



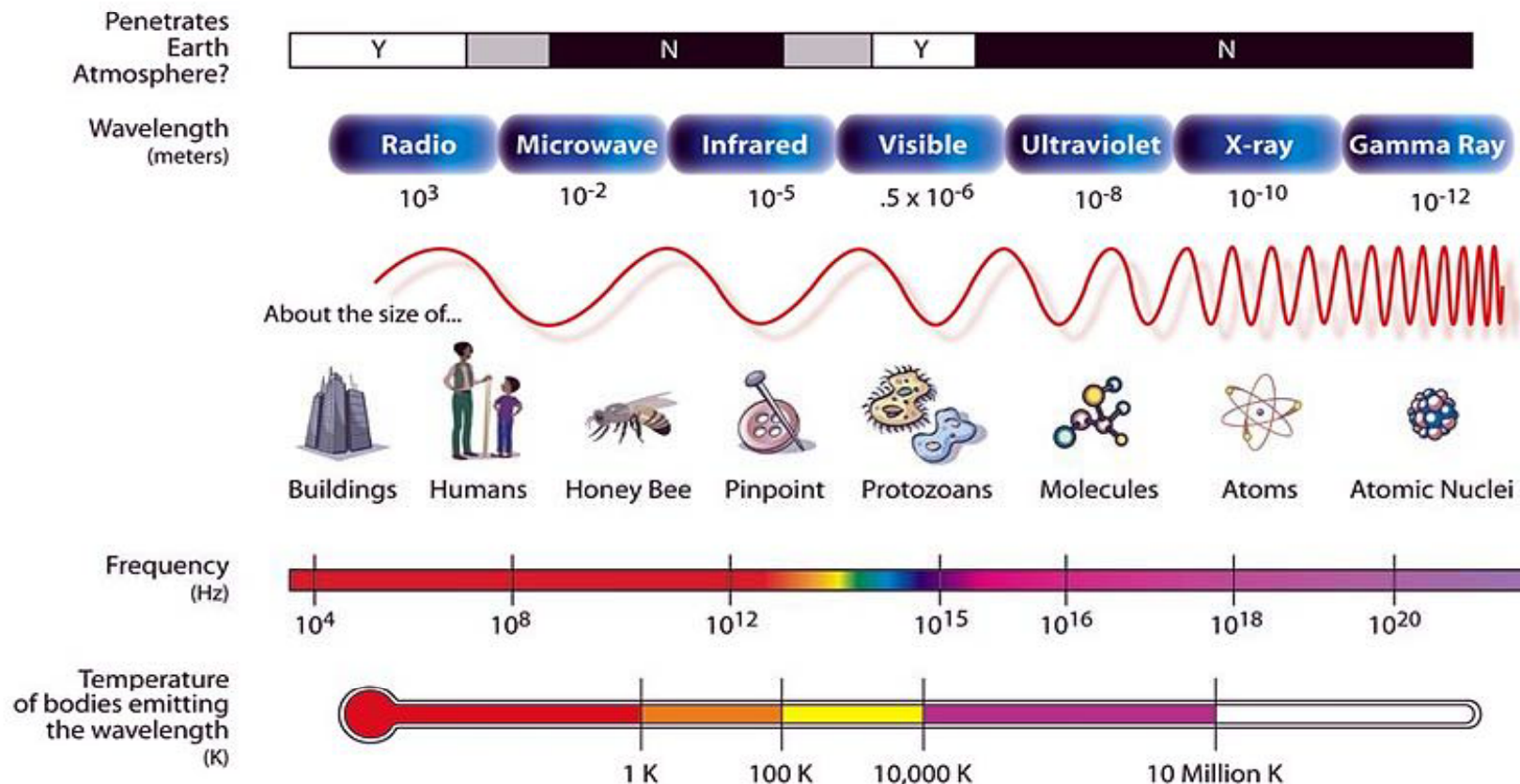
# **Сверхпроводниковая электроника**

***В.П. Кошелец***

***Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН (Москва)***

# Сверхпроводниковая электроника: устройства для приема и обработки сигналов

- Предельная чувствительность:  
(квантовые эффекты, криогенные температуры)
- Частотный диапазон: от долей Гц до рентгена



# Сверхпроводниковая электроника: устройства для приема и обработки сигналов

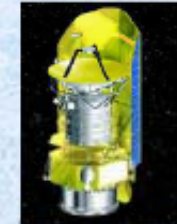
- Предельная чувствительность
- Частотный диапазон: от долей Гц до рентгена
- СКВИДы и системы на их основе
- Приемники терагерцового диапазона частот
- Сверхпроводниковый интегральный приемник
- Сверхпроводниковые генераторы ТГц диапазона
- Однофотонные сверхпроводниковые детекторы
- Детекторы для ультрафиолета и рентгена
- Интерфейсные и цифровые устройства
- Многоэлементные структуры, стандарты напряжения

# Криогенные ИК приемники для космоса

## Cooled Infrared Space Telescopes

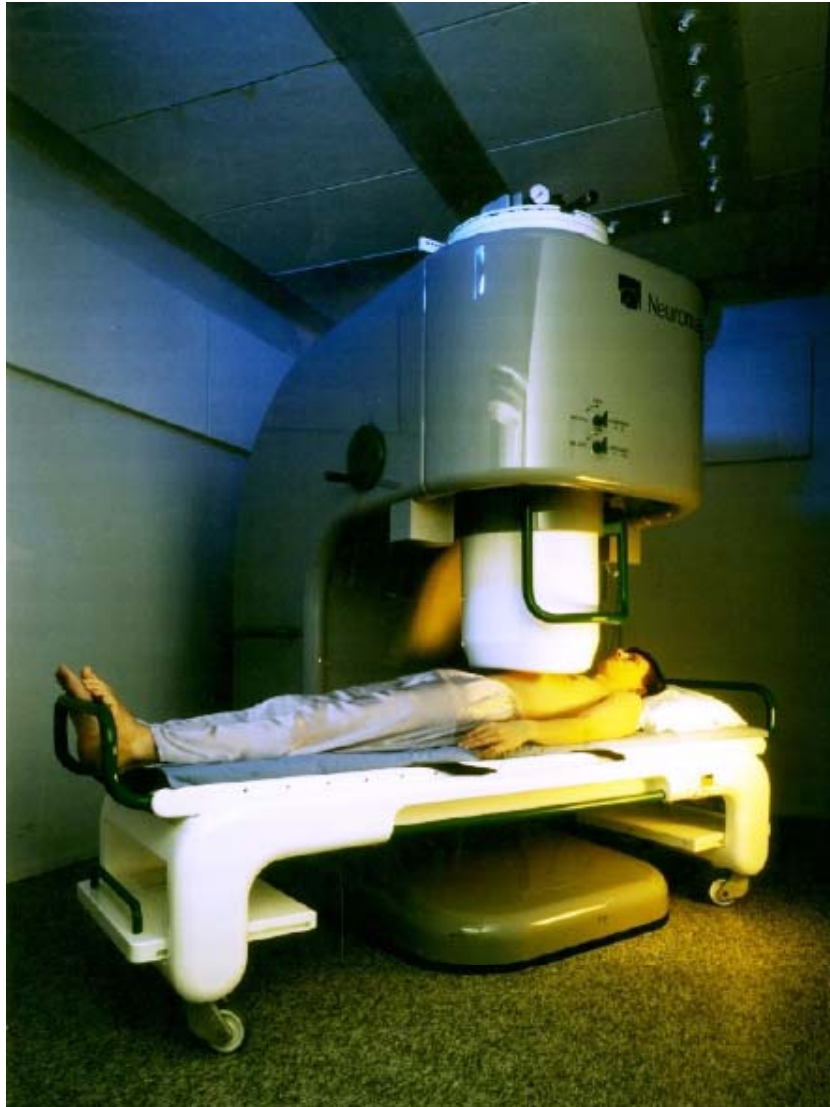
Courtesy: D. Lemke

	Launch	Mission	Telescope Diam. [m]	Telescope Temp. [K]	Detector Temp. [K]	Science	Funding
orbit	1983	IRAS	0.6	3	3	FIR-Survey	NASA, NL, UK
	1989	COBE	0.2 (DIRBE)	1.6	$\geq 1.6$	Cosmic Background	NASA
	1995	ISO	0.6	3	1.8	FIR Observatory	ESA
	2001	WMAP	~1.5	90		Cosmic Background	NASA
	2003	SPITZER	0.8	5	1.6	FIR-Observatory	NASA
development	2005	ASTRO-F	0.7	6	1.6	FIR-Survey/Observ.	ISAS (J)
	2007	HERSCHEL	3.5	70	0.3	FIR-Observatory	ESA
	2007	PLANCK	~1.8	40	0.1	Cosmic Background	ESA
	2011	JWST	6.0	40	6	NIR-, MIR-Observ.	NASA, ESA, CND
future	2015	SAFIR	10.0	5	0.1	FIR-, Submm-Observ.	NASA
	>2010	SPICA	3.5	5		FIR-Observatory	ISAS (J)
	>2015	DARWIN	6x1.5		6	MIR-Interferometer	ESA
	>2015	TPF	5x3.0			MIR-Interferometer ?	NASA
	>2009	SPIRIT	2x3.0			Interferometer	NASA
	>2015	SPECS	3x4.0			Interferometer	NASA Incomplete

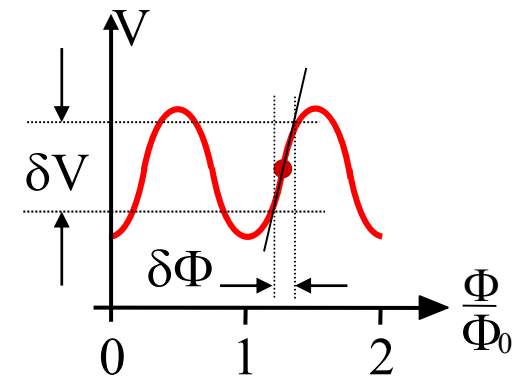
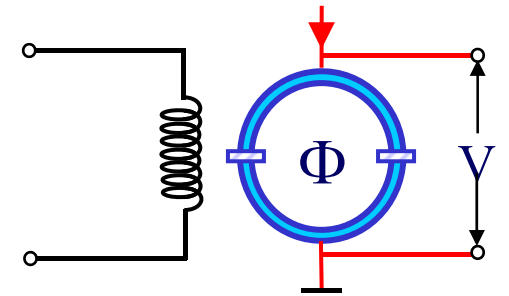




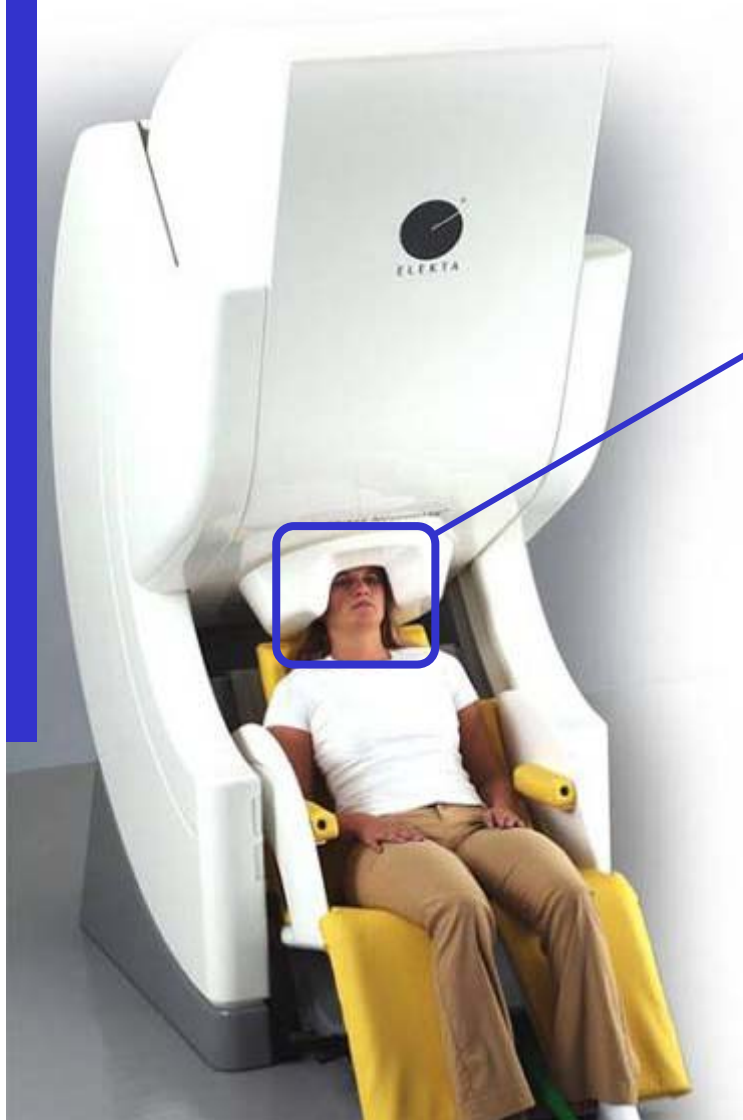
# Магнитокардиография



МКГ-система фирмы Elekta  
Neuromag (Швеция-Финляндия) с  
67 СКВИД-датчиками (работает в  
магнитоэкранированной  
комнате)



# Магнитоэнцефалография



**МЭГ-система фирмы Elekta Neuromag (Швеция-Финляндия) с 306 СКВИД-датчиками (работает в магнитоэкранированной комнате)**

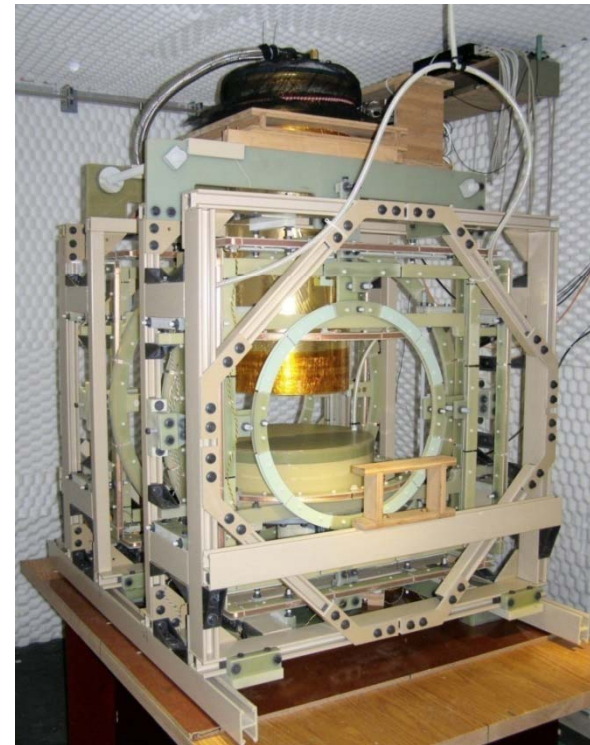
# Инструменты для магнито-резонансной томографии в сверхслабых магнитных полях - МРТ СМП - и МЭГ в Los Alamos National Lab (USA)

Первая многоканальная СКВИД-система для МРТ СМП и МЭГ



Преполяризационное поле: 30 мТл  
Измерительное поле: 46 мкТл (~2 кГц)

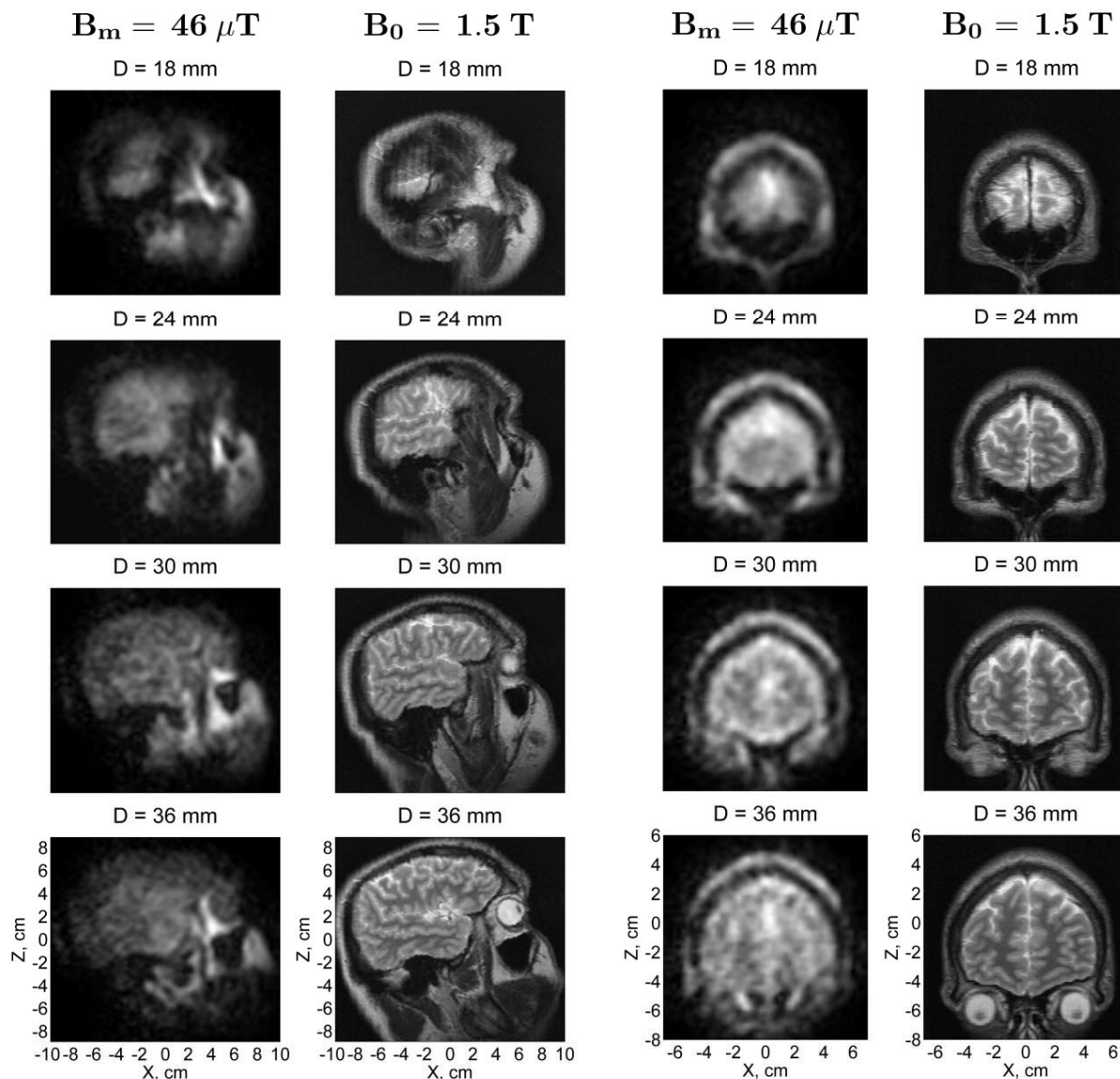
Первая МРТ СМП система для определения жидкой взрывчатки в аэропортах



Преполяризационное поле: 50 мТл  
Измерительное поле: 70 мкТл (~3 кГц)



# 3D-изображения живого мозга человека



**микроТесла МРТ головы человека в сравнении со стандартной МРТ:**

- 3D-изображения головы сбоку и спереди при МРТ в ультраслабых магнитных полях были получены при измерительном поле  $B_m=46 \mu\text{T}$  с пре-поляризацией при 30 мТ.
- Разрешение в плоскости  $3 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$ . Каждое изображение представляет слой ткани головы толщиной 6 мм.
- $D$  - глубина средней плоскости данного 6 мм-слоя по отношению к плоскости дна криостата.
- Изображения соответствуют первому отраженному сигналу со временем  $TE=63$  мсек. Время пре-поляризации для каждого изображения составляло 1 сек.
- Сильнополевое 3D-изображение головы того же испытуемого было получено стандартной МРТ при  $B_0=1.5 \text{ T}$  с  $TE=64$  мсек. и  $TR=9000$  мсек. Изображение с разрешением 1 мм подвергалось вращению и суммированию по глубине внутри 6 мм-слоев, чтобы совпадать примерно с каждым вторым изображением МРТ в ультраслабом поле.



# Компоненты СКВИД-систем для МРТ СМП / МЭГ, разработанные и изготовленные ООО «НПО КРИОТОН» для Los Alamos National Lab



192-канальная СКВИД-электроника для МЭГ-системы



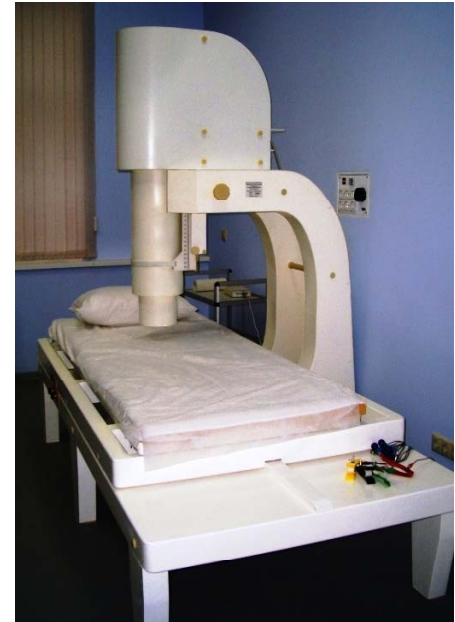
СКВИД-электроника  
96 каналов  
Может быть  
мультиплицирована  
практически без  
ограничений



Стеклопластиковый немагнитный  
криостат

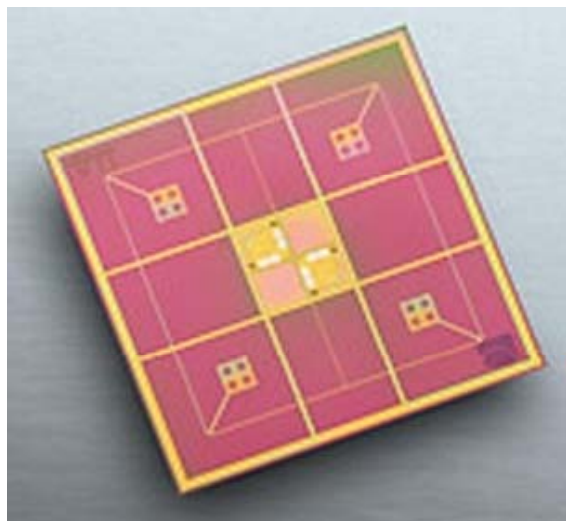
- Объем 32 литра
- Проходной диаметр 300 мм
- Скорость испарения жидкого гелия < 2,5 л/сутки (!)
- Уровень собственных шумов < 1 фТл / Гц<sup>1/2</sup> (!)

# Магнитокардиографические комплексы «МАГ-СКАН» производства ООО «НПО КРИОТОН»



7- и 9-канальные МКГ-комплексы серии «МАГ-СКАН» работают в обычных клинических условиях без дополнительной магнитной экранировки (в 2009 году зарегистрированы Росздравнадзором РФ в качестве изделий медицинской техники).

## ВТСП СКВИДЫ для магнитоэнцефалографии (MEG)



*Elektra Neuromag*



IREE & FZJ

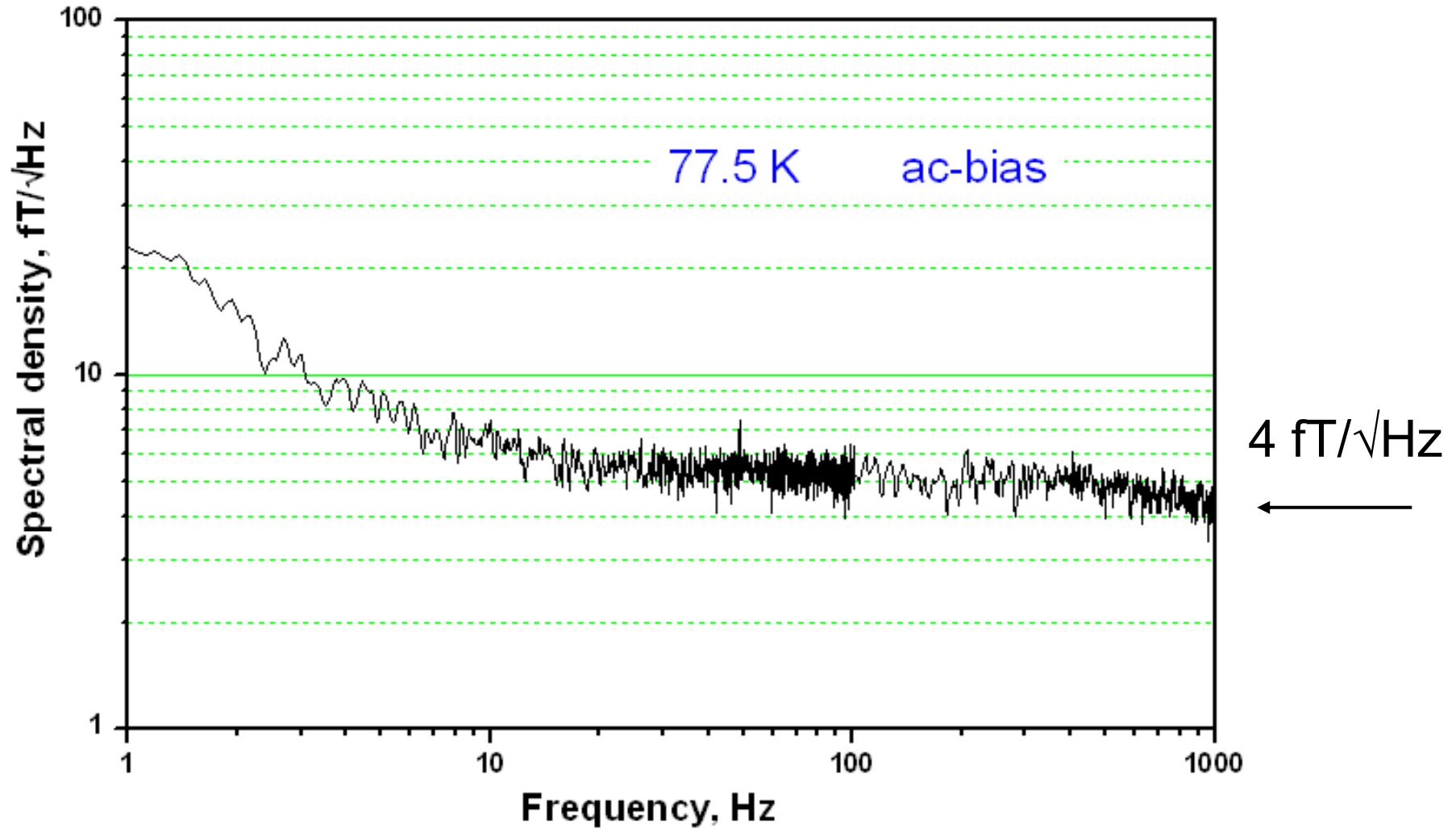


**Low- $T_c$  DC SQUID sensors:**  
 $^4\text{He}$  refill interval of about 7 days,  
21 mm x 21 mm sensors with  
white noise  $3.5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@4.2\text{K}$

**High- $T_c$  DC SQUID sensors:**  
 $\text{N}_2$  refill interval of about 1 month,  
16 mm x 16 mm sensors with  
white noise  $3.5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@77\text{K}$

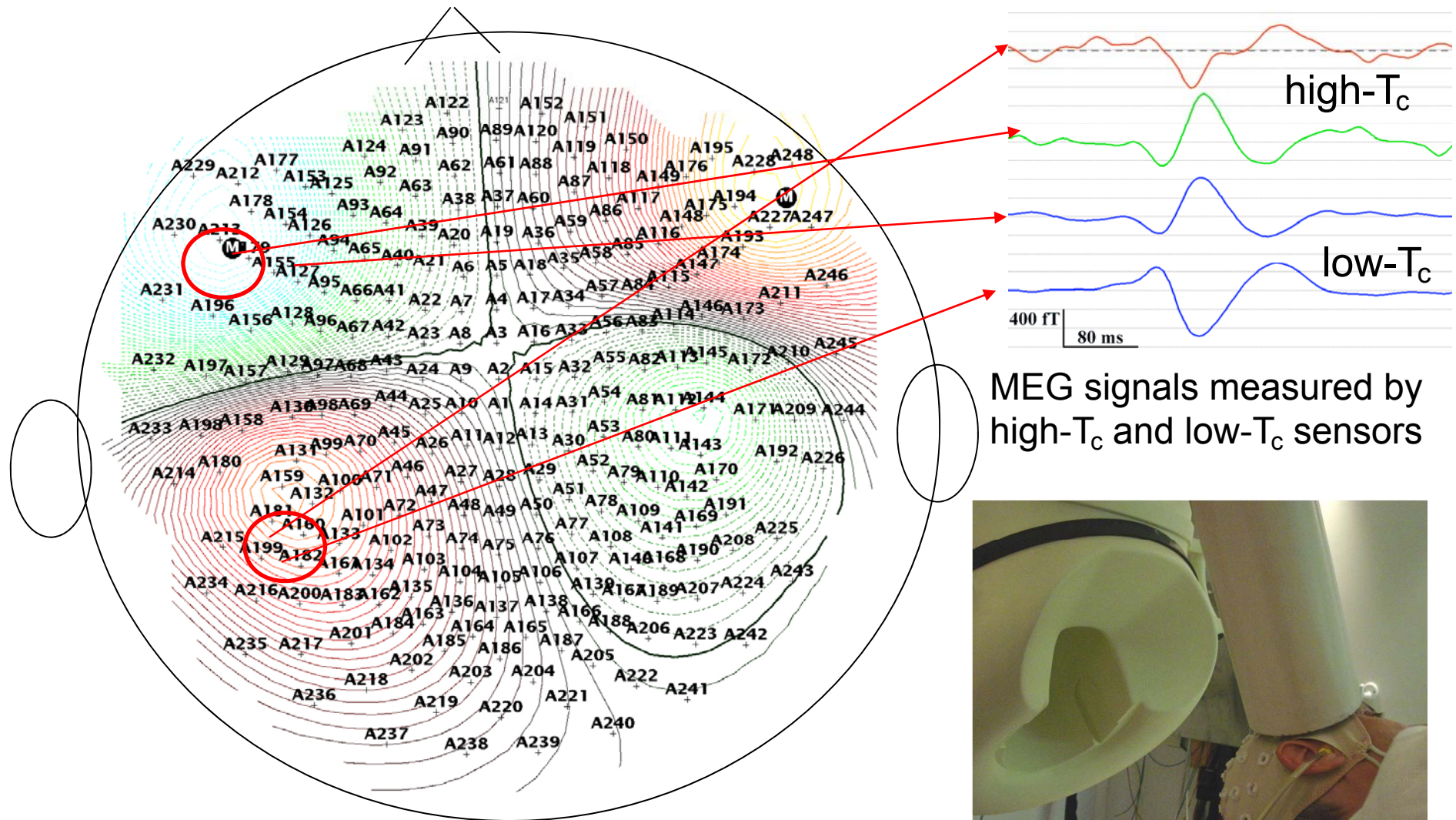
Преимущества: замена традиционных датчиков на ВТСП позволяет экономить до 100 000 Евро в год для одной MEG системы

# Noise spectral density of the high- $T_c$ DC SQUIDS



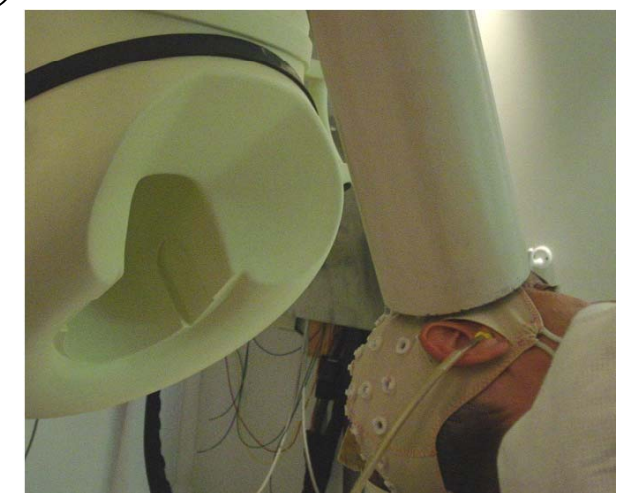


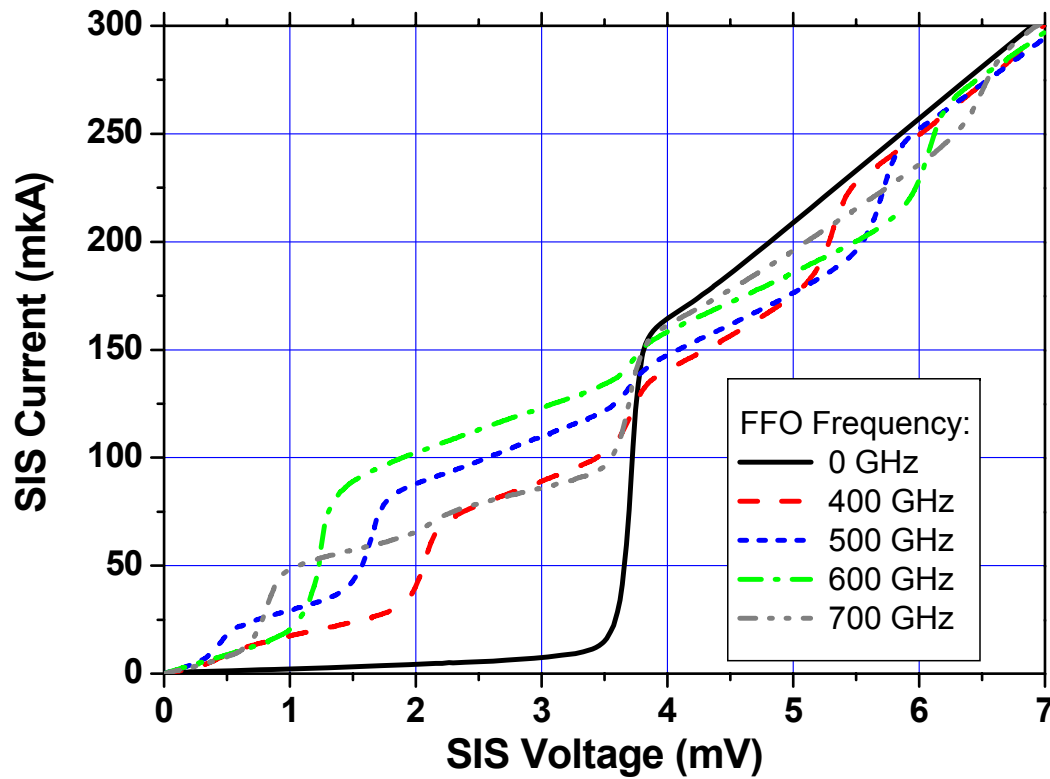
# MEG с помощью ВТСП и НТСП датчиков



MEG signals measured by high-T<sub>c</sub> and low-T<sub>c</sub> sensors

Contour plot of auditory evoked field and arrangement of low-T<sub>c</sub> sensors

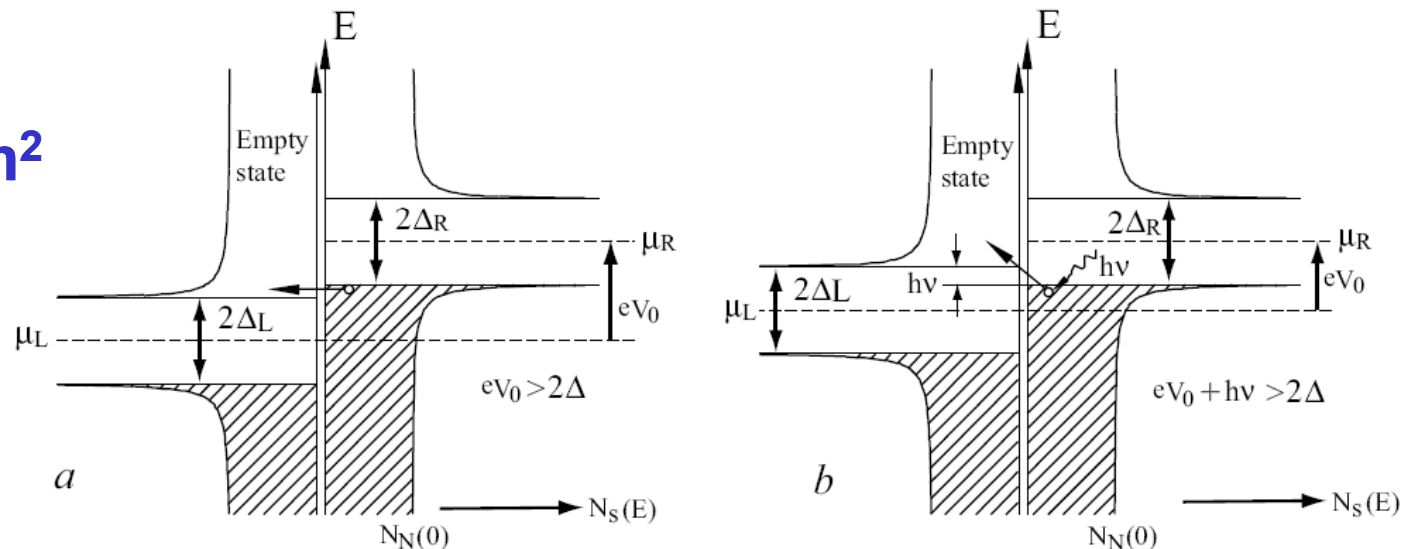




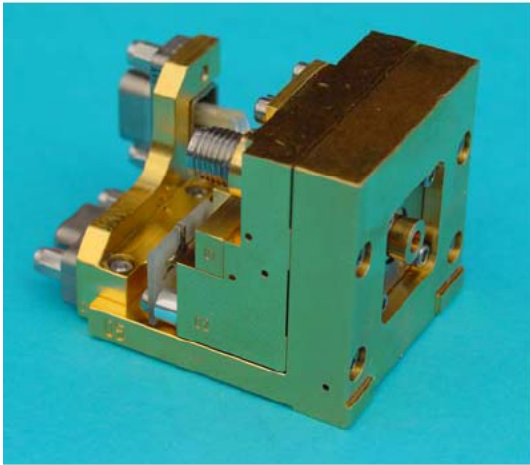
# Квантовые СИС-смесители;

диапазон: 0.1 – 1.4 ГГц,  
шумовая температура  
порядка  $hf/k$

**Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb**  
**Nb-AlN-Nb(N)**  
 **$J_c = 5-15 \text{ kA/cm}^2$**



12 ноября 2012

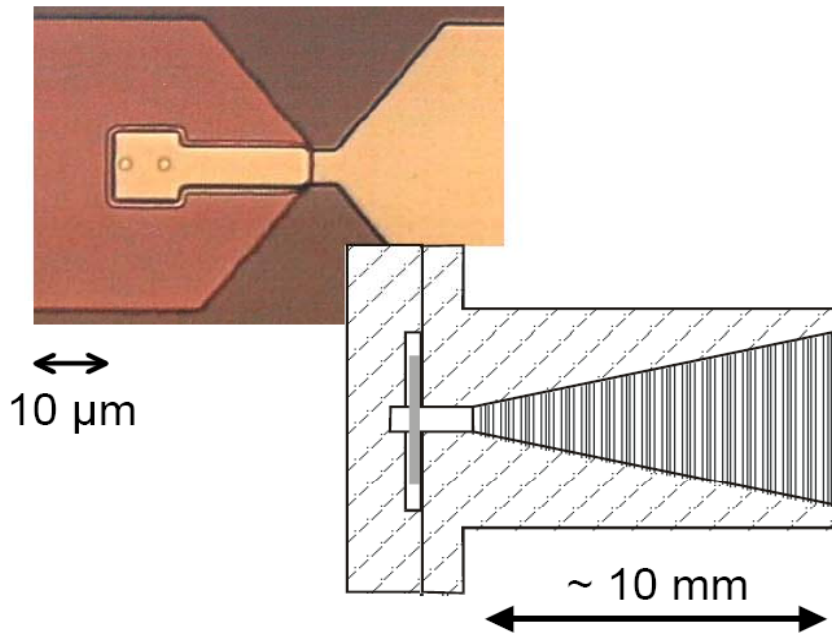


HIFI Band 3  
(de Lange *et al.*)

## Конструкции ТГц приемников

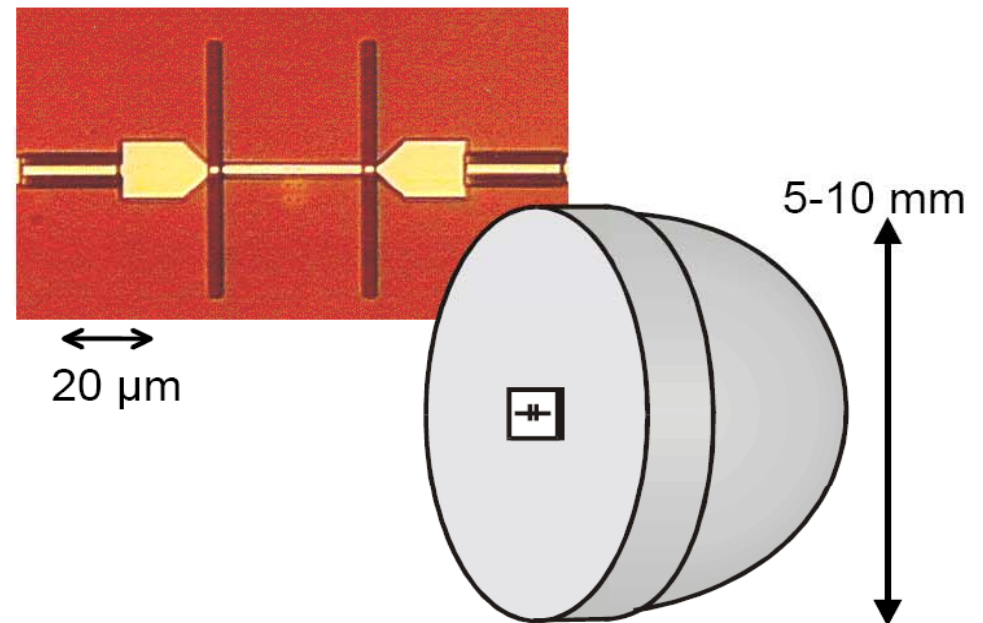
### Waveguide + corrugated horn

- demonstrated performance
- good beam quality / alignment
- closed structure (EM shielding)



### Quasi-optical antenna + lens

- easier to fabricate
- state-of-the art lab sensitivities
- flexibility in choice of substrate

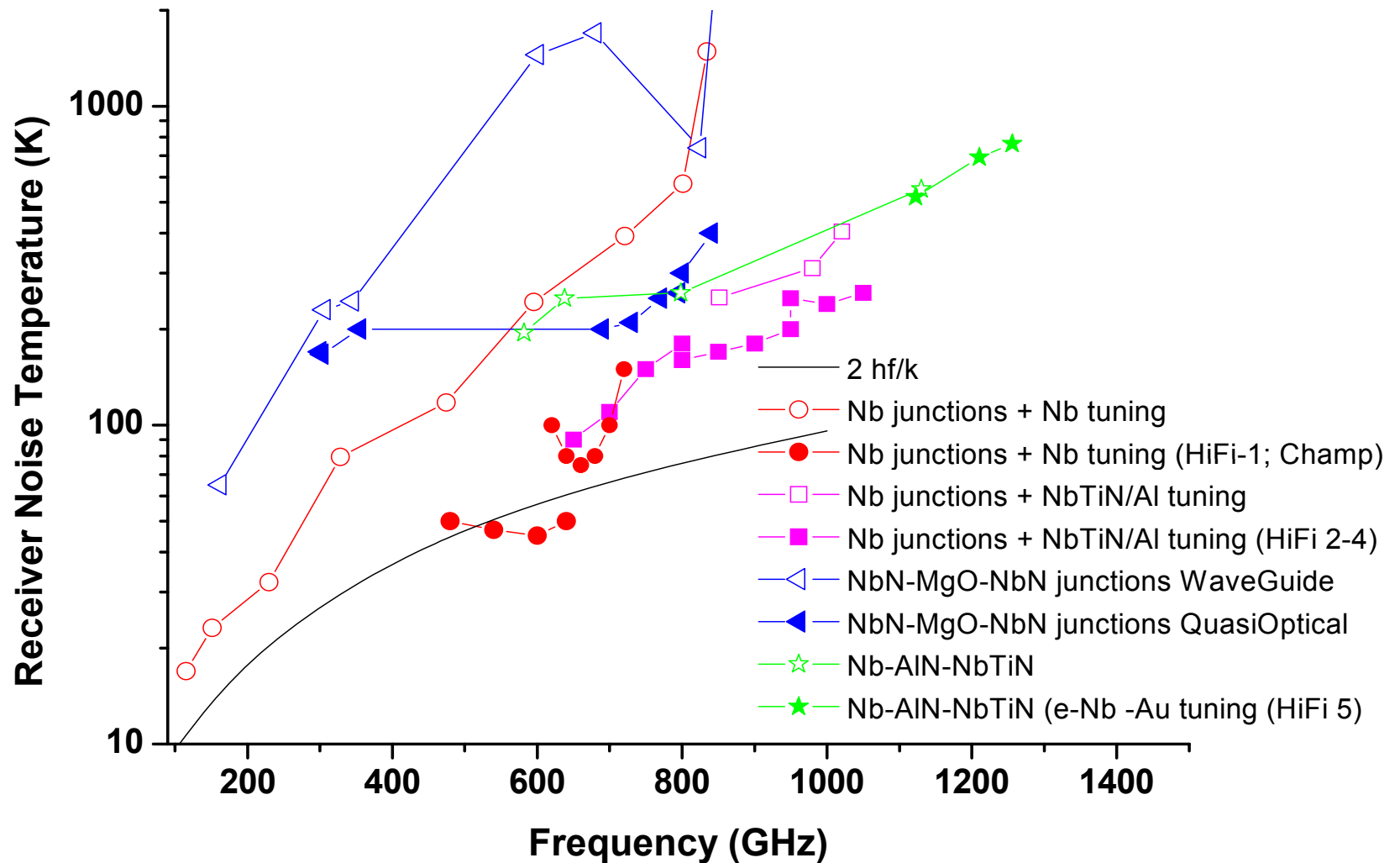
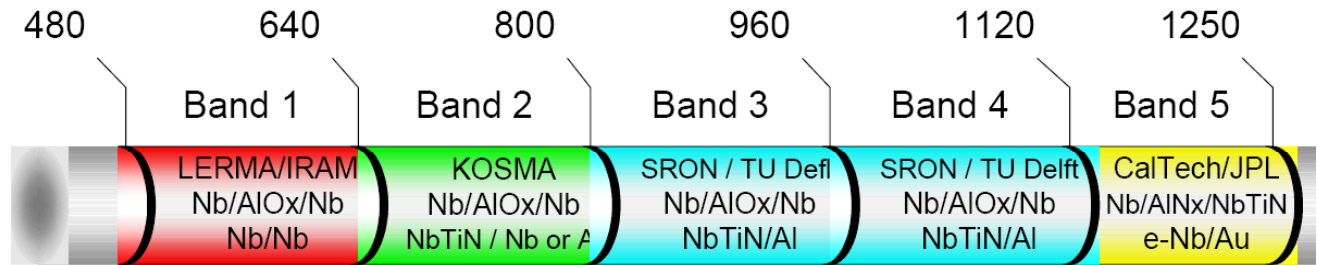


## Herschel and Planck launched with Ariane-5, May 2009

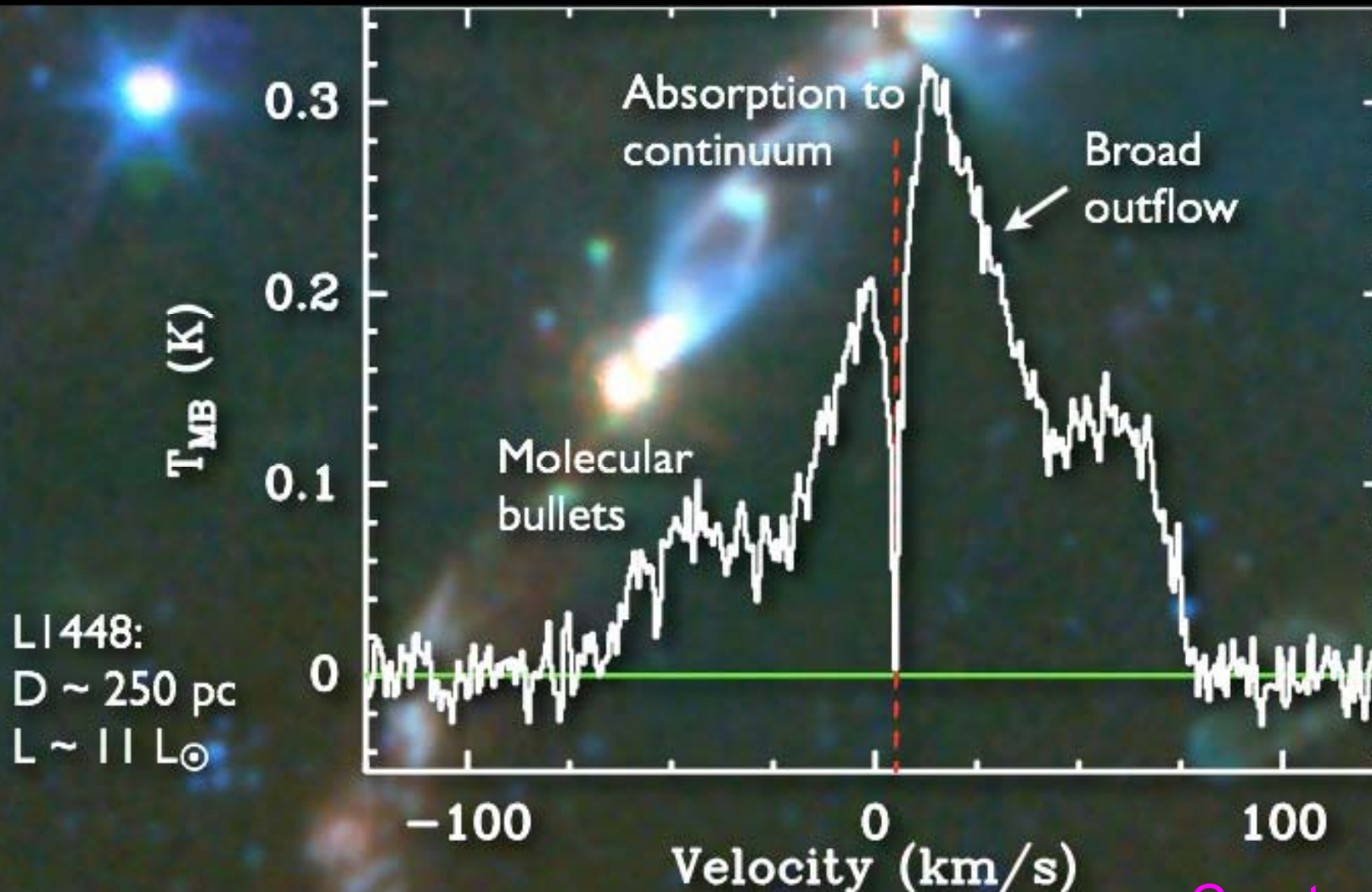




# СИС- приемники для Herschel



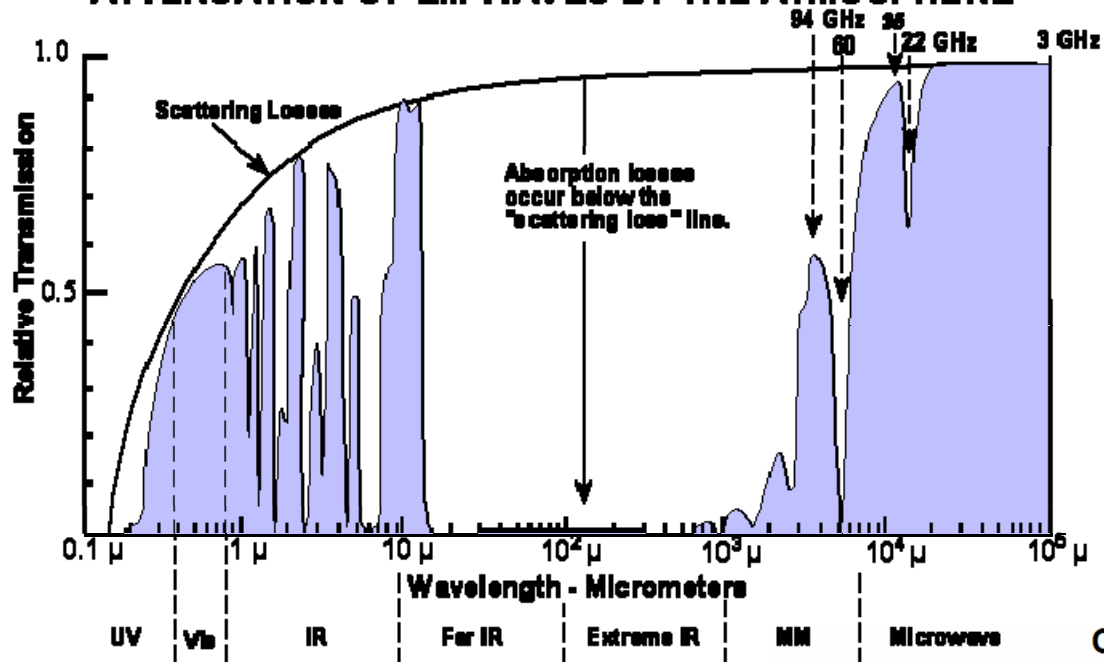
# Water bullets in a low-mass protostar



H<sub>2</sub>O bullets in protostellar jet vs.  
broad, shocked gas along outflow walls

Courtesy of  
Thijs de Graau  
Kristensen et al. in prep.

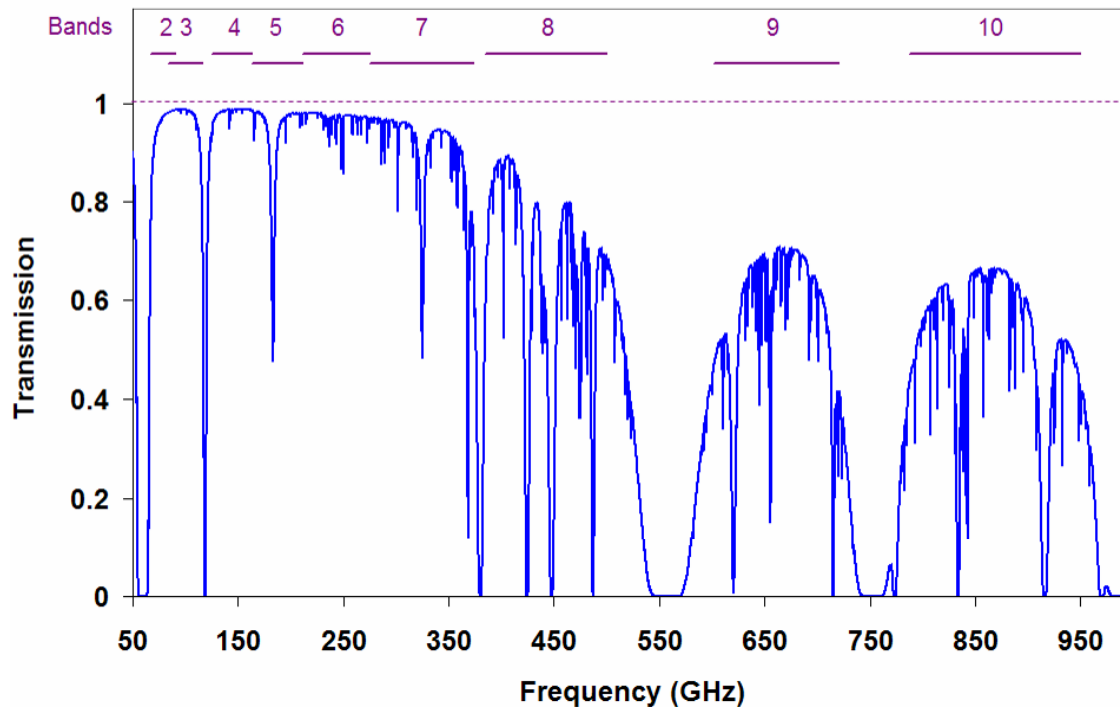
# ATTENUATION OF EM WAVES BY THE ATMOSPHERE



Пропускание атмосферы на уровне моря

Chajnantor - 5000m, 0.25mm pwv

Пропускание атмосферы для диапазонов ALMA



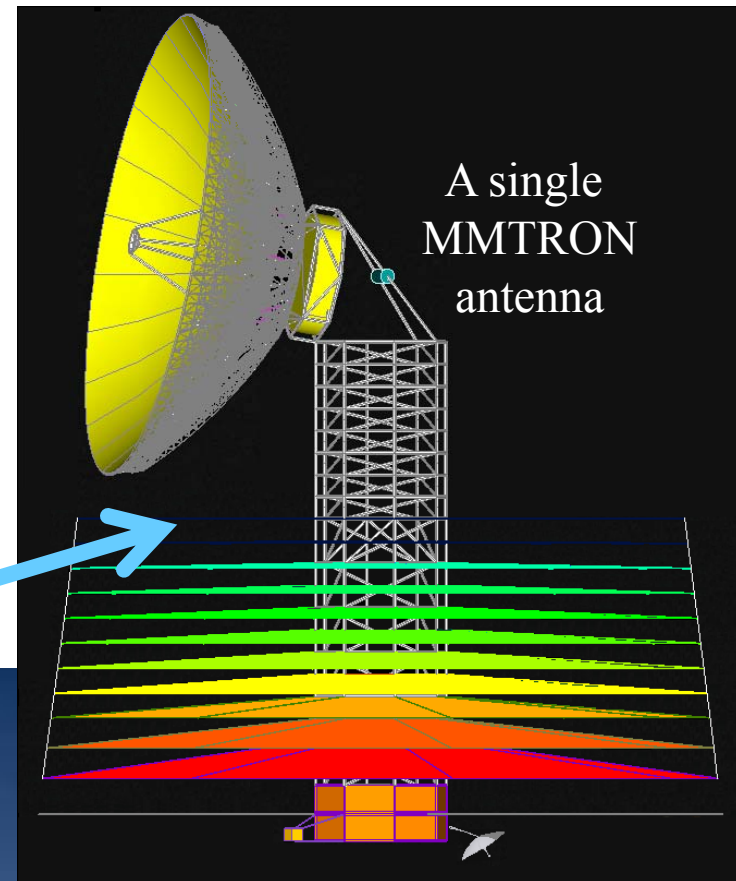
# ALMA; февраль 2011





# Будущее для интерферометрии

CCAT  
25 m, 10  $\mu\text{m}$  rms  
Cerro Chajnantor

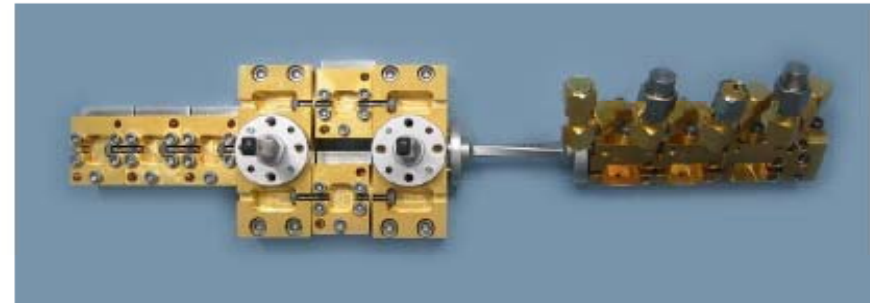
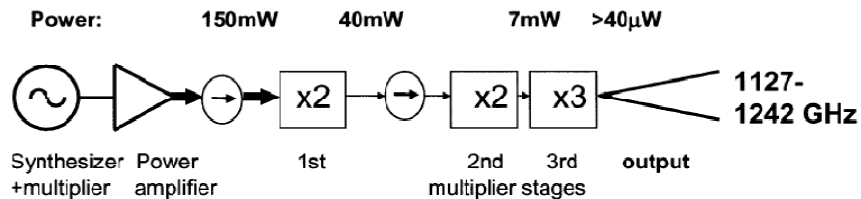


Courtesy of  
Thijs de Graau

# Субмм источники гетеродина для радиоастрономии

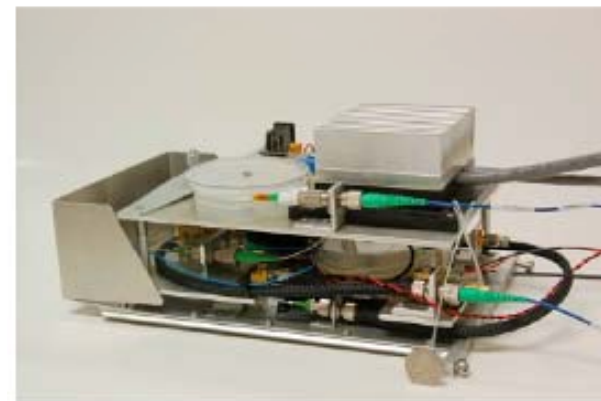
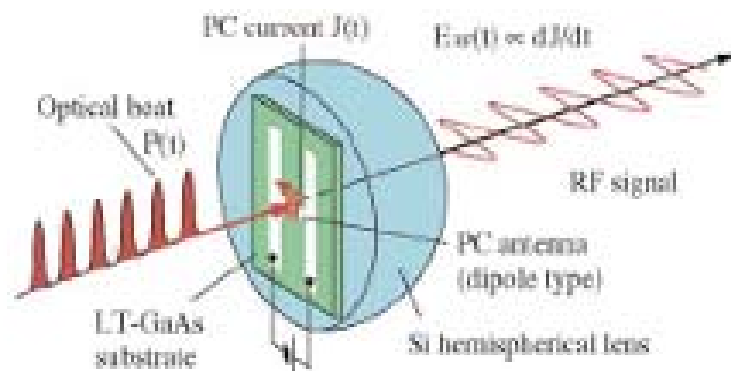
**Need:** Sufficient LO power at THz frequencies

**Goal:** Compact solid state frequency chain



**Multiplier chains (JPL, RPG, VDI)**

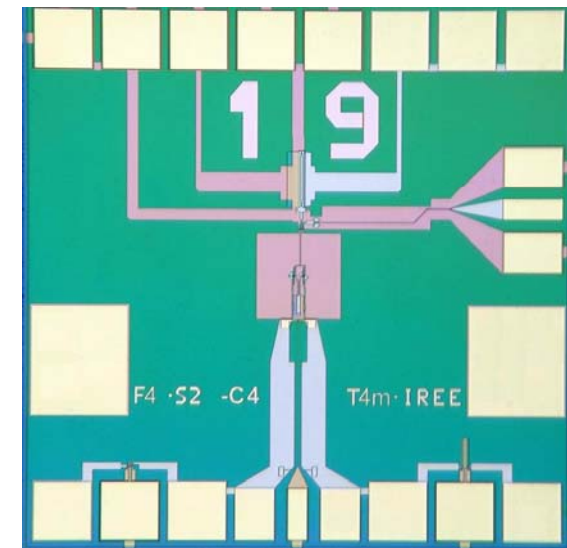
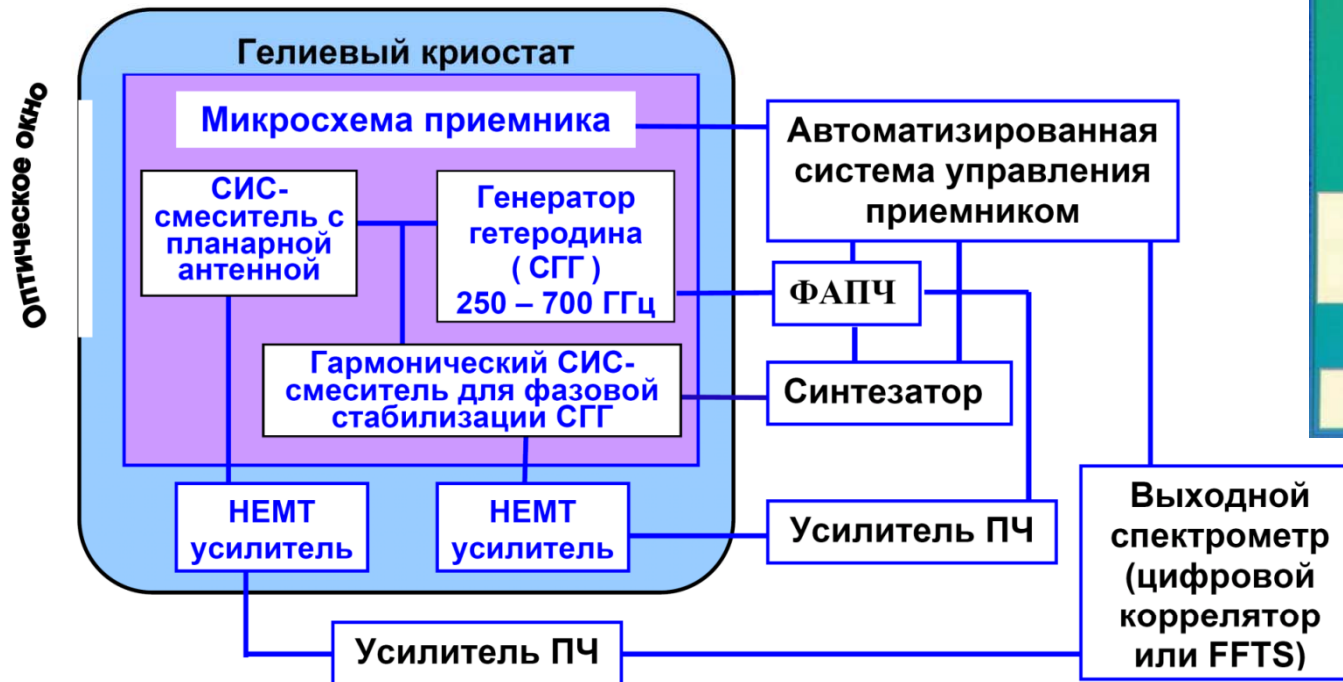
## HIFI multipliers, JPL



**Photo mixers,  
Down conversion**

**Harvard Smithsonian; 160-260 GHz**

# Сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП)



Микросхема СИП



Nb–AlO<sub>x</sub>–Nb или Nb–AlN–NbN

Плотность критического тока:  $J_c = 3 - 8 \text{ кА/см}^2$ ;

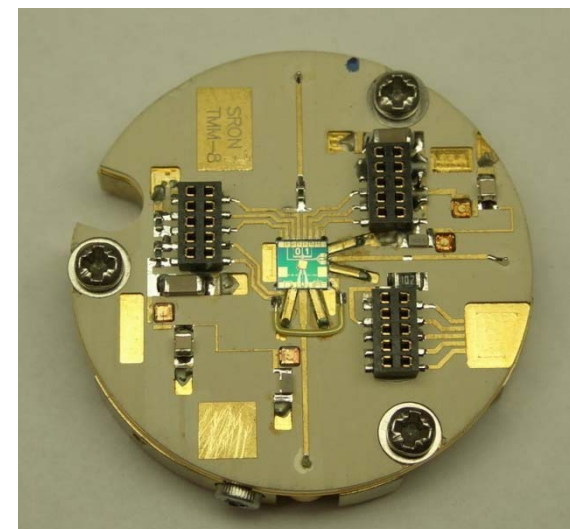
Толщина туннельного барьера:  $\sim 1 \text{ нм}$ ;

Площадь СИС перехода:  $\sim 1 \text{ мкм}^2$



## Основные параметры спектрометра

Входной диапазон частот	450 – 700 ГГц
Шумовая температура	120 К
Диапазон ПЧ	4-8 ГГц
Шаг гетеродина по частоте	< 300 МГц
Спектральное разрешение	< 1 МГц
Выделяемая мощность	< 30 мВт
Рабочая температура	< 4.5 К







# TELIS (Terahertz Limb Sounder)



Международный проект по разработке трехканального аэростатного спектрометра наклонного зондирования

Три запуск аэростата на полигоне Esrange, Швеция;  
Март 2009 г., Январь 2010, Март 2011 г.

Объем аэростата: 400 000 м<sup>3</sup>; вес полезной нагрузки: 1 200 кг



# Спектры, измеренные при сканировании телескопа

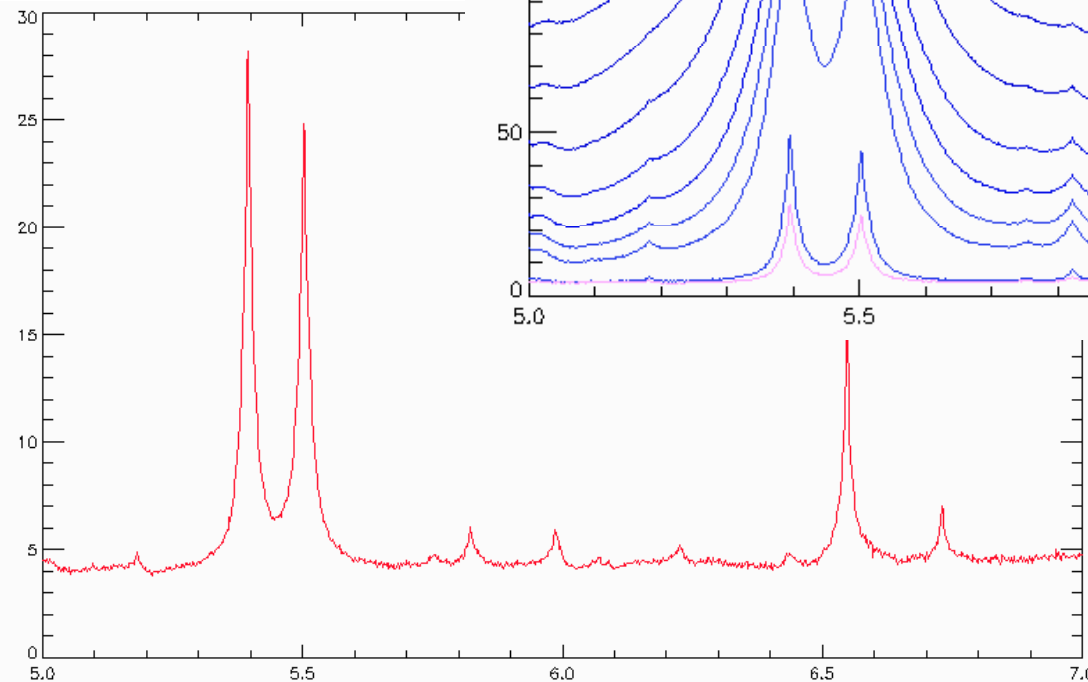
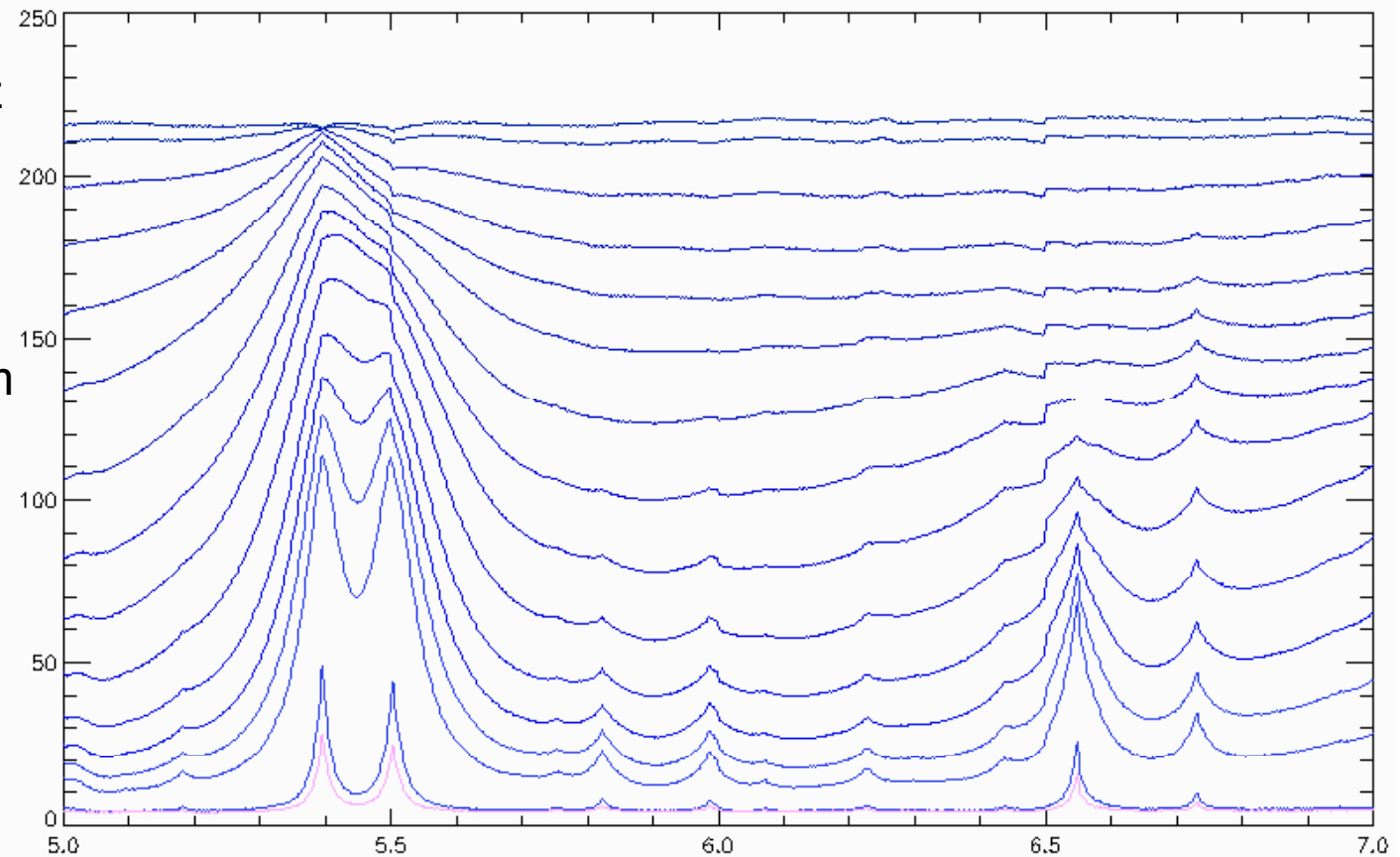
FFO Freq = 495 GHz

Orbit – 30 km;

Increment – 1.5 km,

Tangent: 10.5 – 30 km

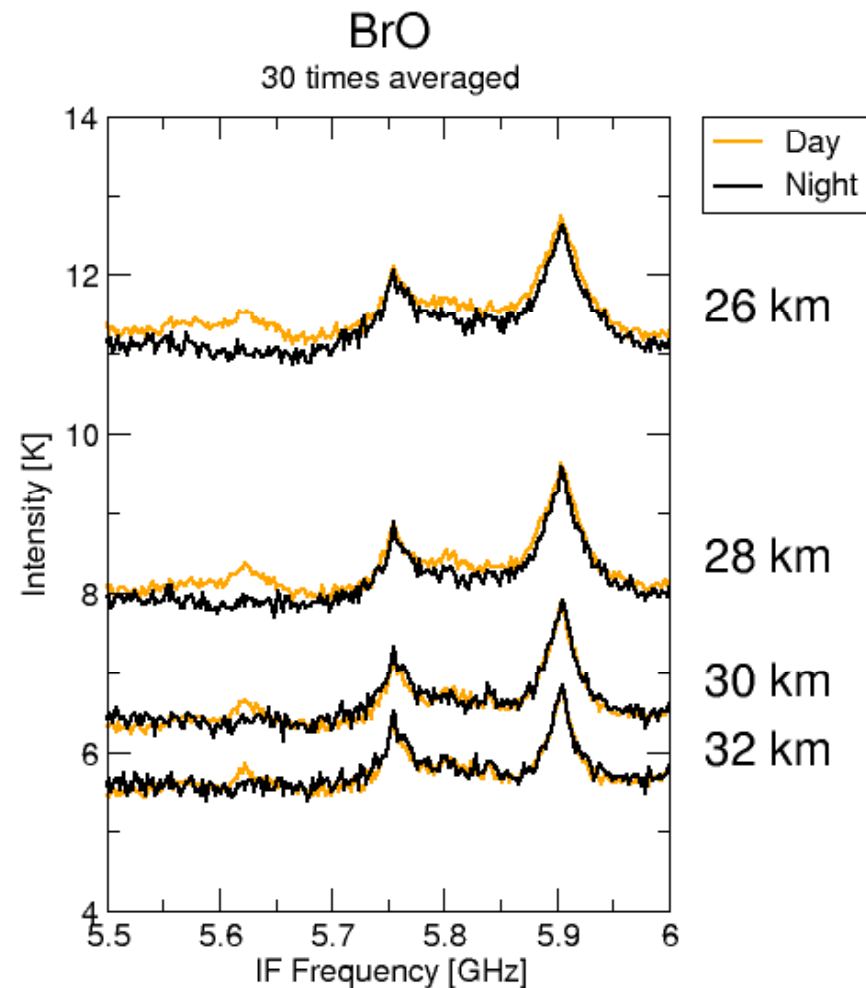
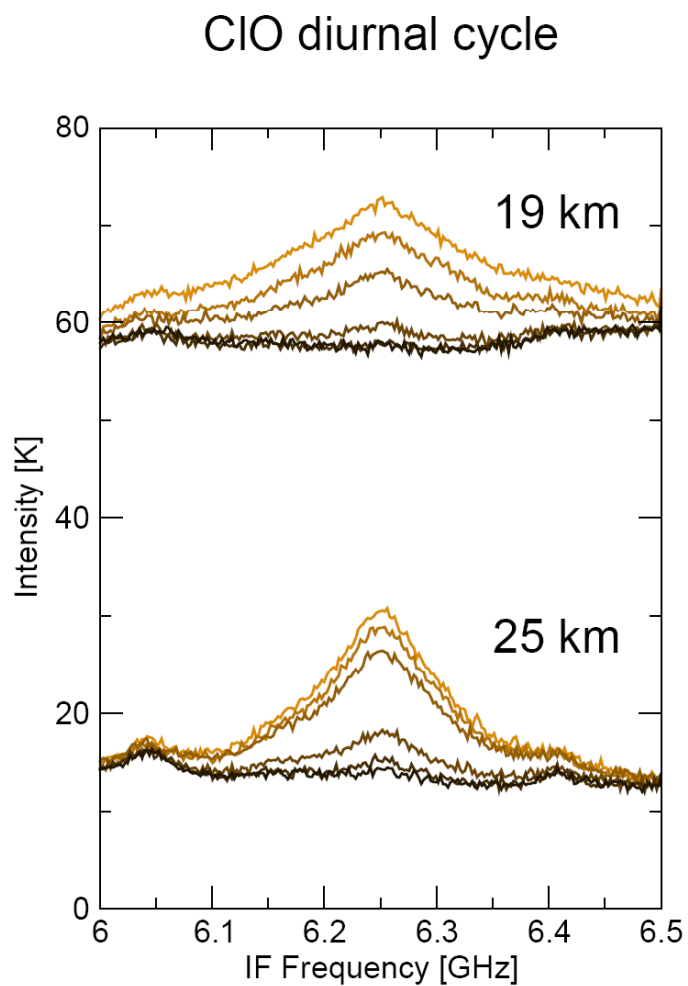
45 degrees up



Выходная частота, ГГц

Выходная частота ПЧ, ГГц

# Спектры, показывающие рост концентрации ClO и BrO после восхода солнца (f СГГ = 495 ГГц и 519,3 ГГц).





# СИП для медицинской диагностики



## Основные достоинства СИП для медицины

- Низкий (квантовый) уровень собственных шумов спектрометра => возможность детектирования сверхмалых концентраций веществ – маркеров => диагностика заболеваний на ранних стадиях;
- Однозначность идентификации веществ - маркеров благодаря высокому спектральному разрешению ( $< 1$  МГц);
- Широкая рабочая полоса частот – регистрация большого числа соединений – маркеров одним прибором.

Фото лабораторной установки  
для спектрального анализа  
выдыхаемого воздуха

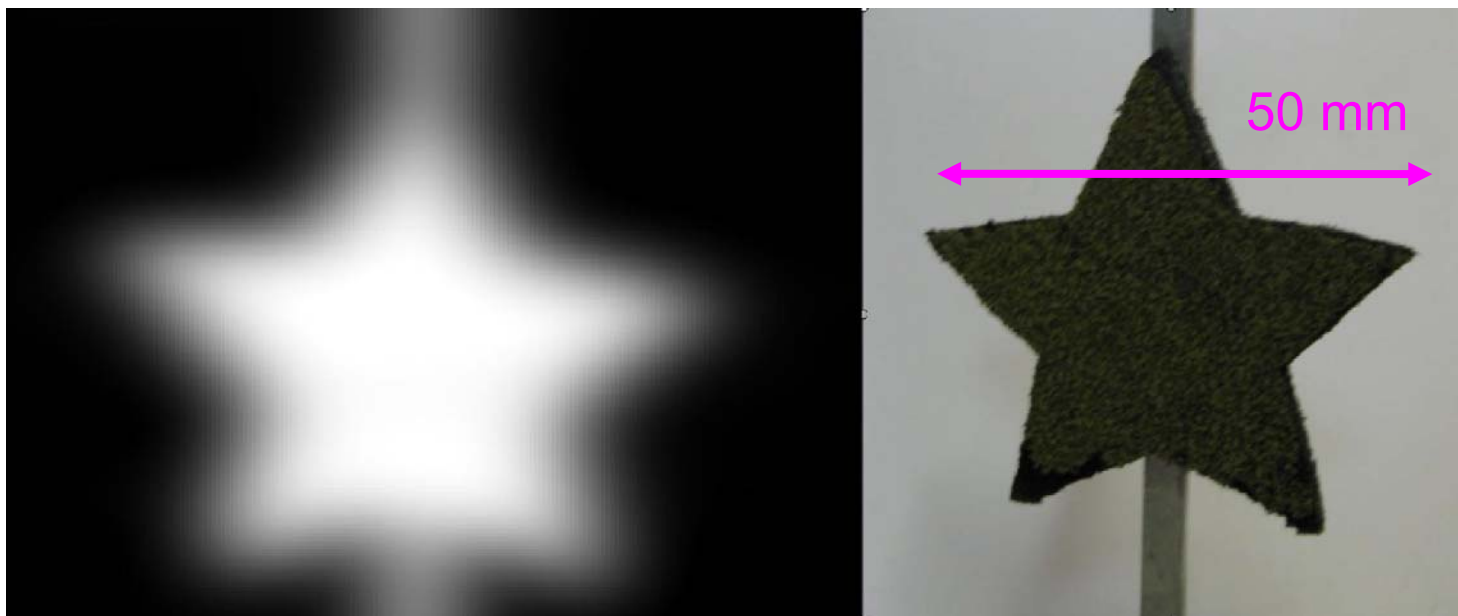






MSPU

## Пассивная система построения терагерцового изображения

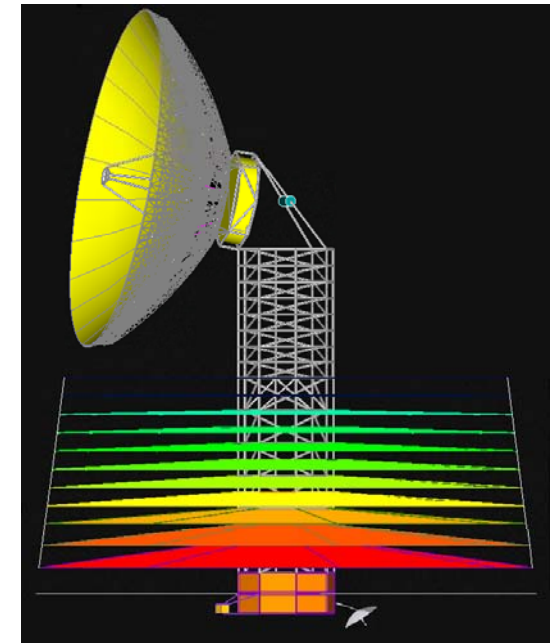
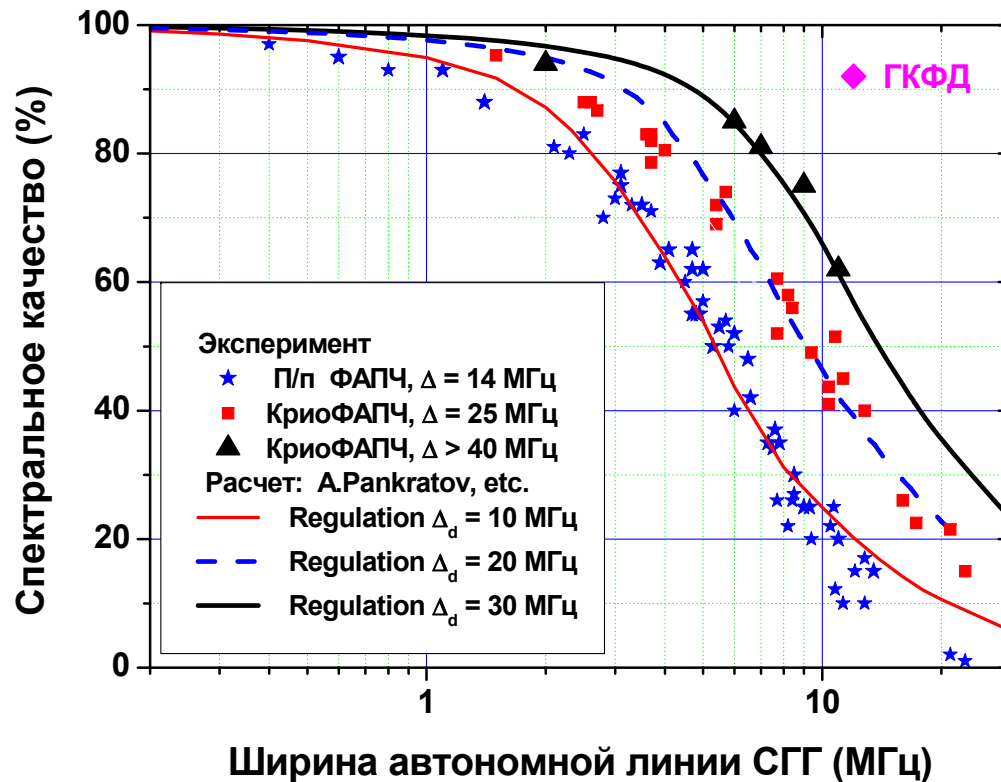


- One pixel receiver with mechanical scanning (NETD  $\sim 13$  mK; Spatial resolution  $\sim 2$  mm)
- Next step: linear array of SIRs



# Криогенный фазовый детектор

Интеграция системы ФАПЧ с криогенным генератором гетеродина



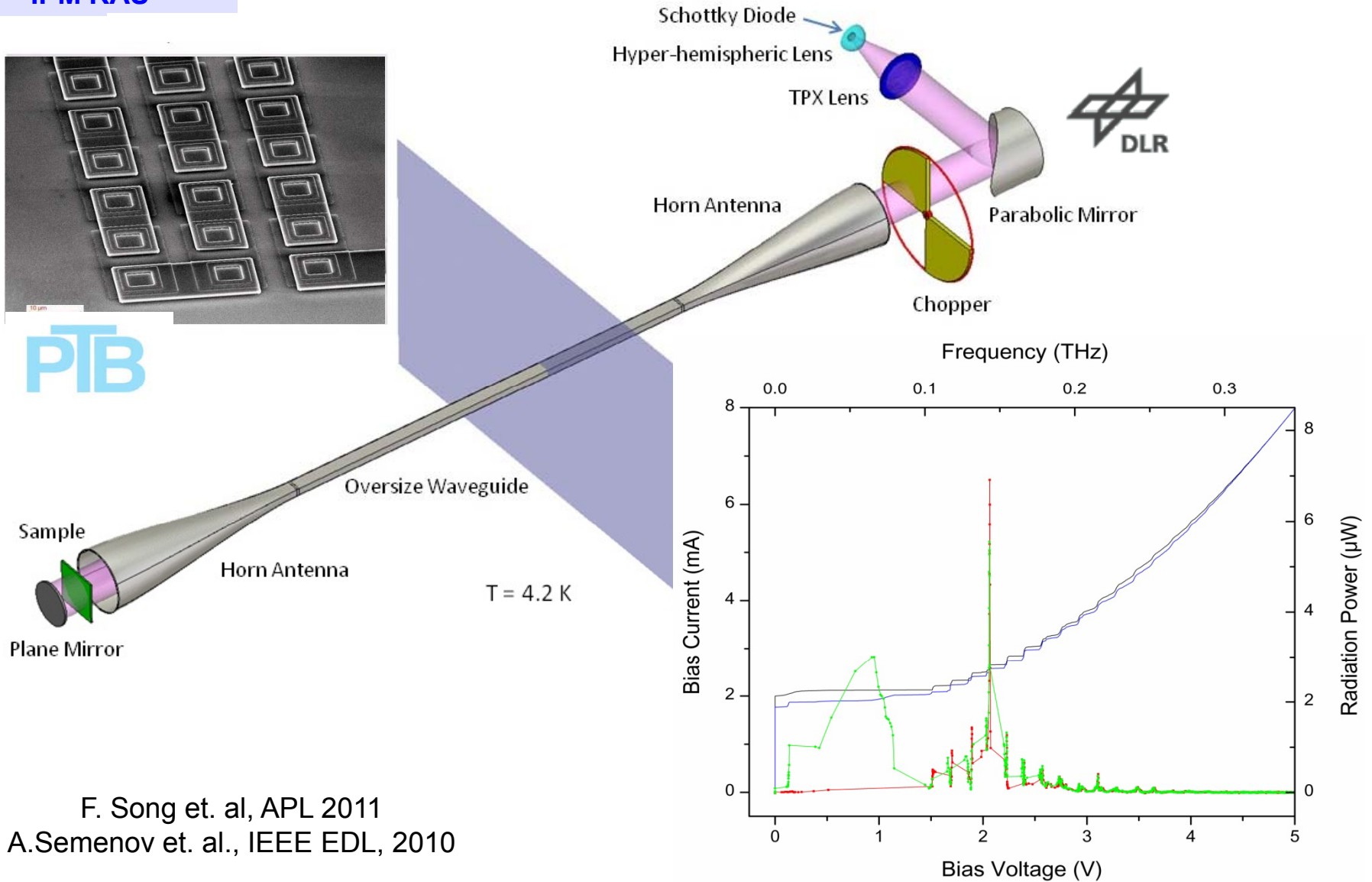
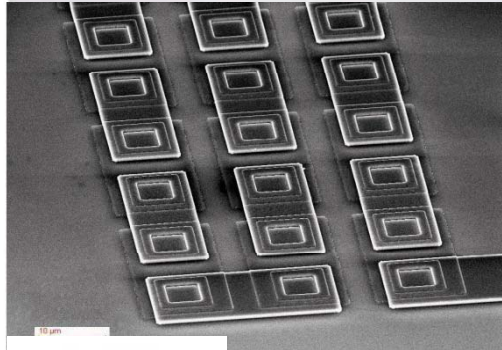
Ground-space interferometer



Полоса	ПП ФАПЧ	КриоФАПЧ	ГКФД
BW (МГц)	12	40	70



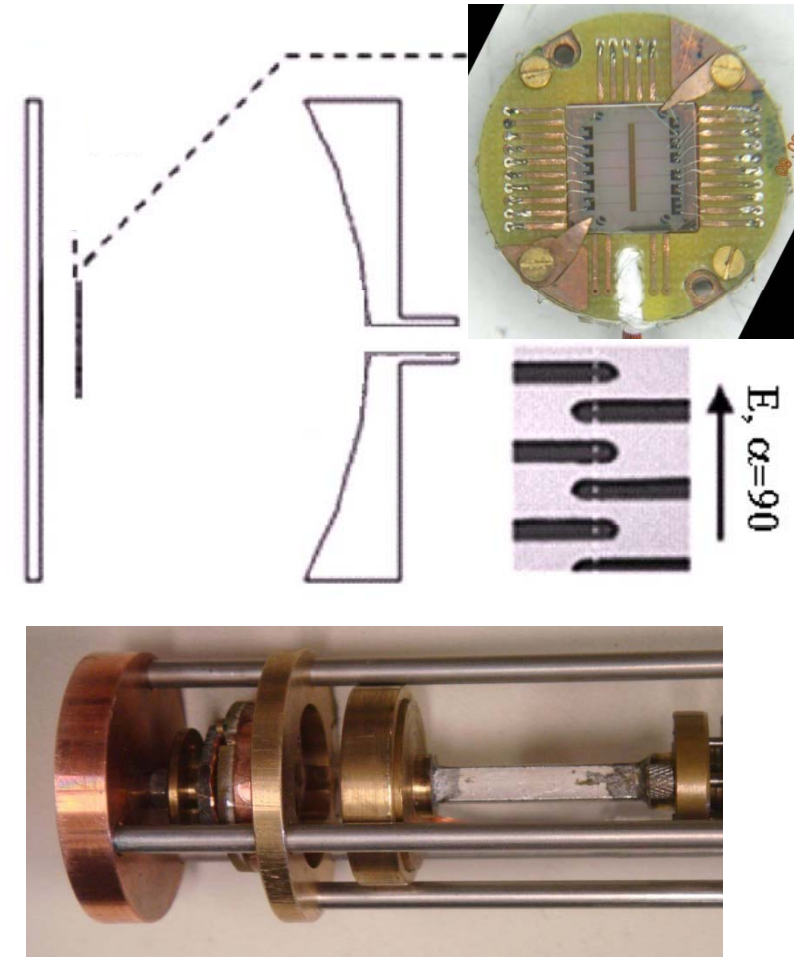
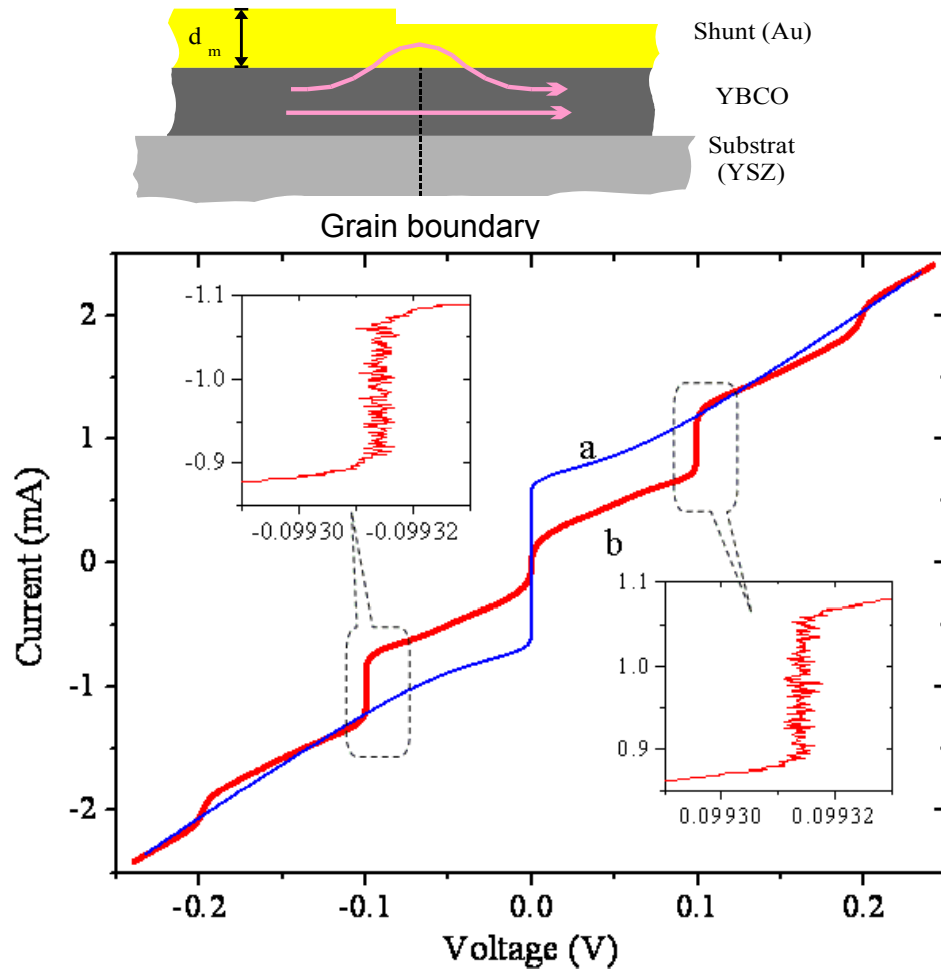
# Когерентное излучение из 7000 джозефсоновских контактов Nb- $\alpha$ Si-Nb



F. Song et. al, APL 2011  
A.Semenov et. al., IEEE EDL, 2010



# HTS array of 620 bicrystal junctions in a hemispherical Fabry-Perot resonator

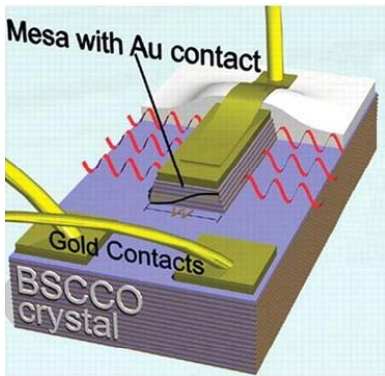


A.M. Klushin et al., Appl. Phys. Lett., 1996, 2002, 2006.

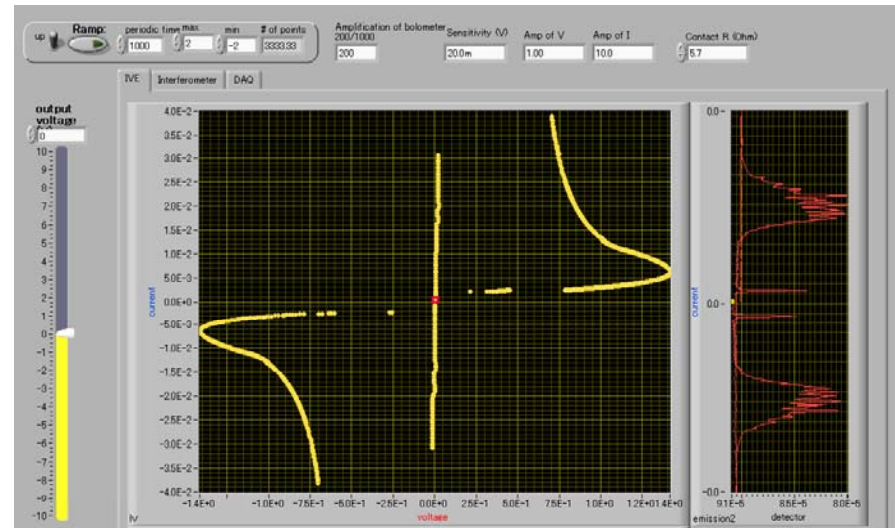
A.M. Klushin et al., J. Phys.: Conf. Ser., 2008



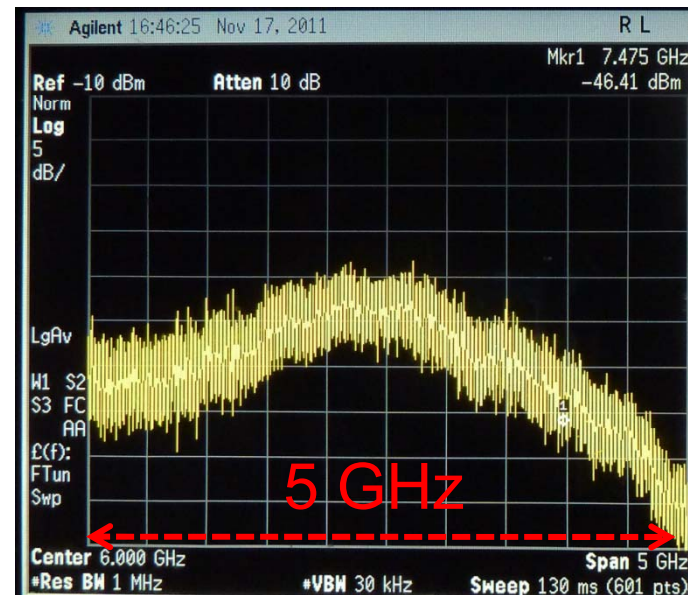
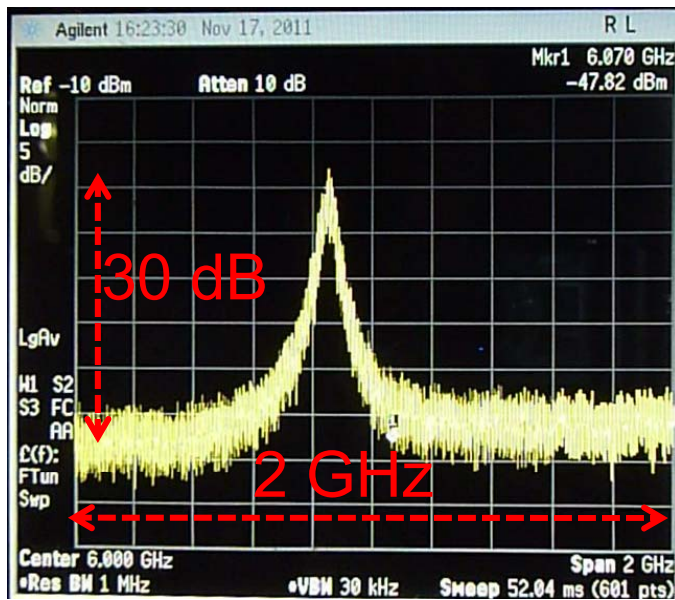
# Спектры излучения из BSCCO mesa, измеренные СИП



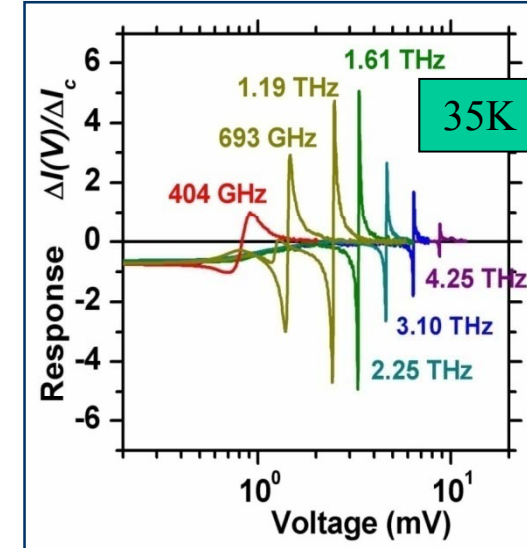
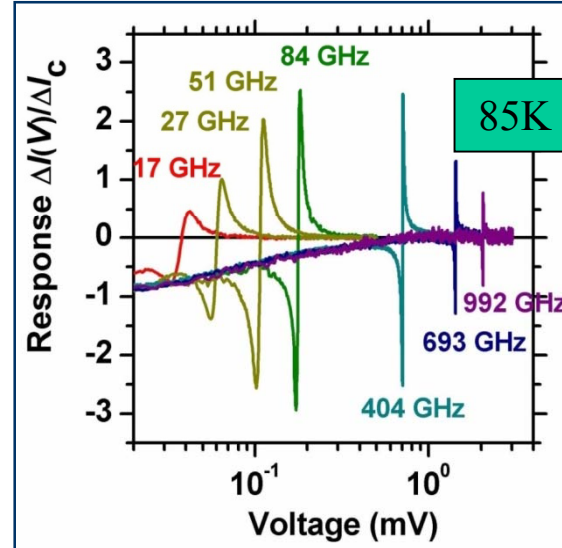
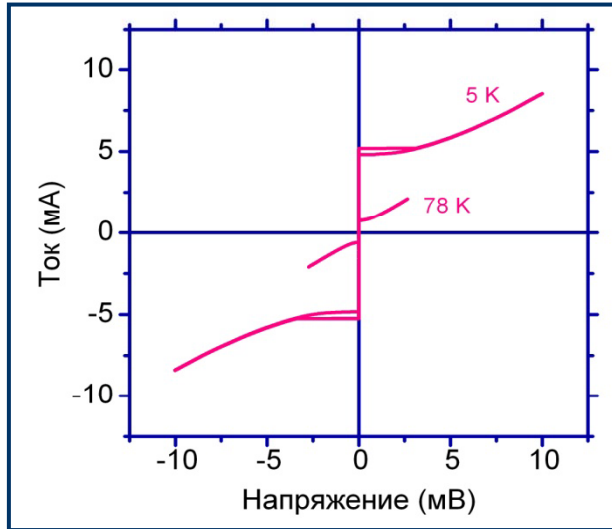
Huabing Wang  
Tsukuba, Japan  
Nanjing, China



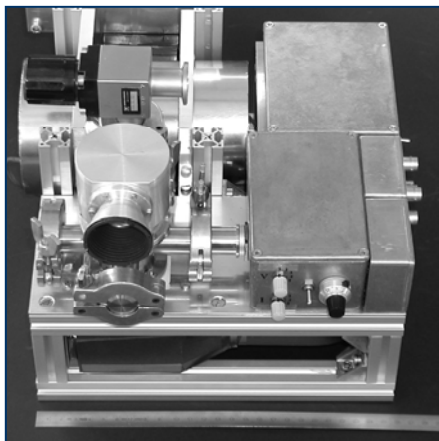
Linewidth: down to **25 MHz**  
Frequency range at 4.2 K: **584 ~ 736 GHz**



# Джозефсоновские детекторы и спектрометры из ВТСП



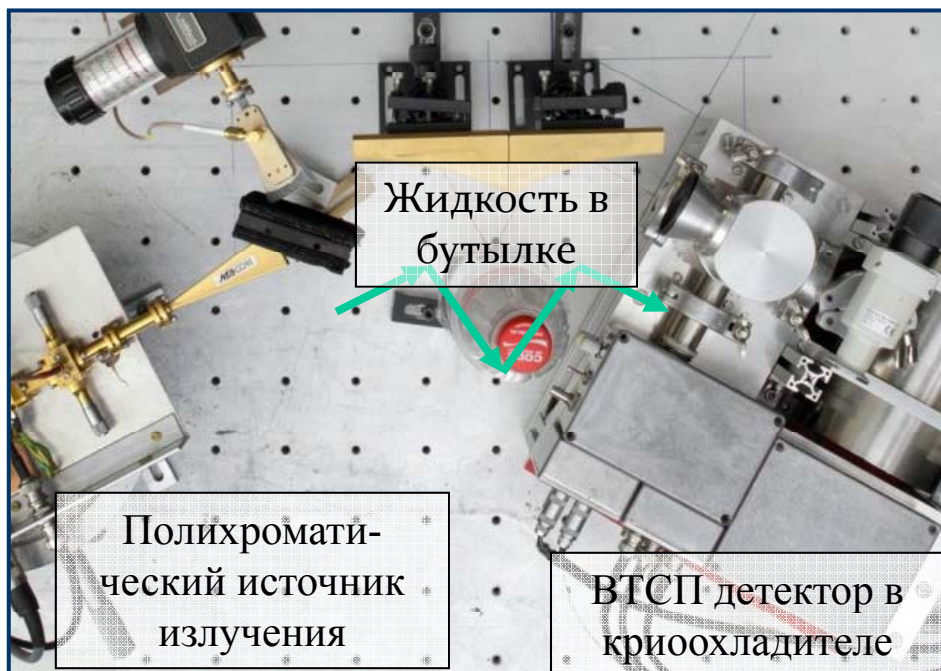
Y. Divin, et al. Physica C 2002



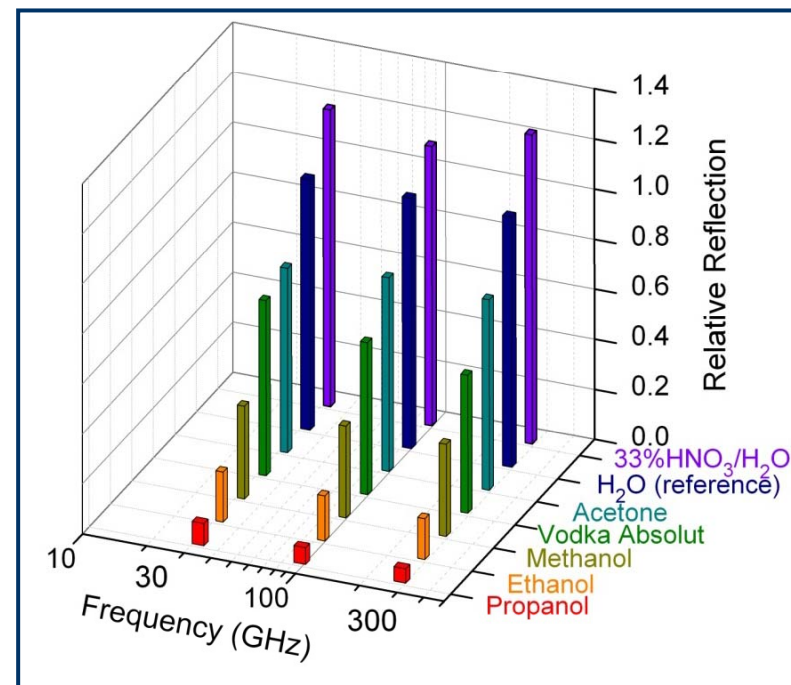
- ВТСП джозефсоновские детекторы в криоохладителях
  - Частотный диапазон: 5 ГГц - 5 ТГц
  - Динамический диапазон по мощности: до  $10^6$
  - NEP: до  $8 \times 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>

Ю.Я. Дивин, У. Поппе, И.М. Котелянский, В.Н. Губанков,  
К. Урбан. Радиотехника и Электроника 2008

# Определение жидкостей с помощью джозефсоновской спектроскопии



**Макет определителя жидкостей**



**Первая база данных**

**Время измерений: 0,2 -5 сек.; Точность измерения: 0,3%**  
**Применения: сфера безопасности, науки о жизни**

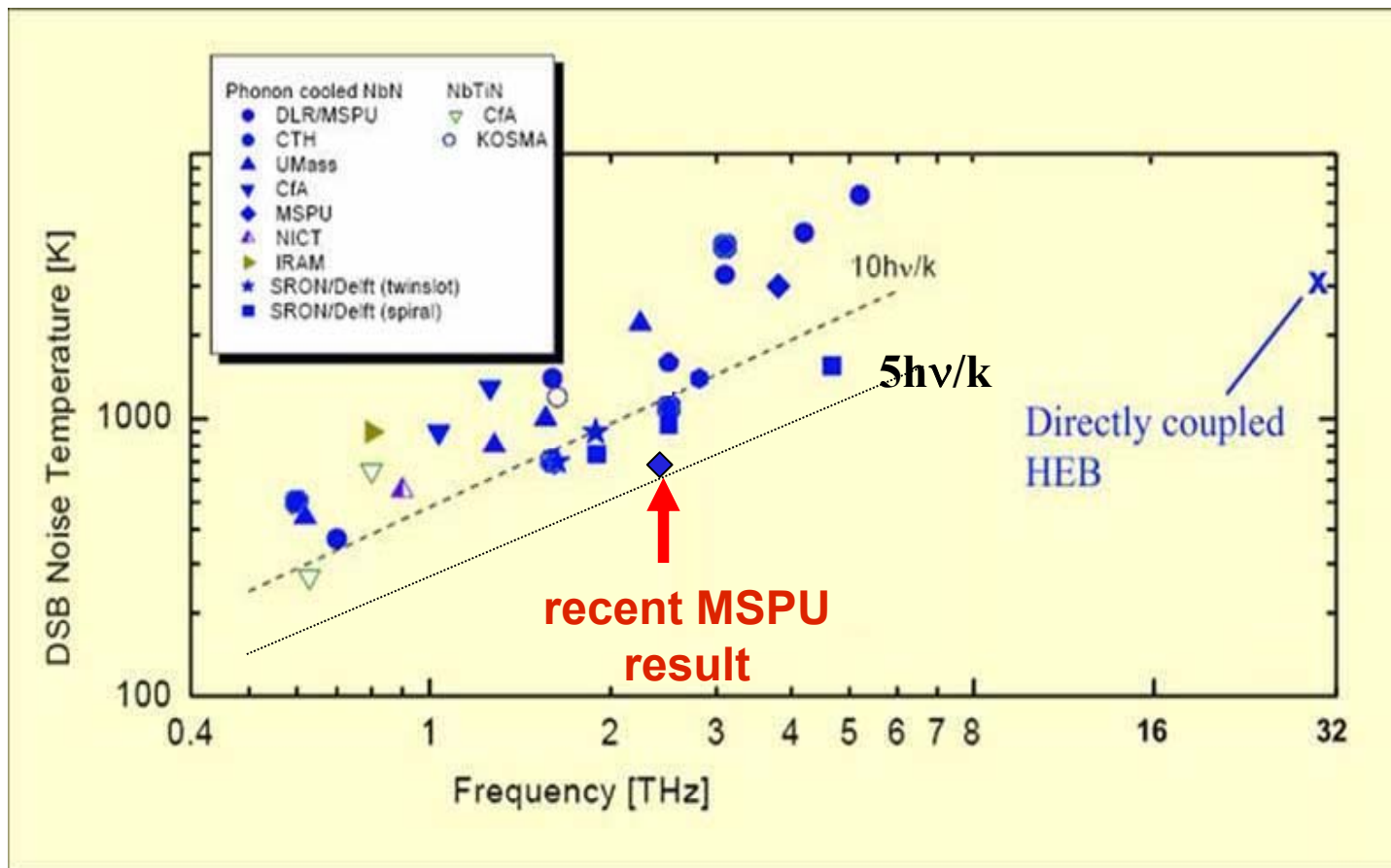
Y. Divin, M. Lyatti, U. Poppe, K. Urban, V. Pavlovskiy. IEEE TAS 2011



# Шумовая температура как функция частоты гетеродина для терагерцовых приемников на основе НЕВ смесителей

The minimum noise temperature that a heterodyne receiver may have is set by the quantum limit  $h\nu/k$ .

Most of the HEB mixers studied today in various laboratories are fabricated from NbN films deposited at MSPU

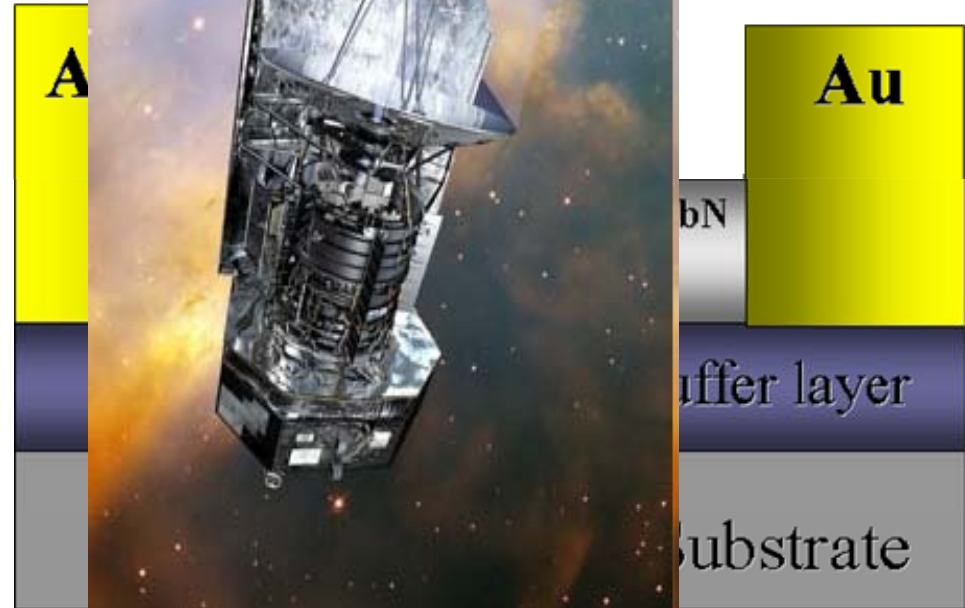
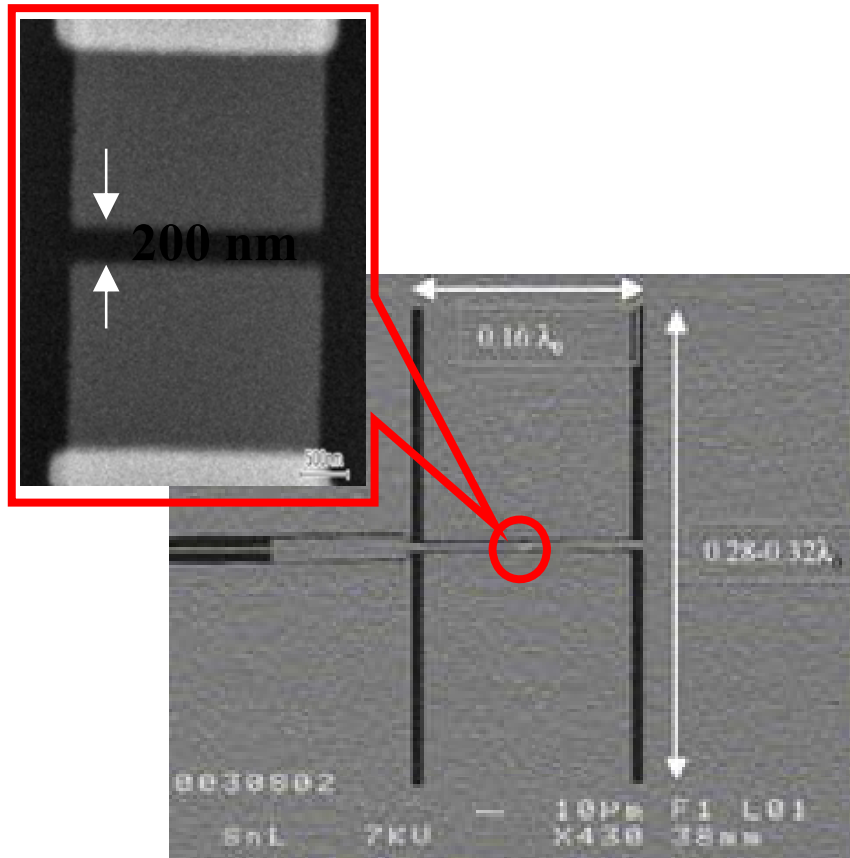






MSPU

# NbN-смеситель на горячих электронах



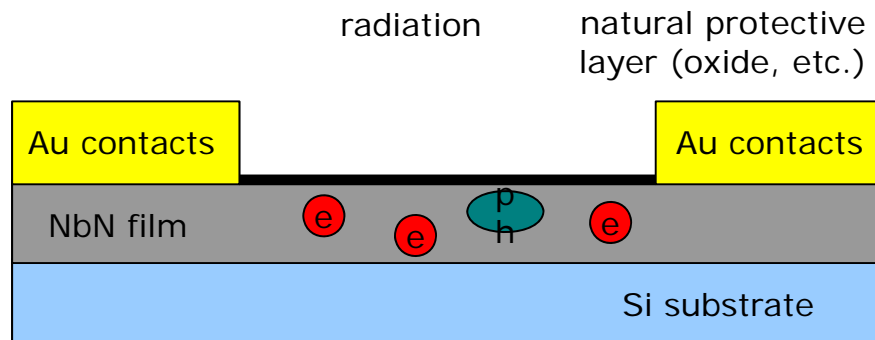
E.M.Gershenzon, G.N.Gol'tsman et al. Sov. Phys. Superconductivity 3, 1582, 1990

Herschel Space Observatory launched, May 2009

HEB mixers in Bands 6 and 7 of the HIFI instrument: 1.41 THz – 1.91 THz

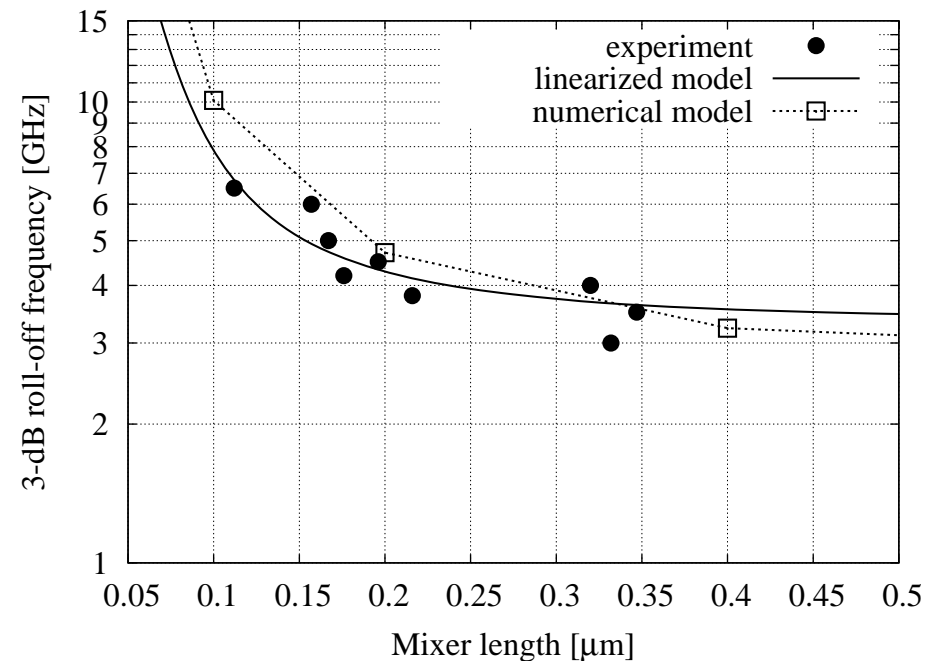
# *In situ* ТЕХНОЛОГИЯ

**NEW (*in situ*)** process:  
Au and NbN are deposited in the same process without breaking vacuum



interface between film and contact pads is now clean, so hot electrons can easily diffuse out →

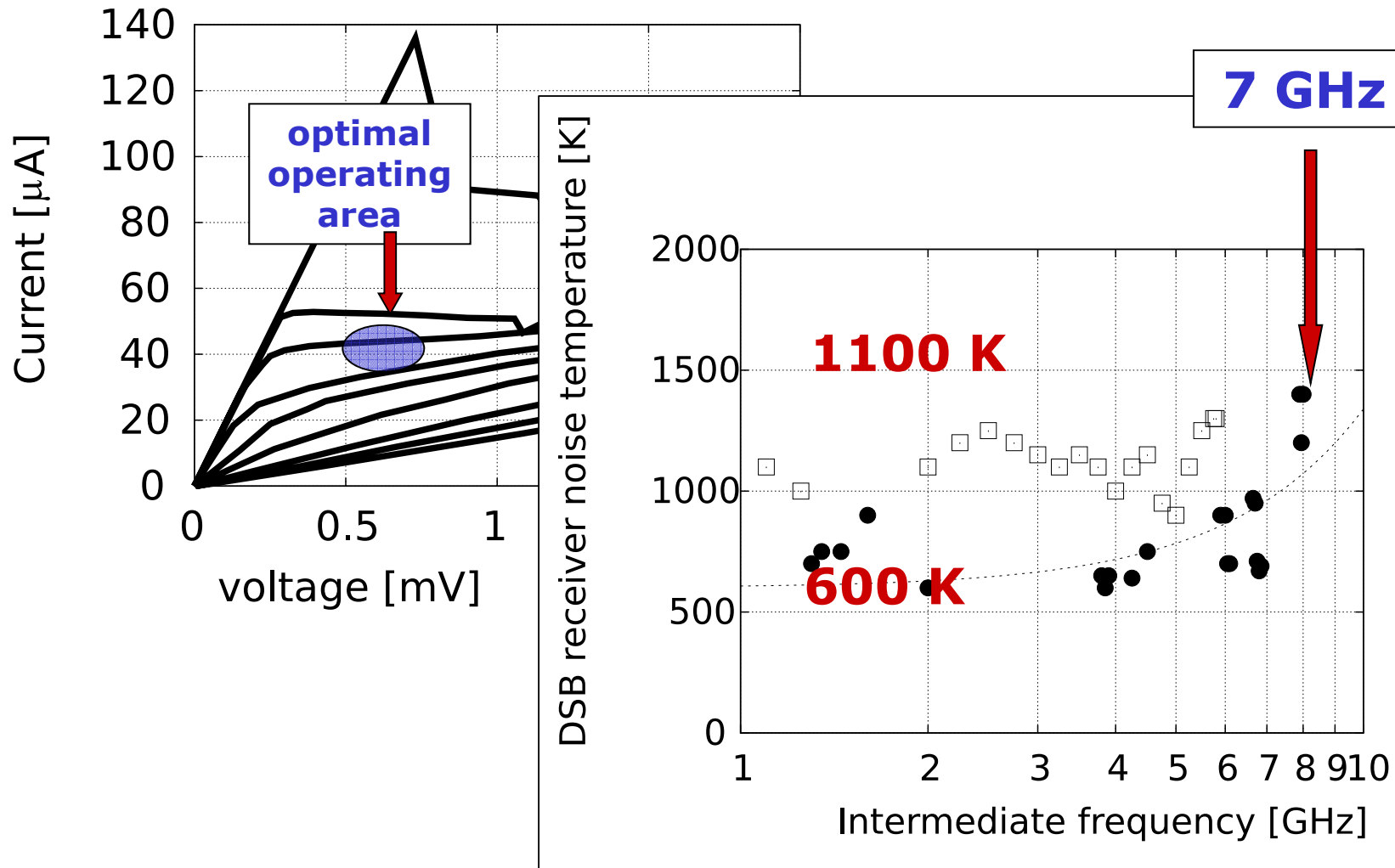
For HEB lengths shorter than diffusion length diffusion cooling becomes effective and the gain bandwidth increases up to **6.5 GHz**



- low RF loss at the interface → **low noise temperature**
- additional diffusion cooling → **gain bandwidth much greater than 6 GHz**

# Шумовая полоса выше 7 ГГц

Receiver noise temperature at 2.5 THz. Measurements were performed in air, and no correction for the atmospheric loss was made



# SAFARI top-level system requirements

FTS band ( $\mu\text{m}$ )	Required NEP ( $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	Aimed NEP ( $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	pixel size ( $\mu\text{m}$ ) Array size
S-band: 30 – 60	$4.5 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-19}$	480, 64 x 64=4096
M-band: 60 –110	$3.6 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-19}$	840, 38 x 38=1444
L-band: 110 –210	$3.5 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-19}$	1600, 20 x 20= 400

- NEP: direct detector sensitivity, optical  
(reflected the minimum detectable power per square root bandwidth)
- Detector speed : 20 - 100 Hz ( 1.6- 8 msec) determined by FTS max scanning speed and FDM readout
- Dynamic range (saturation power) : 1000 (or better)
  - $T_c \sim 100 \text{ mK}$  because  $T_b \geq 50 \text{ mK}$

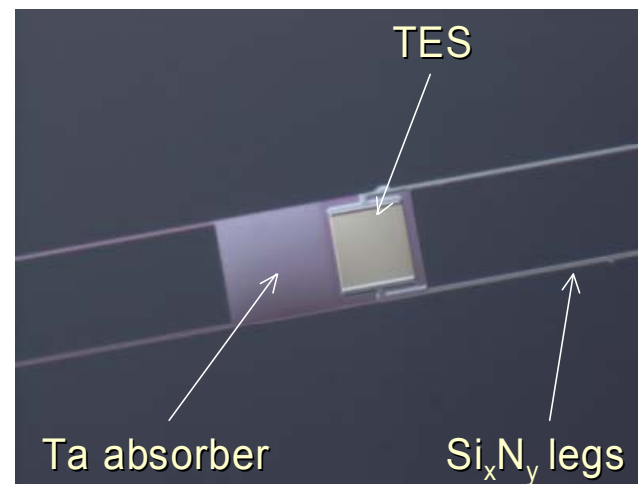
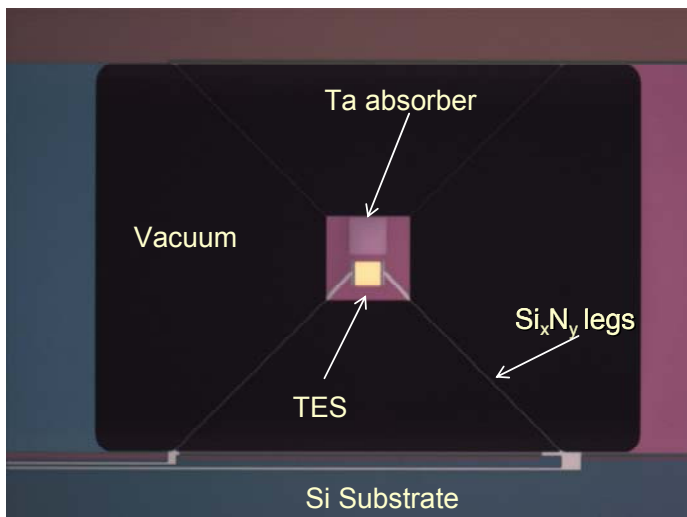
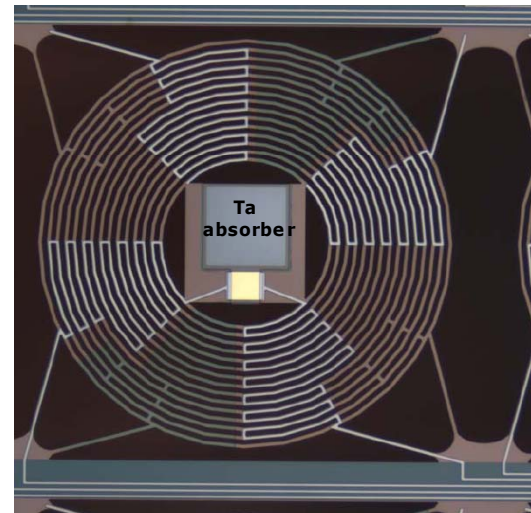
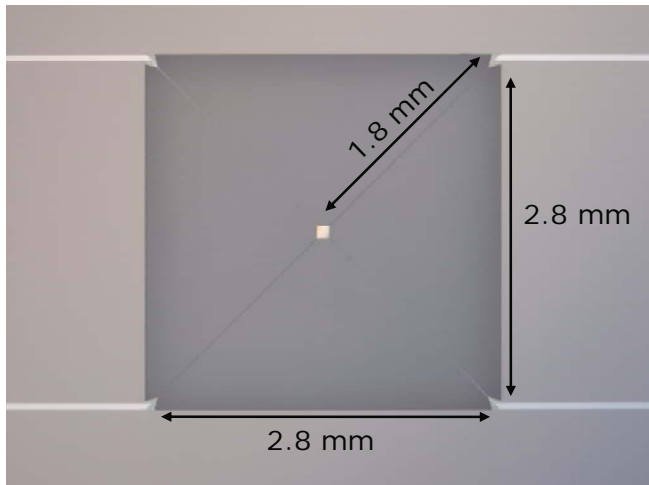
Courtesy of  
Gert de Lange



# Болометры: TES Designs for SAFARI



Courtesy of  
Gert de Lange

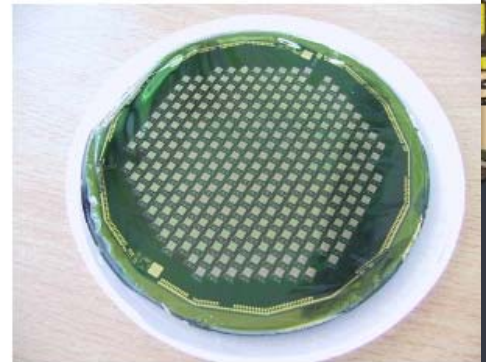
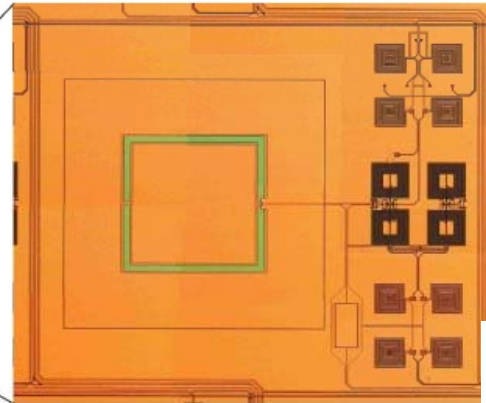
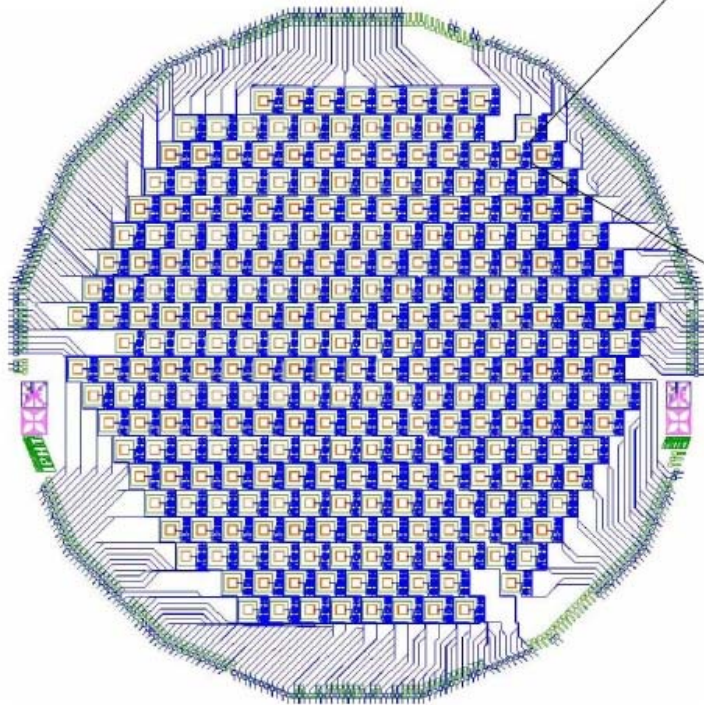


Есть и другие типы болометров: KID, CEB, etc

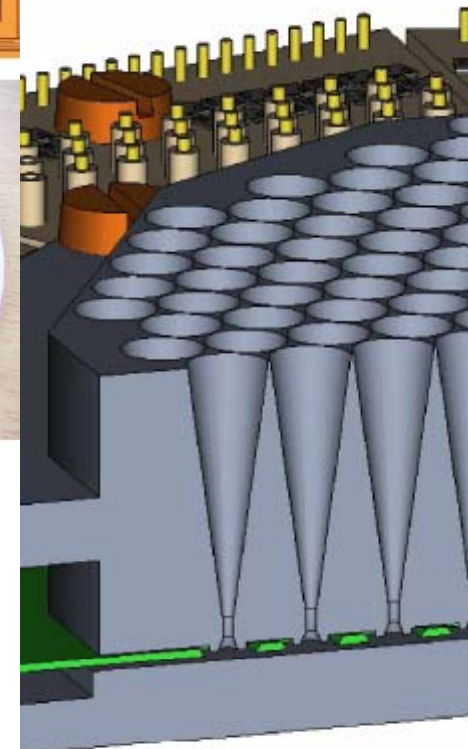
# LABOCA-2 Wafer

IPHT, Jena

288 TES-Bolometers with integrated SQUIDs  
on 4"-Wafer



**288 TES +  
SQUIDs**



horn  
array

wafer

$\lambda/4$  reflector

12 ноября 2012

# Первое наблюдение SSPD отклика и идея физики устройства

APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 79, NUMBER 6 6 AUGUST 2001

## Picosecond superconducting single-photon optical detector

G. N. Gol'tsman,<sup>a)</sup> O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, and A. Dzardanov

*Department of Physics, Moscow State Pedagogical University, Moscow 119435, Russia*

C. Williams and Roman Sobolewski<sup>b)</sup>

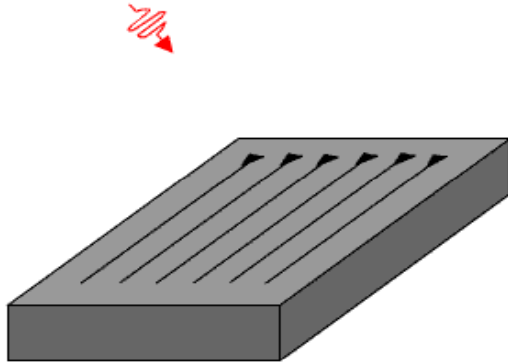


FIG. 1. Schematics of the supercurrent-assisted hotspot formation mechanism in an ultrathin and narrow superconducting strip, kept at temperature far below  $T_C$  are shown. The arrows indicate direction of the supercurrent flow.

## Quantum detection by current carrying superconducting film

Physica C 351 (2001) 349–356

Alex D. Semenov<sup>\*,1</sup>, Gregory N. Gol'tsman, Alexander A. Korneev

*Department of Physics, State Pedagogical University of Moscow, 11989 Moscow, Russian Federation*



Received 18 July 2000; received in revised form 9 October 2000; accepted 11 October 2000

PHYSICA C

www.elsevier.nl/locate/physc

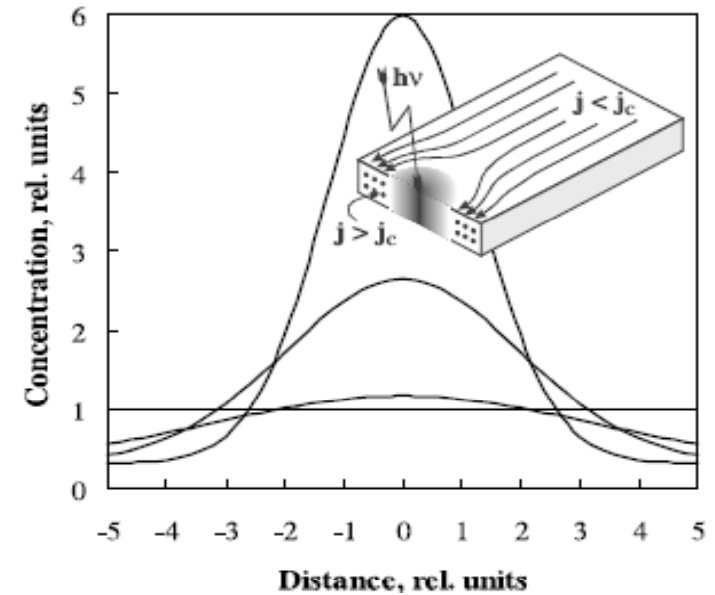
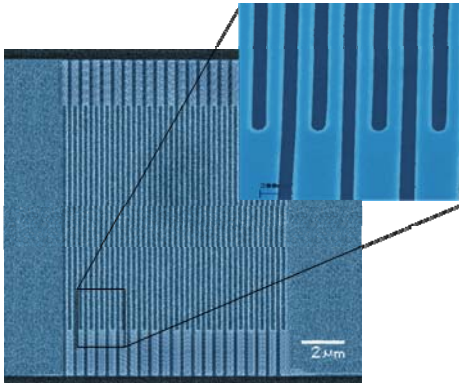


Fig. 1. Concentration of nonequilibrium quasiparticles across the width of the film at different moments after the photon has been absorbed. Time delays are 0.8, 2.0 and 5.0 measured in units of the thermalization time. Distance from the absorption site is shown in units of the thermalization length. Inset illustrates redistribution of supercurrent in the superconducting film with the normal spot – the basis of quantum detection. It shows the cross-section of the film drawn through the point where photon has been absorbed.



# Изготовление SSPD



Fabrication:

- DC magnetron sputtering of NbN film on sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) substrate
- E-beam lithography with reactive ion etching

**Present day challenges:**

- increase filling factor (presently about 60%)
- to reduce strip width from 100 nm to 50 nm or even less



Korneev A. *et al*, *Appl. Phys. Lett.* 84 (2004) 5338

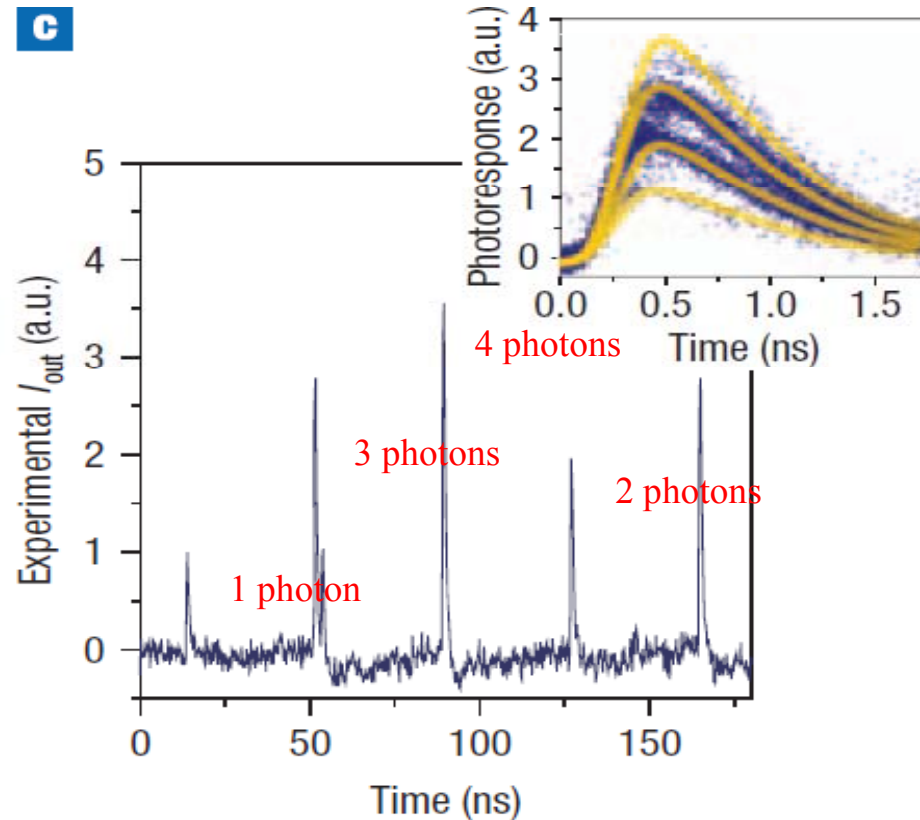
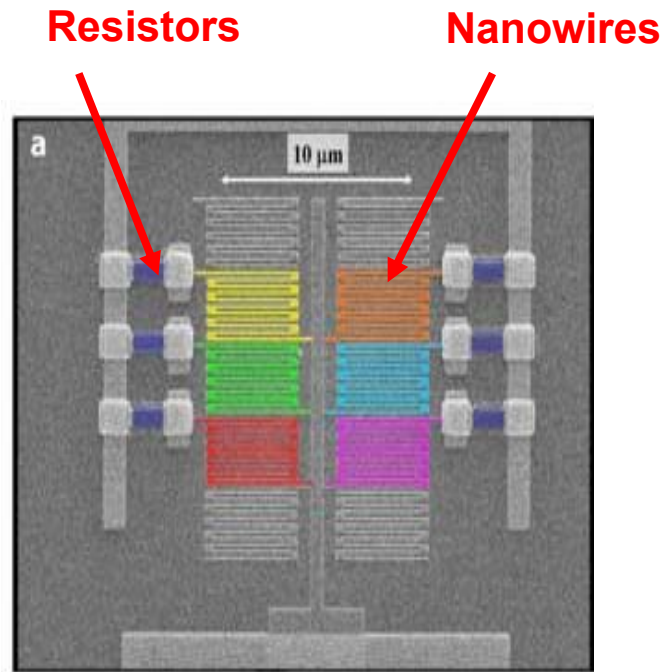




MSPU

# SSPD с разрешением числа фотонов (PNR-SSPD)

Фотоотклик пропорционален числу  
одновременно поглощенных фотонов



A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Goltsman, K. G. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Levy, and A. Fiore,

Nature Photonics, vol. 2, pp 302–306, 2008



MSPU

# Продвижение в средний инфракрасный диапазон

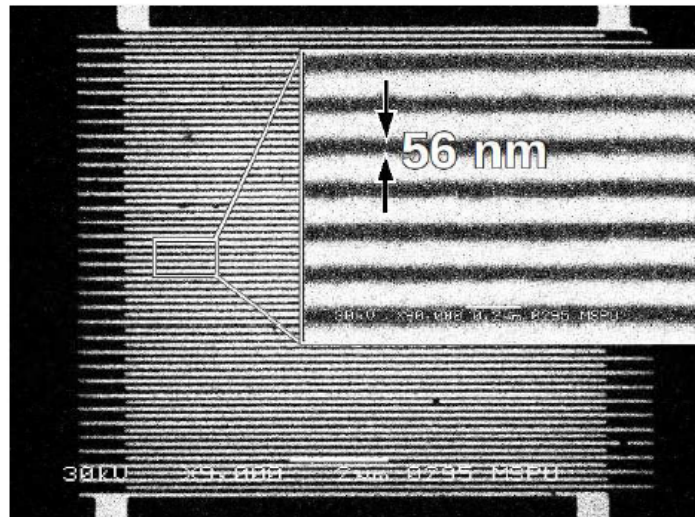


Fig. 1. SEM image of parallel-wire SSPD. Black is NbN film, white is the etched areas. We manage to produce 56-nm-wide strip retaining high superconducting properties.

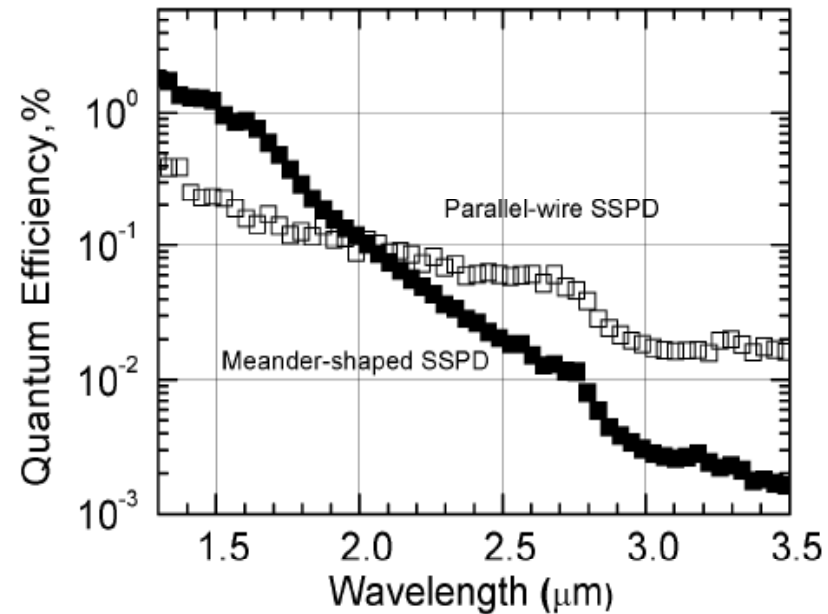


Fig. 3. Spectral sensitivity of the parallel-wire SSPD (open symbols) with 55-nm-wide strips, and 104-nm-wide meander-shaped SSPD (solid symbols) measured at 3 K temperature. At 3.5 μm parallel-wire SSPD exhibits an order of magnitude better *QE* than meander-shaped SSPD.

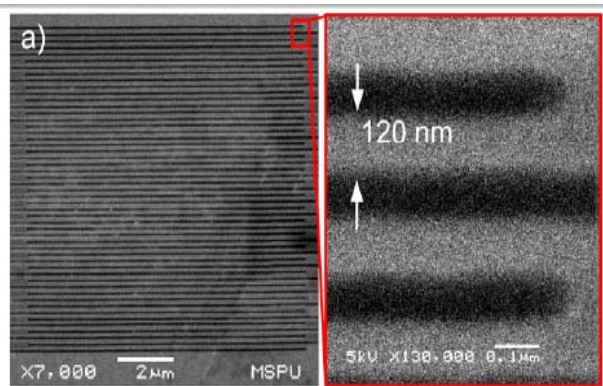
Reduction of the superconducting strip width improves quantum efficiency at longer wavelength.

SSPD with **56-nm-wide strips** connected in parallel exhibits an **order of magnitude better quantum efficiency at 3.5 μm wavelength** compared to usual SSPD with 104-nm wide meander shaped strip.

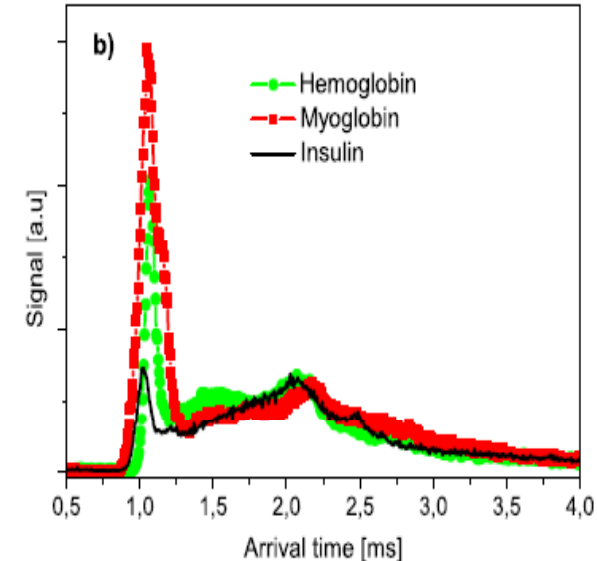
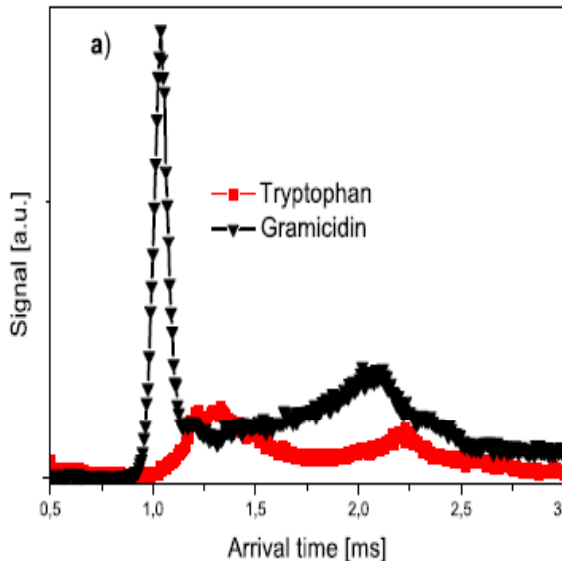
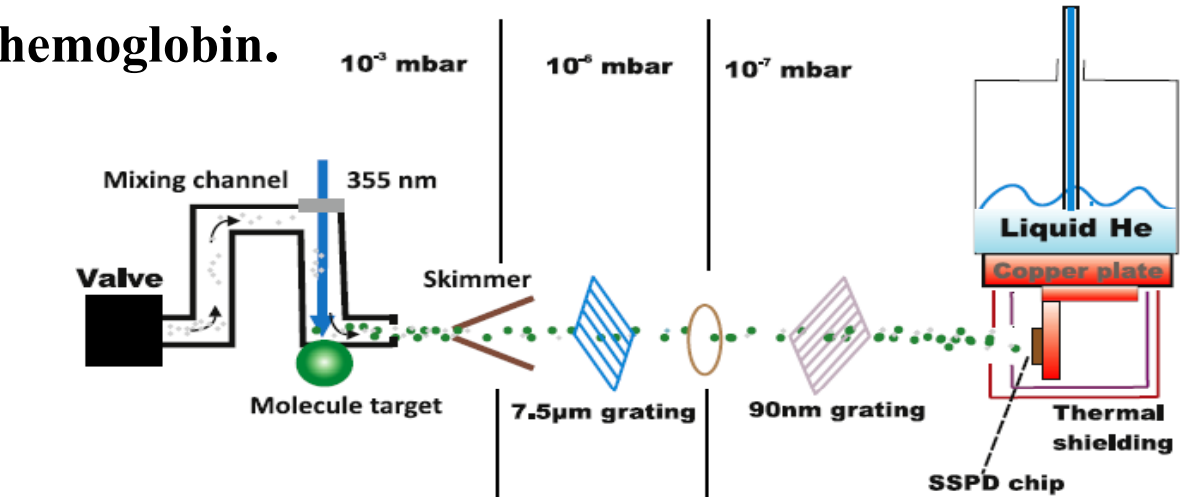
Y. Korneeva, I. Florya, A. Semenov, A. Korneev, and G. Goltsman  
IEEE Trans on Appl Supercond, vol. 21, issue 3, pp 323-326, 2011;



# Детектирование нейтральных молекул: amino acid tryptophan, polypeptide gramicidin, insulin, myoglobin and hemoglobin.



a) Electron microscopy image of the 10 μm x 10 μm sensitive SSPD element. The NbN film is shown in gray.



a) Arrival time distribution of tryptophan and gramicidin. (b) Arrival time distribution of myoglobin, insulin and hemoglobin. All molecules were detected using the 20 μm x 20 μm SSPD chip. Light-weight molecules such as He are not detected.

M. Marksteiner, A. Divochiy, M. Sclafani, P. Haslinger, H. Ulbricht, A. Korneev, A. Semenov, G. Gol'tsman and M. Arndt  
Nanotechnology, 2009 20 455501



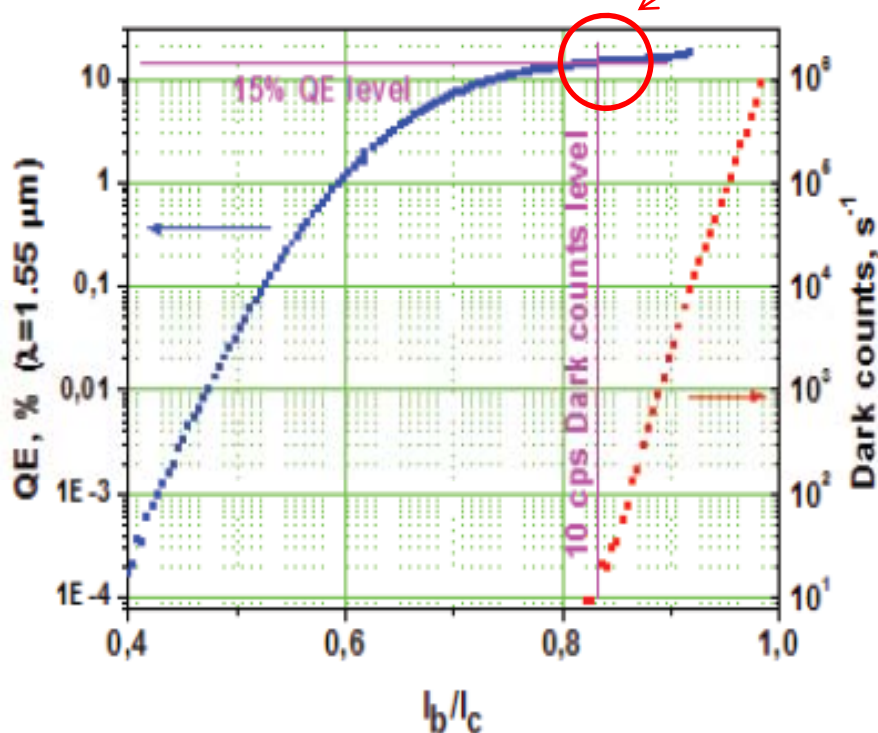
MSPU

## Практический однофотонный приемник на основе SSPD

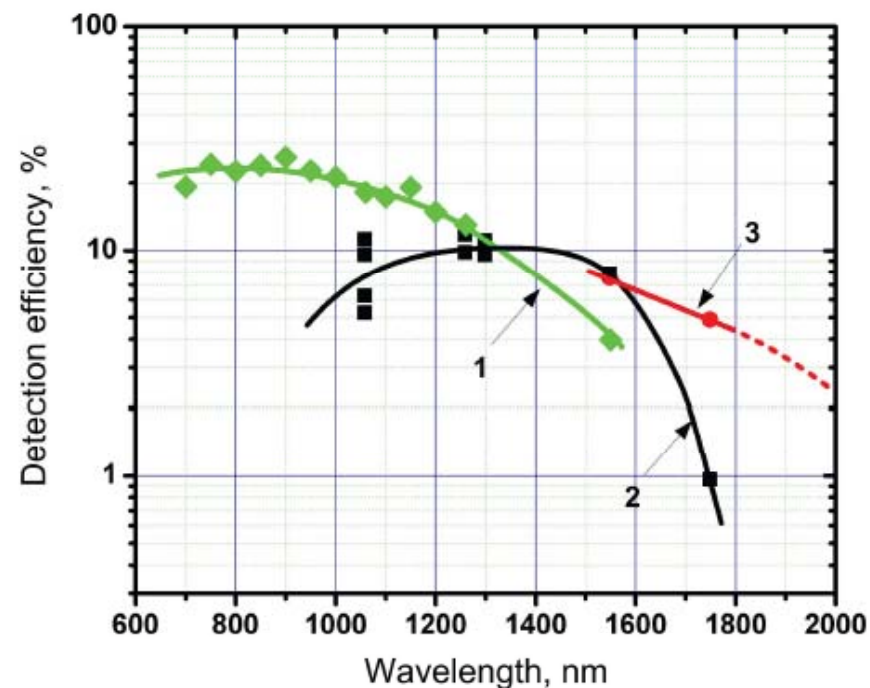


- Работают в стандартном дьюаре с жидким He (2 - 4 канала)
- Опволоконный вход (SMF 28e, HP780, ZBLAN)

Квантовая эффективность 15% при темновом счете  $10\text{s}^{-1}$



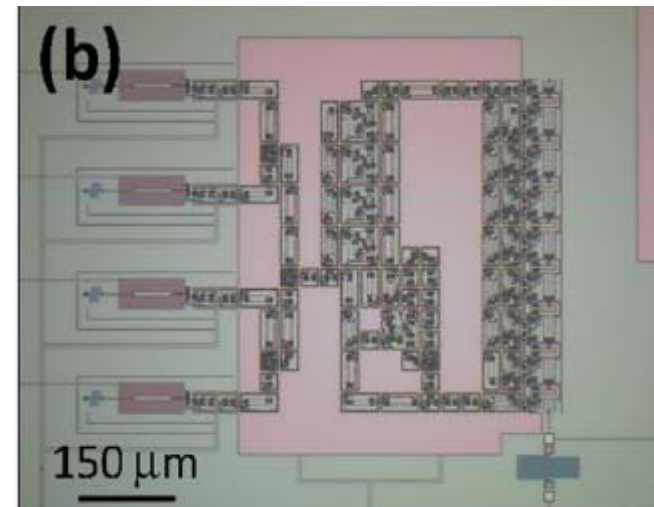
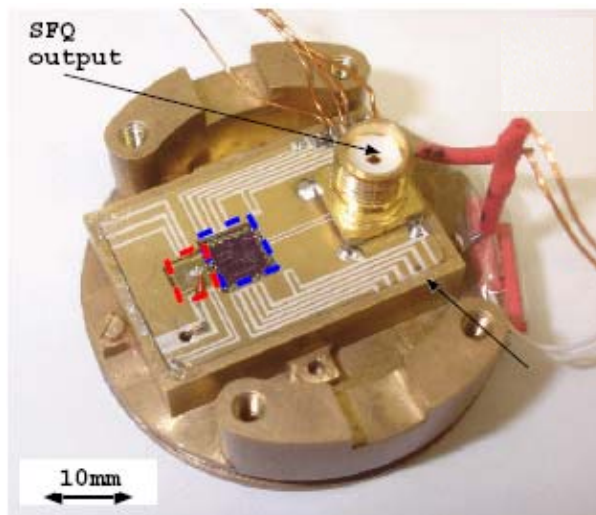
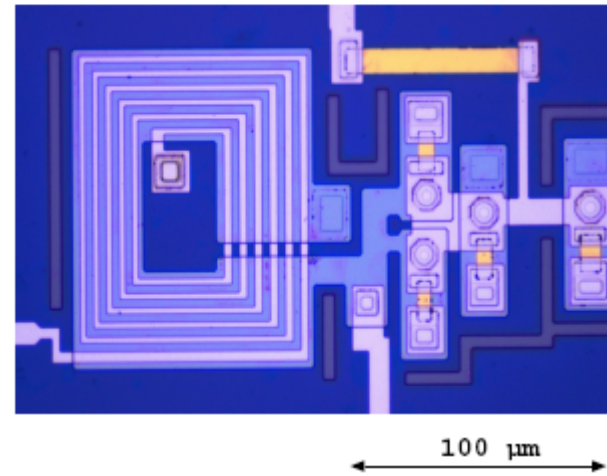
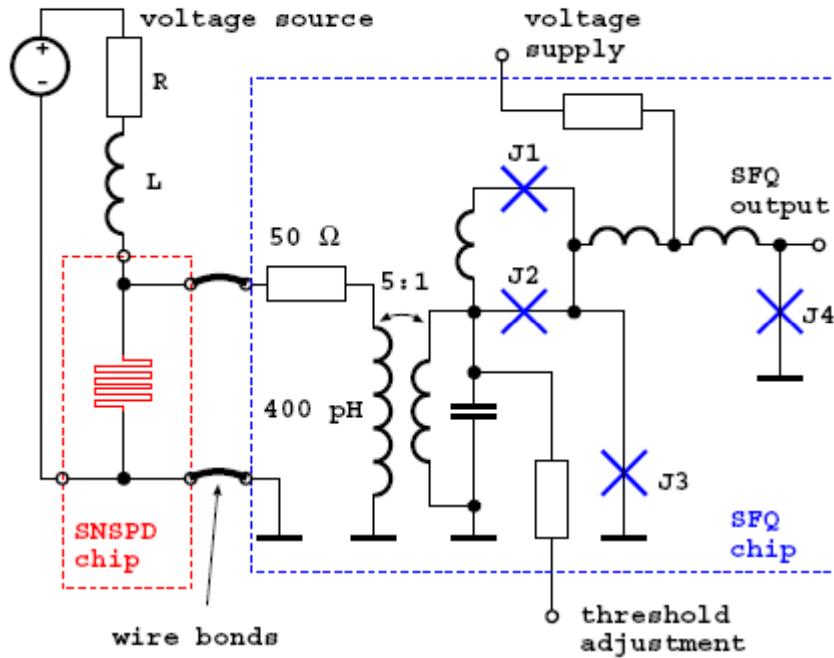
Квантовая эффективность на длине волны 1550 нм и скорость темнового счета от тока смещения.



Эффективность детектирования приемника с различными волокнами: HP 780 (1), SMF 28e XB (2), ZBLAN (3)



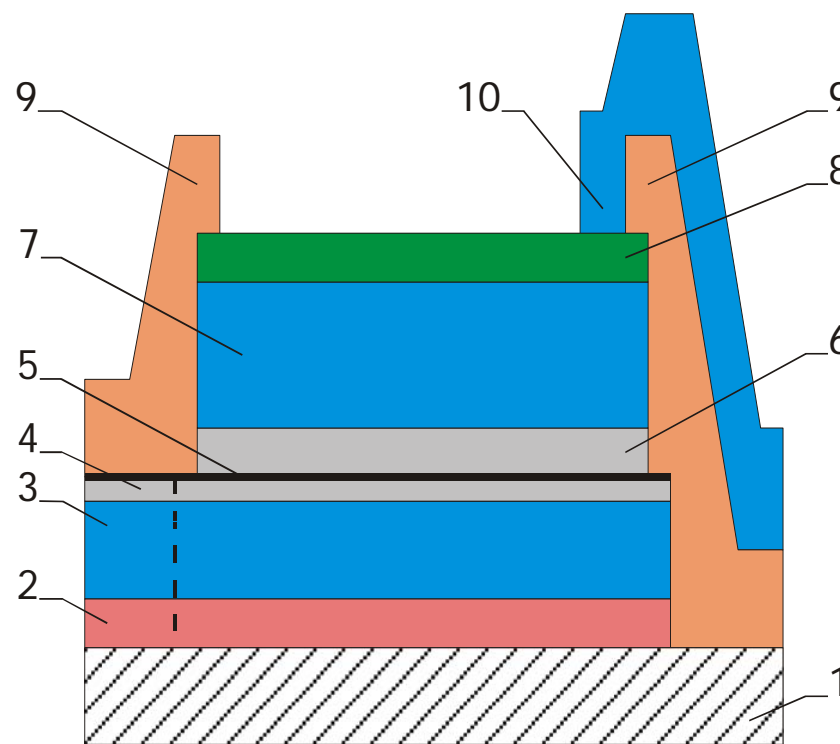
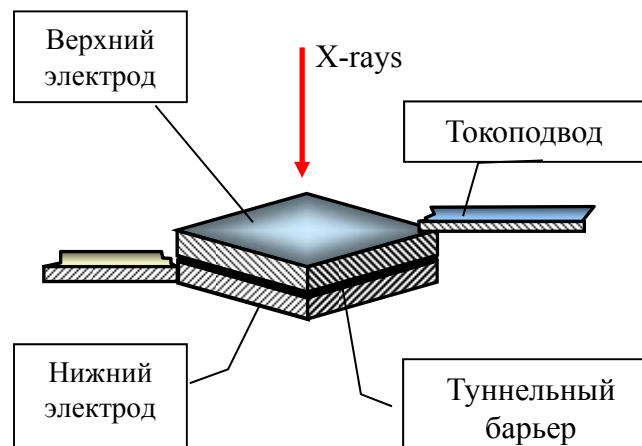
# RSFQ схемы считывания для SSPD



# Рентгеновские детекторы на базе сверхпроводящих туннельных переходов (СТП-детекторы)

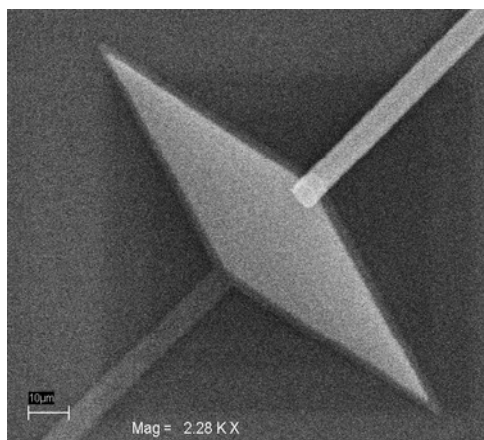
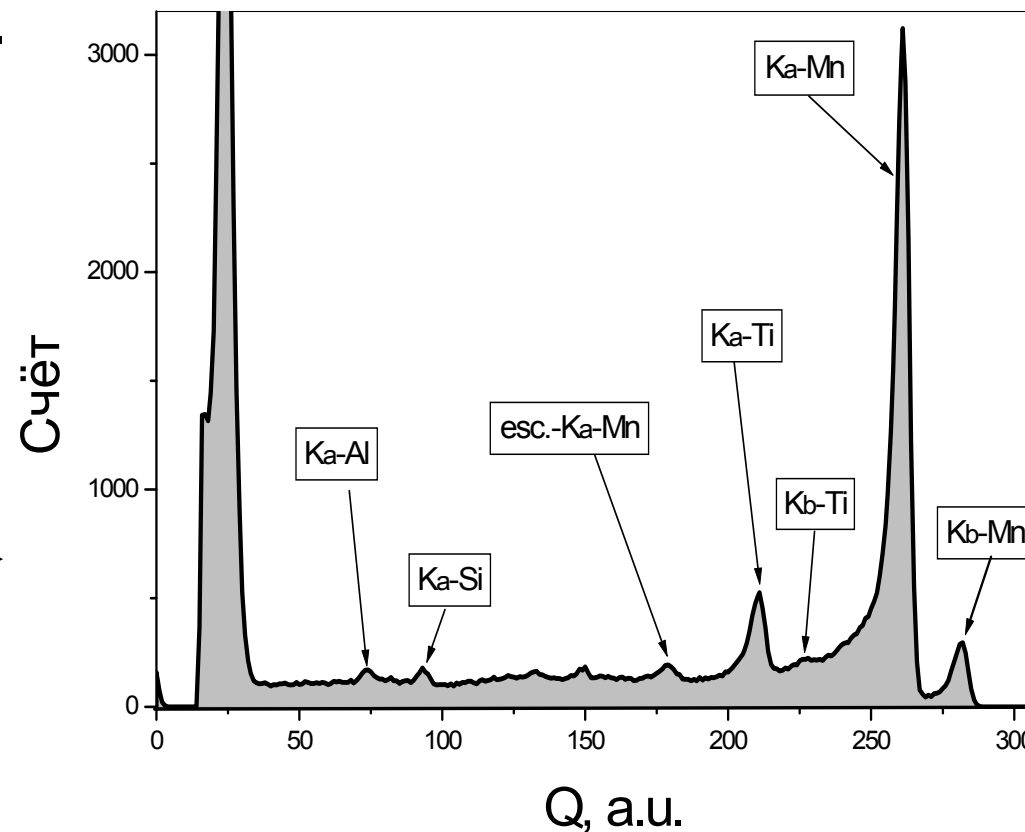
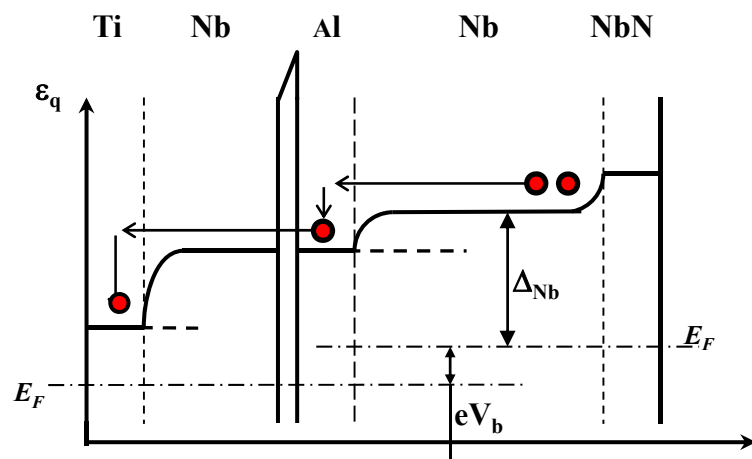
Многослойные электроды

- 1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- 2 – Ti толщина 30 nm
- 3 – Nb(1) толщина 100 nm
- 4 – Al(1) толщина ~ 8 nm
- 5 –  $\text{AlO}_x$  толщина ~ 1 nm
- 6 – Al(2) толщина 13 nm
- 7 – Nb(2) толщина 150 nm
- 8 – NbN толщина 30 nm
- 9 – изолятор  $\text{SiO}_2$
- 10 – верхний контакт из Nb толщиной 350 nm



# Рентгеновские СТП детекторы

СТП-детектор с пассивным электродом  
**Ti/Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb/NbN.**



**Спектр рентгеновских линий**  
K $\alpha$  и K $\beta$  Mn (5.9 кэВ и 6.5 кэВ), K $\alpha$  Ti (4.5 кэВ),  
K $\alpha$  Si (1.76 кэВ) и K $\alpha$  Al (1.46 кэВ).  
Энергетическое разрешение лучше 90 эВ.

**Последовательные цепочки, характеризующиеся большим динамическим диапазоном и с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение и для создания высокочастотных усилителей и активных электрически малых антенн**

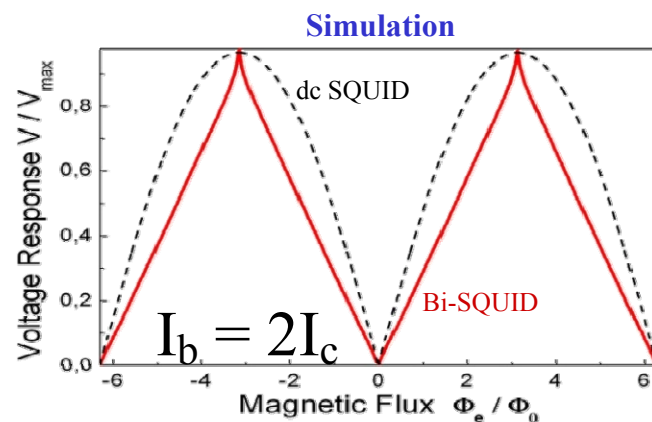
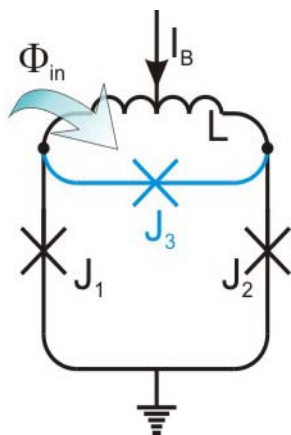
Предложены два типа базовых ячеек с высоколинейным откликом напряжения:

**(1) Bi-SQUID**

bi-SQUID = rf SQUID + dc SQUID

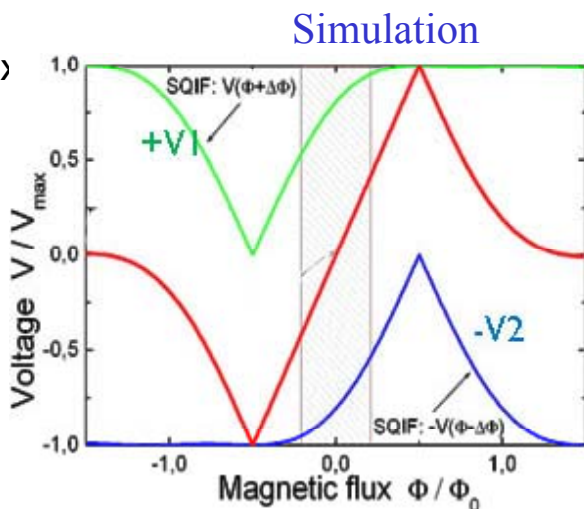
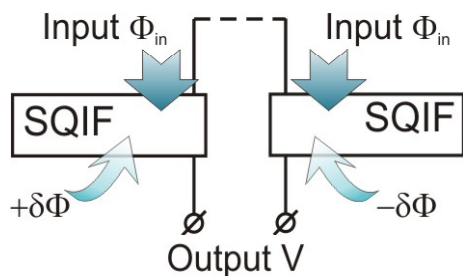
Signal Transformation:

**Nonlinear + Nonlinear = Linear**

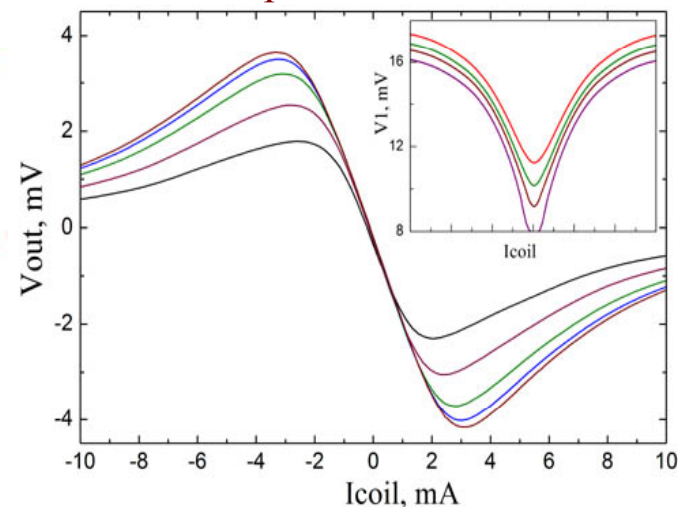


**(2) Ячейка, состоящая из двух дифференциально включенных параллельных SQIF,**

противоположно расстроены магнитным потоком  $\delta\Phi$ .



**Experiment**







# «Информационное» описание эволюции состояния сверхпроводящих квантовых битов (метод ограниченных интегралов по путям)

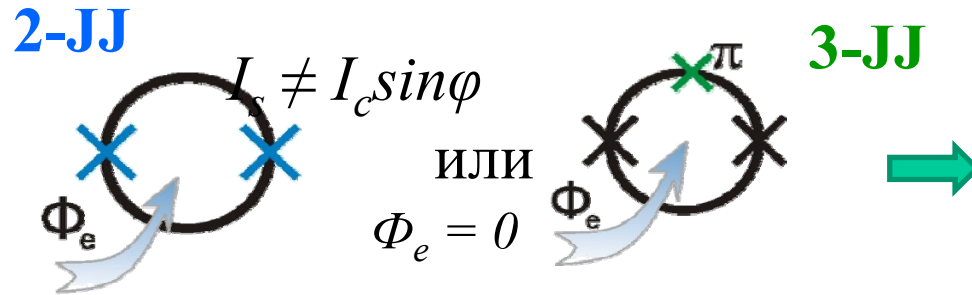
Основное уравнение для матрицы плотности  $\rho$

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{H}, \rho] - \frac{k}{2}[\hat{A}, [\hat{A}, \rho]]$$

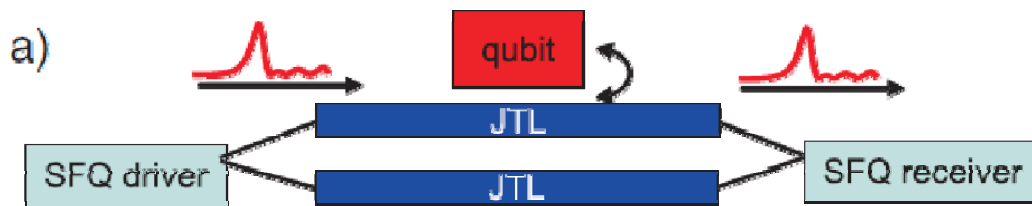
$k = k_0 + k_R$      $k_0$  - связь с окружением;  $k_R$  - связь измерителем

Энтропия фон Неймана:  $E(\rho) = -Sp(\hat{\rho}(t) \log_2 \hat{\rho}(t))$

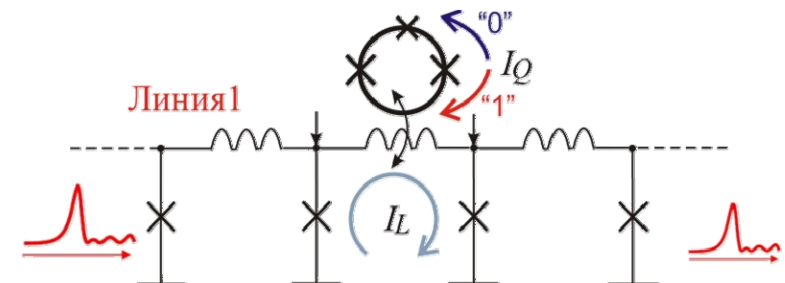
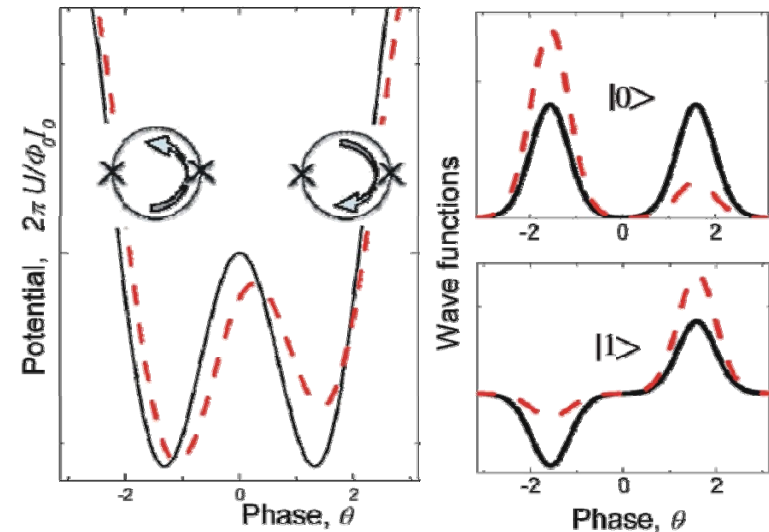
$E=0$  - «чистое состояние»;  $E=1$  - перепутанное состояние



Баллистическое считывание состояний



Потенциал и его изменение при «считывании»



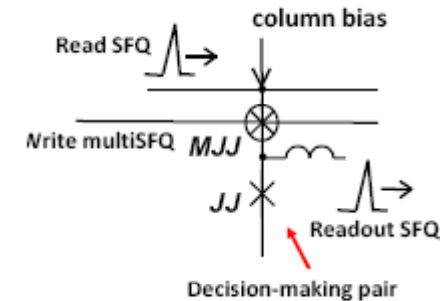
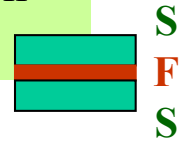
# Возможные приложения SFS устройств

- Josephson SFS (MJJ) junction like a novel memory element for superconducting and other digital electronics

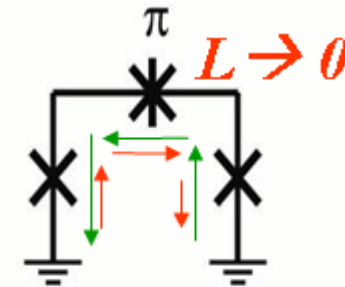
- Josephson SFS  $\pi$ -junctions like superconducting phase invertors for superconducting digital and quantum (qubit) logics

- FS-spin-valves and spin-switches  
- Spin-polarized supercurrents for spintronics

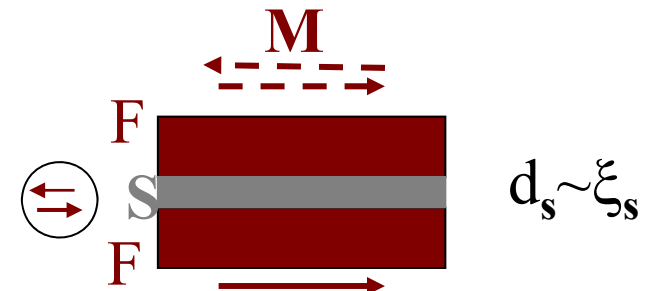
Magnetic Josephson Junction (MJJ)



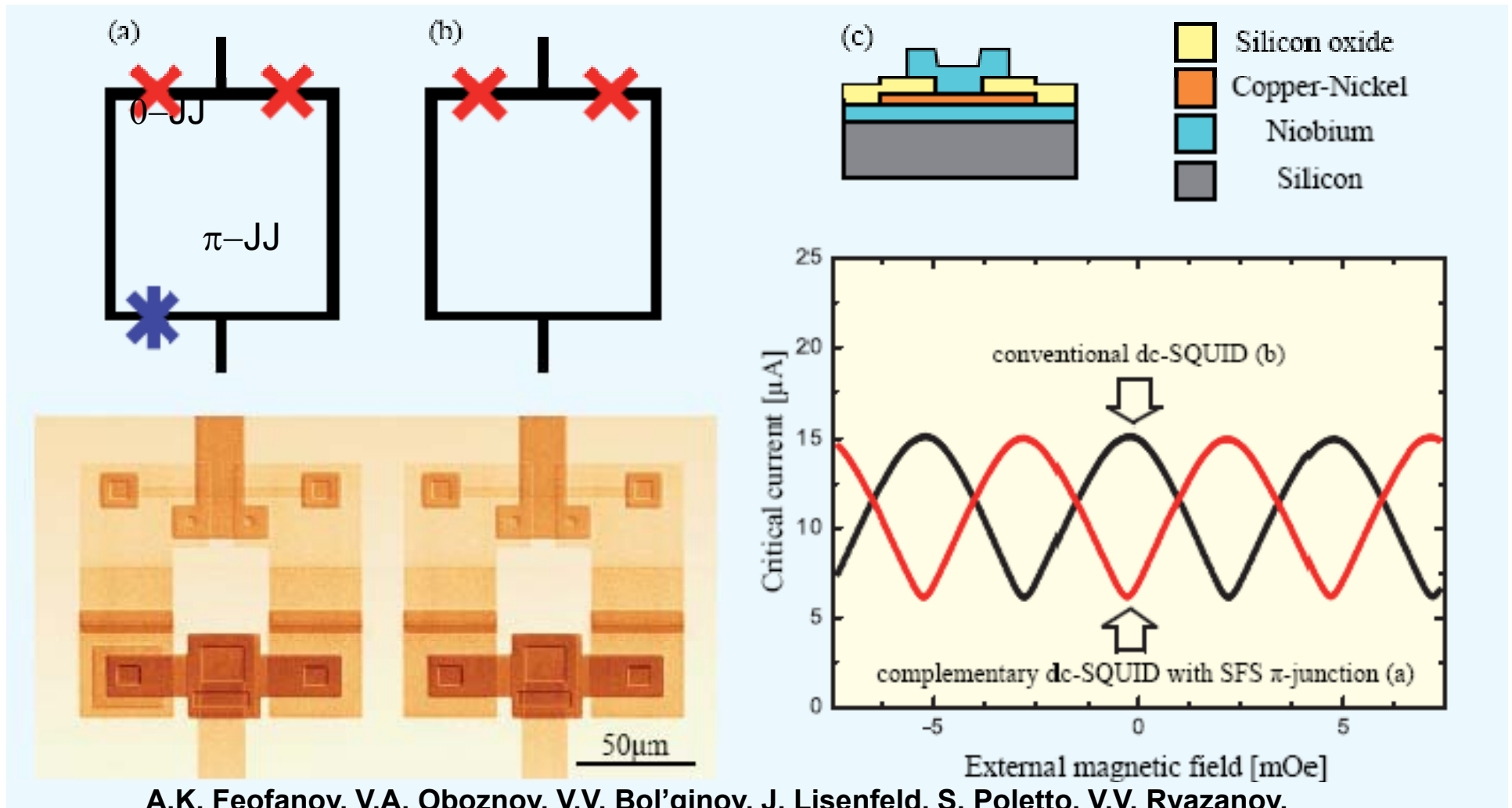
$\pi$  - RSFQ cell



Self-biased cell !



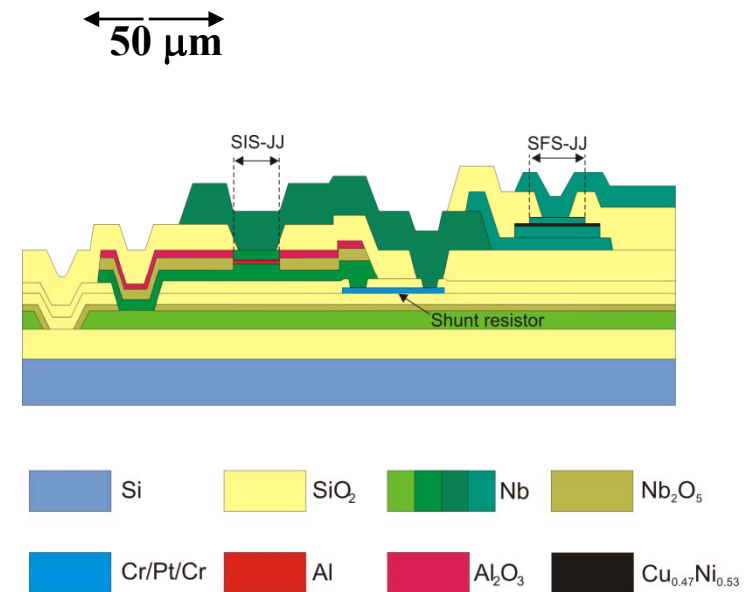
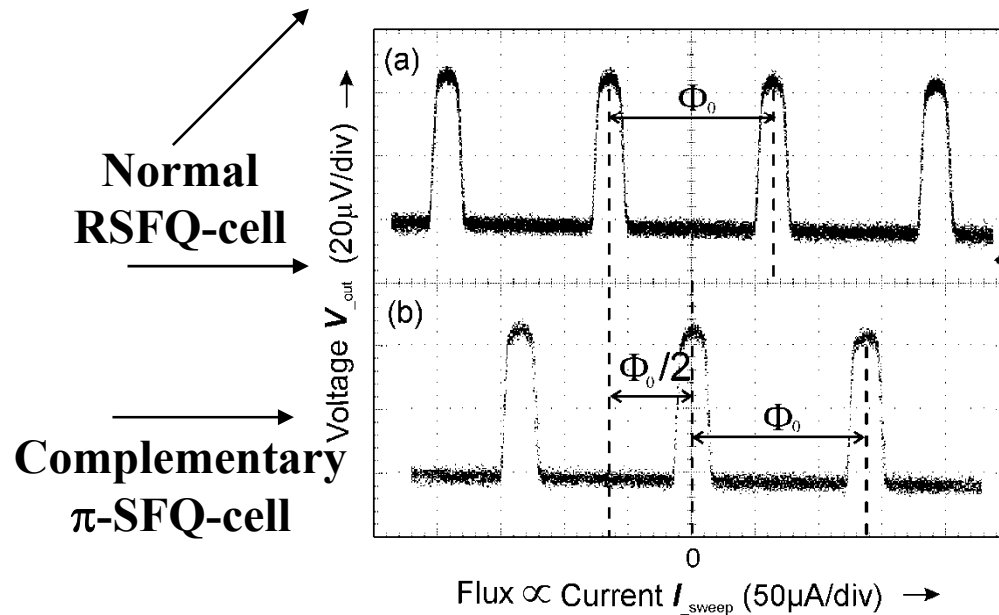
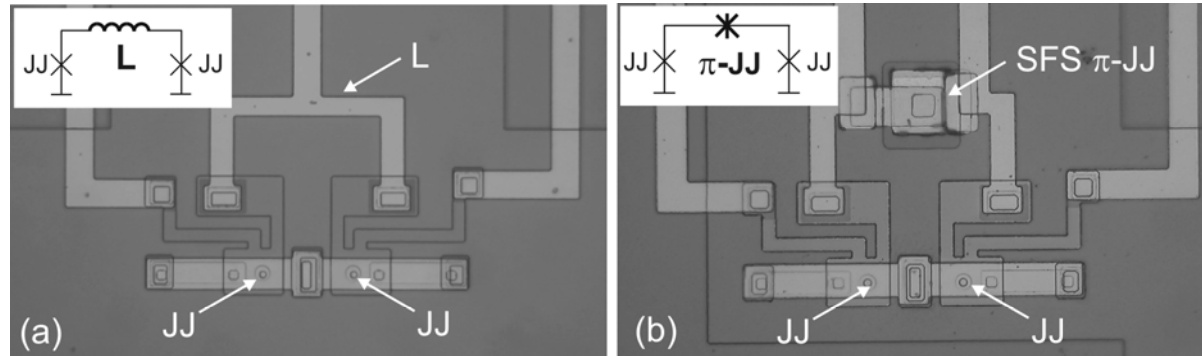
# Demonstration of SFS $\pi$ -shifters



A.K. Feofanov, V.A. Oboznov, V.V. Bol'ginov, J. Lisenfeld, S. Poletto, V.V. Ryazanov, A.N. Rossolenko, M. Khabipov, D. Balashov, A.B. Zorin, P.N. Dmitriev, V.P. Koshelets, A.V. Ustinov, *Nature Physics* 6, 593 (2010).



# Realization of the complementary cell-II



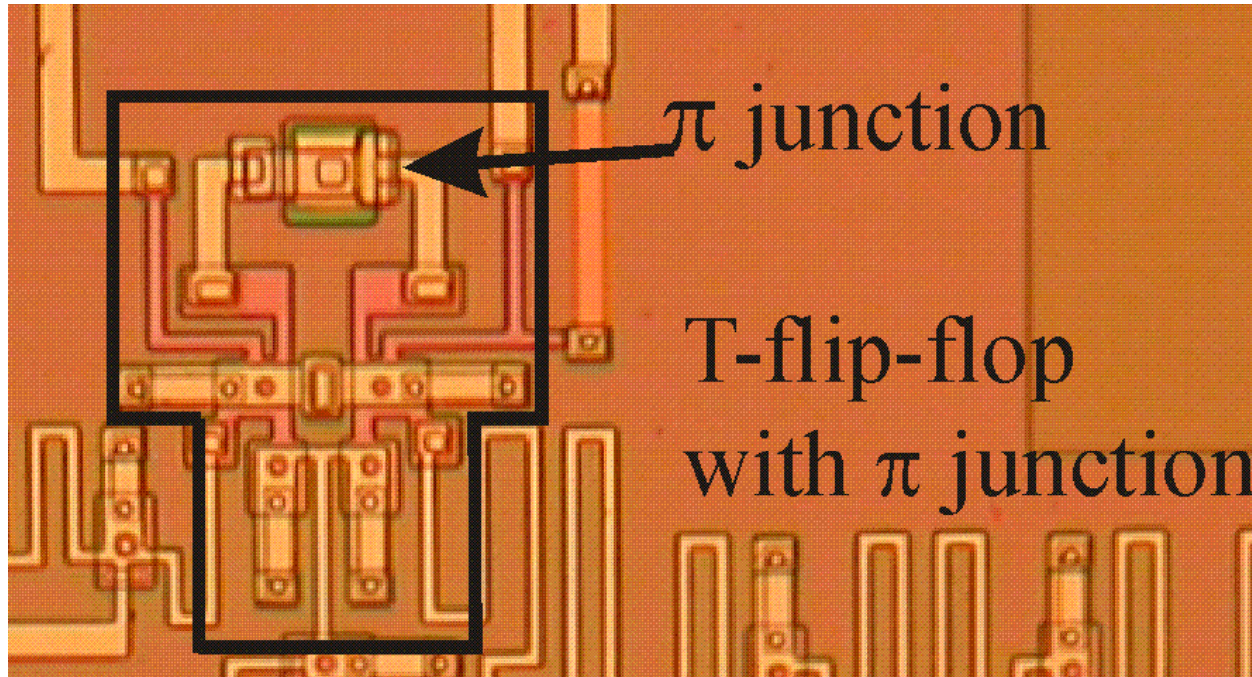
M. I. Khabipov, D.V. Balashov, F. Maibaum, A.B. Zorin, V.A. Oboznov, V.V. Bolginov, A.N. Rossolenko and V.V. Ryazanov. Superconductor Science and Technology, 23, 045032 (2010).

# $\pi$ -SFQ –circuit with SFS $\pi$ -junction

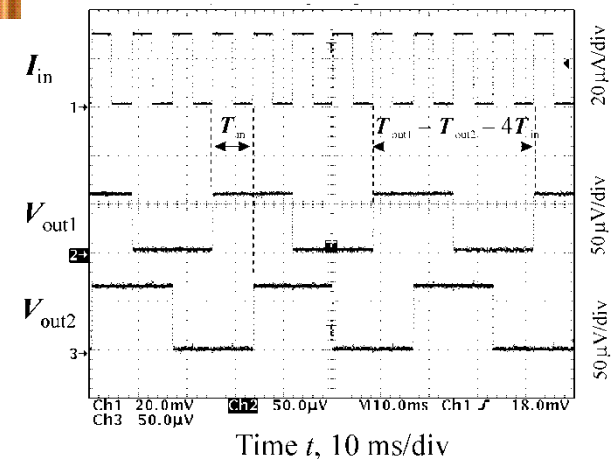
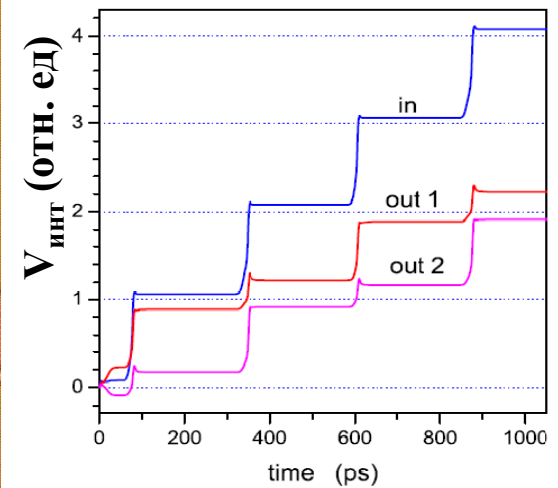
combined Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, Nb-CuNi-Nb technology

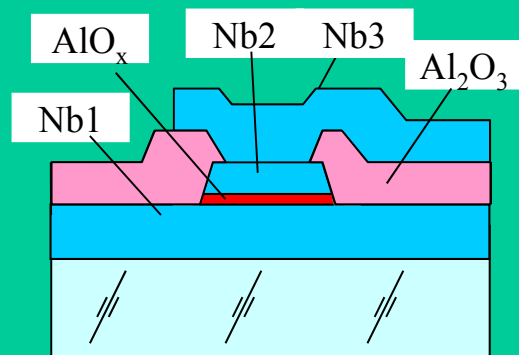
Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb: 4x4  $\mu\text{m}^2$ ;  
 $j_c=100 \text{ A/cm}^2$

Nb-CuNi-Nb: 8x8  $\mu\text{m}^2$ ;  
 $j_c=500 \text{ A/cm}^2$



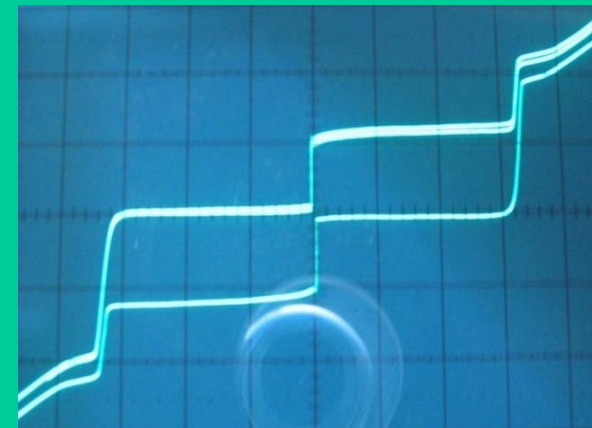
In this cell, a large inductance required for the fluxon storage is replaced by a  $\pi$ -junction operated as a passive phase shifter.





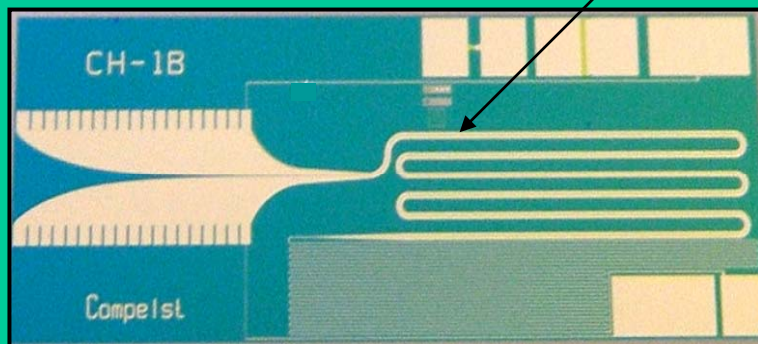
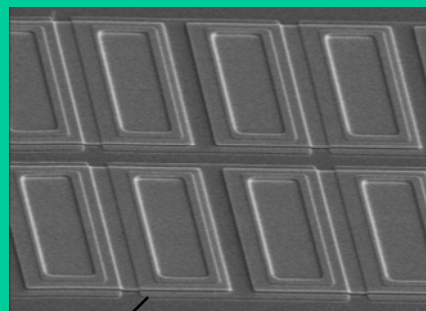
**SIS** тип

Структура планарного  
туннельного перехода  
Джозефсона  
Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb

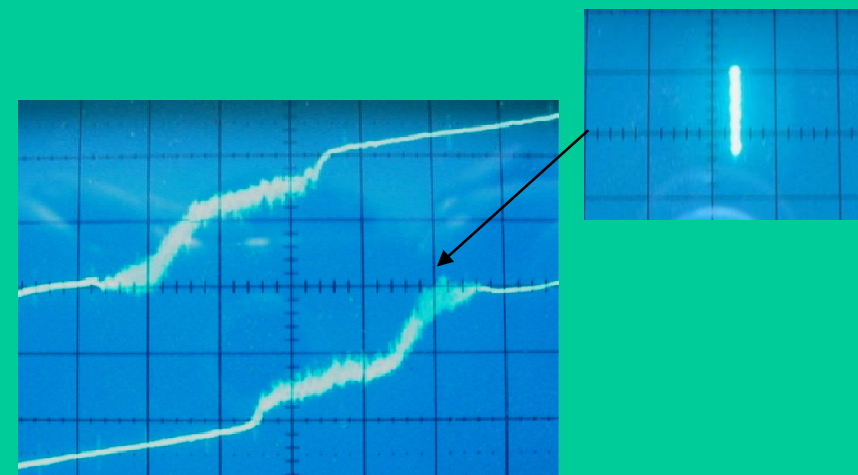


Полная ВАХ СПИС с N = 2400 переходов  
X= 2 В/дел., Y=200 мкА/дел.

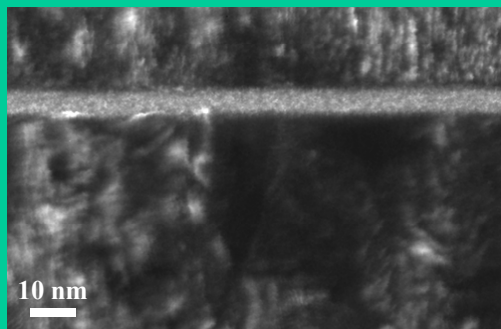
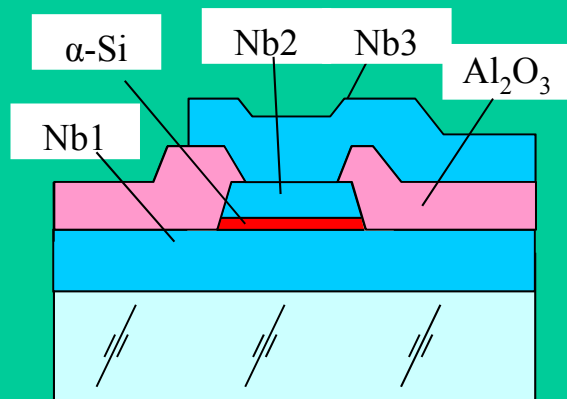
Фрагмент цепочки  
туннельных переходов  
Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Nb  
СПИС ПЧН на 1 В.



СПИС ПЧН эталона напряжения постоянного  
тока на 1 В на основе 2400 переходов SIS типа.



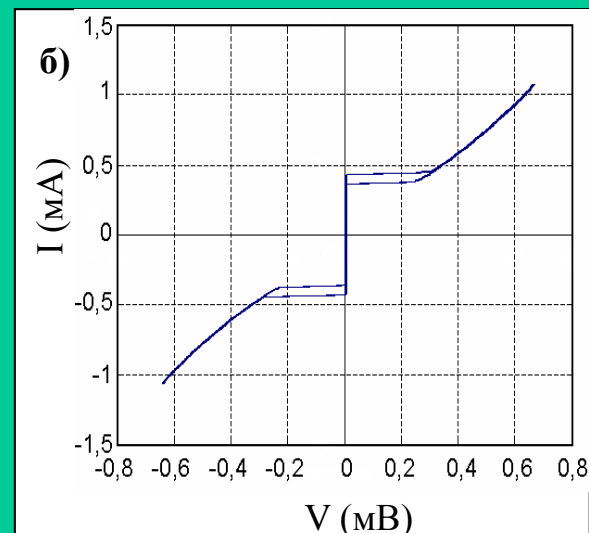
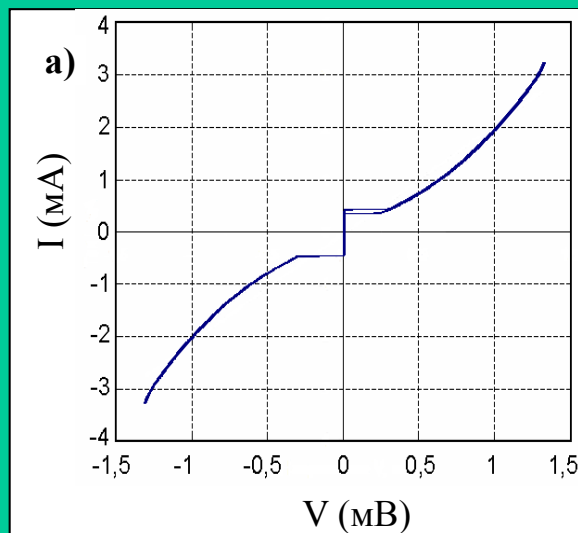
**F=73,8 ГГц.** Ступени при  $-1,1\text{В} < V < +1,1\text{В}$ . На  
вставке одиночная ступень при напряжении 1 В с  
амплитудой 26 мкА. X= 1 мВ/дел., Y= 20 мкА/дел.



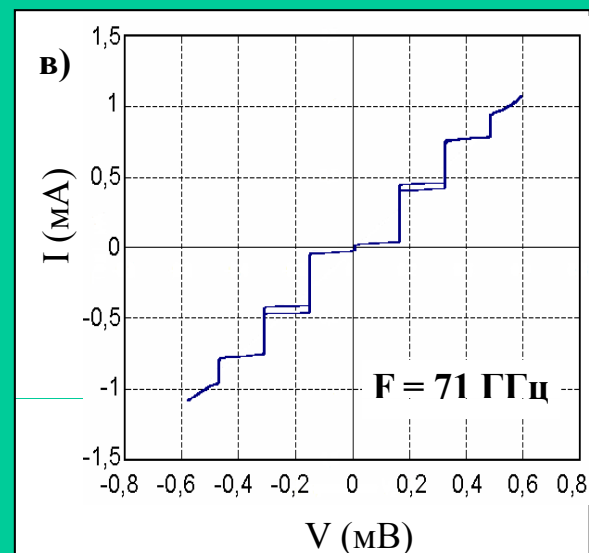
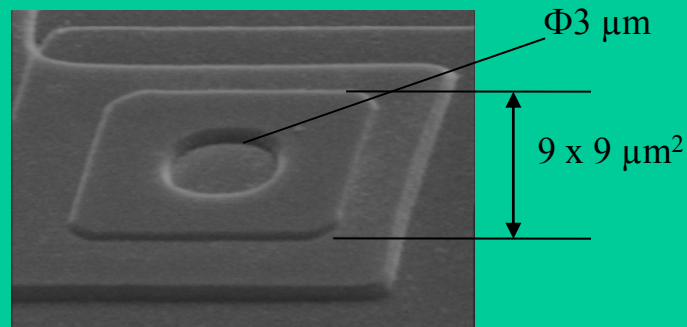
Структура планарного  
перехода Джозефсона  
Nb/ $\alpha$ -Si/Nb

12 ноября 2012

SDS тип

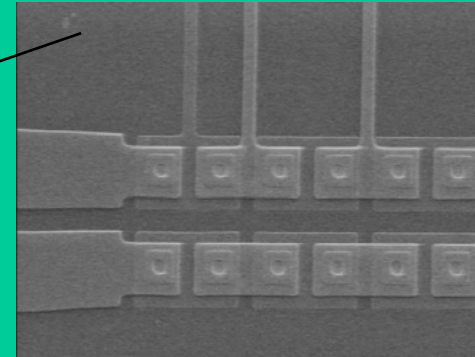
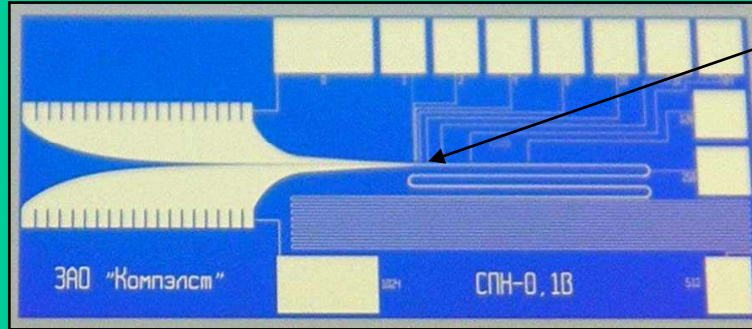


Типичная ВАХ планарного  
джозефсоновского перехода  
Nb/ $\alpha$ -Si/Nb с параметром  $\beta > 1$ .

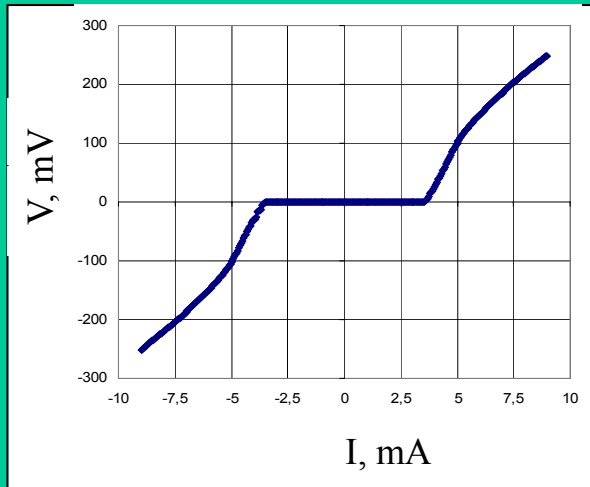




Кристалл  
СПИС ПЧН на  
0,1 В на основе  
1024 переходов  
Nb/ $\alpha$ -Si/Nb.



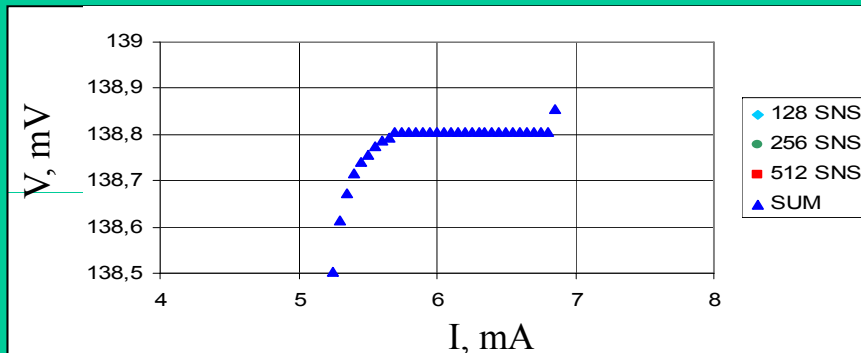
Фрагмент  
цепочки  
переходов  
Nb/ $\alpha$ -Si/Nb  
СПИС ПЧН  
на 0,1 В.



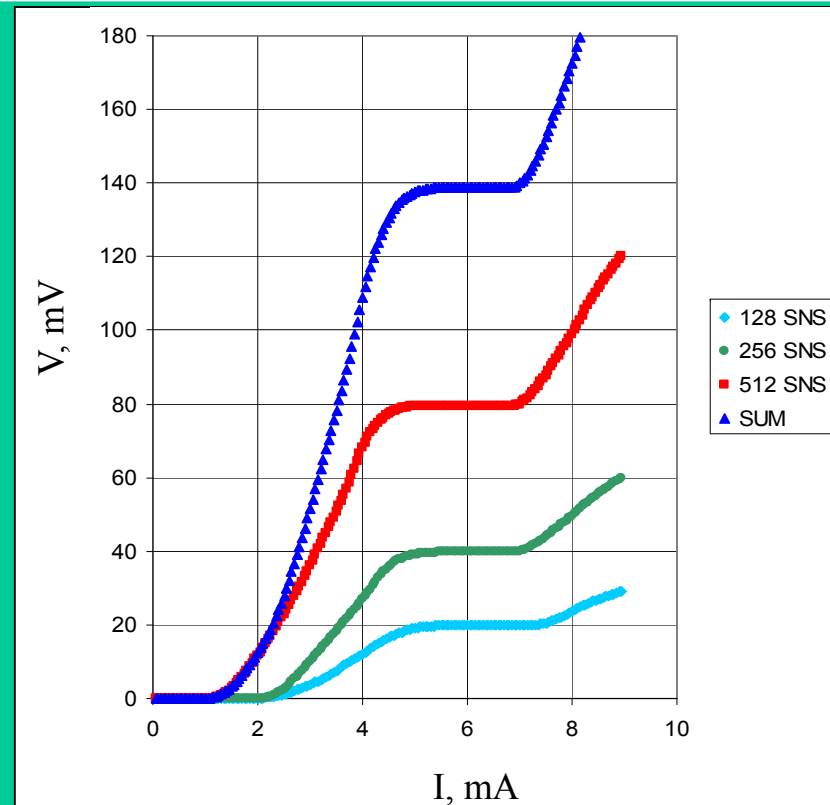
Секция из  
1024 ДП

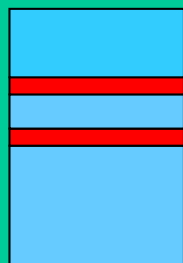
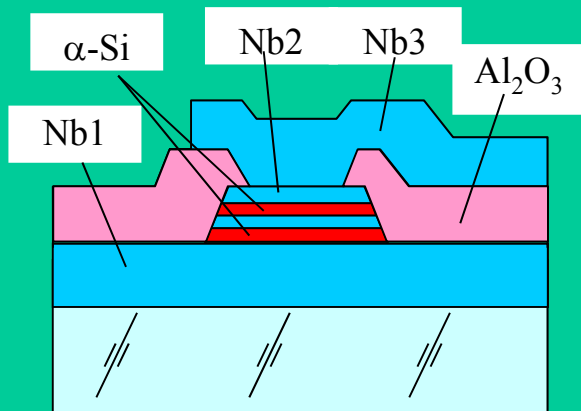
$I_c = 3,4 \text{ mA}$   
Sum.  $R_N = 27,03 \ \Omega$   
 $R_N = 0,0265 \ \Omega$   
 $V_c = 90,1 \ \mu\text{V}$

Секция из 795 ДП.  
 $F = 75 \text{ ГГц}, 7 \text{ dB}$



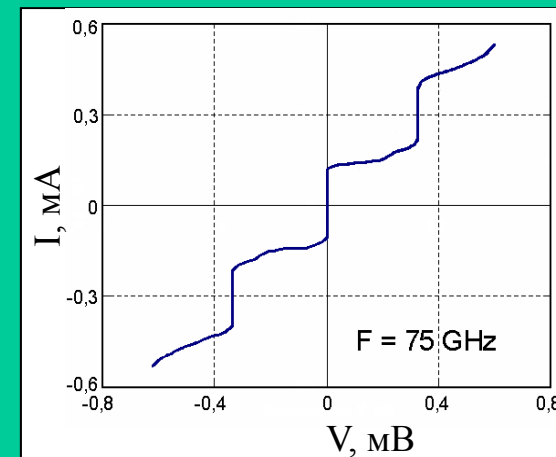
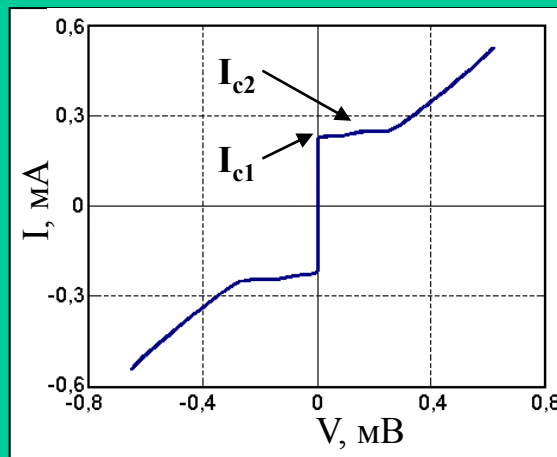
Секции из 128, 256, 512 ДП.  $F = 75 \text{ ГГц}, 7 \text{ dB}$



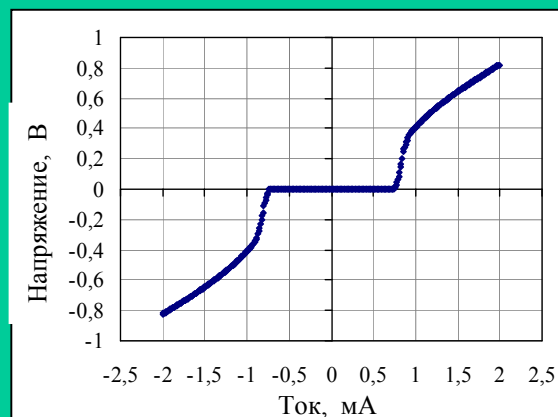
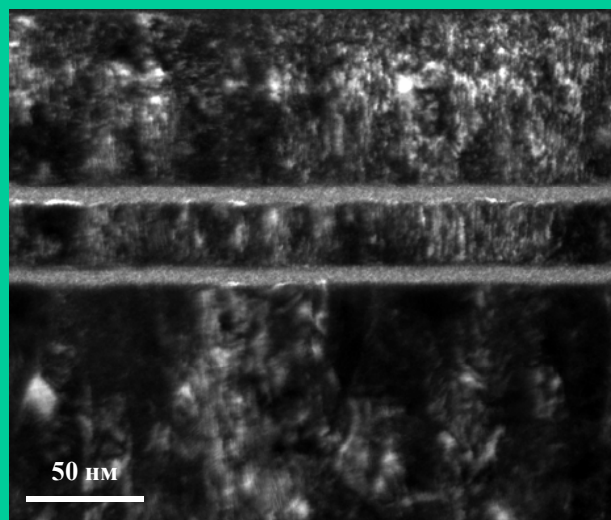


$d_{Nb3} = 100$  нм  
 $d_{\alpha-Si} = 7$  нм  
 $d_{Nb2} = 30$  нм  
 $d_{\alpha-Si} = 7$  нм  
 $d_{Nb1} = 200$  нм

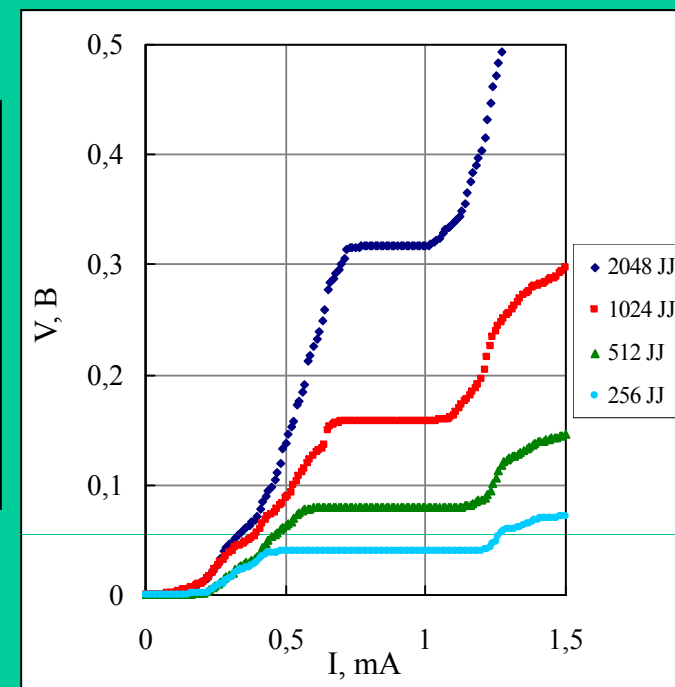
Структура  
планарного стека  
**Nb/ $\alpha$ -Si/Nb/ $\alpha$ -Si/Nb**



ВАХ стека из 2-х переходов



ВАХ ПЧН программируемого  
эталона Вольты на 0,3 В на  
основе 1024 стека.



# Заключение

- Использование методов нанотехнологии и интеграция отдельных элементов на одной микросхеме открывают возможность создания компактных устройств с предельной (квантовой) чувствительностью и уникальным набором параметров, которые не могут быть достигнуты на основе традиционных технологий.
- Сверхпроводниковые элементы определяют уровень развития приемных устройств от долей Герца до рентгена (СКВИДы, СИС и НЕВ смесители, ТГц генераторы, однофотонные и туннельные детекторы, болометры, цифровые и интерфейсные схемы).
- Криогенное обеспечение не является технической проблемой; в космосе в течение 3 – 4 лет успешно работают устройства при температуре 0.1 К.
- ВТСП устройства позволяют существенно снизить эксплуатационные расходы и расширить частотный диапазон.

## **В докладе использованы материалы, которые любезно предоставили:**

- В.А. Андрианов, НИИЯФ МГУ (# 50-51)
- Г.Н. Гольцман, МПГУ, «Сконтел» (# 36-39, 43-48)
- А.Л. Гудков, "Компэлст", ФГУП "НИИФП им. Ф.В. Лукина" (# 59-63)
- Ю.Я. Дивин, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (# 34-35)
- А.М. Клушин, ИФМ РАН (# 31-32)
- М.Г. Козин, НИИЯФ МГУ (# 50-51)
- В.К. Корнев, физфак МГУ (# 52-54)
- М.Ю. Куприянов, НИИЯФ МГУ (# 56-58)
- Ю.В. Масленников, ИРЭ РАН, НПО «Криотон» (# 5-10)
- И.Л. Ромашкина, НИИЯФ МГУ (# 50-51)
- В.В. Рязанов, ИФТТ РАН (# 56-58)
- М.И. Фалей, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (# 11-13)