



Силы Лоренца, отклоняющие
электронный пучок



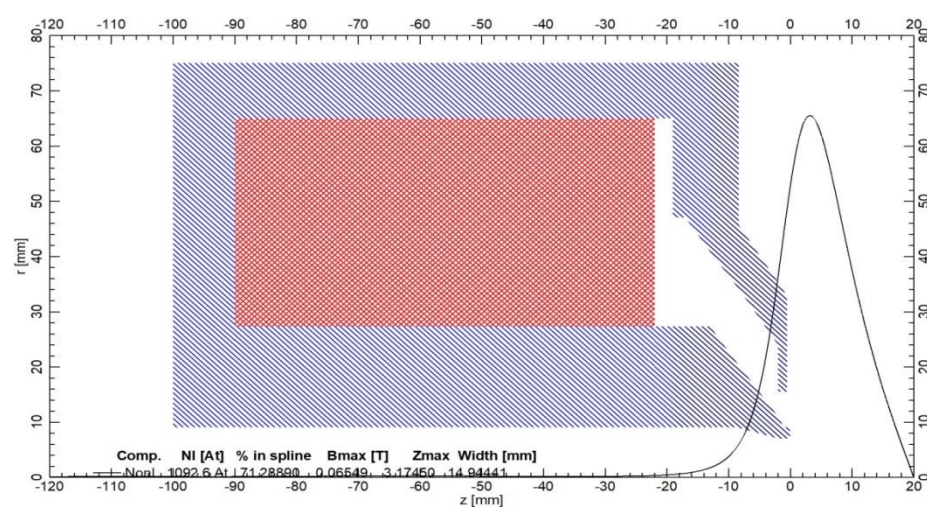
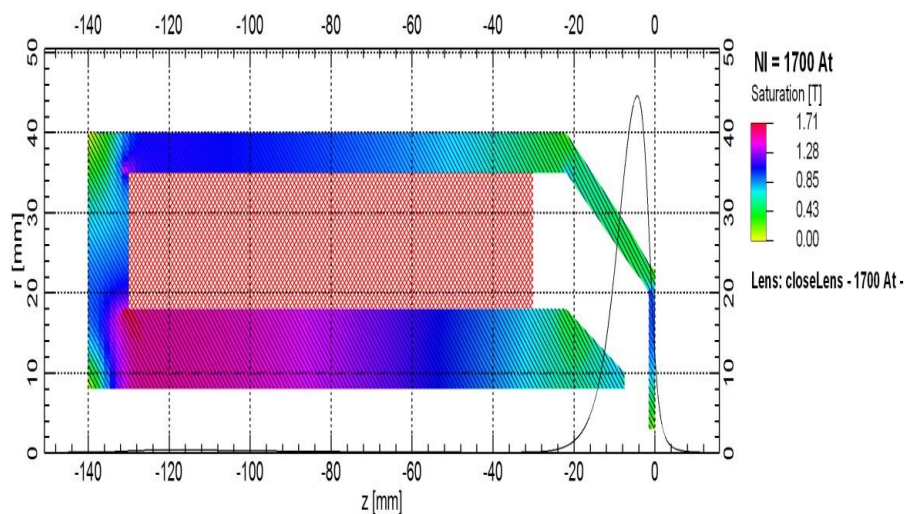
Схематическое изображение
стигматора

Стигматор



Моделирование ЭОС

Линза с аксиальным и радиальным магнитным зазором



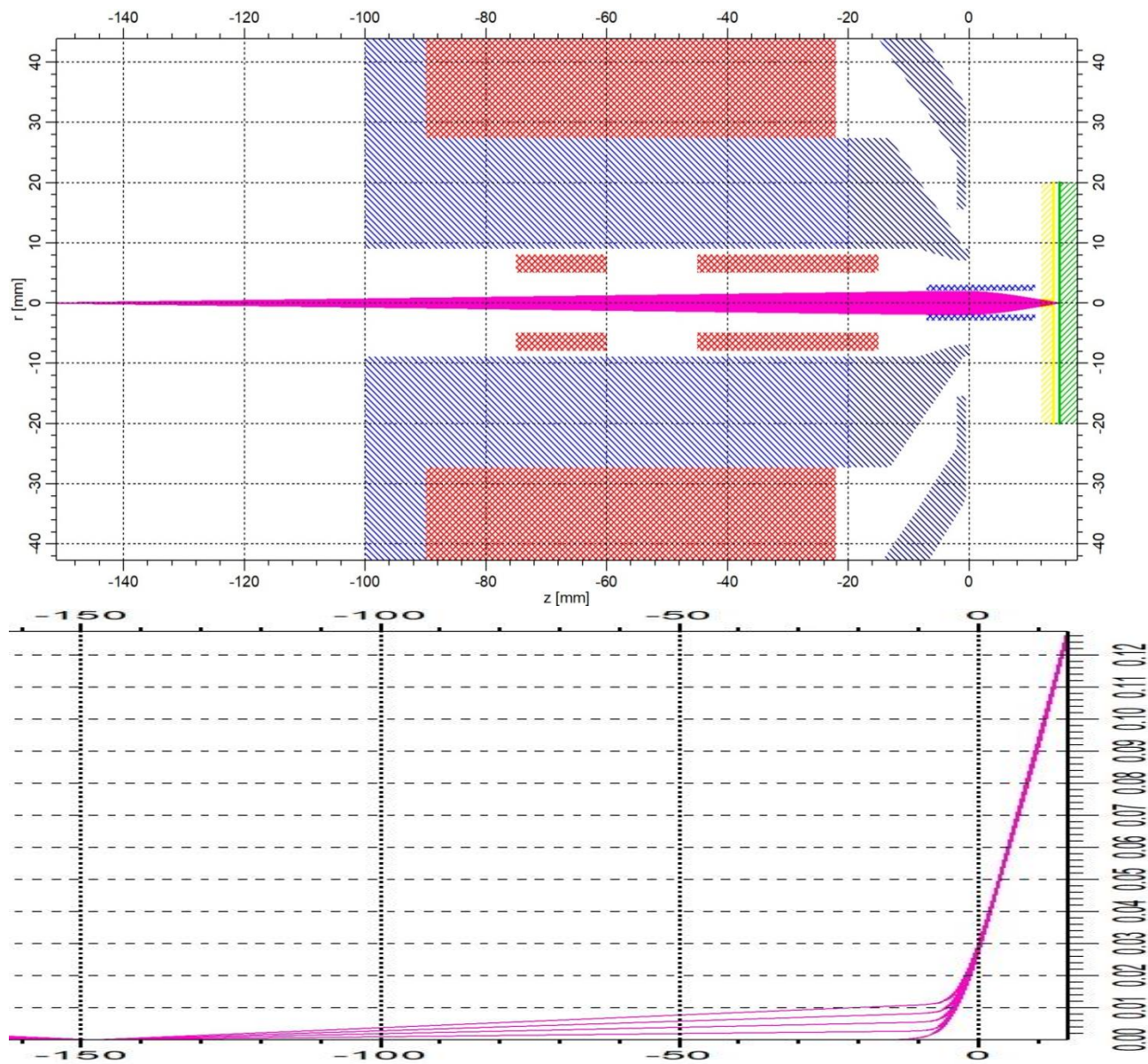
$$C_s = 186,7 \text{ мм}; C_c = 20,6 \text{ мм}$$

$$C_s = 22,7 \text{ мм}; C_c = 10,6 \text{ мм}$$

Уменьшение минимального диаметра пучка за счет C_s примерно в 2,1 раза

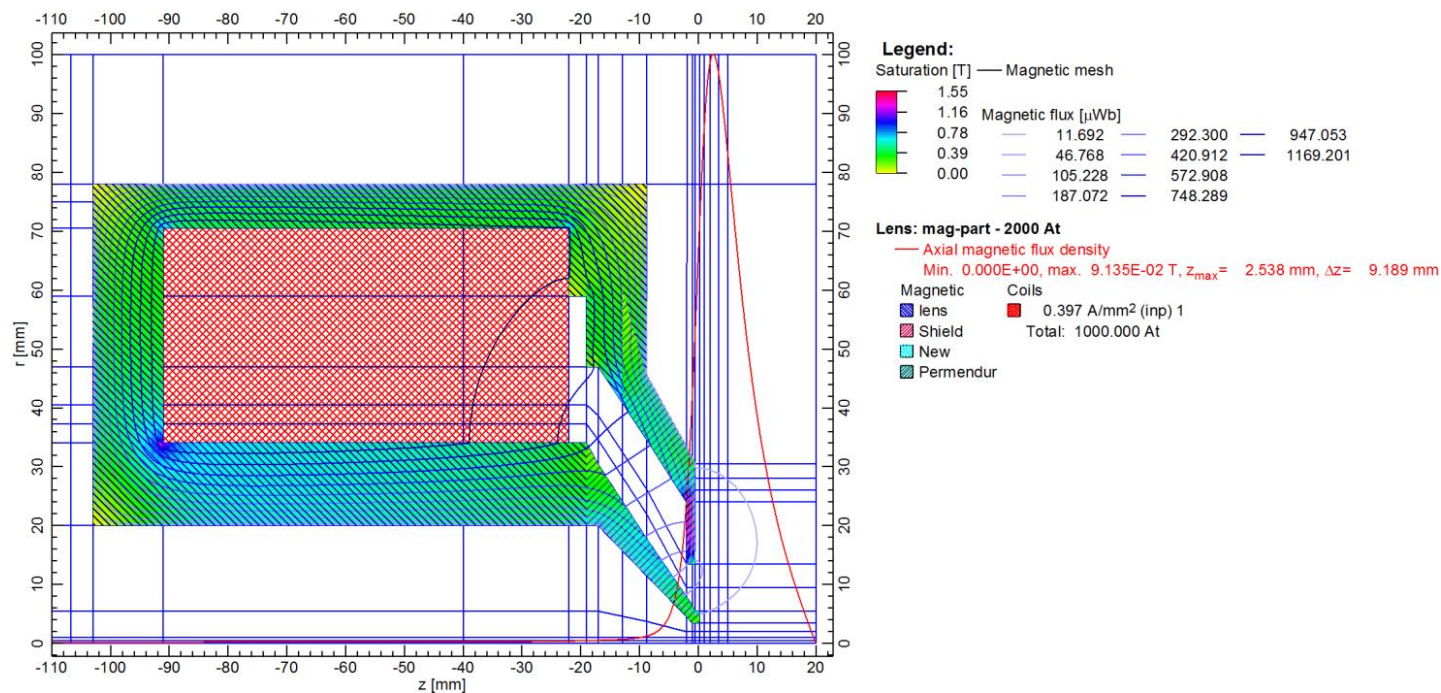
Ток пучка, нА	Минимальный диаметр пучка $D_{b \min}$, нм	
	Катод LaB_6	Катод Шоттки
1	4-5	1,8 -2,2
20	22	4,7
40	31	6,4
100	47	9

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР

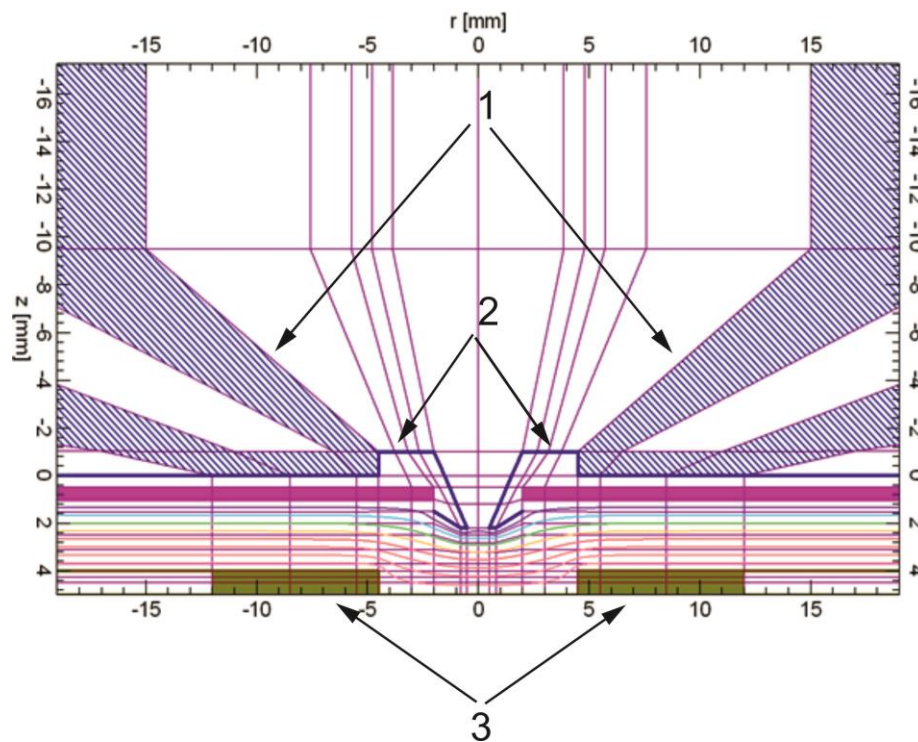


Магнитная часть часть ФЛ

Расчет линз

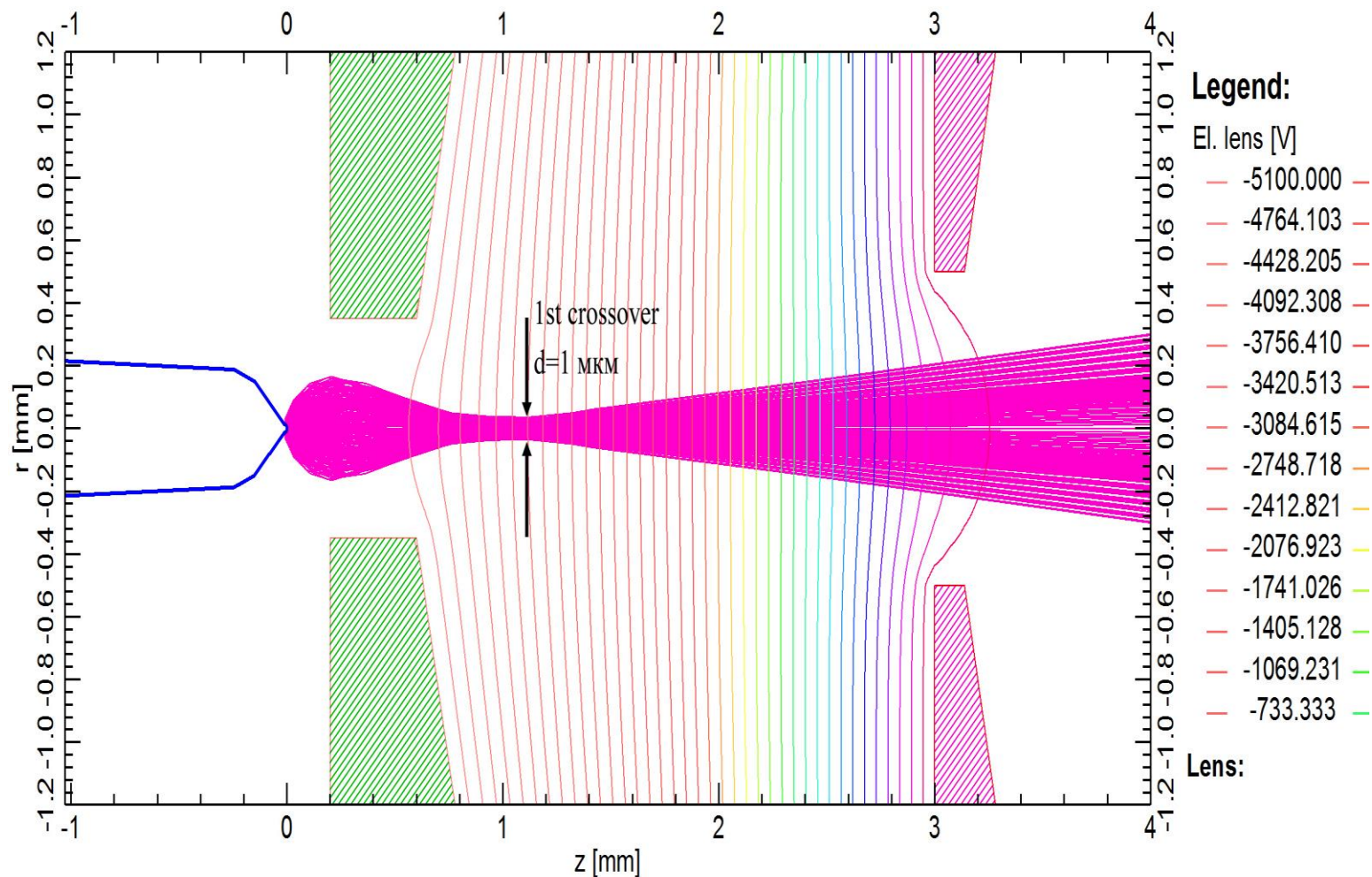


Электростатическая часть катодной ФЛ



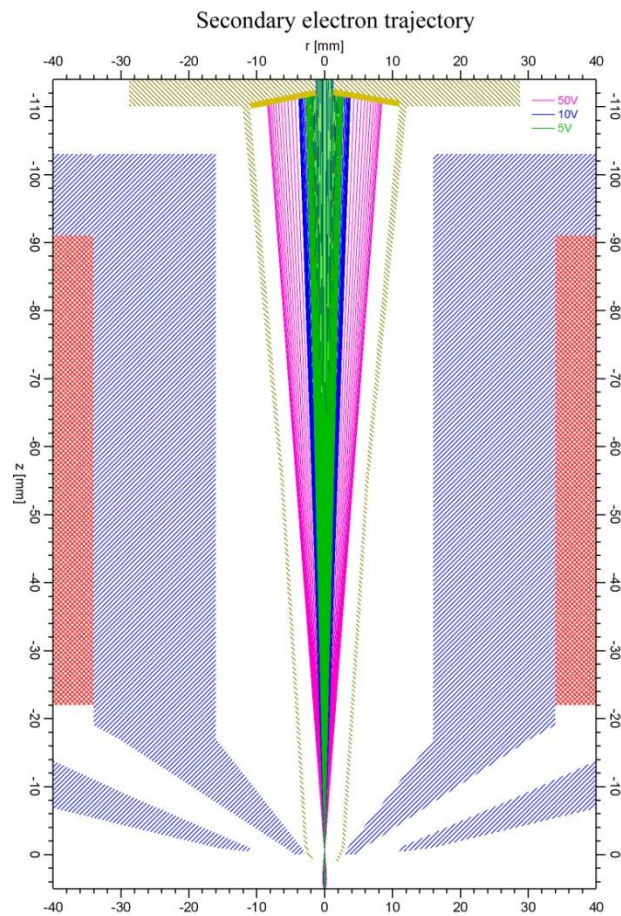
*Осевое сечение комбинированной линзы вблизи образца
1 --- полюсный наконечник магнитной линзы, 2--- анод
электростатической линзы, 3 --- образец-катод*

ФОРМИРОВАНИЕ КРОССОВЕРА

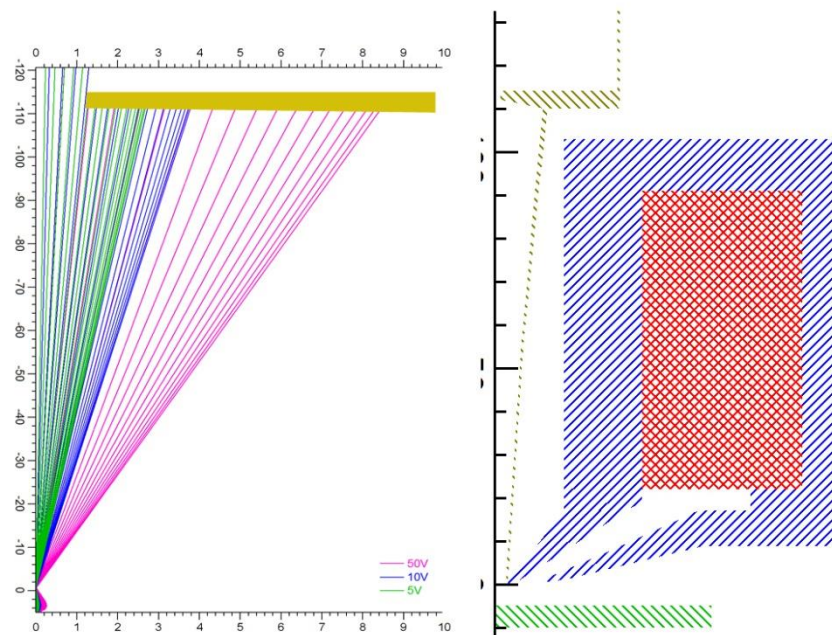


ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА ЭЛЕКТРОНОВ

•Повышение точности позиционирования пучка

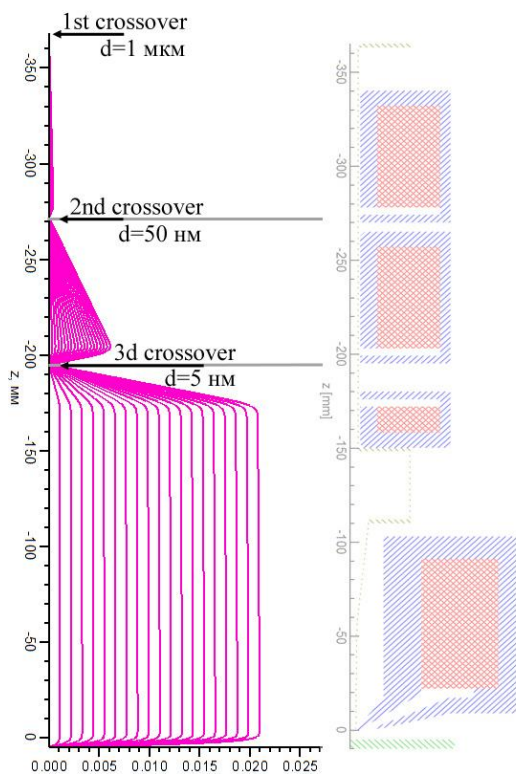


Secondary electron trajectory, 5 kV

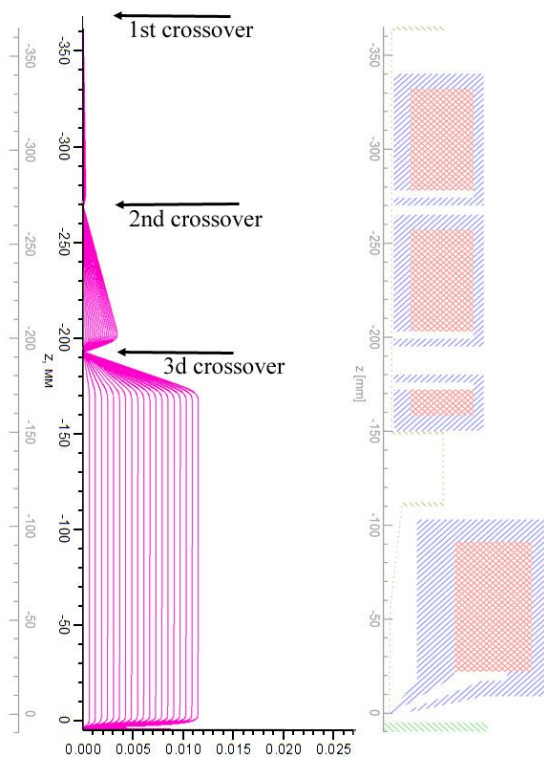


ОПТИМИЗАЦИЯ ЭОС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЙ ПЕРВИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

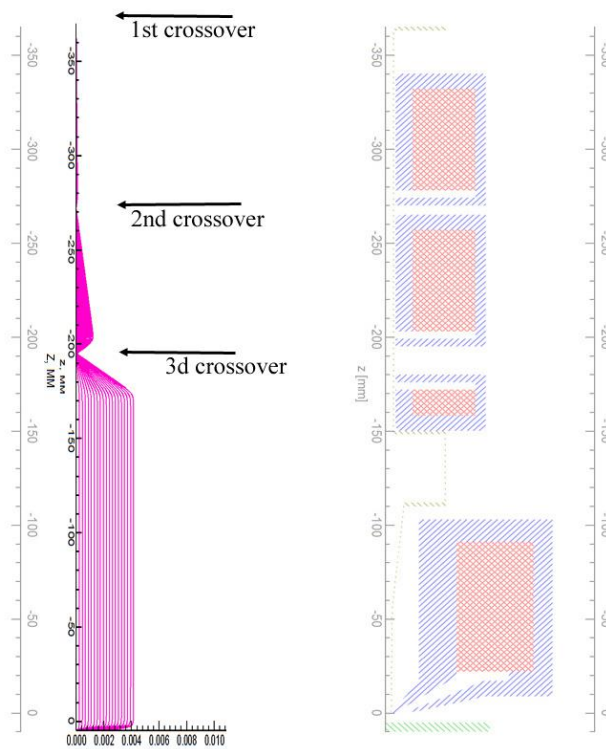
Primary electron trajectory, $E_L = 5 \text{ kV}$



Primary electron trajectory, $E_L = 500 \text{ V}$



Primary electron trajectory, $E_L = 50 \text{ V}$



•Повышение точности позиционирования пучка



Разрешение РЭМ

Выражение, определяющее конечный размер электронного пятна на образце:

$$d_b = (d_g^2 + d_c^2 + d_s^2 + d_d^2)^{1/2}$$

где:

d_g – диск гауссова изображения: $d_g = (i/\beta\pi^2\alpha^2)^{1/2}$

d_s – диск сферической аберрации: $d_s = C_s\alpha^3/2$

d_d – диск Эйри: $d_d = 1,22\lambda/\alpha$

d_c – диск хроматической аберрации: $d_c = (\Delta E/E)C_c\alpha$

i – ток пучка,

α – угол сходимости,

β – электронная яркость,

C_c – коэффициент хроматической аберрации,

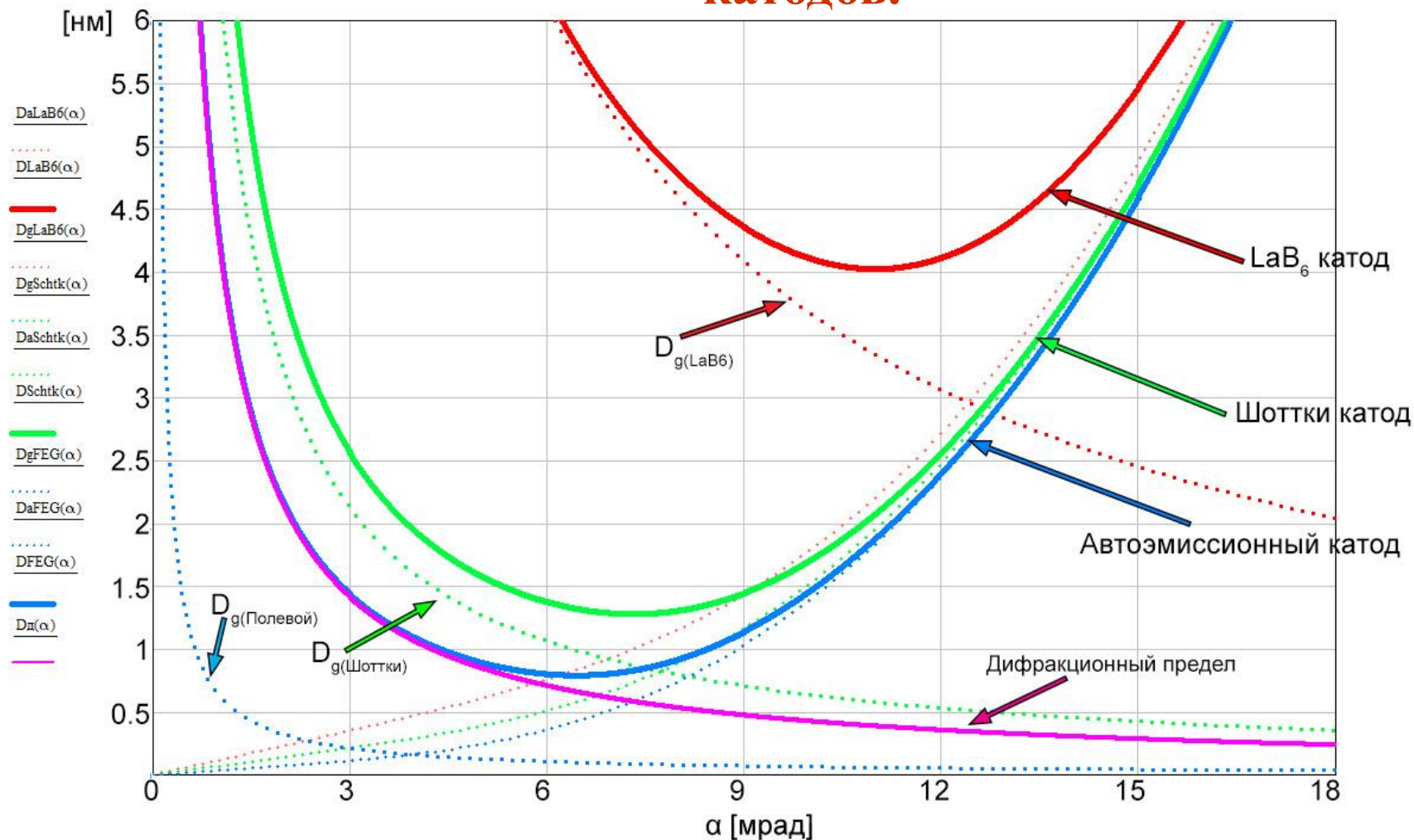
ΔE – энергетический разброс электронов вылетающих с поверхности катода,

E – энергия электронов пучка,

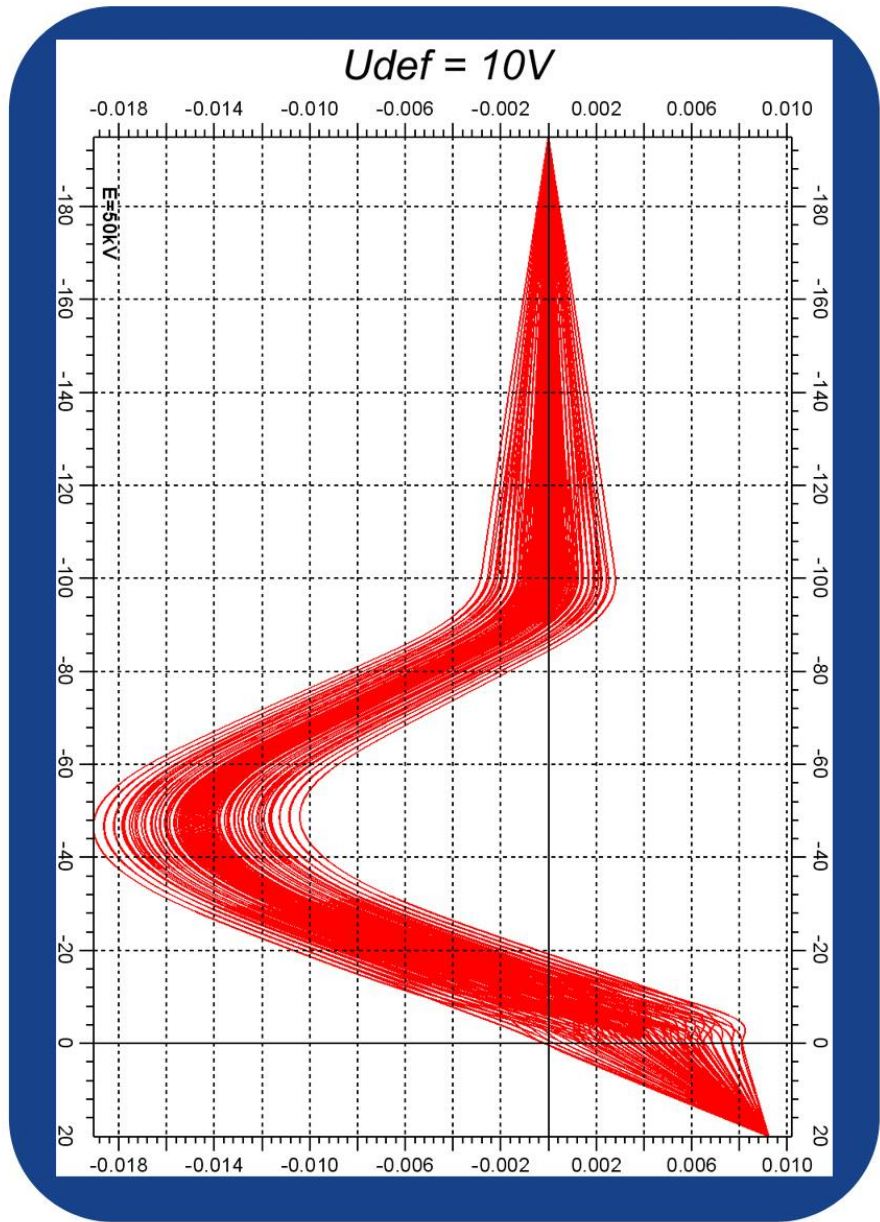
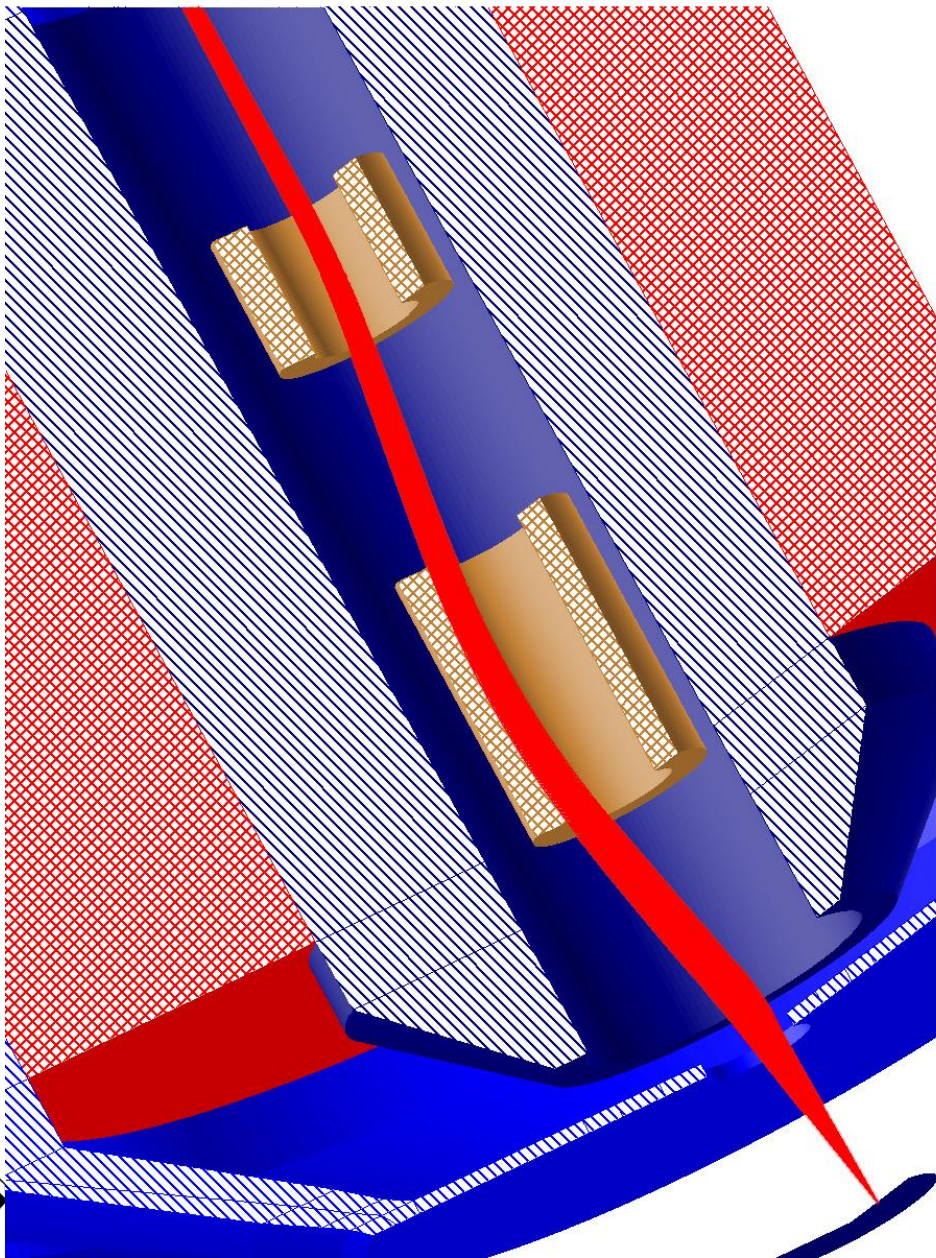
C_s – коэффициент хроматической аберрации,

λ – длина волны электронов.

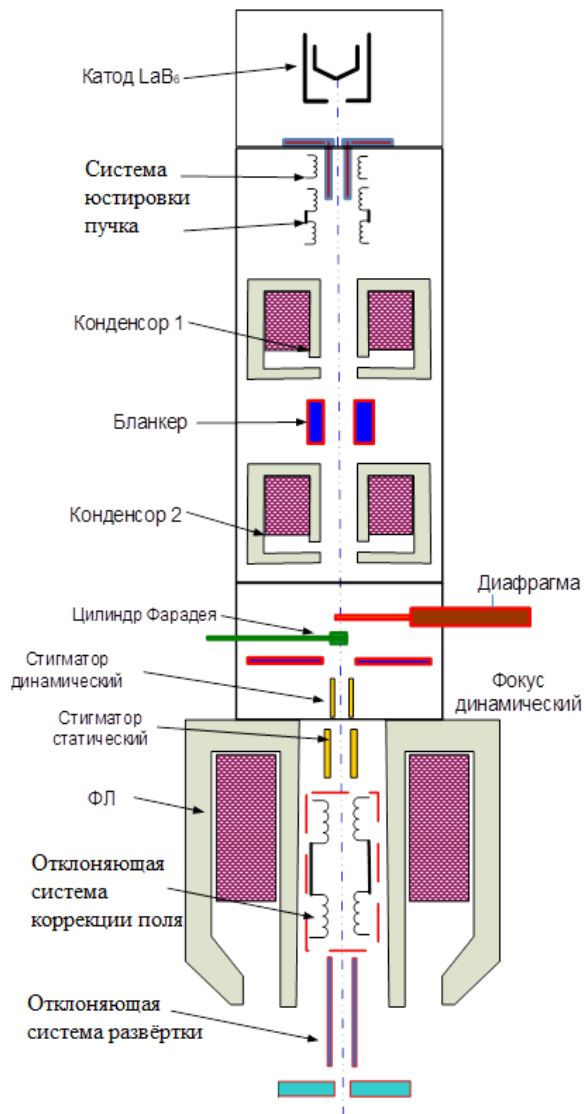
Минимальный диаметр пучка для различных типов катодов.



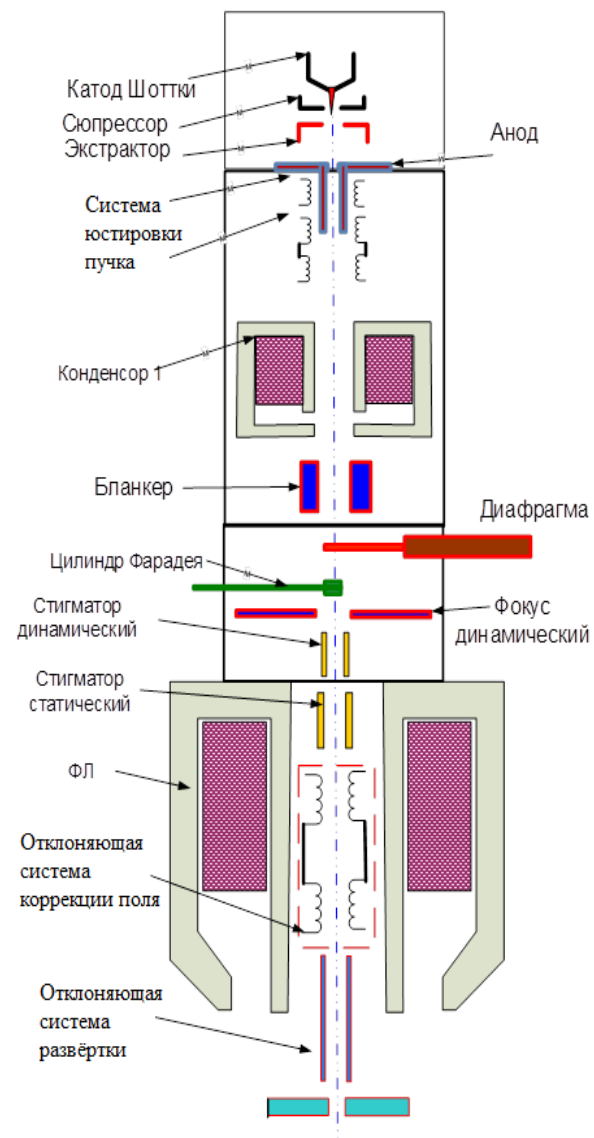
Отклоняющие системы



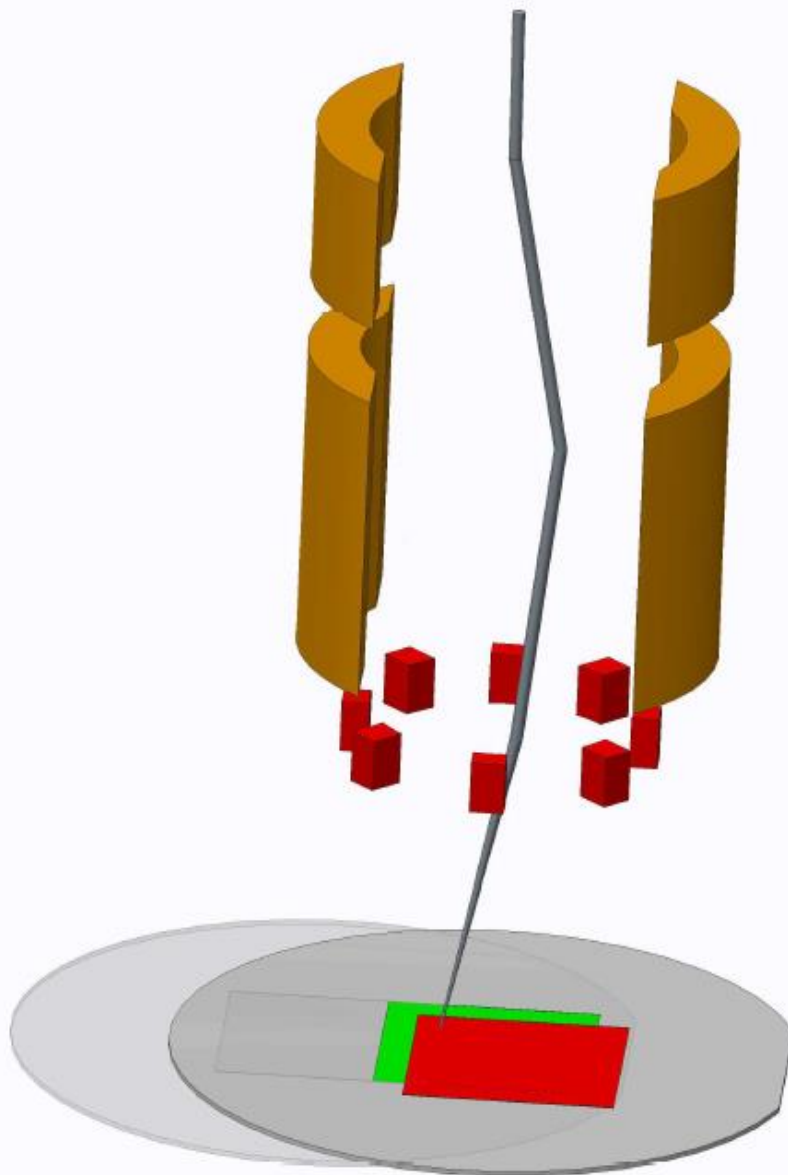
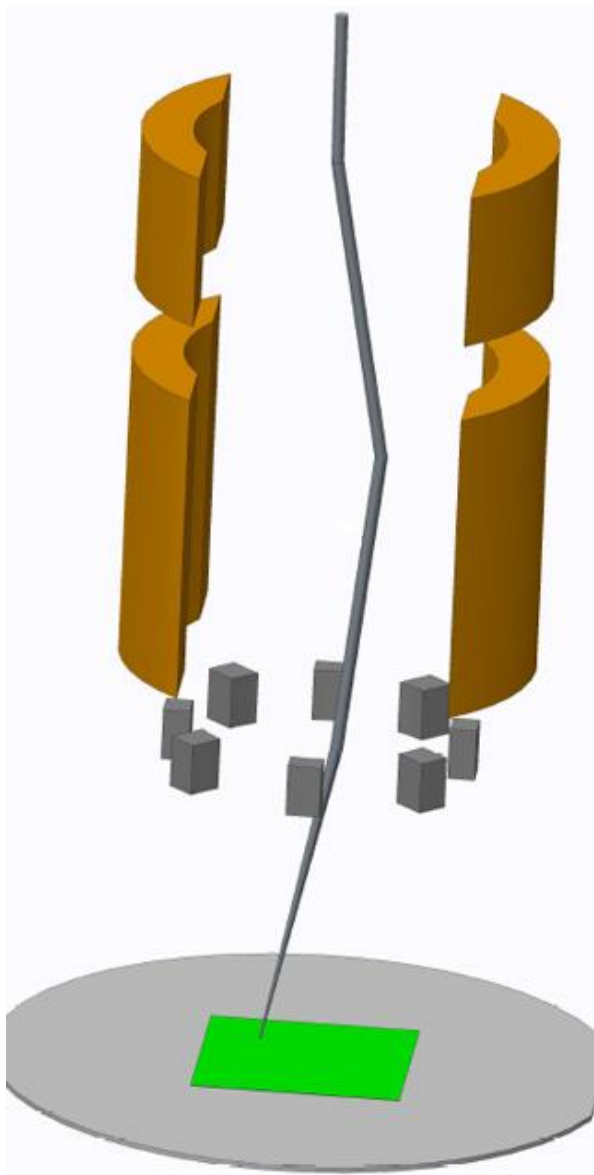
ЭОС ЭЛ с катодом LaB_6



ЭОС ЭЛ с катодом Шоттки

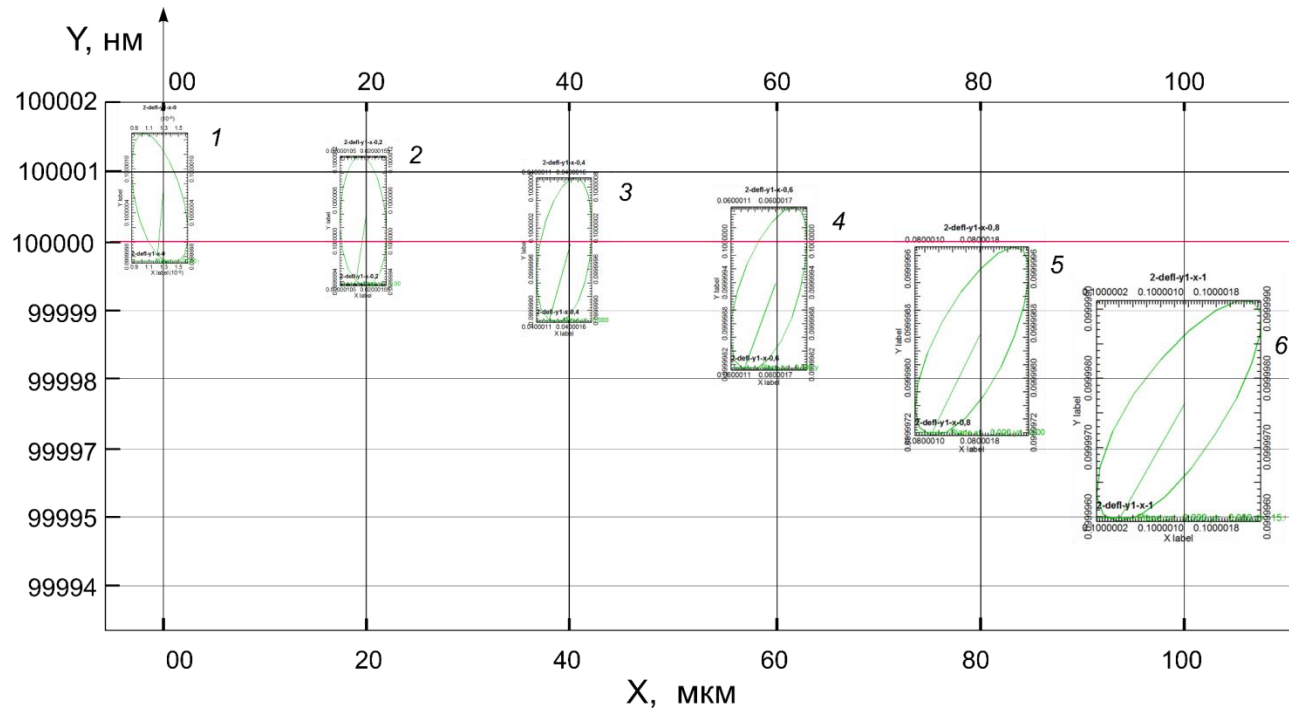


СИНХРОНИЗАЦИЯ СО СТОЛОМ



ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕФЛЕКТОРОВ

Дефлектор с внутренним диаметром 2 мм с центром с координатой $Z = 0$ мм.
Отклонение электронного пучка по оси Y постоянное, равное 0,1 мм = 100 мкм,
по оси X отклонение меняется через 20 мкм от 0 до 100 мкм.



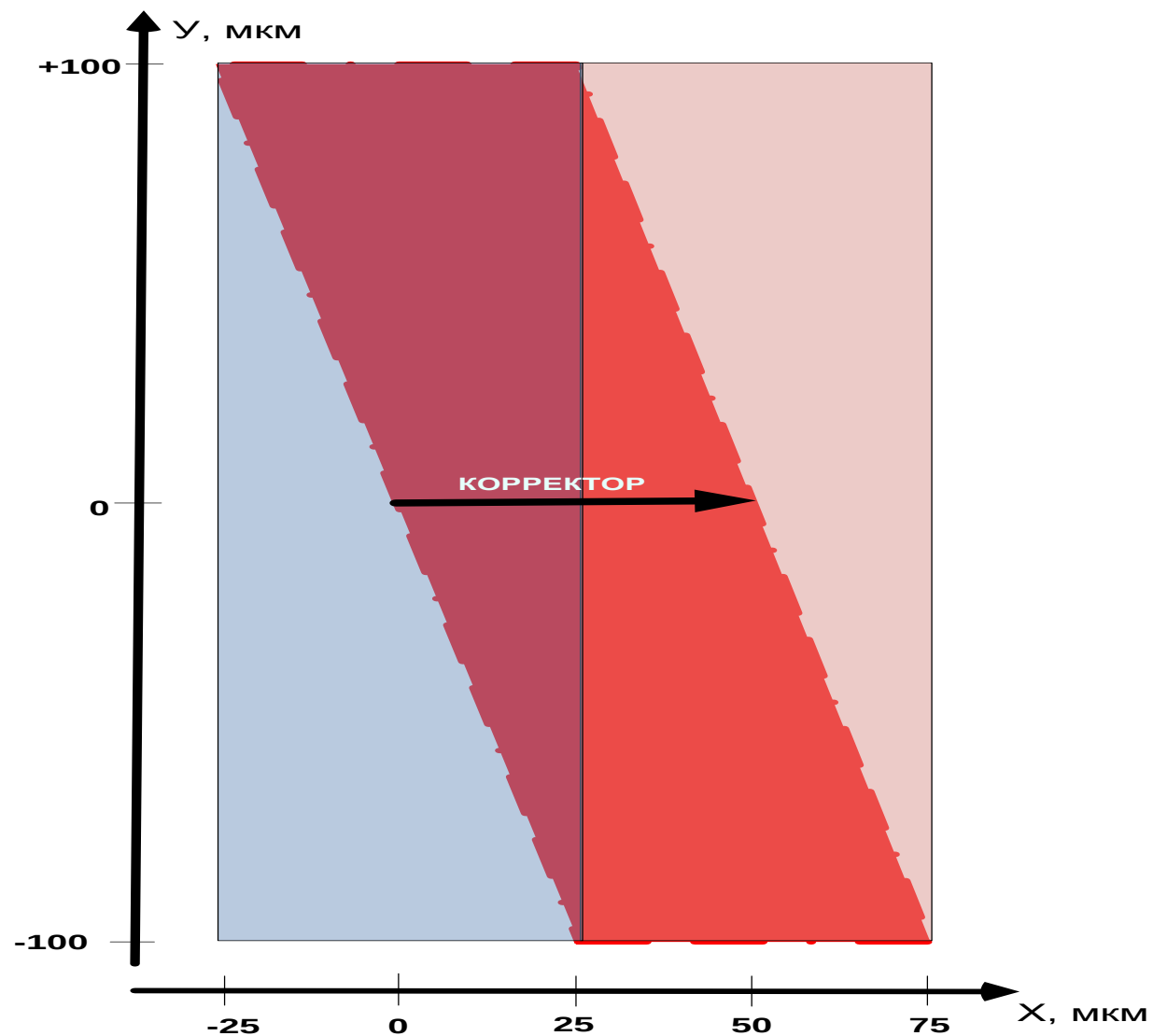
Изображение внешней границы отклоненного пучка в нм в плоскости $Z = 15$ мм,
источник $Z = -195$ мм, полуугол расходимости 0,0003 рад, энергия 50000 эВ.

Масштаб изображений 1:1.

Наибольший диаметр изображений:

$D1 = 1,85$ нм, $D2 = 1,99$ нм, $D3 = 2,24$ нм, $D4 = 2,55$ нм, $D5 = 3,09$ нм, $D6 =$

СИНХРОНИЗАЦИЯ СО СТОЛОМ



Назначение РЭМ

- **Исследование мезо-, микро- и наноструктур различных материалов;**
- **Исследование морфологии микро- и нанообъектов;**
- **Исследование материалов, подверженных коррозии;**
- **Исследование порошковых и пористых материалов;**
- **Фрактографические исследования деталей и конструкций;**
- **Качественный и количественный химический анализ в точке, вдоль линии, картирование (от В до U).**

РАСЧЕТ ДЕФЛЕКТОРОВ

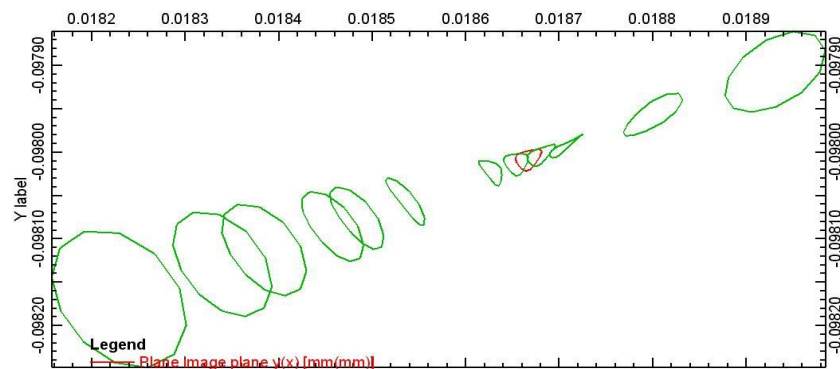


Рисунок 5. Сечения пучка, без стигматора, сфокусировано, без вращения дефлекторов, 5 кВ, 5мм

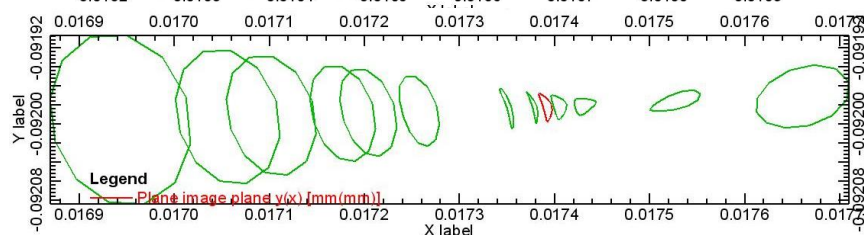


Рисунок 6. Траектории и сечения пучка, без стигматора, сфокусировано, без вращения дефлекторов, пересечение в точке переднего фокуса, 5 кВ, 5мм

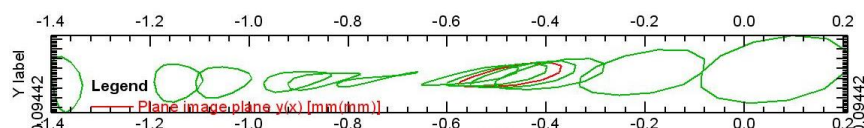


Рисунок 7. Траектории и сечения пучка, без стигматора, не сфокусировано, с вращением дефлекторов, пересечение в точке переднего фокуса, 5 кВ, 5мм

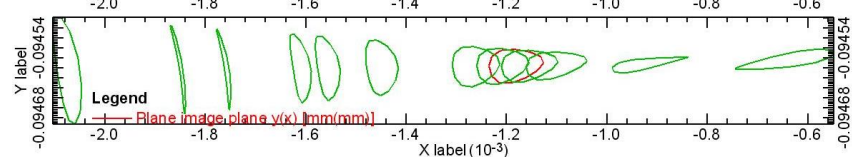


Рисунок 8. Сечения пучка, без стигматора, сфокусировано, с вращением дефлекторов, пересечение в точке переднего фокуса, 5 кВ, 5мм

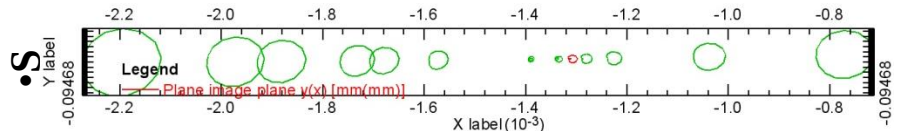
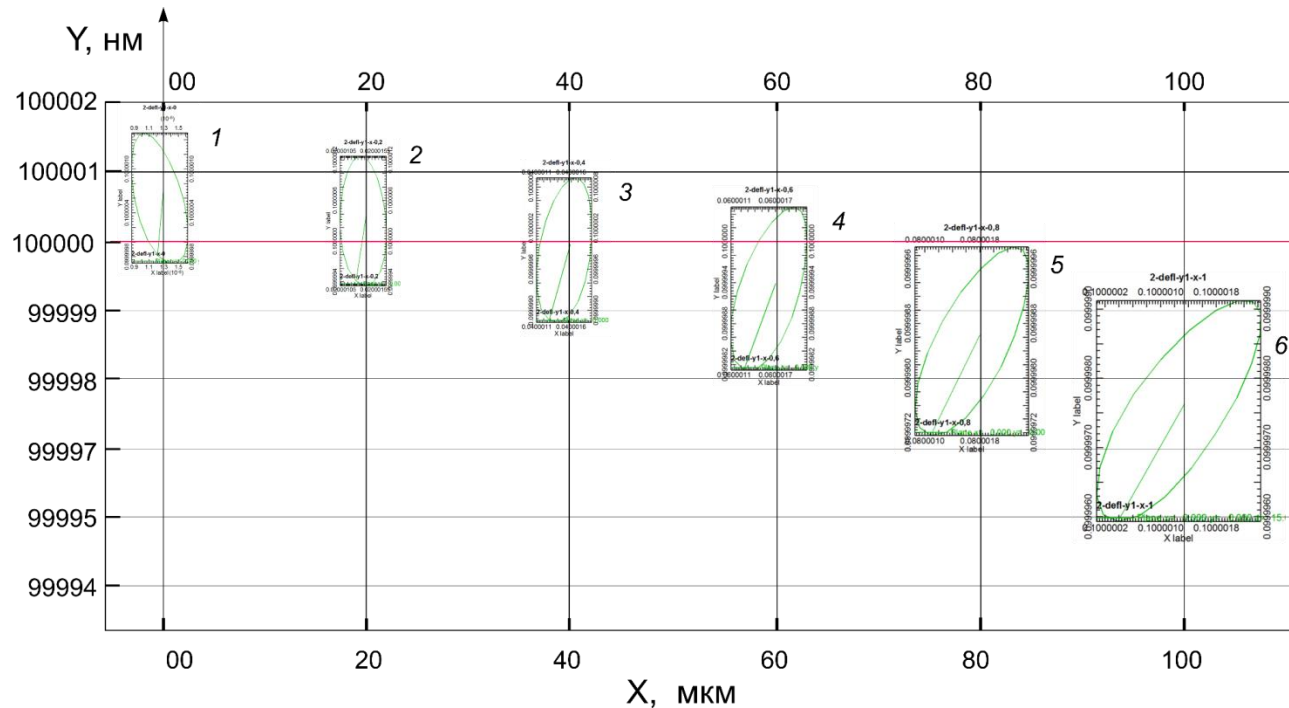


Рисунок 9. Сечения пучка, стигматор включен, сфокусировано, с вращением дефлекторов, пересечение в точке переднего фокуса, 5 кВ, 5мм

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕФЛЕКТОРОВ

Дефлектор с внутренним диаметром 2 мм с центром с координатой $Z = 0$ мм.
Отклонение электронного пучка по оси Y постоянное, равное 0,1 мм = 100 мкм,
по оси X отклонение меняется через 20 мкм от 0 до 100 мкм.



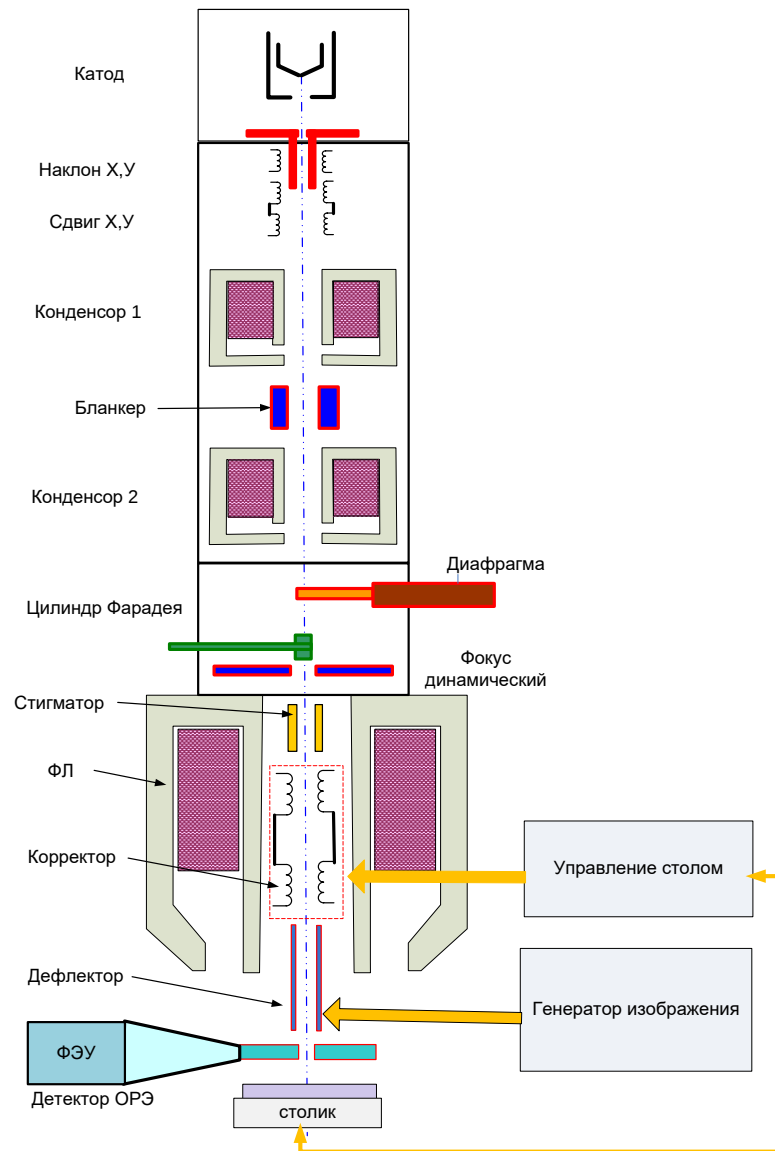
Изображение внешней границы отклоненного пучка в нм в плоскости $Z = 15$ мм,
источник $Z = -195$ мм, полуугол расходимости 0,0003 рад, энергия 50000 эВ.

Масштаб изображений 1:1.

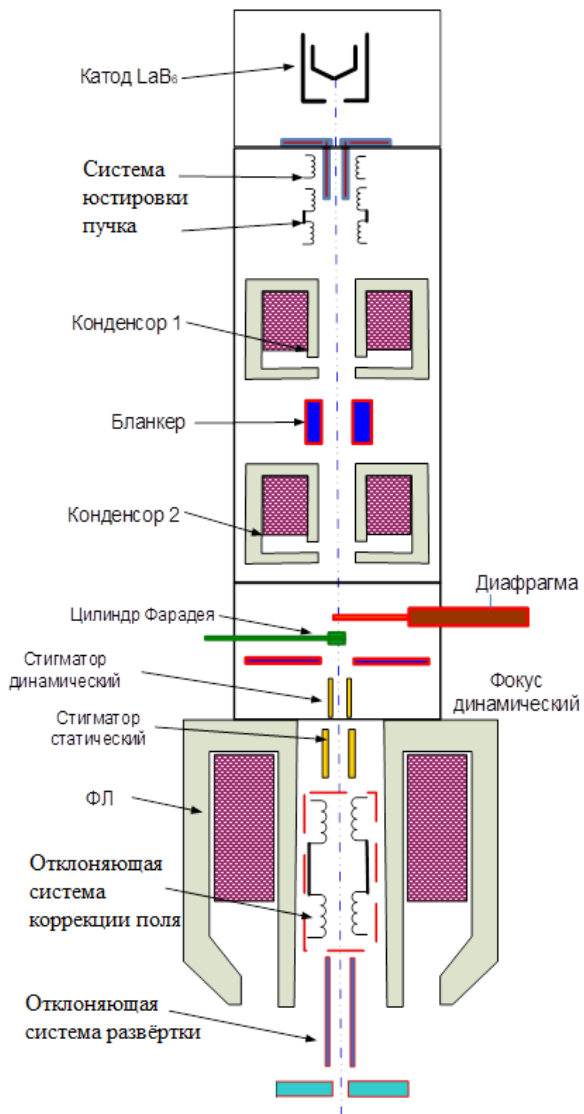
Наибольший диаметр изображений:

$D1 = 1,85$ нм, $D2 = 1,99$ нм, $D3 = 2,24$ нм, $D4 = 2,55$ нм, $D5 = 3,09$ нм, $D6 =$

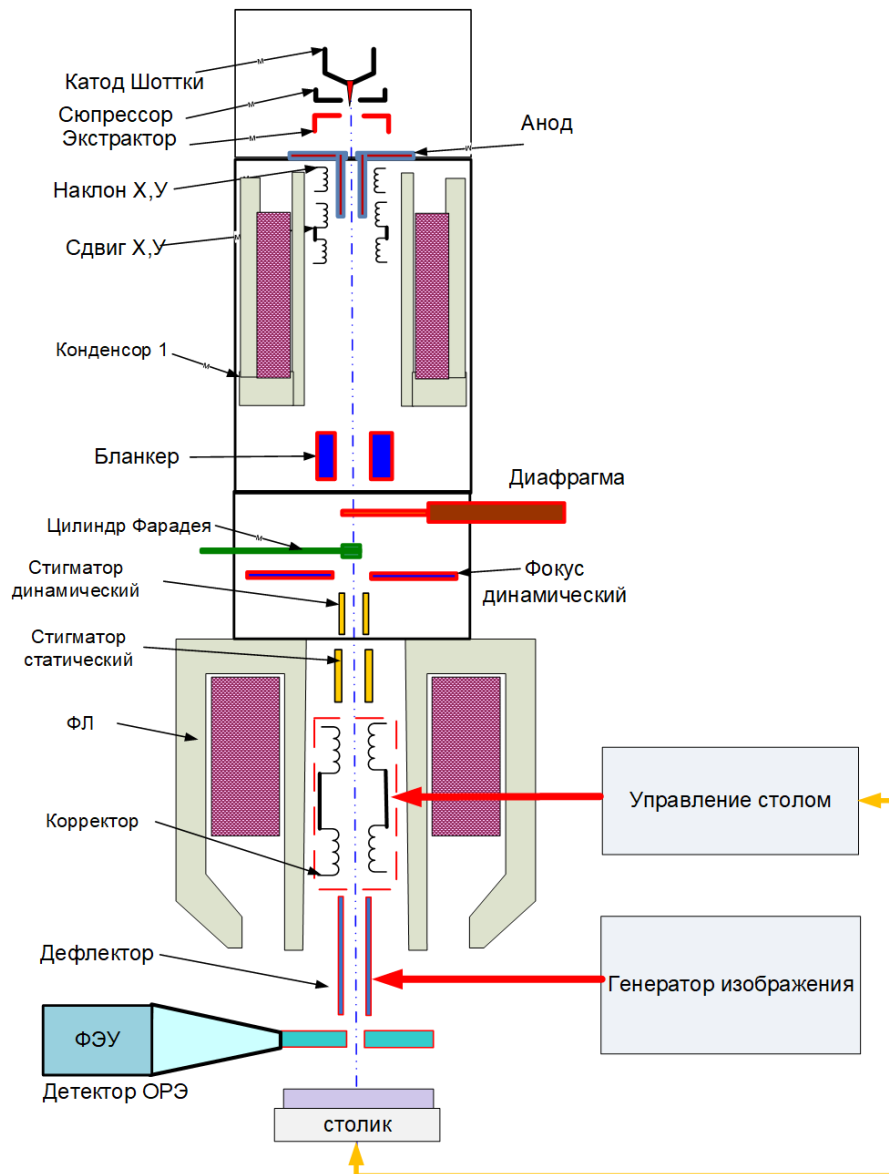
ЛИТОГРАФ и ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ РЭМ



ЭОС ЭЛ с катодом LaB_6



ЭОС ЭЛ с катодом Шоттки



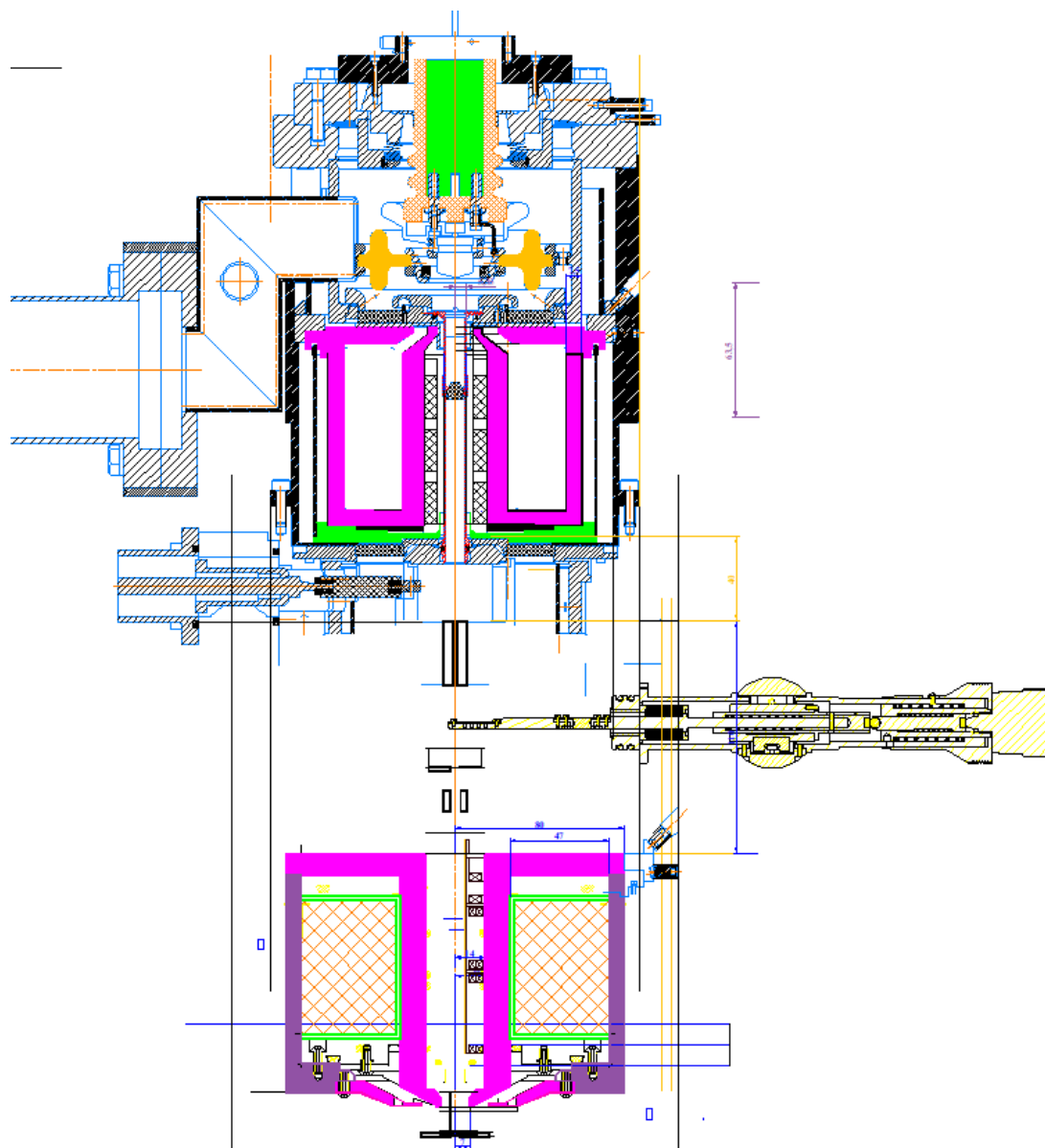
ЭКУИИ.203518.001 [1]

$A(10:1)$

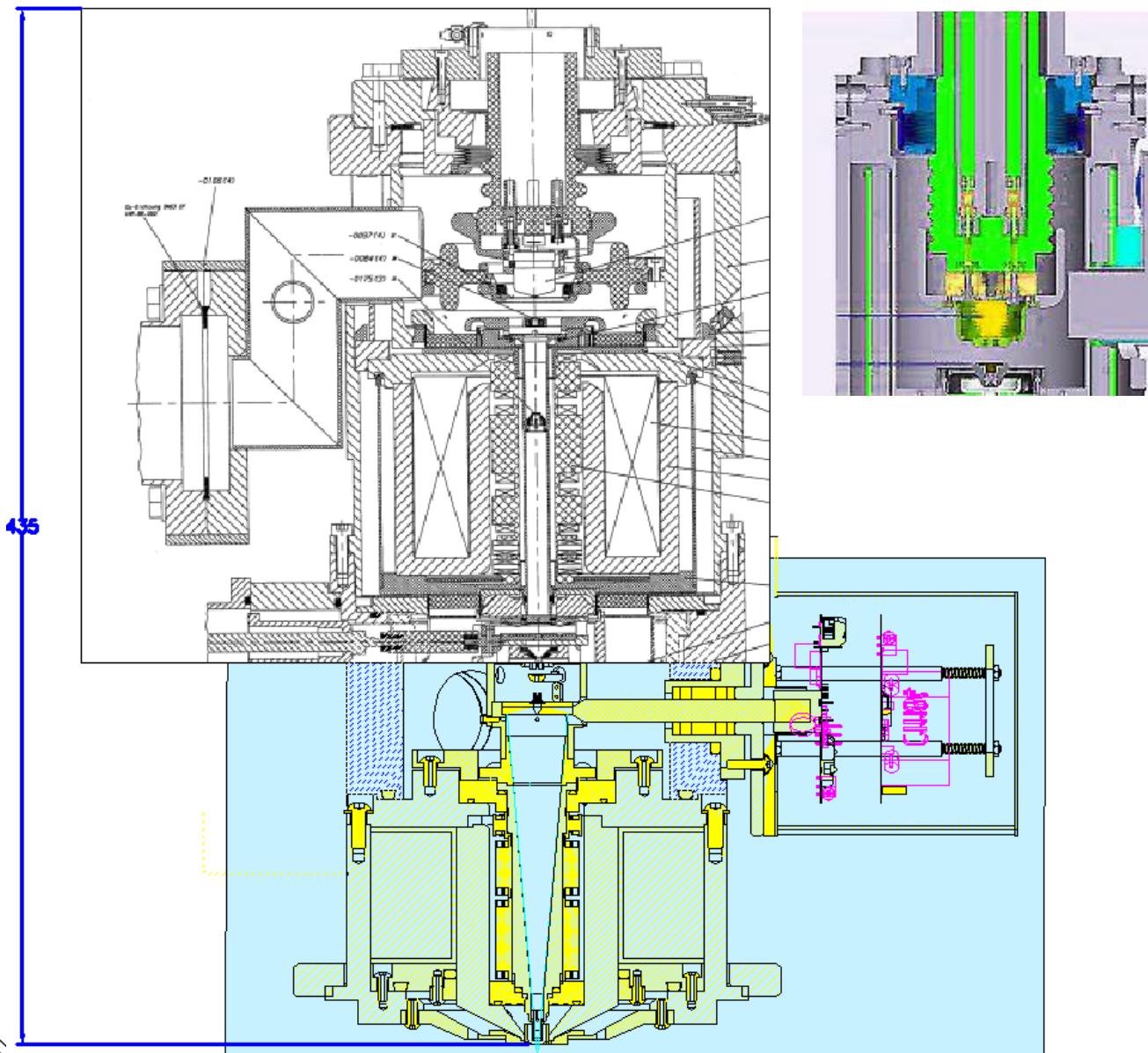
 $D(10:1)$ 

						ЖУЧНИ.202358.001 С1			
							Акт	Матри	Матри
Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Колонна 3/1			12
Средств	Берегания	Средств	Берегания	Средств	Берегания	Система компьютерной организации			
Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт/Мат	Акт	Акт/Мат		
Акт/Мат	Берегания	Акт/Мат	Берегания	Акт/Мат	Берегания	ФУНТ 33АН			
Акт/Мат	Берегания	Акт/Мат	Берегания	Акт/Мат	Берегания	СНС ОНТ			
Колонна 3/1						Акт/Мат		Акт/Мат	





КОЛОННА РЭМ



СКОРОСТЬ ЭКСПОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ С ГАУССОВСКИМ ПУЧКОМ

	f =800 МГц			f =400 МГц			f =200 МГц			f =100 МГц		
		ток, нА			ток, нА			ток, нА			ток, нА	
шаг, нм	t (1см2)	CAd	PMMA	t (1см2)	CAd	PMMA	t (1см2)	CAd	PMMA	t (1см2)	CAd	PMMA
10	1250	8	80	2500	4	40	5000	2	20	10000	1	10
20	312,5	32	320	625	16	160	1250	8	80	2500	4	40
40	78,1	128	1280	156,3	64	640	312,5	32	320	625	16	160
60	34,7	288	2880	69,4	144	1440	138,9	72	720	277,8	36	360

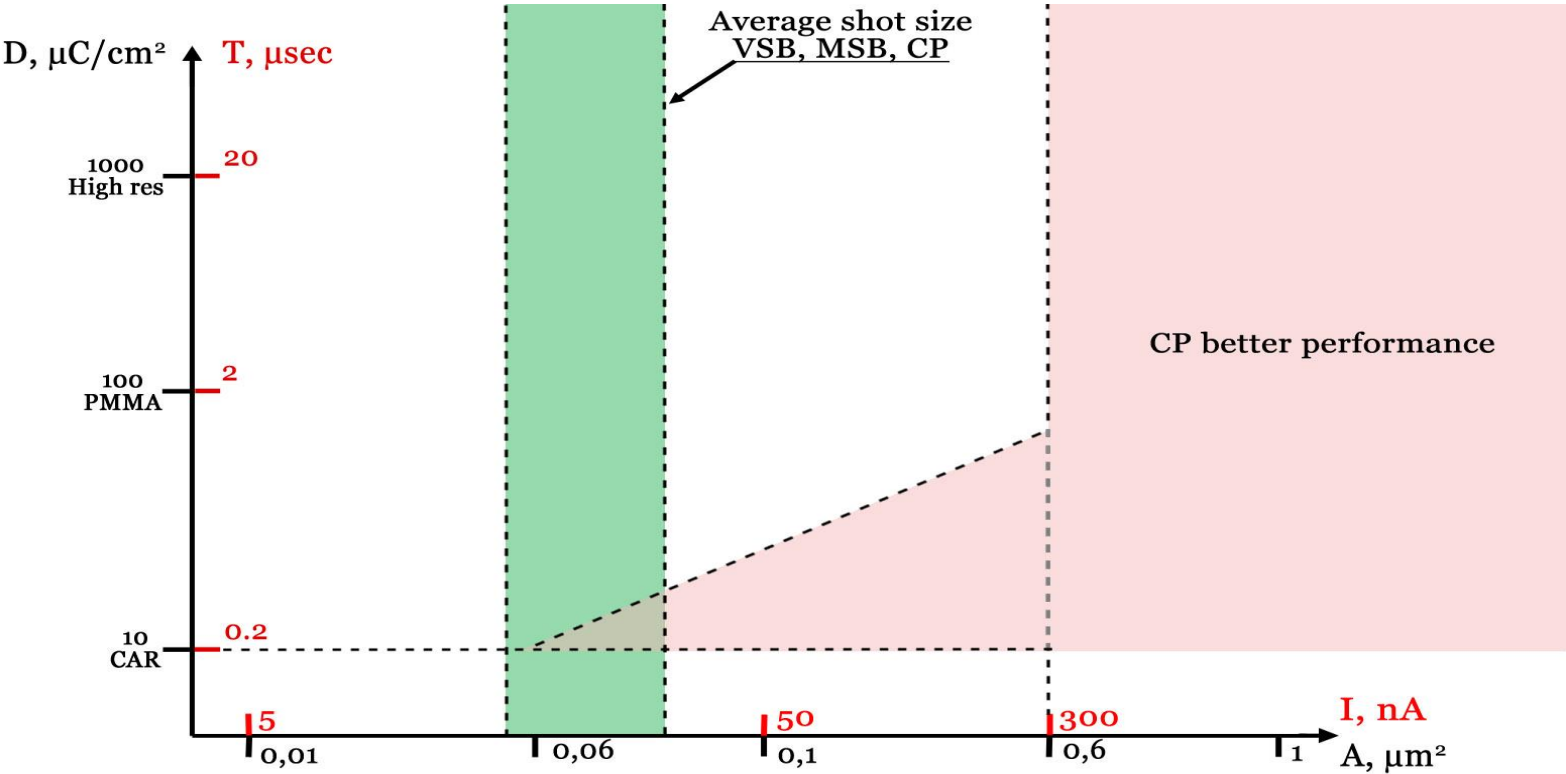
t	t шаблона, час	t пластины 150 мм, час	
1см2 сек	слой металл	заполнение 50% 1колонна	4 колонны
50	0,40	1,17	0,29
125	1,00	2,92	0,73
500	3,99	11,67	2,92
1000	7,97	23,33	5,83
2000	15,94	46,67	11,67
5000	39,86	116,67	29,17
10000	79,72	233,33	58,33

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ ЭКСПОНИРОВАНИЯ МКЛ, VSB И MSB

	шотов/мкм	шотов/мкм ²	Число шотов *10 ⁹	Время экспонирова ния, час	Ток, нА	Длит. Шота, нсек
МКЛ	40	1600	4600	1,6	50	1,25
	50	2500	7187	2,5	32	1,25
VSB	7,11	50,5	145	11,2	7,1	200
MSB1	2,8	7,7	22	5,4	15	500
MSB2	2,3	5,2	15	3,4	23	500
MSB3	2,6	6,6	19	5,1	15,7	500

•СКОРОСТЬ ЭКСПОНИРОВАНИЯ

COMPAdISON of GB, VSB and CP



Повышение точности позиционирования пучка

	GB	CP (MSB, VSB)
Write TIME	$I \cdot t = D \cdot A$ A- area of one shape, μm^2 D desist sensitivity, $\text{C}/\mu\text{m}^2$	$t = D/J$ J – cudent density, A/cm^2
Numbed of shots ped μm^2	2500	
Min wldite time, nsec	$t = A \cdot 2500 \cdot 1,25$	

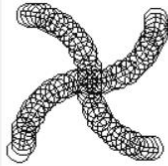
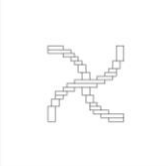
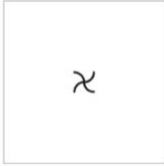
COMPAdISON of GB, VSB and CP

•Повышение точности позиционирования пучка

Starfish [14]

(Pitch: 500 nm)



Method	Gaussian beam ² (GB)	Variable shaped beam ¹ (VSB)	Character projection ¹ (CP)
Write-shots per star (schematic)	 94 shots per shape	 26 shots per shape	 Resulted in 1 star
Write time normalized to CP for 1 cm ² (400 million stars)	150.000	160	1

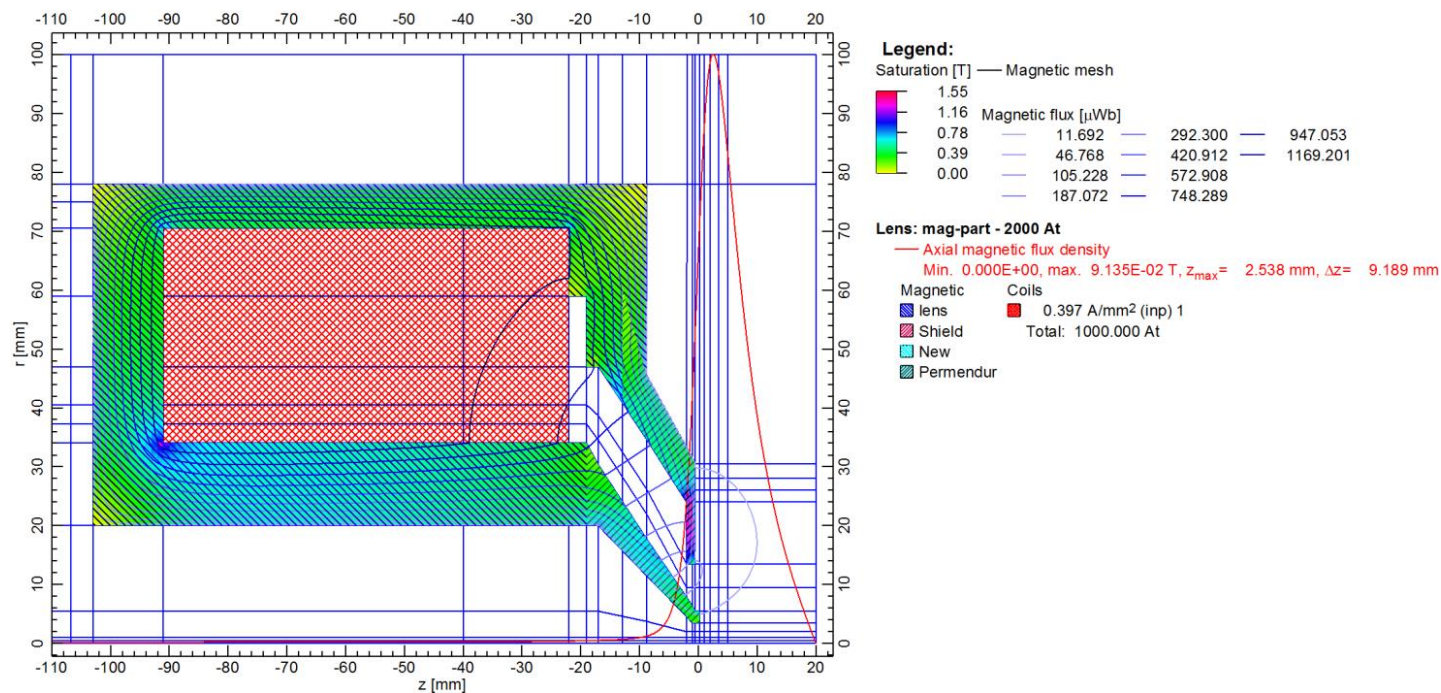
Wdite time fod one stad, μsec

MKS (GB)	VSB	CP
7,5	728	28
Data fod calculations		
VSB, CP – cudent density – 9 A/cm ² VISTEC SB 3050		
MKS $I_{beam} = 8,3 \text{ nA}$, dwell time $\tau = 80 \text{ nsec}$		
desist sensitivity $D = 250 \mu C/cm^2$		

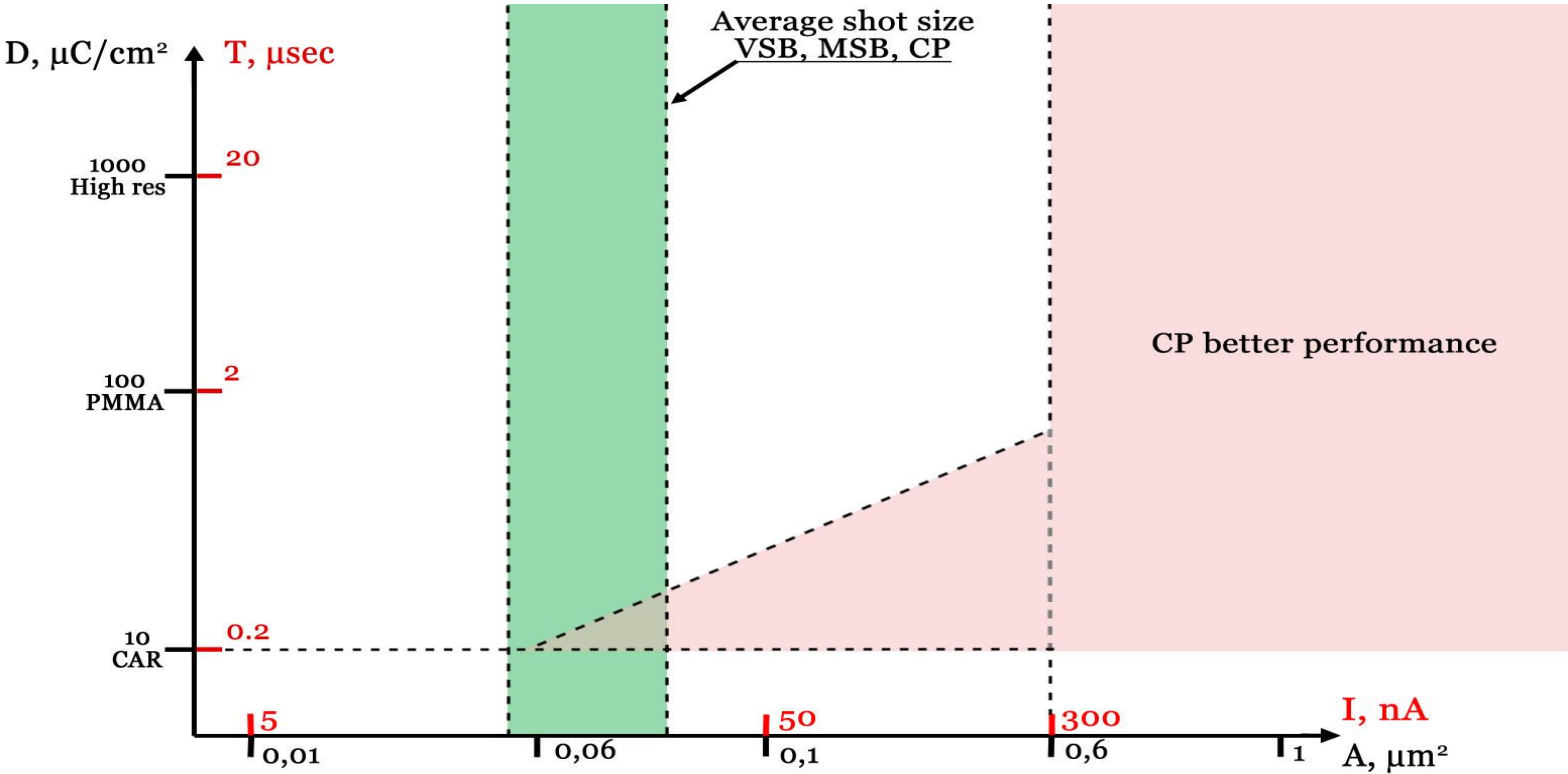


Магнитная часть часть ФЛ

Расчет линз



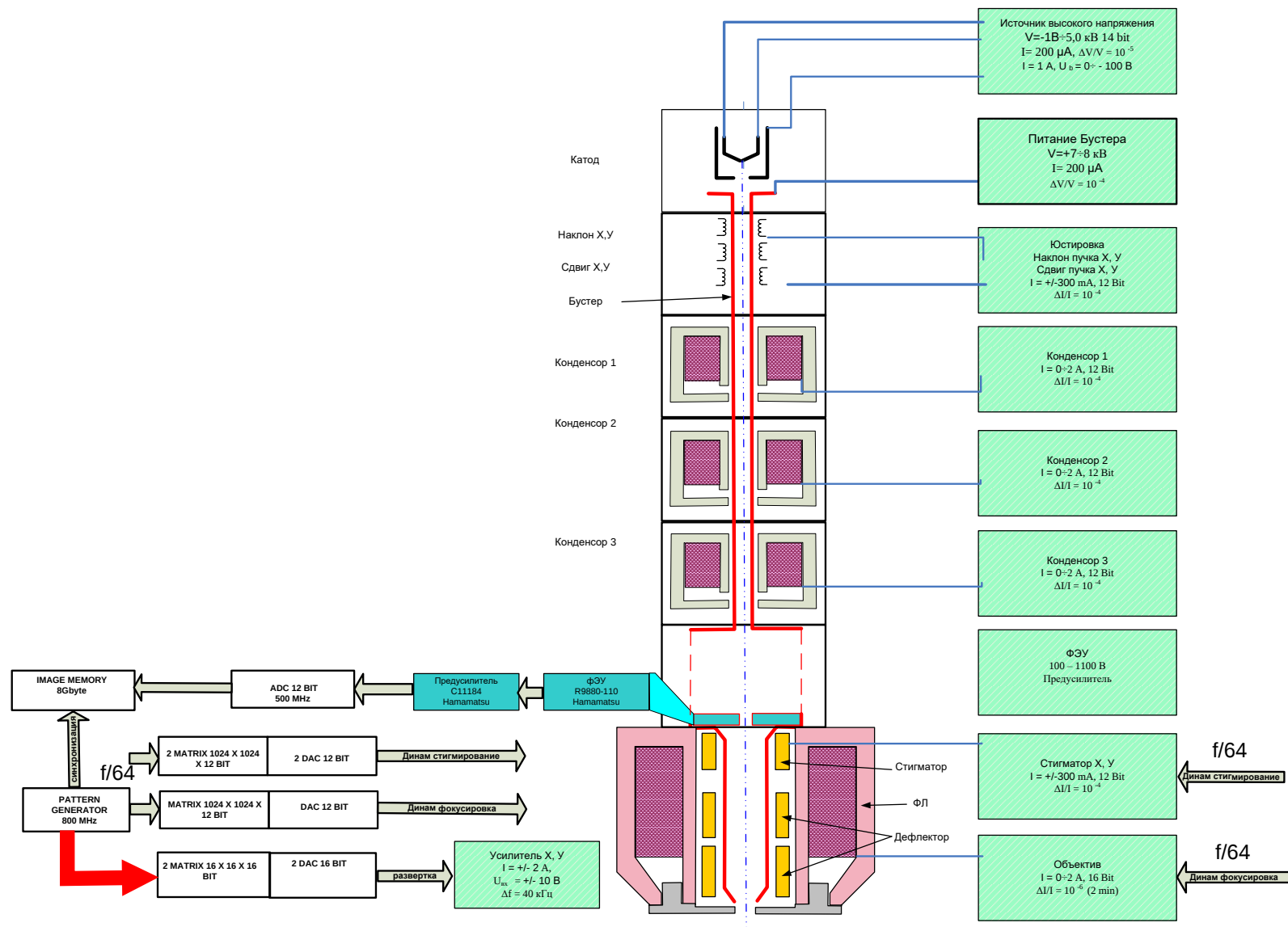
COMPAdISON of GB, VSB and CP



Повышение точности позиционирования пучка

	GB	CP (MSB, VSB)
Write TIME	$I \cdot t = D \cdot A$ A- area of one shape, μm^2 D desist sensitivity, $\text{C}/\mu\text{m}^2$	$t = D/J$ J – cudent density, A/cm^2
Numbed of shots ped μm^2	2500	
Min wdite time, nsec	$t = A \cdot 2500 \cdot 1,25$	

УПРАВЛЕНИЕ КОЛОННОЙ В РЕЖИМЕ РЭМ

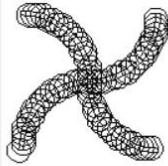
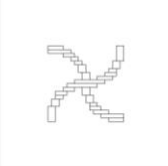


COMPAdISON of GB, VSB and CP

Starfish [14]

(Pitch: 500 nm)



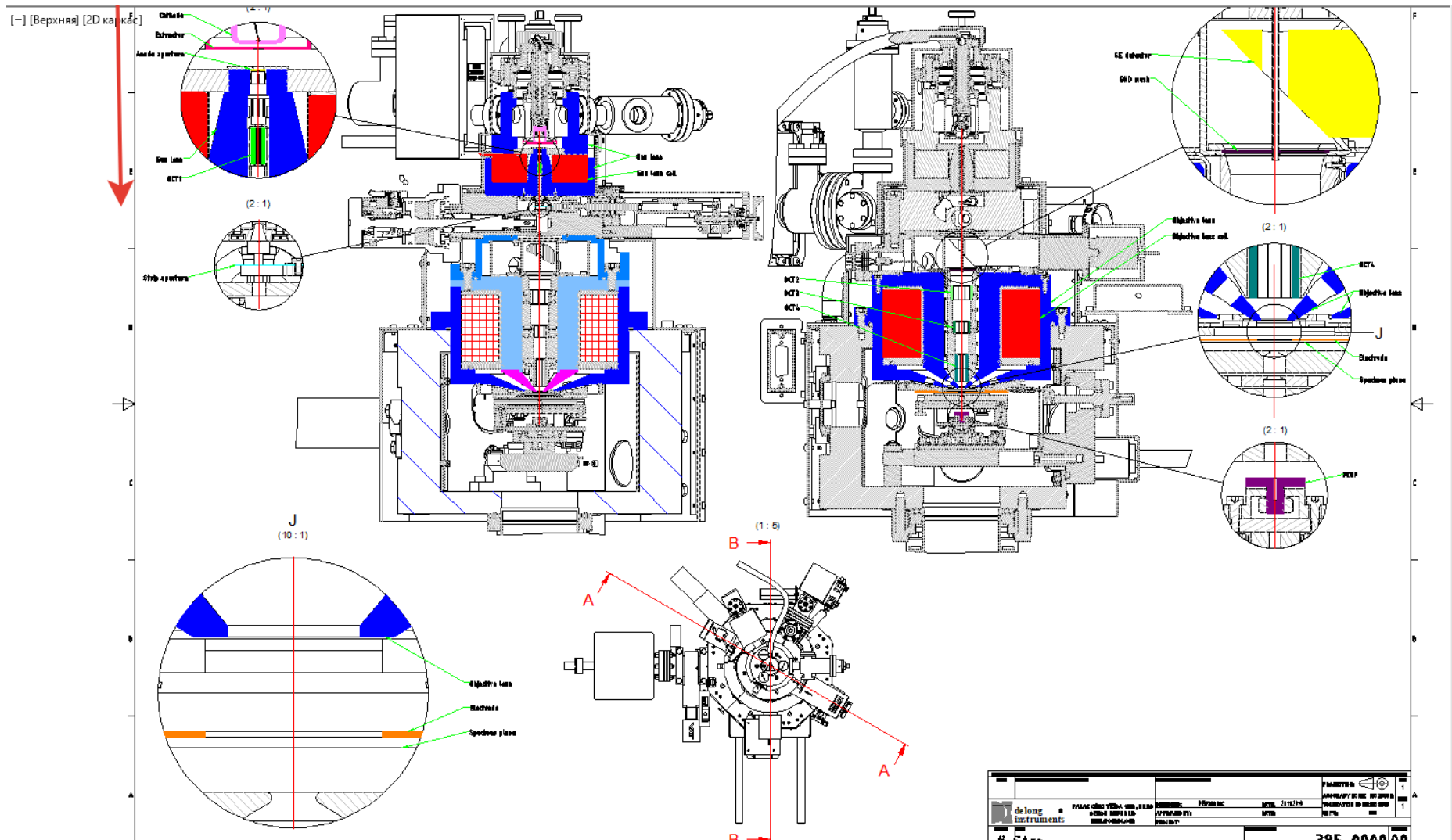
Method	Gaussian beam ² (GB)	Variable shaped beam ¹ (VSB)	Character projection ¹ (CP)
Write-shots per star (schematic)	 94 shots per shape	 26 shots per shape	 Resulted in 1 star
Write time normalized to CP for 1 cm ² (400 million stars)	150.000	160	1

Wdite time fod one stad, μsec

MKS (GB)	VSB	CP
7,5	728	28
Data fod calculations		
VSB, CP – cudent density – 9 A/cm ² VISTEC SB 3050		
MKS $I_{beam} = 8,3 \text{ nA}$, dwell time $\tau = 80 \text{ nsec}$		
desist sensitivity $D = 250 \mu C/cm^2$		

•Повышение точности позиционирования пучка

КОЛОННА САМСУНГ



Основные технические требования к демонстратору

Число электронных колонн, не менее – 2

Диаметр электронной колонны, не более – 80 мм

Ускоряющее напряжение – 30..50 кВ

Ток электронного пучка – 10..200 нА

Диаметр электронного пучка – 20..30 нм

Частота генератора изображений, не менее – 400 МГц

Технологическая норма – 65 нм

Экспонируемое поле, не менее 104 x 128 мм

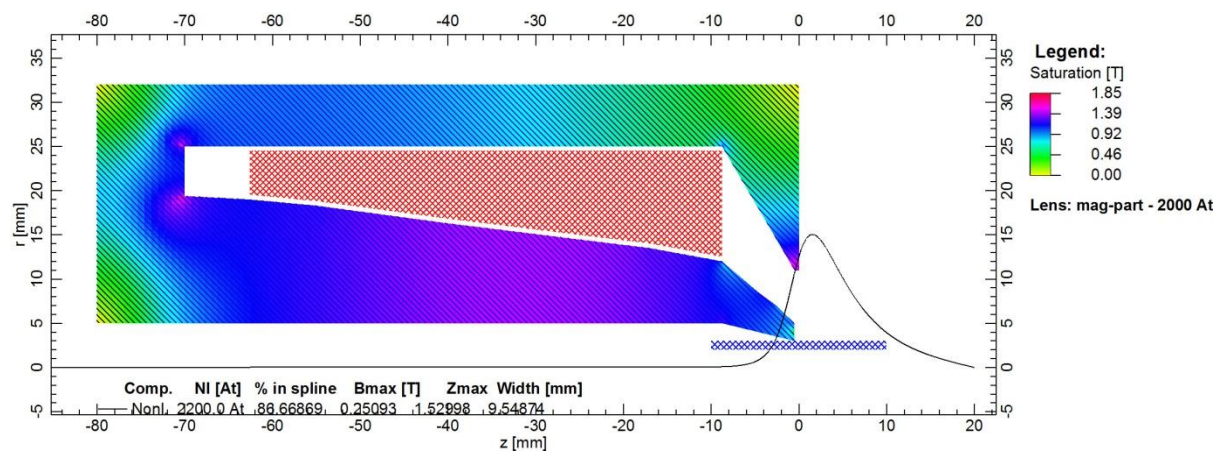
Формат ввода данных – OASIS/GDSII

Время экспонирования слоя с ~50% заполнением, не более – 6 ч

Технические характеристики РЭМ

Разрешение в режиме ВЭ	1,8 -2, 9 нм
Энергия электронов	40 эВ -30 кэВ
Катод	Катод Шоттки
Диапазон тока пучка	0.5 – 10 нА
Вакуум в области катода	$< 1 \times 10^{-6}$ мбар
Время жизни катода	1500 часов
Стабильность тока	$\leq 0.5\%$ за 4 часа
Рабочий отрезок	5-6 мм
Увеличение	10 – 300 000 крат
Электронно-оптическая система	2-х линзовая система
Размер образца	До 200 мм □
Максимальная тактовая частота, МГц	200
Видеоканал	256 градаций серого, 200 МГц ВЭ, ОРЭ , Прошедшие электроны*
Детектор ВЭ и ОРЭ	Высокоскоростной In-lens детектор Детектор ОРЭ* Детектор Эверхарта-Торнли*
Отклоняющая система	Двухступенчатая электромагнитная
Коррекция поля	Коррекция вращения, ортогональности и увеличения
Режимы синхронизации развертки с перемещением столика объектов	Полное поле, уменьшенное поле, Однократное сканирование Линия, точка Синхронизация
Разрядность ЦАП дефлекторов	16 бит (65536 пикселей)

S



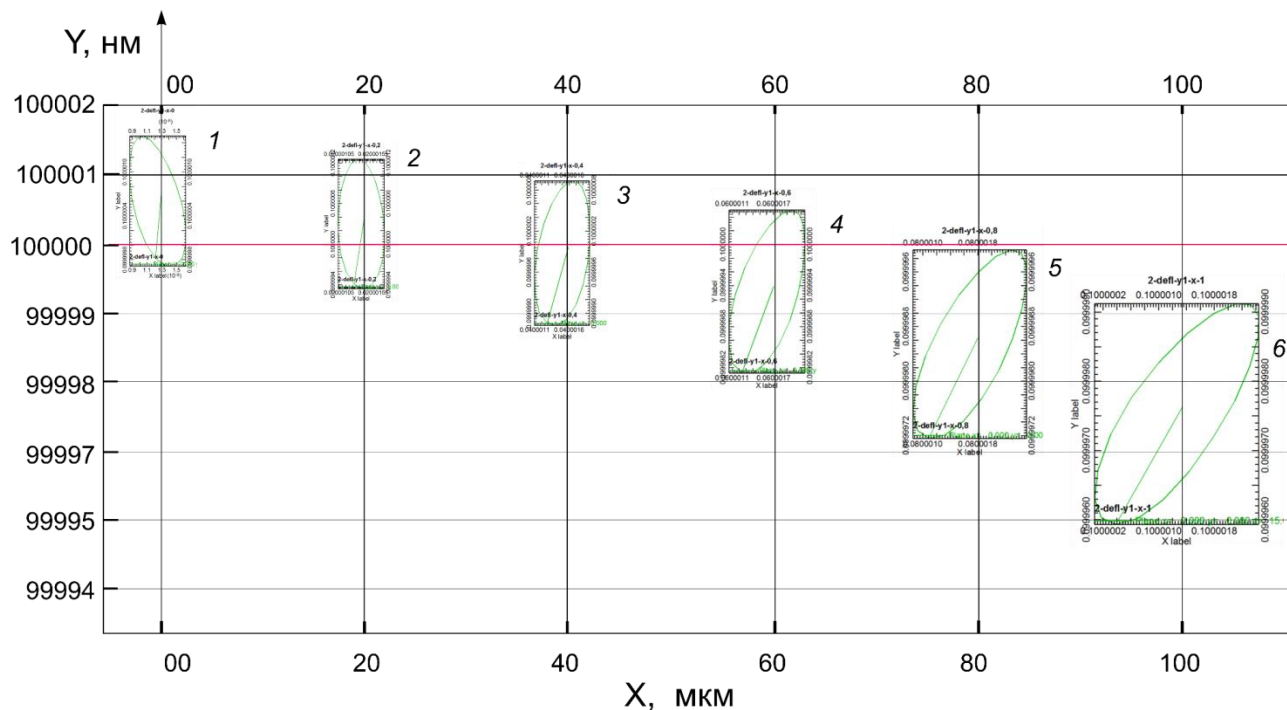
S

Технические характеристики РЭМ

Разрешение в режиме ВЭ	1,8 -2, 9 нм
Энергия электронов	40 эВ -30 кэВ
Катод	Катод Шоттки
Диапазон тока пучка	0.5 – 10 нА
Вакуум в области катода	$< 1 \times 10^{-6}$ мбар
Время жизни катода	1500 часов
Стабильность тока	$\leq 0.5\%$ за 4 часа
Рабочий отрезок	5-6 мм
Увеличение	10 – 300 000 крат
Электронно-оптическая система	2-х линзовая система
Размер образца	До 200 мм □
Максимальная тактовая частота, МГц	200
Видеоканал	256 градаций серого, 200 МГц ВЭ, ОРЭ , Прошедшие электроны*
Детектор ВЭ и ОРЭ	Высокоскоростной In-lens детектор Детектор ОРЭ* Детектор Эверхарта-Торнли*
Отклоняющая система	Двухступенчатая электромагнитная
Коррекция поля	Коррекция вращения, ортогональности и увеличения
Режимы синхронизации развертки с перемещением столика объектов	Полное поле, уменьшенное поле, Однократное сканирование Линия, точка Синхронизация
Разрядность ЦАП дефлекторов	16 бит (65536 пикселей)

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕФЛЕКТОРОВ

Дефлектор с внутренним диаметром 2 мм с центром с координатой $Z = 0$ мм.
Отклонение электронного пучка по оси Y постоянное, равное 0,1 мм = 100 мкм,
по оси X отклонение меняется через 20 мкм от 0 до 100 мкм.



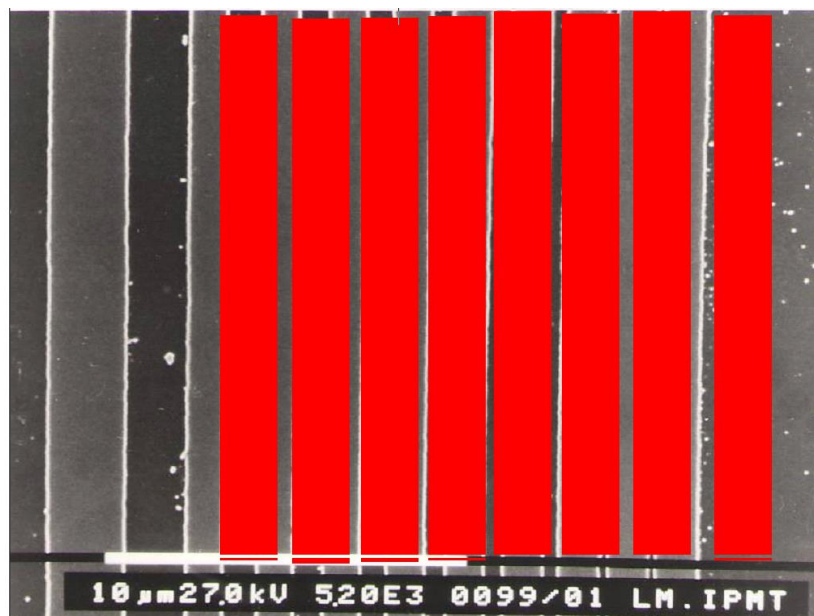
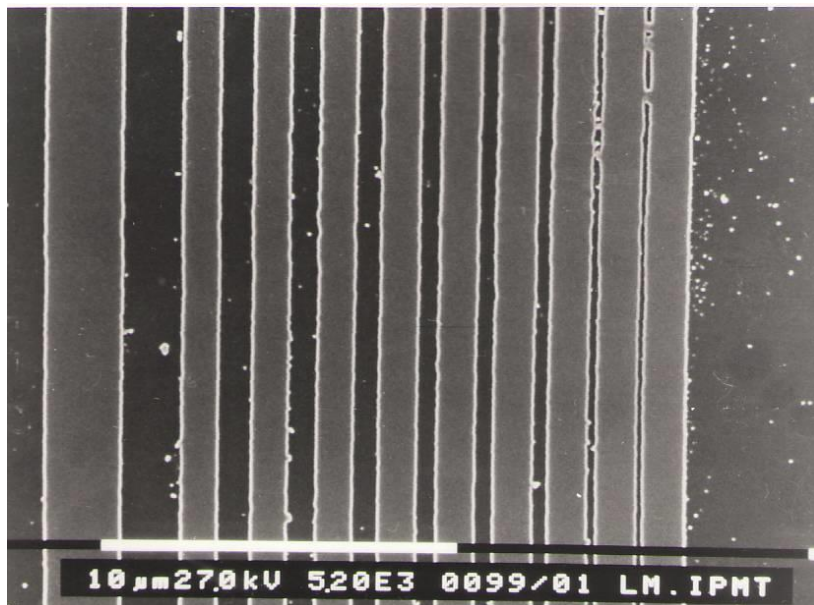
Изображение внешней границы отклоненного пучка в нм в плоскости $Z = 15$ мм,
источник $Z = -195$ мм, полуугол расходимости 0,0003 рад, энергия 50000 эВ.

Масштаб изображений 1:1.

Наибольший диаметр изображений:

$D1 = 1,85$ нм, $D2 = 1,99$ нм, $D3 = 2,24$ нм, $D4 = 2,55$ нм, $D5 = 3,09$ нм, $D6 =$

СКАНИРОВАНИЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМ



ширина, мкм	число пикс	отн погрешность %	пикс, нм
1.65	297	0.67	5.55
0.83	149.4	1.338688086	2.79
0.67	120.6	1.658374793	2.25
0.62	111.6	1.792114695	2.08
0.5	90	2.222222222	1.68
0.4	72	2.777777778	1.34
0.3	54	3.703703704	1.010
0.16	28.8	6.944444444	0.53
0.08	14.4	13.88888889	0.26

Формат кадра, Пикс x пикс	Длительность кадра, сек		Размер пикселя, нм	
	$\tau = 10$ нсек	$\tau = 100$ нсек	Поле 100 мкм	Поле 25 мкм
4K x 4K	0,16	1,6	25	6,25
8K x 8K	0,64	6,4	12.5	3,125
16K x 16K	2,56	25,6	6,25	1,56
32K x 32K	10,24	102,4	3,125	0,78
64K x 64K	41	410	1,56	0,4
	Кол-во электронов, I= 1нА			
	62,5	625		
	Отношение сигнал/шум			
	8	25		

НАСТРОЙКА ФОКУСА И ДОЗЫ СКАНЕРА

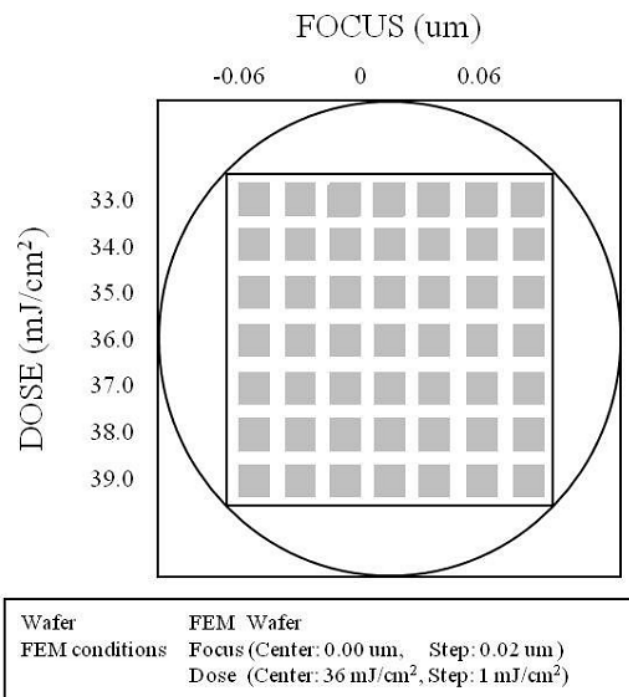
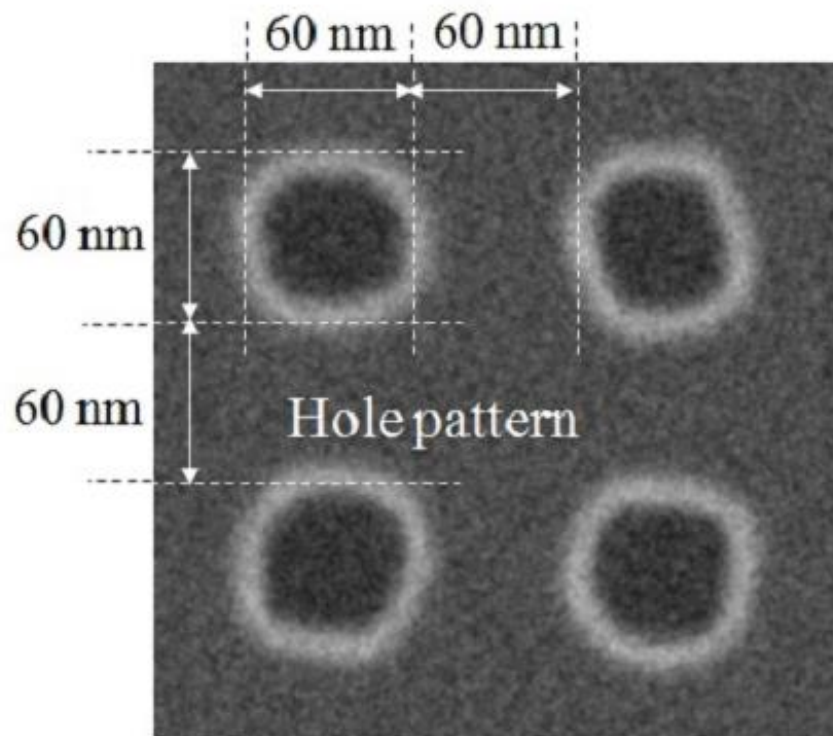


Figure8. FEM wafer for modeling



ПРОБЛЕМЫ:

1. Длительное время измерений
2. Подтравливание резиста электронным пучком

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

1 ВЫСОКАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

2. ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

3. НИЗКОЕ УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

**4. ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОПОЛОГИИ
СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ОБРАЗЦОВ**

ВОПРОСЫ

1. Как настроить катодный узел на режим
2. Как настроить РЭМ на режим высокого разрешения

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ НАНОЛИТОГРАФ

Перспективным путем решения проблемы, возникающей при создании структур с размерами элементов 0,1 мкм и менее, является использование высоковольтных (30 кВ и выше) электронно-зондовых приборов с остросфокусированным пучком, получивших в отечественной литературе название микрофабрикаторов либо нанолитографов. Установки для экспонирования

структур незаменимы в микроэлектронике, нанотехнологии и микромеханике.

Современный электронный литограф — край, сложный комплексный прибор, включающий себя электронно-оптическую (представленную, схеме) и вакуумную системы, прецизионный олик объекта с лазерными интерферометрами, с темы позиционирования пучка и объекта, под товки данных для экспонирования с учетом в яния эффектов близости и т.д. Стоимость ук новки электронно-лучевой литографии на ми вом рынке составляет около 5 млн. долларов.

Ранее отечественные потребности в этих у новках удовлетворялись за счет поставок из Г, приборов ZRM12, ZRM20 и ZBA10, ZBA Ввиду прекращения поставок, морального и

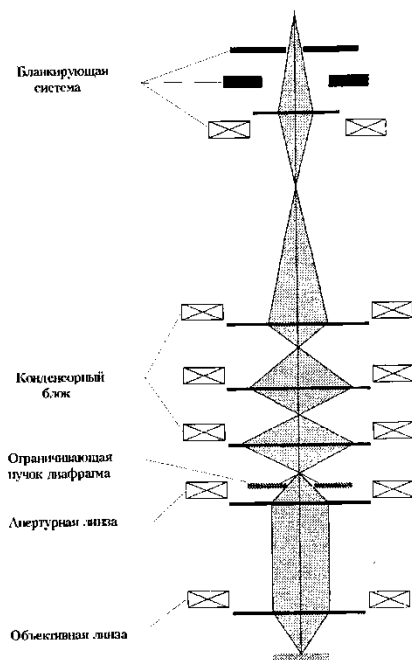


Схема электронной-оптической системы
высоковольтного нанолитографа

Ускоряющее напряжение, кВ	10-100
Диаметр зонда, нм, при E=30 кВ, рабочем отрезке 15 мм	20
W катод, нм	6
автокатод, нм	5
Нестабильность тока объективной линзы за 5 часов, не более	$5 \cdot 10^{-6}$
Наблюдение объекта	вторичные электроны, обратно рассеянные электроны
Максимальное рабочее поле, мм	3,2 x 3,2
Минимальная ширина экспонируемых структур, мкм	0,1
Максимальный диаметр экспонируемых пластин, мм	150
Прецизионный столик объекта:	
перемещение по осям X и Y, мм	± 75
погрешность перемещения, мкм	0,05
скорость перемещения, мм/с	10
контроль перемещения	лазерный интерферометр

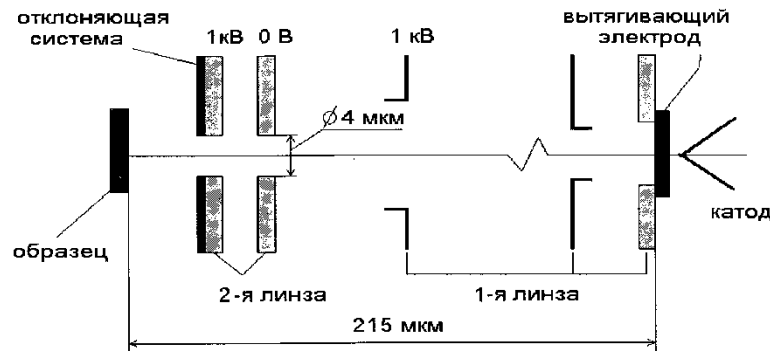
НИЗКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ НА БАЗЕ МИКРОМИНИАТЮРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

В ИПТМ РАН разрабатываются макетные образцы низковольтных нанолитографов на основе принципиально новой электронной оптики, использующей технологии современной микроэлектроники. Сочетание предельно малого диаметра электронного пучка (2 нм) и низкого ускоряющего напряжения (1 кВ) позволяет создавать структуры размерами несколько нанометров.

Малые размеры (4 - 5 мм) электронно-оптической системы дают возможность разместить ее в любом месте технологического цикла и надежно изолировать от влияния внешних помех.

Технические характеристики

Ускоряющее напряжение, кВ	1
Диаметр пучка, нм	1,73
Поле экспонирования, мкм	100x100



размер поля экспонирования 64 x 108 мм (пол шаблона 128 x 108 мм) резист 10 мкКл/см²

Tool Type	Layer	Beamlet Matrix Size	Maximum Beamlet Size [nm]	Shot / M-Shot Count [10 ⁹]	Write Time [hh:mm]
VSБ 50А/см ² , 50kV	METAL	n.a.	n.a.	145	11:14 40 440
MSB 20А/см ² , 50kV	METAL	64	200	22	05:23 19 380
		64	400	15	03:23 12180
		256	100	19	05:04
VSБ 50А/см ² , 50kV	VIA	n.a.	n.a.	31	04:24
MSB 20А/см ² , 50kV	VIA	64	200	9	04:05
		64	400	5	02:16
		256	100	9	04:04
VSБ 50А/см ² , 50kV	ACTIVE	n.a.	n.a.	59	05:31
MSB 20А/см ² , 50kV	ACTIVE	64	200	17	04:09
		64	400	12	02:41
		256	100	16	03:58
VSБ 50А/см ² , 50kV	POLY GATE	n.a.	n.a.	66	08:30
MSB 20А/см ² , 50kV	POLY GATE	64	200	24	07:23
		64	400	19	05:06
		256	100	23	07:12

