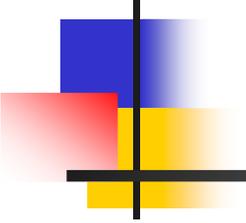


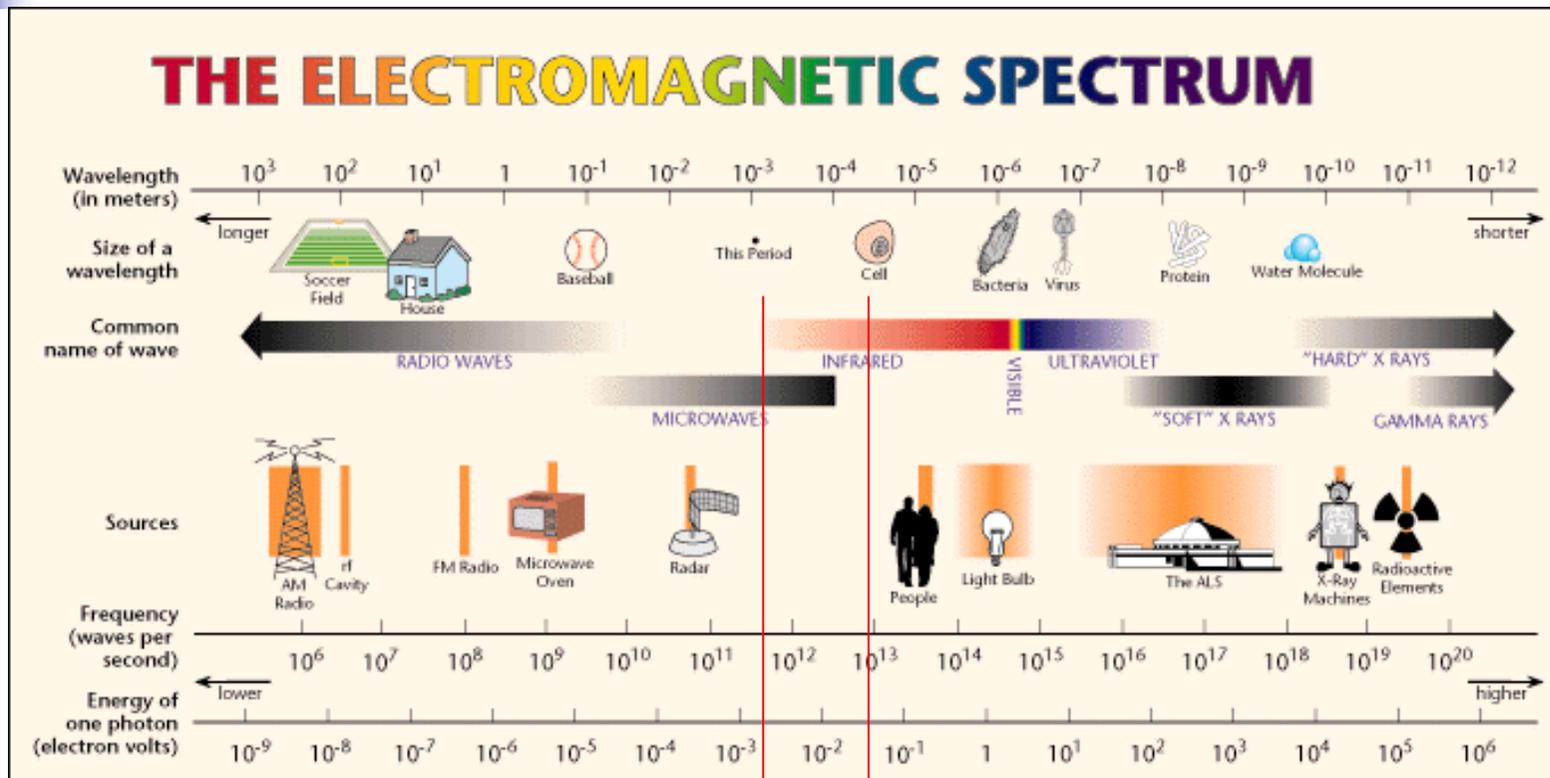
Терагерцовое излучение. Физика и возможности применения



Д.Р.Хохлов

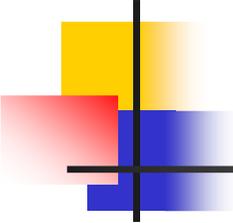
*Московский государственный
университет им. М.В.Ломоносова*

Спектр электромагнитного излучения



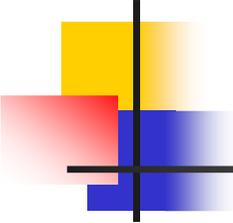
«Терагерцовая щель»





Терагерцовое излучение

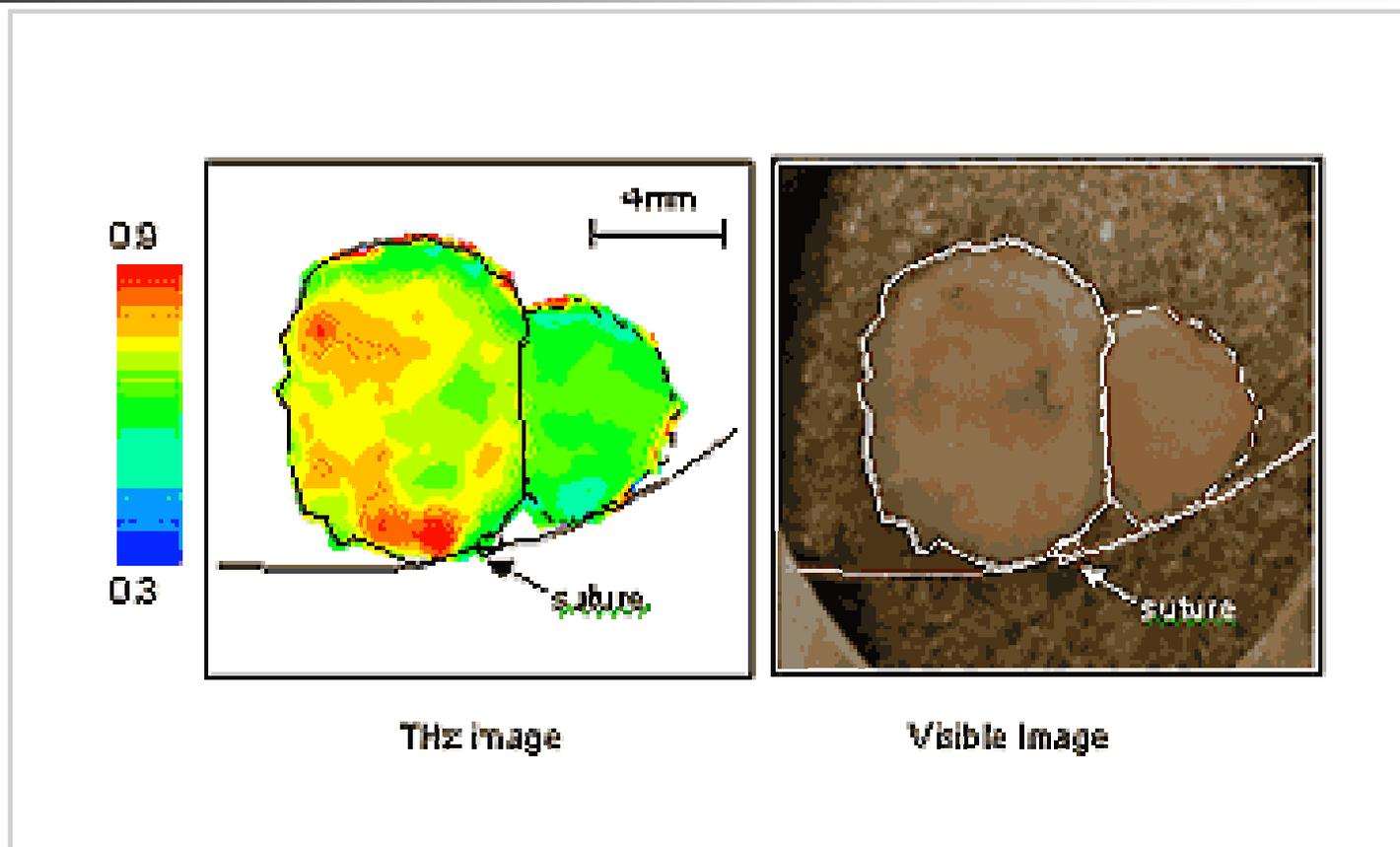
- В данной спектральной области плохо работают как радиофизические методы (со стороны длинных волн), так и оптические методы (со стороны коротких волн)
- Следствие: отсутствие хороших источников и чувствительных приемников излучения



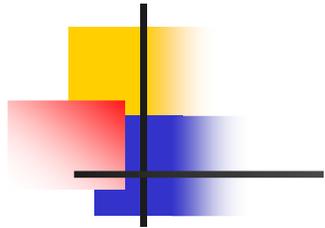
Области применения терагерцового излучения

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

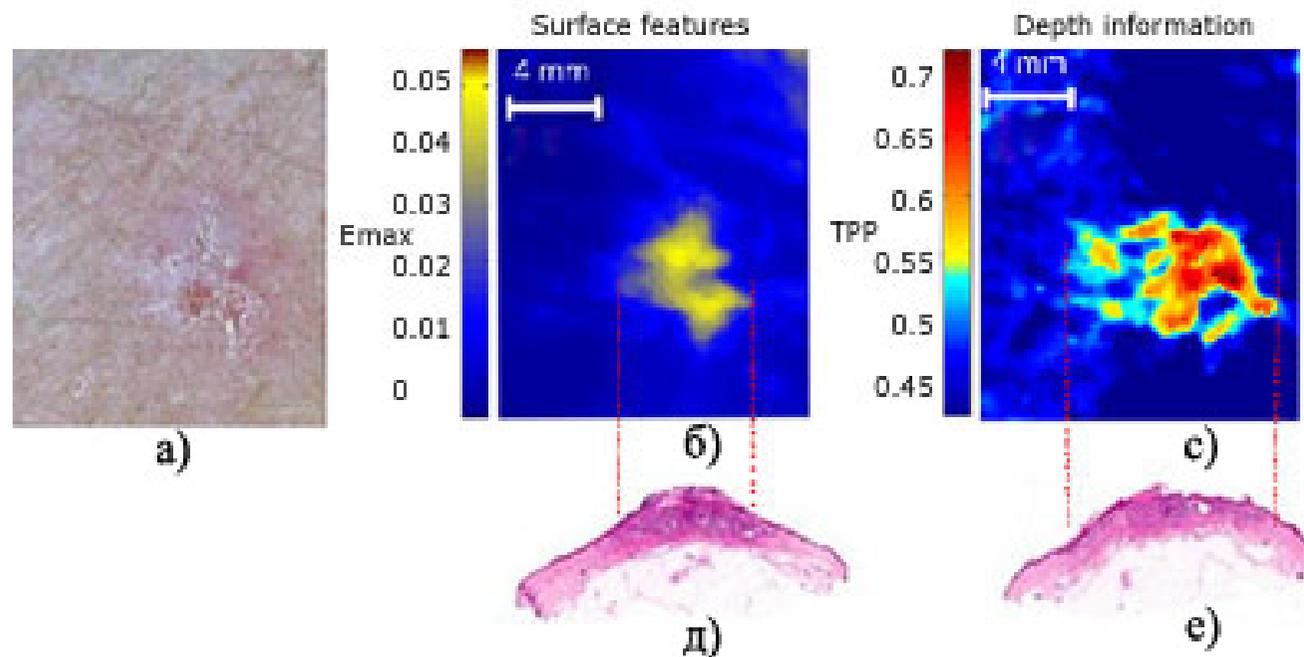
Медицинские приложения



Картина раковой опухоли в терагерцовом и в видимом диапазоне



Медицинские приложения



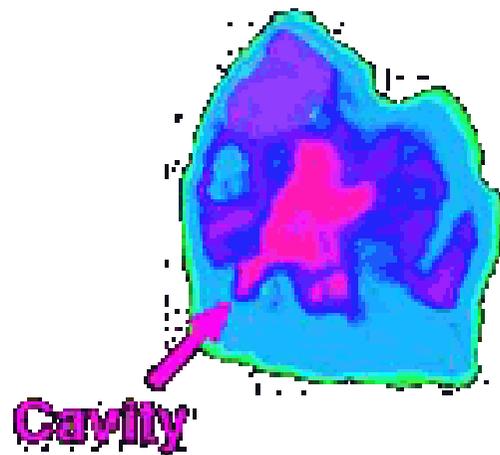
Базально-клеточный рак кожи (базалиома)

Медицинские приложения

Visible image
of human tooth

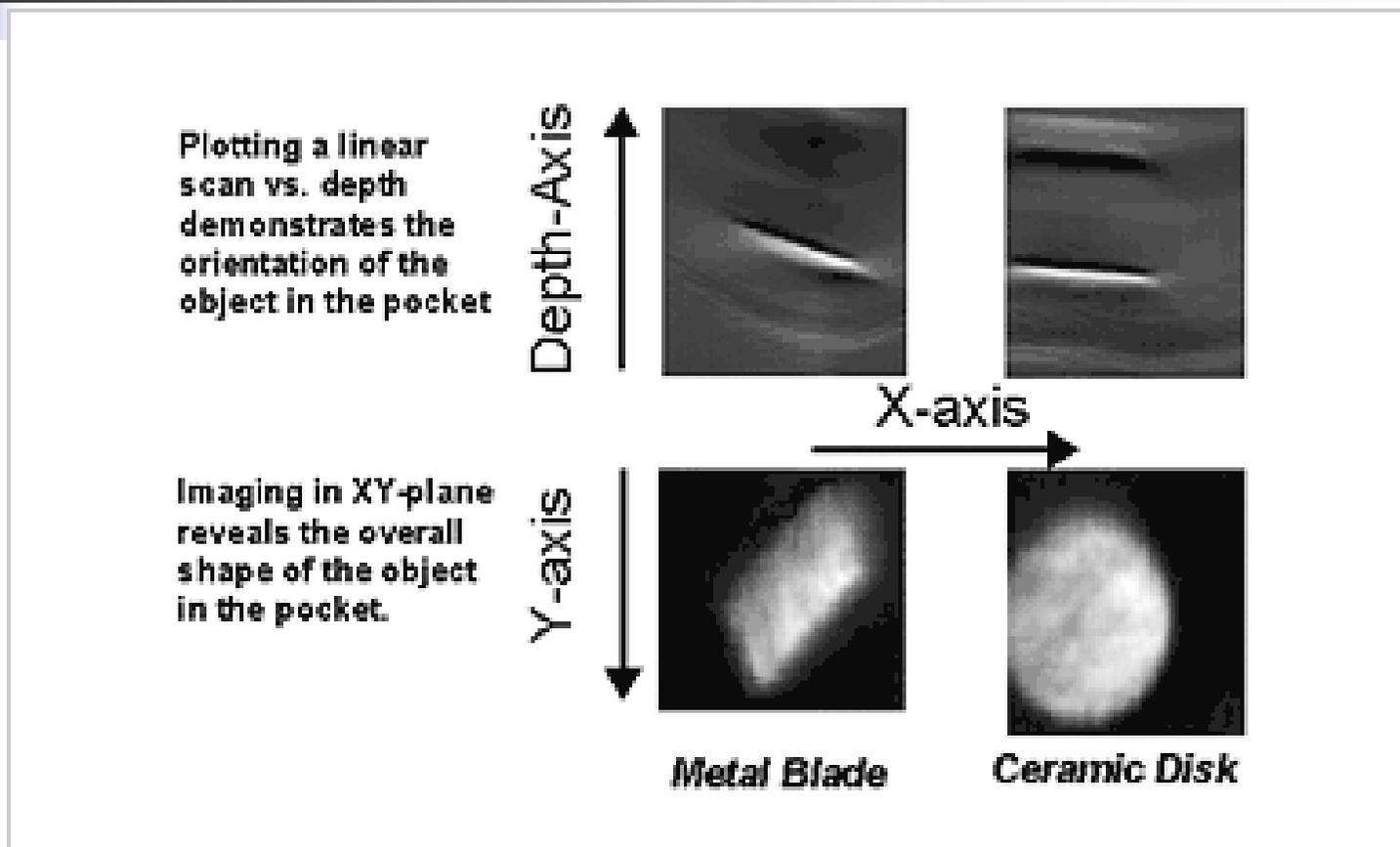


Terahertz image of
cavity in human tooth



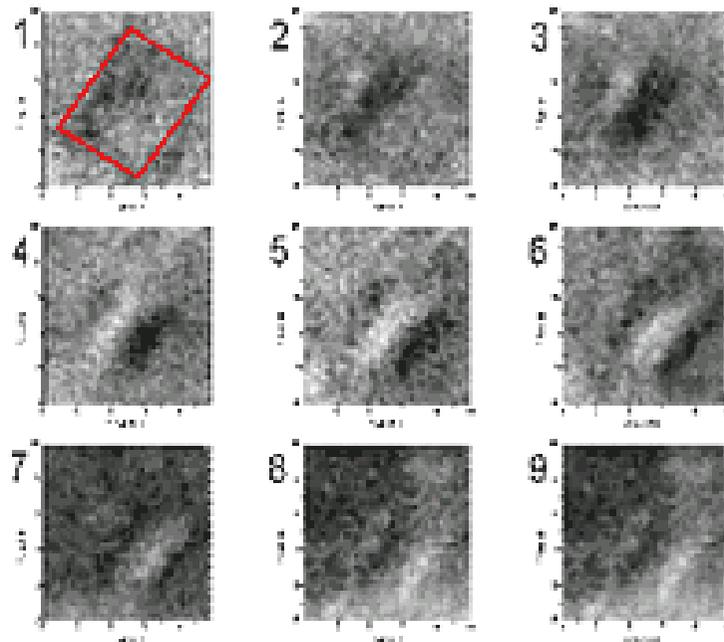
Человеческий зуб с внутренним кариесом
в видимом и терагерцовом диапазоне

Системы безопасности



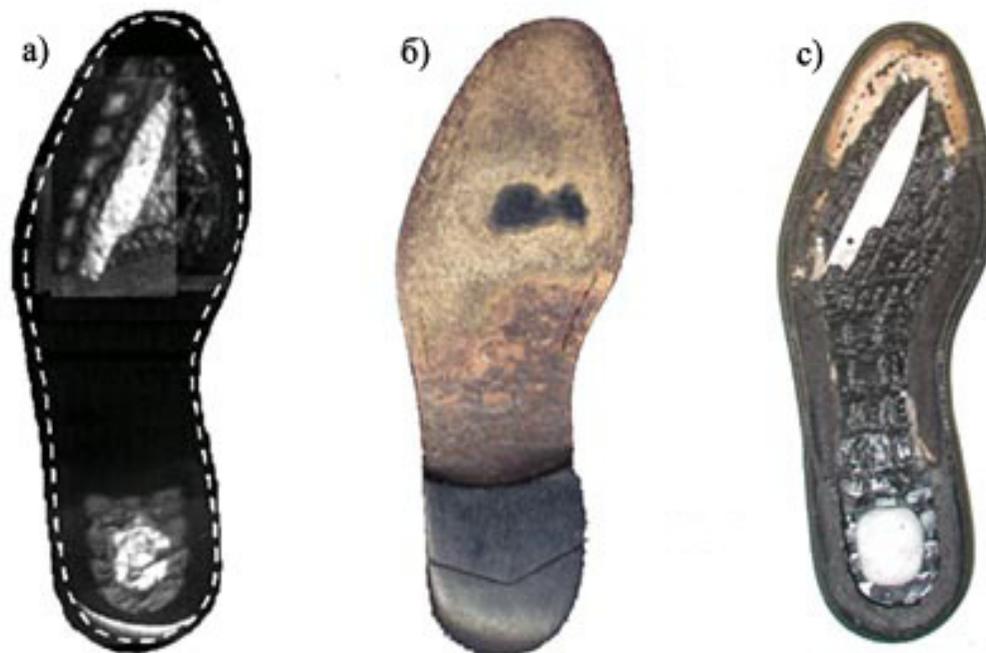
Металлическая пластина и керамический диск в кармане куртки,
вид в анфас и профиль в терагерцовом диапазоне

Системы безопасности



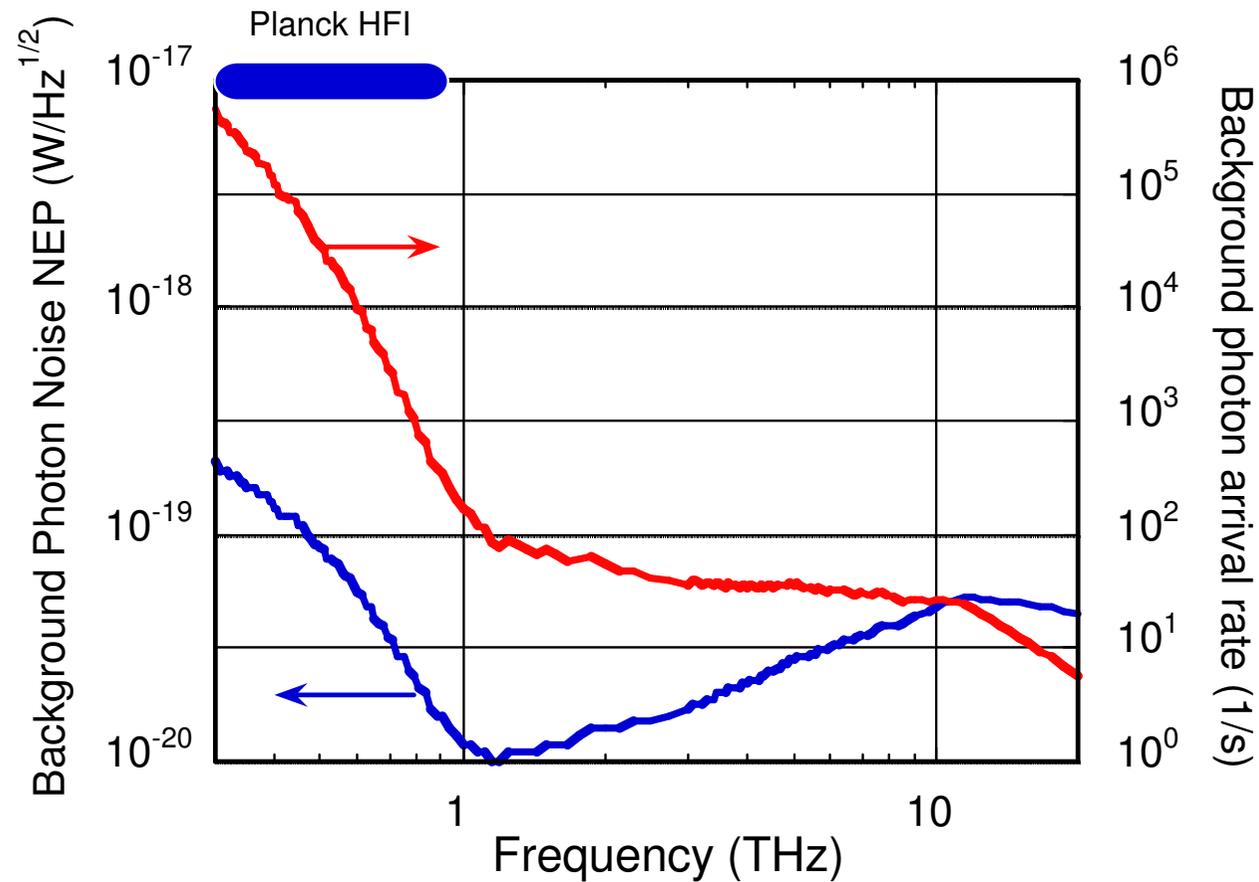
Полиэтиленовая коробка, зарытая в песок,
картинки в терагерцовом диапазоне

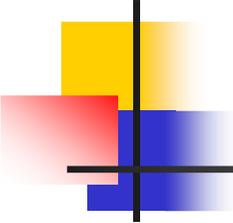
Системы безопасности



Ботинок, в подошве которого спрятан
керамический нож и пластичная взрывчатка
Семтекс

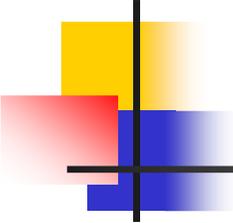
Терагерцовая астрономия





Обсерватория “Миллиметрон”

- Совместный проект Европейского космического агентства и Российского космического агентства
- 12-метровая антенна, охлажденная до 10 К
- Несколько диапазонов длин волн включая гига- и терагерцовый
- Дата выведения на орбиту 2017-2018



Астероидная опасность

Максимум спектральной плотности
излучения абсолютно черного тела

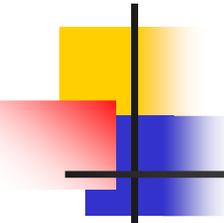
$$\lambda(\mu\text{m})=3000/T(\text{K})$$

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

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

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

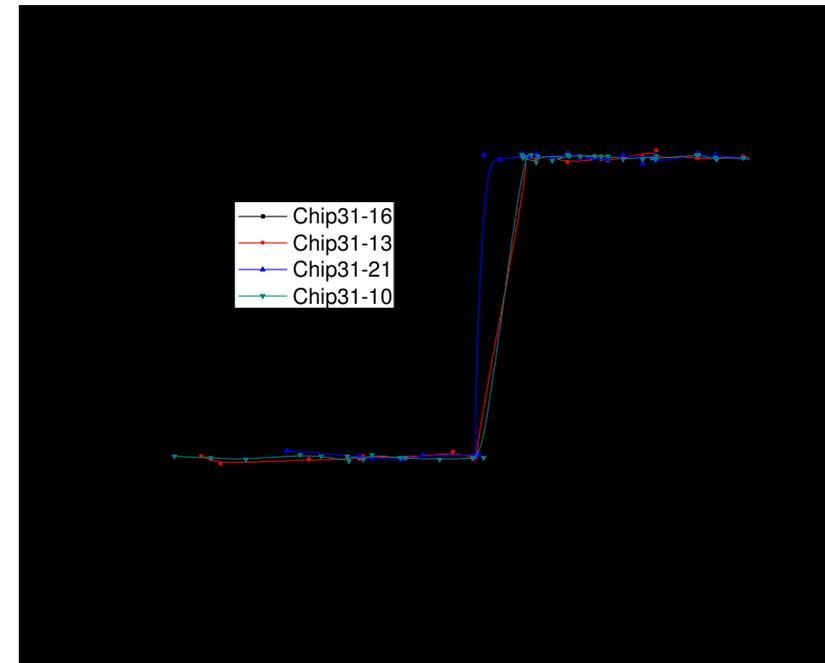
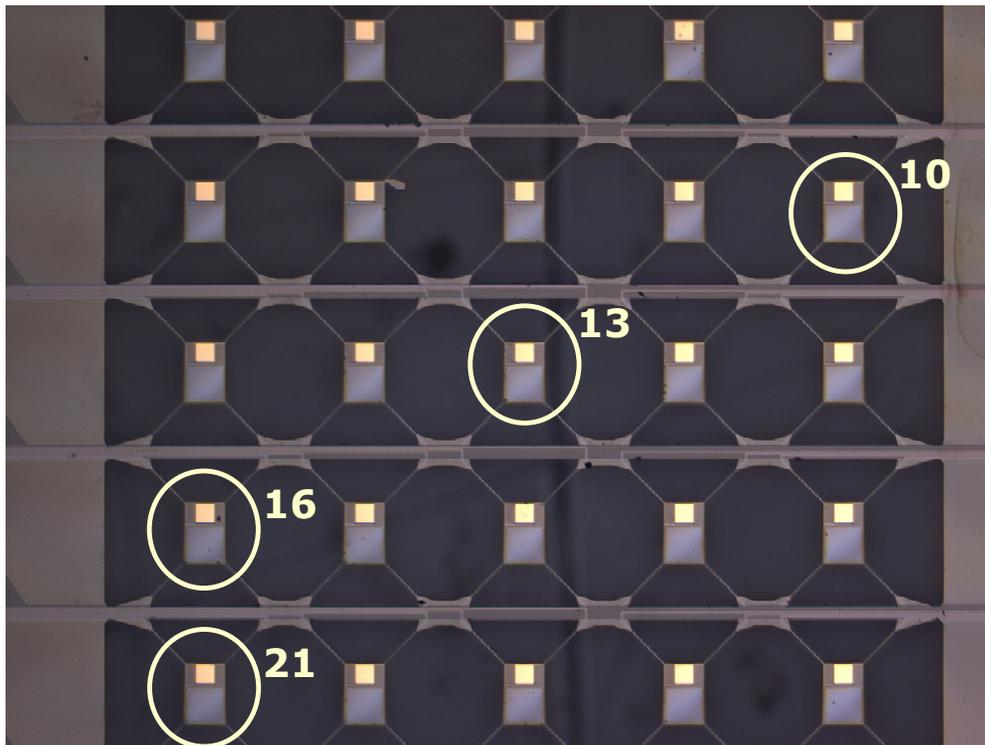
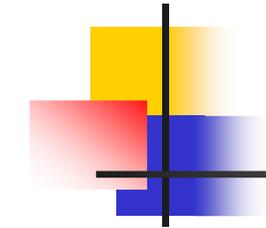
→ $\nu=1\text{ THz}$ – Терагерцовый диапазон!



Существующие высокочувствительные детекторы терагерцового излучения

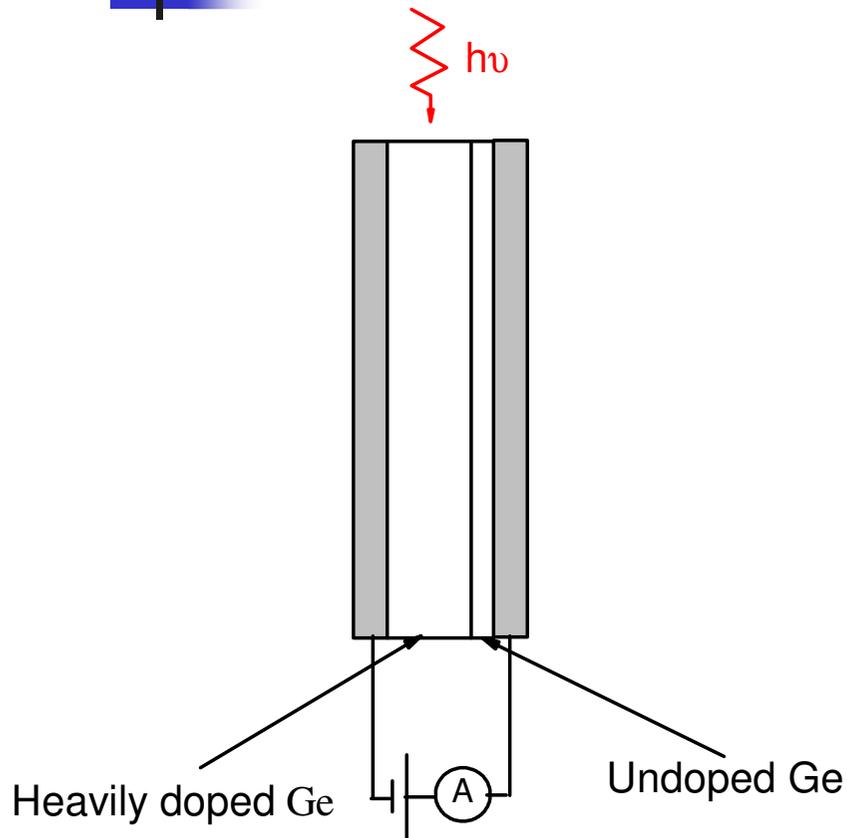
- Сверхпроводящие болометры (TES – Transition Edge Sensors)
- Детекторы с блокированной примесной полосой (BIB - Blocked Impurity Band detectors)
- Детекторы с кинетической индуктивностью (KID - Kinetic Inductance Detectors)

State of the art bolometers (Transition Edge Sensor)



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

Ge(Ga) blocked impurity band detectors



Blocked Impurity Band
BIB structures
based on doped
Si and Ge

The highest red cut-off
wavelength:
uniaxially stressed Ge(Ga)
 $\lambda = 220 \mu\text{m}$

Problem: the highest NEP achieved so far
 $10^{-16} \text{ W Hz}^{-1/2}$ at T well below 4.2 K

Principle of Kinetic Inductance Detector

(Courtesy of A. Baryshev)

Pair breaking detector

Superconductor $\sim L_{KIN}$ at $T < T_c/3$

$L_{KIN} \sim N_{qp} \sim$ power absorbed

Use L_{KIN} to measure absorbed power

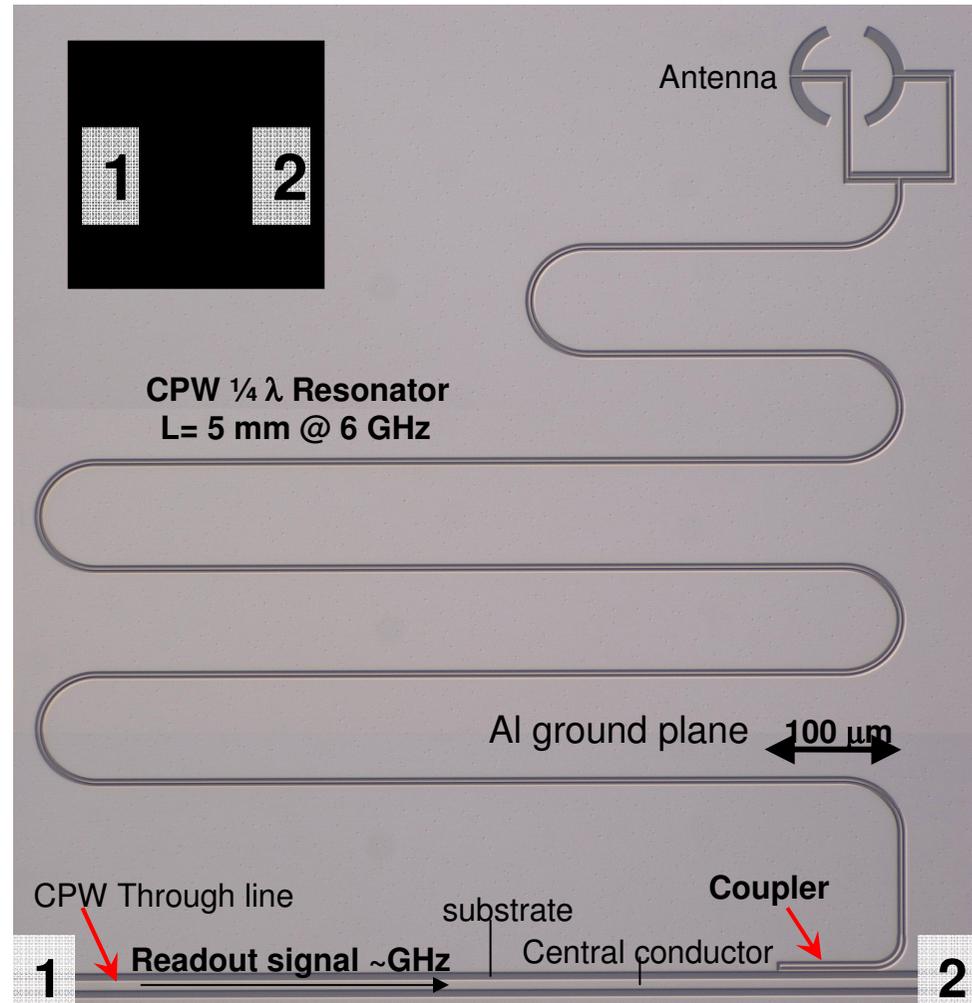
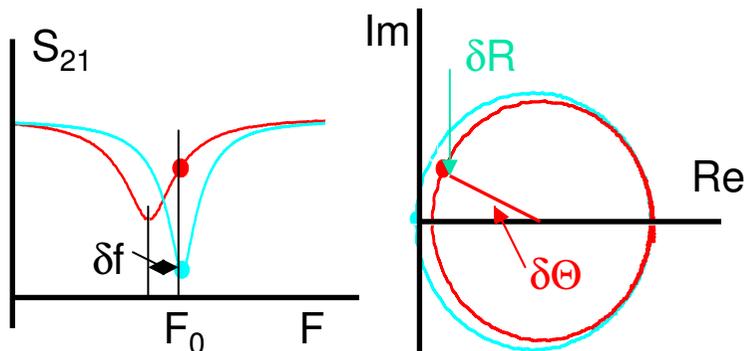
KID

a SC material in resonance circuit

read out at $F_0 \sim 4$ GHz

resonance feature is function of N_{qp}

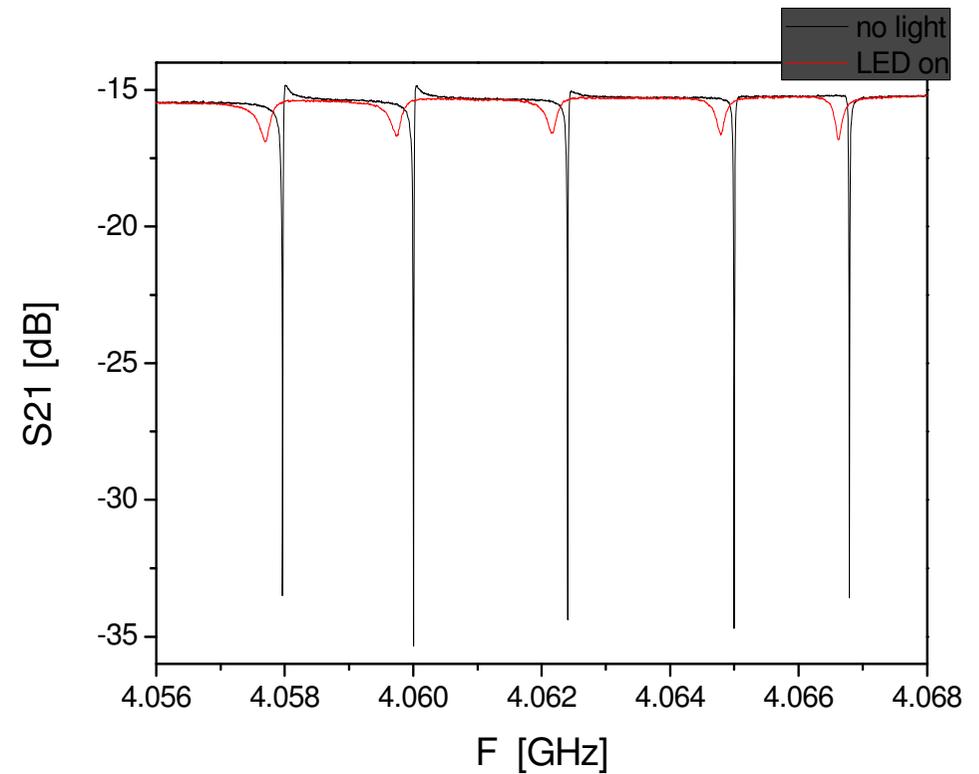
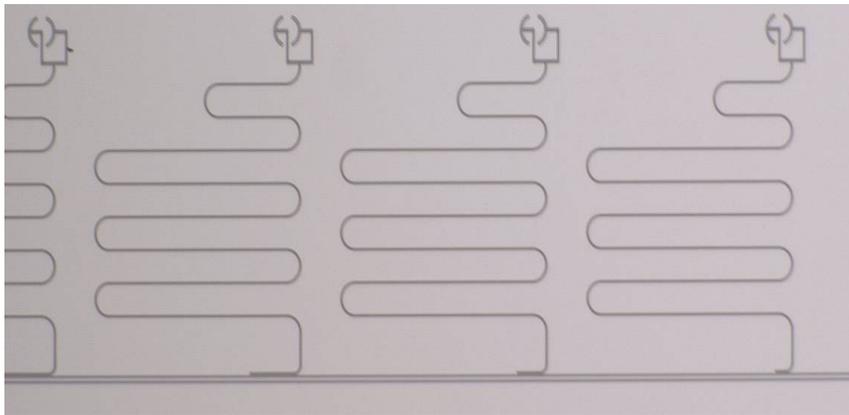
signal in S_{21} or R and θ

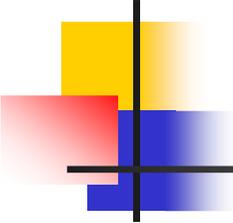


KID arrays for SPICA

Dark NEP = 10^{-18} W Hz^{-1/2}

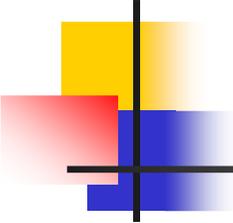
Resonances @ F_0
 F_0 set by geometry (length)





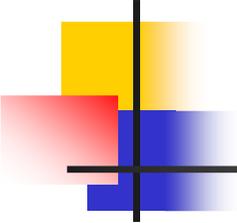
Проблемы (как я их вижу)

- Очень низкая рабочая температура < 150 мК
- Высокий коэффициент отражения сверхпроводников
- Демонстрация оптической NEP (?)
- Динамический диапазон (?)



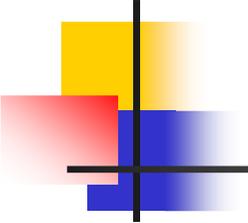
Существующие приемники терагерцового излучения

- Болометры (полупроводниковые и сверхпроводящие) – тепловые приемники излучения: излучение нагревает приемник, и изменяется его сопротивление
- Фотонные приемники: кванты излучения взаимодействуют с отдельными электронами, приводя к появлению фототока



Альтернативная возможность

Легированные сплавы
на основе теллурида свинца

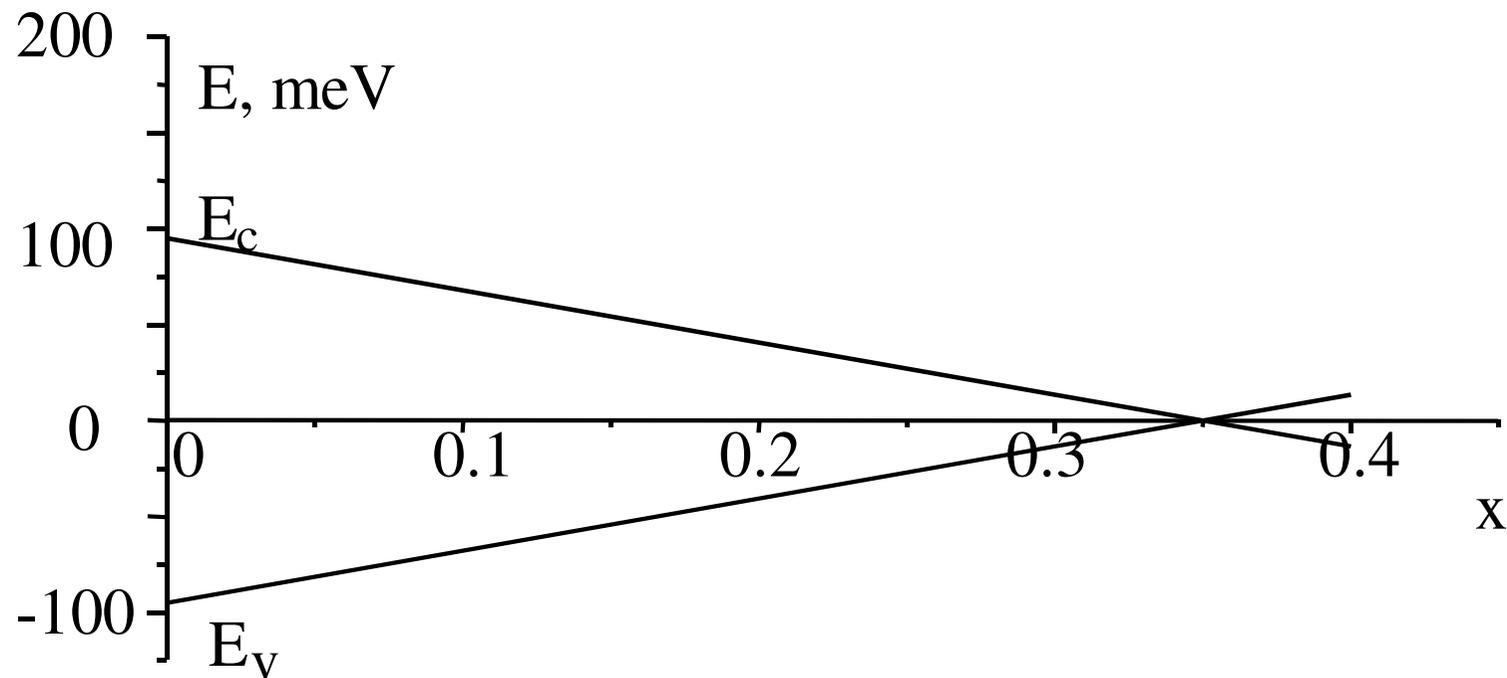


Нелегированные сплавы на основе теллурида свинца

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 $\epsilon \sim 10^3$.
- 3. Малые эффективные массы $m \sim 10^{-2} m_e$.

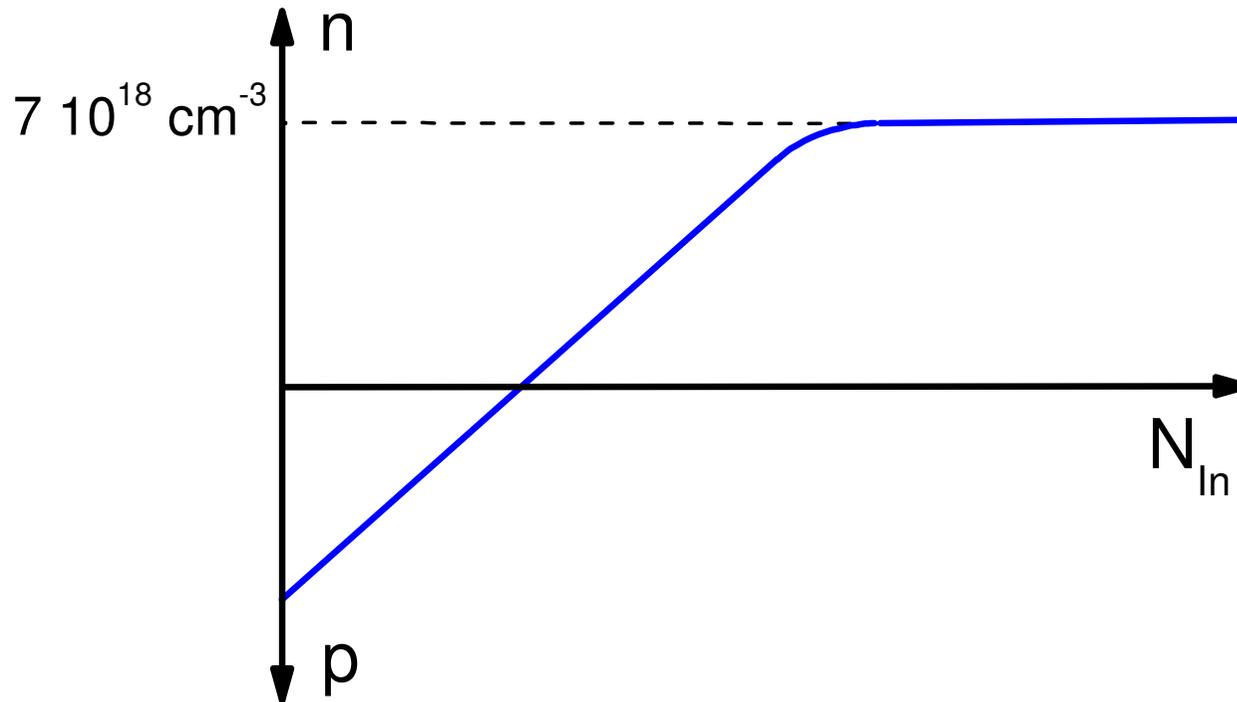
Твердые растворы



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

Эффекты, появляющиеся при легировании

Стабилизация уровня Ферми.

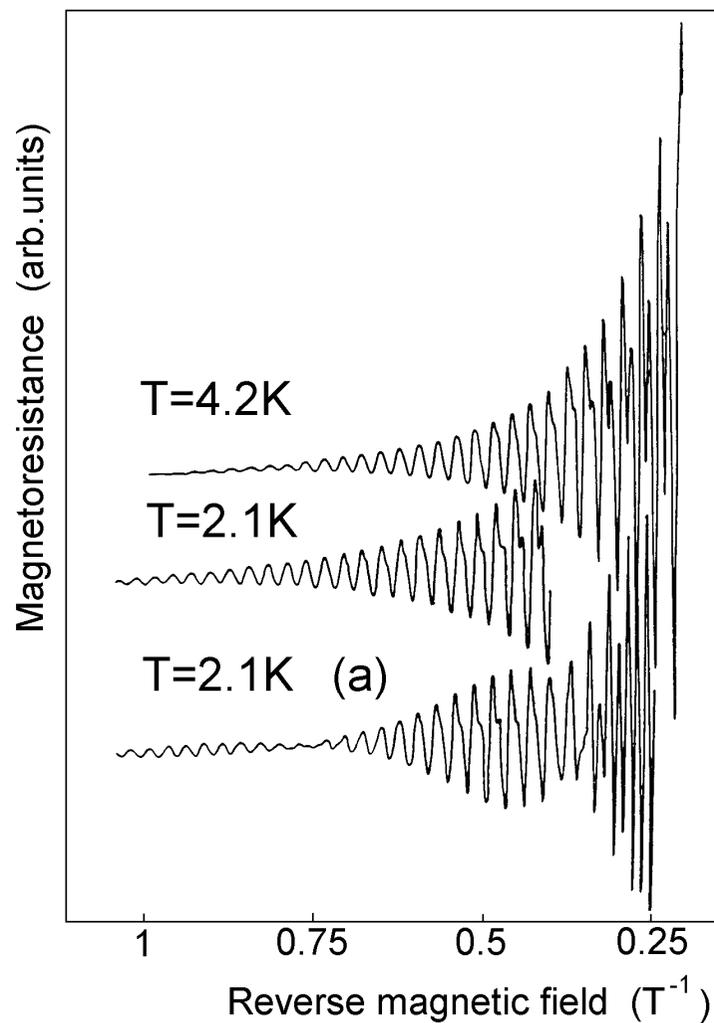


$\text{PbTe(In)}, N_{In} > N_i$

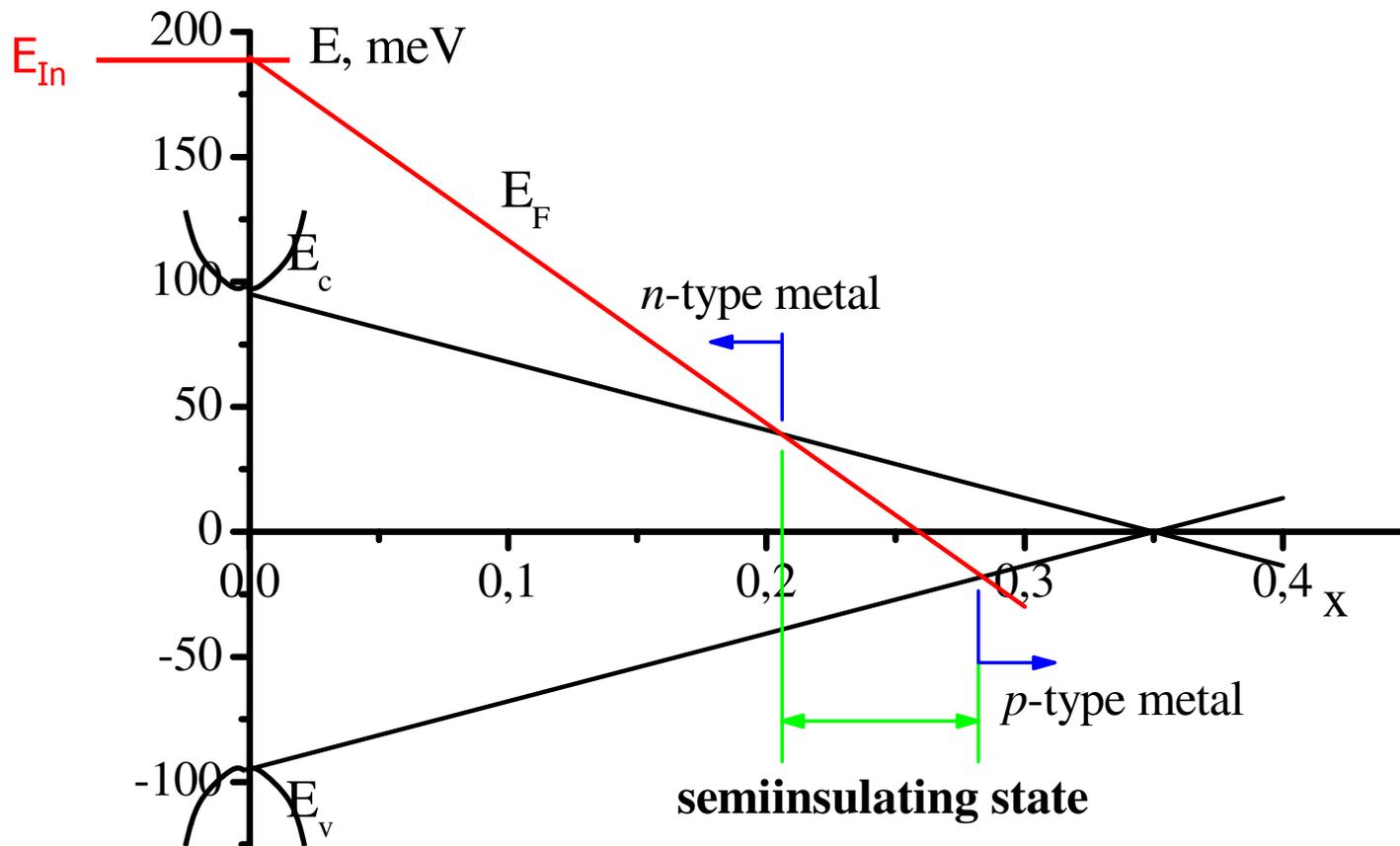
Последствия

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

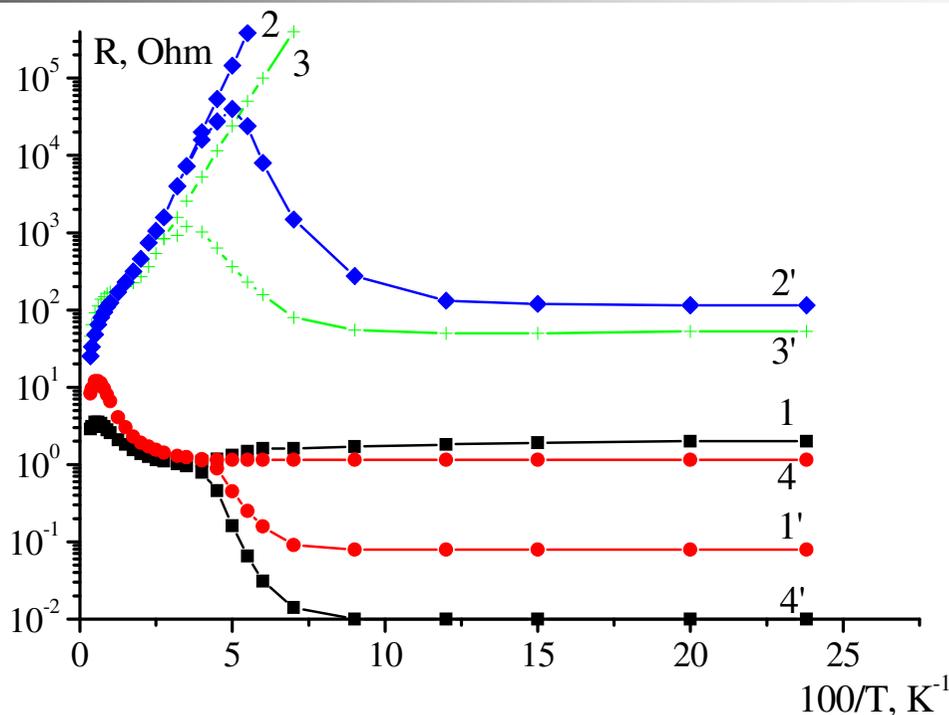
Осцилляции Шубникова – де Гааза в PbTe(In)



Стабилизация уровня Ферми в сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te(In)}$.

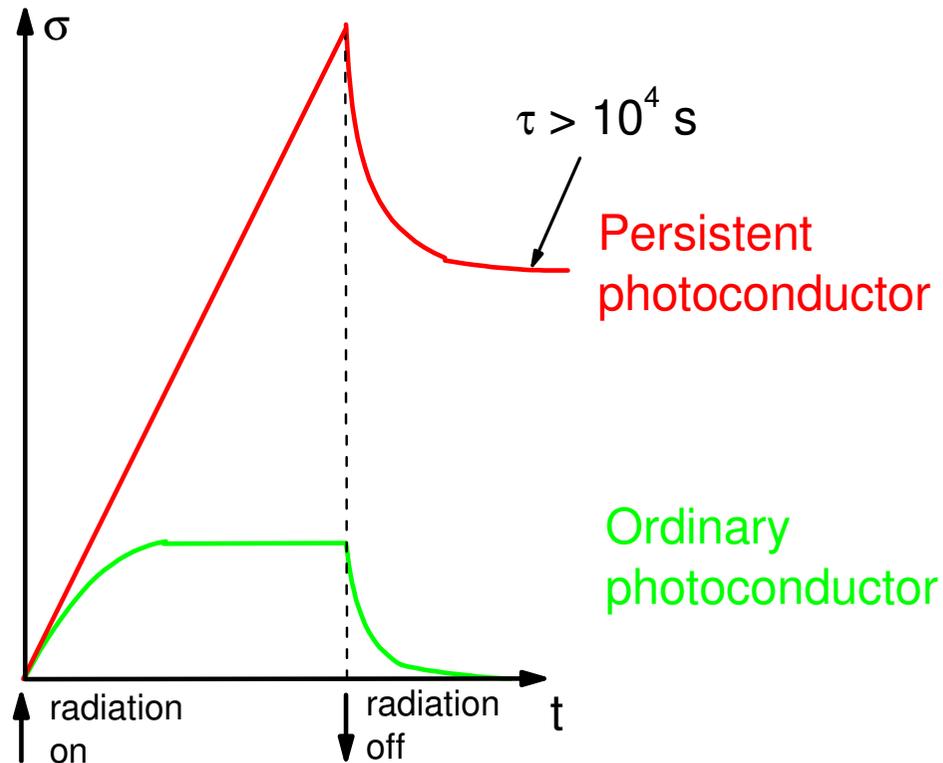


Задержанная фотопроводимость

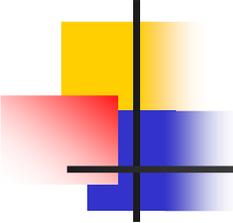


Температурная зависимость сопротивления, измеренная в темноте (1-4) и при инфракрасной подсветке (1'-4') в сплавах с $x = 0.22$ (1, 1'), 0.25 (2, 2'), 0.27 (3, 3') и 0.29 (4, 4')

Кинетика фотопроводимости



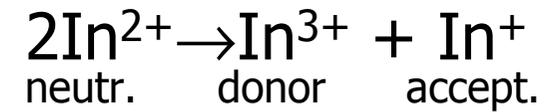
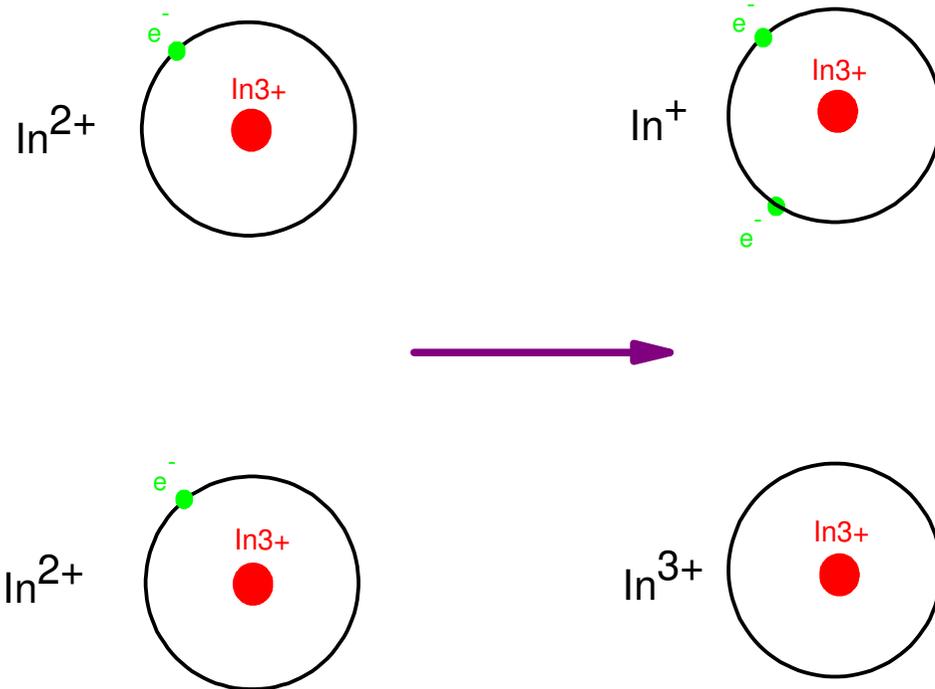
Большое время жизни фотовозбужденных электронов связано с существованием барьера между локальными и зонными состояниями — **DX-подобные примесные центры**



Основные проблемы

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

Модель переменной валентности



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

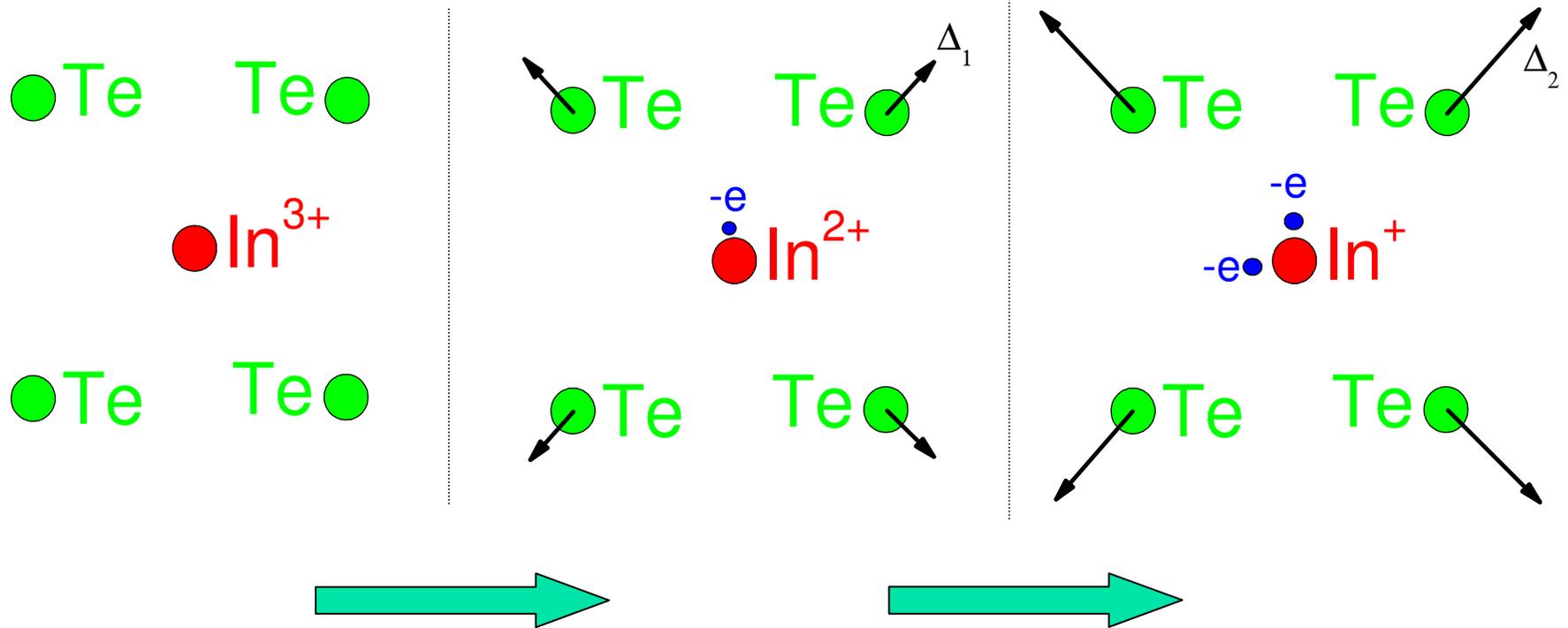
$$E_{\text{ion(right)}} = E^{(2)} + E^{(1)}$$

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

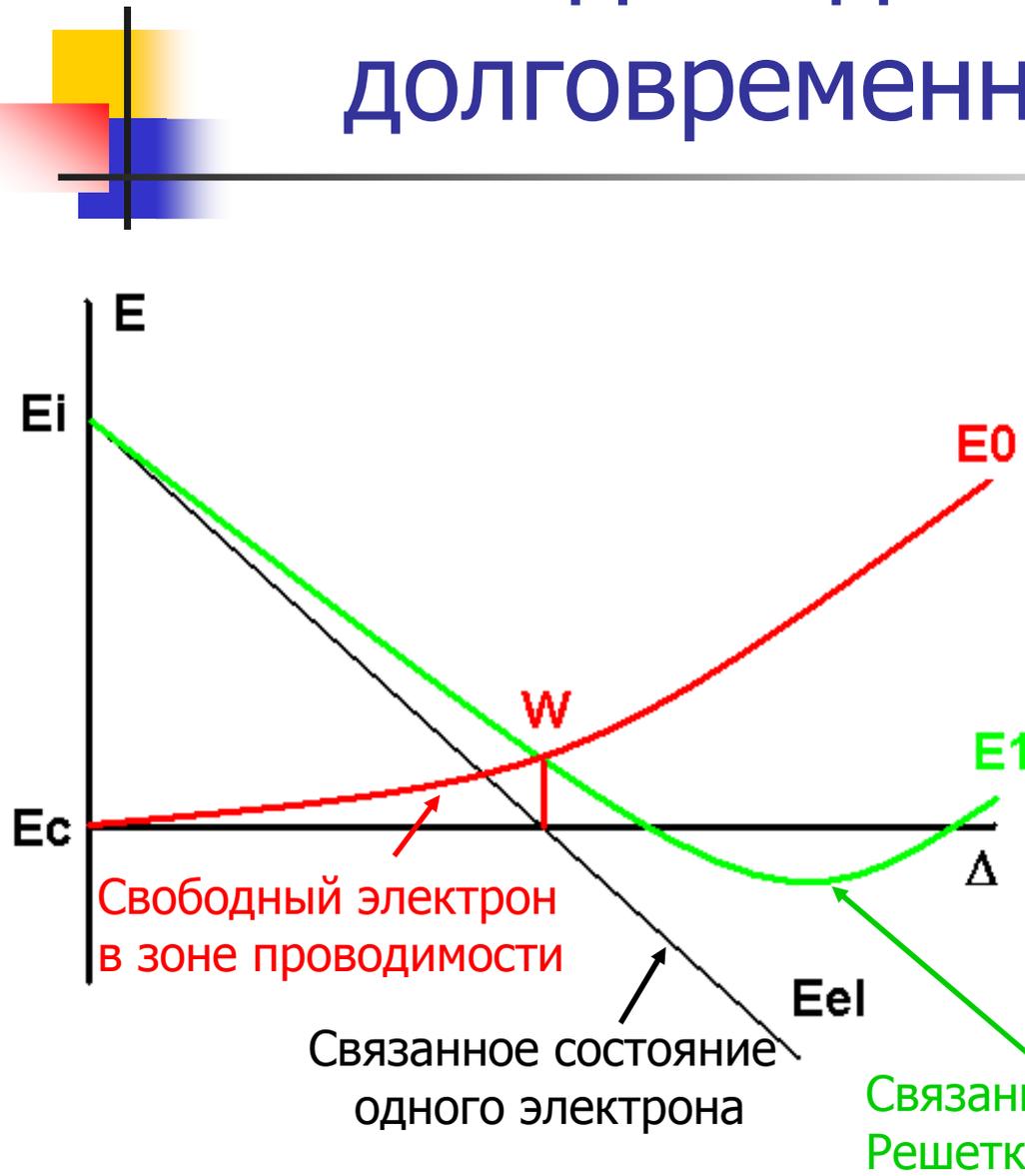
Обычно $U > 0$

“Negative-U” центр:
 $U < 0$

Модель переменной валентности (продолжение)



Модель для объяснения долговременных процессов

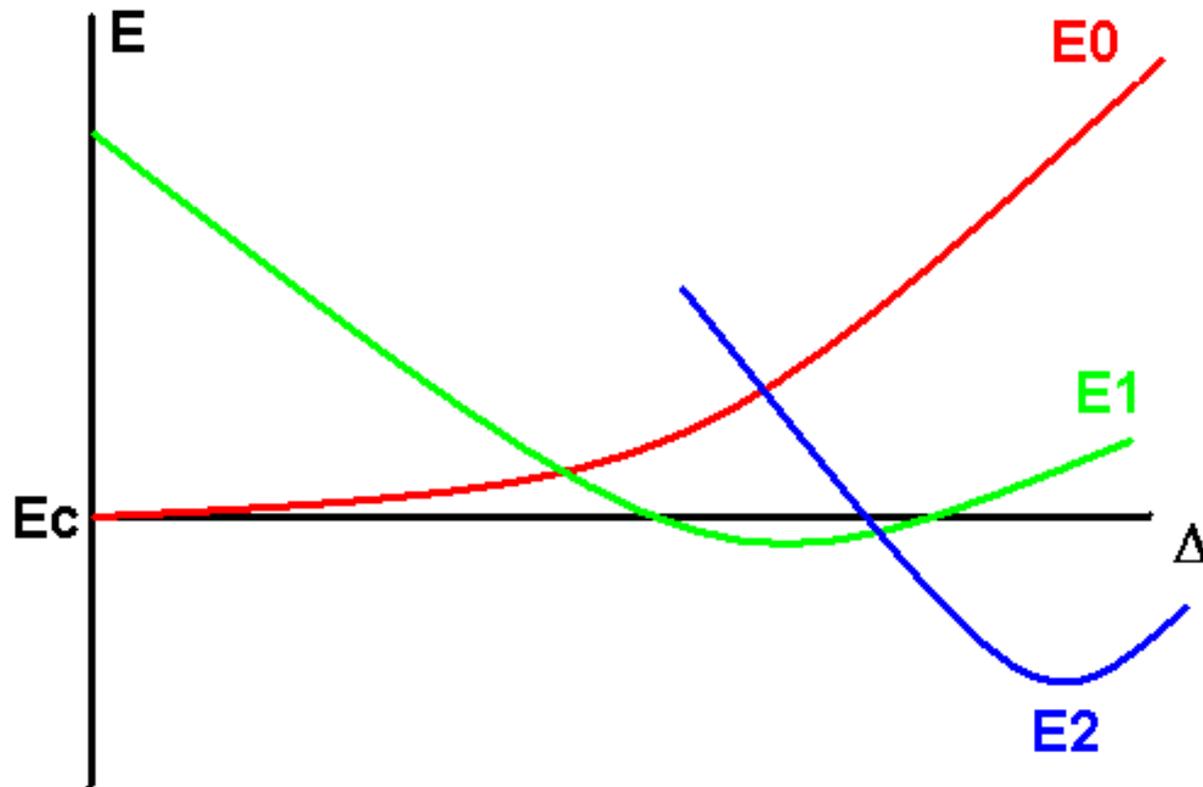


Конфигурационно-
координатная
диаграмма

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

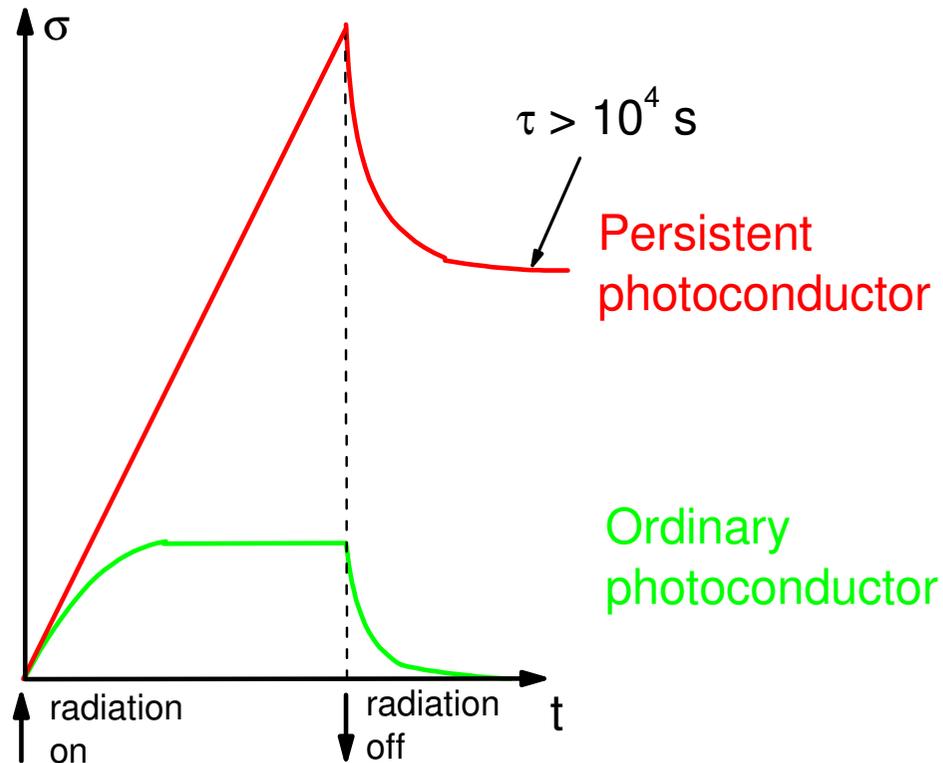
($n = 0, 1, 2$) – число
локализованных
электронов

Модель для объяснения долговременных процессов



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

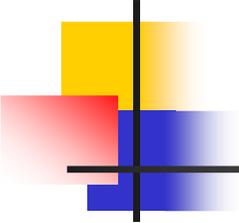
«Внутреннее» интегрирование СВЕТОВОГО ПОТОКА



Интегрирование
увеличивает
отношение
сигнал-шум

НО

Необходимо
уметь
быстро гасить
задержанную
фотопроводимость



Гашение задержанной фотопроводимости

- 1. **Термическое гашение:** нагрев до 25 К и последующее охлаждение – слишком медленный процесс.

- 2. **СВЧ-гашение:** приложение СВЧ-импульсов к образцу

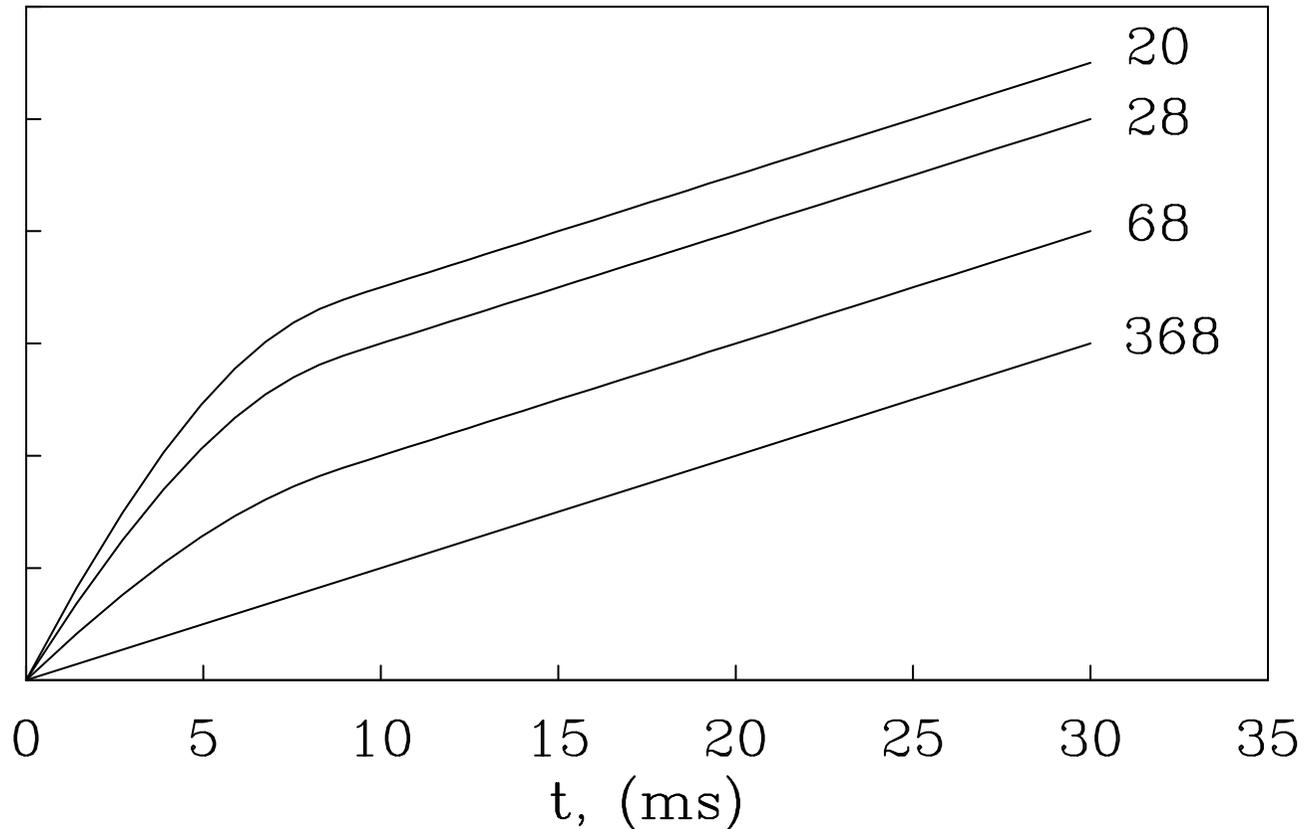
$$f = 250 \text{ МГц}, P = 0.9 \text{ Вт}, \Delta t = 10 \text{ мкс}$$

Квантовая эффективность

фотоприемника **может быть увеличена до $\sim 10^2$** в некотором специальном режиме СВЧ-гашения.

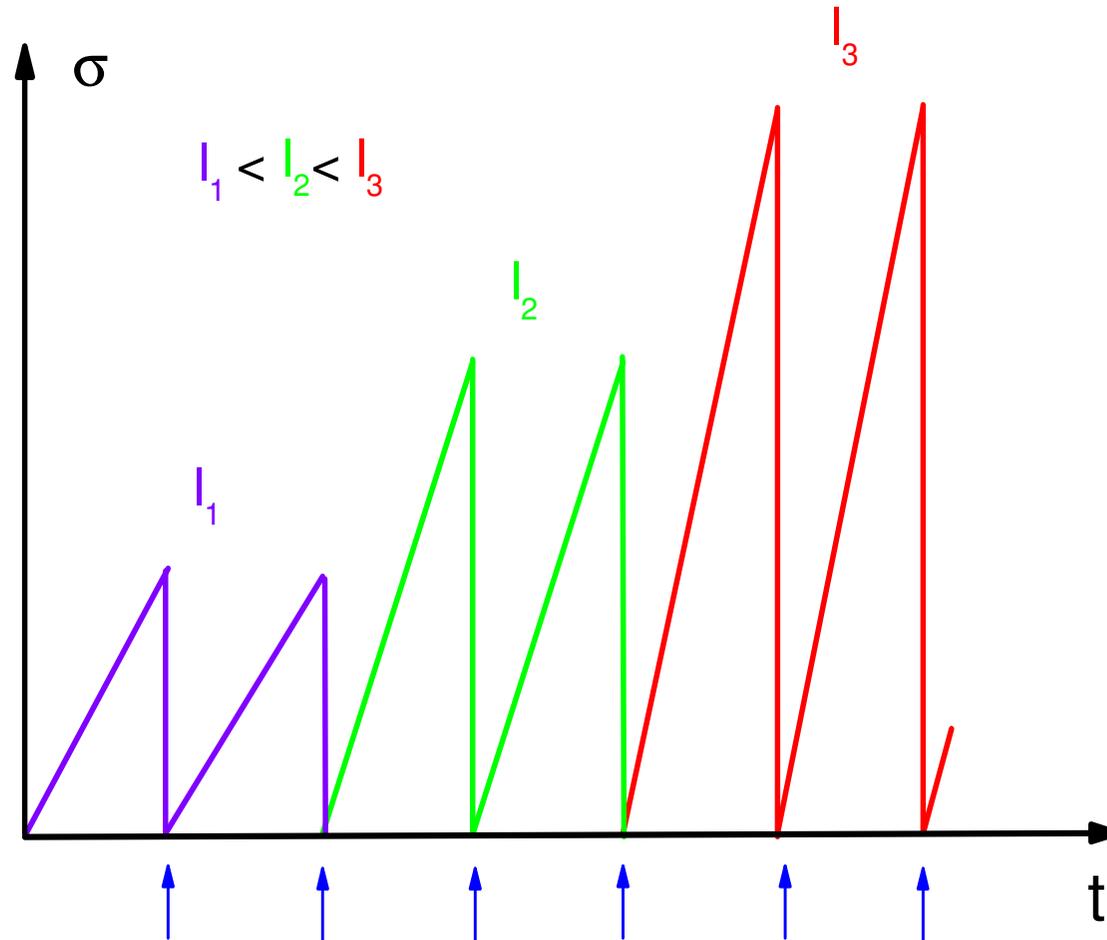
СВЧ-стимуляция квантовой эффективности

S, arb.u.

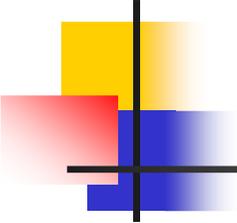


Квантовая
эффективность
может быть
увеличена
до 100!

Принцип действия приемника излучения



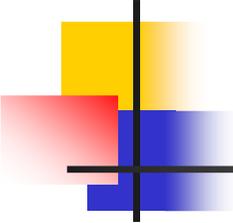
quenching pulses



Инфракрасные фотоприемники на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$

Одиночный фотоприемник, работающий в режиме периодического накопления и последующего быстрого гашения фотосигнала, режим СВЧ-стимуляции квантовой эффективности.

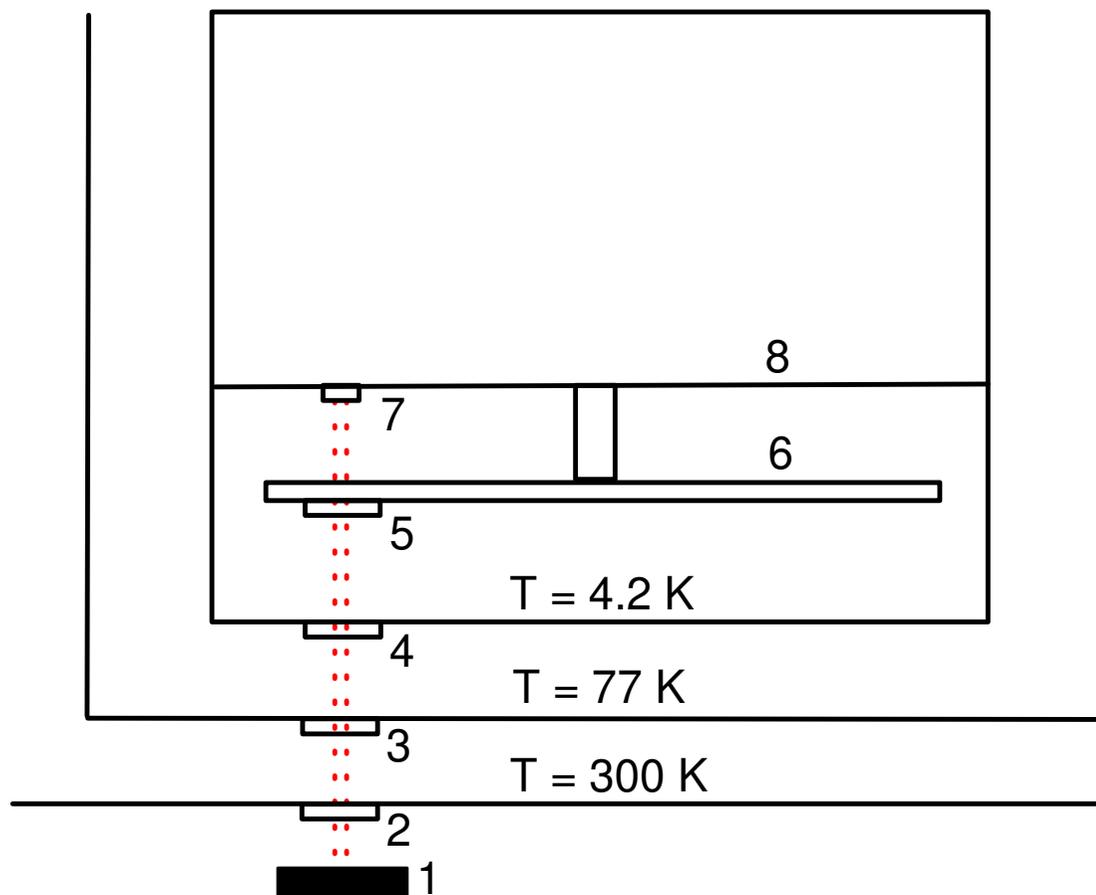
- рабочая температура 4.2 К;
- длина волны 18 мкм (определяемая фильтром);
- быстродействие 3 Гц;
- площадь 300*200 мкм;
- токовая чувствительность $> 10^7$ А/Вт;
- минимальная регистрируемая мощность $< 10^{-16}$ Вт (чувствительность измерительной электроники лишь 10^{-7} А).



Проблемы

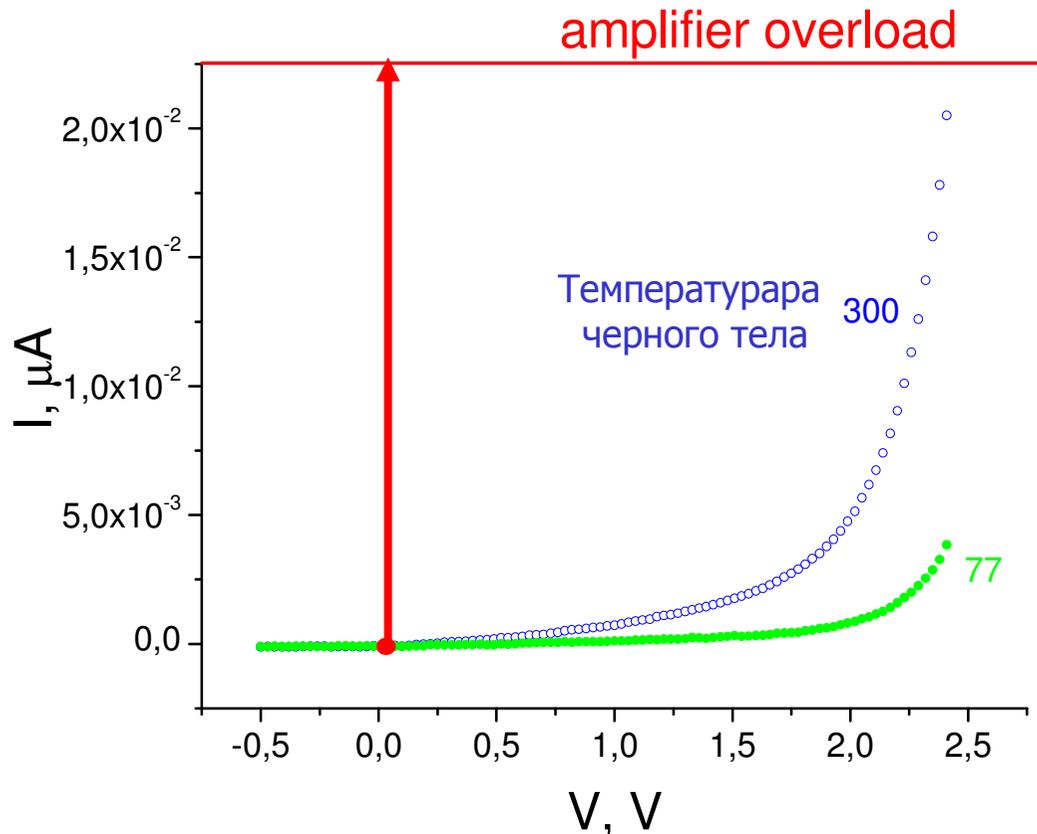
- Насколько хороши фотоприемники на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ по сравнению с аналогами?
- Каков спектральный диапазон чувствительности фотоприемников на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$?

Экспериментальная установка



Сравнение с

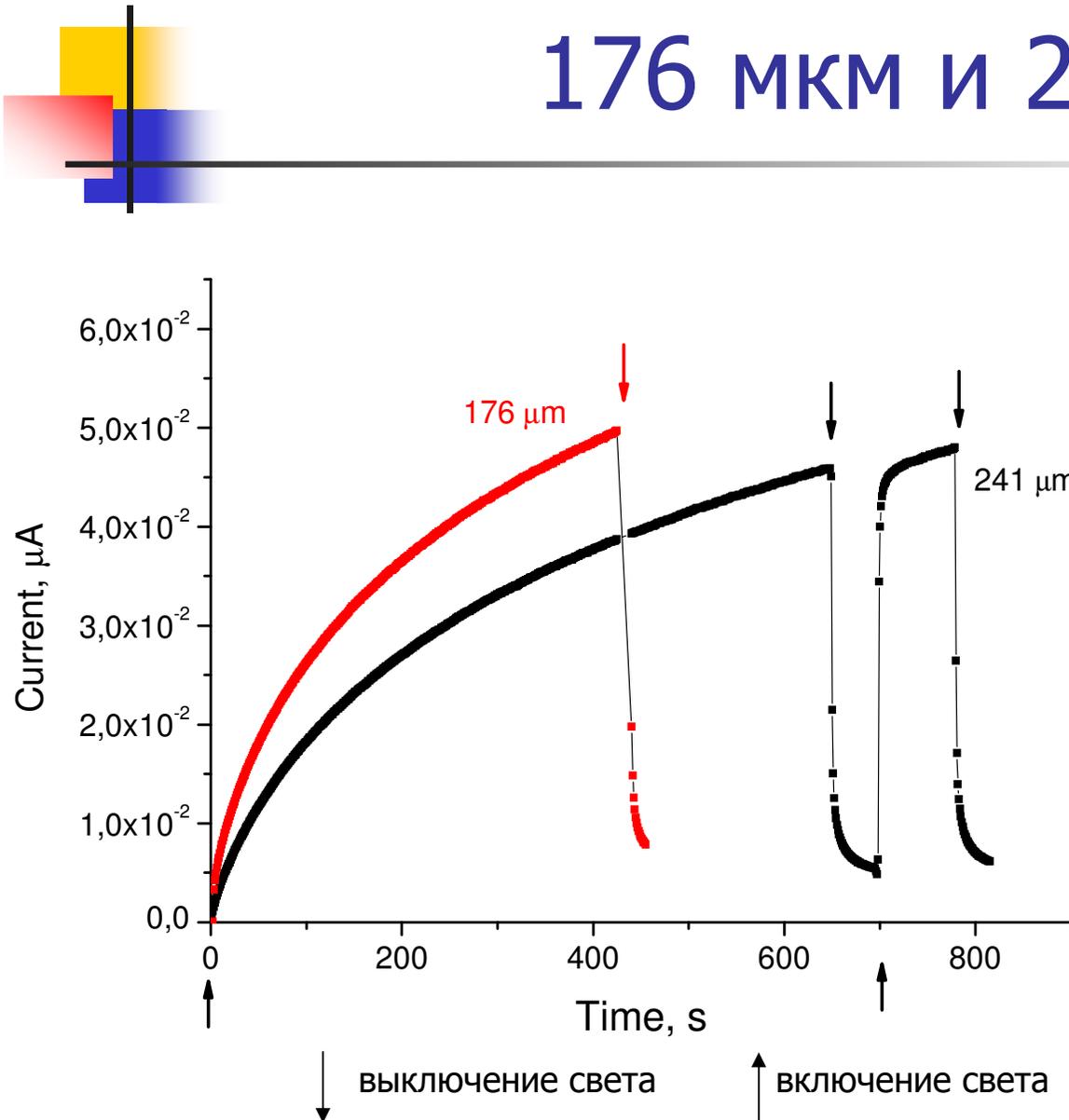
Si(Sb) и Ge(Ga) (продолжение)



$\lambda = 14$ мкм;
state of the art
Si(Sb) ВІВ

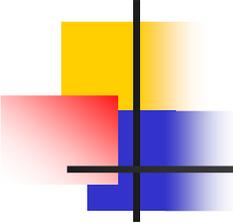
Фотоприемник
 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$:
темновой ток при
минимально
возможном смещении
40 мВ
(красная точка)

Фотоотклик на длинах волн 176 мкм и 241 мкм



Сильный
фотоотклик на
длинах волн 176 и
241 мкм

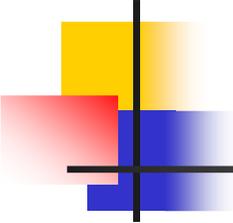
$\lambda = 241$ мкм
выше, чем
 $\lambda_{\text{red}} = 220$ мкм
наблюдавшаяся в
Ge(Ga)



Мартовские данные

Одиночный фотоприемник, работающий в режиме периодического накопления и последующего быстрого гашения фотосигнала, режим СВЧ-стимуляции квантовой эффективности.

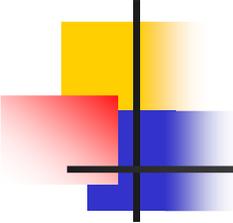
- Рабочая температура 4.2 K;
- Длина волны 350 μm (определяемая фильтром, $Q=4$);
- Частота гашения 1 Hz;
- площадь 300*200 μm ;
- NEP $\sim 10^{-13}$ W/Hz^{1/2} (чувствительность измерительной электроники 10^{-6} A).



Майские данные

Одиночный фотоприемник, работающий в режиме периодического накопления и последующего быстрого гашения фотосигнала, режим СВЧ-стимуляции квантовой эффективности.

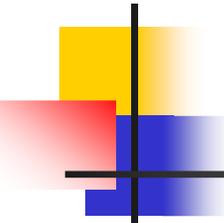
- Рабочая температура 4.2 K;
- Длина волны 350 μm (определяемая фильтром, $Q=4$);
- Частота гашения 100 Hz;
- площадь 300*200 μm ;
- NEP $\sim 3 \cdot 10^{-17}$ W/Hz^{1/2}



Июльские данные

Одиночный фотоприемник, работающий в режиме периодического накопления и последующего быстрого гашения фотосигнала, режим СВЧ-стимуляции квантовой эффективности.

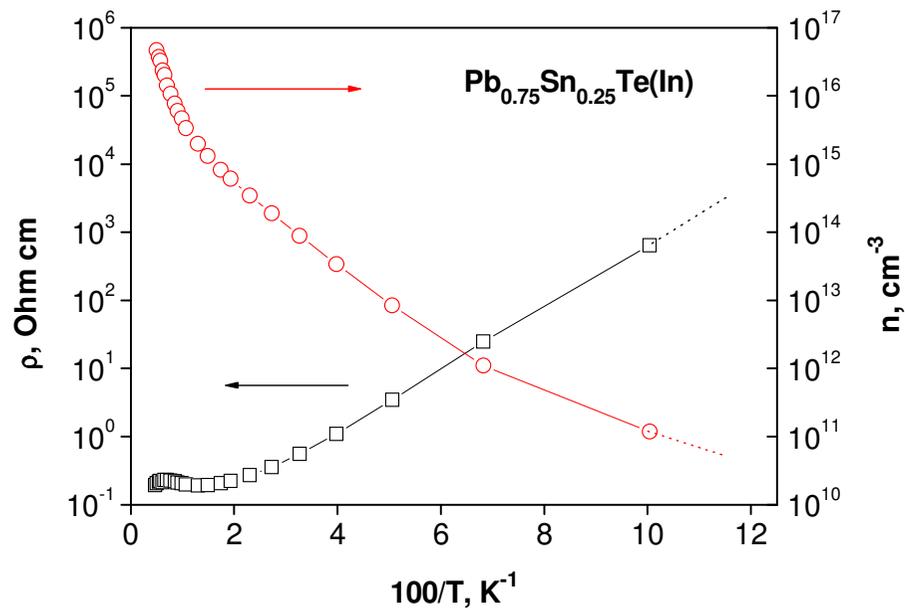
- Рабочая температура **1.57** K;
- Длина волны **350** μm (определяемая фильтром, $Q=4$);
- Частота гашения 100 Hz;
- площадь $300*200$ μm ;
- NEP \sim **$5*10^{-19}$** W/Hz^{1/2} **!!!**



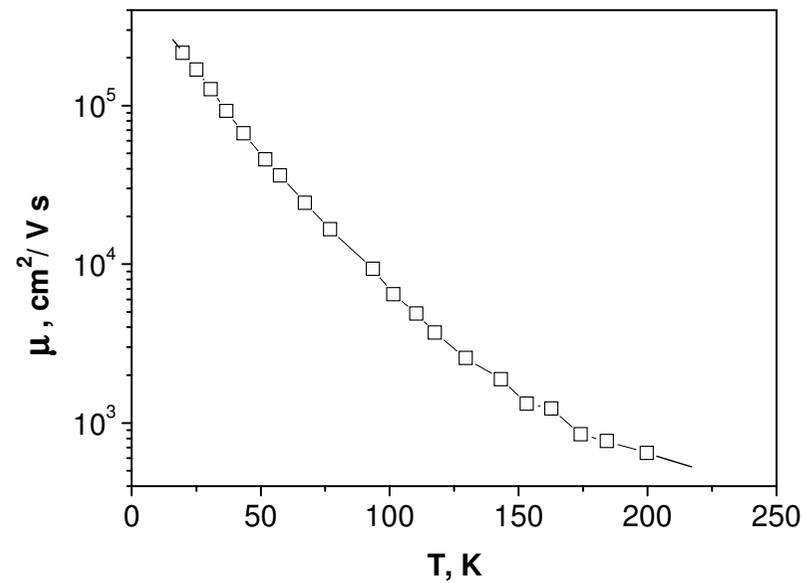
Фотопроводимость PbSnTe(In) под действием терагерцового лазерного излучения

- Длина волны лазера: 90, 148, 280, 496 μm
- Длительность импульса: 100 ns
- Мощность в импульсе: до 30 kW
- Температура образца: 4.2 – 300 K

Образцы

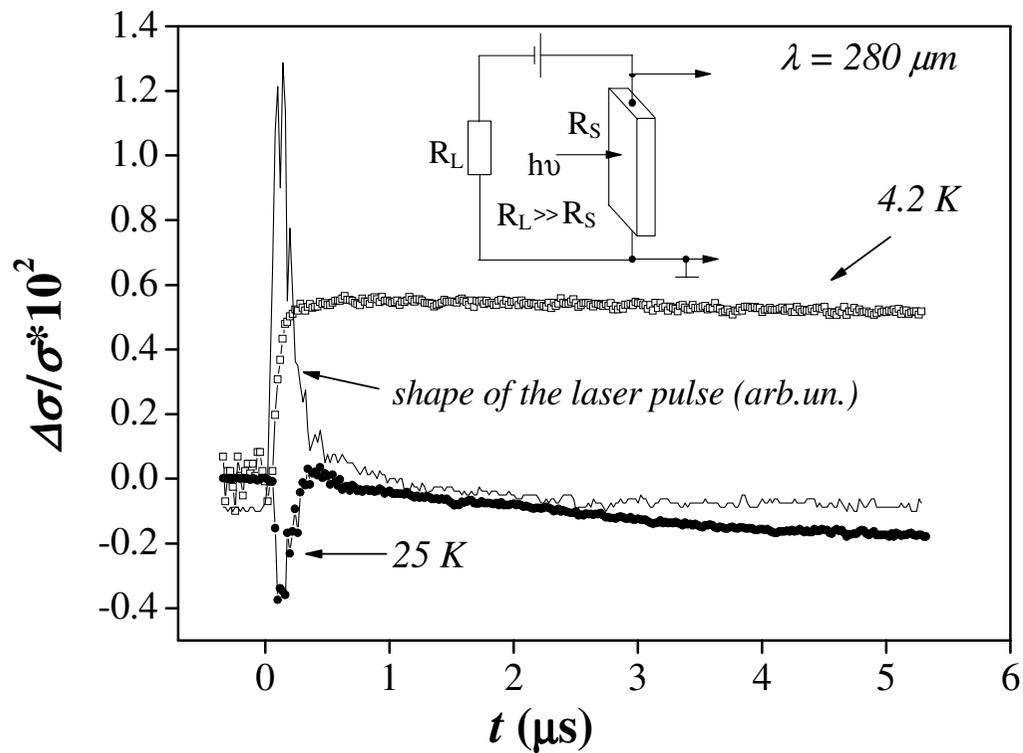


Температурная зависимость
удельного сопротивления и
концентрации электронов

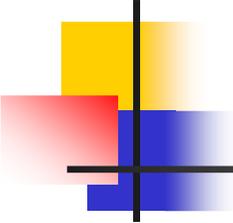


Температурная зависимость
подвижности электронов

Кинетика фотопроводимости



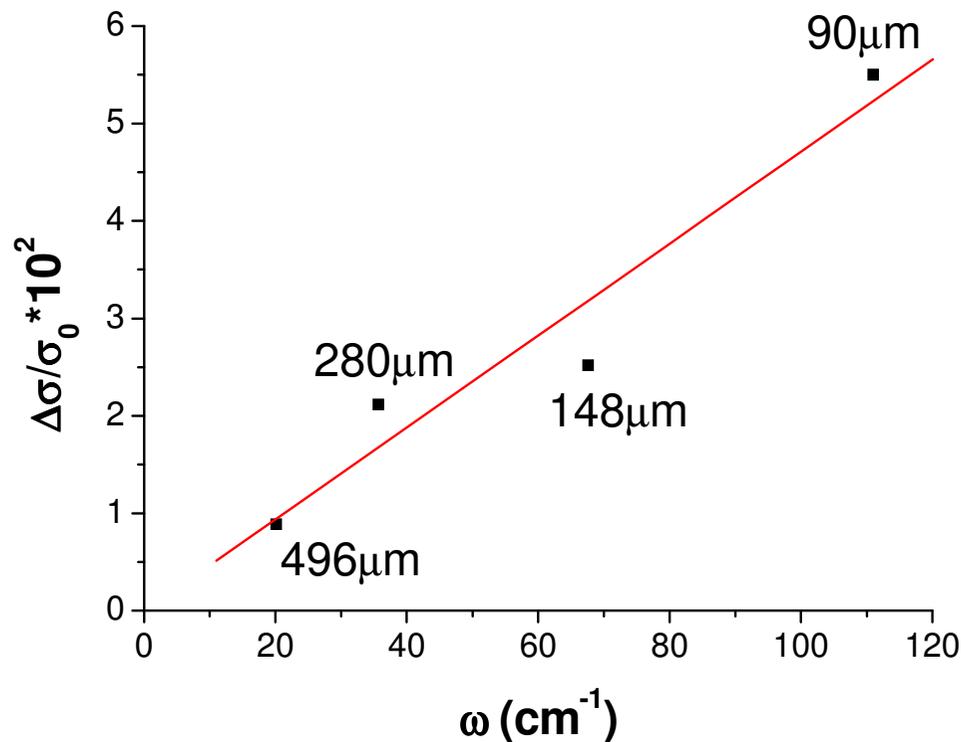
Временной профиль лазерного импульса и кинетика фотопроводимости при различных температурах



Механизмы фотопроводимости

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

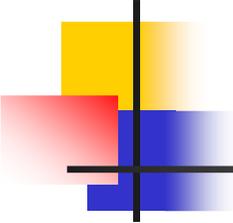
Зависимость амплитуды фотоотклика от длины волны



$$N_{\text{кв}} = 8.7 \cdot 10^{-24} \text{ с}^{-1}$$

Заметный фотоотклик наблюдается вплоть до длины волны 496 мкм, что более чем в два раза выше, чем предыдущий рекорд для фотонных приемников – 220 мкм для одноосно деформированного Ge(Ga)

Линейная экстраполяция квантовой эффективности к нулевому значению фотоотклика дает красную границу фотоэффекта $E_{\text{кр}}=0!$



Одна из главных проблем

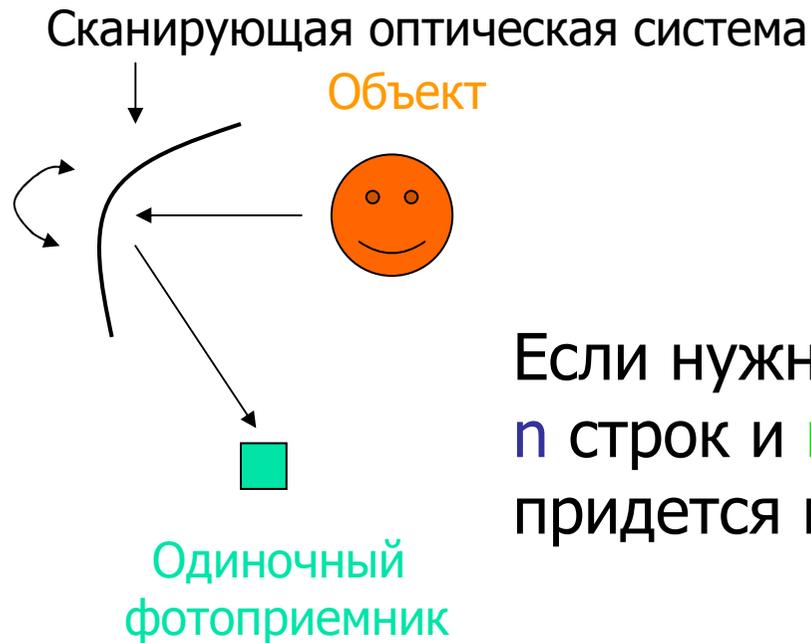
Трудности с созданием многоэлементных матричных фотоприемников.

В настоящее время максимальное количество элементов матричных приемников терагерцового диапазона не превышает нескольких десятков

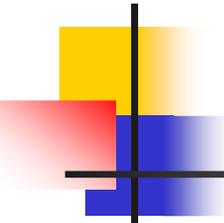
Зачем нужны матричные приемники

Общее правило: дольше смотришь – больше видишь

Дано: быстродействие системы, т.е. время формирования кадра T

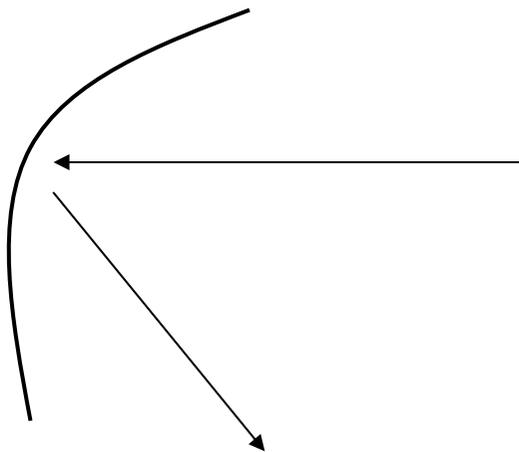


Если нужно за время T получить картинку из n строк и m кадров, то на каждый элемент придется время $T/n \cdot m$



Фокальные матрицы

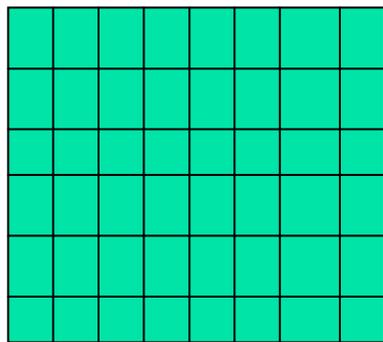
Несканирующая оптика



Объект

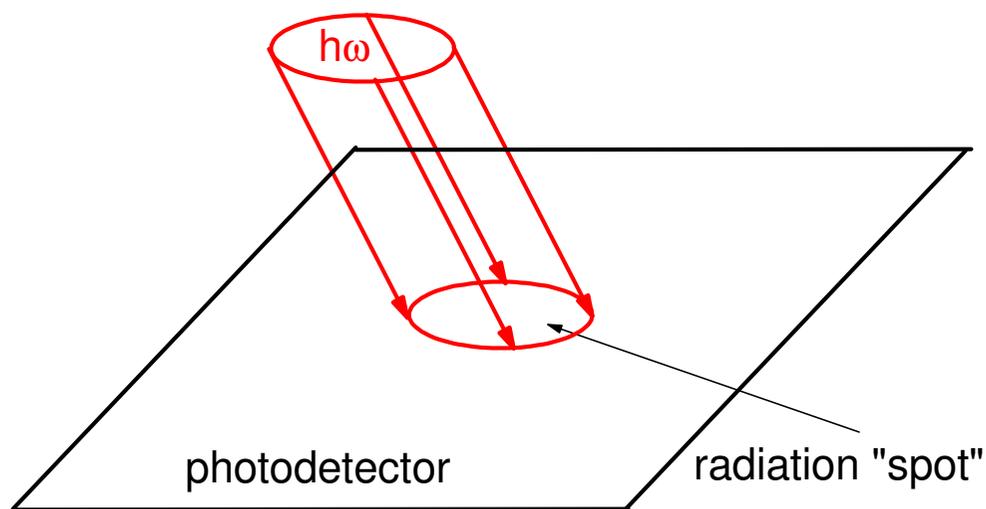


Изображение на каждом из элементов формируется в течение всего времени кадра T
Чувствительность возрастает в $n \cdot m$ раз



Матрица из n строк и m столбцов

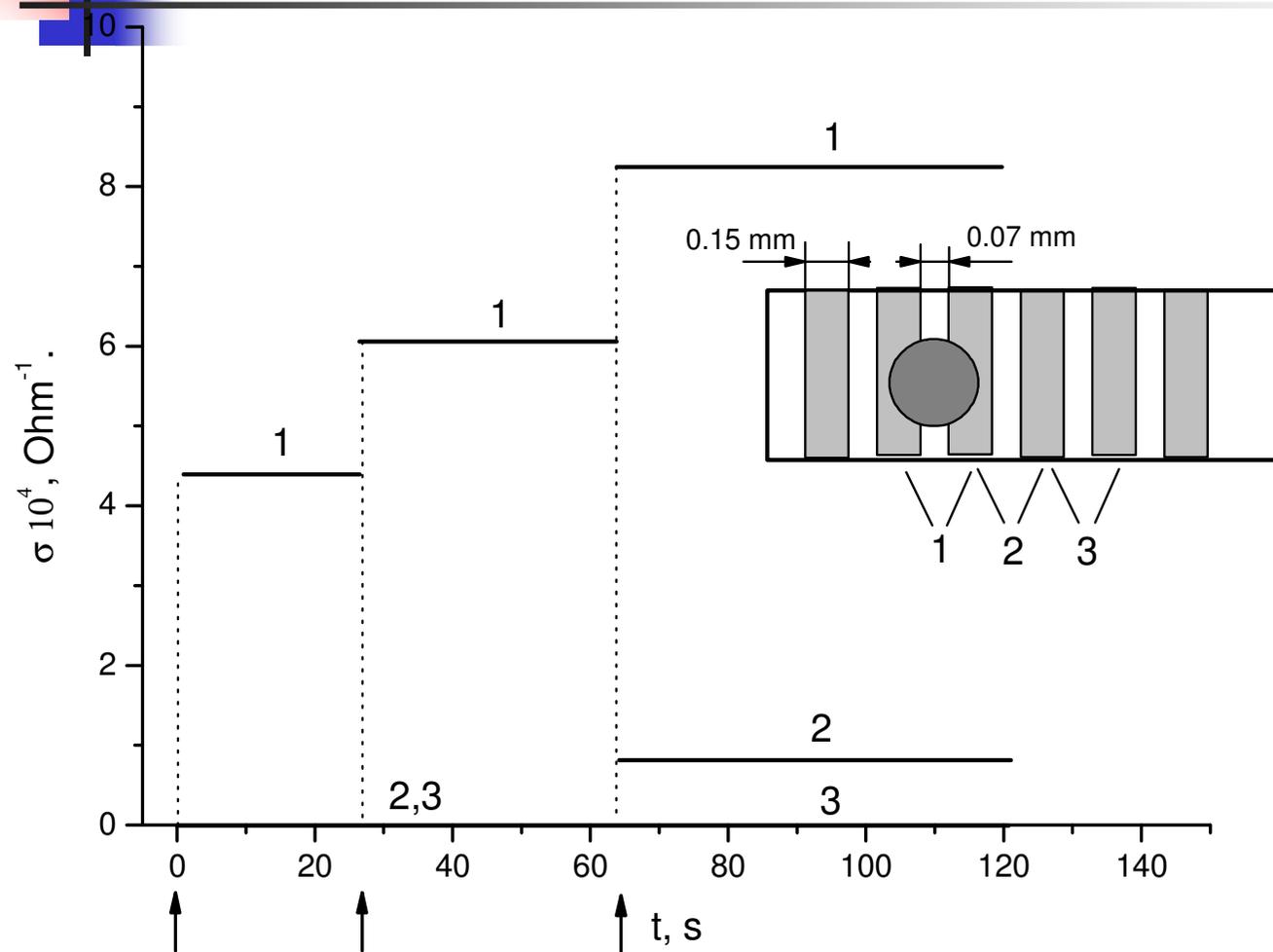
Фокальная «непрерывная» матрица



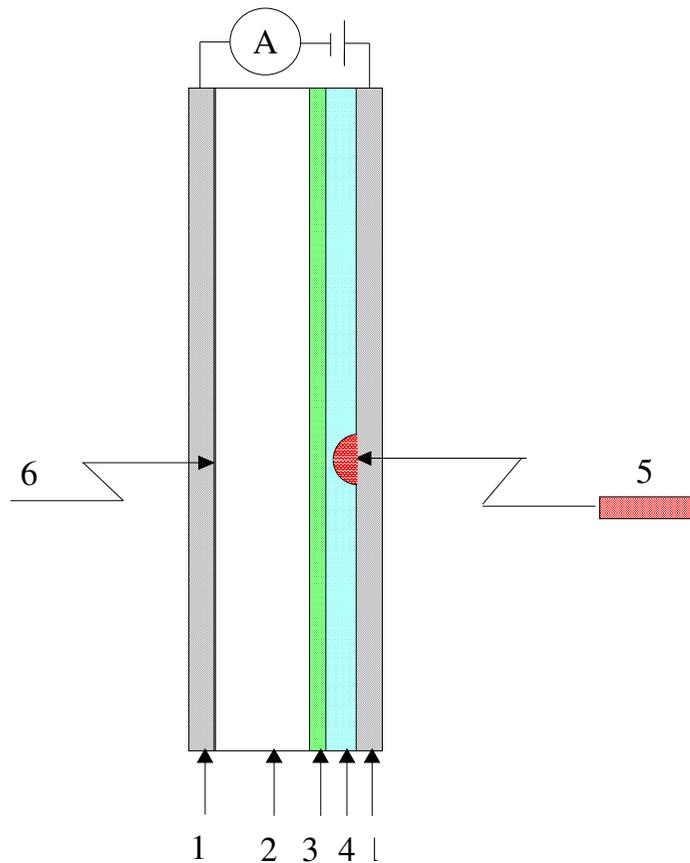
Локальная ИК-подсветка приводит к **локальной генерации** фотовозбужденных свободных электронов.

Характерный пространственный масштаб < 100 мкм

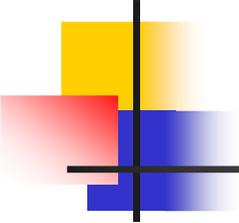
Экспериментальное подтверждение



Идея способа считывания



- 1 – полупрозрачные электроды
- 2 – активный слой $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te(In)}$
- 3 – буферный слой BaF_2
- 4 – слой широкозонного полупроводника
- 5 – коротковолновый лазер
- 6 – исследуемый поток излучения



Выводы

Фотоприемники $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te(In)}$ имеют ряд привлекательных свойств, которые позволяют им успешно конкурировать с существующими аналогами:

- **Внутреннее интегрирование падающего светового потока,**
- **Возможность эффективного быстрого гашения накопленного сигнала**
- **СВЧ-стимуляция квантовой эффективности до 10^2**
- **Возможность реализации «непрерывной» фокальной матрицы**
- **Возможность реализации простого способа считывания**
- **Высокая радиационная стойкость**