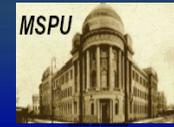


Гетеродинные приёмники оптического диапазона на основе эффекта электронного разогрева в ультратонких сверхпроводниковых пленках NbN

Ю. Лобанов

План:

1. Гетеродинный приёмник ИК диапазона: назначение и общий вид.
2. Достижение криогенных температур.
3. Установка НЕВ элемента на оптоволокно.
4. Эффективность согласования смесителя с падающим излучением.
5. Детектор на основе электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках (Hot Electron Bolometer) и преобразование частоты смесительным элементом.
6. Различные типы созданных структур.
7. Основные характеристики гетеродинного приёмника на основе тонких плёнок NbN.
8. Экспериментальные результаты. Заключение.



Астрофизические задачи:

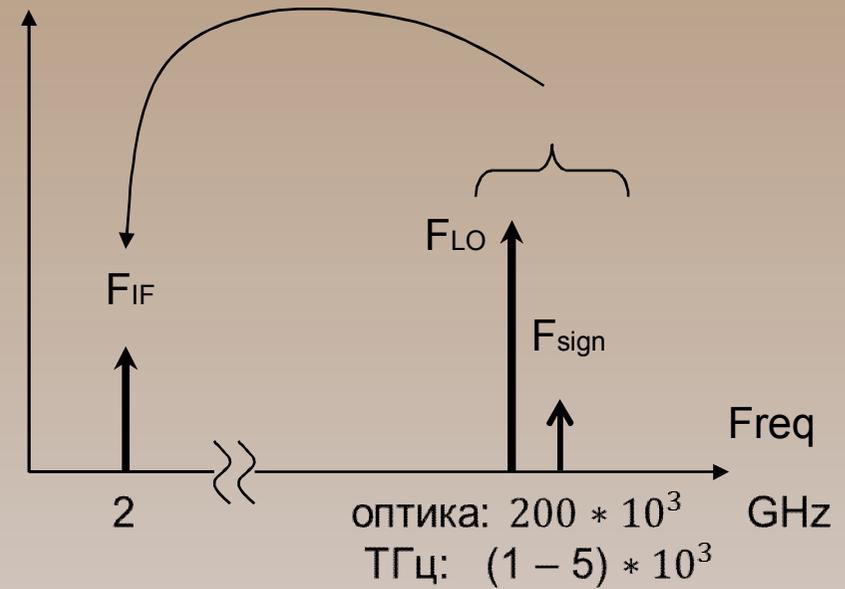
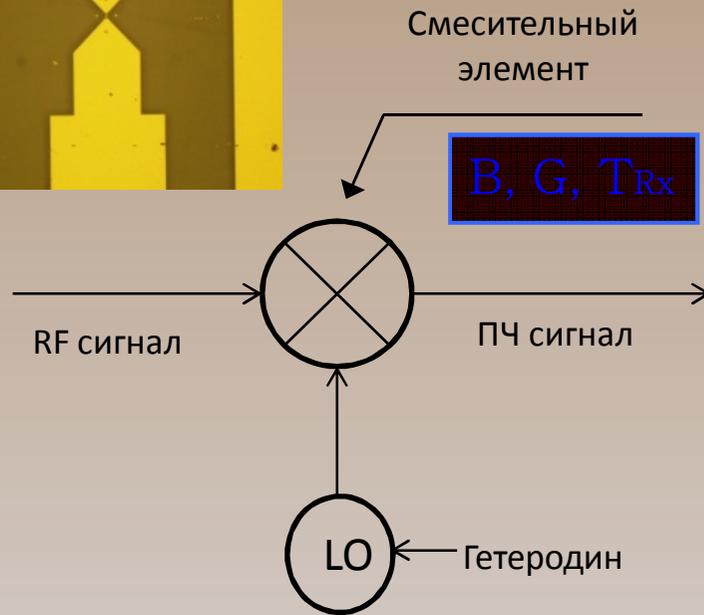
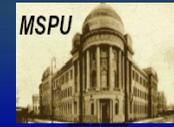
- Детектирование молекул с малыми концентрациями.
- Выполнение изотопных измерений.
- Выполнение доплеровских измерений поля скоростей.

Технологические и экспериментальные задачи:

- Разработка детектора для гетеродинного спектрометра ИК диапазона (1.5 мкм).
- Изготовление образцов с различными геометрическими характеристиками.
- Экспериментальные исследования свойств изготовленных структур.



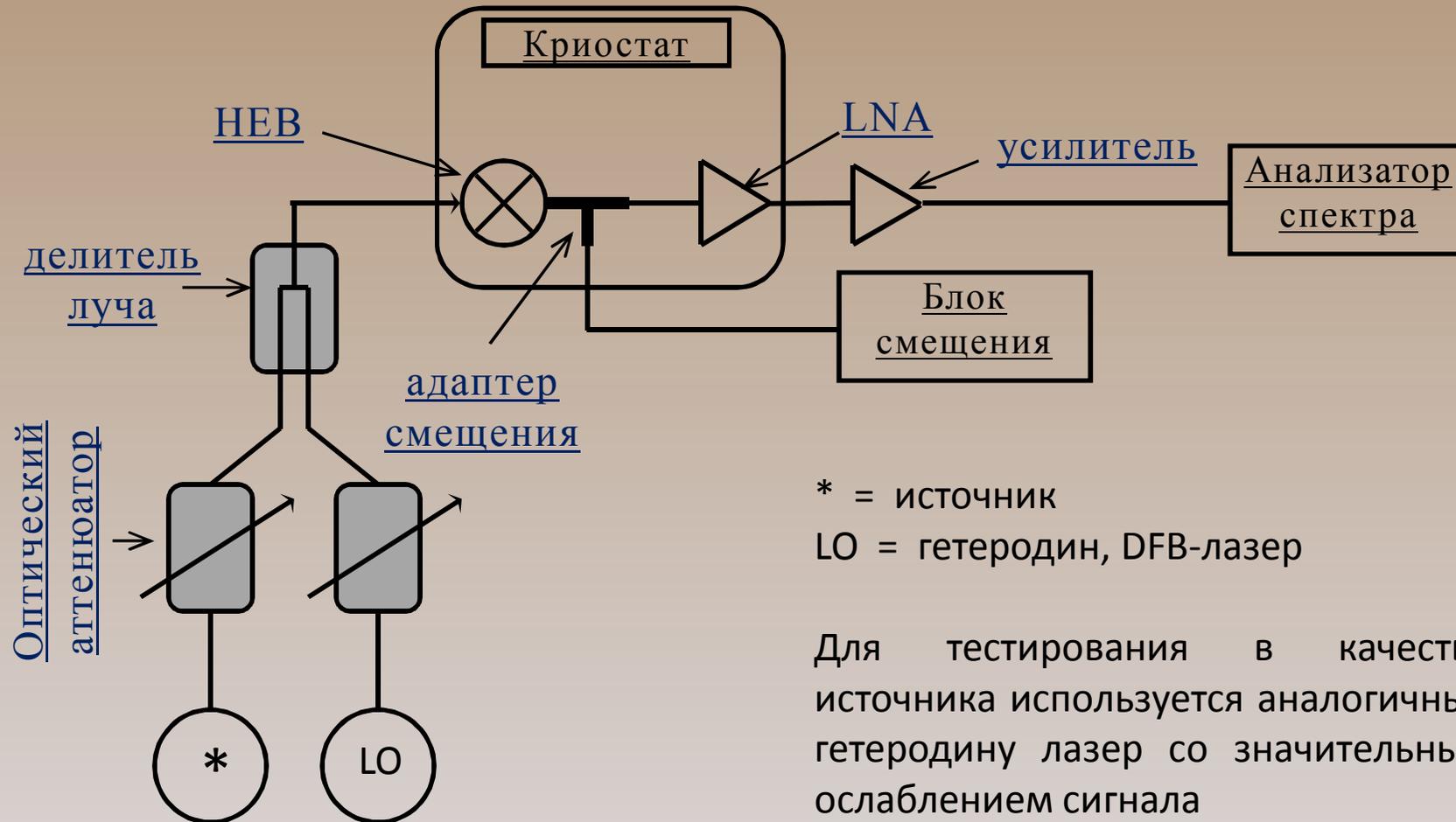
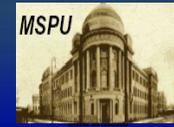
Гетеродинная схема приема



$$F_{IF} = F_{LO} \pm F_{sign}$$

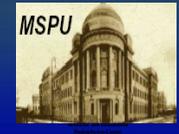


Гетеродинный приёмник ИК диапазона: общий вид



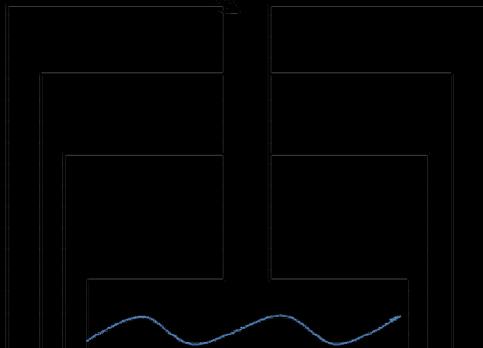


Достижение криогенных температур



Криостат

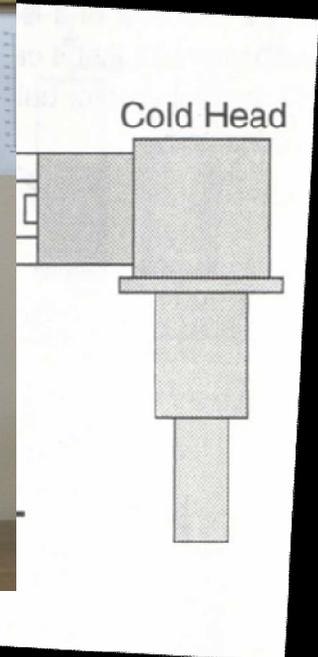
Трубки для охлаждения жидкого гелия



Cooling water flow



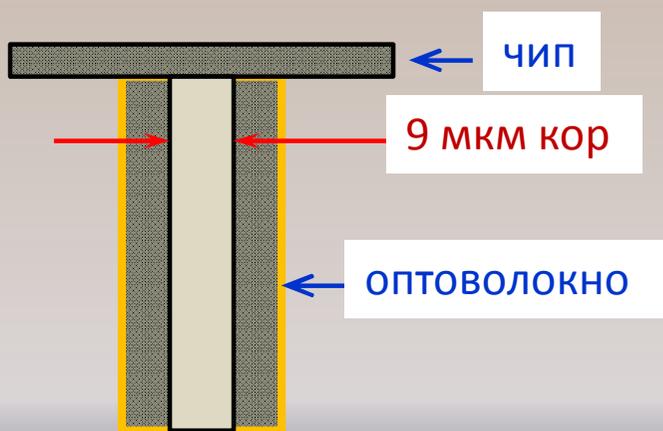
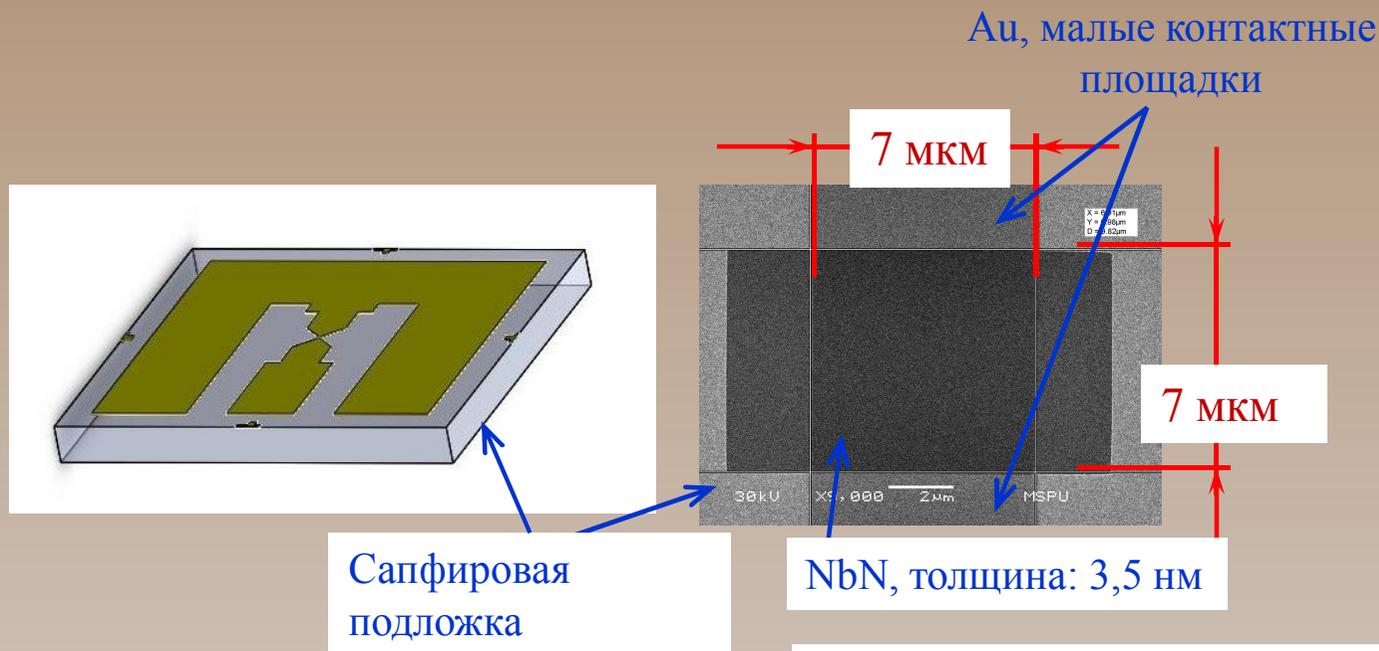
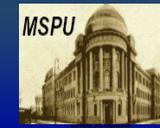
Машина замкнутого цикла



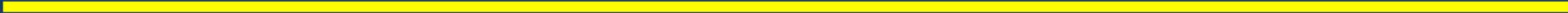
Compressor Unit



Внешний вид чипа и его согласование с оптоволоком

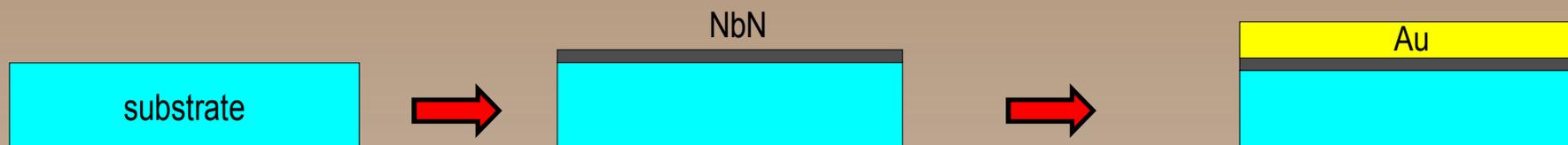
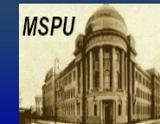


- Смеситель лицевой частью соприкасается с оптоволоком.
- Совмещение осуществляется с помощью оптического микроскопа.
- Второй конец оптоволокну выводится наружу через вакуумный FC/PC коннектор.





Описание детектора и технология его изготовления



Установка реактивного магнетронного осаждения Z-400 Laybold Heraus:

Параметры процесса осаждения NbN:

Остаточное давление: 1.2×10^{-6} mbar;
температура подложки: 800°C ;
Парциальное давление Ar: 5×10^{-3} mbar;
Парциальное давление N_2 : 9×10^{-5} mbar;
 $I=300$ mA, $U \sim 300$ V (смесь Ar+N₂).
Толщина пленки: 4 nm.

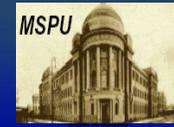
Параметры процесса осаждения Au :

Температура подложки: 150°C ;
Парциальное давление Ar: 5×10^{-3} mbar;
 $I=50$ mA, $U \sim 350$ V.
Толщина пленки: 20 nm.

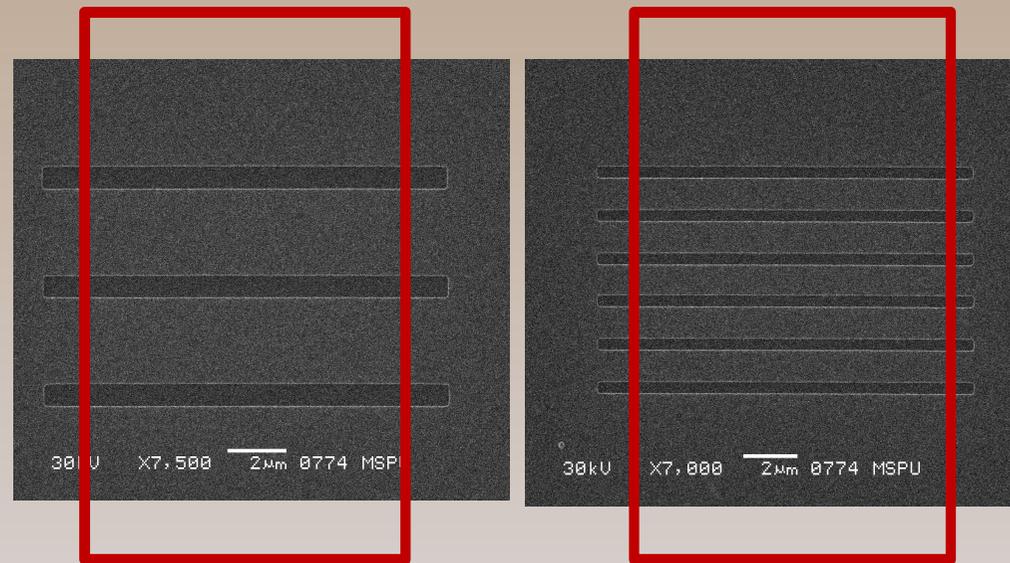
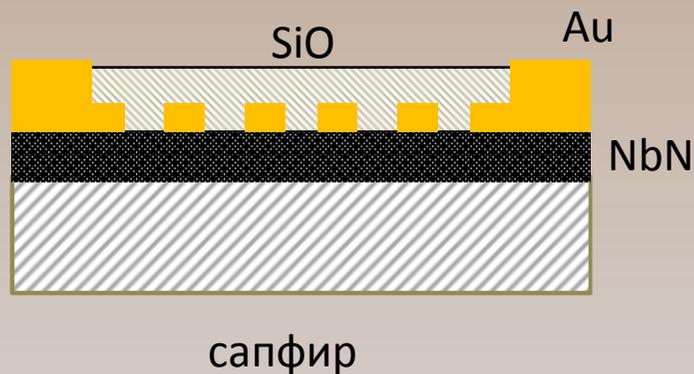




Нанесение золотых полосок в виде зебры:



- увеличение поглощения ЭМ волн за счёт формирования наведённых зарядов на границе NbN-Au;
- уменьшение требуемой мощности гетеродина, поскольку уменьшилась площадь NbN, непосредственно поглощающего излучение.

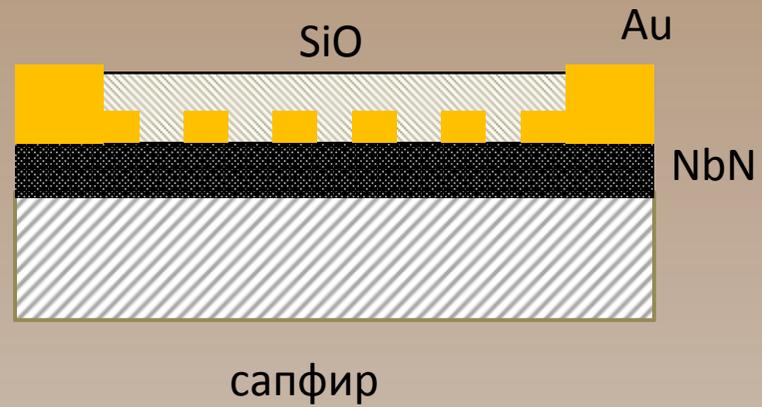
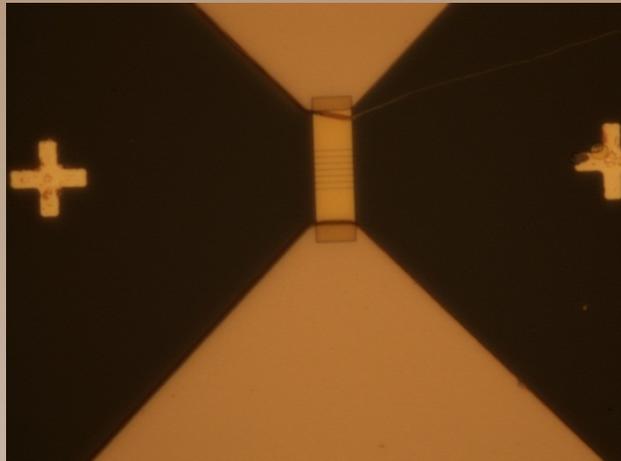


* Поляризационная чувствительность

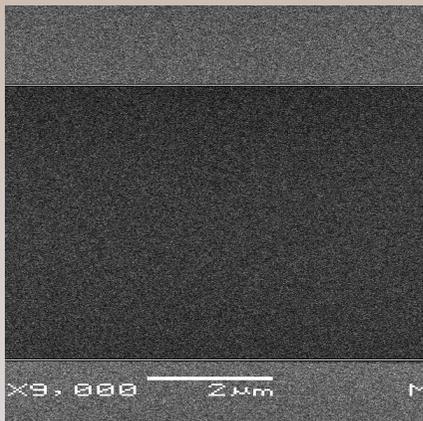
Слой SiO, определяющий ширину структуры и формируемый на следующем технологическом этапе



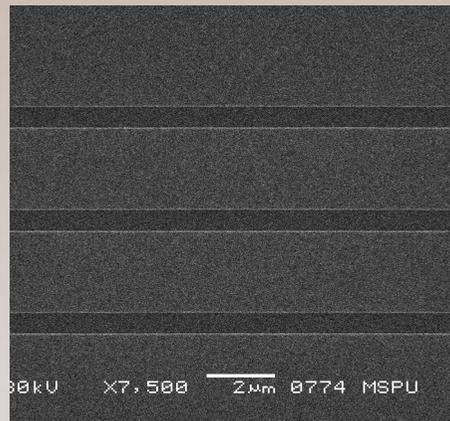
Различные типы изготовленных структур



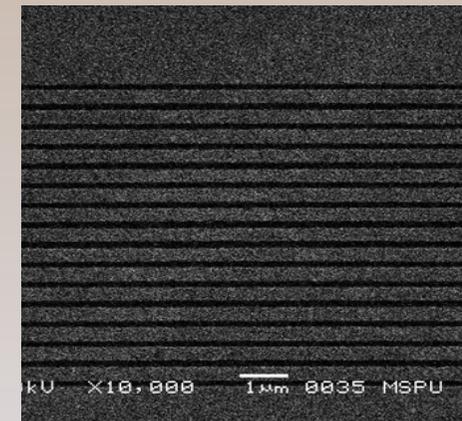
Тип 1



Тип 2



Тип 3

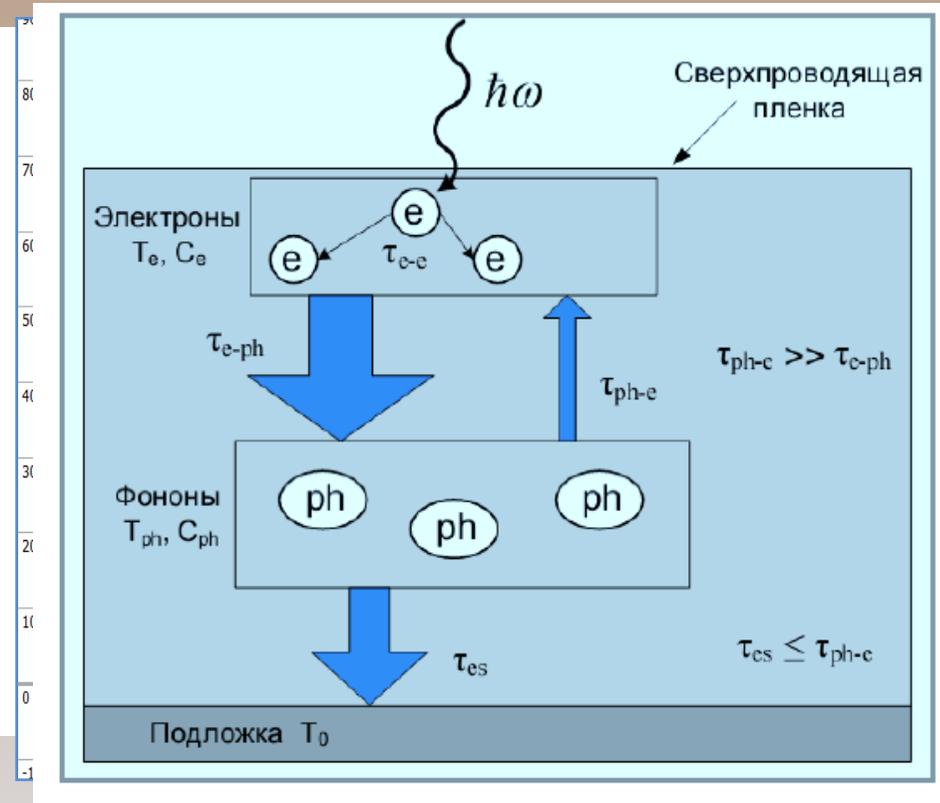
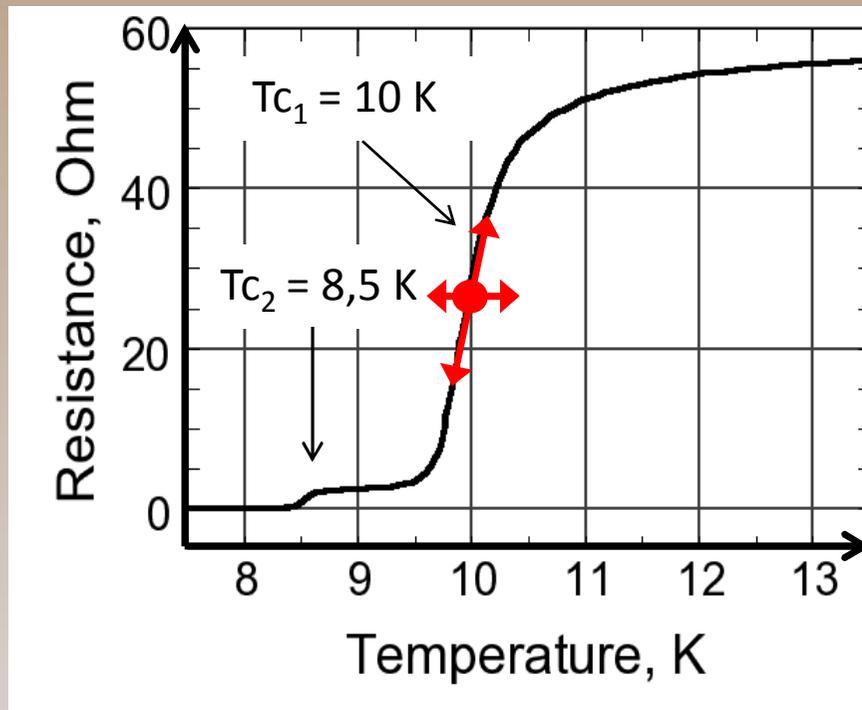




Основные характеристики гетеродинного приёмника на основе плёнки NbN



Сверхпроводниковые свойства NbN смесителей. Выбор рабочей точки. Электронный разогрев и релаксация электронной температуры.



$$T_e \approx T_c \quad dV \sim \frac{dR}{dT}$$



Mixing in the Bolometer

$$P(t) \propto \frac{E_{LO}^2}{2} + \frac{E_{LO}^2}{2} \cos(2\omega_{LO}t) + \frac{E_S^2}{2} + \frac{E_S^2}{2} \cos(2\omega_S t) + \\ + E_{LO}E_S \cos[(\omega_{LO} + \omega_S)t] + E_{LO}E_S \cos[(\omega_{LO} - \omega_S)t]$$

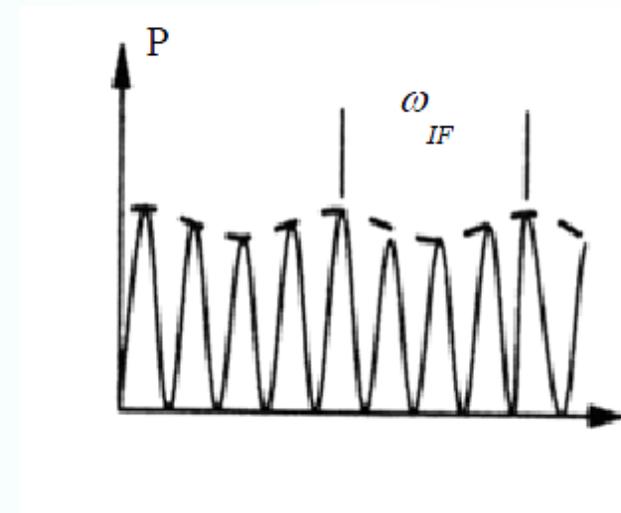
$$P_{LO} = \frac{E_{LO}^2}{2} \quad P_S = \frac{E_S^2}{2} \quad P_{IF} = 2\sqrt{P_{LO}P_S}$$

$$P_0 = \alpha \left(\frac{E_{LO}^2}{2} + \frac{E_S^2}{2} \right) + P_{DC} \quad \omega_{IF} = |\omega_{LO} - \omega_S|$$

Bolometer follows only IF
oscillations



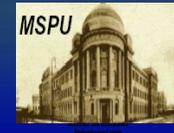
$$P(t) = P_0 + P_{IF} \cos(\omega_{IF}t)$$



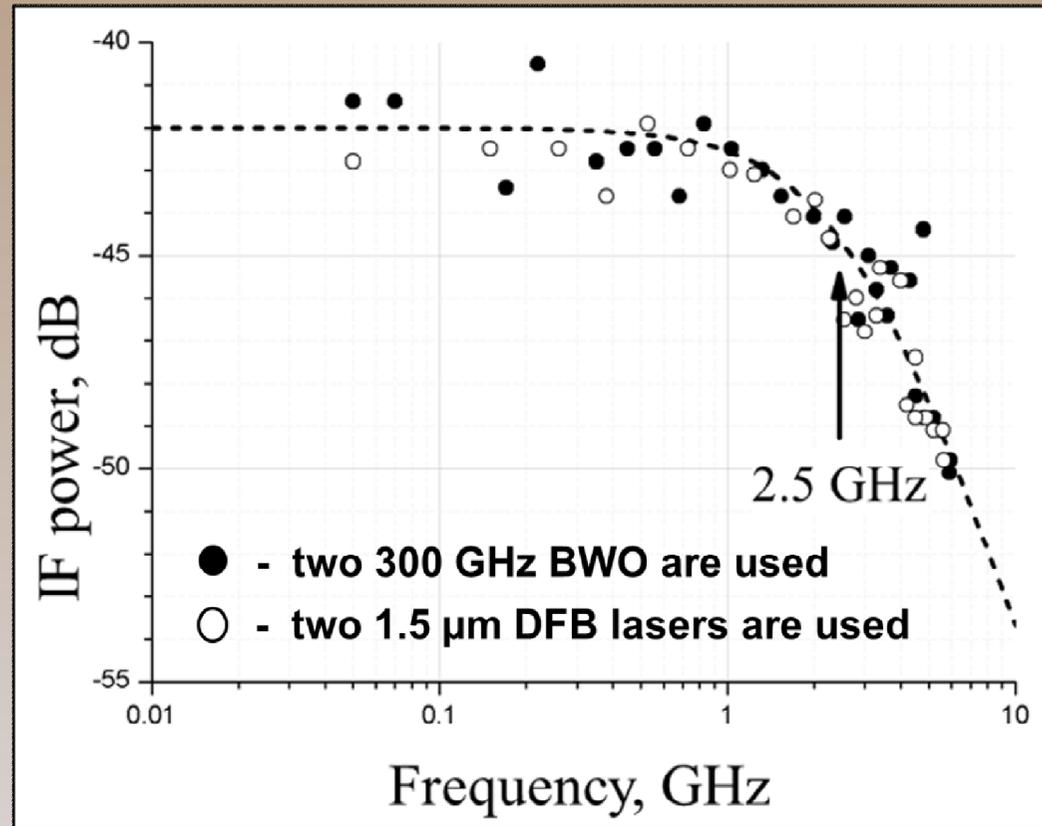
Power dissipated in HEB device
is modulated with IF frequency



Основные характеристики гетеродинного приёмника на основе плёнки NbN

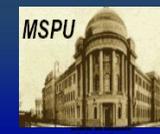


Полоса преобразования





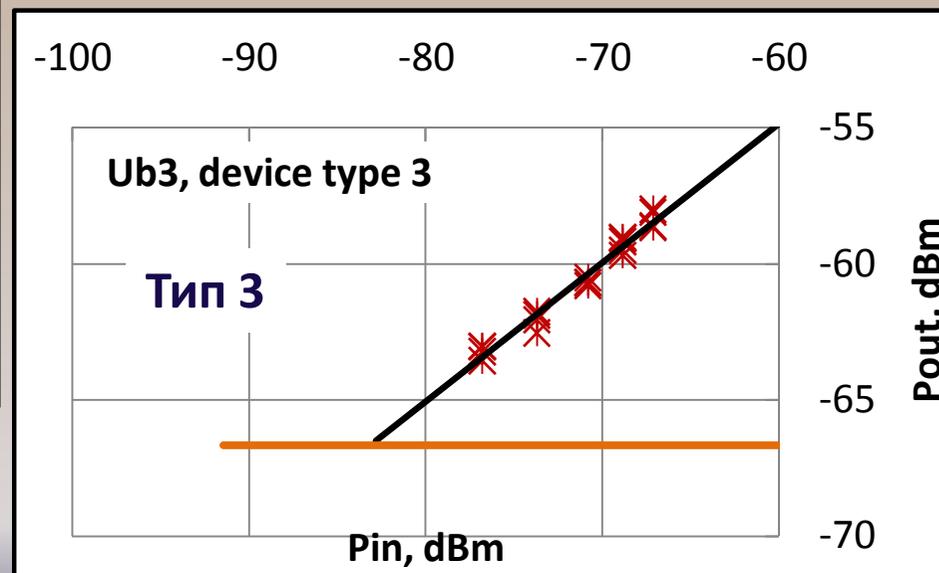
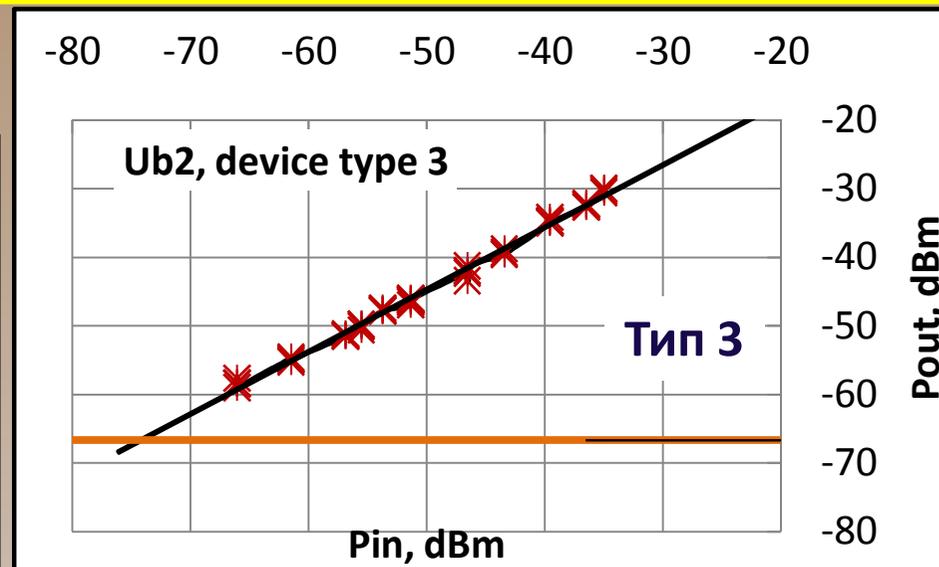
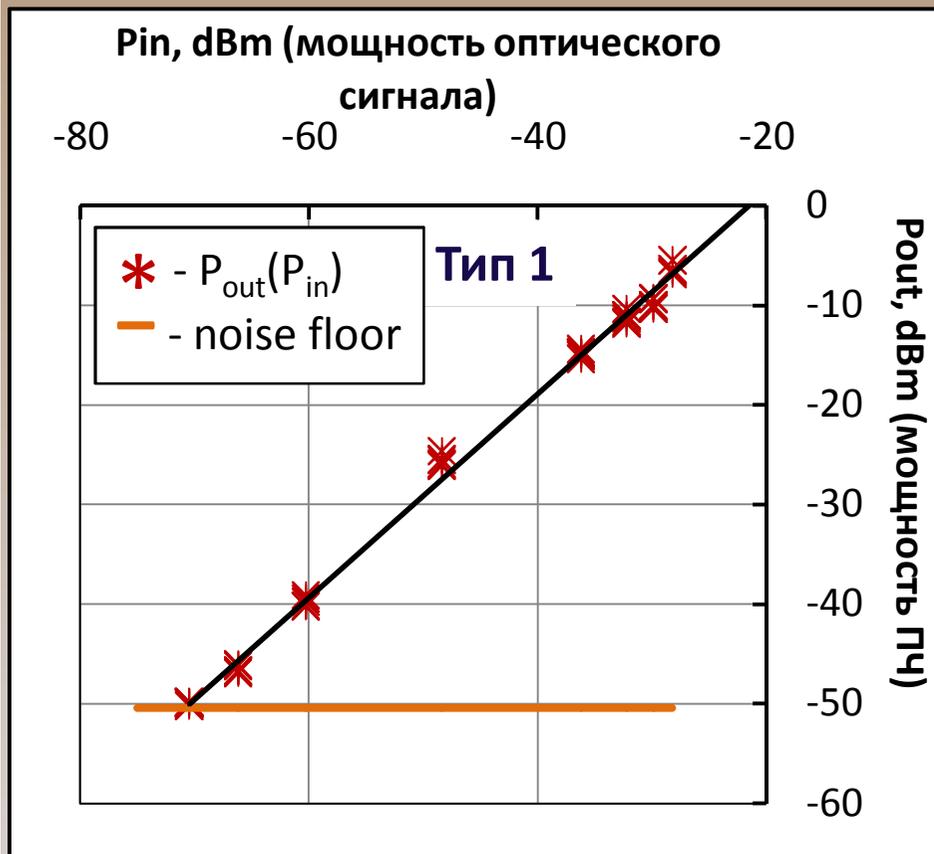
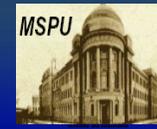
Сравнение детекторов с разной геометрией золотых полосок



Тип	Число полосок Au	Ширина полосок NbN : (NbN-Au), мкм	R ₃₀₀ , Ом	I _c , мкА	T _c , К	Мощность гетеродина, мкВт	Коэффициент поглощения, %
1	-	7 : (-)	108	2100	10	560	≈6-8
2	2	0.4 : (2.9)	81	1720	9.8	248	≈8-10
3	15	0.156 : (0.3)	202	1640	11.1	170	≈15-18

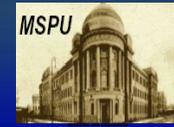


Сравнение детекторов с разной геометрией золотых полосок





Оценка чувствительности детектора



Выходная мощность

$$P^{out} = G_{sys} \cdot (T^{in} + T_{sys})$$

Y-фактор

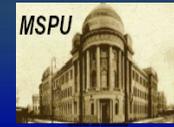
$$Y = \frac{P_1^{out}}{P_2^{out}}$$

$$S_{sys} = \frac{T_1^{in} - Y \cdot T_2^{in}}{(Y - 1) \cdot B}$$

Спектральная плотность шума

$$NF^{meas} \cong 25 \text{ dB}$$

Шумовой фактор



Выводы

- Нанесение золотых полосок способствует уменьшению оптимальной мощности гетеродина.
- Коэффициент поглощения пленки NbN зависит от геометрических параметров полосок золота.
- Наибольшего поглощения удастся достичь при характерных размерах NbN – Au полосок $\sim 0.15 - 0.30$ мкм.

Планируемые исследования

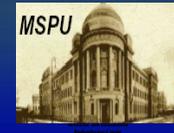
- Измерение полосы преобразования
- Измерение чувствительности



Спасибо за внимание!



Приложение 1. HEB смесители в терагерцовом диапазоне частот



SAO Receiver Lab Telescope
Mt. Cerro Sairecabur, 5525 m, Chile



APEX-Atacama Pathfinder Experiment



SOFIA – Airborne Observatory

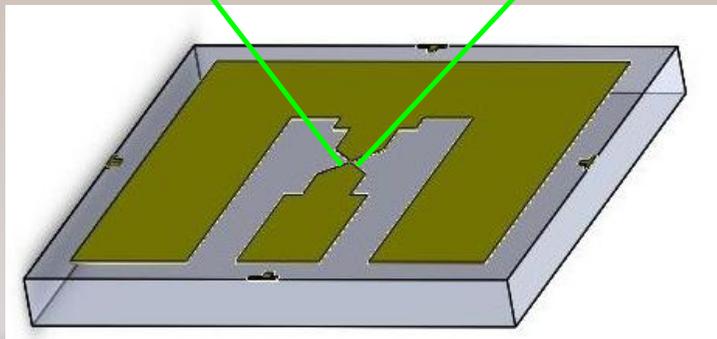
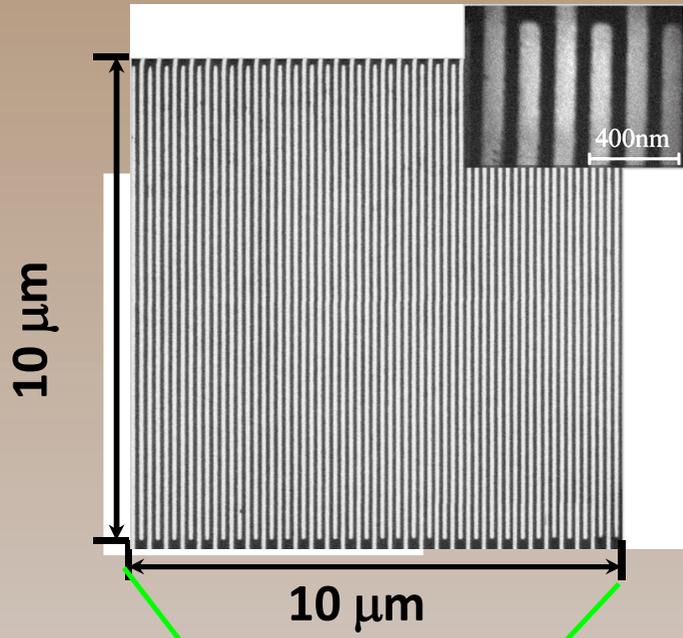


Herschel Space Observatory





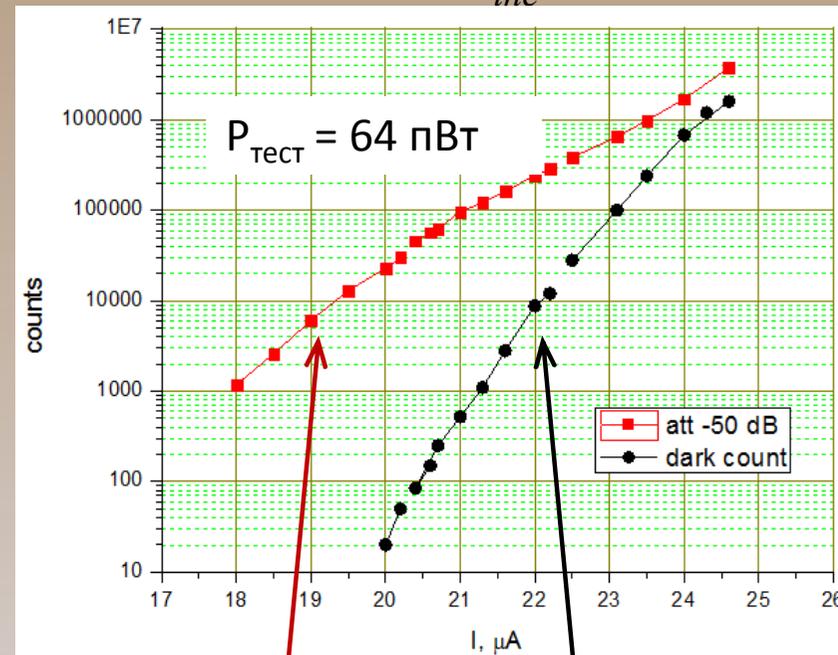
Приложение 2. Счётчик одиночных фотонов на основе NbN наноструктур



$$QE = \frac{N_{det}}{N_{inc}}$$

N_{det} - Число зарегистрированных фотонов

N_{inc} - Число падающих фотонов



Световые отсчёты

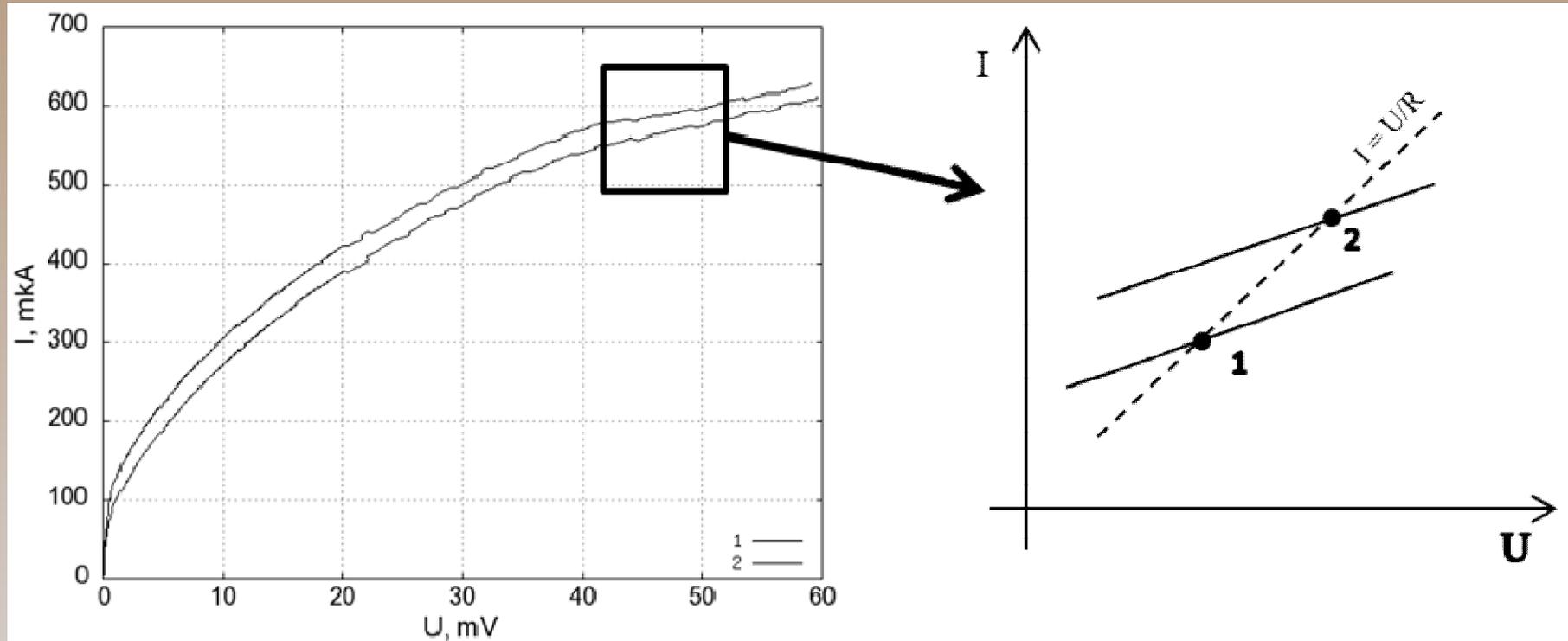
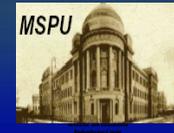
темновые отсчёты

Мощность излучения на входе детектора

$$P_s = N_{inc} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{N_{det}}{QE} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda}$$



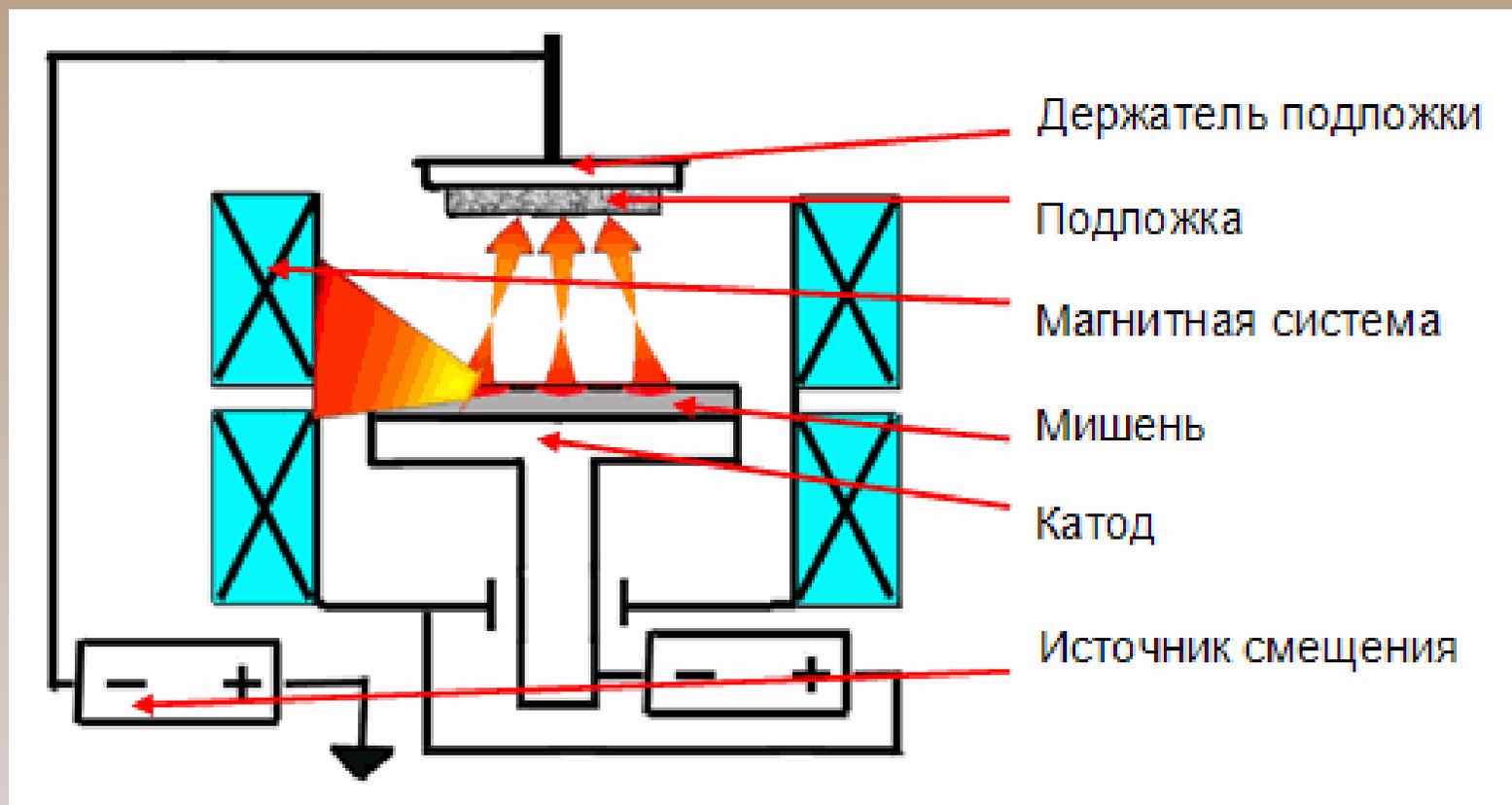
Приложение 3. Оценка поглощенной мощности гетеродина методом изотерм



- ✓ Переход 1 \rightarrow 2 выполняется малыми изменениями мощности гетеродина и напряжения смещения;
- ✓ Температуры электронной подсистемы в точках 1 и 2 равны



Приложение 4. магнетронное осаждение тонких пленок





Приложение 5. Электронный разогрев и релаксация электронной температуры

