

---

# Терагерцовое излучение: физика и возможности применения

---

Д.Р. Хохлов

*Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*



---

# Что означает приставка «Тера»

Наименование происходит от греческого слова **τέρας**, что означает «чудовище».

То есть единиц с указанной приставкой чудовищно много.

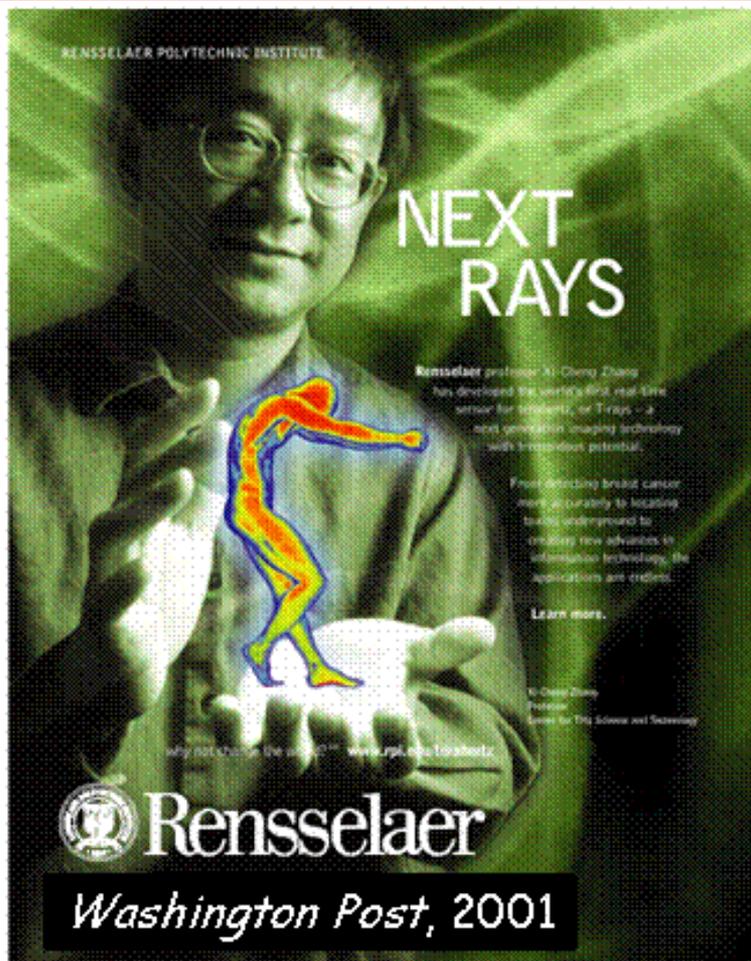
Обычно считается, что ТЕРА – диапазон простирается от  $10^{11}$  до  $10^{13}$  единиц.

Число звезд в видимой Вселенной  $\sim 10^{11}$ ,  
размер государственного долга США  
 $\sim 10^{13}$  долларов.

То есть в ТЕРА-диапазоне – все проблемы  
– от земных до космических

---

# NEXT RAYS? T-RAY!



Over 85 groups worldwide are now working on **THz** projects

Physics

Biology

Chemistry

Biomedicine

Material science

Electrical engineering

USA: Major research force

Europe: **Tera**vision, **Tera**-bridge

Japan: **Tera**-photonics

Taiwan: **Tera**-photonics

# Терагерцы около 100 лет назад

1923 г., в 100 м от Кремля

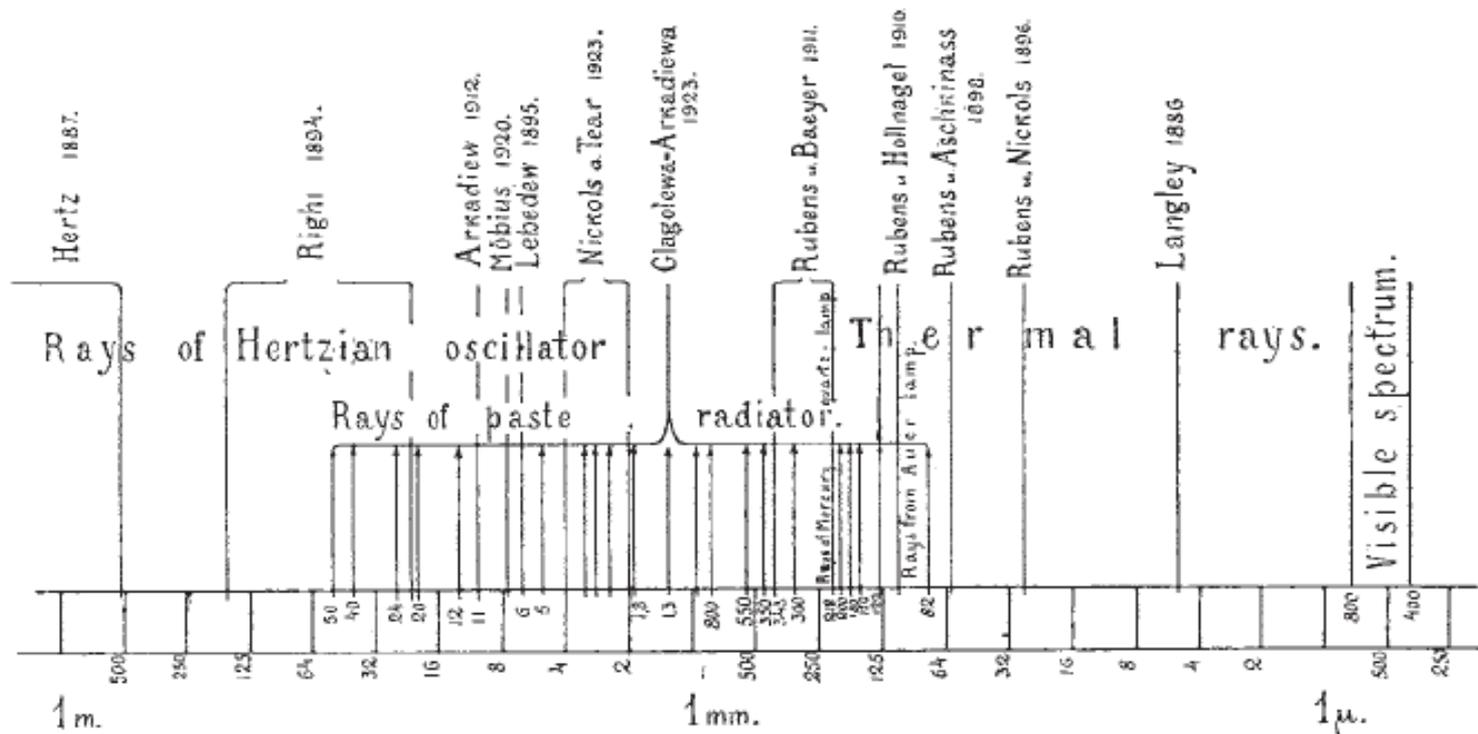
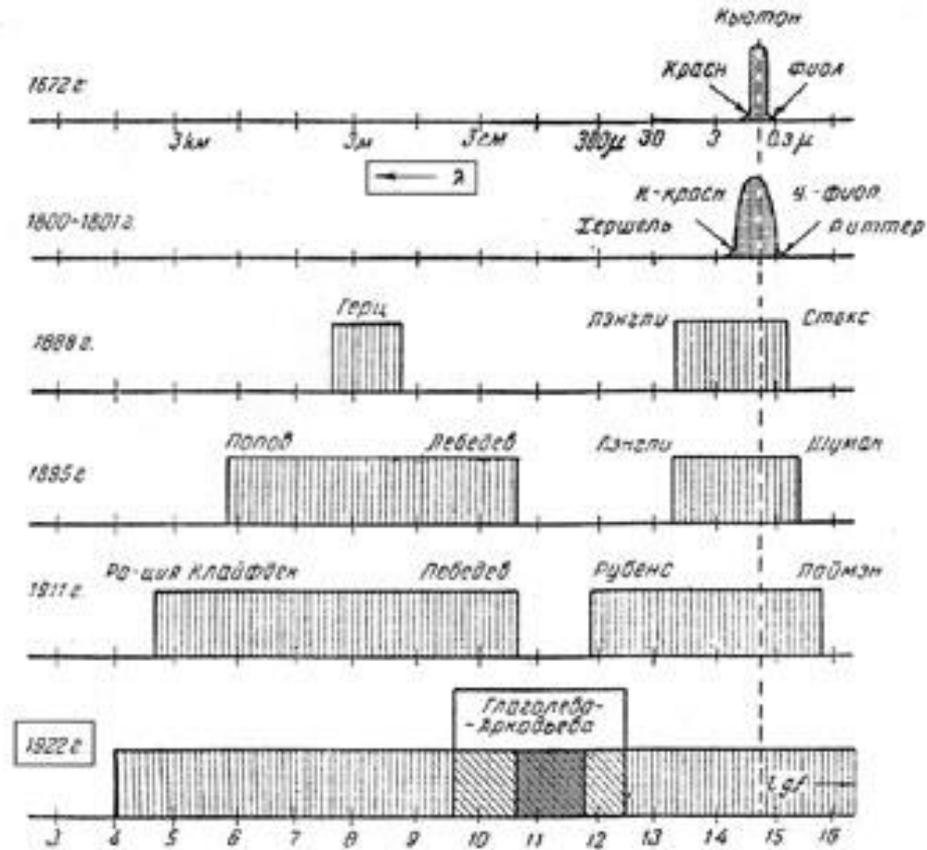


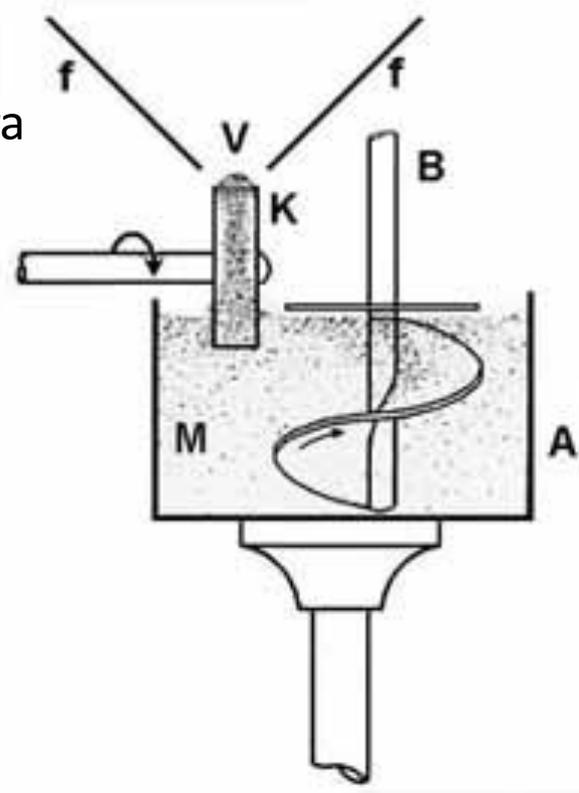
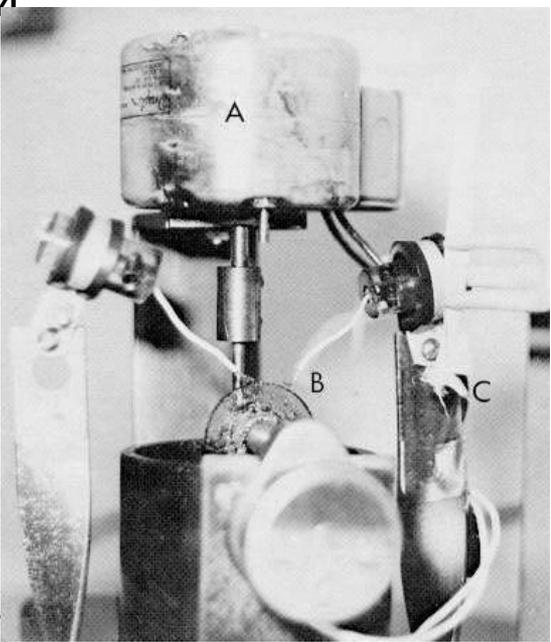
FIG. 3.—Position of radiation of the paste radiator on the scale of the electromagnetic waves.



**Александра Андреевна Глаголева-Аркадьева  
(16(28).2.1884 — 30.10.1945)**

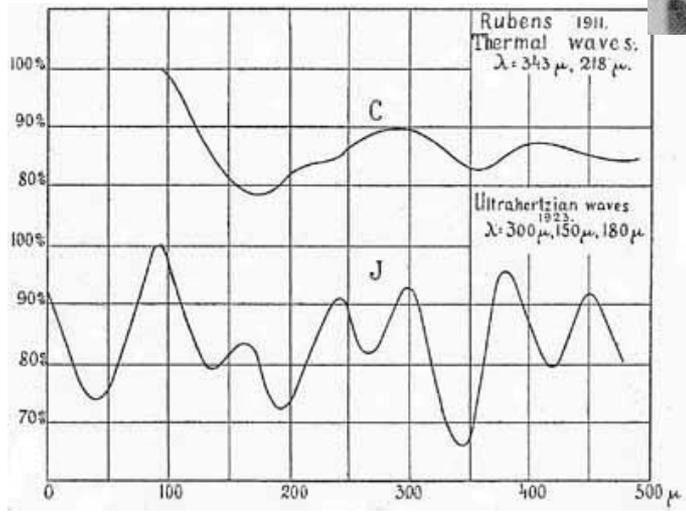


Максвелловская магнитная лаборатория Московского государственного университета 1924

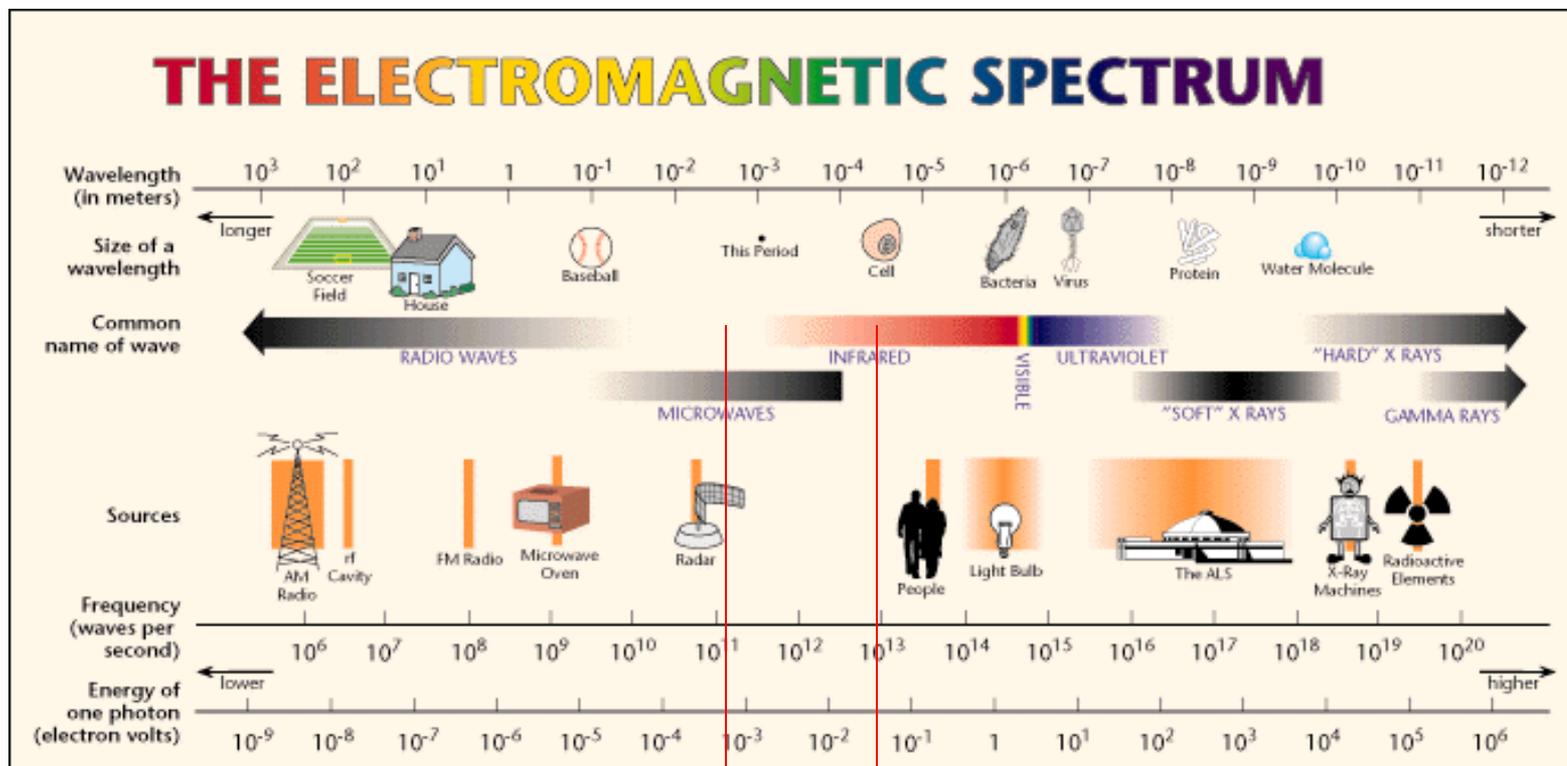


Терагерцовый пастовый генератор

Glagolewa-Arkadiewa A. "Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 microns", Nature, V. 113, p. 640 (1924)



# Спектр электромагнитного излучения



Терагерцовая щель» 0.1 ТГц – 10 ТГц



---

# Терагерцовое излучение

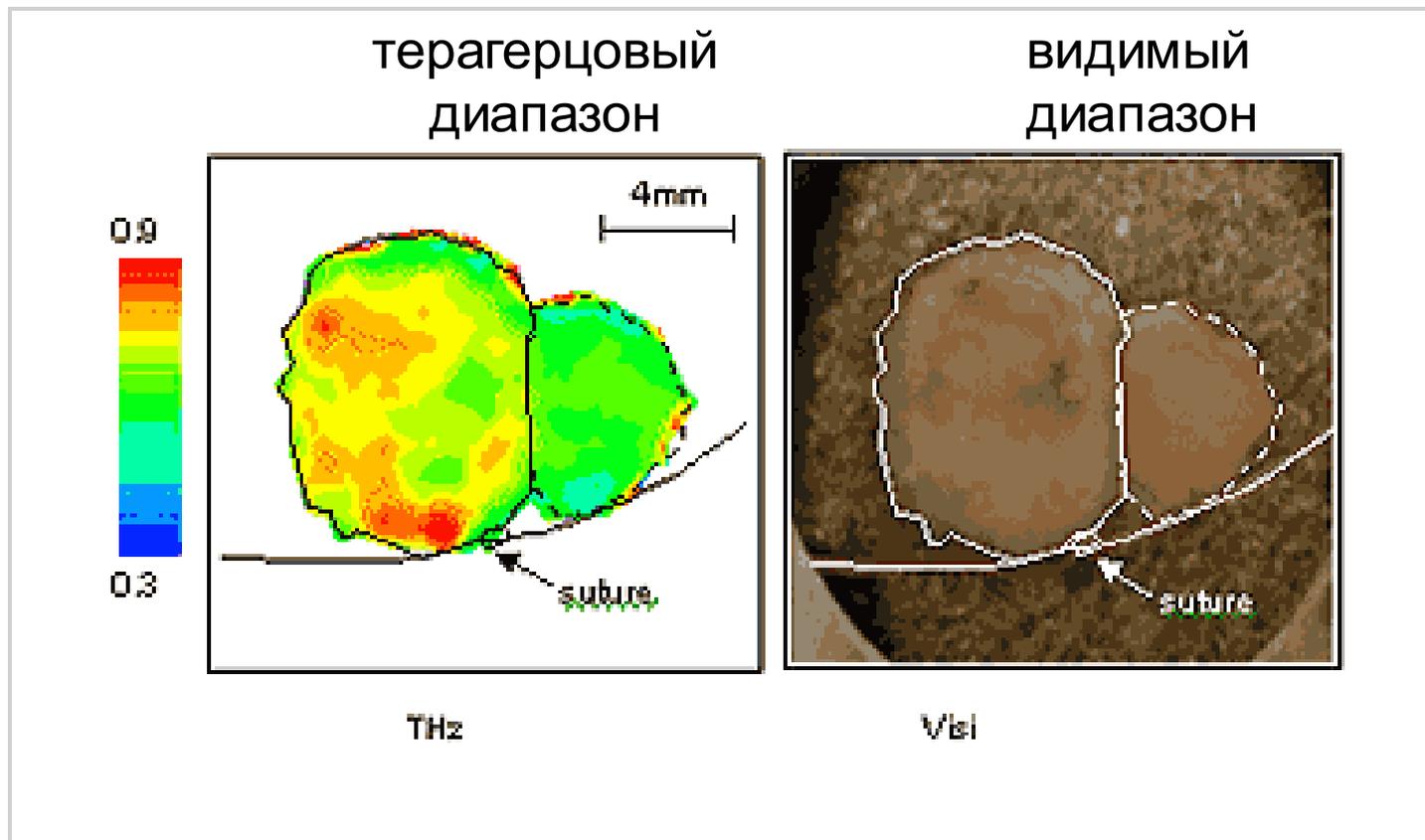
- В данной спектральной области плохо работают как радиофизические методы (со стороны длинных волн), так и оптические методы (со стороны коротких волн)
  - Следствие: отсутствие хороших источников и чувствительных приемников излучения
-

---

# Области применения терагерцового излучения

- Медицинские приложения (онкология, стоматология)
  - Системы безопасности (поиск и обнаружение взрывчатых веществ)
  - Мониторинг концентрации тяжелых органических молекул
  - Метеорология
  - Терагерцовая астрономия
-

# Медицинские приложения



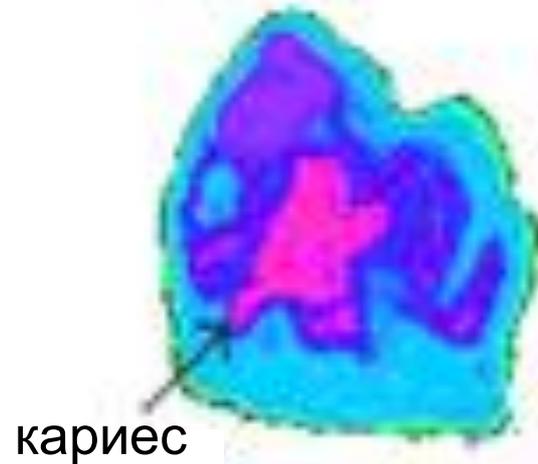
Картина раковой опухоли в терагерцовом и в видимом диапазоне

# Медицинские приложения

видимый диапазон

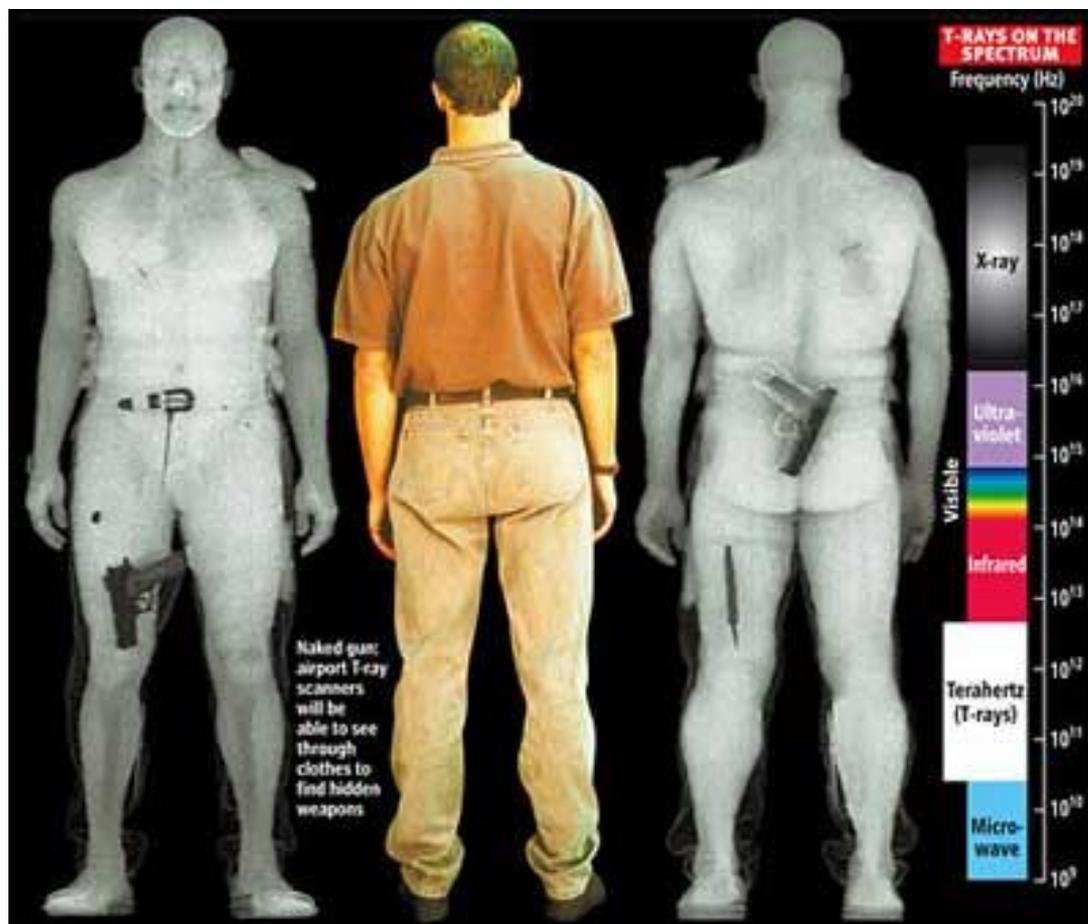


терагерцовый диапазон



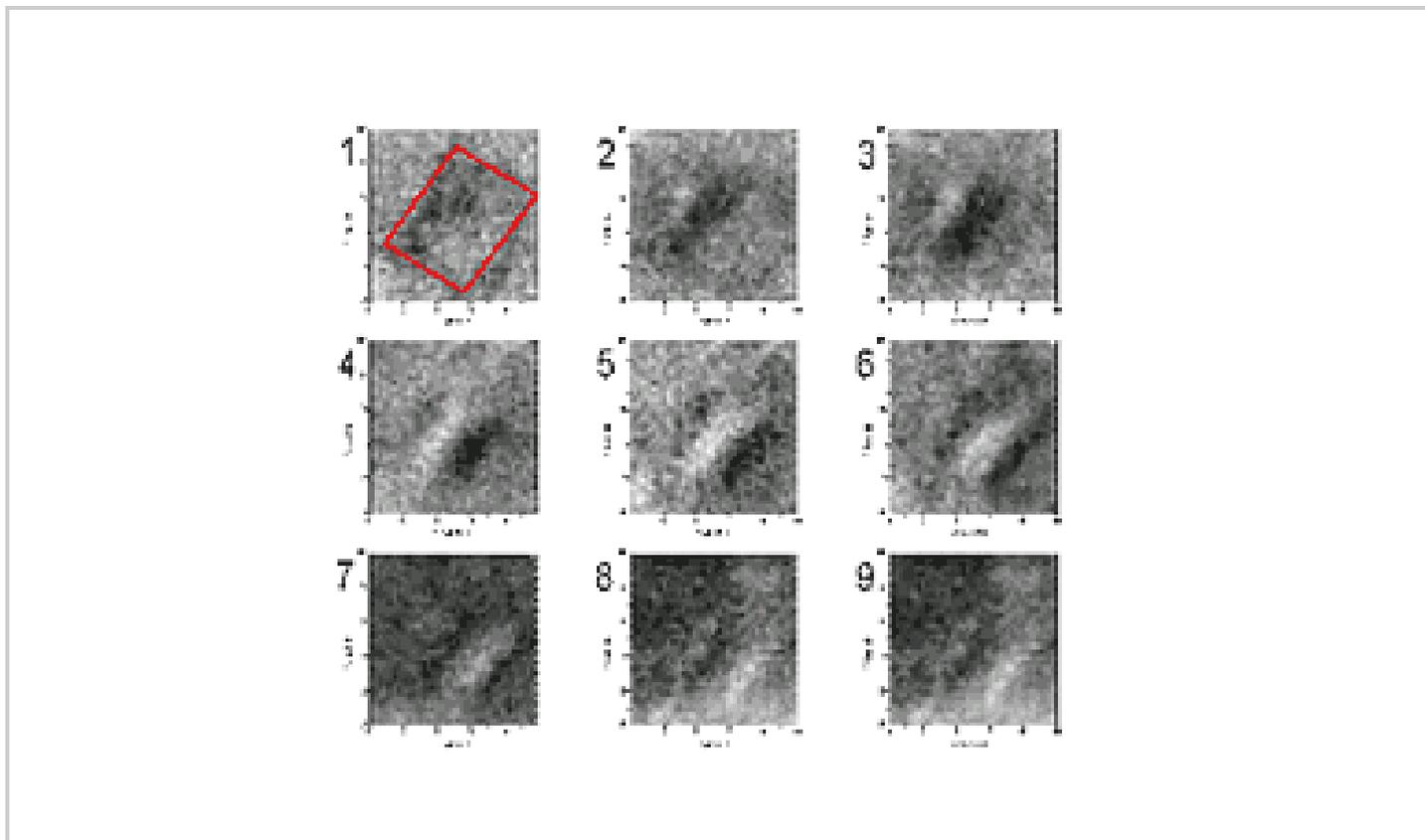
Человеческий зуб с внутренним кариесом  
в видимом и терагерцовом диапазоне

# Системы безопасности



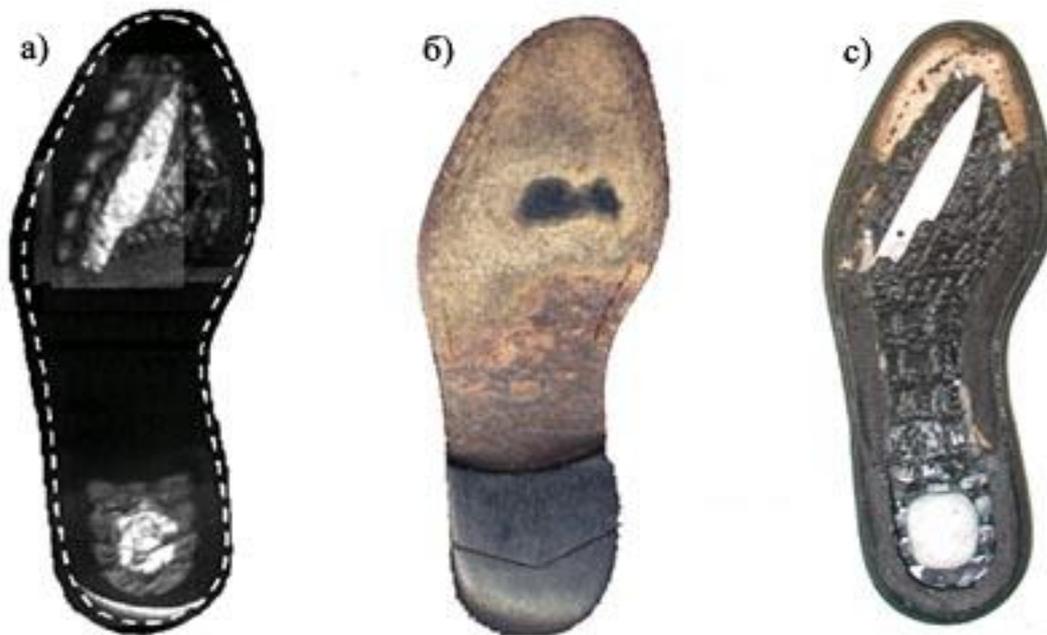
Одежда прозрачна в терагерцовом спектральном диапазоне

# Системы безопасности



Полиэтиленовая коробочка, зарытая в песок,  
картинки в терагерцовом диапазоне

# Системы безопасности



Ботинок с керамическим ножом и с пластиковой взрывчаткой  
“Semtex” в подошве

---

## Активные системы

- Вышеприведенные примеры – **активные системы**, когда внешний терагерцовый источник освещает объект, и исследуется отраженное, либо прошедшее излучение
-

---

# Источники терагерцового излучения

- Умножитель частоты
  - Квантово-каскадный лазер
  - Ртутная лампа
  - Лампа обратной волны
  - Газовый лазер
  - Гиротрон
  - Лазер на свободных электронах
  - ...
-

---

# «Комнатные» приемники терагерцового излучения

- Ячейка Голея
- Батарея термопар
- Пироэлектрический фотоприемник
- Микроболометр
- Фотоприемник на полевых транзисторах
- Фотоприемник на двумерных плазмонах
- ...

**Проблема:**  $NEP > 10^{-13} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$

---

# Что такое NEP?

**NEP** = **N**oise **E**quivalent **P**ower

Мощность, эквивалентная мощности шума,  
т.е. мощность, при которой  $S/N = 1$

Время  $\Delta t$

Число квантов фона

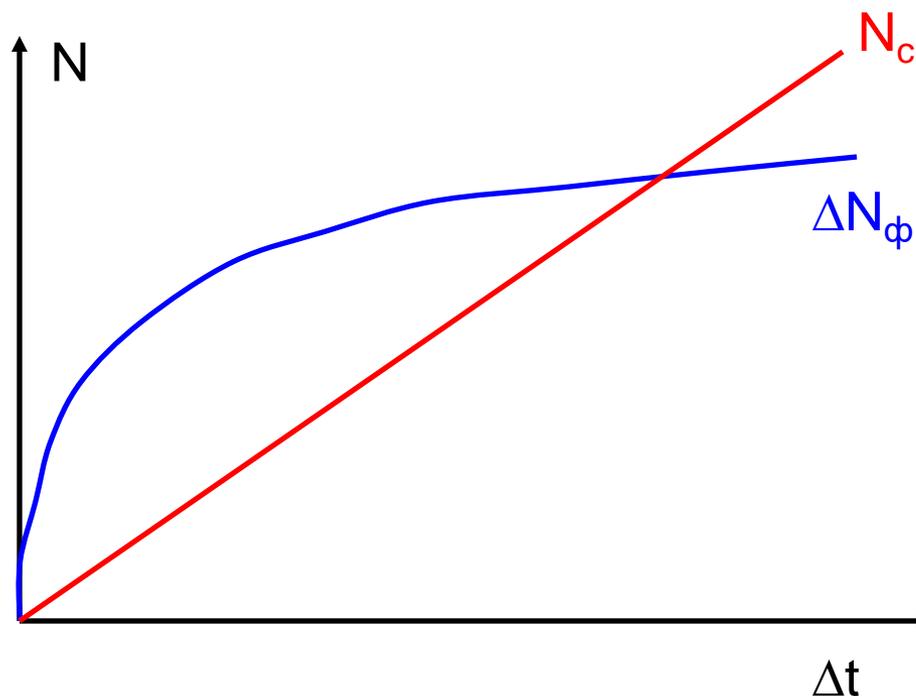
$$N_{\phi} \sim \Delta t$$

Флуктуация числа  
квантов

$$\Delta N_{\phi} = N_{\phi}^{1/2} \sim \Delta t^{1/2}$$

Число квантов

$$\text{сигнала } N_c \sim \Delta t$$



---

## Пассивные системы

- **Пассивные системы**, в которых анализируется излучение, испущенное самим объектом, требуют гораздо большей чувствительности приемников

Необходимое NEP  $< 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>

реализуемо только в охлаждаемых системах

---

---

В чем разница между активными и пассивными системами?

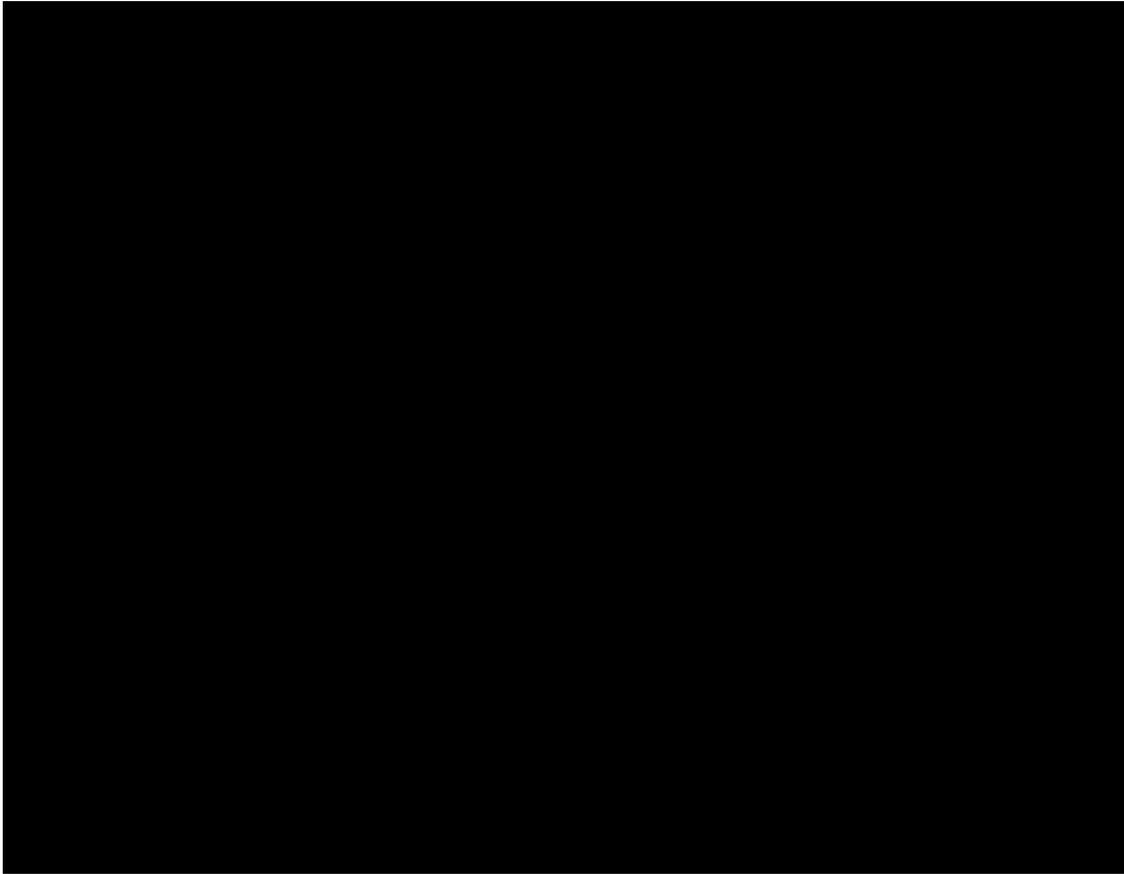


Изображение человека в видимом диапазоне, активная система



---

# Изображение человека в видимом диапазоне, пассивная система

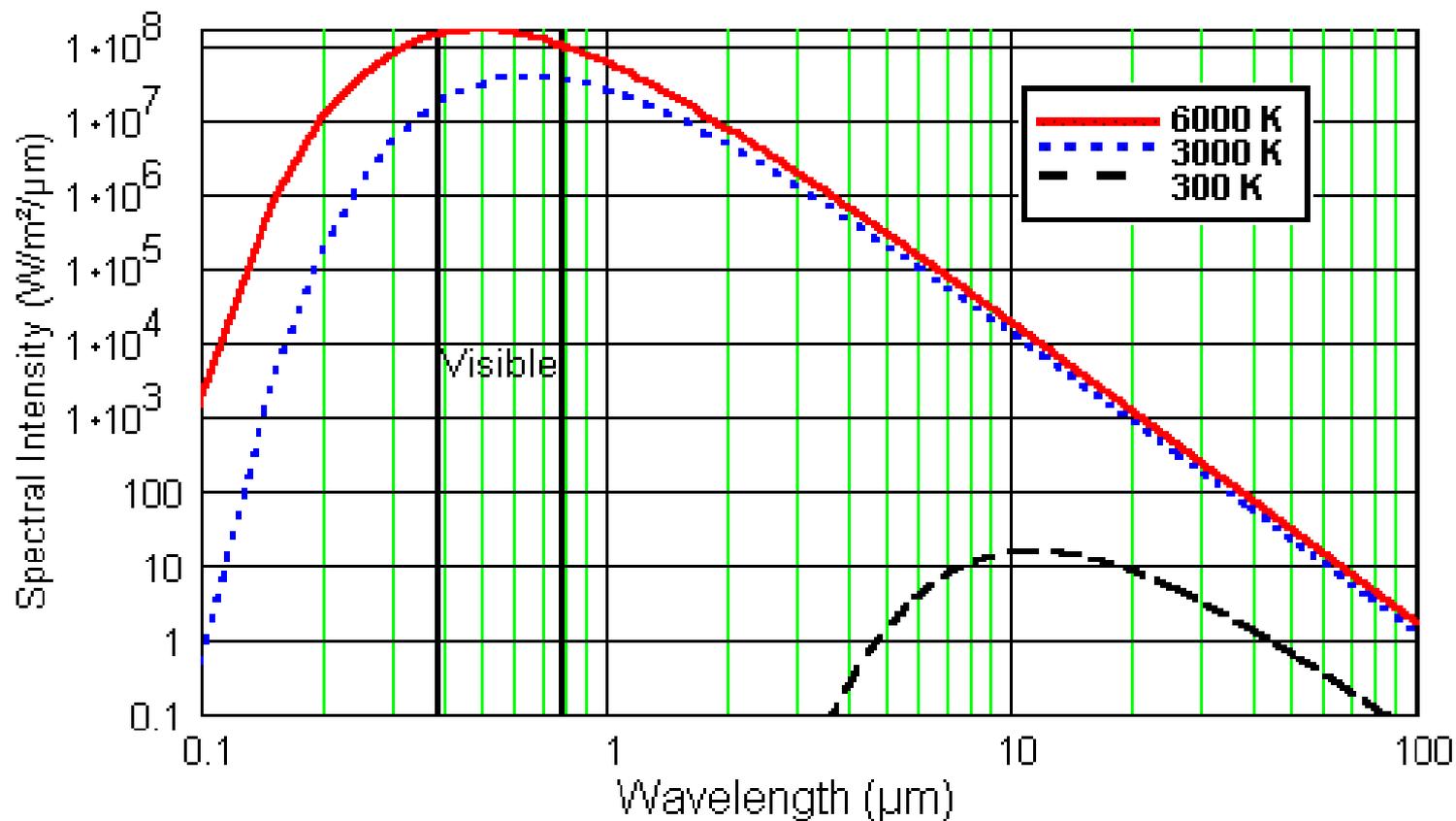


---

# Изображение человека на длине волны 10 мкм, пассивная система

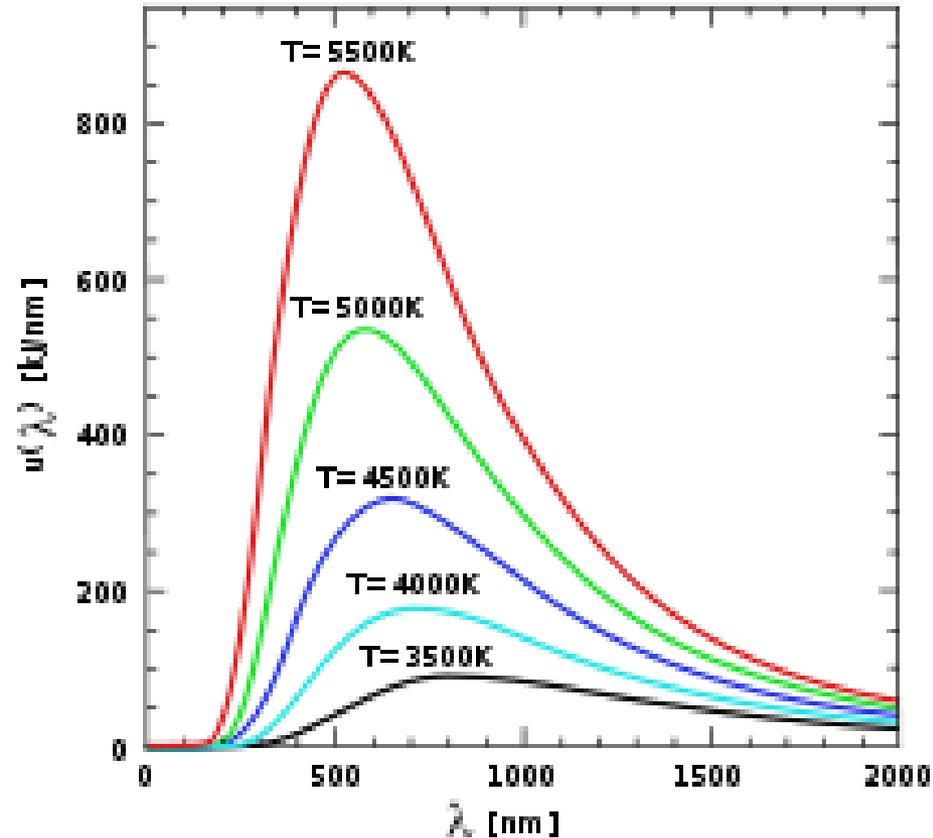


# Формула Планка



$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right)}$$

# Астероидная опасность



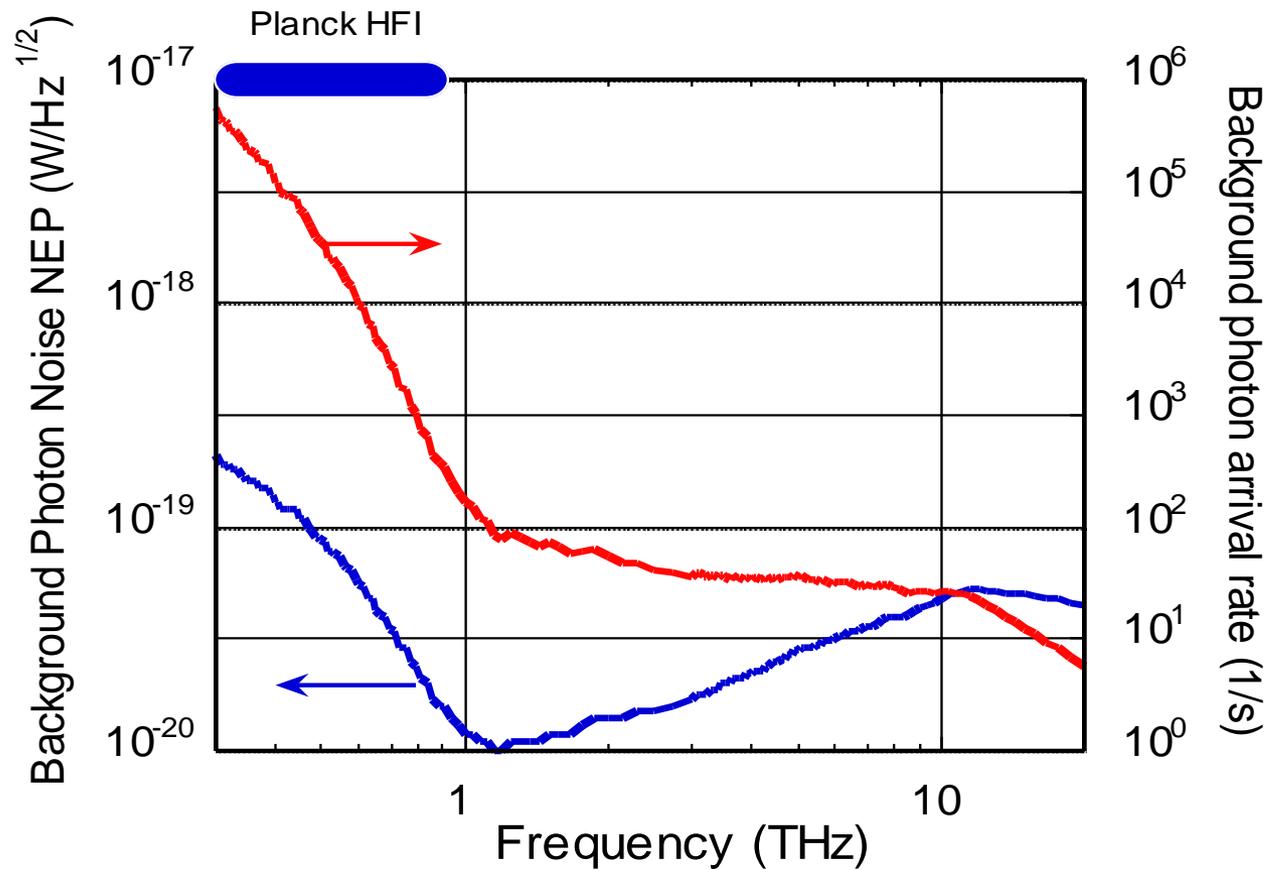
Максимум спектральной плотности излучения абсолютно черного тела  
 $\lambda(\mu\text{m}) = 3000/T(\text{K})$

Солнце:  $T=6000\text{ K}$ ,  $\lambda=500\text{ nm}$

Земля:  $T=300\text{ K}$ ,  $\lambda=10\ \mu\text{m}$

Астероиды:  $T=10\text{ K}$ ,  $\lambda=300\ \mu\text{m}$   
 $\nu=1\text{ THz}$  – терагерцовый диапазон!

# Терагерцовая астрономия



---

# Планируемые космические миссии в терагерцовом диапазоне

- SPICA
  - SAFARI
  - BLISS

Требуемое значение NEP  $\sim 10^{-19}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>  
и ниже

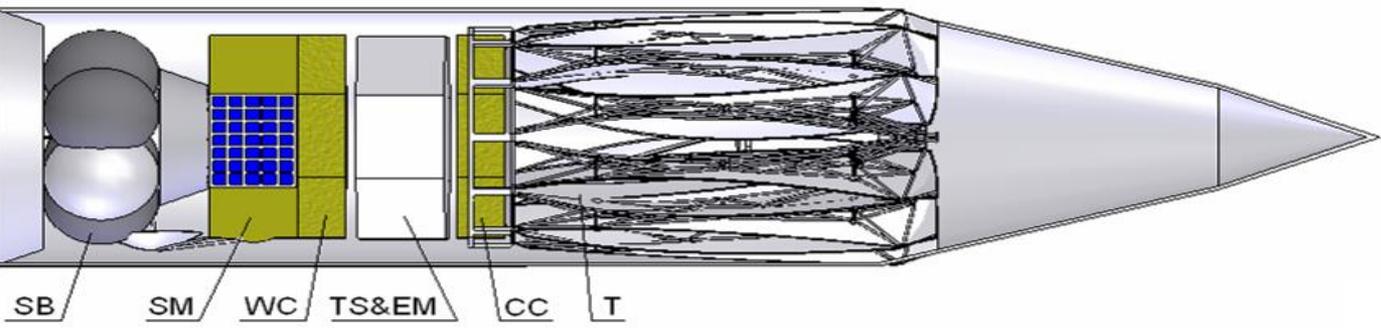
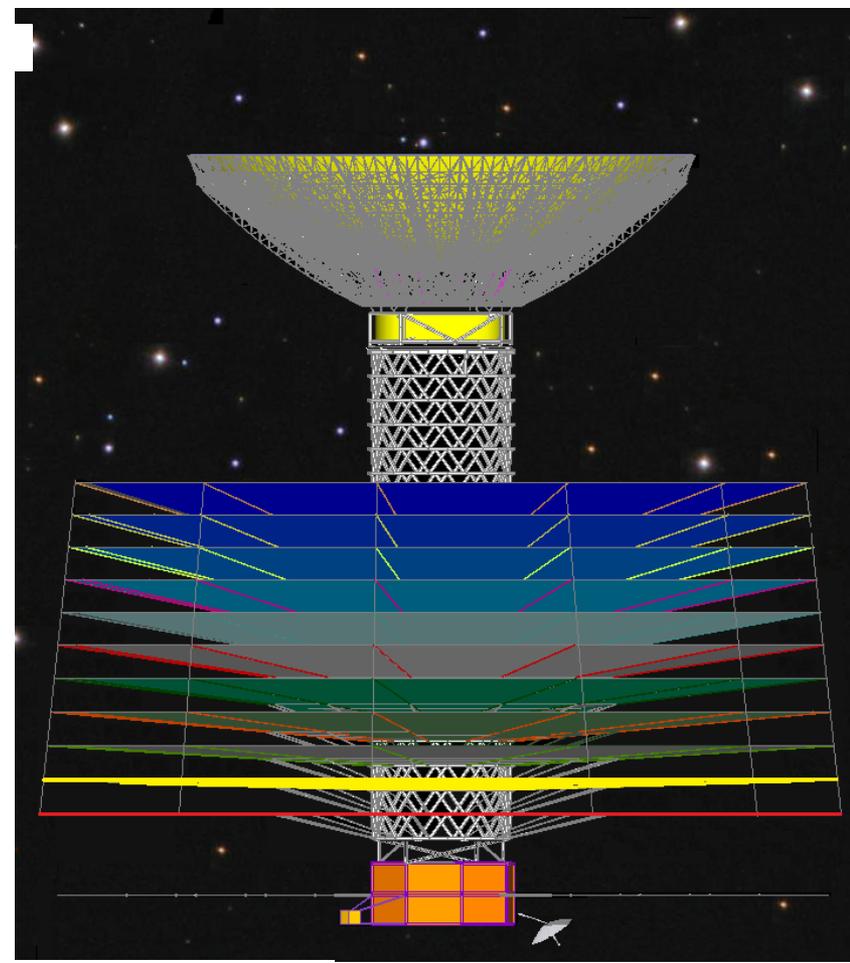
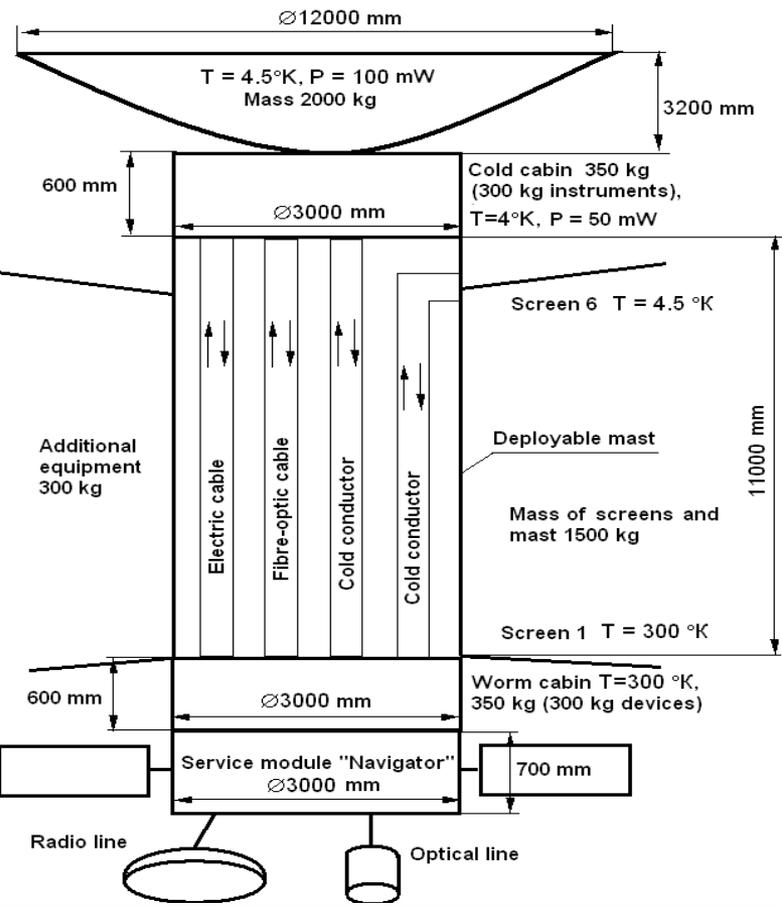
---

---

## Обсерватория «Миллиметрон»

- 12-метровая антенна, охлажденная до 10 К
  - Несколько областей длин волн, включая гига- и терагерцовый диапазоны
  - Дата запуска около 2030
-

**Preliminary mass, overall and heat scheme of space observatory MILLIMETRON**



**Proton-M  
launcher,  
L2 orbit,  
4500+2100 ka**

**SB – space buster DM, SM – service module, WC – warm cabin, TS&EM – thermal screens & expanding mast, CC – cold cabin, T – telescope.**

# Параметры приборов на обсерватории «Миллиметр»

## **Telescope:**

**Primary mirror diameter 12 m, surface RMS accuracy 10  $\mu\text{m}$ , diffraction beam 4" and field of view 4.5' at 1.5 THz.**

## **Bolometer arrays:**

**wavelength ranges 0.2-0.4 mm, and 0.7-1.4 mm**

**HPBW beam (at 1.5 THz) 4"**

## **Low resolution spectropolarimeter:**

**wavelength range 0.02-0.8 mm**

**spectral resolution  $R = 3$**

## **Medium resolution spectrometers:**

**wavelength ranges 0.03-0.1 mm, and 0.1-0.8 mm**

**spectral resolution  $R = 1000$**

## **High resolution spectrometer:**

**wavelength ranges 0.05 – 0.3 mm**

**spectral resolution  $R = 10^6$**

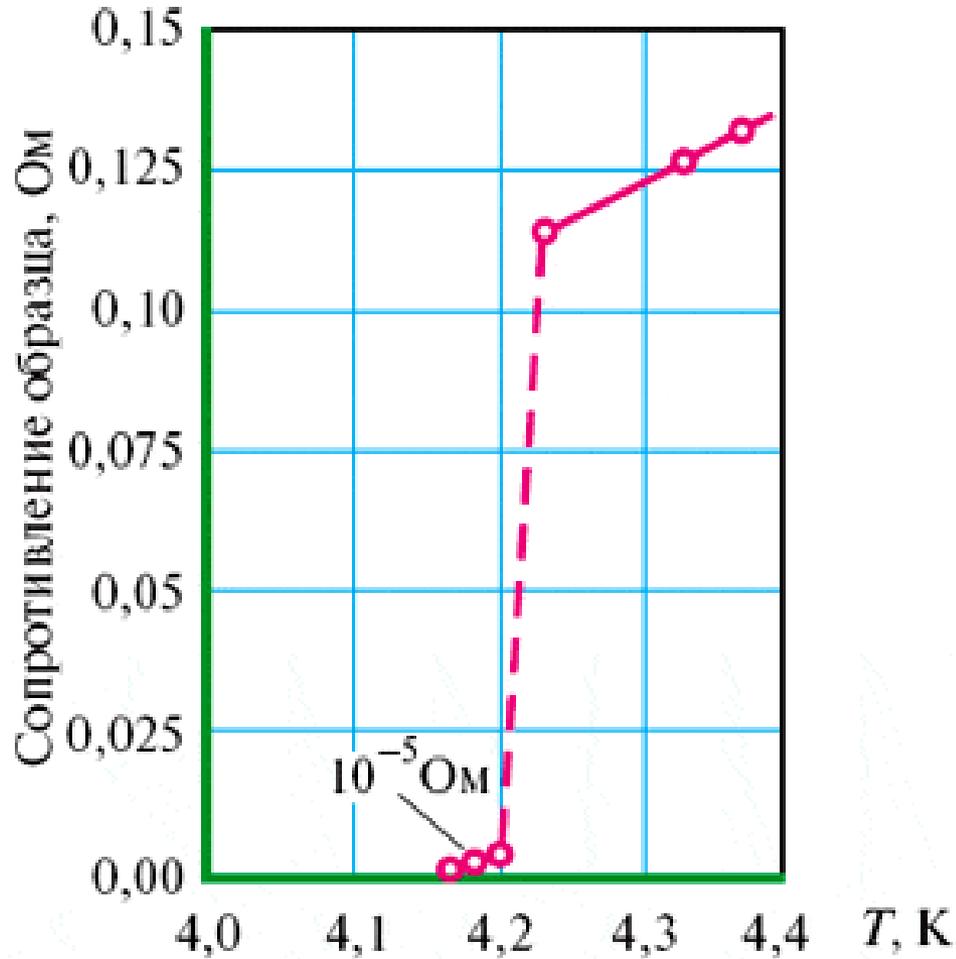
**Bolometric sensitivity: at 1 THz,  $\text{NEP} = 10^{-19} \text{ W(s)}^{0.5}$ ,  $A = 100 \text{ m}^2$ ,  $R=3$  and 1 h integration  $5 \cdot 10^{-9} \text{ Jy (1 } \sigma)$**

---

# Наиболее чувствительные приемники терагерцового излучения

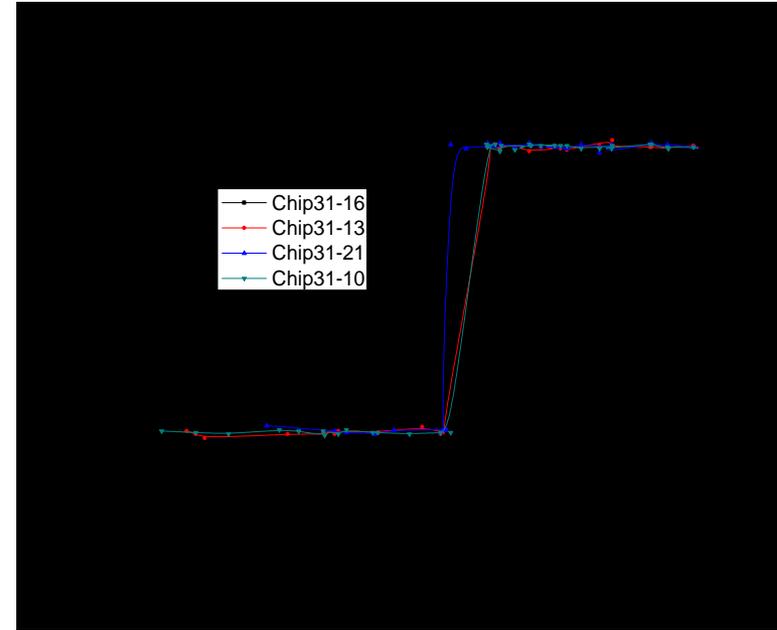
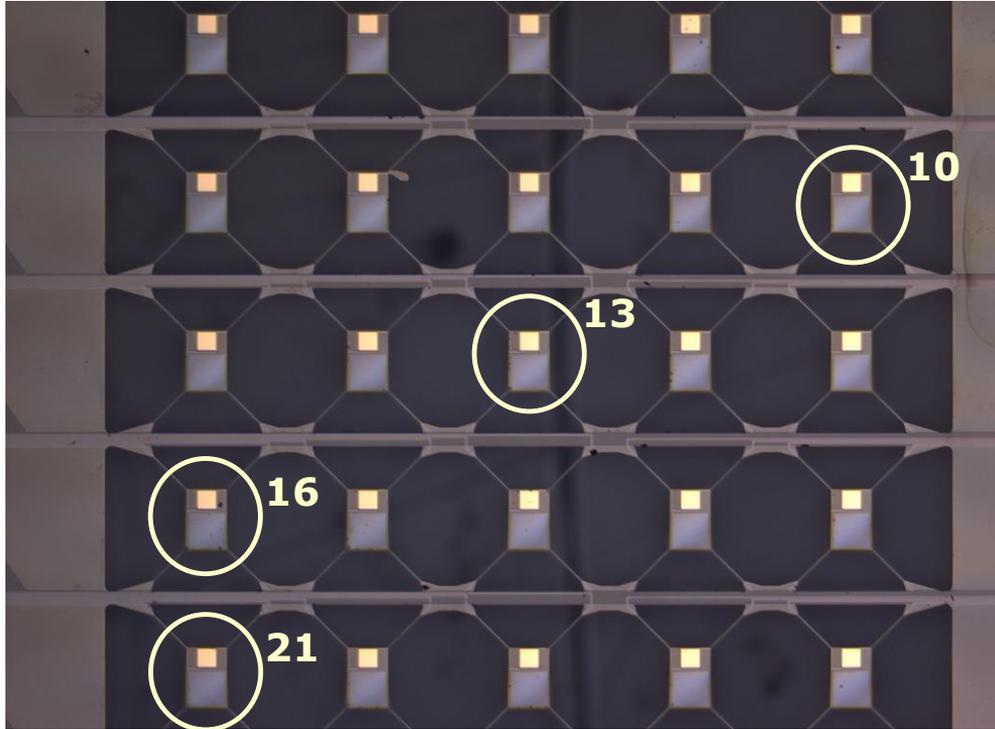
- Сверхпроводящие болометры
  - Детекторы на кинетической индуктивности
  - Болометры на горячих электронах
  - Болометры на холодных электронах
-

# Сверхпроводимость



Температурная зависимость сопротивления ртути  
Каммерлинг-Оннес, 1911 г.

# Сверхпроводящие болометры



Optical NEP for Single pixel:  $\sim 1 \times 10^{-18} \text{W}^{1/2}/\text{Hz}$  by Cardiff /SRON  
At  $45 \mu\text{m}$

---

---

## Проблемы

- Очень низкая рабочая температура  
< 200 мК
  - NEP не ниже  $4 \cdot 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$  в лаборатории  
и не ниже  
 $10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$  в реальных космических  
обсерваториях
  - Проблемы с многоэлементными  
матрицами
-

- 
- Все, о чем говорилось выше – СВЕРХпроводниковые технологии
  - Как насчет ПОЛУпроводниковых технологий?
    - Фотоприемники с блокированной примесной полосой на основе одноосно деформированного Ge(Ga)?
    - Забыты в 90-х
    - Что еще???
-

---

Альтернативная возможность

Легированные сплавы  
на основе теллурида свинца

---

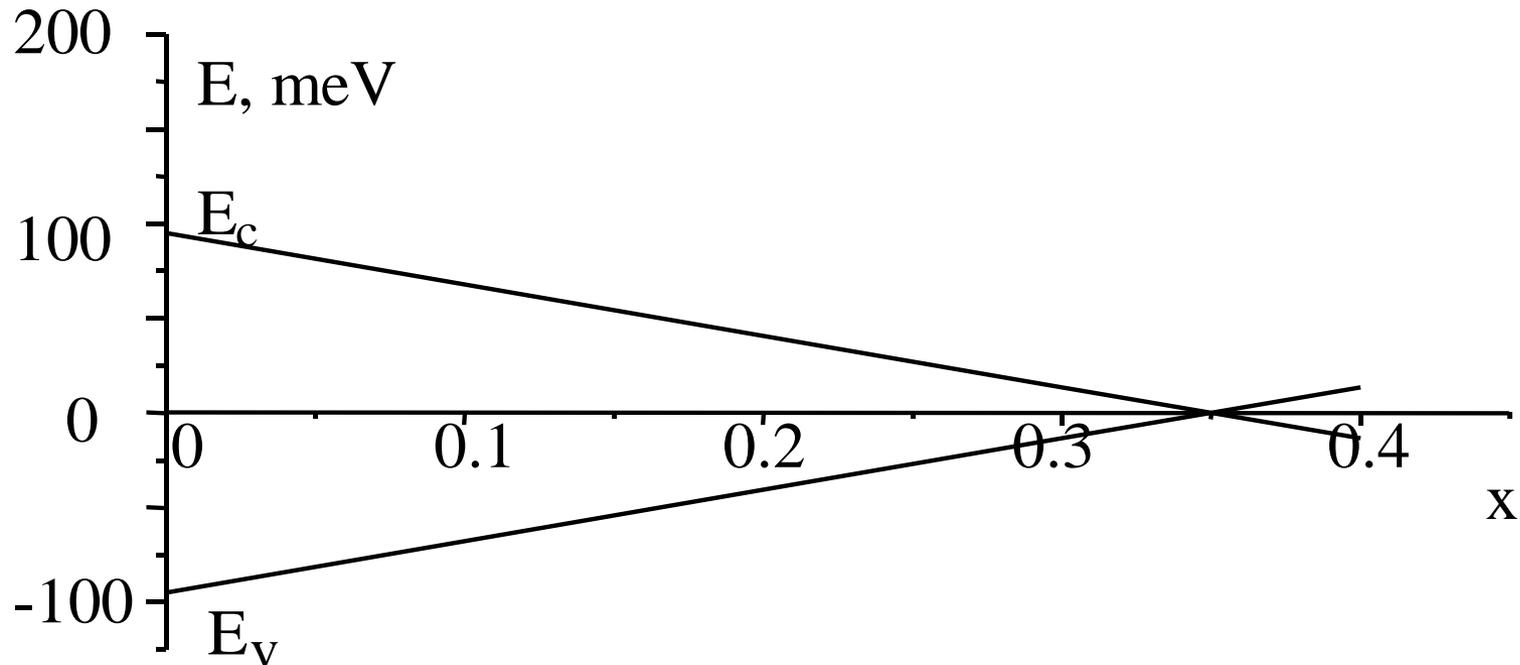
# Нелегированные сплавы

на основе теллурида свинца

PbTe: узкощелевой полупроводник:

- 1. Прямая щель  $E_g = 190 \text{ meV}$  при  $T = 0 \text{ K}$  в  $L$ -точке зоны Бриллюэна
- 2. Высокая диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon \sim 10^3$ .
- 3. Малые эффективные массы  $m \sim 10^{-2} m_e$ .

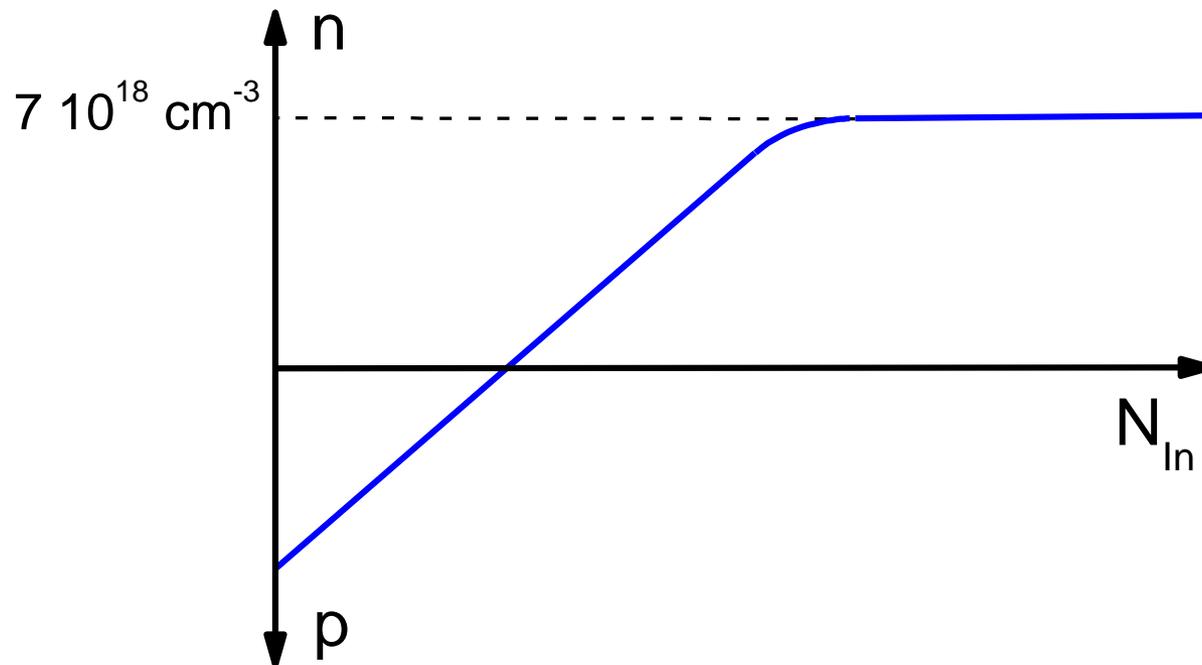
# Твердые растворы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$



Происхождение свободных носителей:  
Отклонение от стехиометрии  $\sim 10^{-3}$ .  
Как правило:  $n, p \sim 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$

# Эффекты, возникающие при легировании

## Эффект стабилизации уровня Ферми\_

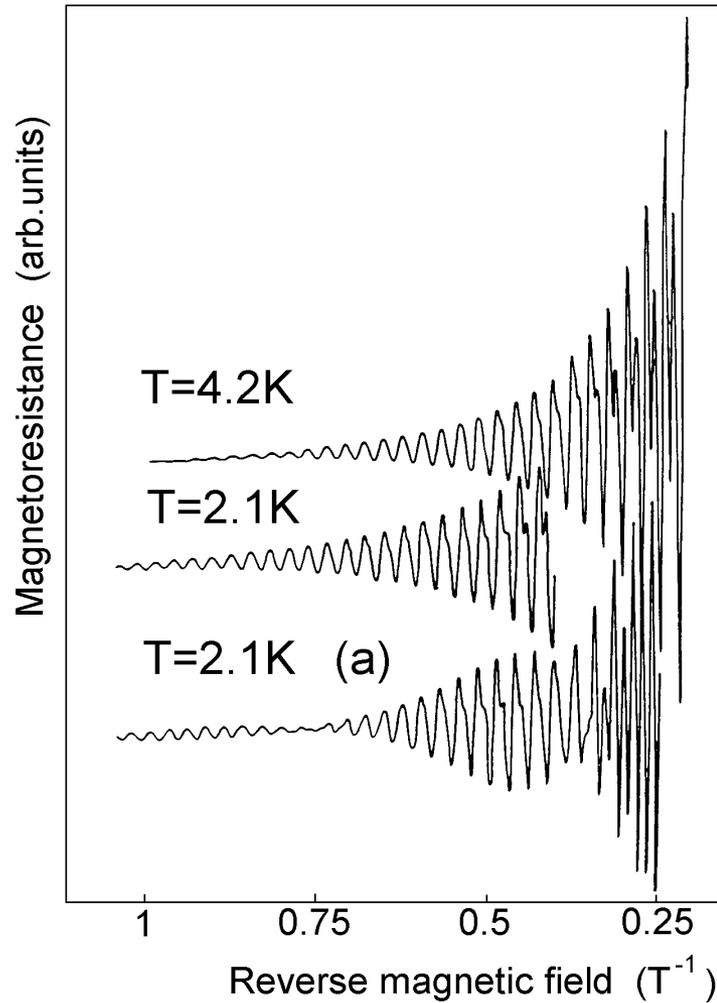


---

# Последствия

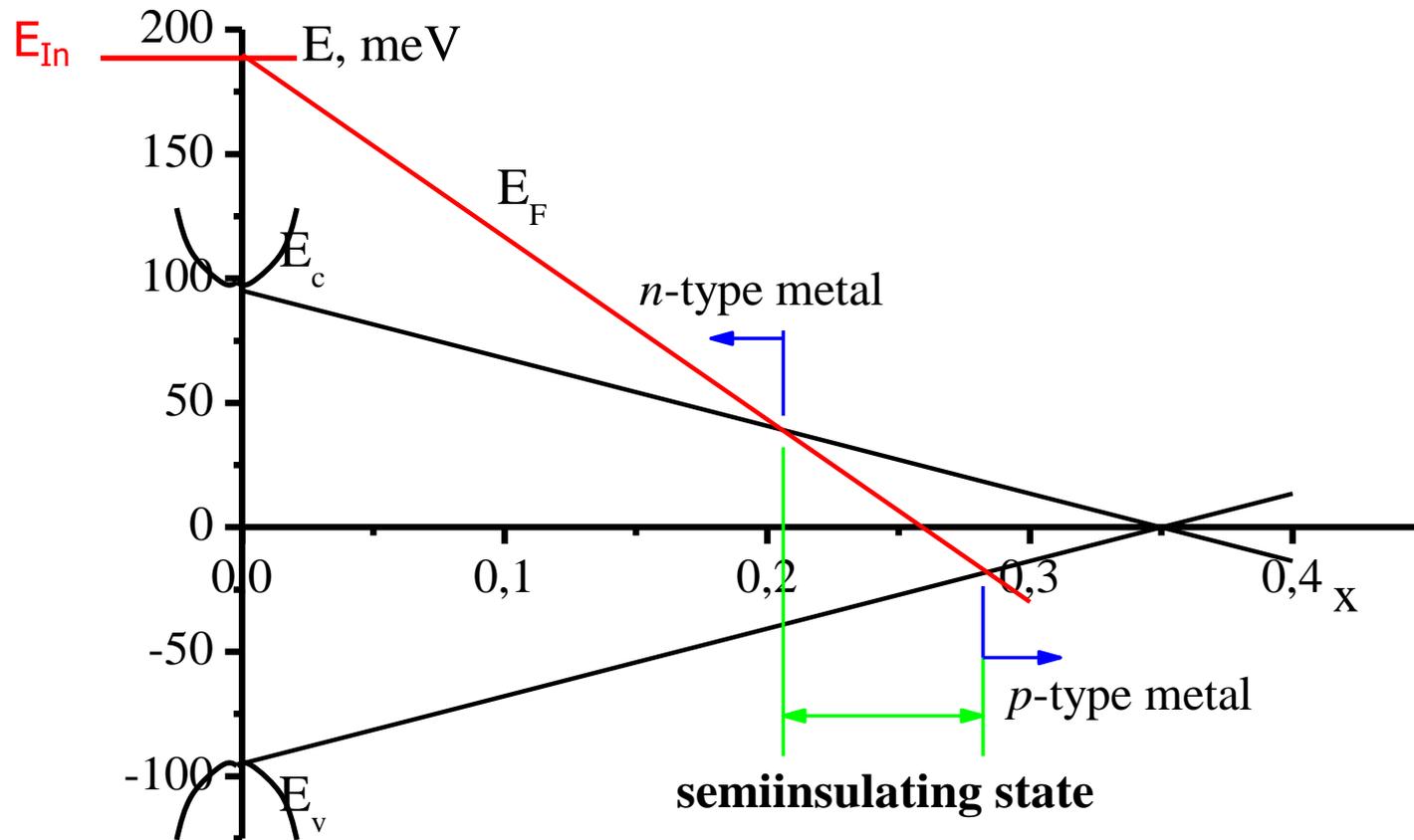
- **Абсолютная воспроизводимость** параметров образца независимо от способа синтеза (одного и того же состава). Положение  $E_{In}$  жестко фиксировано и соответствует  $E_F$
  - Исключительно высокая **пространственная однородность**. При  $E_F \sim 70$  мэВ флуктуации дна зоны проводимости  $< 0.1$  мэВ
  - **Высокая радиационная стойкость** (стабильность при потоках жесткого излучения до  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>) в  $10^3$ - $10^4$  раз выше стойкости обычных полупроводников
-

# Осцилляции Шубникова – де Гааза

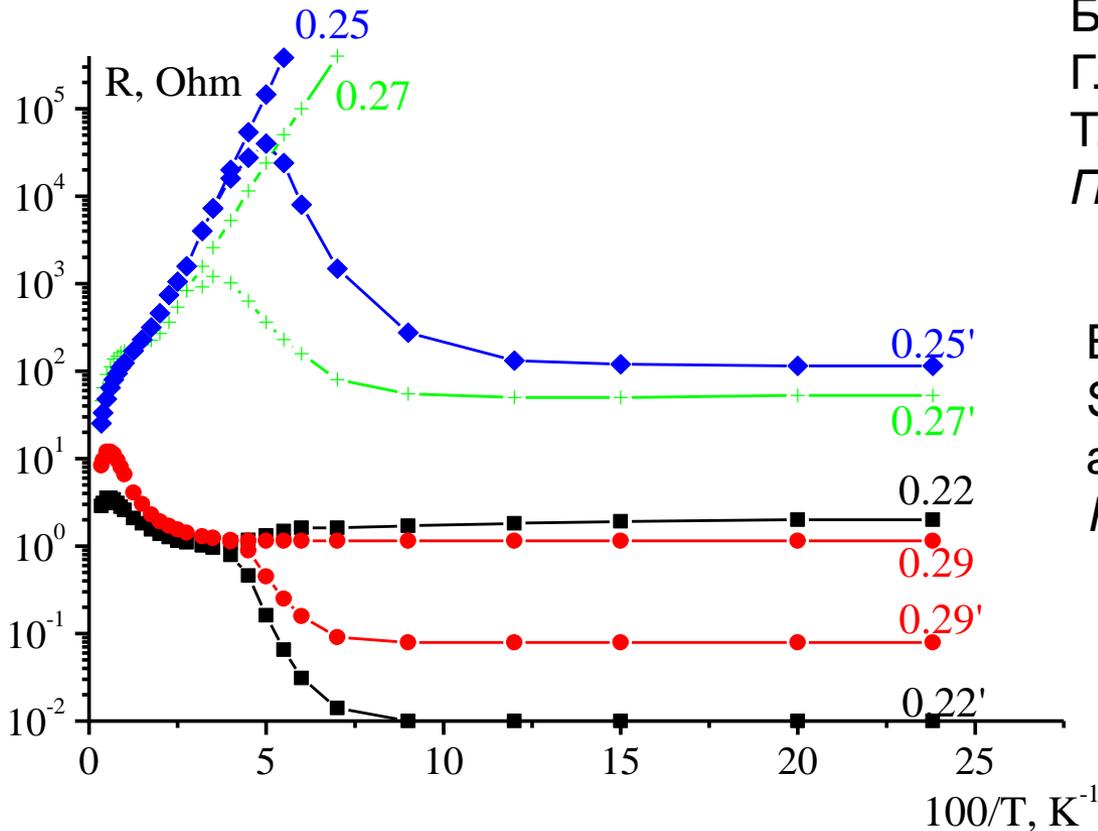


PbTe(In)

# Стабилизация уровня Ферми в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$



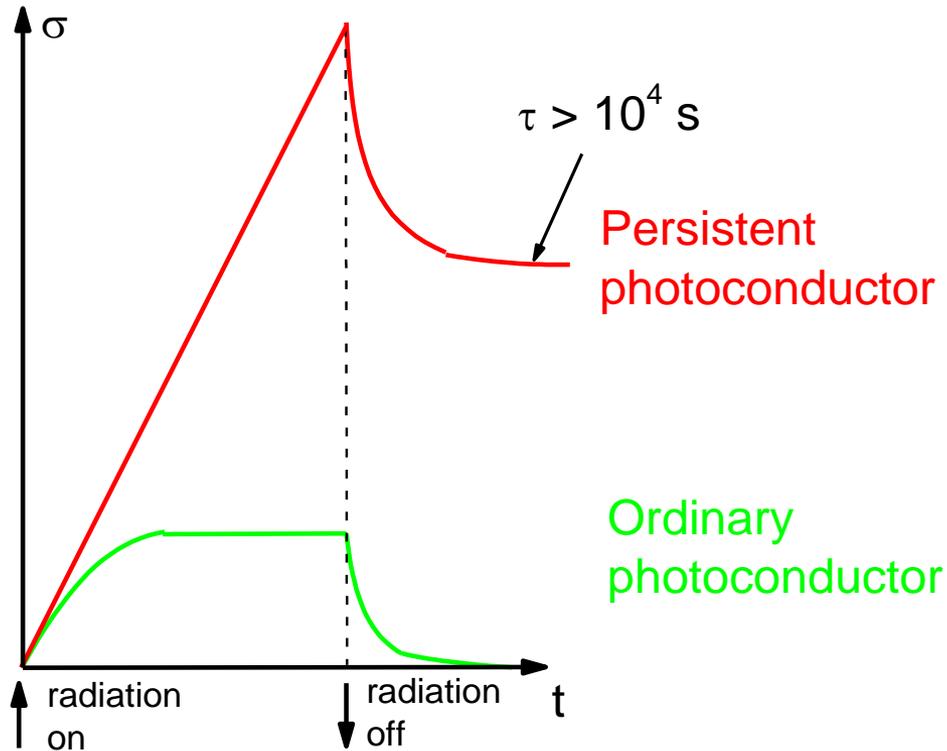
# Задержанная фотопроводимость



Б.М.Вул, И.Д.Воронова,  
Г.А.Калюжная, Т.С.Мамедов,  
Т.Ш.Рагимова,  
*Письма в ЖЭТФ*, **29**, 21 (1979)

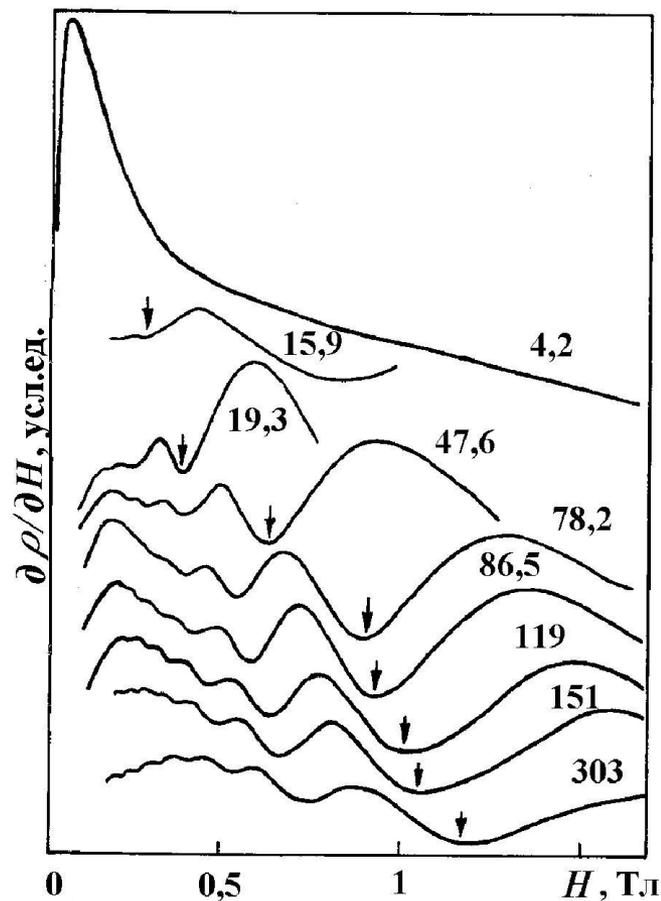
В.А.Акимов, N.B.Brandt,  
S.O.Klimonskiy, L.I.Ryabova,  
and D.R.Khokhlov,  
*Phys.Lett.* **88A**, 483 (1982)

# Кинетика фотопроводимости



Большое время жизни фотовозбужденных электронов связано с существованием барьера между локальными и зонными состояниями DX-подобные примесные центры

# Осцилляции Шубникова – де Гааза при ИК-подсветке



V.A.Akimov, N.B.Brandt,  
S.O.Klimonskiy, L.I.Ryabova,  
and D.R.Khokhlov,  
*Phys.Lett.* **88A**, 483 (1982)

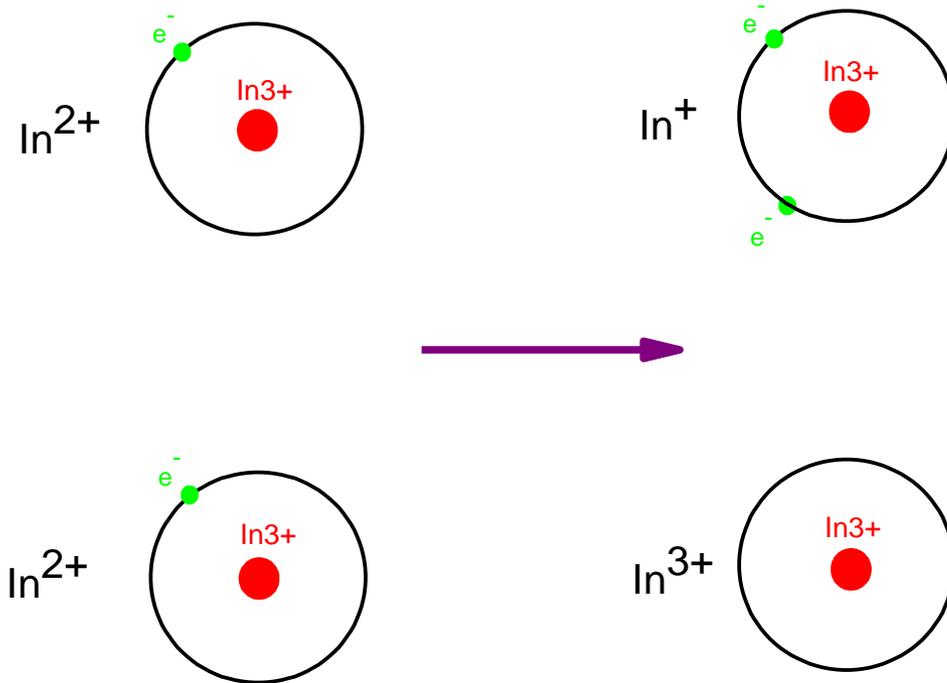
Задержанная фотопроводимость  
позволяет изменять положение  
квазиуровня Ферми при подсветке

---

# Основные проблемы

- Как объяснить необычную электроактивность примеси
  - Как объяснить появление долговременных релаксационных процессов при низких температурах
-

# Модель переменной валентности



$$E_{\text{ion(left)}} = E^{(1)} + E^{(1)}$$

$$E_{\text{ion(right)}} = E^{(2)} + E^{(1)}$$

$$E^{(2)} = E^{(1)} - U$$

Обычно  $U > 0$

“Negative-U” центр:  $U < 0$

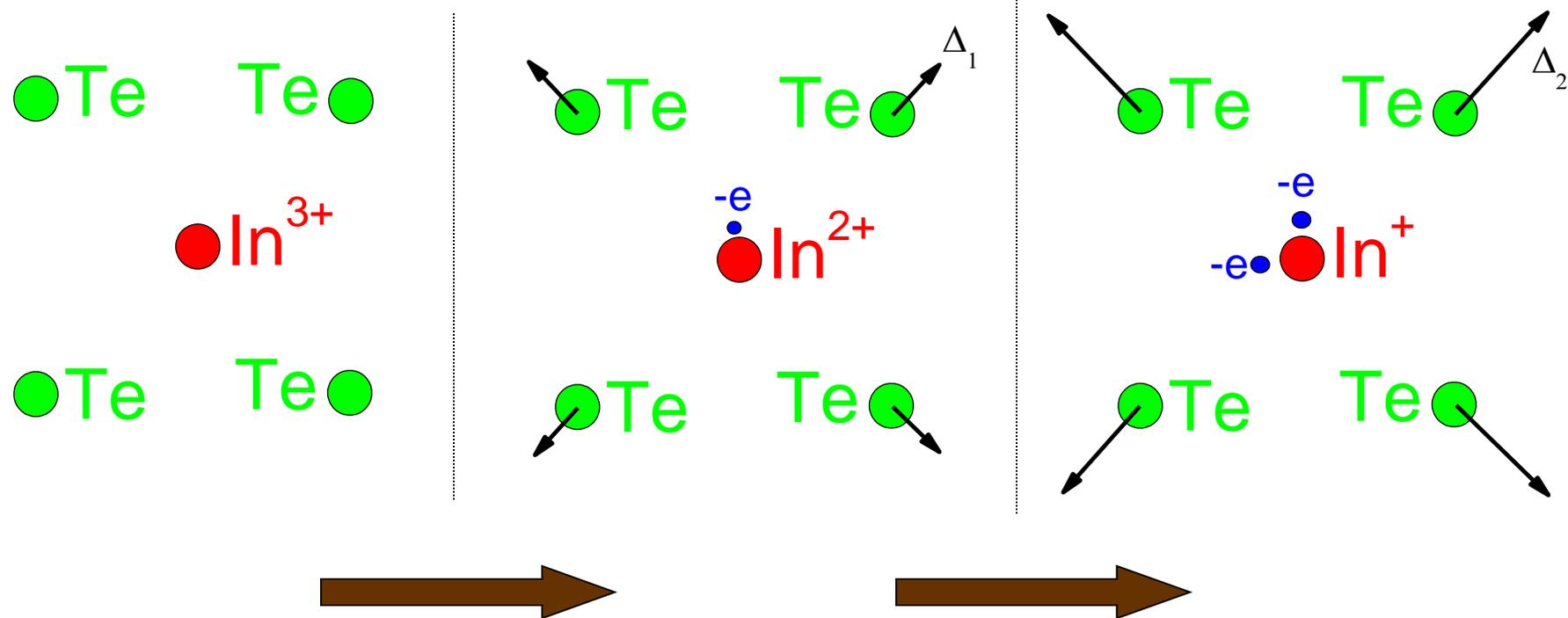
И.А.Драбкин, Б.Я.Мойжес,  
ФТП, 15, 625 (1981)

# Модель переменной валентности

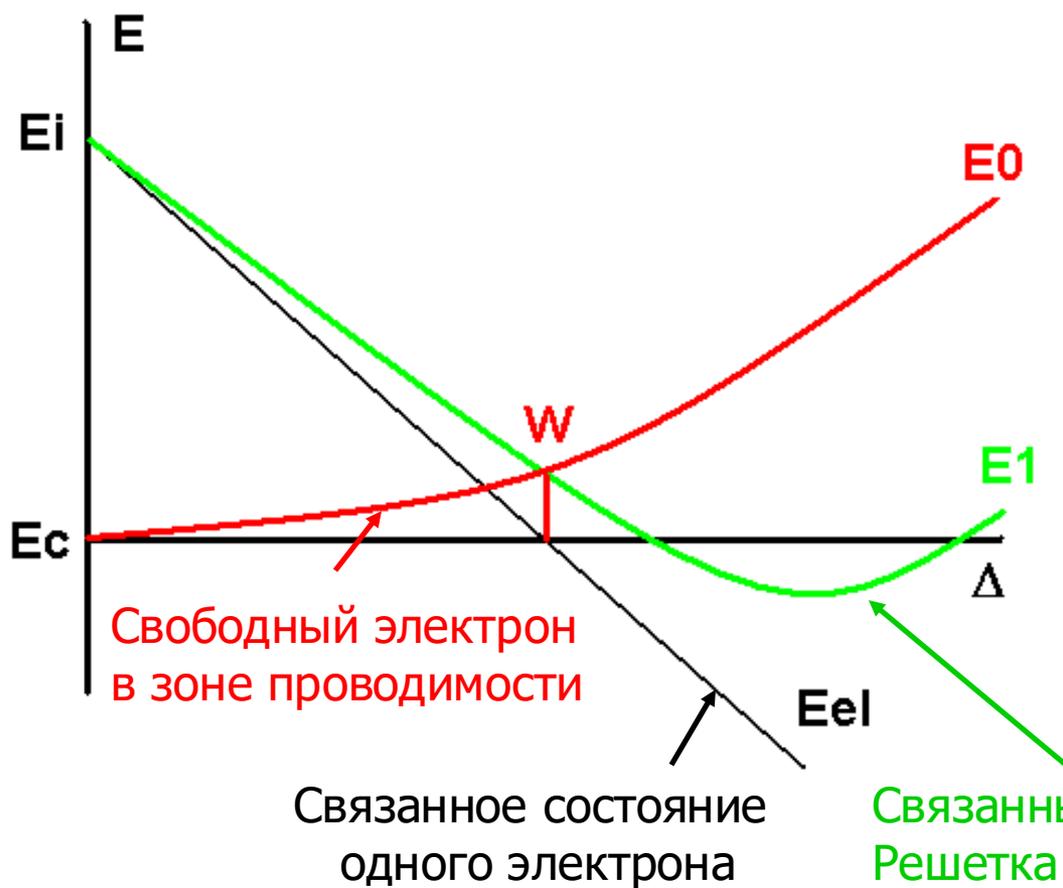
Ю.М.Каган, К.А.Кикоин, *Письма в ЖЭТФ*, **31**, 367 (1980)

Б.А.Волков, О.А.Панкратов, *ДАН СССР*, **255**, 93 (1980)

В.И.Литвинов, К.Д.Товстюк, *ФТТ*, **24**, 896 (1982)



# Модель для объяснения долговременных процессов

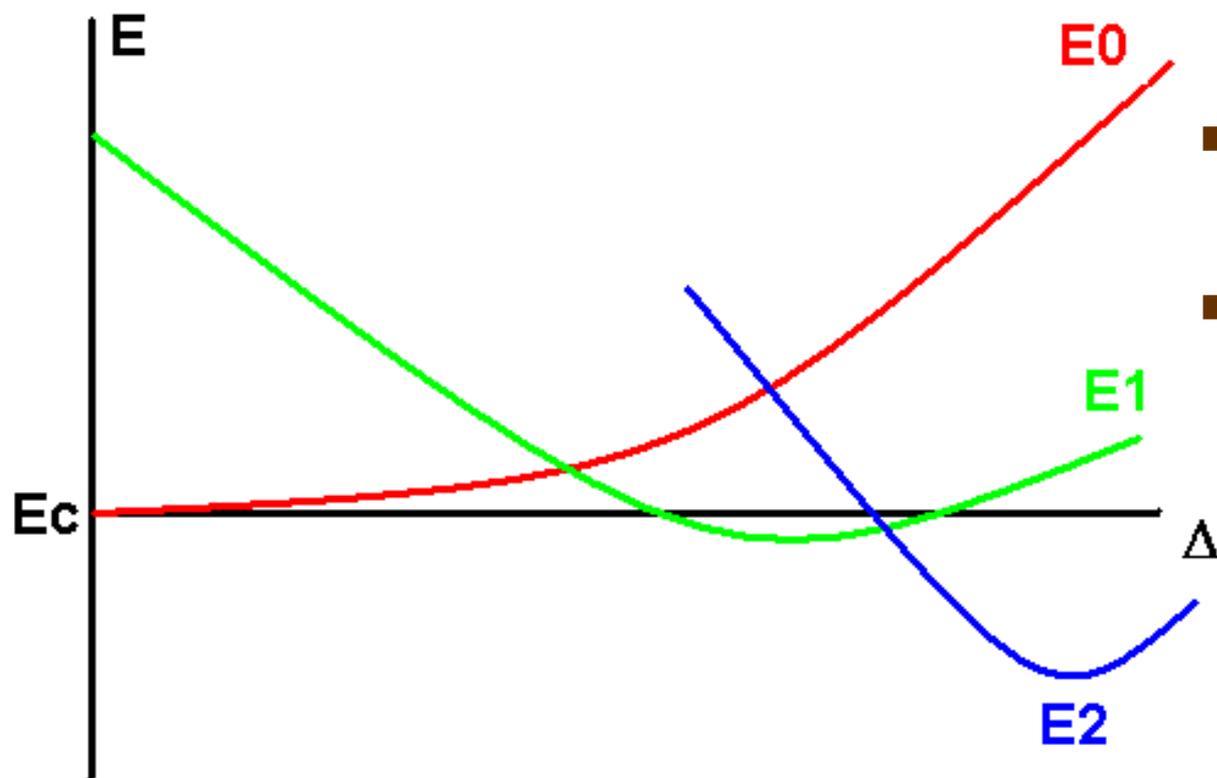


Конфигурационно-координатная диаграмма

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{el}} + E_{\text{lat}} = (E_i - \Delta) \cdot n + \frac{\Delta^2}{2\Delta_0}$$

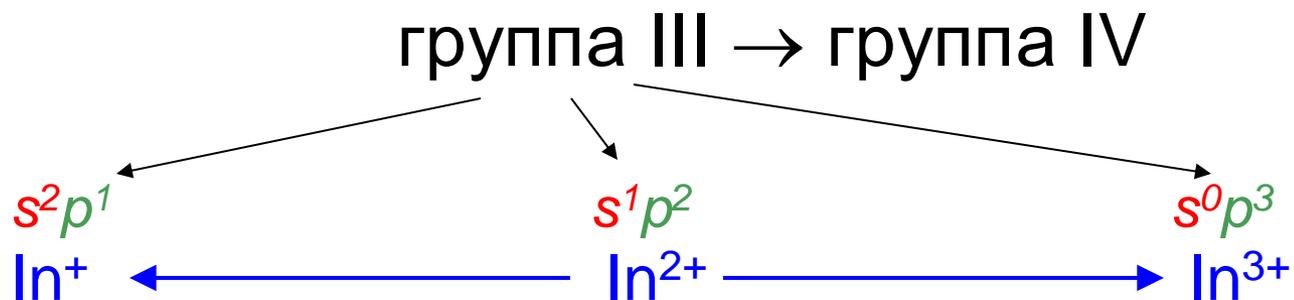
( $n = 0, 1, 2$ ) – число локализованных электронов

# Модель для объяснения долговременных процессов



- $E_2$  – основное локальное состояние
- $E_1$  – метастабильное локальное состояние

# Переменная валентность элементов III группы



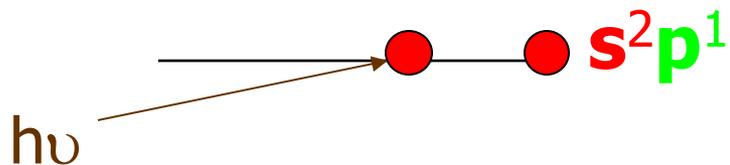
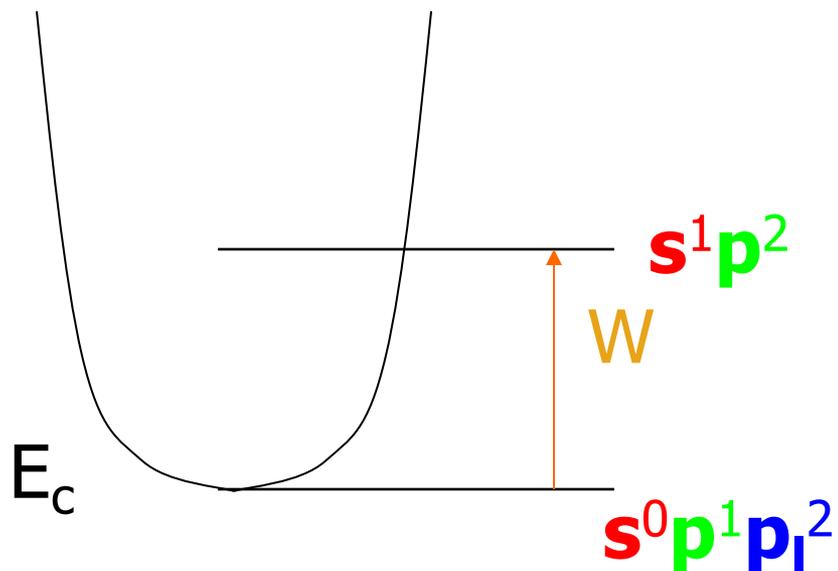
$p$ -электроны формируют разрешенные зоны

Условие стабилизации уровня Ферми:

$$E(s^2p^1) = E(s^0p^3) < E(s^1p^2)$$

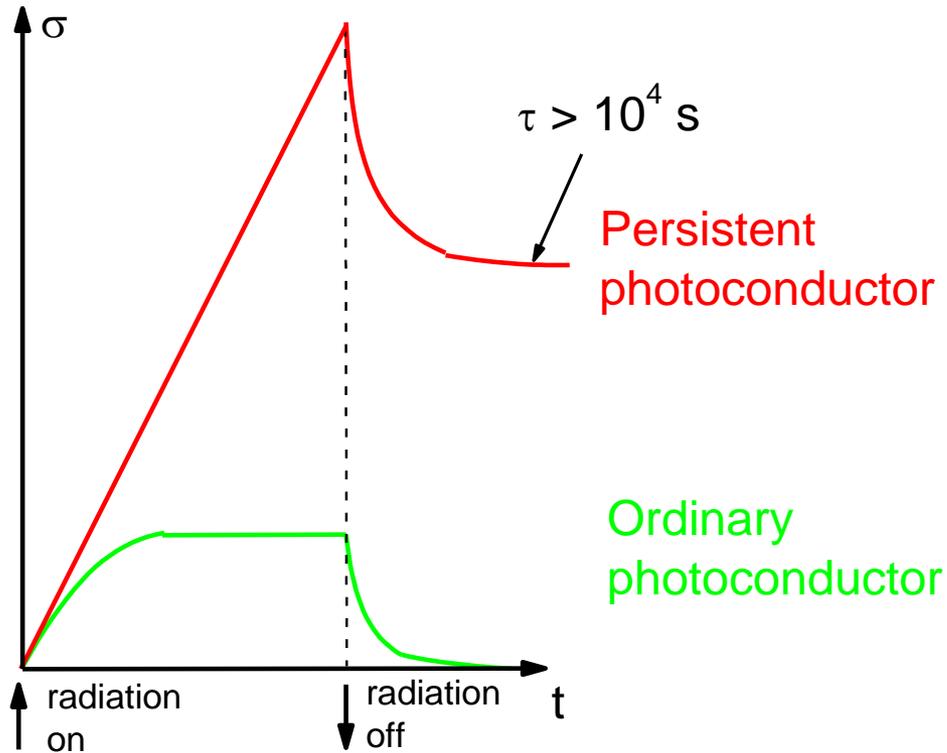
Negative-U поведение

# Объяснение долговременных процессов



Один локальный уровень  $p_l$  формируется для  $N \gg 1$  (до  $10^4 - 10^5$ )  $s^0 p^3$  центров

# Кинетика фотопроводимости



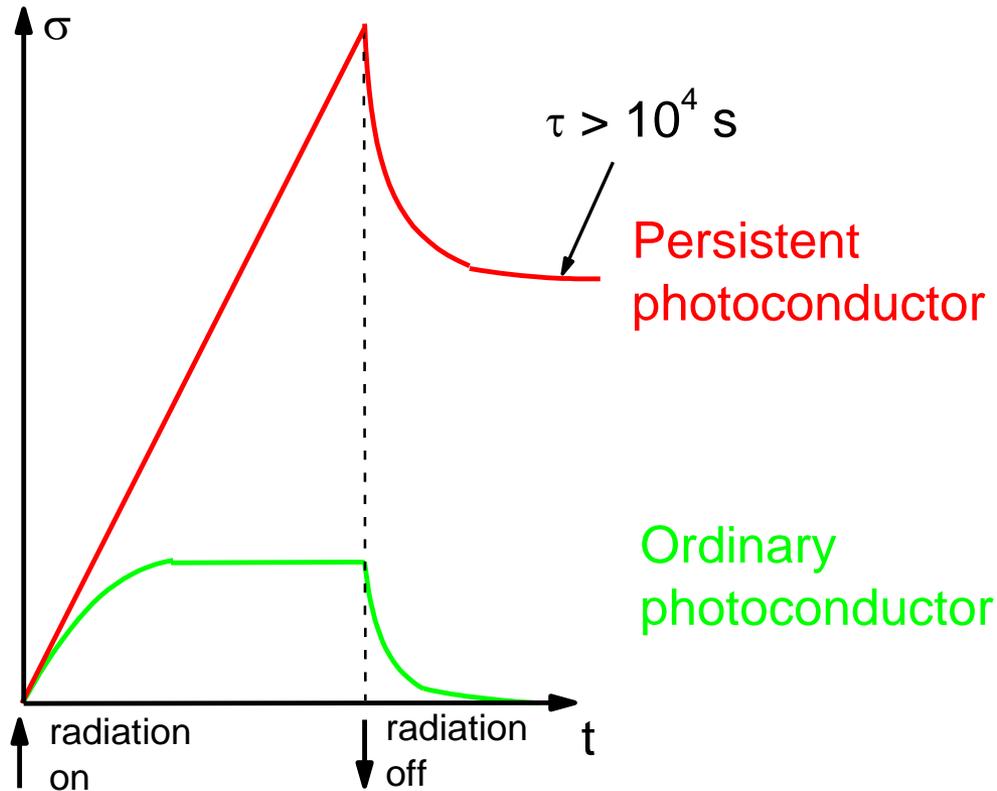
Быстрая релаксация связана с переходами в состояние  $s^0p^1p_i^2$ , медленная релаксация связана с переходами в основное локальное состояние  $s^2p^1$

---

## Важные замечания

- И основное, и метастабильное локальное состояние - двухэлектронные
  - Волновая функция электрона в локальном метастабильном состоянии имеет большой радиус локализации
  - Поляризуемость электрона в локальном метастабильном состоянии может быть очень велика
-

# Кинетика фотопроводимости



Быстрая релаксация  
- локализация на  
метастабильные  
локальные состояния;  
медленная релаксация  
соответствует  
локализации на  
основное локальное  
состояние

# Локальные метастабильные состояния

Метастабильные состояния отвечают за появление ряда эффектов:

- Диамагнитный отклик до 1% от идеального
- Увеличение эффективной диэлектрической проницаемости до  $10^5$  при терагерцовом освещении
- Гигантское отрицательное магнитосопротивление с амплитудой до  $10^6$
- **Задержанная фотопроводимость в терагерцовой спектральной области**

---

# Спектральный отклик

## ■ Два подхода

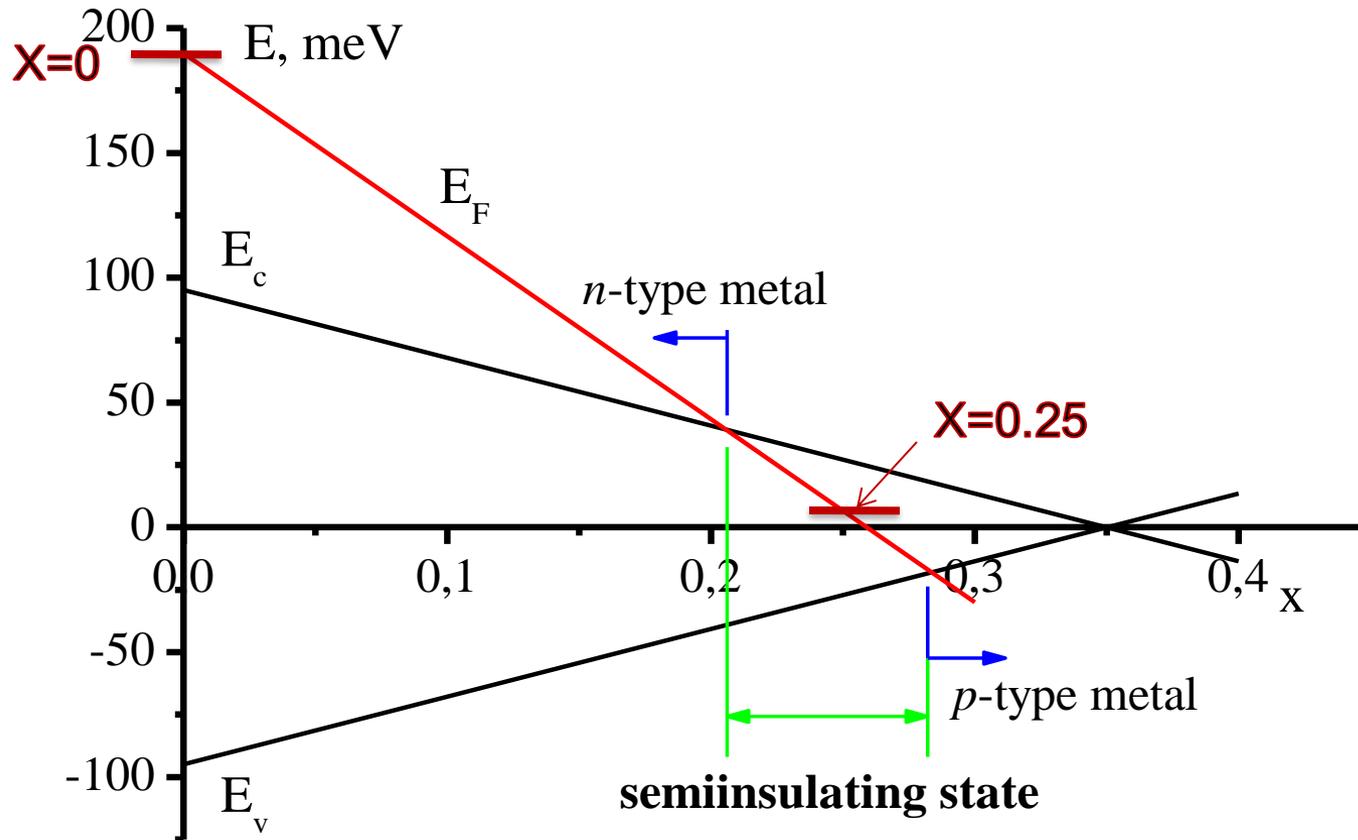
- Низкофоновый подход: образец экранирован от фонового излучения, низкоинтенсивные источники излучения
  - Высокофоновый подход: образец не экранирован от фонового излучения, высокоинтенсивные источники излучения
-

---

# Высокофонный подход

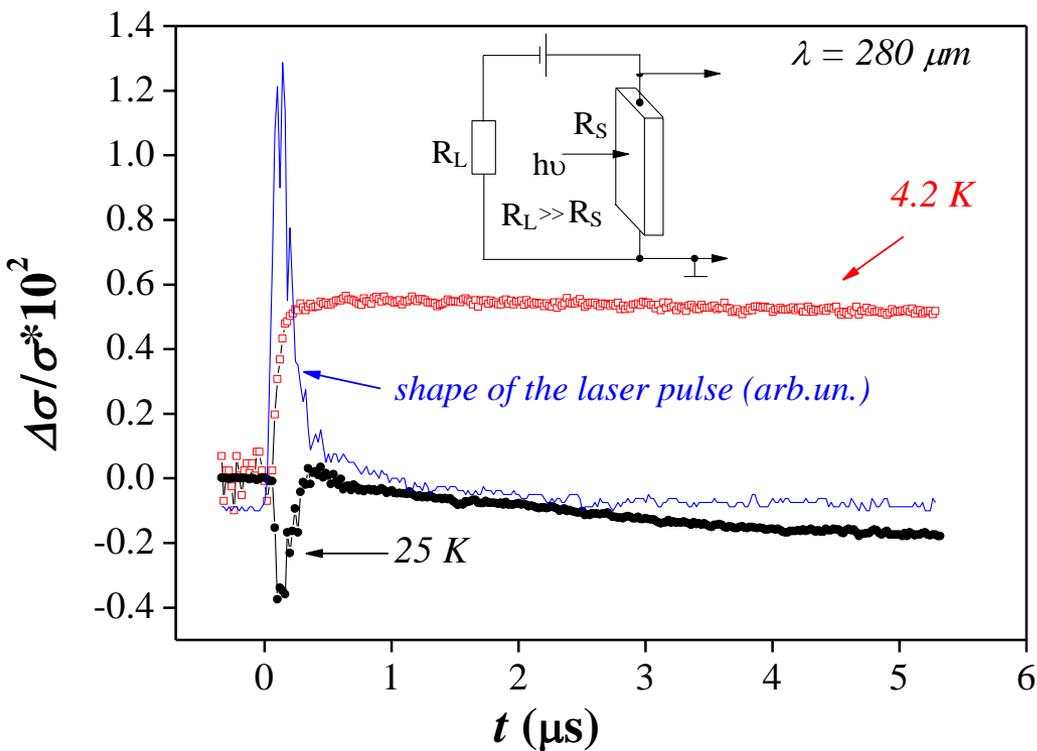
- Длины волн лазера:  
90, 148, 280, 496  $\mu\text{m}$
  - Длительность импульса: 100 ns
  - Мощность в импульсе: до 30 kW
  - Температура образца: 4.2 – 300 K
-

# Состав исследованных образцов



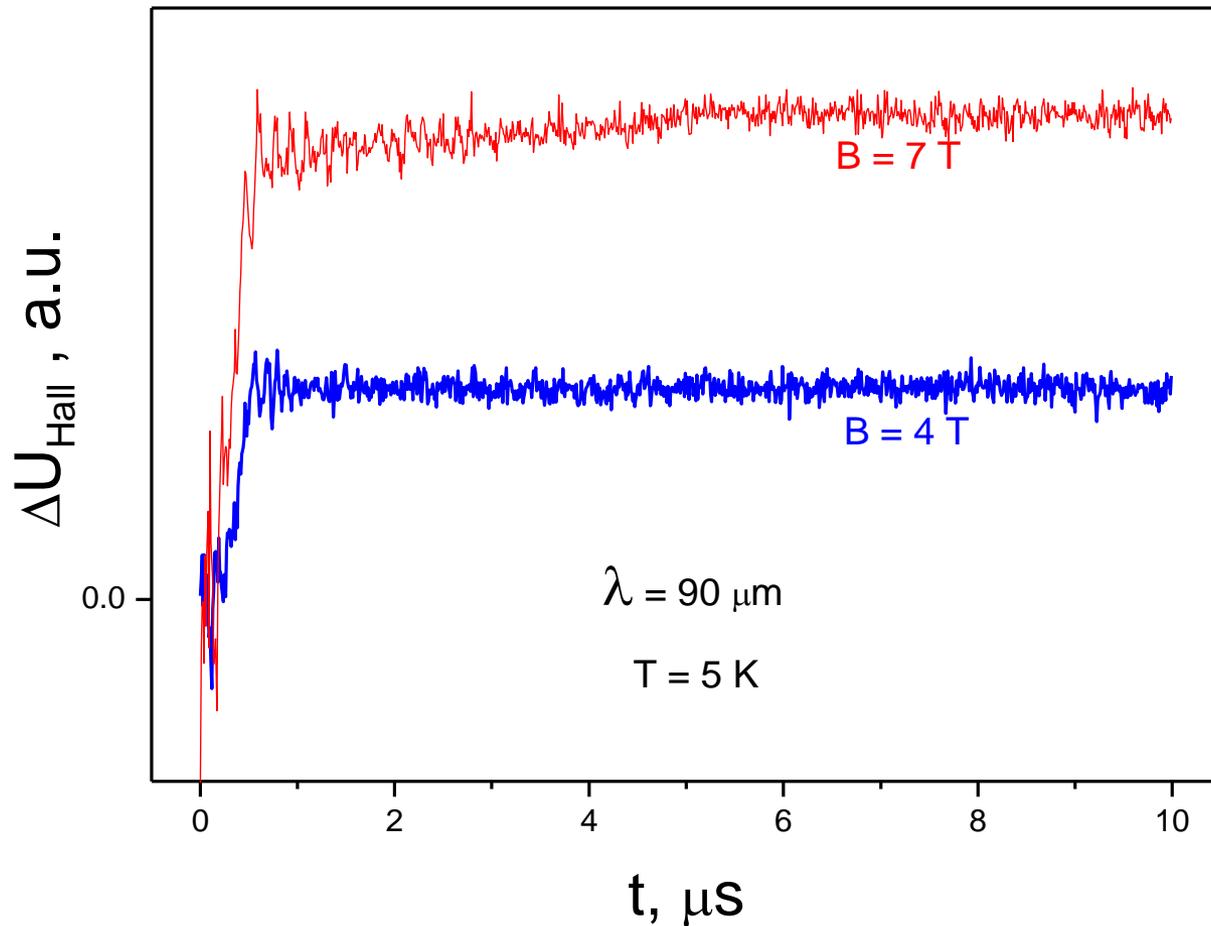
# Кинетика фотопроводимости в $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}(\text{In})$

D.Khokhlov, L.Ryabova, A.Nicorici,  
V.Shklover, S.Ganichev, S.Danilov,  
and V. Bel'kov,  
*Appl. Phys. Lett.*, **93**, 264103 (2008)



Временной профиль лазерного импульса и кинетика фотопроводимости при различных температурах

# Измерения фото-эффекта Холла при лазерном возбуждении

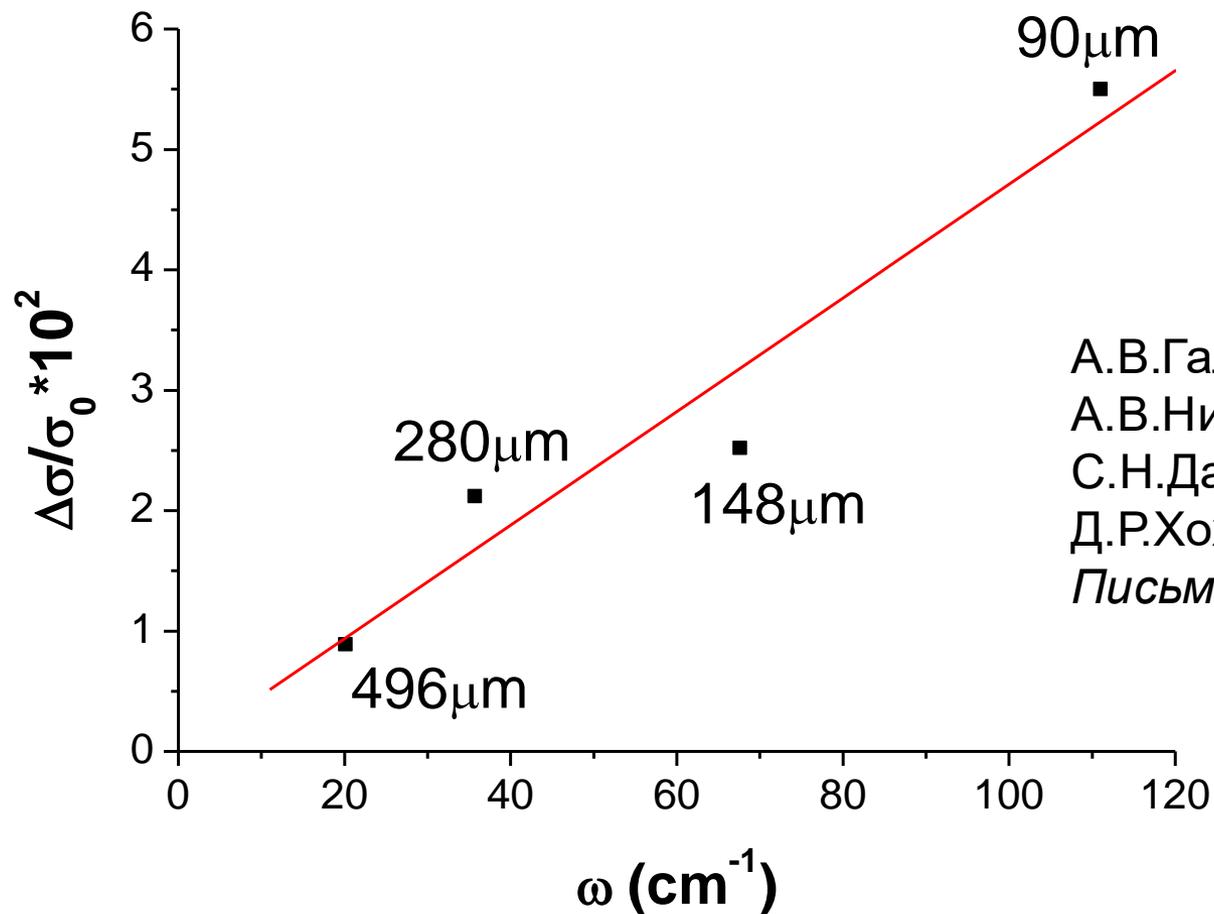


---

# Механизмы фотопроводимости

- Отрицательная фотопроводимость: разогрев электронного газа, изменение подвижности электронов
  - Положительная фотопроводимость: генерация неравновесных электронов с локальных метастабильных состояний, изменение концентрации электронов
-

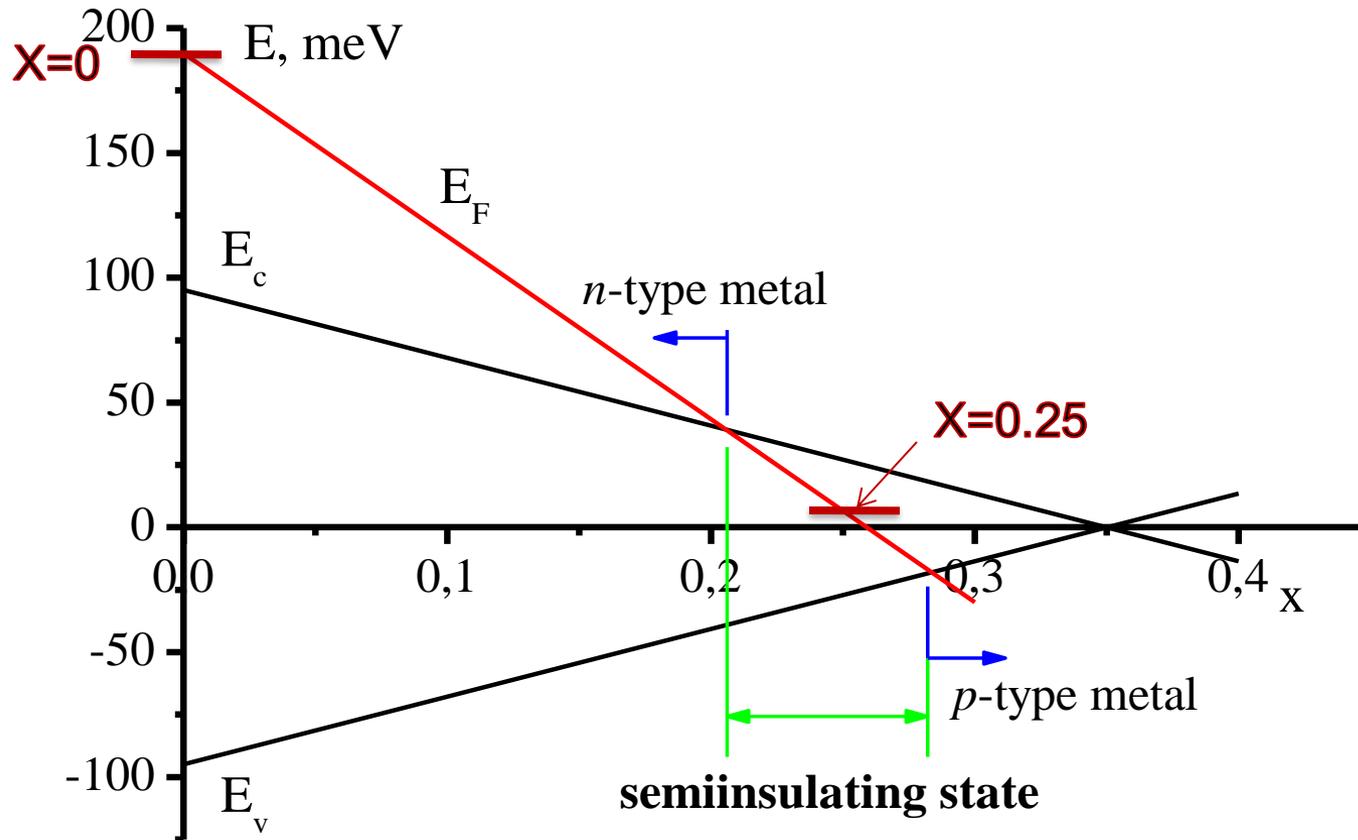
# Зависимость фотоотклика от длины волны излучения



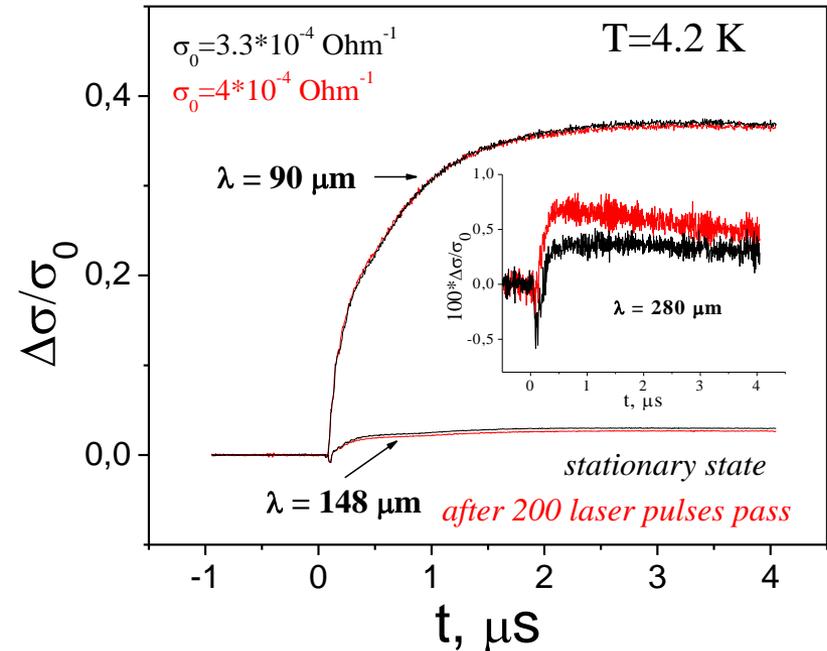
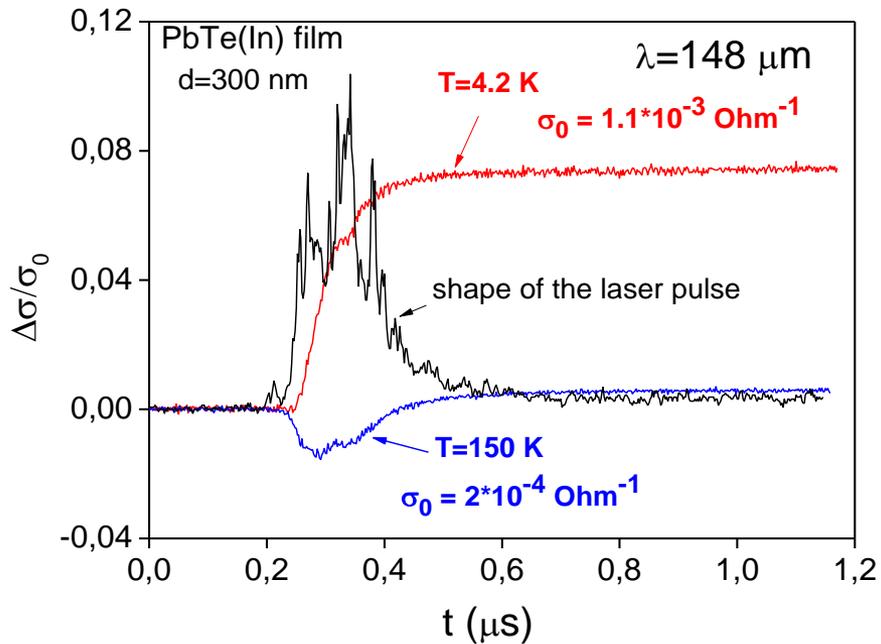
А.В.Галеева, Л.И.Рябова,  
А.В.Никорич, С.Д.Ганичев,  
С.Н.Данилов, В.В.Бельков,  
Д.Р.Хохлов,  
*Письма в ЖЭТФ*, **91**, 37 (2010)

$$N_{qu} = 8.7 \cdot 10^{-24} \text{ s}^{-1}$$

# Состав исследованных образцов

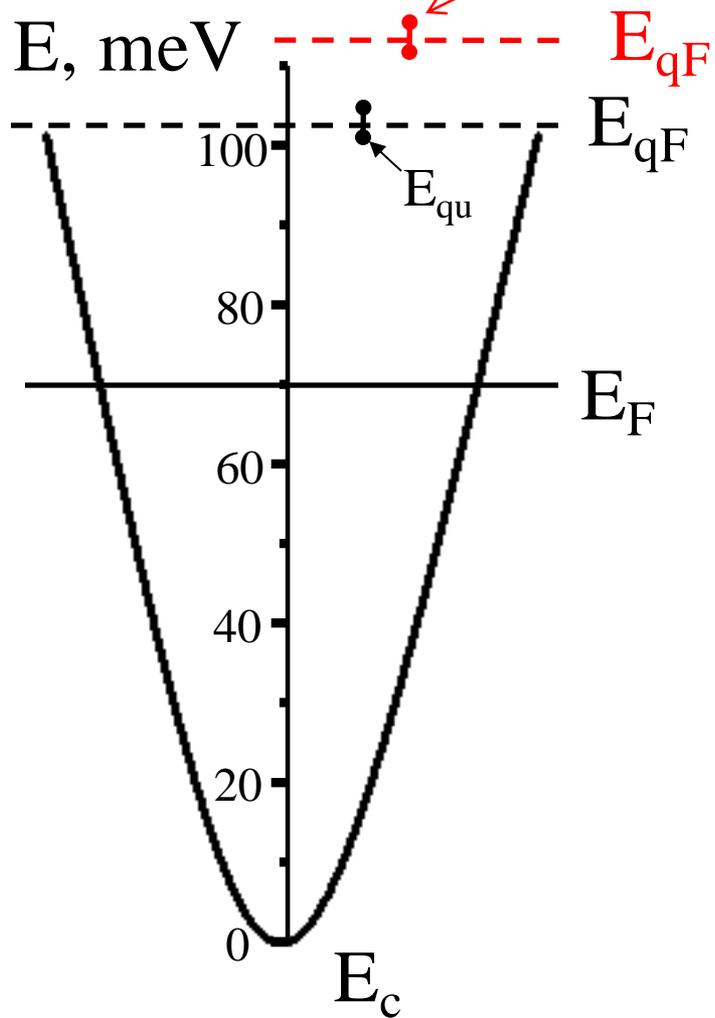


# Кинетика терагерцовой фотопроводимости в PbTe(In)

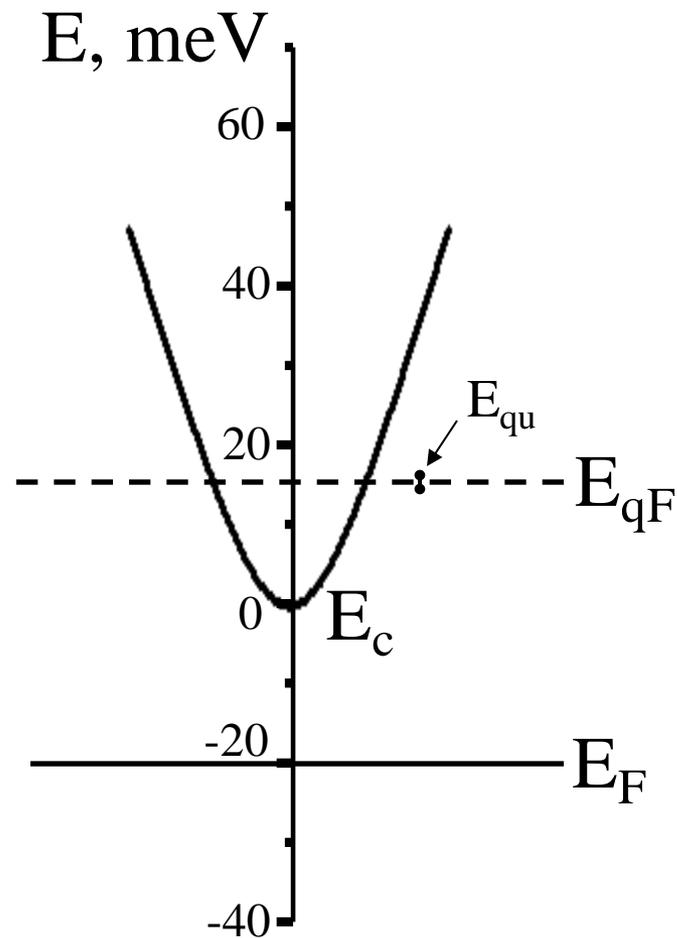


V.Chernichkin, A.Dobrovolsky, V.Kasiyan, A.Nicorici, S.Danilov,  
L.Ryabova, Z.Dashevsky, D.Khokhlov. *Europhys. Lett.*, **100**, 17008 (2012)

# PbTe(In)



# Pb<sub>0.75</sub>Sn<sub>0.25</sub>Te(In)



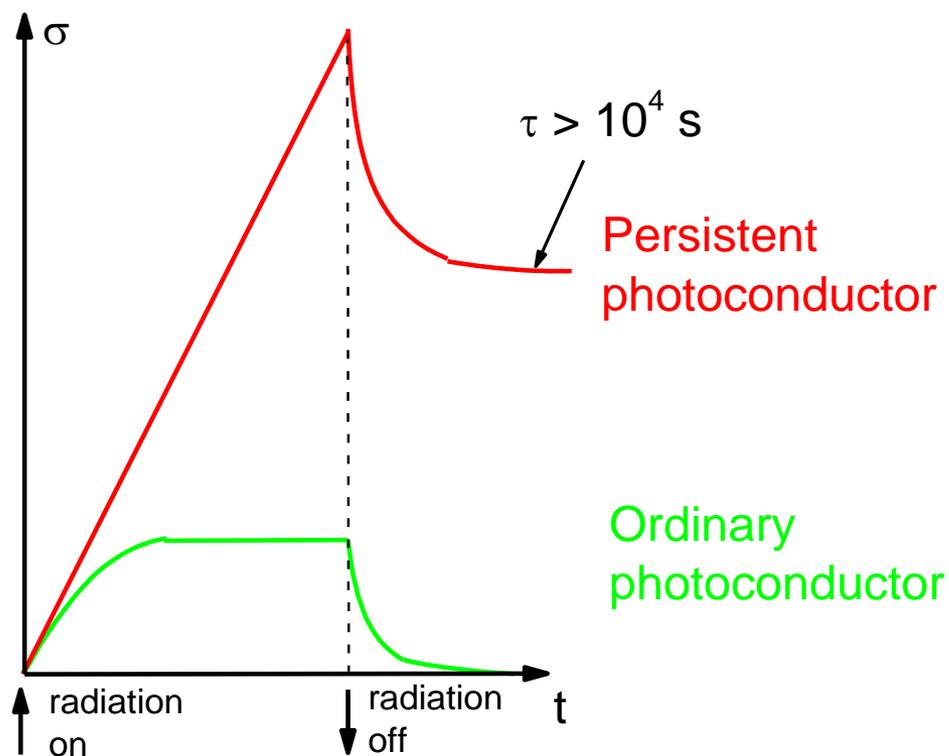
---

# Новый тип локальных электронных состояний в полупроводниках

Обнаружен новый тип локальных электронных состояний, «привязанных» не к определенному месту в энергетическом спектре полупроводника, а к положению квазиуровня Ферми, который может изменяться с помощью фотовозбуждения

---

# Низкофонный подход

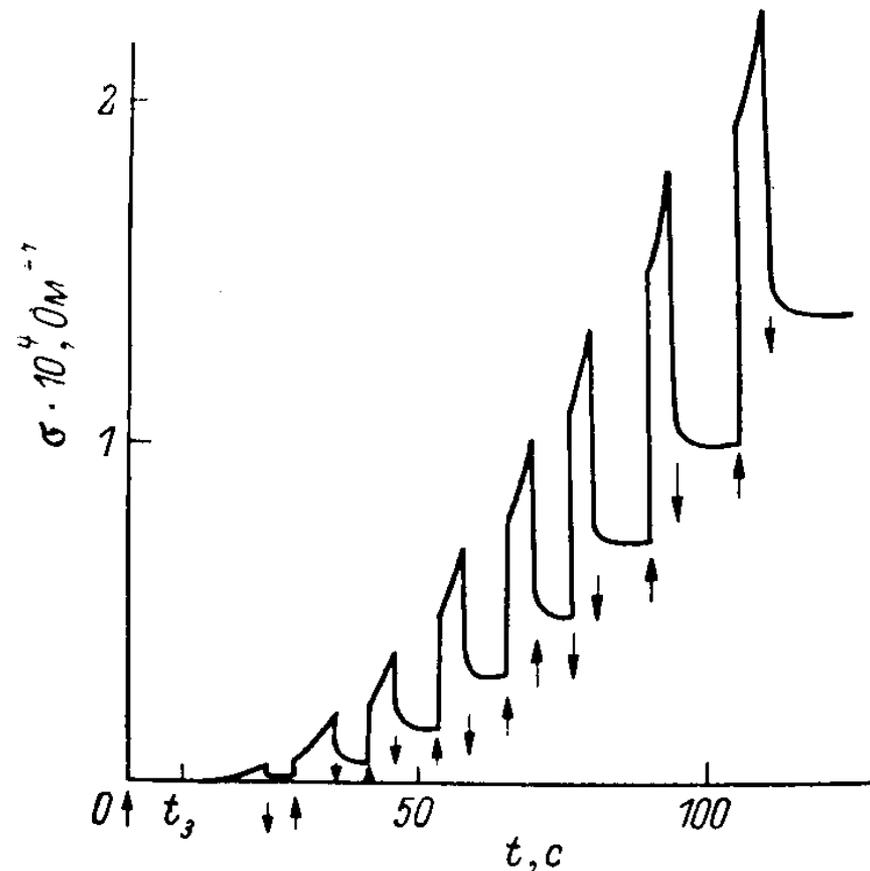
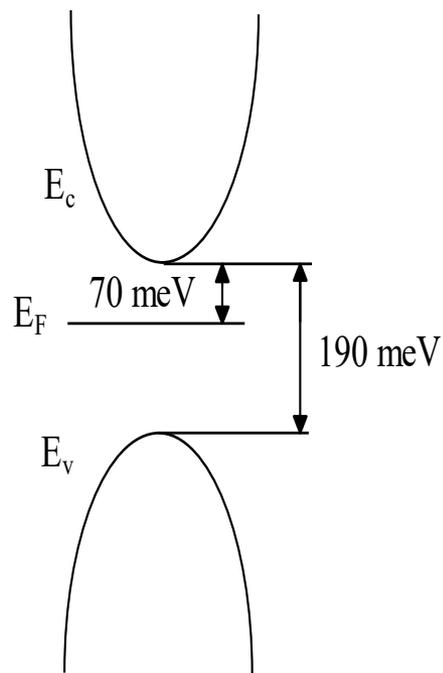


Интегрирование  
увеличивает  
отношение  
сигнал-шум

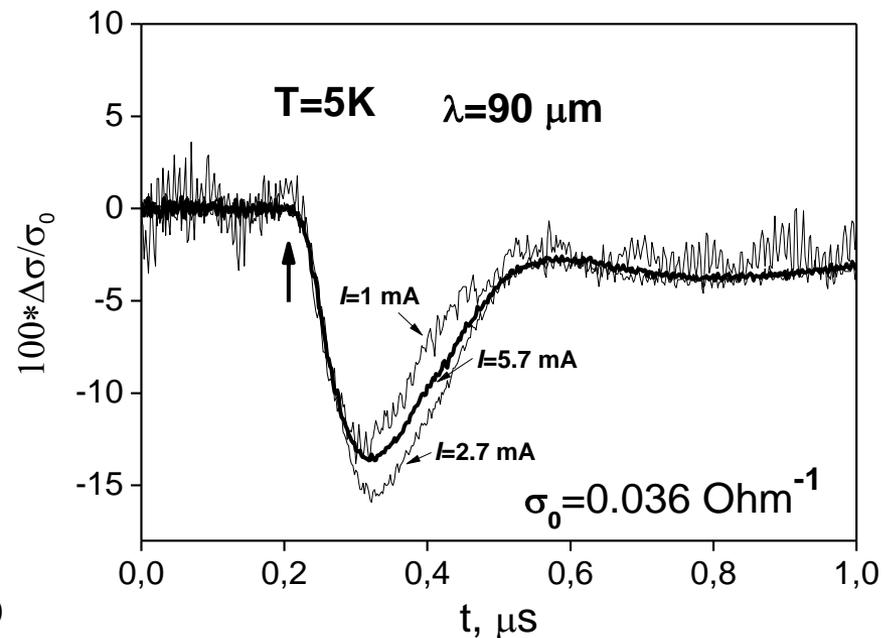
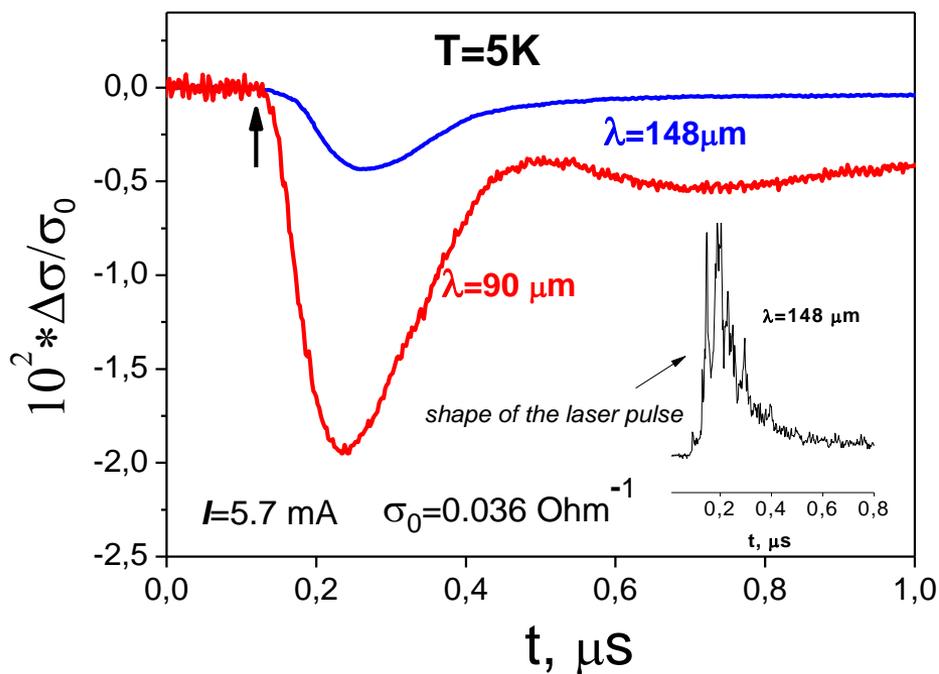
**НО**

Важно уметь быстро  
гасить  
задержанную  
фотопроводимость

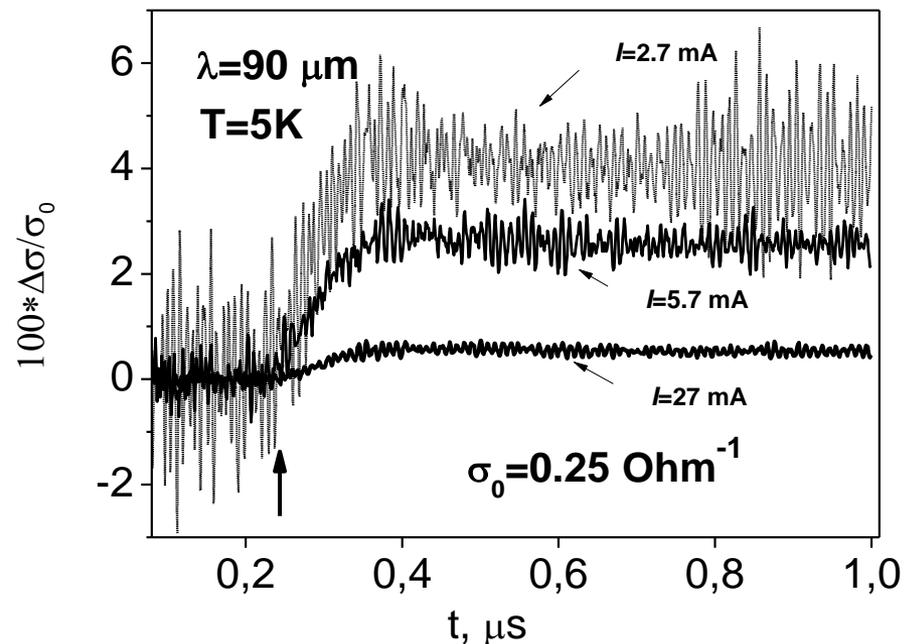
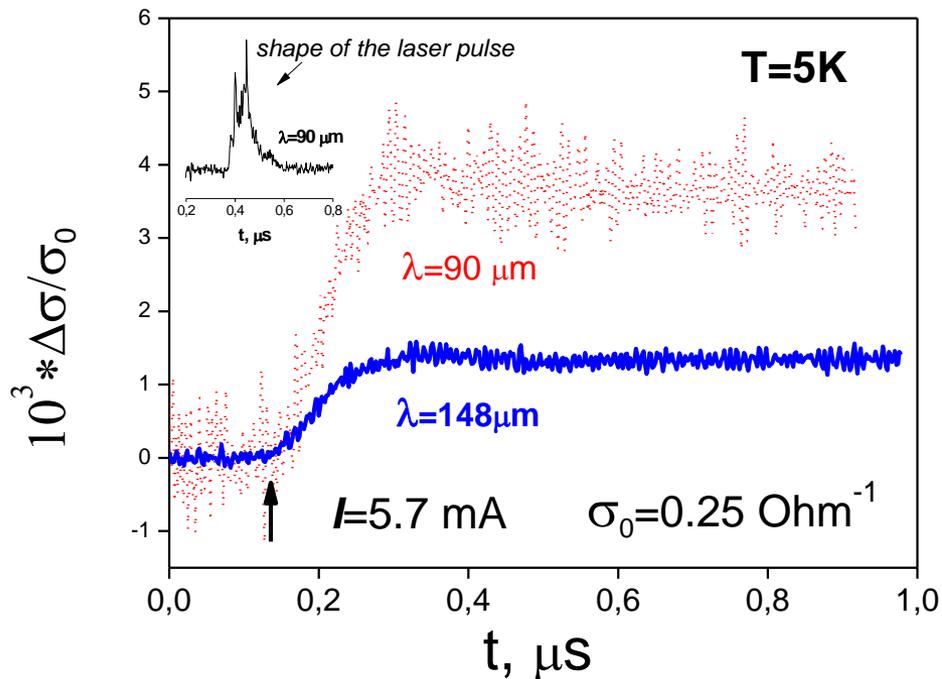
# Иллюстрация: кинетика фотопроводимости в PbTe(Ga)



# Кинетика фотопроводимости в PbTe(Ga) при слабом возбуждении



# Кинетика фотопроводимости в PbTe(Ga) при сильном возбуждении



---

# Локальные электронные состояния, отвечающие за терагерцовый фотоотклик

- в  $\text{PbTe}(\text{Ga})$  ведут себя аналогично  $\text{PbTe}(\text{In})$
  - не возникают, когда уровень Ферми внутри щели, либо когда концентрация электронов мала
  - похоже, что зависят от плотности зонных состояний на уровне Ферми
-

---

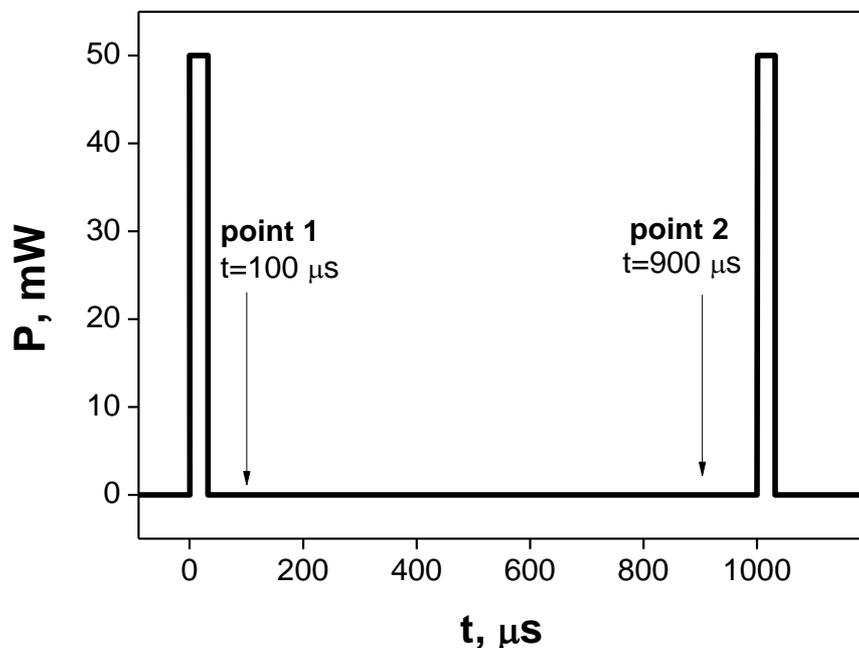
# Гашение задержанной фотопроводимости

- **1. Термическое гашение:** нагрев до 25 К и последующее охлаждение: слишком медленный процесс
  - **2. Радиочастотное гашение :**  
приложение радиочастотных импульсов к образцу  
 $f = 50\text{-}200$  МГц,  $P < 10$  мВт,  
 $\Delta t = 100$  нс
-

# Механизм радиочастотного гашения: эксперимент

Освещение на длине волны 200  $\mu\text{m}$

Проводимость измерялась в точке 1 (100  $\mu\text{s}$  после импульса) и 2 (900  $\mu\text{s}$  после импульса)



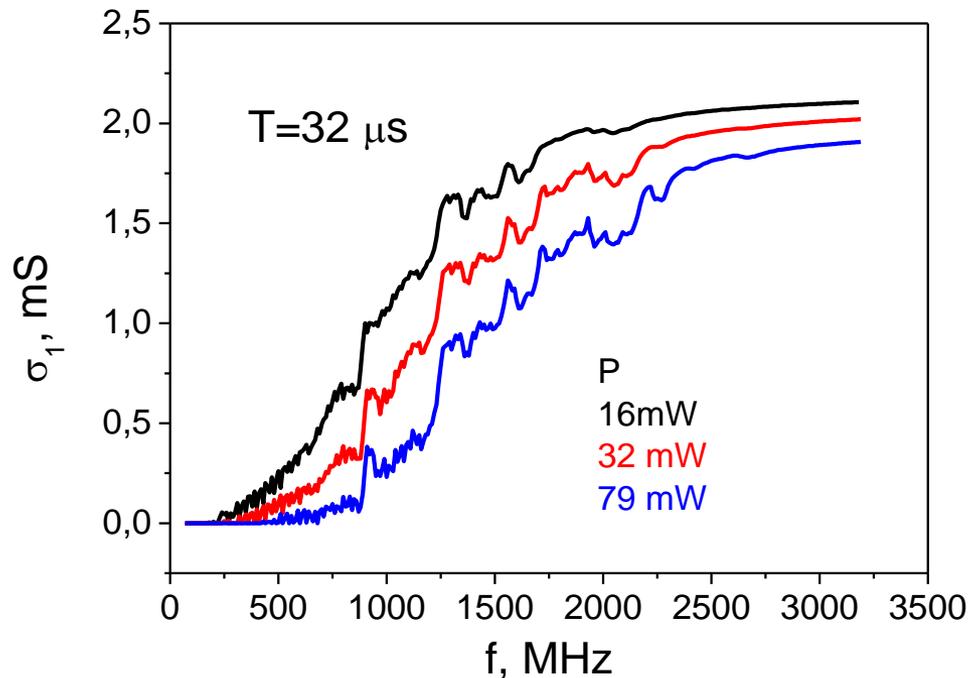
Измеряемые величины:

$$\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad (\sigma_2 - \sigma_1) / \sigma_1$$

как функция

- радиочастоты в импульсе  $f$  (70 MHz-3 GHz)
- длительности импульса  $\Delta t$  (1-64  $\mu\text{s}$ )
- мощности в импульсе  $P$  (до 70 mW)

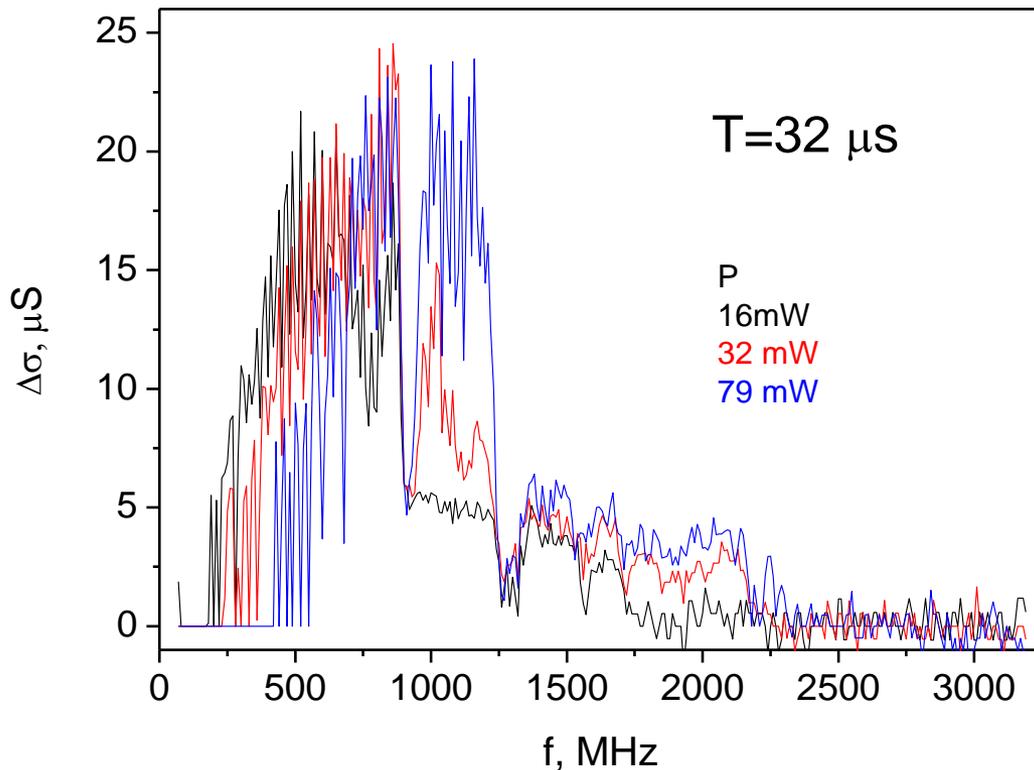
# Зависимость «уровня прогашивания» от радиочастоты



Гашение наиболее эффективно на низких радиочастотах

Эффективность гашения растет с увеличением мощности в импульсе

# Зависимость $\Delta\sigma$ от радиочастоты $f$



«Слишком эффективное»  
гашение на низких частотах  
ведет к уменьшению  
фотоотклика!

На высоких частотах  
фотоотклик также уменьшается

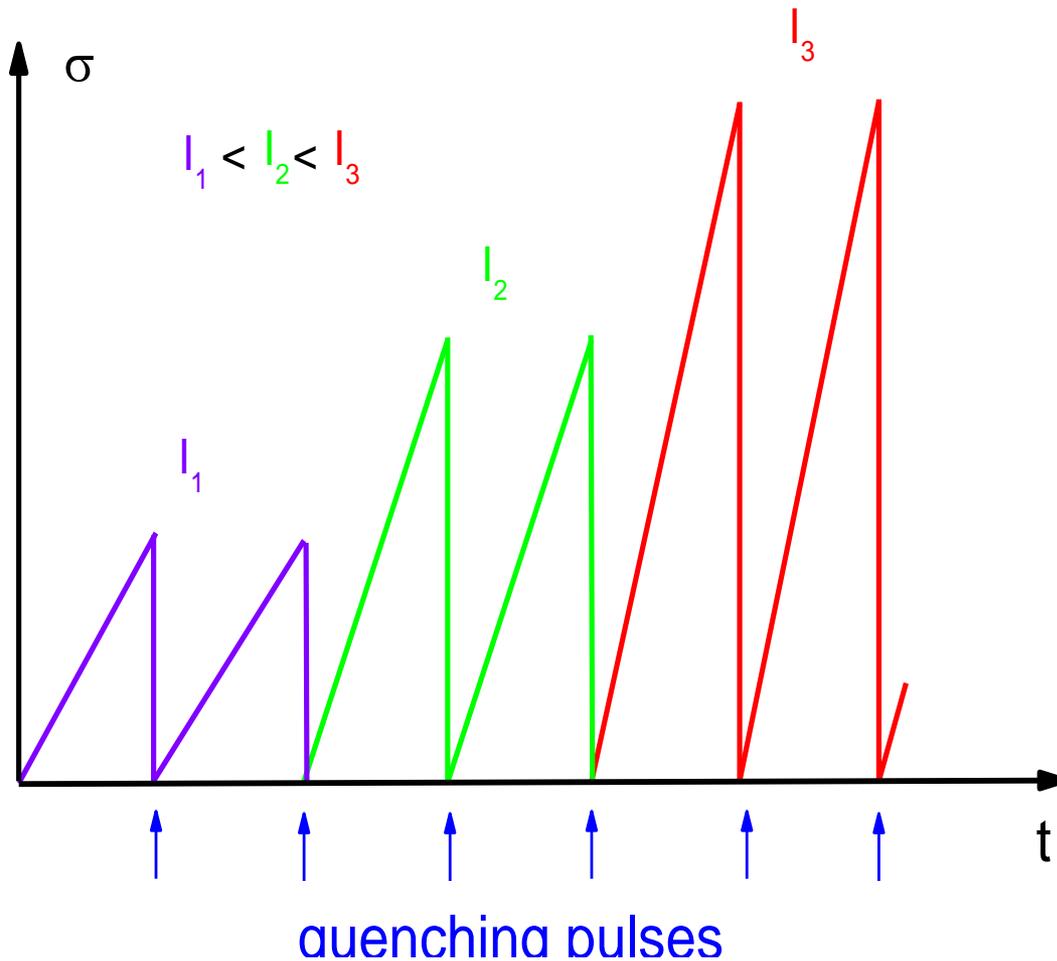
Существует оптимальная  
по частоте область  
радиочастотного гашения

---

## Выводы о механизмах гашения

- Термический механизм исключается
  - Механизм, связанный с разогревом электронного газа, вероятен
  - При уменьшении радиочастоты, увеличении мощности или длительности импульса эффективность гашения растет
  - В то же время легко разрушить «фоточувствительное состояние», если импульс гашения «слишком эффективен»
-

# Принцип действия приемника излучения



Предварительные  
оценки:

$$T = 4.2 \text{ K}$$

$$\lambda = 350 \text{ мкм}$$

$$\text{NEP} \sim 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$$

$$T = 1.6 \text{ K}$$

$$\lambda = 350 \text{ мкм}$$

$$\text{NEP} \sim 6 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$$

Чувствительность  
достаточна  
для построения  
системы пассивного  
терагерцового видения

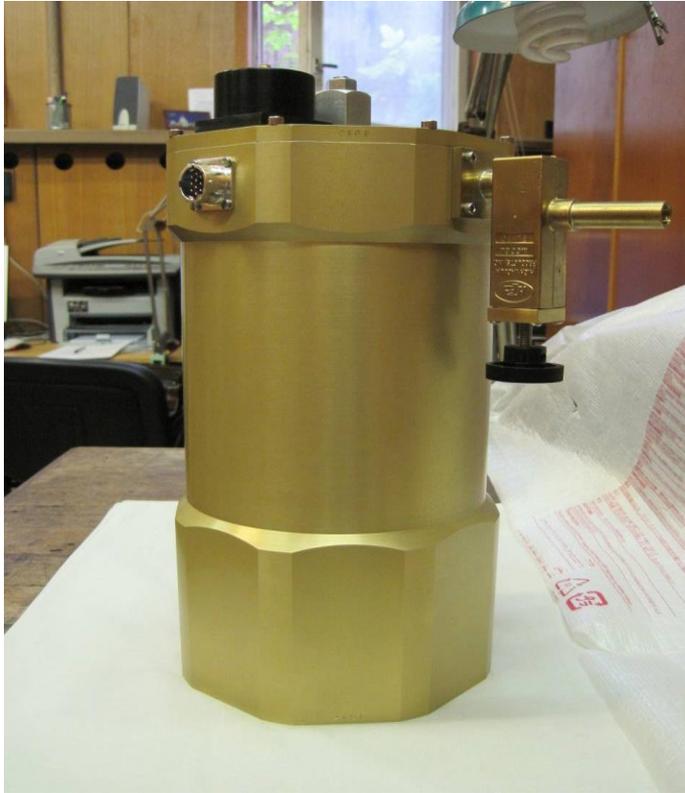
# Система пассивного терагерцового видения: оптико-механический сканер



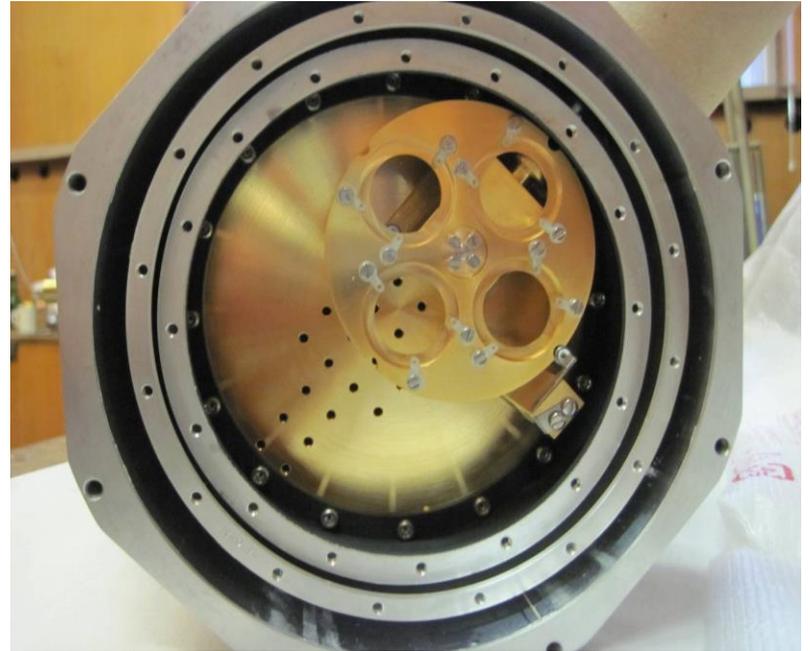
Кадр состоит из  
140\*140 пикселей:  
всего около  $2*10^4$

Время формирования  
кадра 40 с

# Детекторный блок

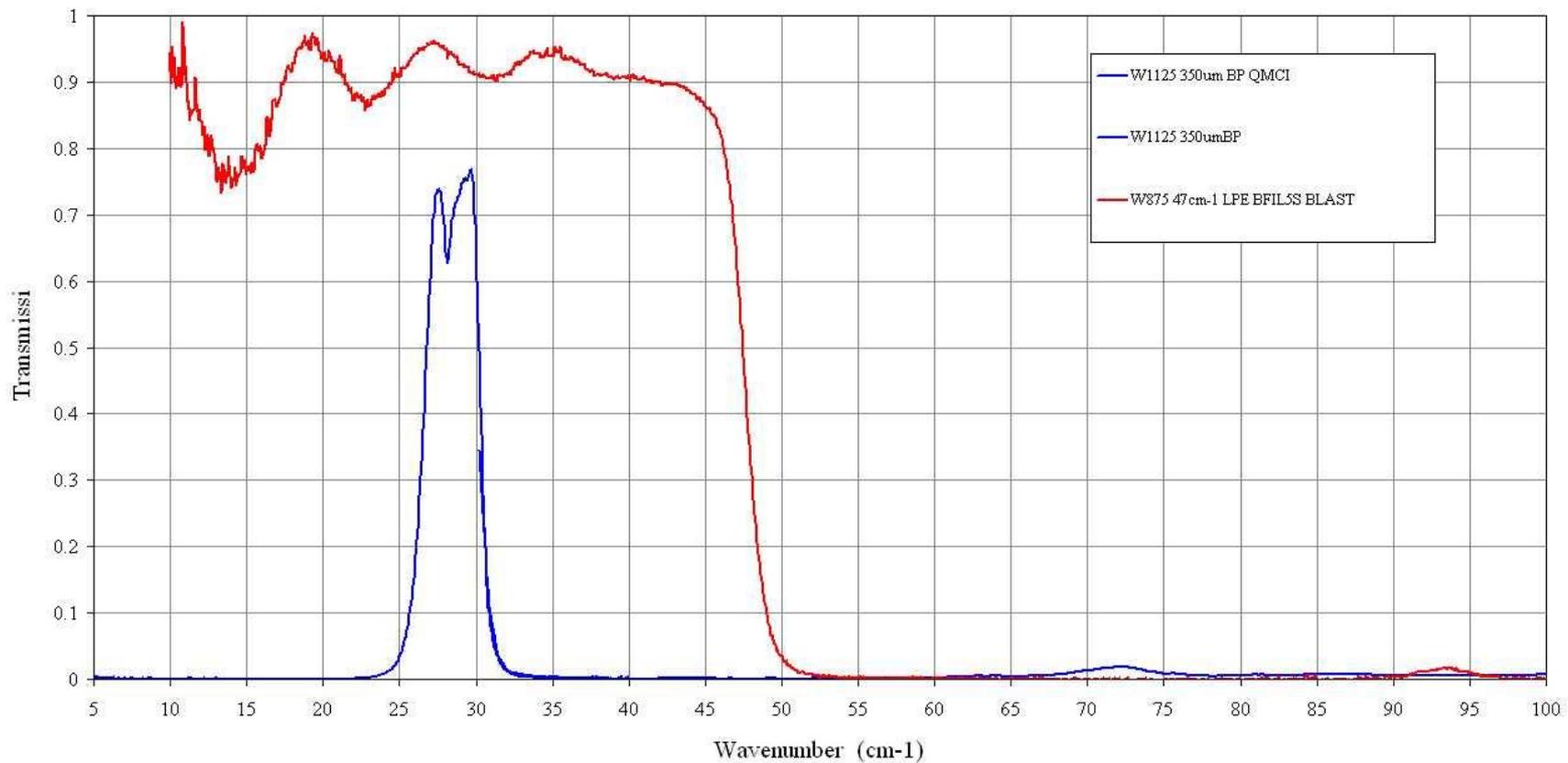


Модифицированный сосуд  
Дьюара IrLabs HDL-5



4 сменяемых холодных фильтра,  
1-открыто, 2-закрыто, 3,4-фильтры

# Спектры пропускания холодных фильтров



---

## Направление дальнейших исследований

- Разработка линеек и матриц фотоприемников
  - Разработка перестраиваемых терагерцовых фильтров
  - Разработка систем пассивного терагерцового видения для медицинских приложений
  - Исследование возможностей применения в космических обсерваториях
-

# Наша замечательная группа

