

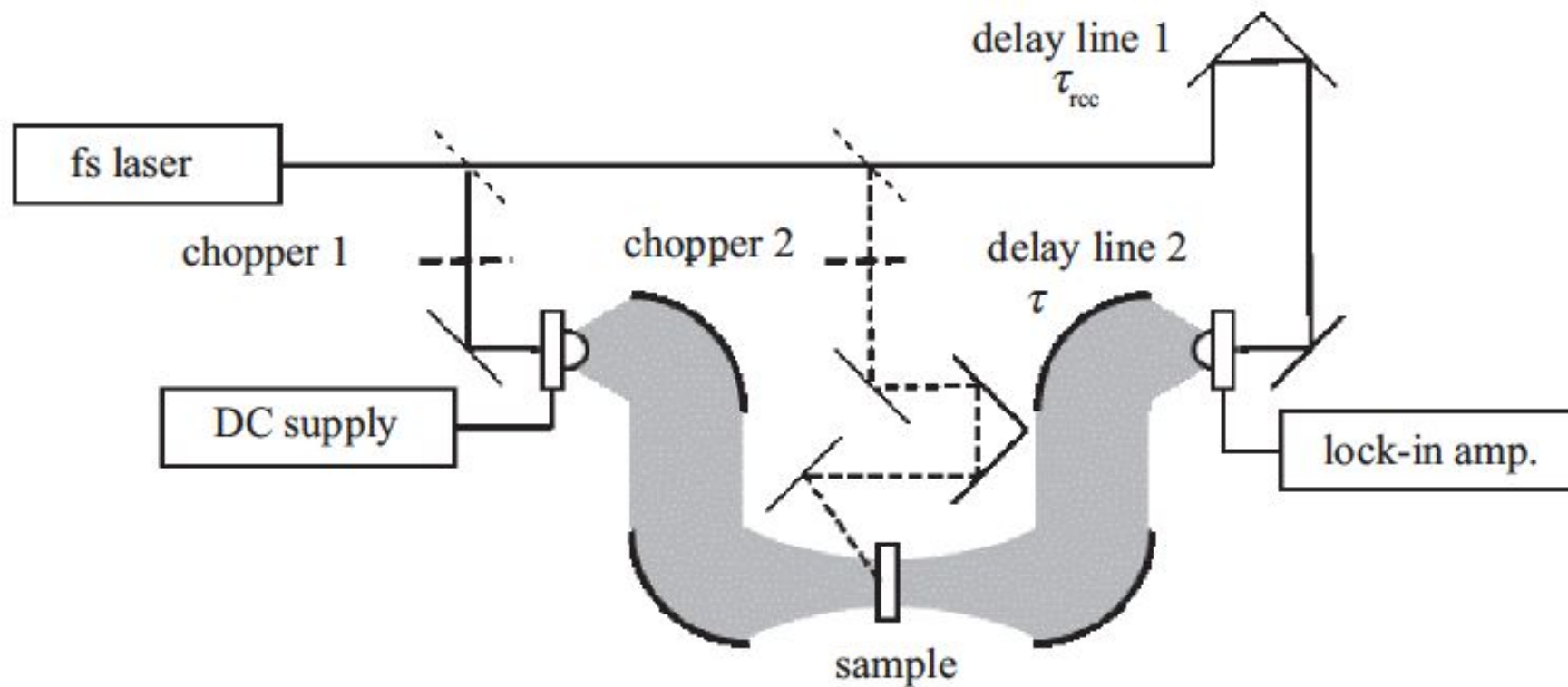


THz pump-probe

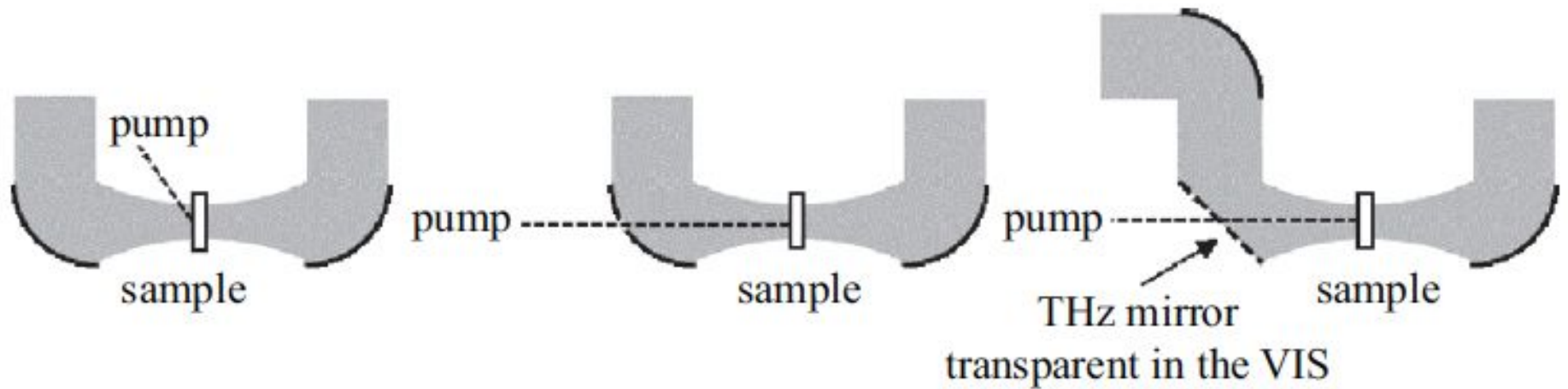
Лекция 29 марта 2020 года

TRTS – ТГц спектроскопия с временным разрешением

Схема спектрометра для TRTS



Схемы реализации метода



Временной анализ принятого сигнала

$$S_{\text{det}}(\tau_{\text{rec}}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{laser}}(t - t' - \tau_{\text{rec}}) G(t') S_{\text{THz}}(t) dt' dt.$$

$S_{\text{THz}}(t)$ - ТГц сигнал, который падает на приемник, $G(t)$ это временной отклик приемника $S_{\text{laser}}(t)$ профиль временного импульса на приемнике τ_{rec} - время задержки между источником и детектором .

Это некоторая общая формула для метода анализа временного отклика

ТГц отклик образца при его исследовании

$$S_{\text{THz}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{THz,emit}}(t - t'') T(t'') dt''.$$

$T(t)$ временной отклик образца – обратное преобразование Фурье от спектра пропускания

$$T(t) \equiv T(t, \tau) = T_0(t) + \Delta T(t - \tau).$$

$T_0(t)$ и $\Delta T(t - \tau)$ Временной отклик «не облученного» и «облученного» образцов

$$S_{\text{det}}(\tau_{\text{rec}}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{laser}}(t - t' - \tau_{\text{rec}}) S_{\text{THz,emit}}(t - t'') \times T(t'', \tau) G(t') dt dt' dt''. \quad (1)$$

Свойство фото-индуцированного отклика среды

$$T(t, \tau) = T_0(t) + \int_{-\infty}^t \chi(t - t') I_{\text{laser}}(t', \tau) dt'.$$

Фотоиндуцированный временной отклик образца не является мгновенным. Это означает, что пропускание в момент времени t зависит от фотоиндуцированных измерений, которые происходят за некоторое время до

этого

$$T_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T_0(\omega) e^{j\omega t} dt.$$

По принципу причинности

$$\chi(t < 0) = 0$$

$$\Delta T(t - \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(t - t') I_{\text{laser}}(t', \tau) dt'.$$

$$t' \rightarrow +\infty$$

Для не облучаемого образца

$$S_o(\tau_{\text{rec}}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{laser}}(t - t' - \tau_{\text{rec}}) S_{\text{THz,emit}}(t - t'') \times T_o(t'') G(t') dt dt' dt''.$$

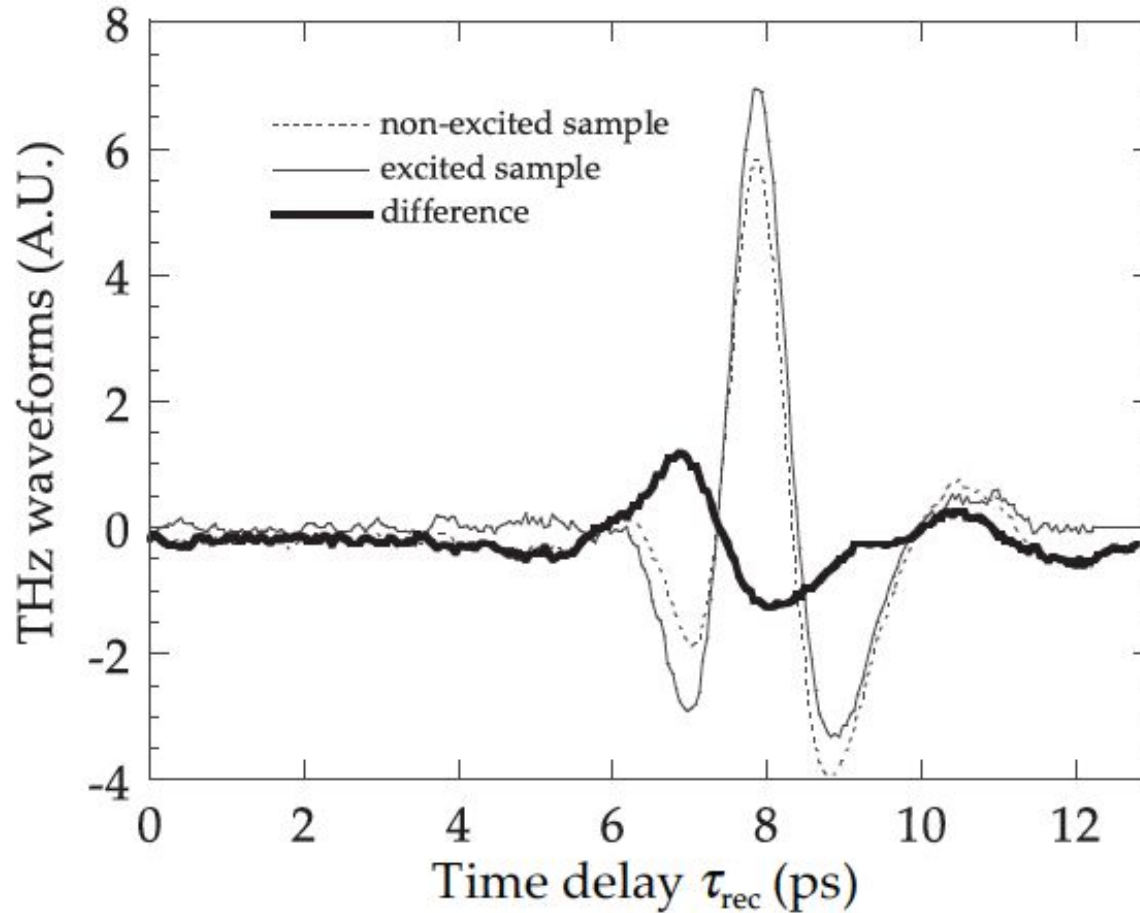
$$S_o(\tau_{\text{rec}}) = \int_{-\infty}^{+\infty} [S_{\text{THz,emit}} \otimes T_o](t) \times [S_{\text{laser}} \otimes G](t - \tau_{\text{rec}}) dt.$$

$$\Delta S(\tau_{\text{rec}}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [S_{\text{THz,emit}} \otimes \Delta T](t - \tau) \times [S_{\text{laser}} \otimes G](t - \tau_{\text{rec}}) dt.$$

Измеряется величина

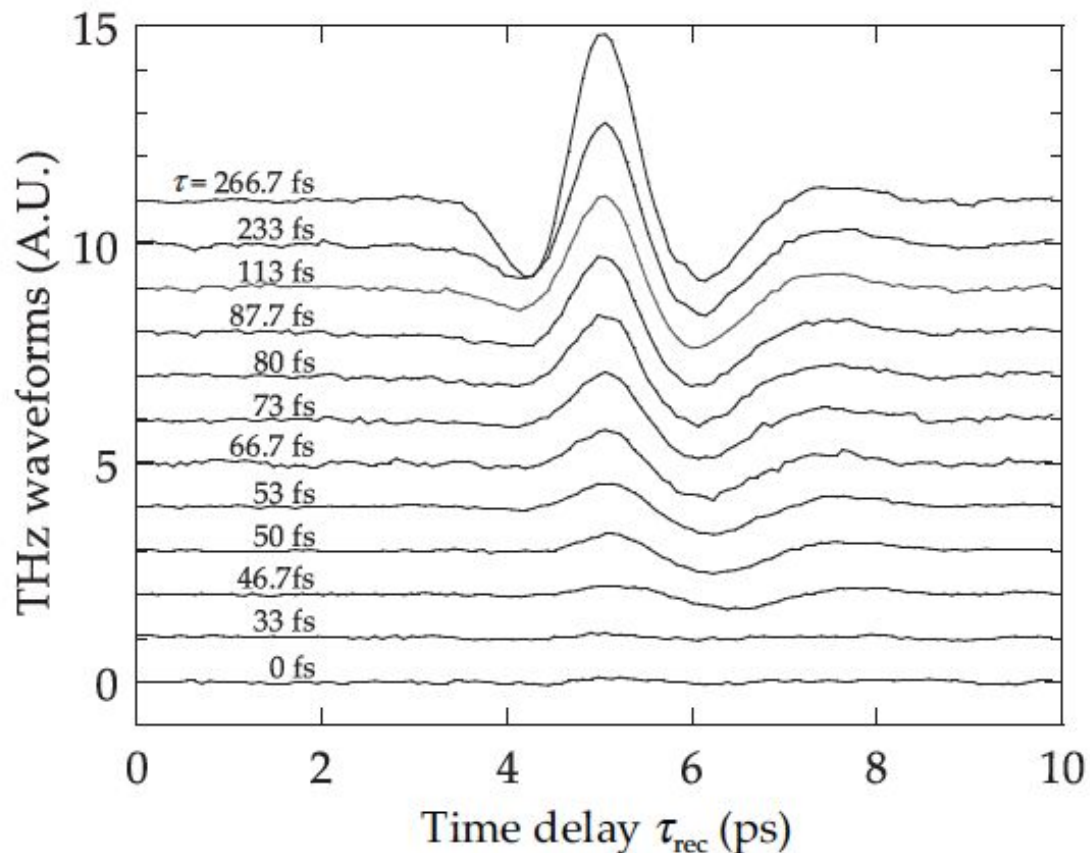
$$S_{\text{THz,emit}} \otimes \Delta T.$$

Пример реализации трех импульсной схемы



ТГц импульсы, излучаемые пластиной GaAs толщиной 500 мкм, который накачивается лазерным импульсом при $\lambda = 800$ нм (сплошная линия). Время задержка между оптическим возбуждением и оптическим зондом составляет $\tau = 2,67$ пс.

Пример реализации трех импульсной схемы: исследование медленные индуцированные



Разностные ТГц сигналы излучаемые пластиной 500 мкм, накачиваемой лазерным импульсом при $\lambda = 800$ нм. Каждая кривая соответствует разным значениям временной задержки τ между оптическим возбуждением и оптическим зондированием.

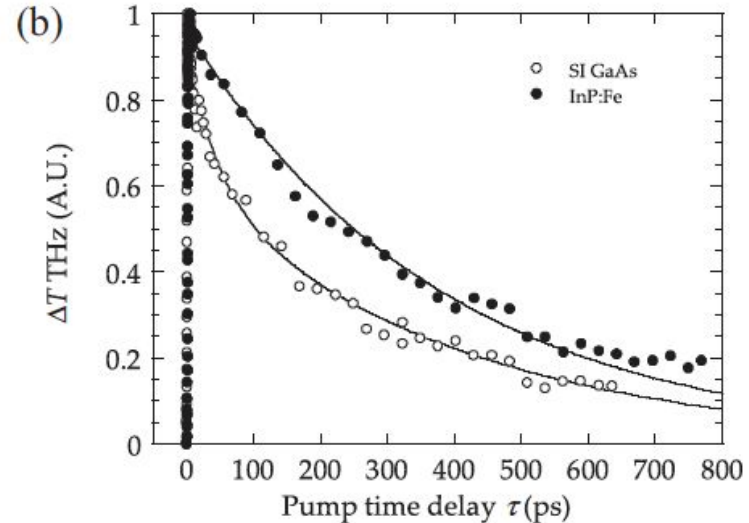
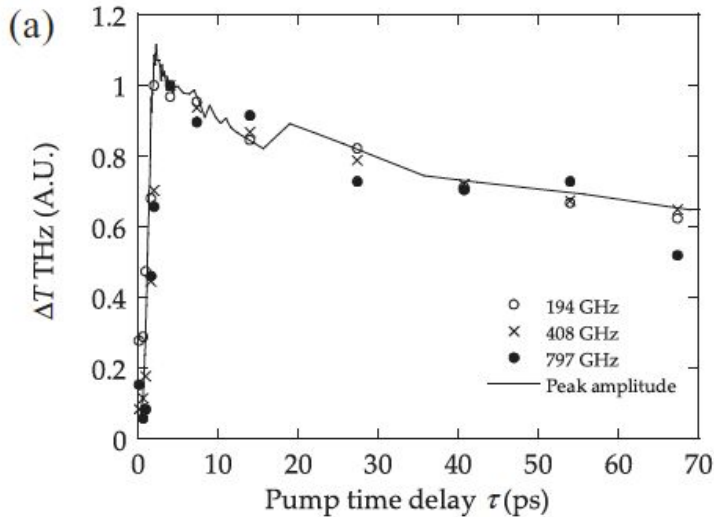
Пример реализации трех импульсной схемы:
исследование медленные индуцированные

процессы
Так как функция у нас медленно меняется, то

$$[S_{\text{THz,emit}} \otimes \Delta T](t - \tau) \approx S_{\text{THz,emit}}(t - \tau) \times \Delta T(t - \tau)$$

$$\Delta S(\tau_{\text{rec}}, \tau) \approx \Delta T(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{THz,emit}}(t) [S_{\text{laser}}(t - \tau_{\text{rec}}) \otimes G(t - \tau_{\text{rec}})] dt.$$

Кинетический анализ



- (а) Фотоиндуцированное изменение пропускания пластины Si-GaAs. Экспериментальные точки соответствуют различным частотам спектра поглощения, в то время как непрерывная линия соответствует временной динамике амплитуды ТГц импульса.
- (б) фото-индуцированное изменение поглощения пластины Si-GaAs и InP:Fe. Сплошные линии экспоненциальная подгонка.

Некоторые методические замечания

$$S_o(\tau_{\text{rec}}) = \int_{-\infty}^{+\infty} [S_{\text{THz,emit}} \otimes T_o](t) \times [S_{\text{laser}} \otimes G](t - \tau_{\text{rec}}) dt.$$



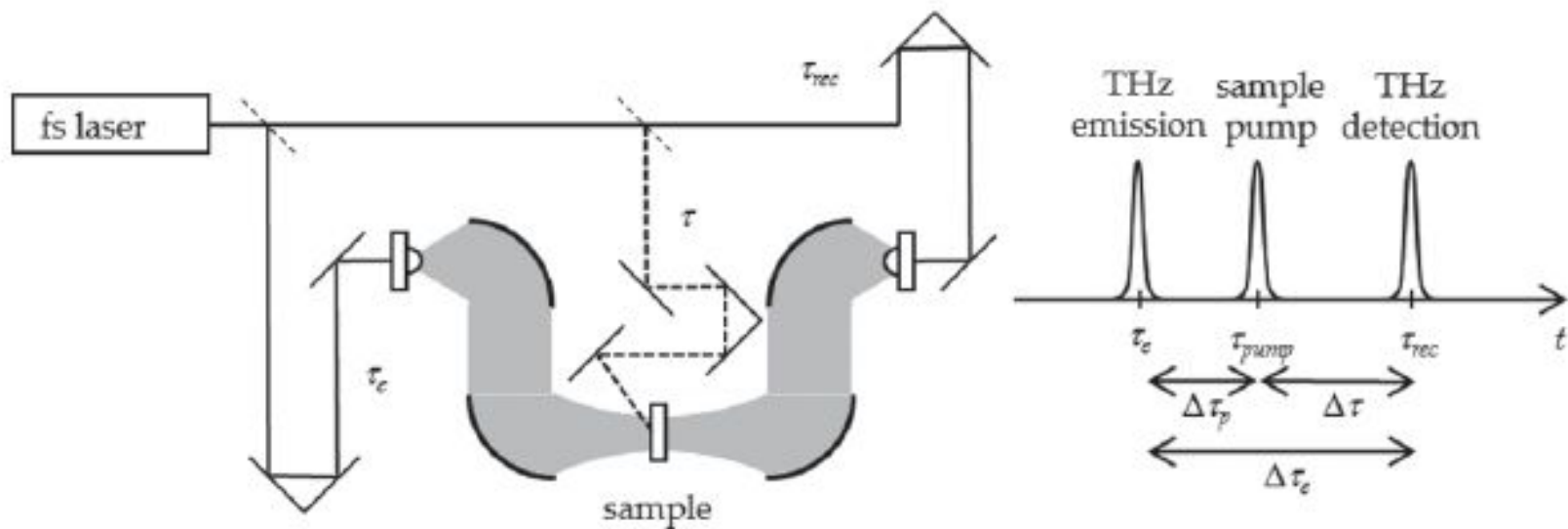
$$S_o(\omega) = S_{\text{THz,emit}}(\omega) T_o(\omega) S_{\text{laser}}^*(\omega) G^*(\omega)$$

$$\Delta S(\tau_{\text{rec}}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [S_{\text{THz,emit}} \otimes \Delta T](t - \tau) \times [S_{\text{laser}} \otimes G](t - \tau_{\text{rec}}) dt.$$

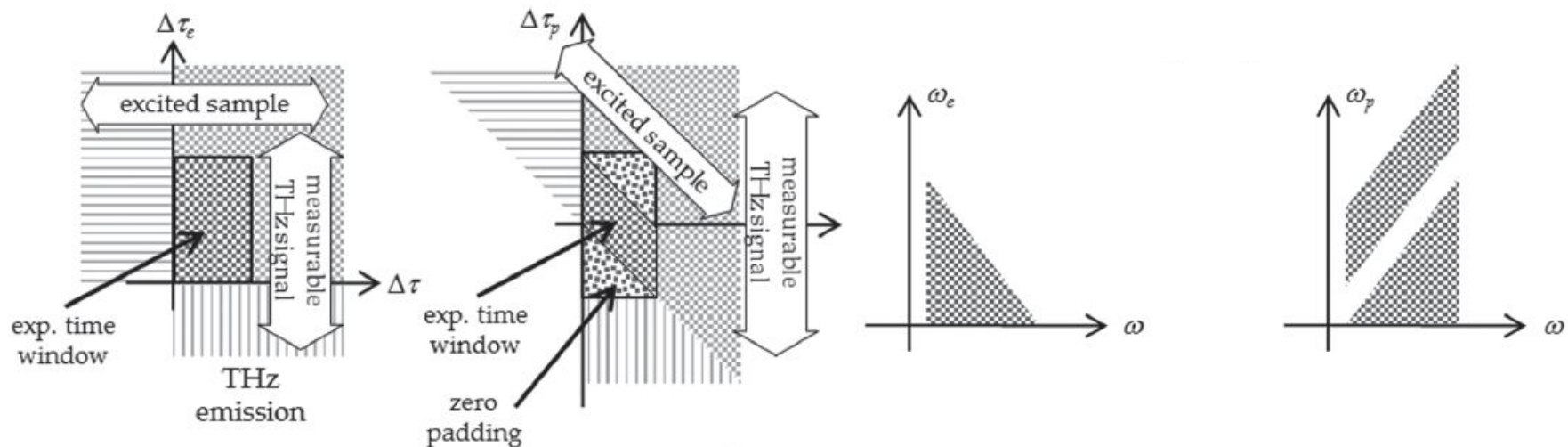


$$\Delta S(\omega, \tau) = -S_{\text{THz,emit}}(\omega) \Delta T(\omega) S_{\text{laser}}^*(\omega) G^*(\omega) e^{-j\omega\tau}$$

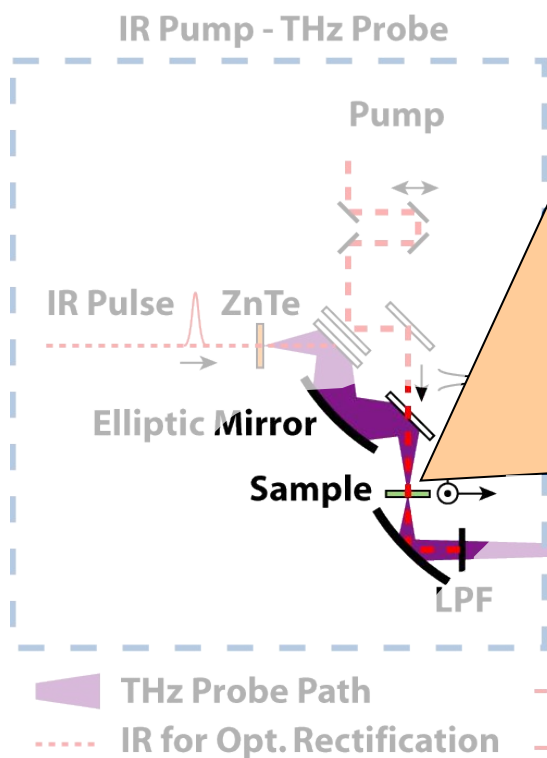
$$\frac{\Delta T(\omega)}{T_o(\omega)} = -\frac{\Delta S(\omega, \tau)}{S_o(\omega)} e^{j\omega\tau}$$



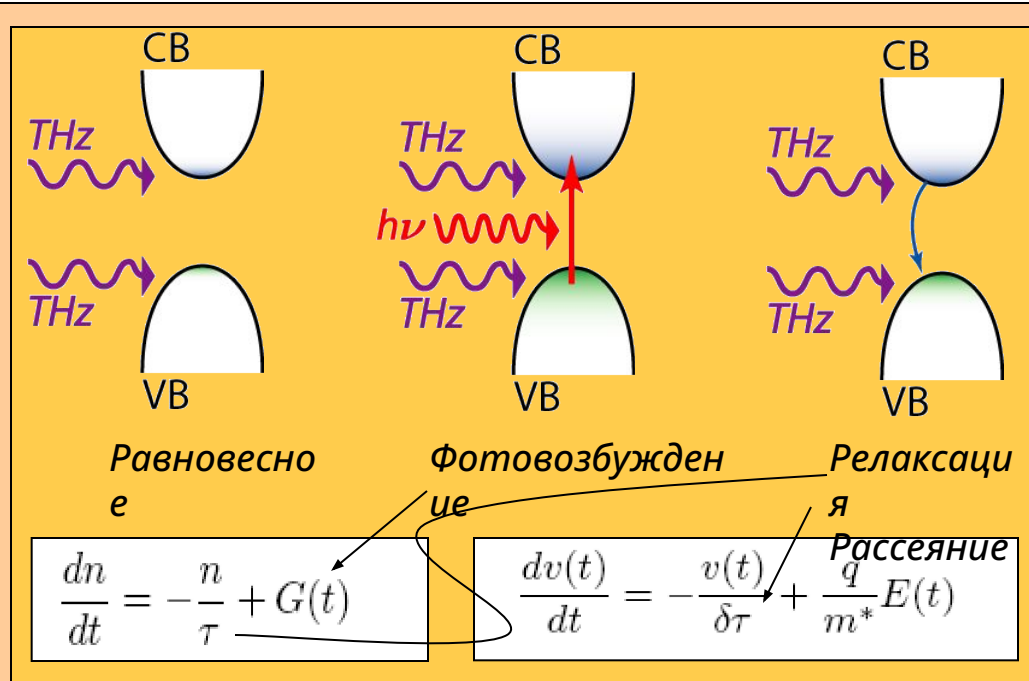
2D временные зависимости наблюдаемых явлений в TRTS



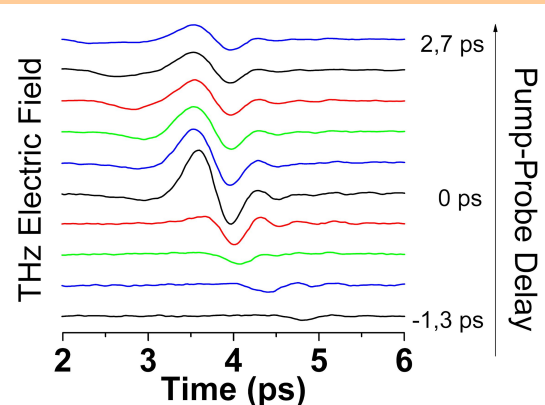
Идея реализации метода



Low excitation experiment
Initial carrier concentration
Setup in vacuum box to



$\Delta E_{THz}(t)$:
Нестационарное
изменение $E_{THz}(t)$
(временная форма)
записаны при
различных задержках

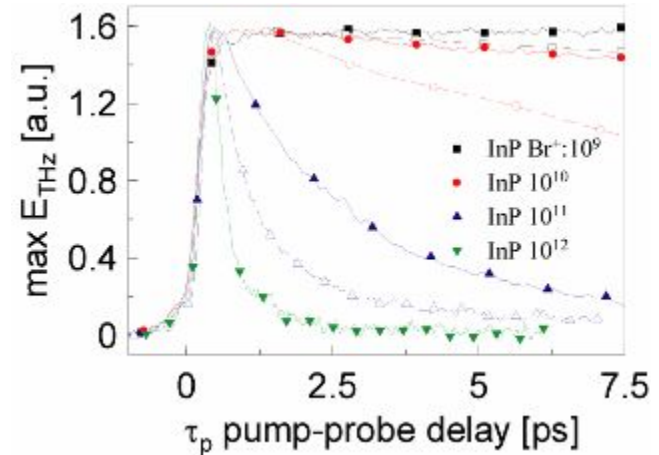


InP: Результаты

Медленные процессы

Нестационарное изменение максимума временного профиля импульса vs. Pump-Probe задержка τ_p (1D Scan).
Усредненная спектральная информация о времени жизни носителей τ_c .

Временная динамика ТГц временного профиля:
Комплексный спектр (действительная и мнимая части) поверхностной проводимости.



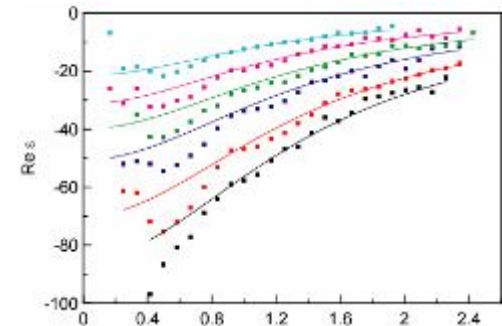
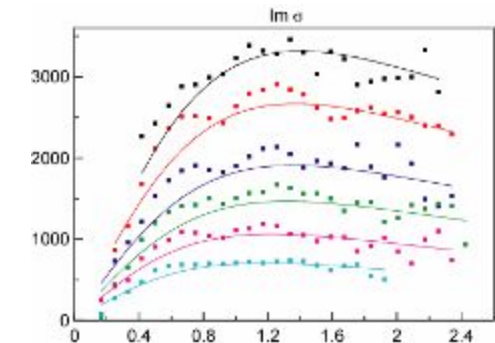
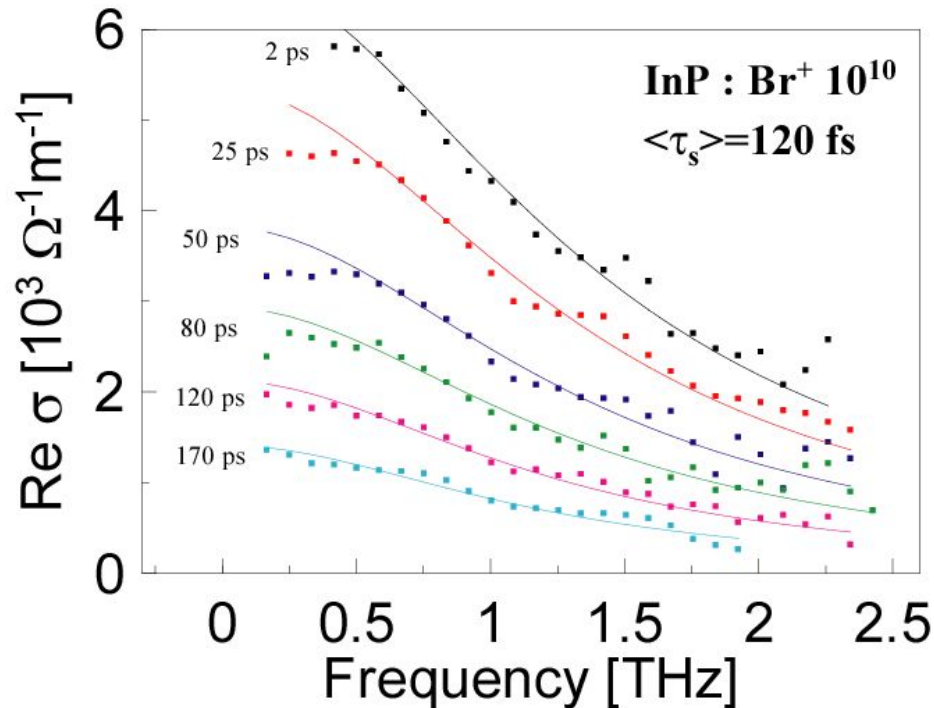
$$n(\tau_p) = n_0 \exp(-\tau_p / \tau_c) + n_b$$

$$\Delta\sigma(f, \tau_p) = \frac{n(\tau_p) e_0^2}{m_{\text{eff}}} \frac{\tau_s}{1 - 2\pi i f \tau_s}$$

InP: Результаты исследования

Медленные
процессы
Поверхностная
проводимость

$$\Delta\sigma(f, \tau_p) = \frac{n(\tau_p) e^2}{m_{\text{eff}}} \frac{\tau_s}{1 - 2\pi i f \tau_s}$$



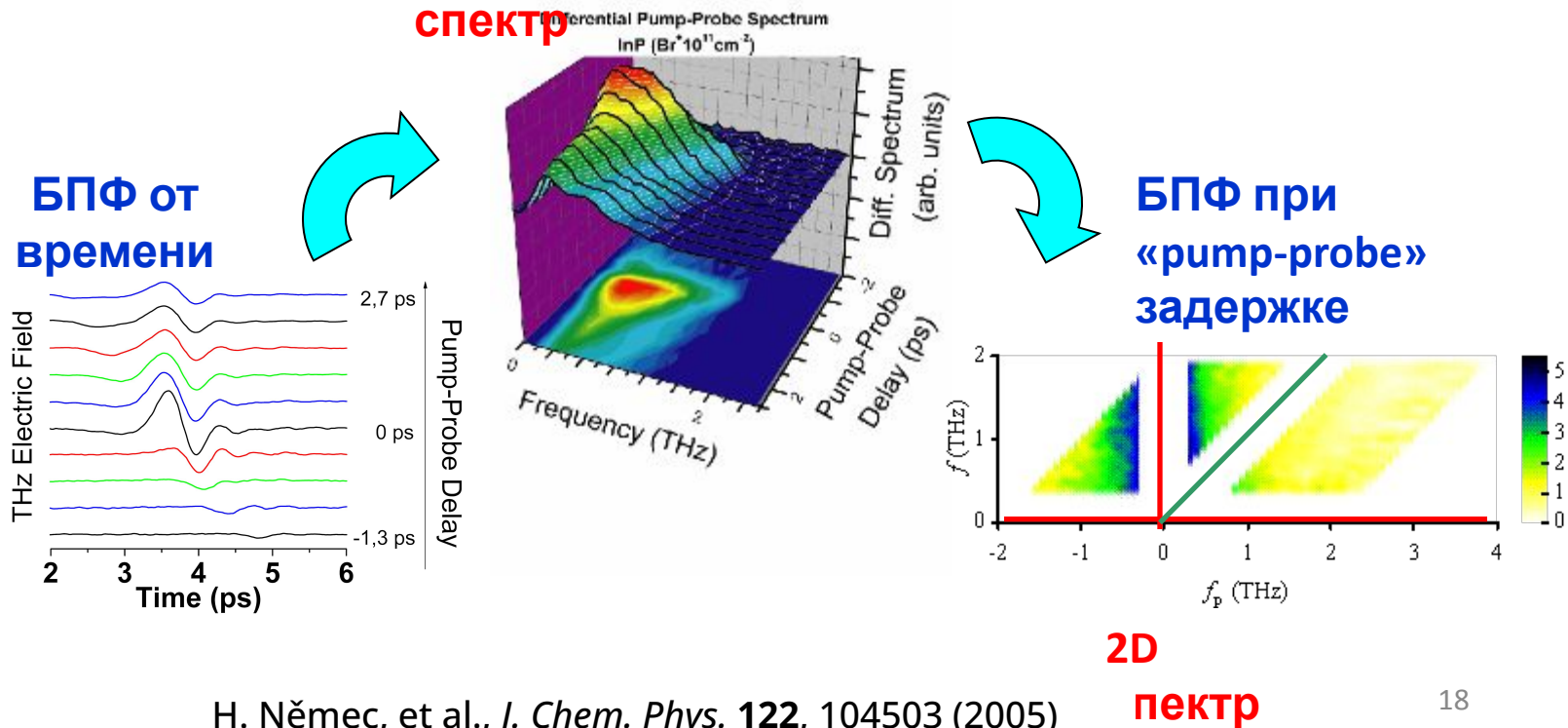
InP: Результаты исследований

Быстрая динамика

Динамика при легировании 10^{11} и 10^{12} cm^{-2} быстрая (нет quasi-dc)

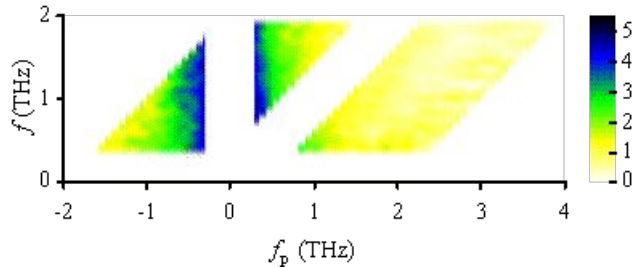
- Необходимо использовать 2D БПФ

Время-разрешенный спектр

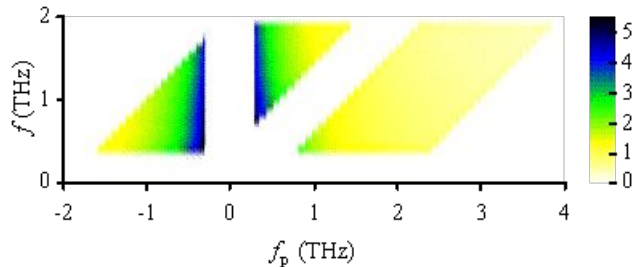
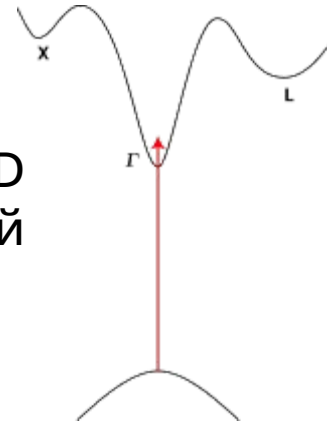


InP: Результаты исследований

Быстрая динамика

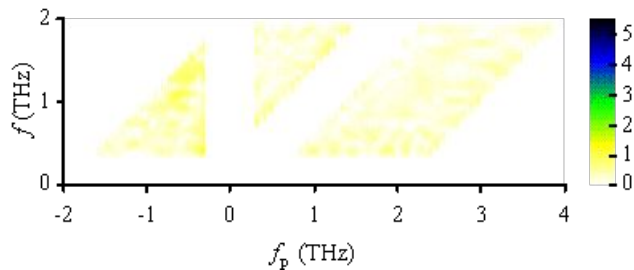


Экспериментальный 2D спектр поверхностной проводимости



Подгонка с помощью модели Друде

$$\Delta\sigma(f, f_p) = \frac{n_0 e^2}{m_{\text{eff}}} \cdot \frac{1}{\tau_s^{-1} + \tau_c^{-1} - 2\pi i f} \cdot \frac{1}{\tau_c^{-1} - 2\pi i f_p}$$



Без накачки нет никаких особенностей

Хорошее согласие с моделью Друде

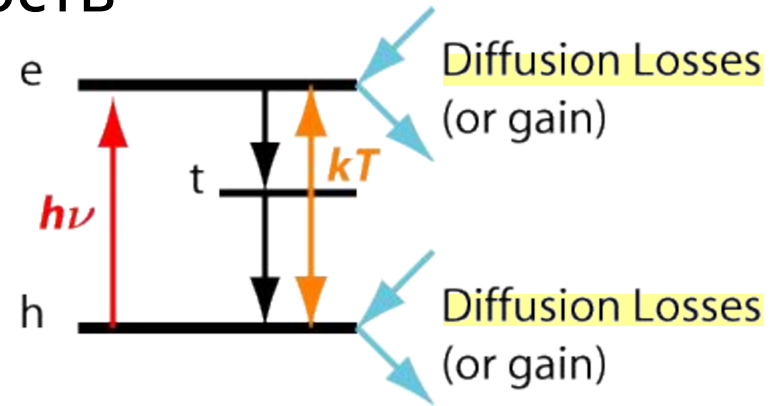
InP: Результаты исследований

Энергетическая зависимость

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2} - \frac{n_e}{\tau_e} \left(1 - \frac{n_t}{N_t} \right) + g_e n_t$$

$$\frac{\partial n_t}{\partial t} = \frac{n_e}{\tau_e} \left(1 - \frac{n_t}{N_t} \right) - \frac{n_h}{\tau_h} \cdot \frac{n_t}{N_t} - n_t (g_e + g_h)$$

$$\frac{\partial n_h}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 n_h}{\partial z^2} - \frac{n_h}{\tau_h} \cdot \frac{n_t}{N_t} + g_h n_t$$



Модель Шокли-Рида-Холла

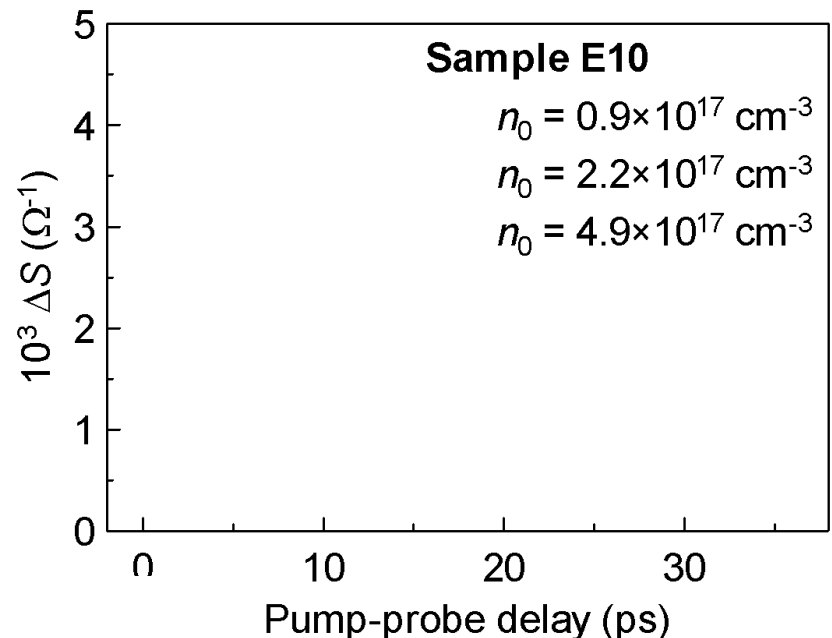
$$g_e = \frac{1}{\tau_e} \cdot \frac{N_e}{N_t} \gamma_t \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)$$

$$g_h = \frac{1}{\tau_h} \cdot \frac{N_h}{N_t} \gamma_t^{-1} \exp\left(-\frac{E_g - \Delta E}{k_B T}\right)$$

Физика и техника полупроводников, 2005, том 39, вып. 11

NB! Если использовать накачку большим пятном, то поперечной диффузии не будет.

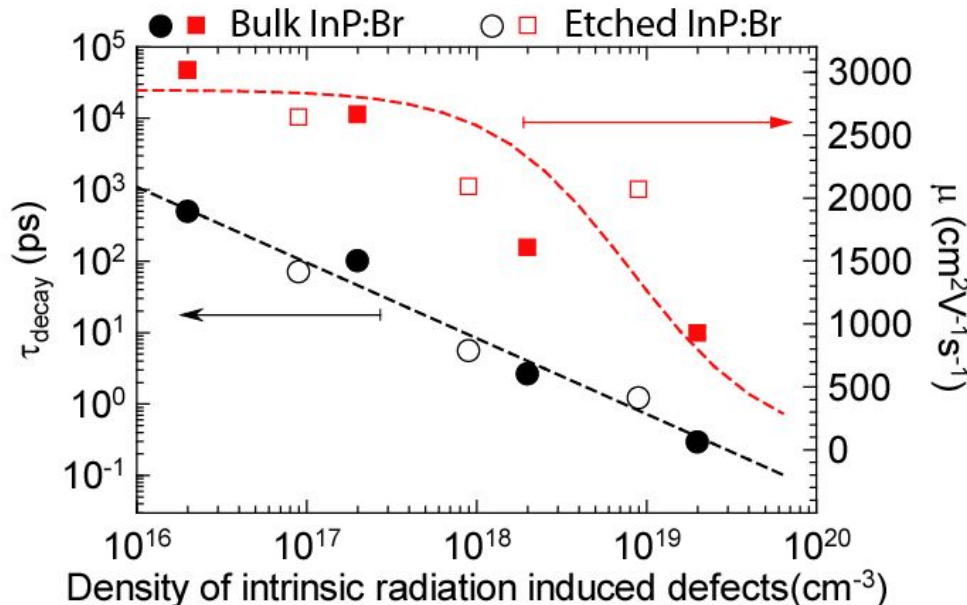
Phys. Rev. B, **78**, 235206 (2008)



InP Результаты: Вывод

Влияние концентрации ионов Br^+ на объемные и параметры и параметры травления

Образец	n_{IRRAD} (cm ⁻³)	n_{Br} (cm ⁻³)	n_0 (cm ⁻³)	τ_s (фс)	μ_0 (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	τ_{decay} (пс)
B9	2×10^{16}	0	1.6×10^{17}	140	3000	490
E9	9×10^{16}	5×10^{12}	1.1×10^{17}	120	2600	70
B10	2×10^{17}	0	1.6×10^{17}	120	2700	100
E10	9×10^{17}	5×10^{13}	0.9×10^{17}	100	2100	5.5
B11	2×10^{18}	0	1.6×10^{17}	70	1600	2.6
E11	9×10^{18}	5×10^{14}	2.2×10^{17}	90	2100	1.2
B12	2×10^{19}	0	1.6×10^{17}	40	900	0.29

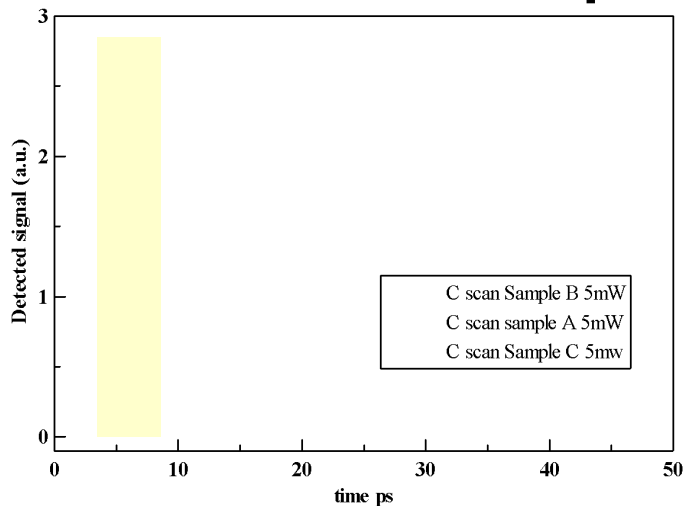


Время жизни носителей:
 - Плотность наведенных дефектов;
 - нет влияния облучения ионами Br

- **Время захвата (trapping time) уменьшается на 3 порядка (Log)**
- **Мобильность уменьшается только в три раза (Linear)**

InGaAs: Результаты исследования

Медленные процессы



$$n(\tau_p) = n_0 \exp(-\tau_p / \tau_c) + n_b$$

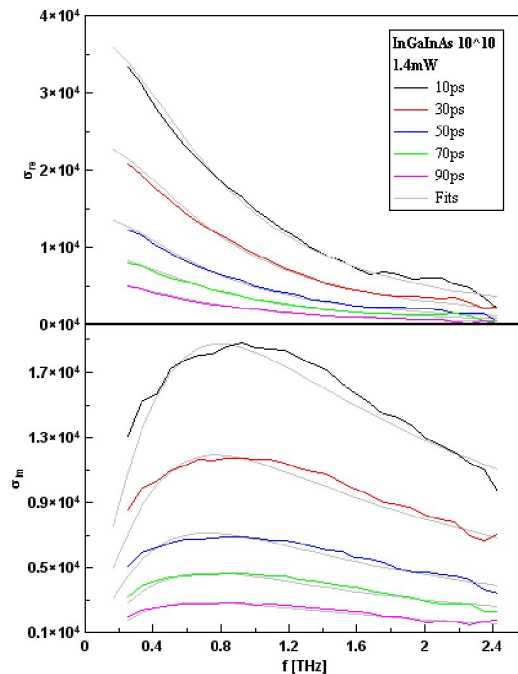
$$\Delta\sigma(f, \tau_p) = \frac{n(\tau_p) e^2}{m_{\text{eff}}} \frac{\tau_s}{1 - 2\pi i f \tau_s}$$

Одно-
компонентна
Я

Dose (cm ⁻²)	τ_s (fs)	τ_c (ps)	$\Delta R/R$ (ps)	$\mu_{0, \text{THz}}$	$\mu_{0, \text{Hall}}$
				(cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	
10 ⁹	0.25	297 ± 5	>500(*)	2600	10800
10 ¹⁰	0.22	43 ± 5	10	2100	--
10 ¹¹	0.175	3.4 ± 2	<0.4	1900	4300

(*)

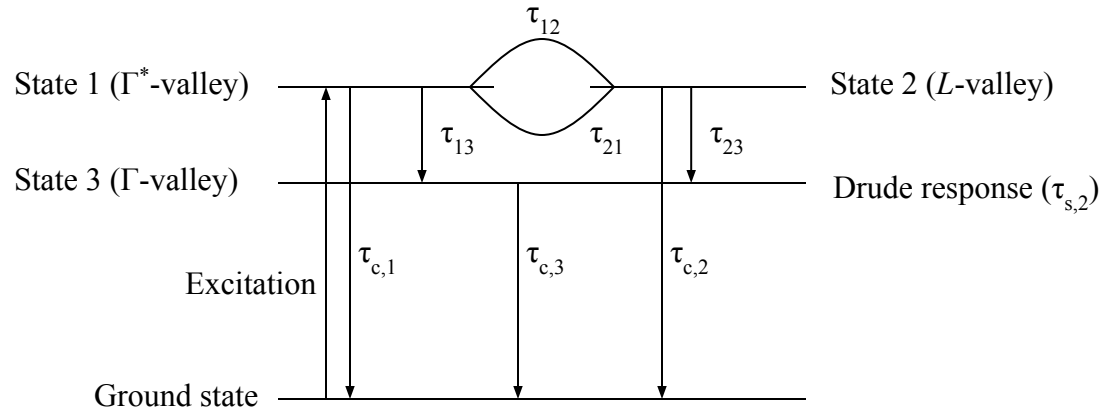
нелегированный



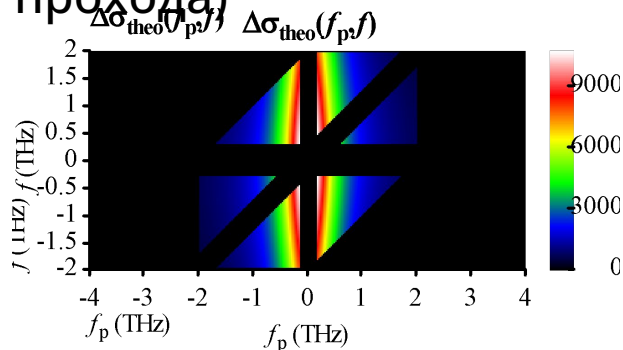
In_{1-x}Ga_xAs: Результаты исследований

(*x=0.47*)

Быстрые процессы

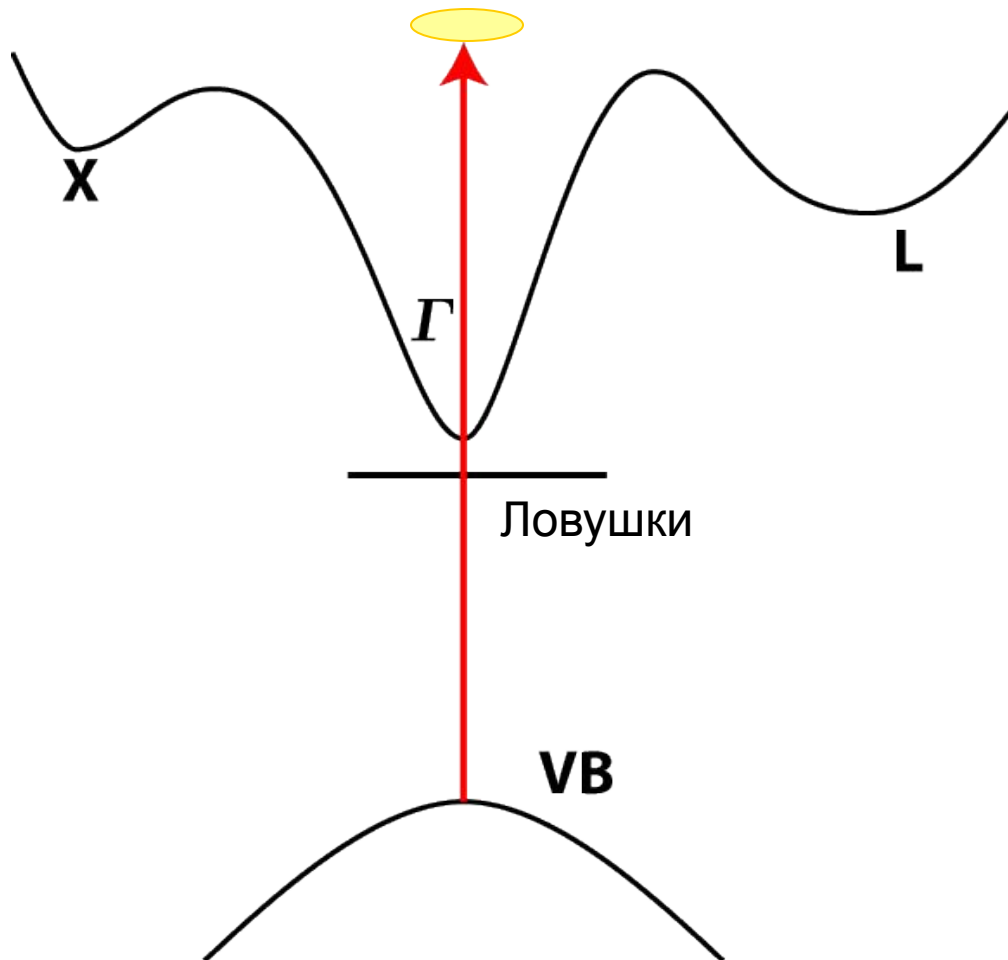


Проводимость: сумма нескольких вкладов (3 прохода) $\Delta\sigma = \sum_{i=1,2,3} \Delta\sigma_i$



← Подгонка 2D спектра
Дает возможность
получить τ 's

In_{1-x}Ga_xAs Динамика



(x=0.47)

$$m_L = 0.29 m_e$$

$$m_X = 0.68 m_e$$

$$m_\Gamma = 0.041 m_e$$

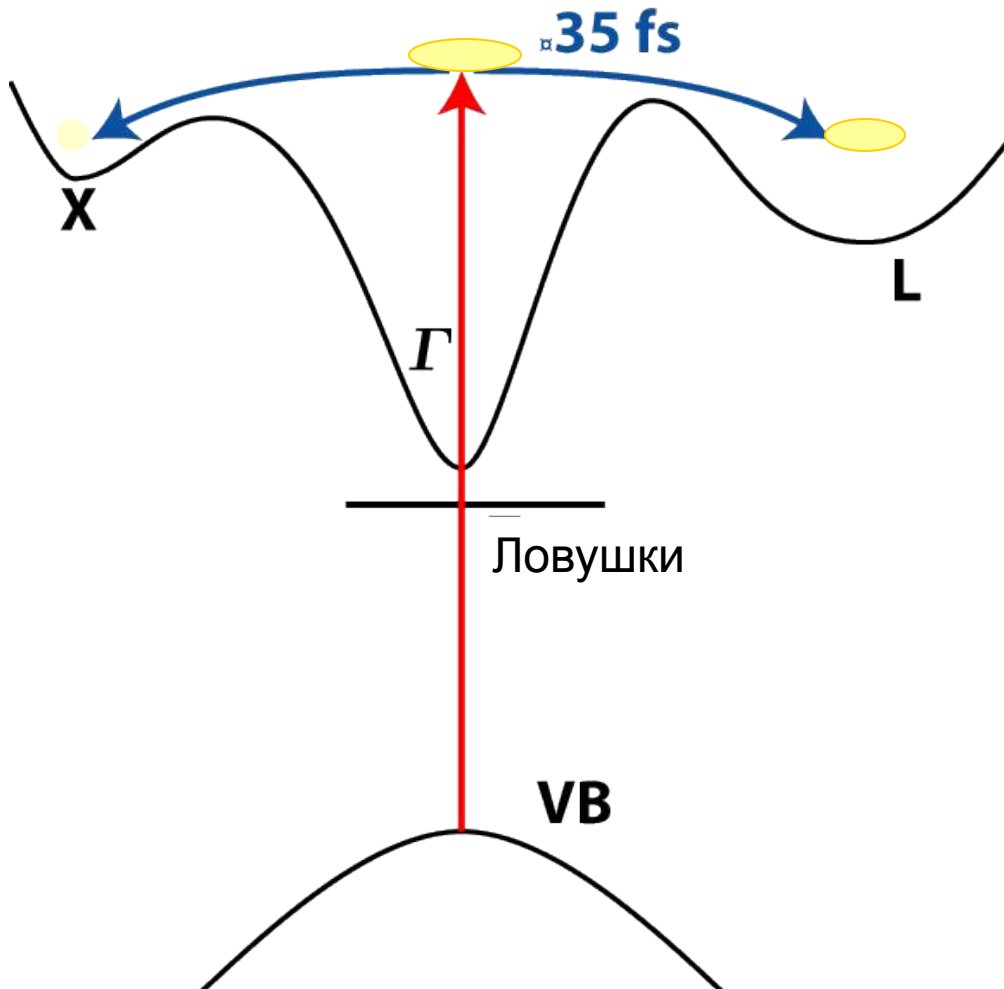
In_{1-x}Ga_xAs Динамика

($x=0.47$)

$$m_L = 0.29 m_e$$

$$m_X = 0.68 m_e$$

$$m_\Gamma = 0.041 m_e$$



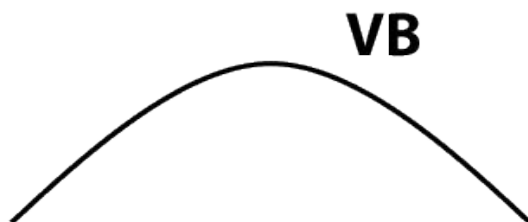
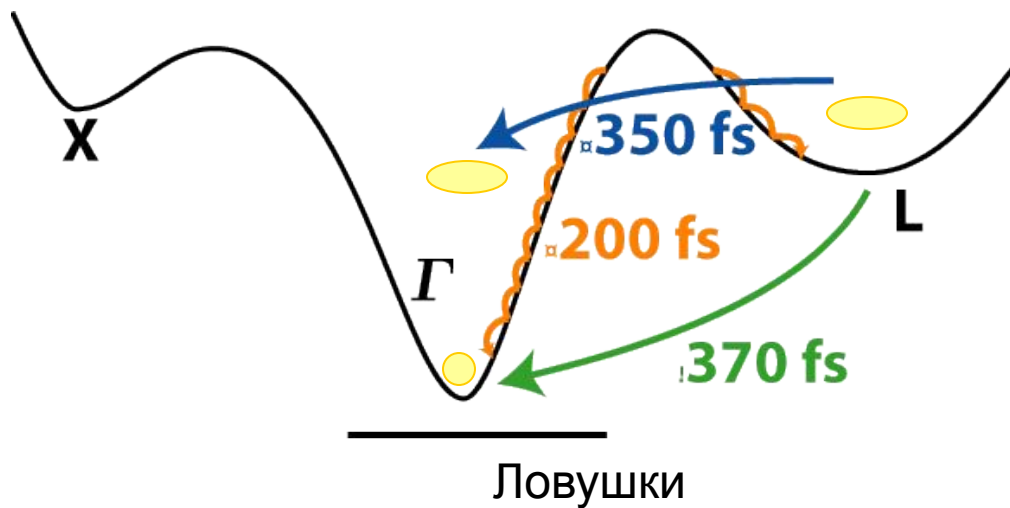
In_{1-x}Ga_xAs Динамика

($x=0.47$)

$$m_L = 0.29 m_e$$

$$m_X = 0.68 m_e$$

$$m_\Gamma = 0.041 m_e$$



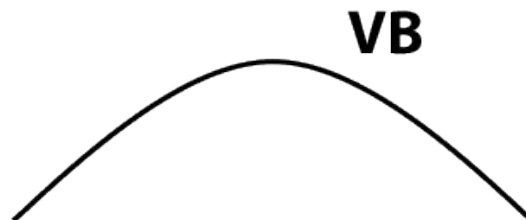
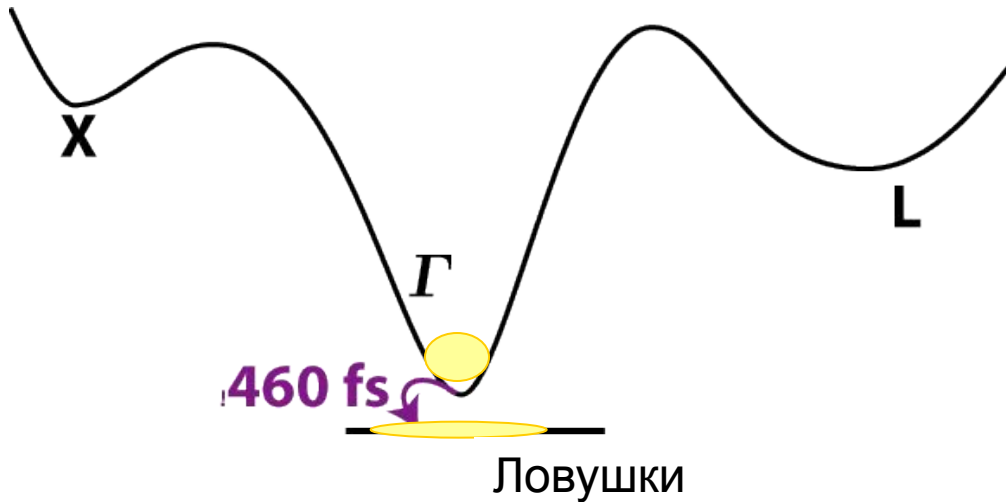
In_{1-x}Ga_xAs Динамика

($x=0.47$)

$$m_L = 0.29 m_e$$

$$m_X = 0.68 m_e$$

$$m_\Gamma = 0.041 m_e$$



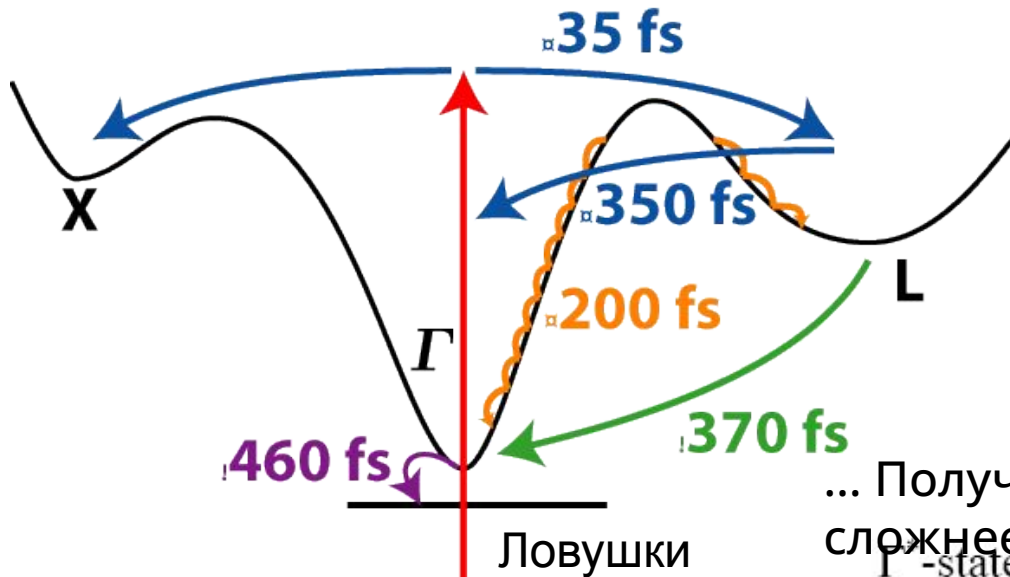
*... и дальнейшая
медленная
релаксация ...*

Временная динамика $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($x=0.47$)

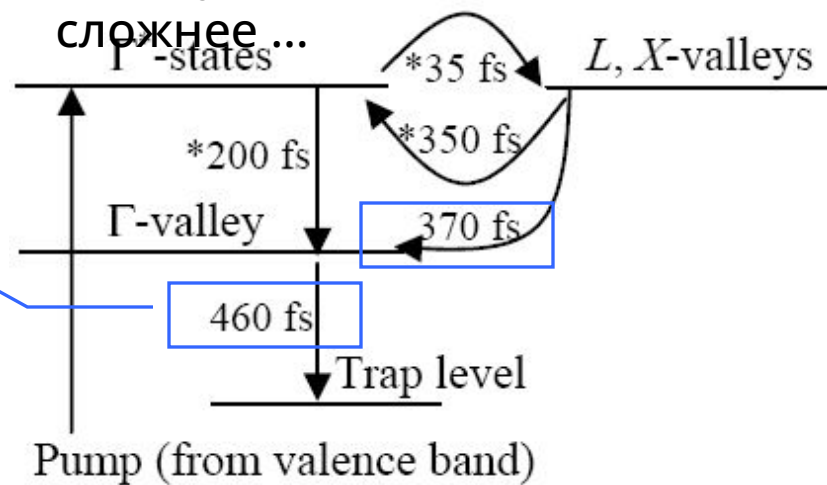
$$m_L = 0.29 m_e$$

$$m_X = 0.68 m_e$$

$$m_\Gamma = 0.041 m_e$$



... Получается несколько сложнее ...



Теоретическая модель
S.E.Ralph et al, Phys. Rev. B 54,

5568

VB