Памяти Б.А. Волкова

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

Д.Р.Хохлов[1], А.В.Галеева[1], Д.Е.Долженко[1], Л.И.Рябова[1], А.В. Никорич[2], С.Д.Ганичев[3], С.Н.Данилов[3], 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

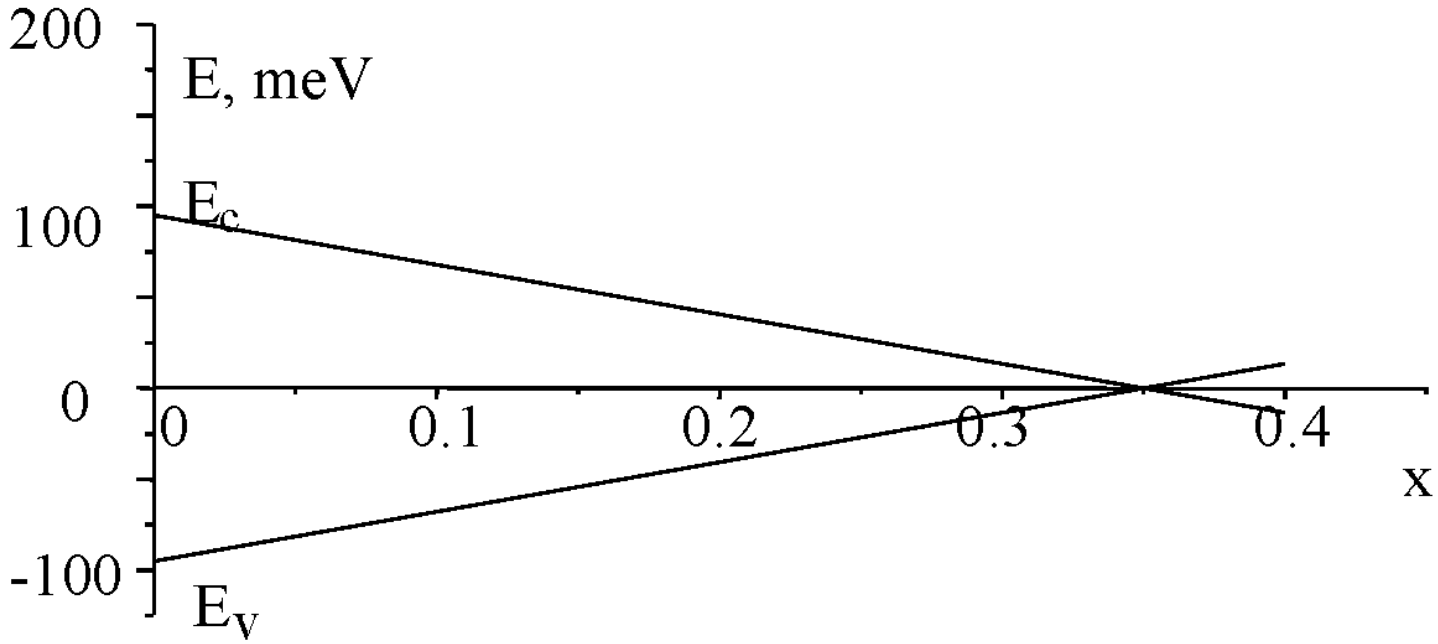
- 1. Нелегированные сплавы на основе теллурида свинца
- 2. Легирование теллурида свинца индием
  - А) Стабилизация уровня Ферми
  - Б) Задержанная фотопроводимость
  - В) Примесные метастабильные состояния
- 3. Фотопроводимость в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ под действием терагерцовых лазерных импульсов
- 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 meV при T = 0 K в L-точке зоны Бриллюэна
- 3. Высокая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon \sim 10^3$.
- 4. Малые эффективные массы $m \sim 10^{-2}$ m_e.

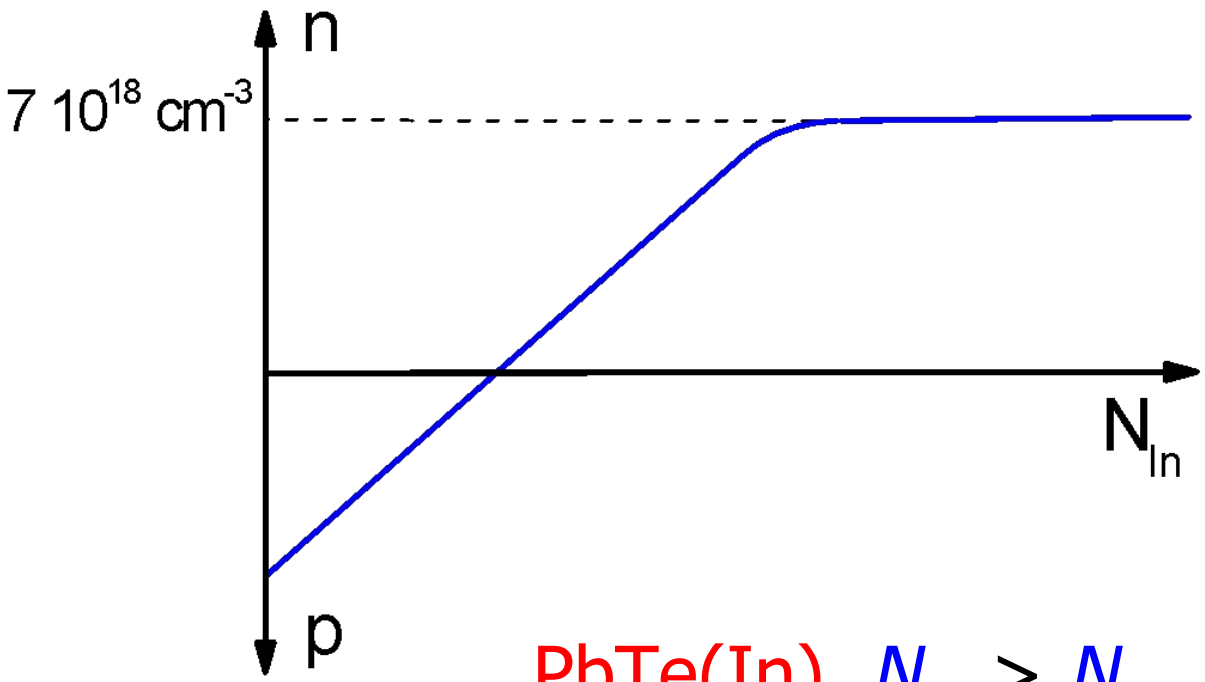
Твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xTe$



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

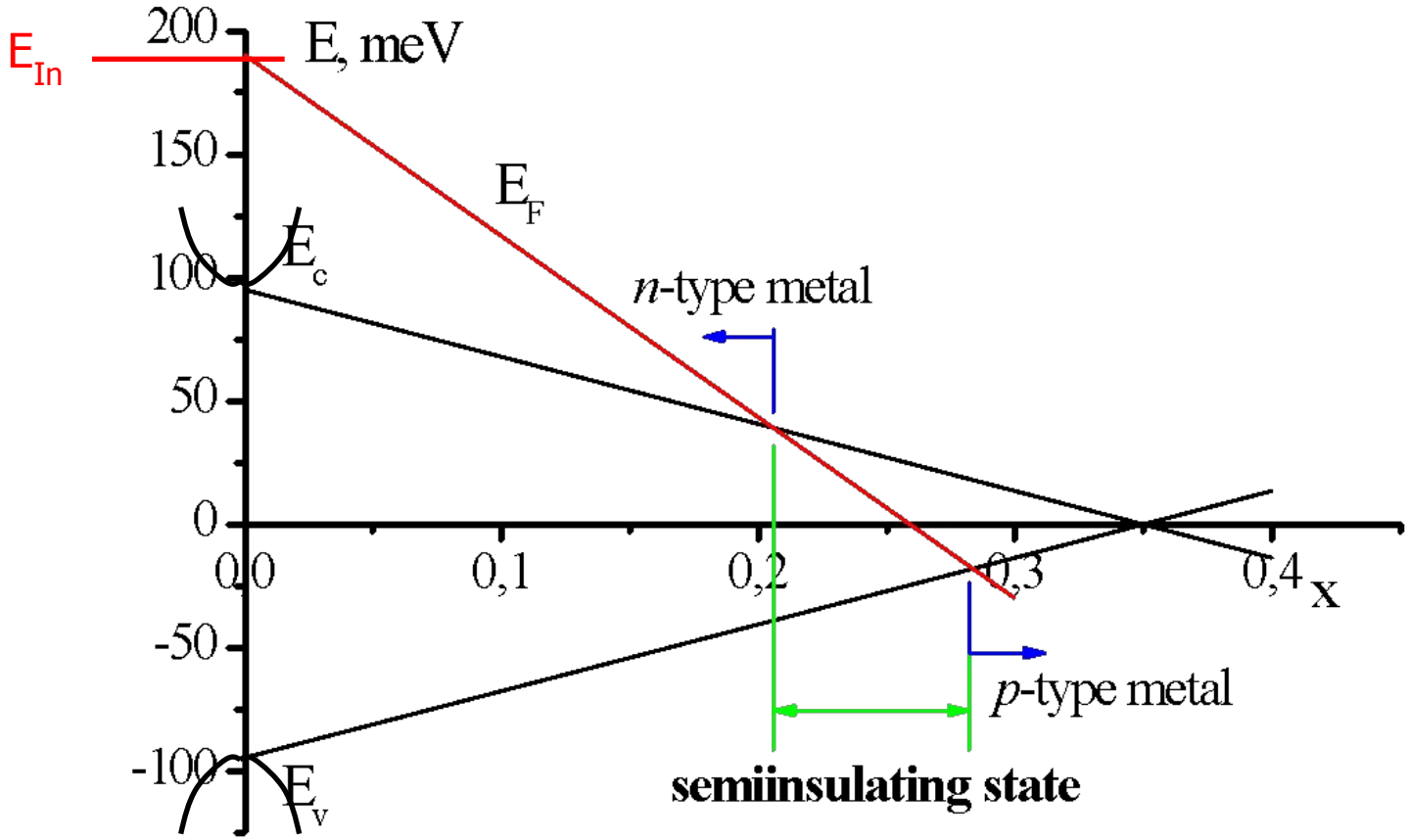
2. Эффекты, появляющиеся при легировании

Стабилизация уровня Ферми.

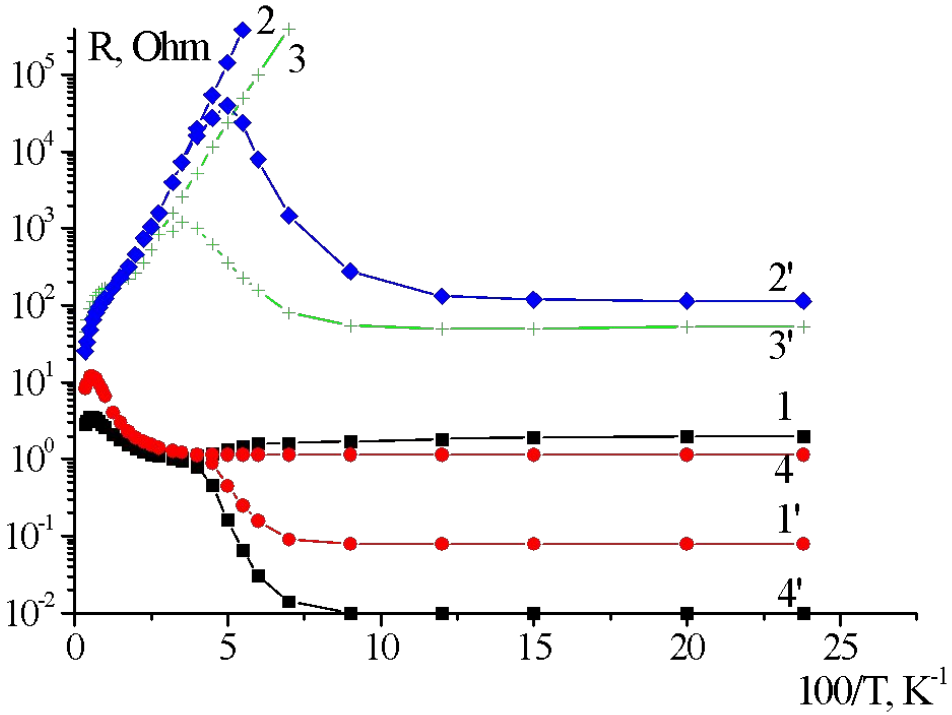


PbTe(In), $N_{In} > N_i$

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

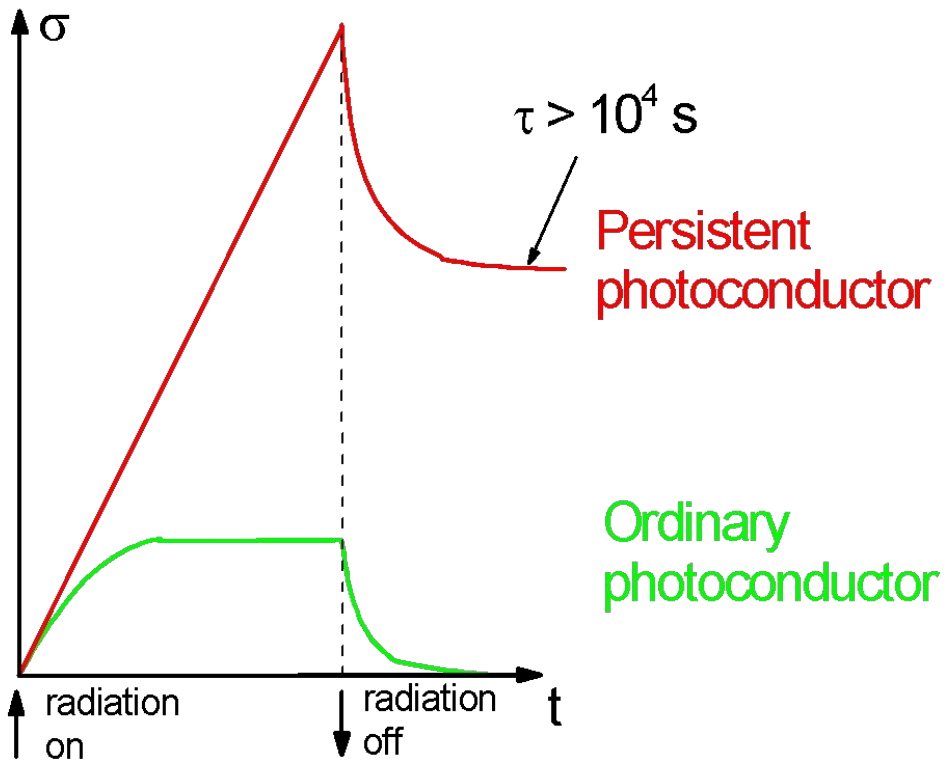


Задержанная фотопроводимость



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



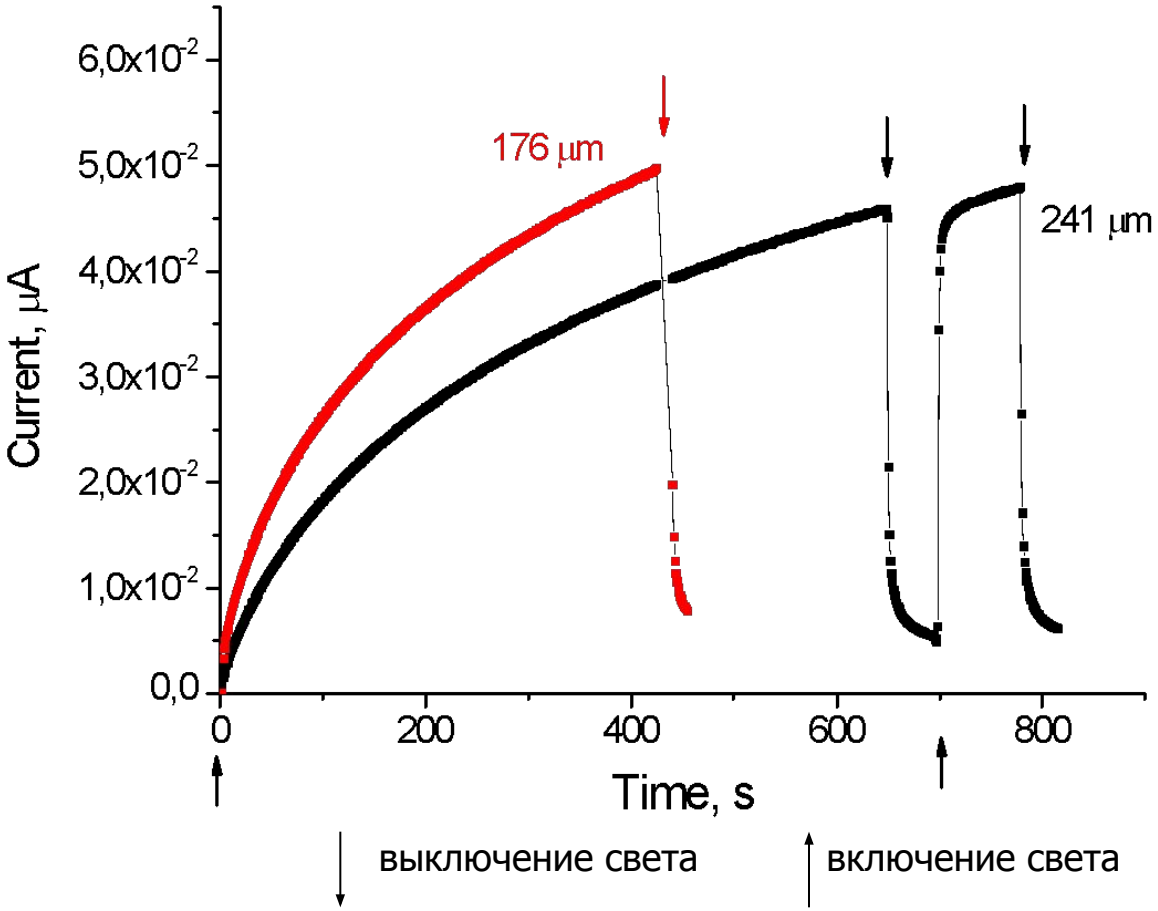
Большое время жизни фотовозбужденных электронов связано с существованием барьера между локальными и зонными состояниями – **DX-подобные примесные центры**

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

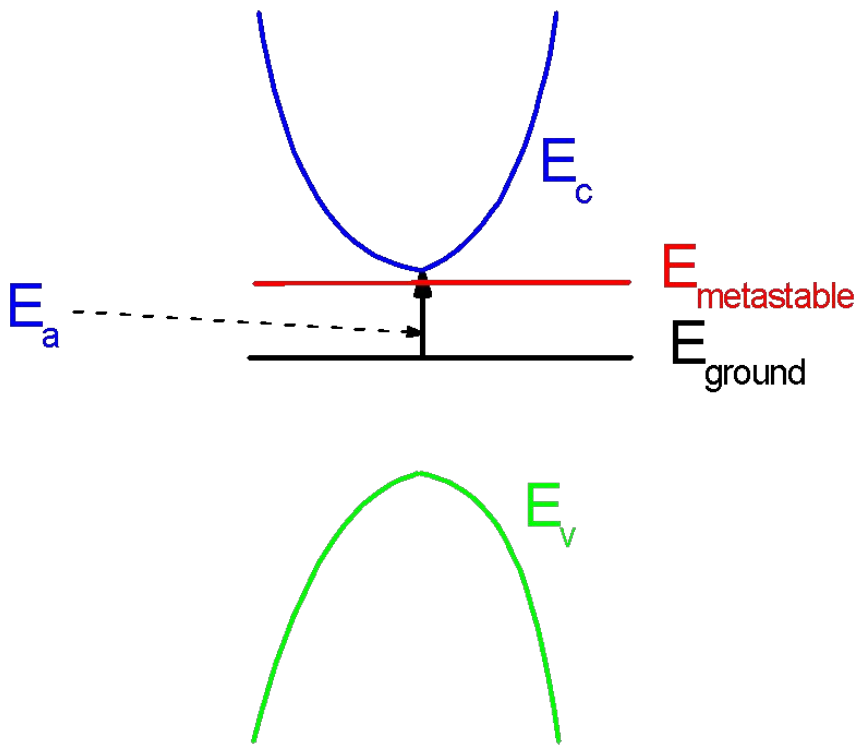


Сильный фотоотклик на длинах волн 176 и 241 мкм

λ = 241 мкм выше, чем λ_{red} = 220 мкм наблюдавшаяся в Ge(Ga)

Важное замечание

E_λ=(241, 176)μm < E_a

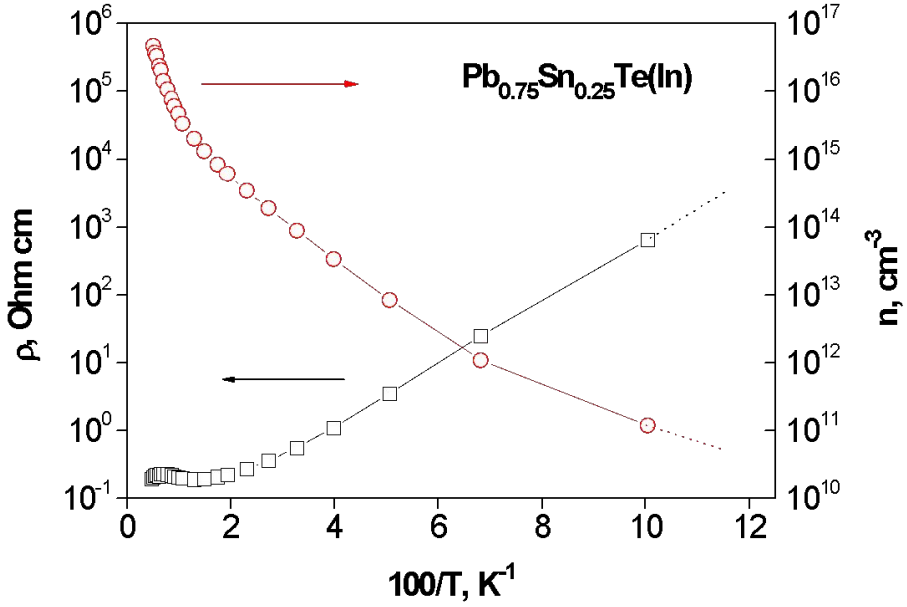


За фотопроводимость отвечает возбуждение **с примесных метастабильных состояний.**

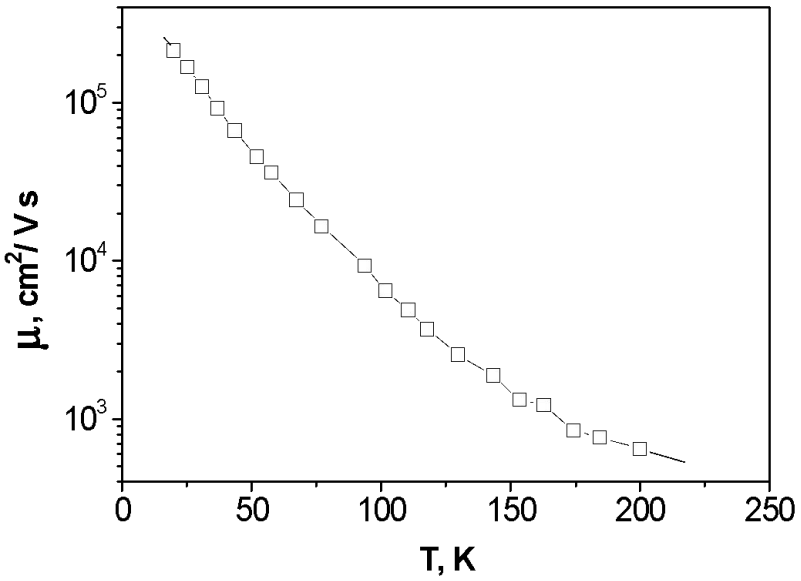
3. Фотопроводимость PbSnTe(In) под действием терагерцового лазерного излучения

- 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

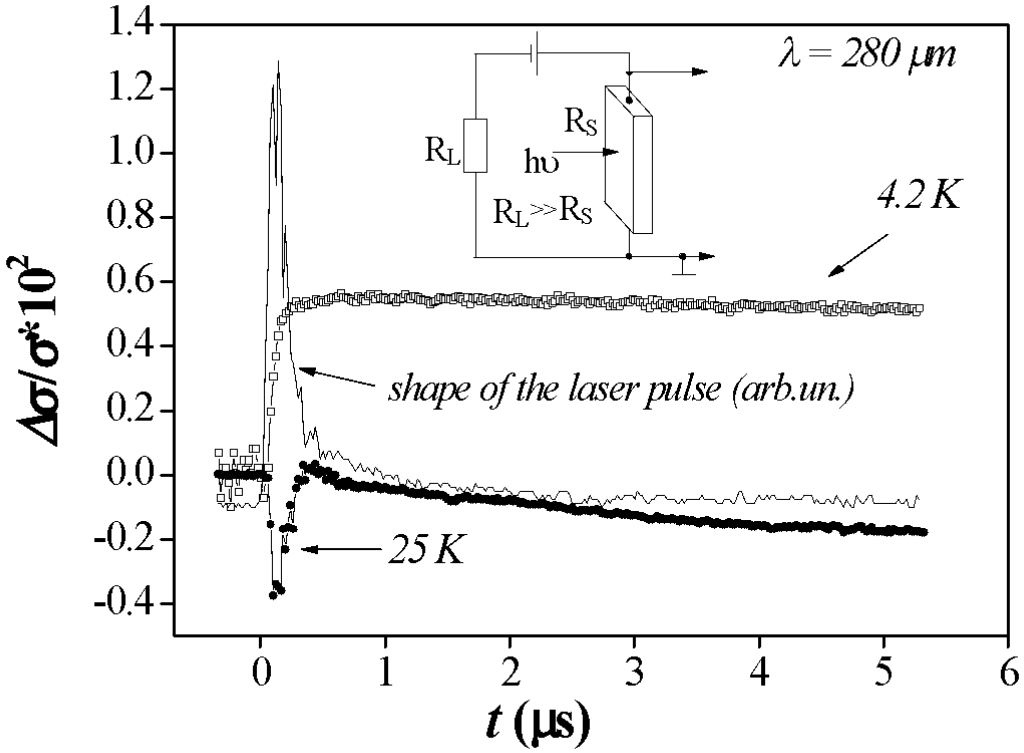


Температурная зависимость удельного сопротивления и концентрации электронов



Температурная зависимость подвижности электронов

Кинетика фотопроводимости

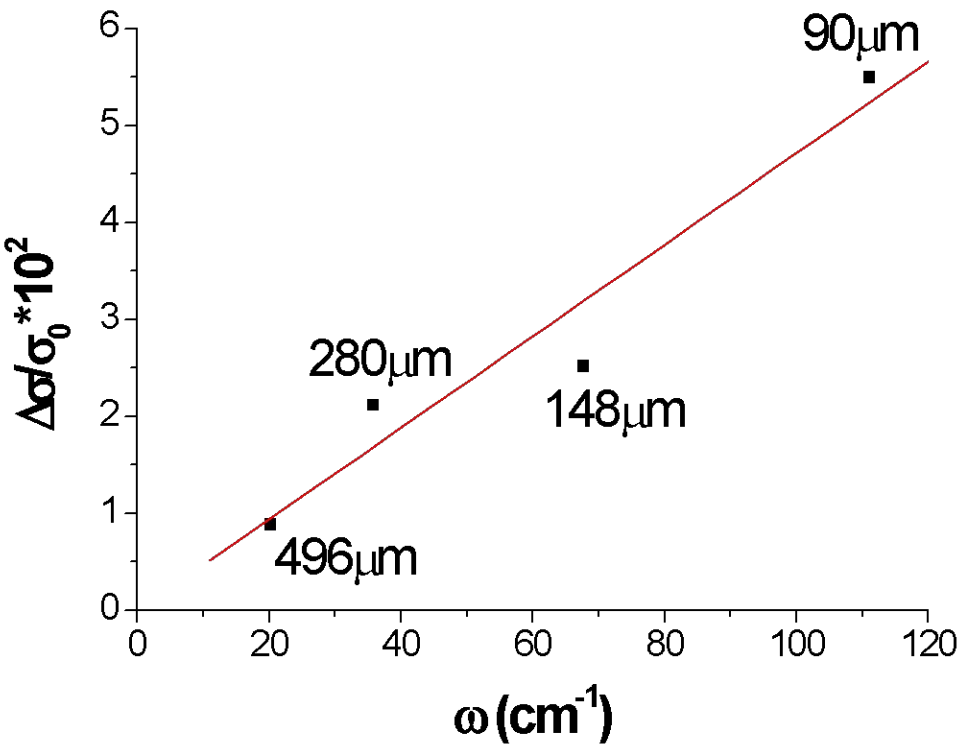


Временной профиль лазерного импульса и кинетика фотопроводимости при различных температурах

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



$N_{кв}=8.7\ 10^{-24}\ c^{-1}$

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 $E_{кр}=0$!

4. Фотоэлектромагнитный эффект в PbSnTe(In)

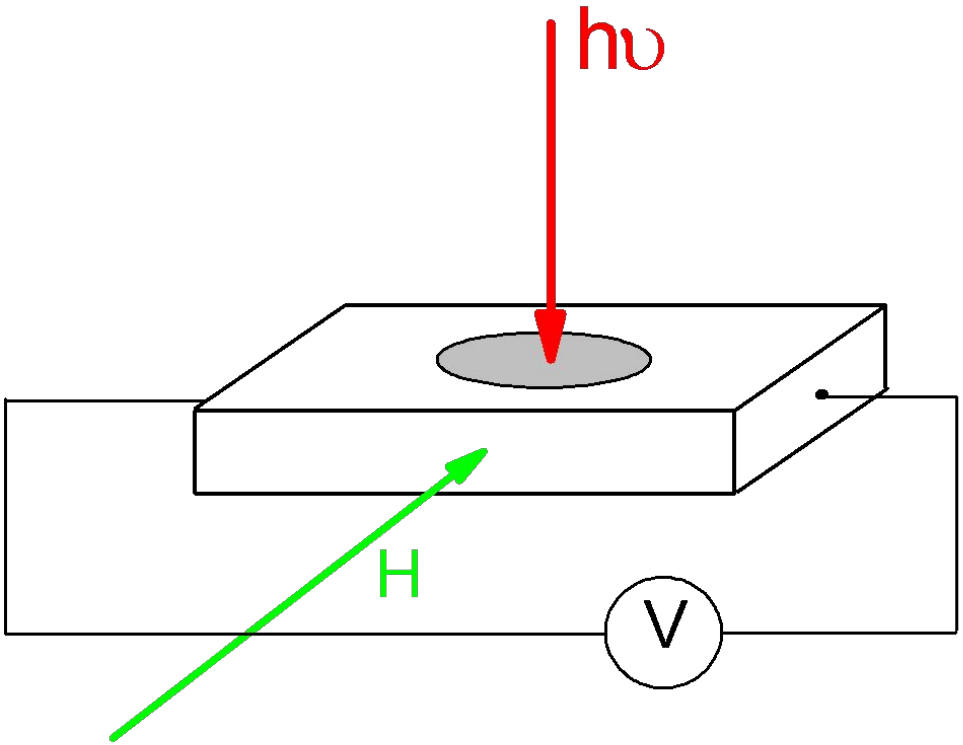
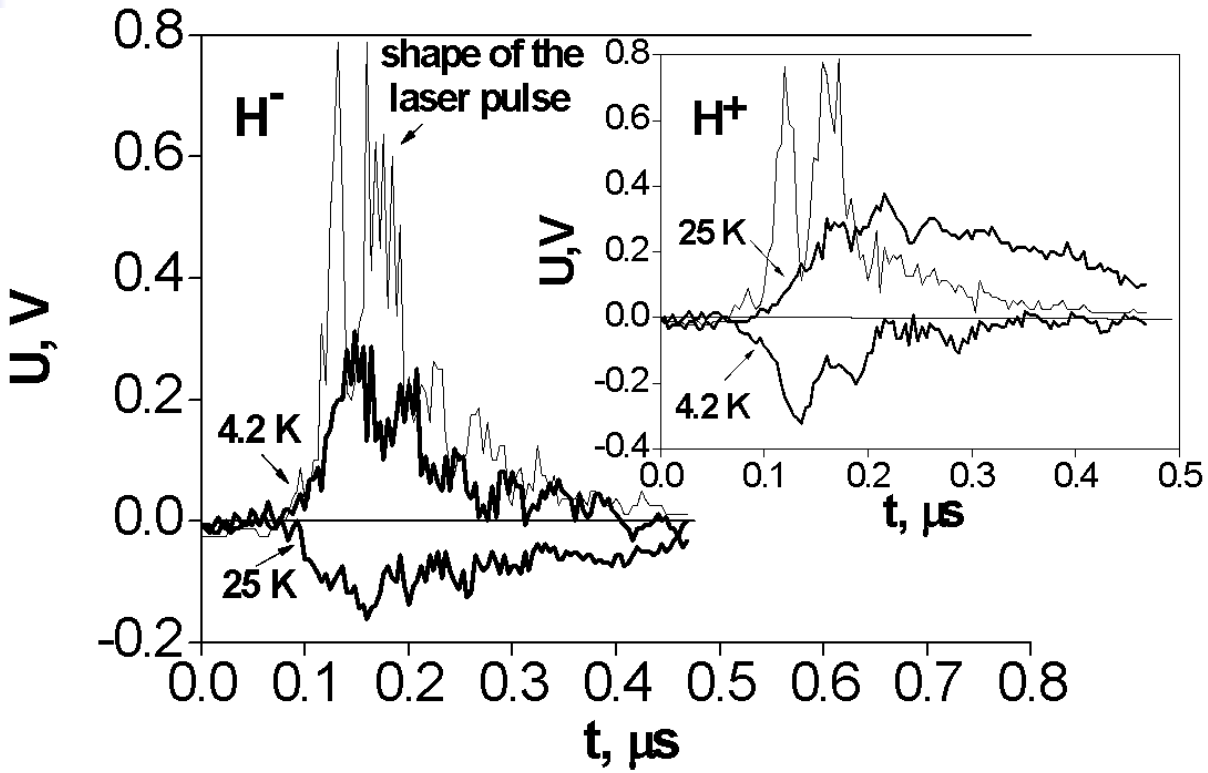


Схема эксперимента

Эксперимент

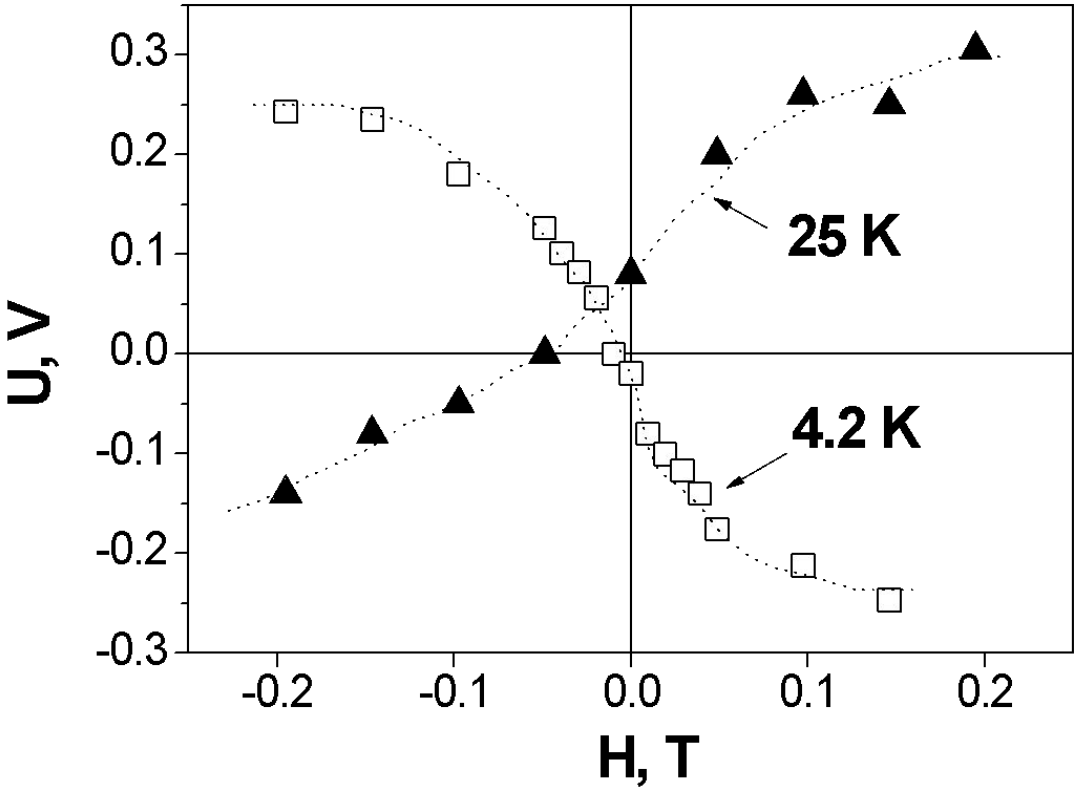


Изменение сигнала при прохождении лазерного импульса для двух полярностей магнитного поля (H- и H+ = 0.195 Тл) при температурах 4.2 и 25 К.

Особенности

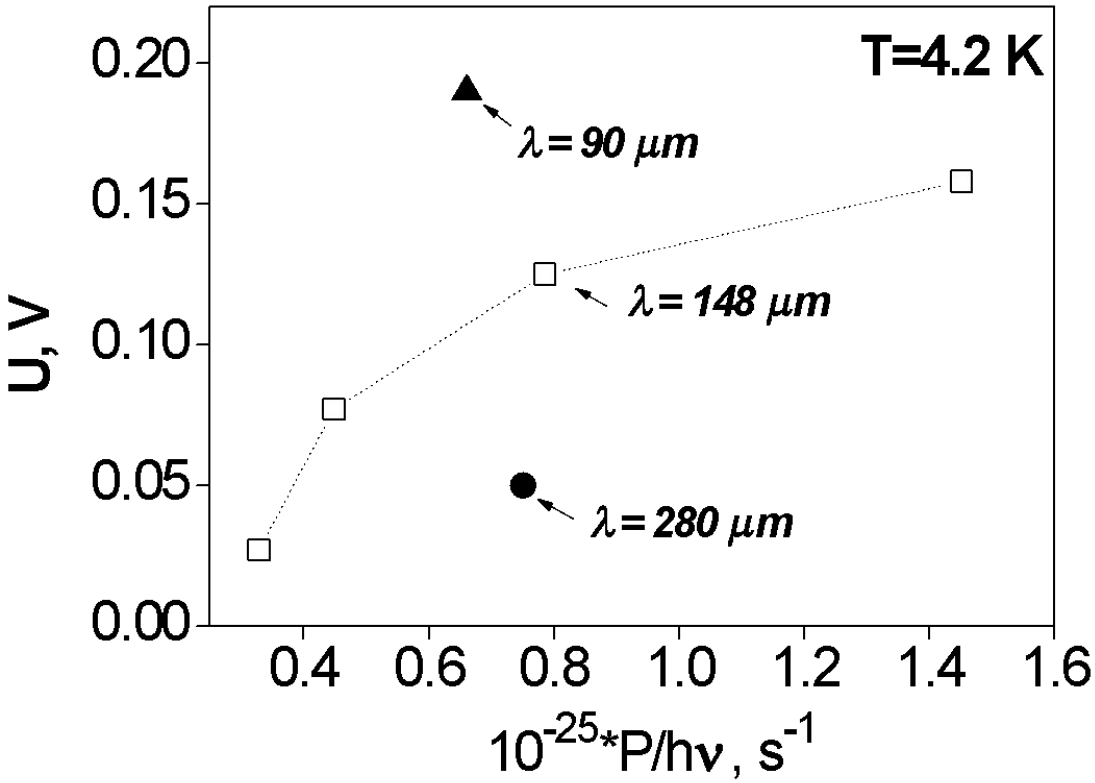
- 1. При 4.2 К имеется задержка сигнала относительно импульса – около 30 нс
- 2. При 25 К знак эффекта меняется на противоположный
- 3. Задержка сигнала относительно импульса при 25 К – около 100-150 нс
- 4. Эффект не зависит от поляризации излучения
- 5. Эффект исчезает при направлении магнитного поля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

Зависимость от магнитного поля



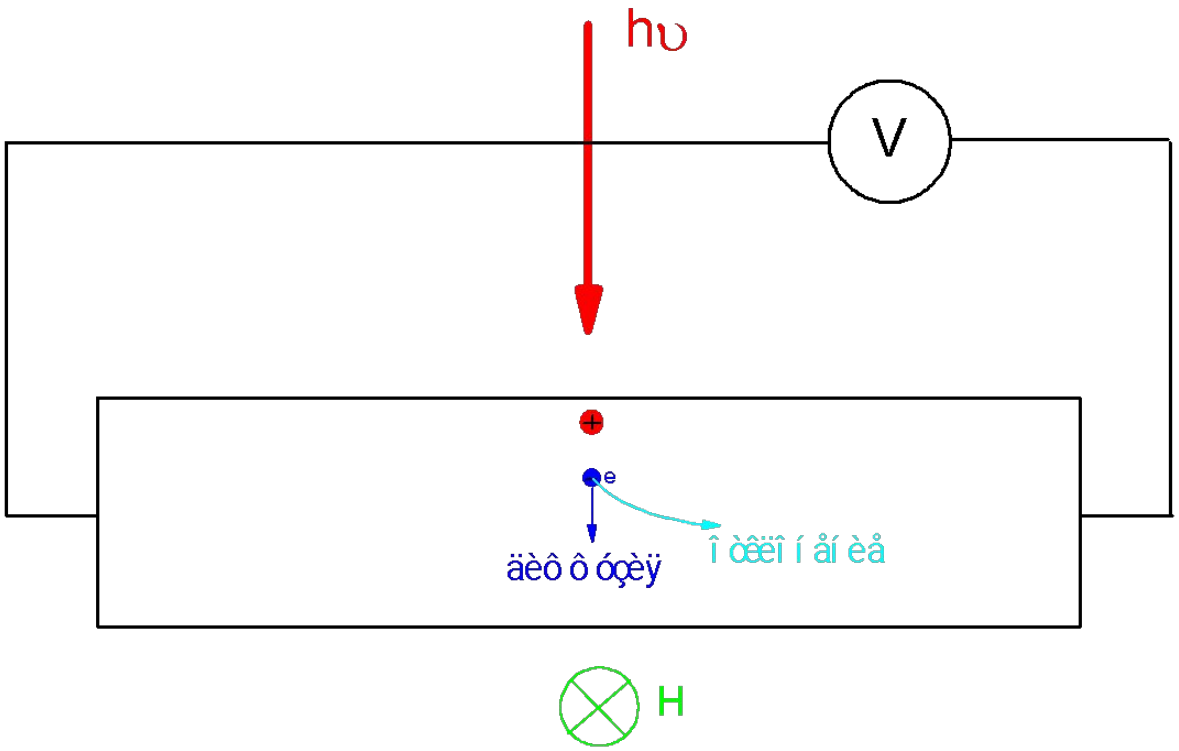
Зависимости максимальной амплитуды сигнала от магнитного поля при температурах 4.2 и 25 К.

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

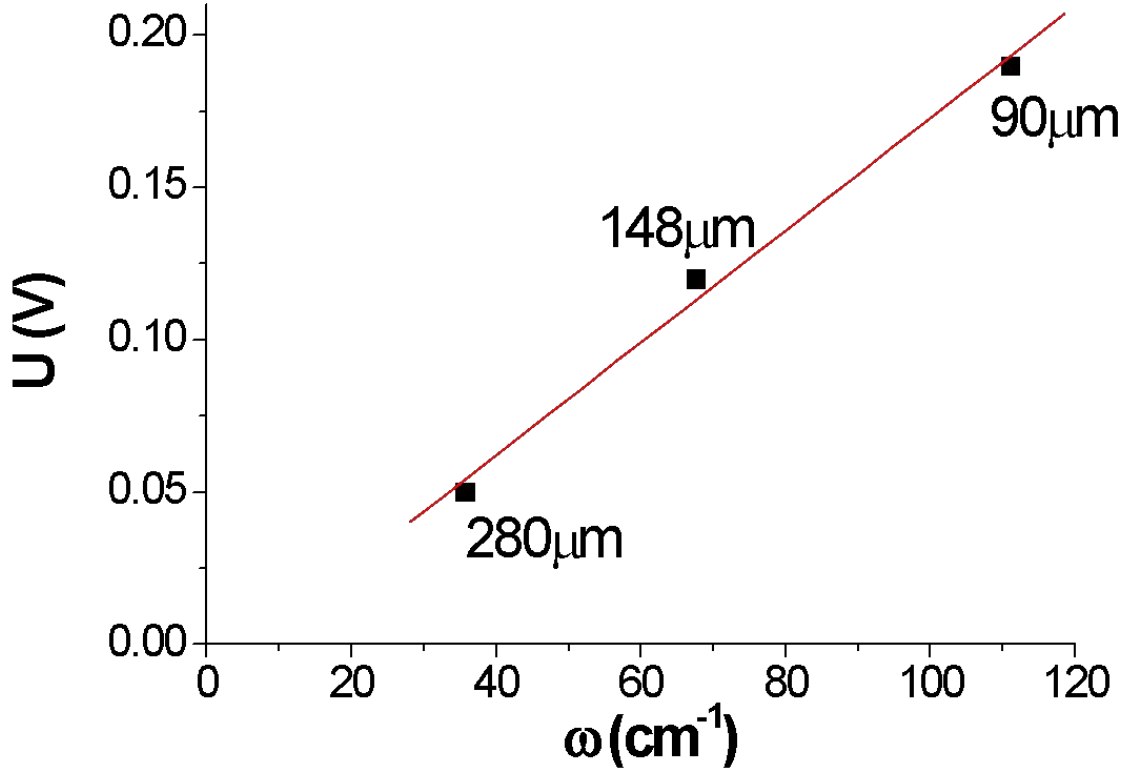
Оценка диэлектрической проницаемости

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 $E_{кр}=0$?

Выводы

Обнаружен ряд новых фотоэлектрических эффектов в $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$) под действием терагерцового лазерного излучения:

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