

Фотоэлектрические эффекты в легированных полупроводниках на основе теллурида свинца при воздействии лазерного терагерцового излучения

Д.Р.Хохлов¹, А.В.Галеева¹, Д.Е.Долженко¹, Л.И.Рябова¹, А.В.
Никорич², С.Д.Ганичев³, С.Н.Данилов³, В.В.Бельков^{3,4}

¹ *Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Москва, Россия*

² *Институт прикладной физики АН Молдовы, Кишинев, Молдова*

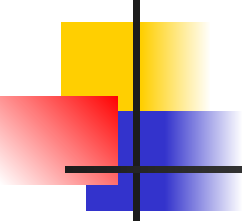
³ *Физический факультет, университет Регенсбурга, Германия*

⁴ *Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия*



План доклада

- 1. Нелегированные сплавы на основе теллурида свинца
- 2. Легирование теллурида свинца индием
 - А) Стабилизация уровня Ферми
 - Б) Задержанная фотопроводимость
 - В) Примесные метастабильные состояния
- 3. Фотопроводимость в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ под действием терагерцовых лазерных импульсов
- 4. Монополярный фотоэлектромагнитный эффект в $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$
- 5. Выводы

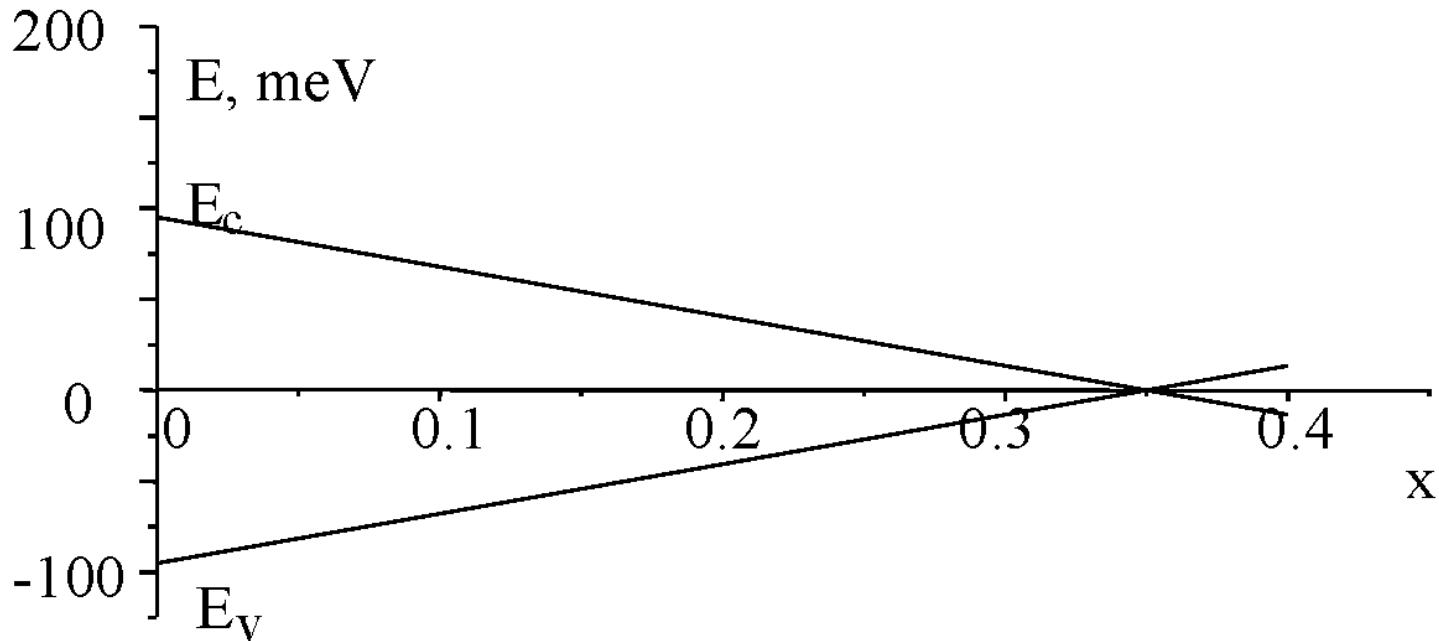


1. Нелегированные сплавы на основе теллурида свинца

PbTe: узкощелевой полупроводник:

- 1. Кубическая гранецентрированная решетка типа Na^+Cl^-
- 2. Прямая щель $E_g = 190 \text{ meV}$ при $T = 0 \text{ K}$ в L -точке зоны Бриллюэна
- 3. Высокая диэлектрическая проницаемость $\epsilon \sim 10^3$.
- 4. Малые эффективные массы $m \sim 10^{-2} m_e$.

Твердые растворы



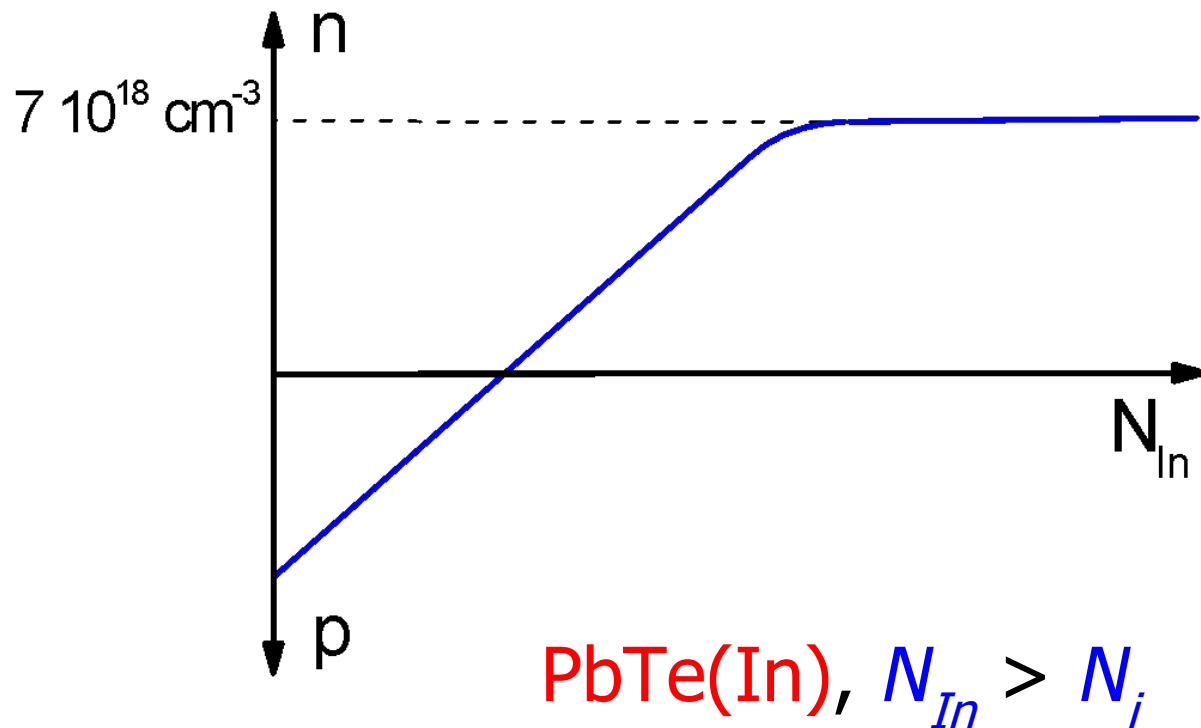
Происхождение свободных носителей:

Отклонение от стехиометрии $\sim 10^{-3}$.

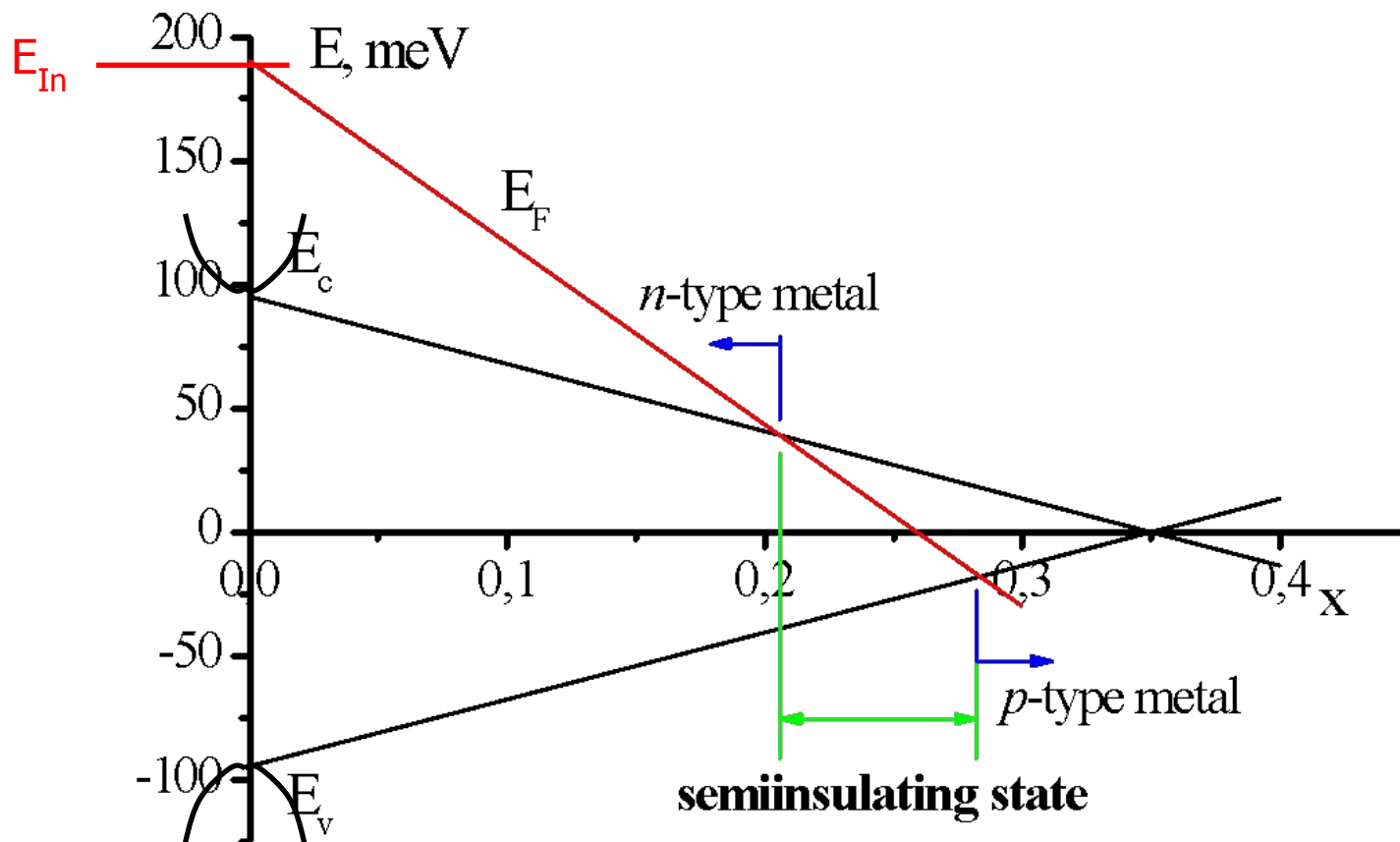
Как правило: $n, p \sim 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$

2. Эффекты, появляющиеся при легировании

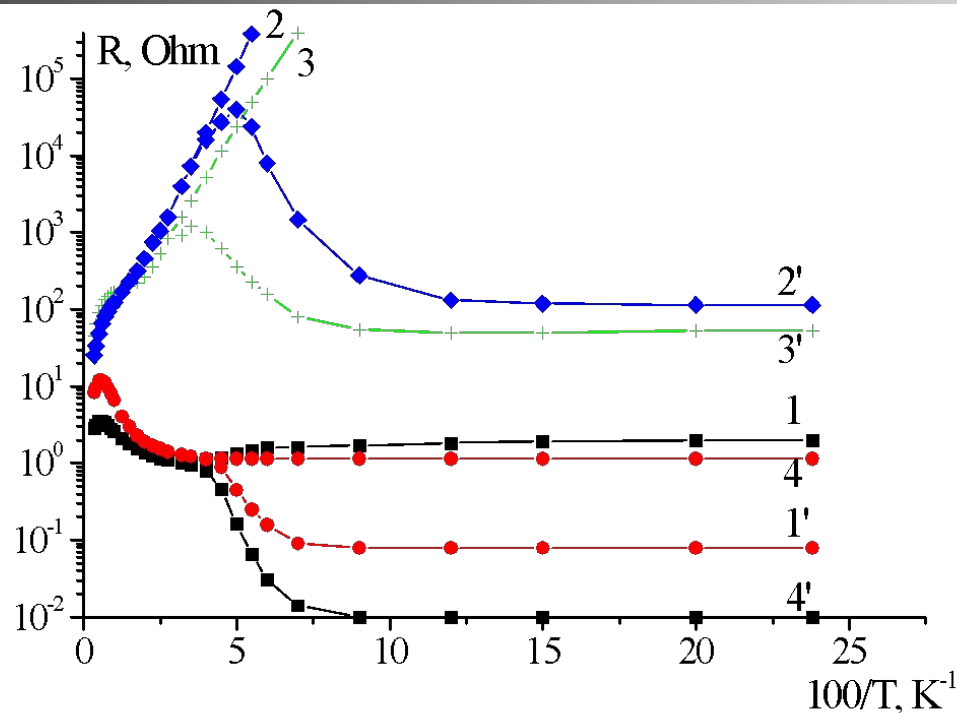
Стабилизация уровня Ферми.



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

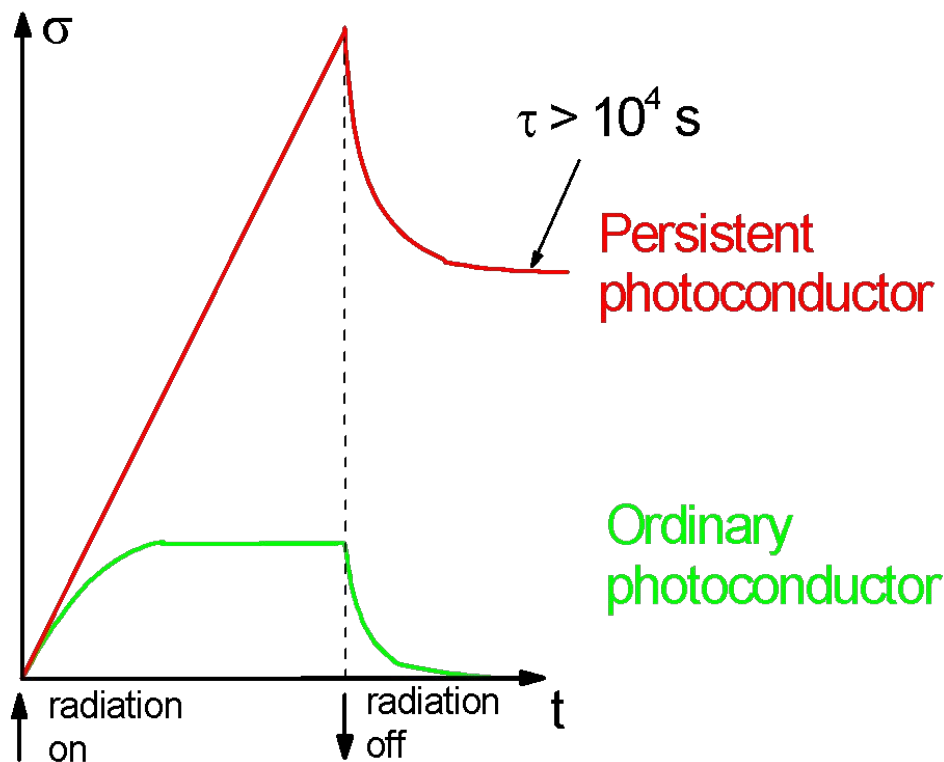


Задержанная фотопроводимость



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**

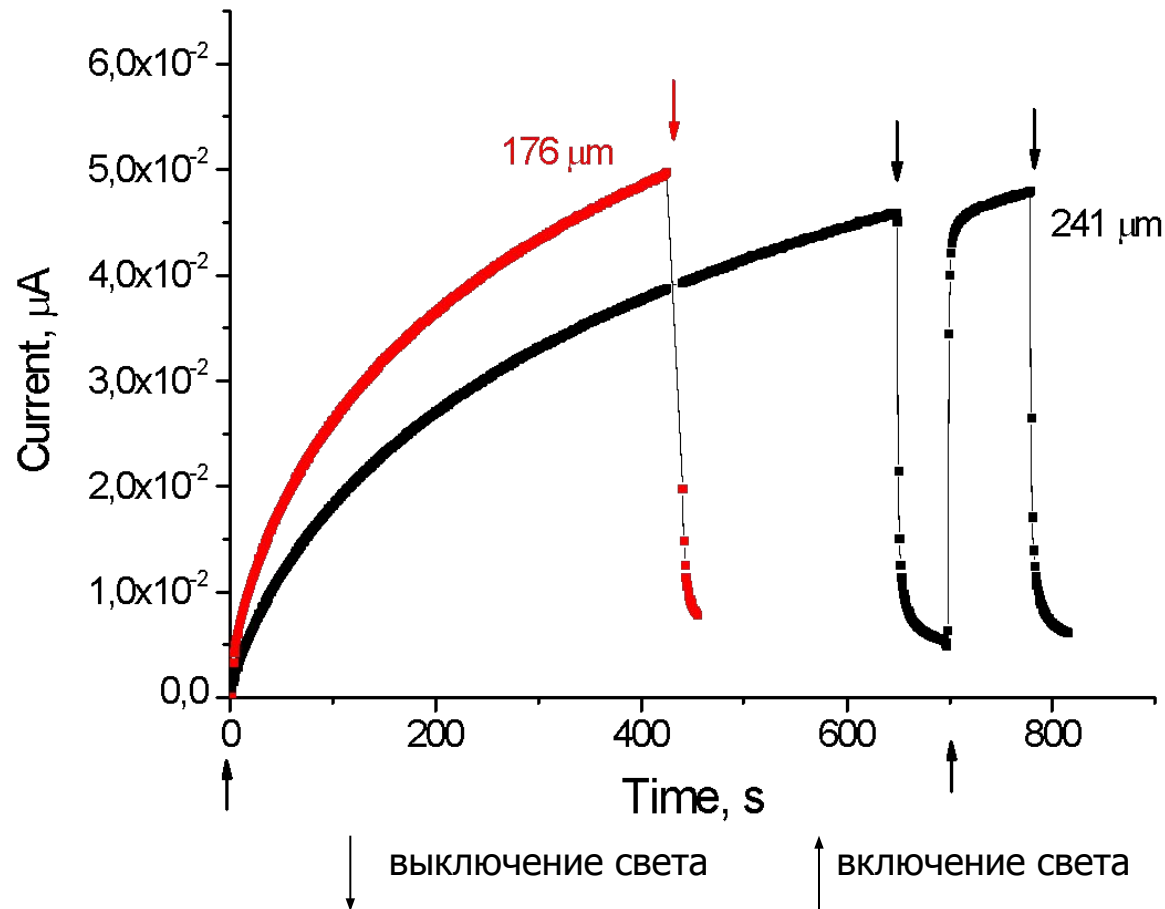
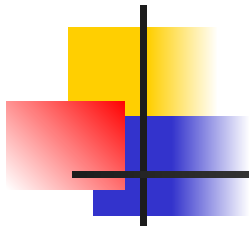


Примесные метастабильные состояния

Примесные метастабильные состояния ответственны за появление ряда сильных эффектов:

- Задержанная фотопроводимость в терагерцовом спектральном диапазоне
- СВЧ-стимуляция квантовой эффективности до 10^2
- Усиленный диамагнитный отклик, составляющий до 1% от идеального
- Рост эффективной диэлектрической проницаемости до 10^5 при ИК-подсветке
- Гигантское отрицательное магнитосопротивление с амплитудой до 10^6

Фотоотклик на длинах волн 176 мкм и 241 мкм

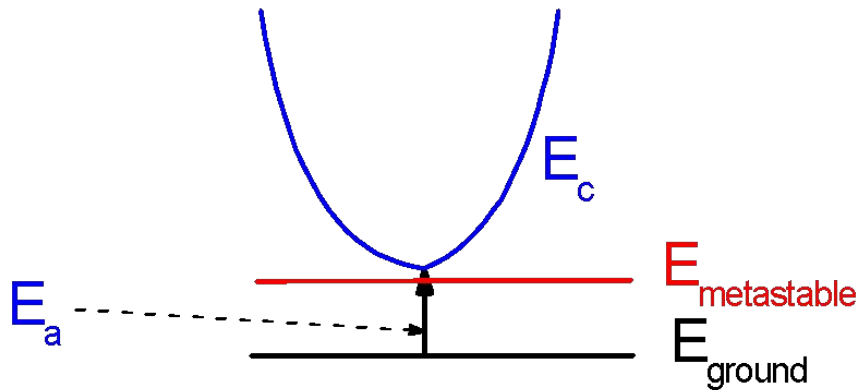


Сильный
фотоотклик на
длинах волн 176 и
241 мкм

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

Важное замечание

$$E_{\lambda} = (241, 176) \mu\text{m} < E_a$$

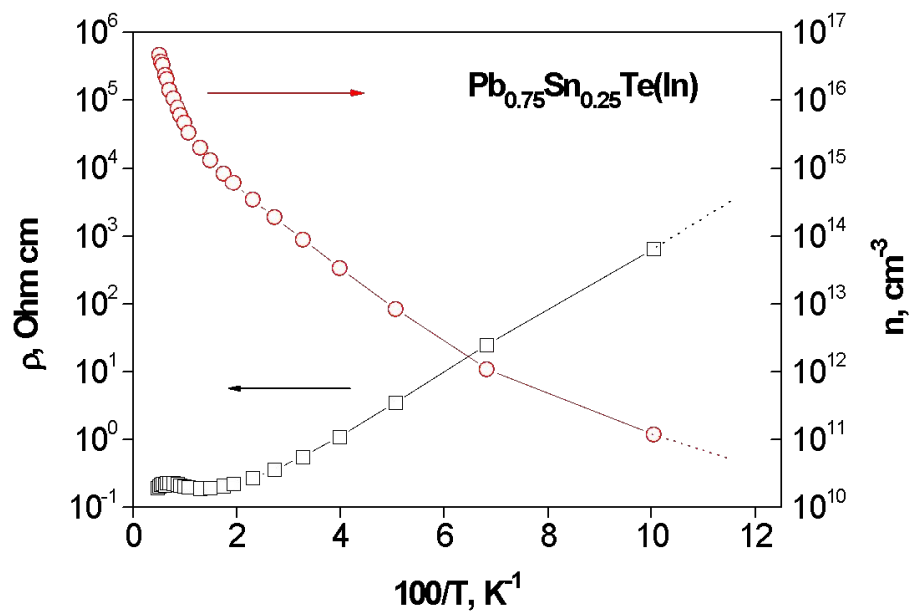


За фотопроводимость
отвечает возбуждение
**с примесных
метастабильных
состояний.**

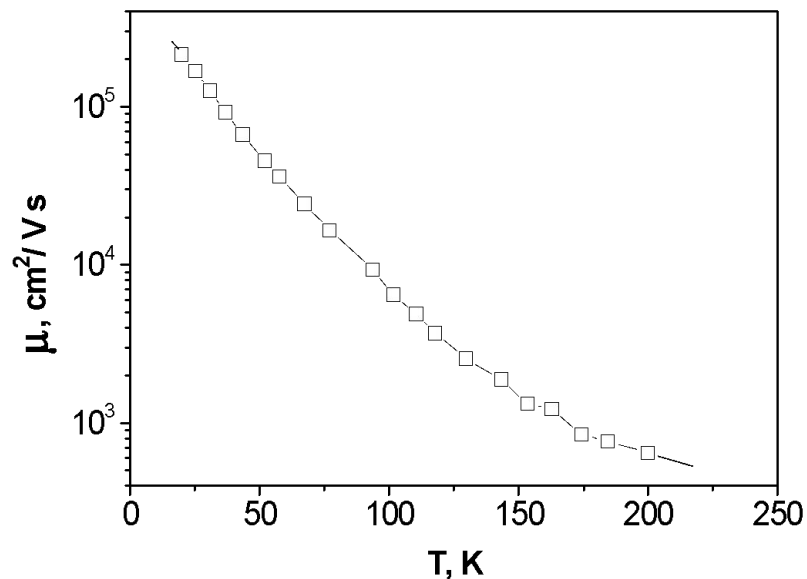
3. Фотопроводимость PbSnTe(In) под действием терагерцового лазерного излучения

- 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

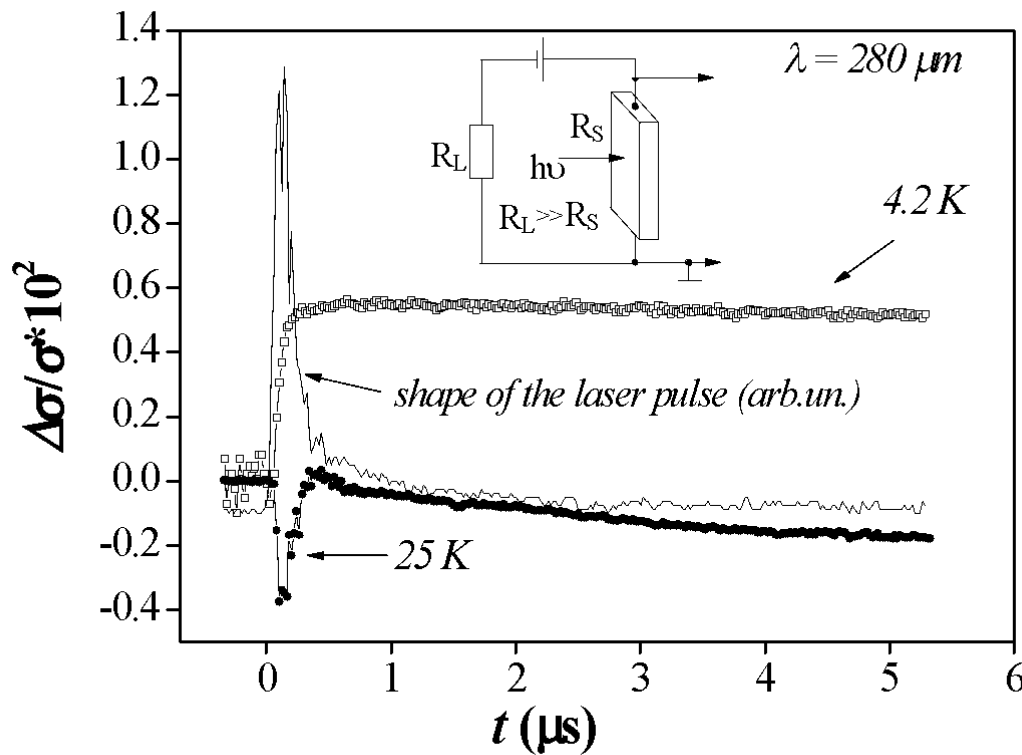


Температурная зависимость
удельного сопротивления и
концентрации электронов



Температурная зависимость
подвижности электронов

Кинетика фотопроводимости



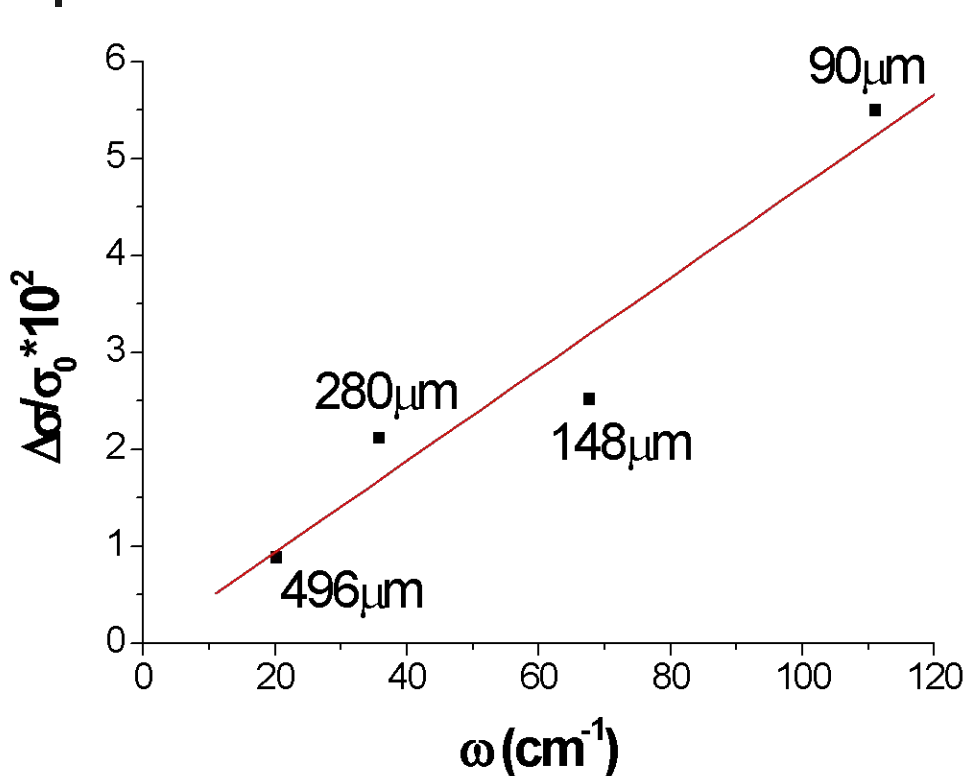
Временной профиль лазерного импульса и кинетика фотопроводимости при различных температурах



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



$$N_{\text{KB}} = 8.7 \cdot 10^{-24} \text{ c}^{-1}$$

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 $E_{\text{кр}} = 0!$

4. Фотоэлектромагнитный эффект в $\text{PbSnTe}(\text{In})$

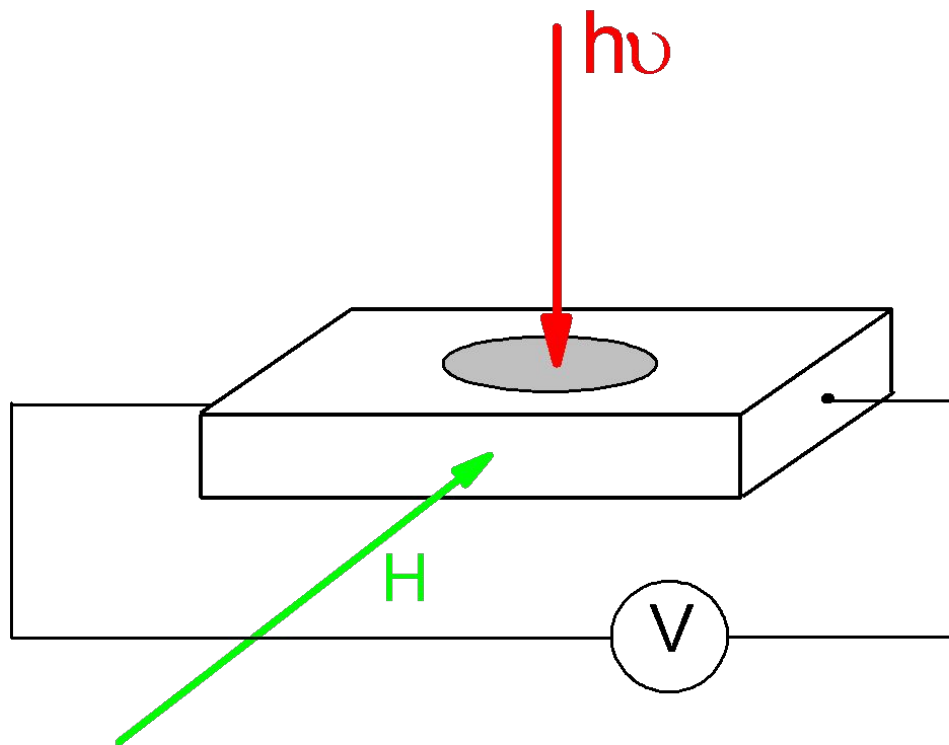
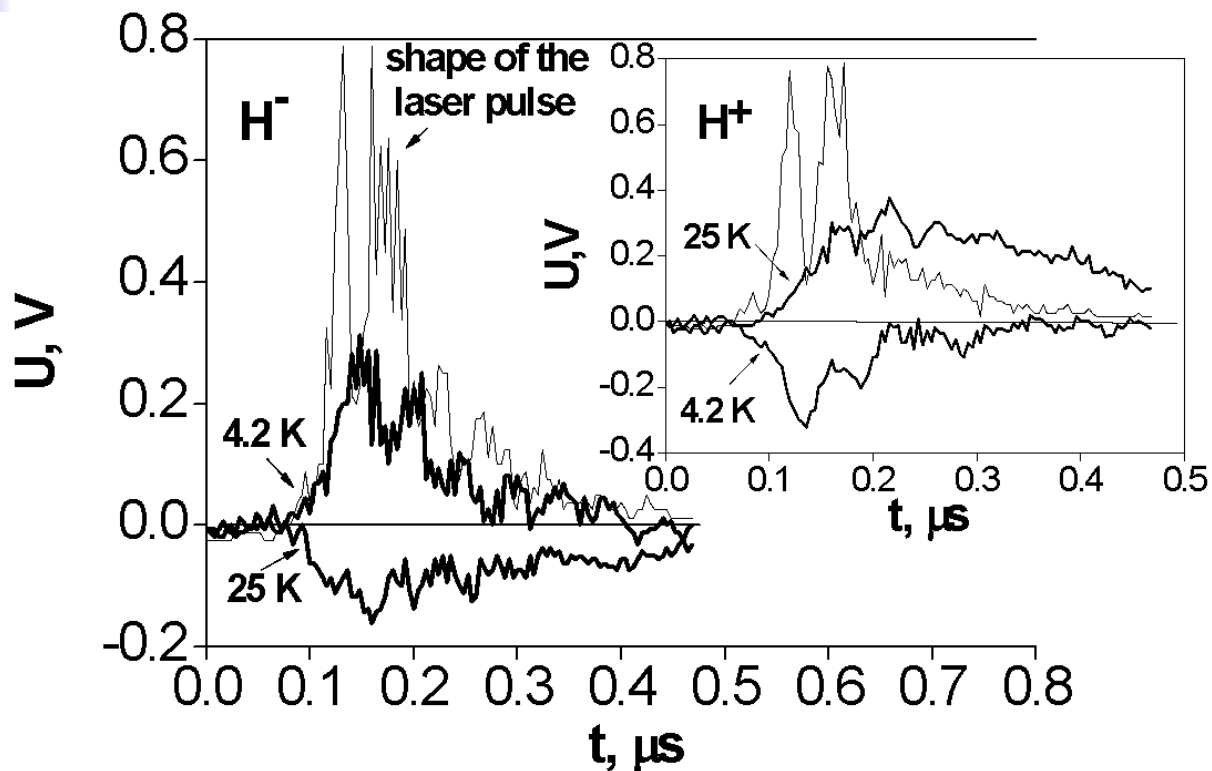


Схема эксперимента

Эксперимент



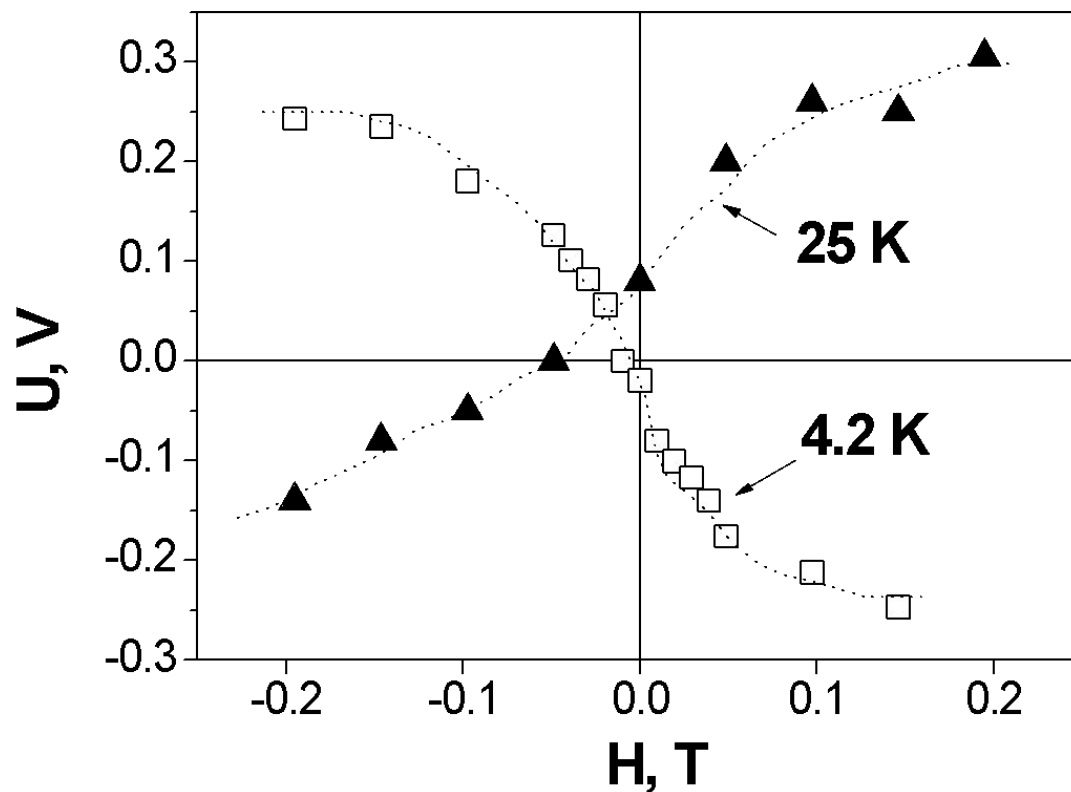
Изменение сигнала при прохождении лазерного импульса для двух полярностей магнитного поля (H^- и $H^+ = 0.195$ Тл) при температурах 4.2 и 25 К.



Особенности

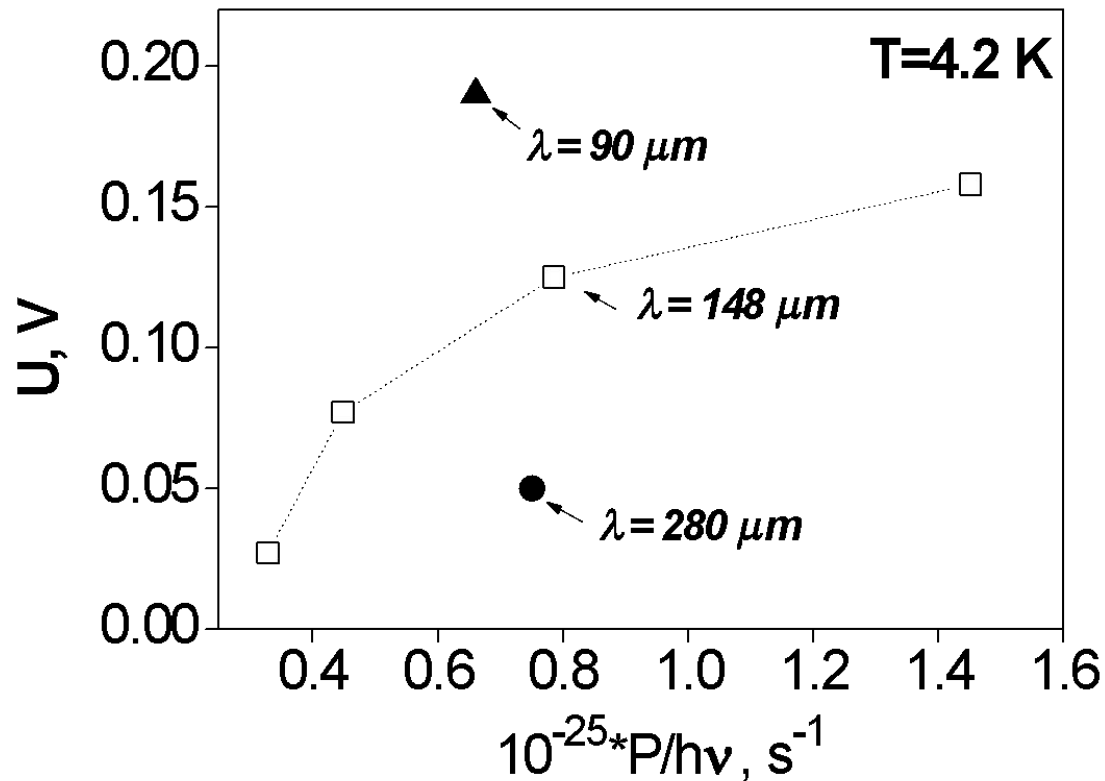
- 1. При 4.2 К имеется задержка сигнала относительно импульса – около 30 нс
- 2. При 25 К знак эффекта меняется на противоположный
- 3. Задержка сигнала относительно импульса при 25 К – около 100-150 нс
- 4. Эффект не зависит от поляризации излучения
- 5. Эффект исчезает при направлении магнитного поля вдоль контактов

Зависимость от магнитного поля



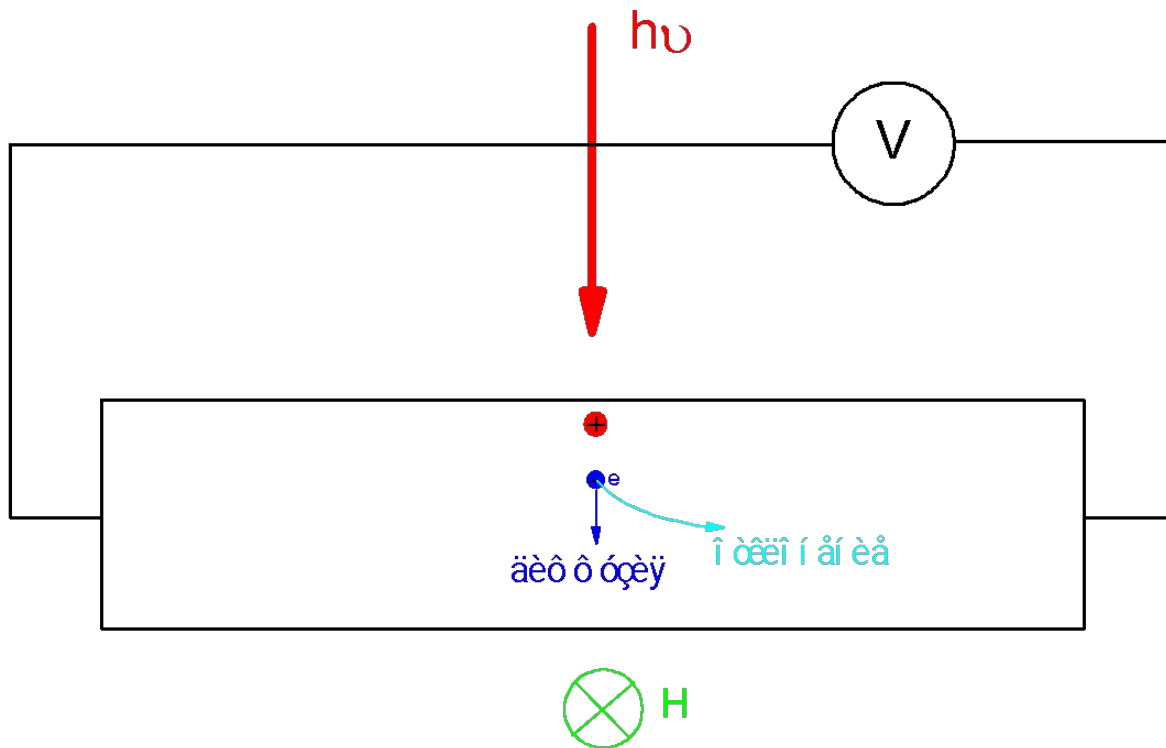
Зависимости максимальной амплитуды сигнала от магнитного поля при температурах 4.2 и 25 К.

Зависимость от мощности импульса



Зависимость максимальной амплитуды сигнала от приведенной мощности лазерного импульса. $H = 0.195$ Тл.

Возможная интерпретация





Отличия от классического ФЭМ эффекта

- 1. Энергия кванта много меньше E_g , эффект монополярный
- 2. Кинетика эффекта не повторяет кинетику фотопроводимости
- 3. Природа эффекта при 4.2 К и 25 К, видимо, несколько различается



Механизм эффекта

- При 4.2 К – градиент концентрации неравновесных электронов, диффузия неравновесных электронов от поверхности
- При 25 К – градиент подвижности электронов при неизменной концентрации, диффузия более быстрых электронов из объема к поверхности



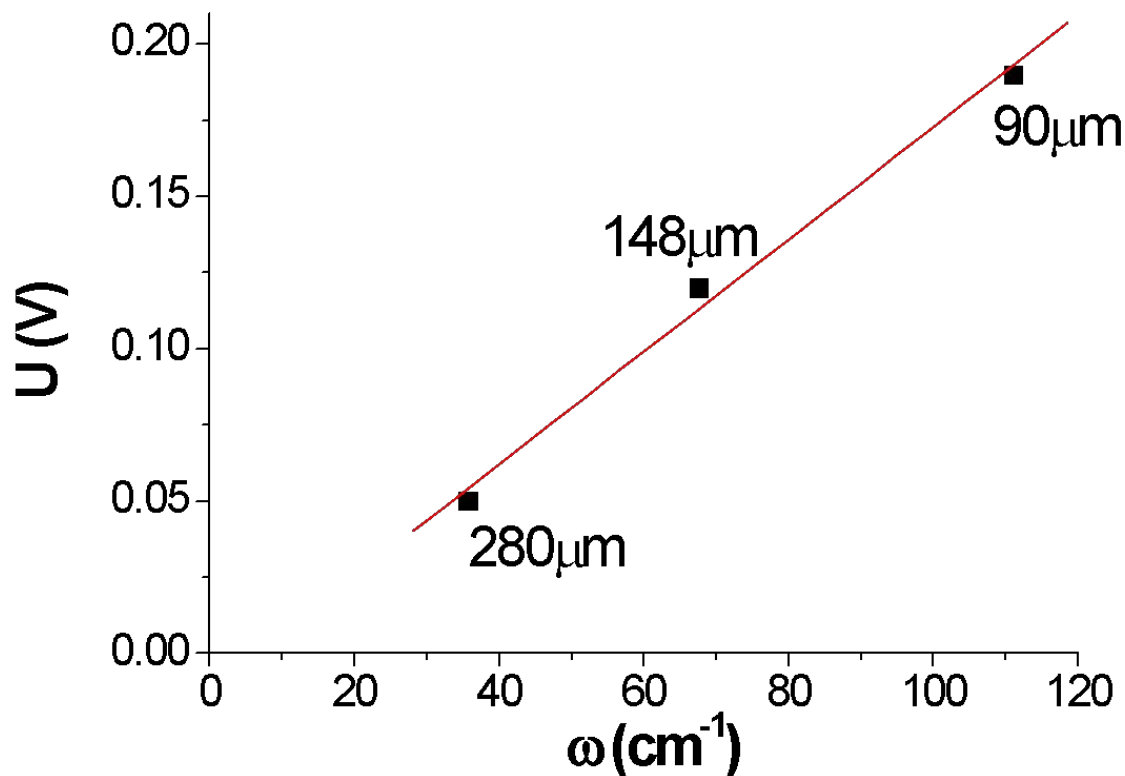
Оценка диэлектрической проницаемости

Если время задержки сигнала при 4.2 К соответствует максвелловскому времени релаксации, то

$$\tau = \varepsilon \varepsilon_0 \rho$$

откуда $\varepsilon \sim 10^7$

Зависимость от длины волны



Опять $E_{\text{кр}} = 0$?



Выводы

Обнаружен ряд новых фотоэлектрических эффектов в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te(In)}$ под действием терагерцового лазерного излучения:

- Положительная задержанная фотопроводимость при $T < 10$ К, связанная с фотовозбуждением с метастабильных примесных состояний,
- Отрицательная незадержанная фотопроводимость при $T \sim 25$ К, связанная с разогревом электронного газа
- Красная граница фотоэффекта, по крайней мере, выше 496 мкм. Экстраполяция к нулевому сигналу дает $E_{\text{кр}} = 0!$
- Обнаружен монополярный фотоэлектромагнитный эффект
- Оценка диэлектрической проницаемости дает значение 10^7 в условиях фотовозбуждения
- Для фотоэлектромагнитного эффекта экстраполяция к нулевому сигналу также дает $E_{\text{кр}} = 0!$