



ИОФ
РАН

КУРС ЛЕКЦИЙ МИФИ

Диагностика лазерной плазмы ²⁰¹⁴

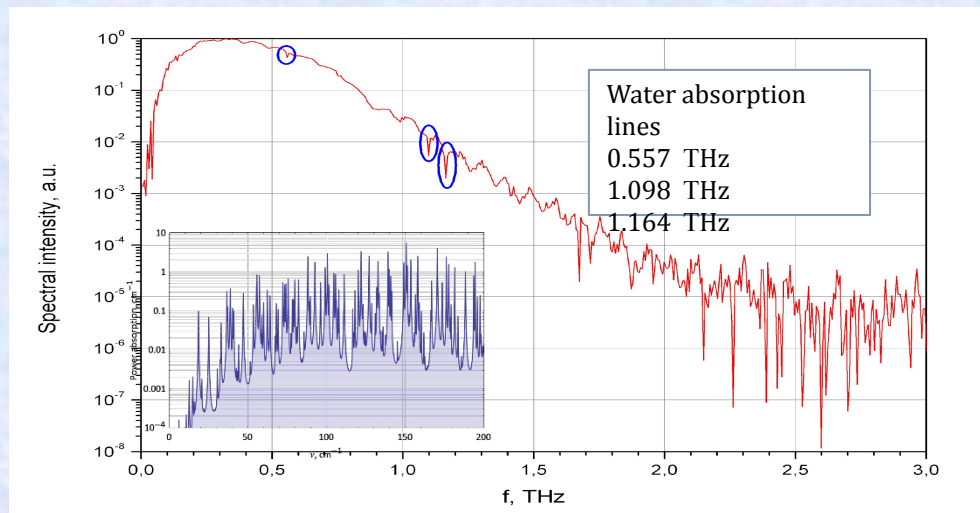
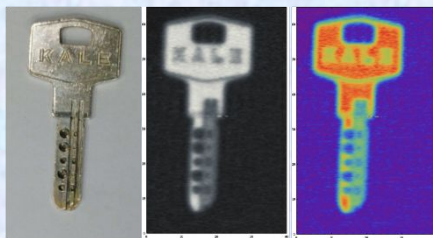
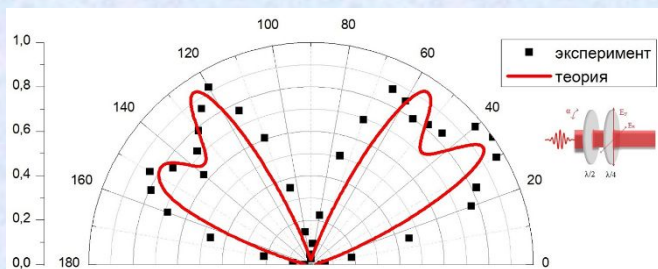
Экспериментальные методы пространственно-временной и спектрально-временной диагностики плазмы, создаваемой импульсным лазерным излучением.

Букин Владимир Валентинович

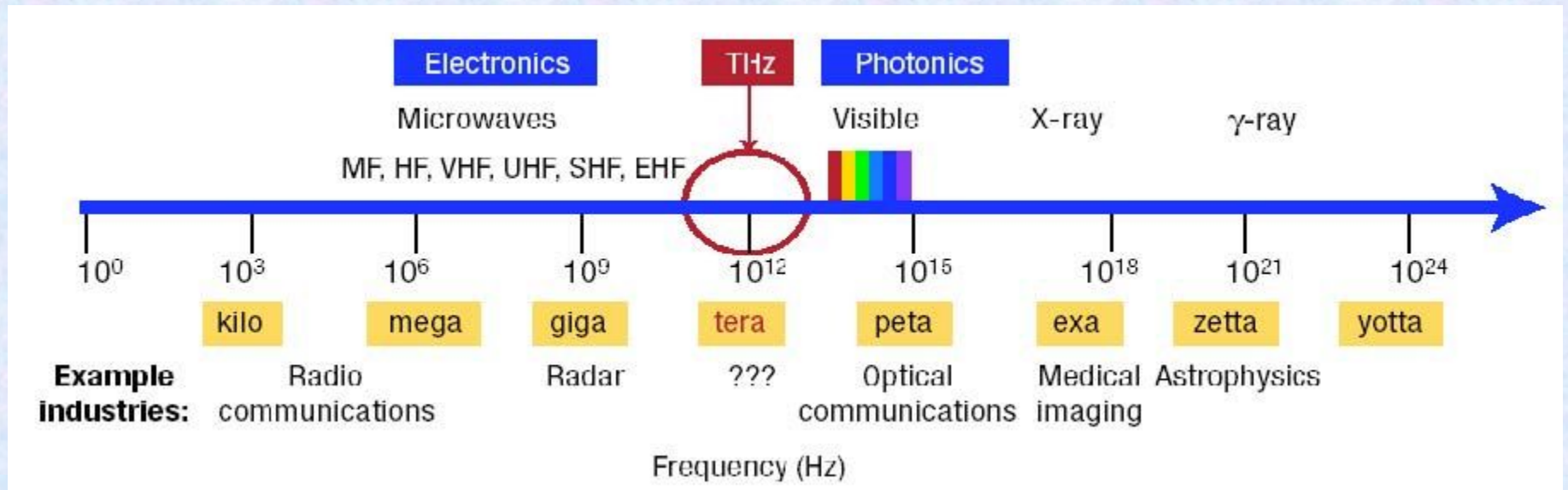
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН ИОФРАН

Лекции №12 3 декабря 2014 г.

Терагерцовое излучение

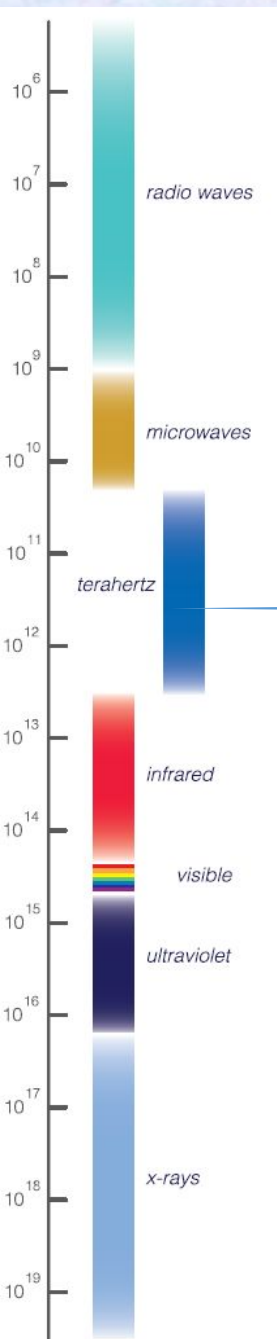


Терагерцовое излучение



$$1 \text{ ТГц} \leftrightarrow \tau = 1 \text{ пс} \leftrightarrow \nu = 33 \text{ см}^{-1} \leftrightarrow \lambda = 0.3 \text{ мм} \leftrightarrow \hbar\omega = 4 \text{ мэВ}$$

Приложения ТГц излучения



- Спектроскопия

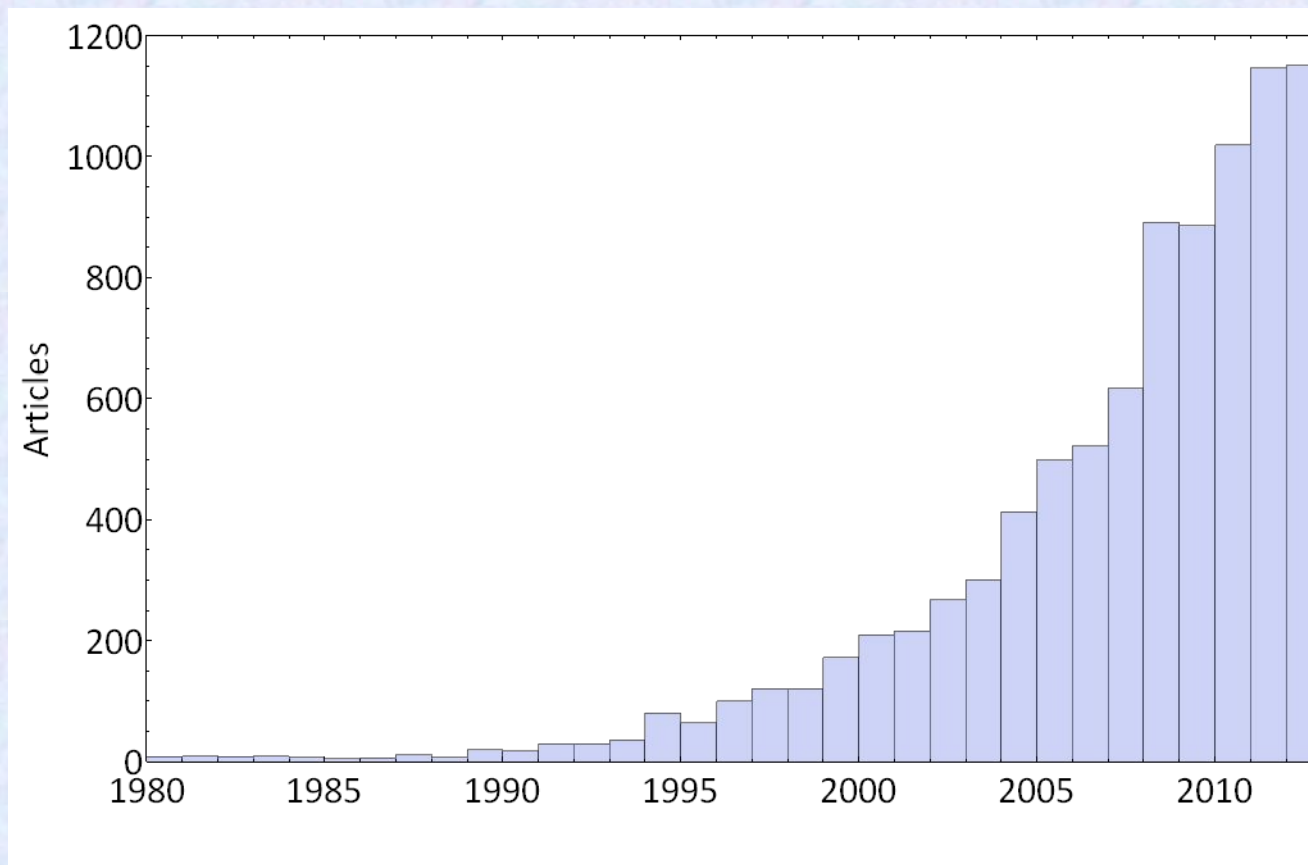
- Безопасность

- Медицина

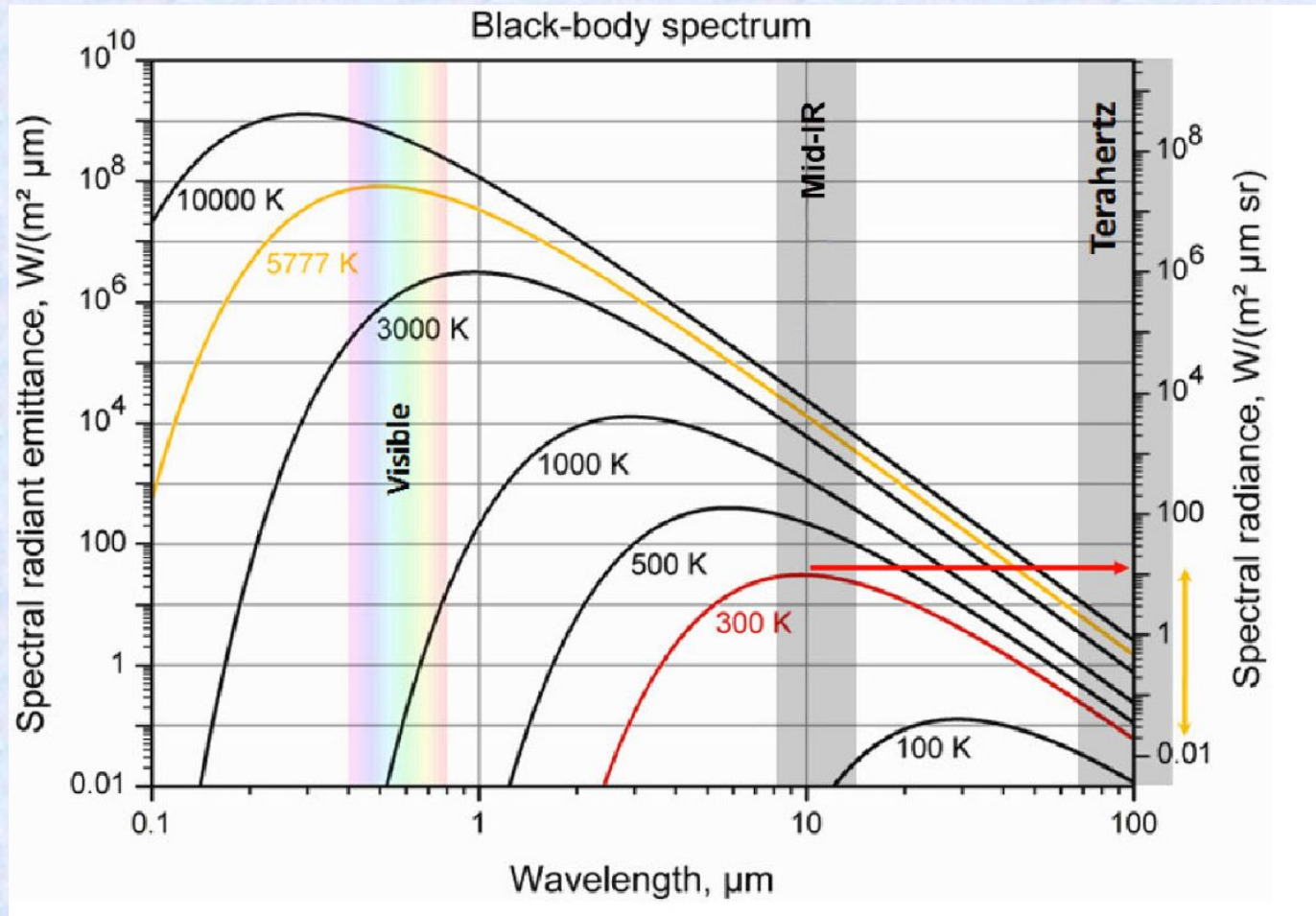
-

Телекоммуникации

Публикации по ТГц излучению

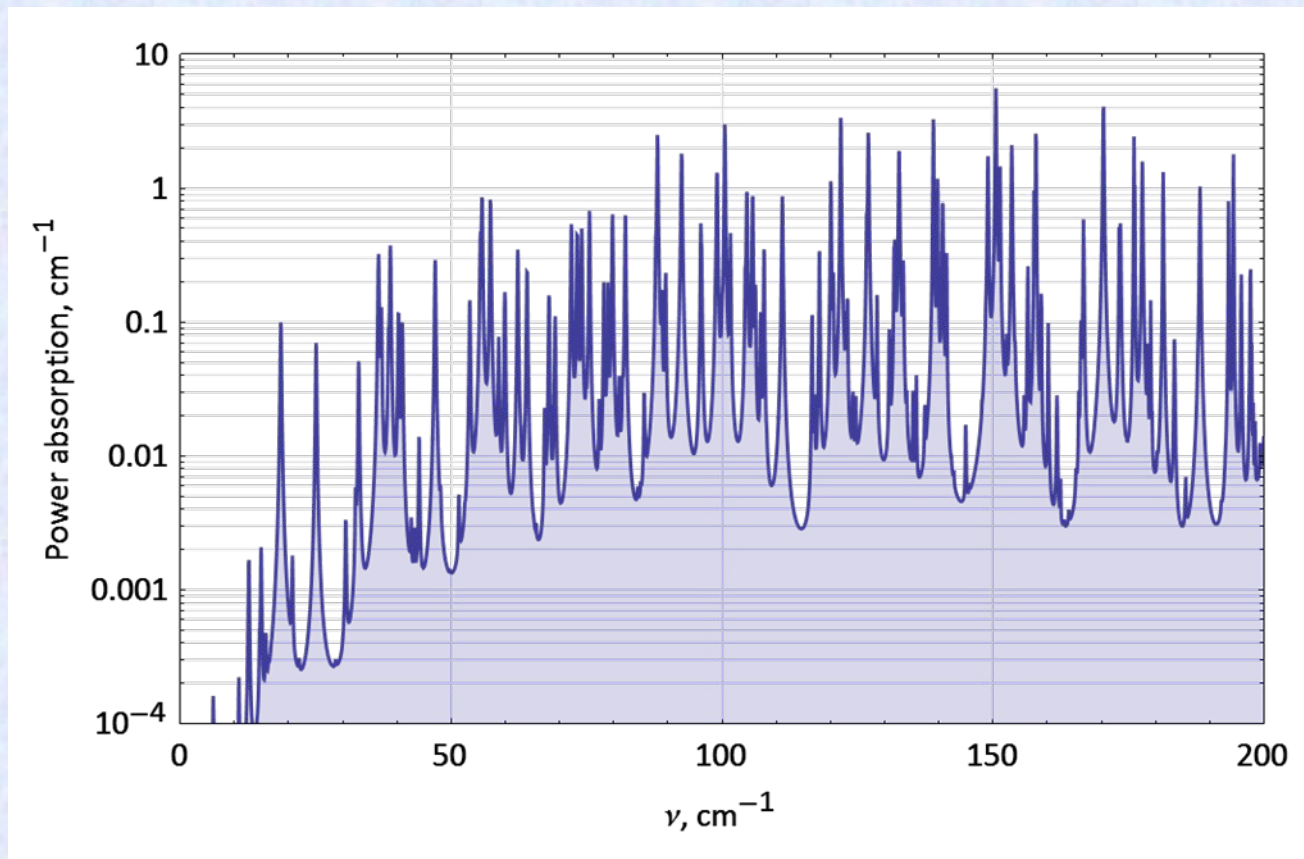


Тепловое излучение

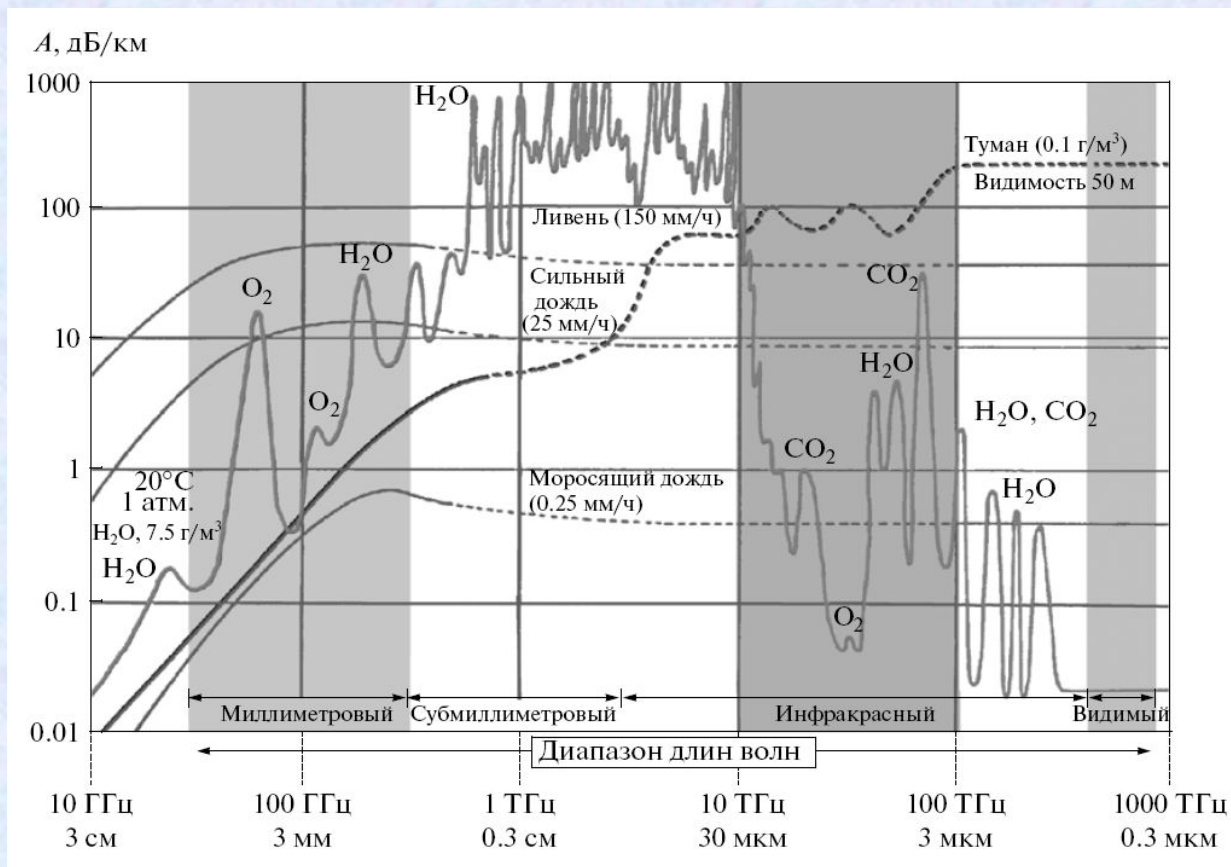


Поглощение в атмосферном воздухе

- Поглощение в диапазоне $\sim 10^{-3} - 1 \text{ cm}^{-1}$

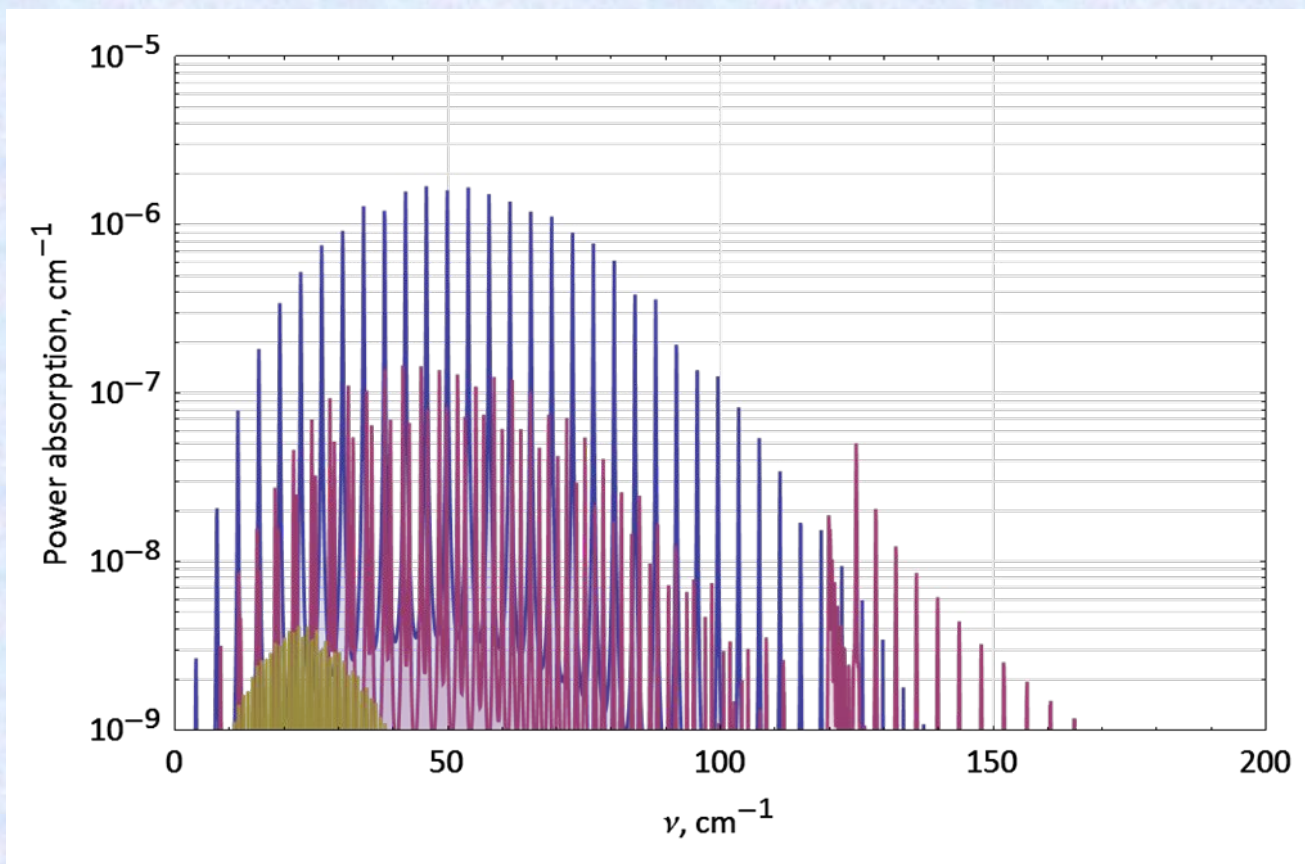


Поглощение в атмосферном воздухе



Обнаружение продуктов распада

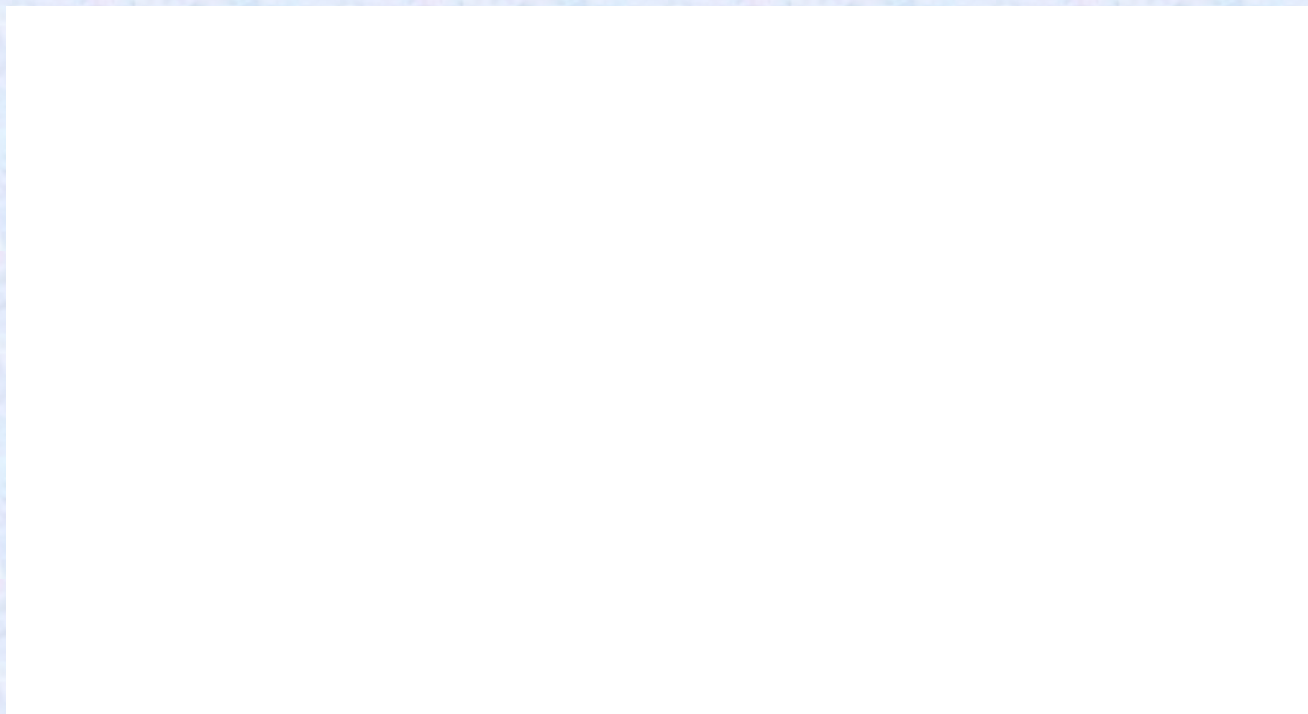
- Продукты распада ВВ – CO, NO, N₂O.



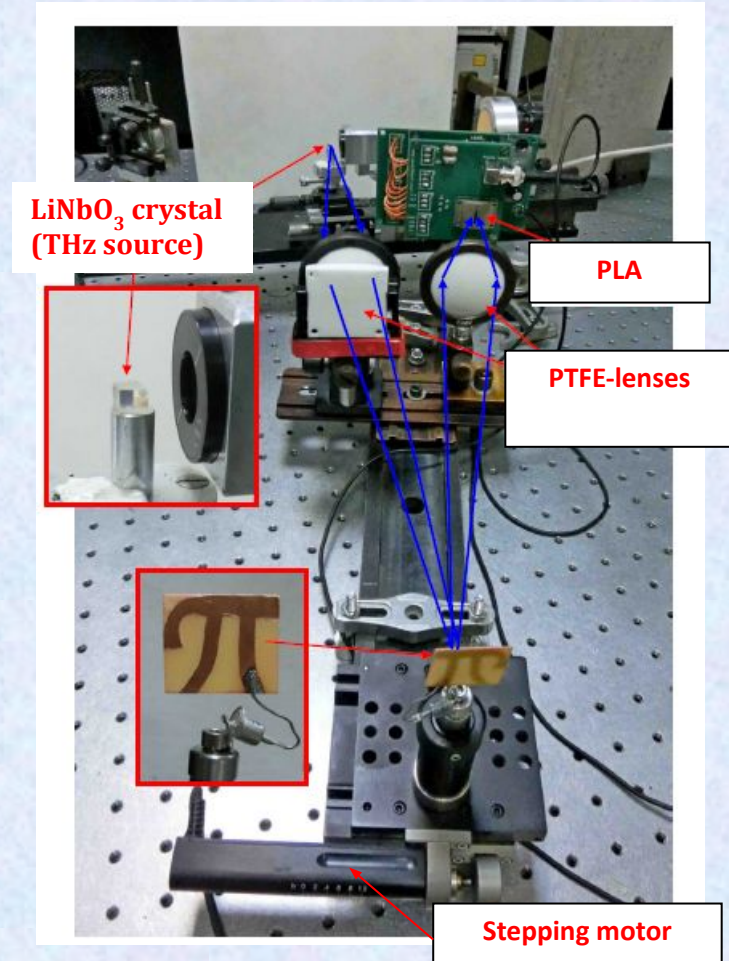
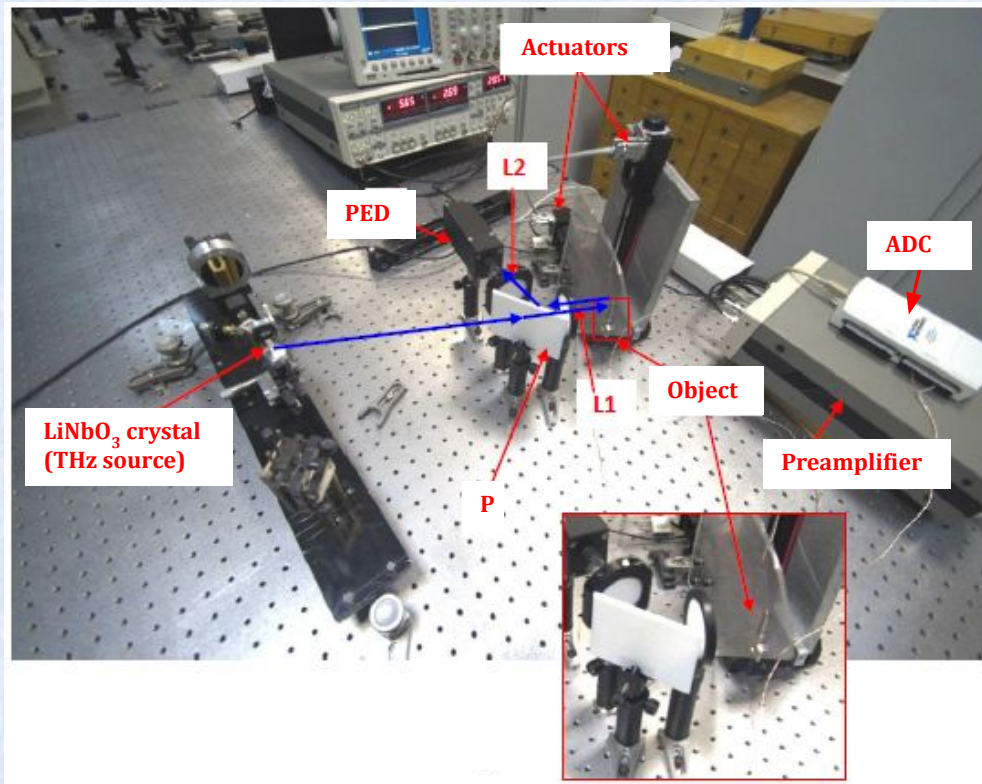
Построение изображений в ТГц диапазоне

- Построение изображений объектов за преградами
- Определение химического состава (спектроскопия)
- Определение расстояний до объектов и их формы

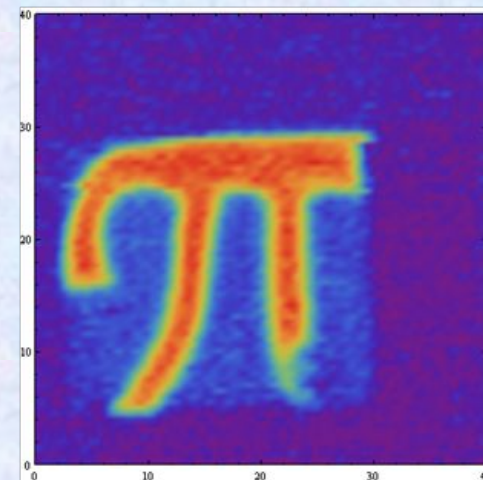
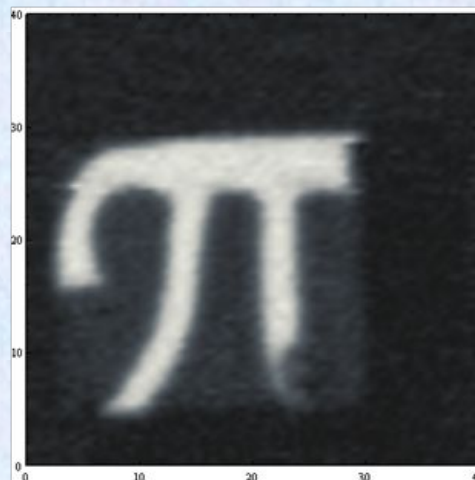
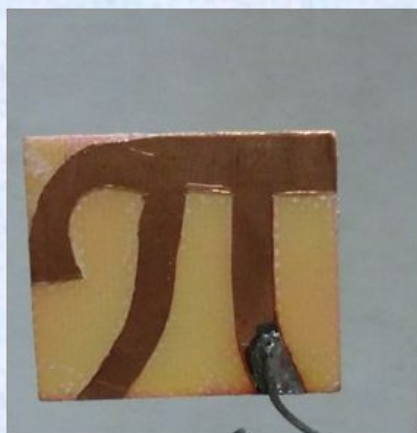
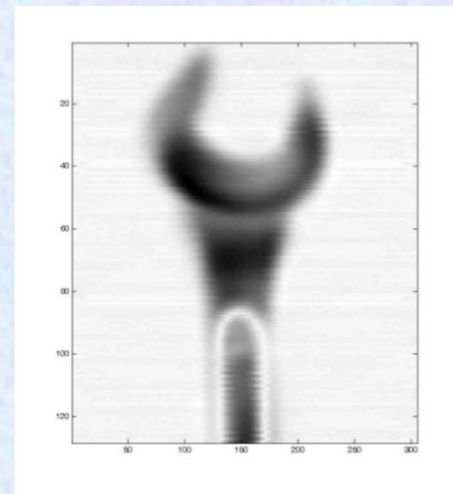
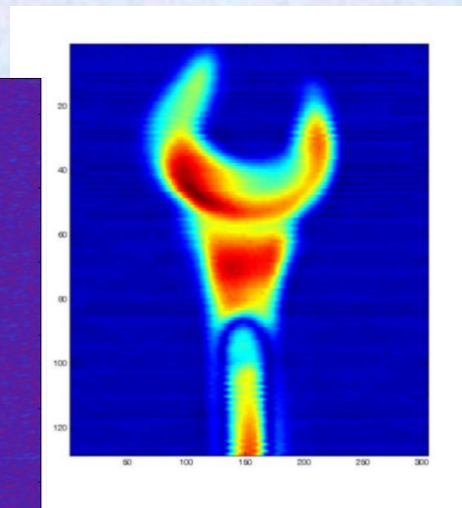
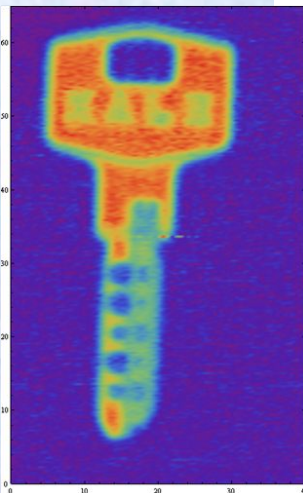
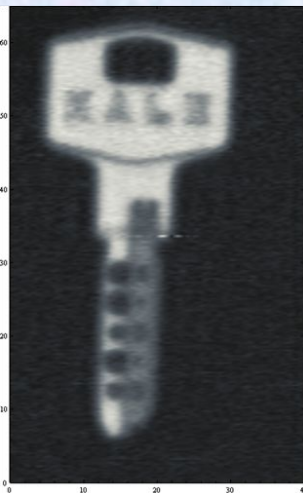
Построение изображений в ТГц диапазоне



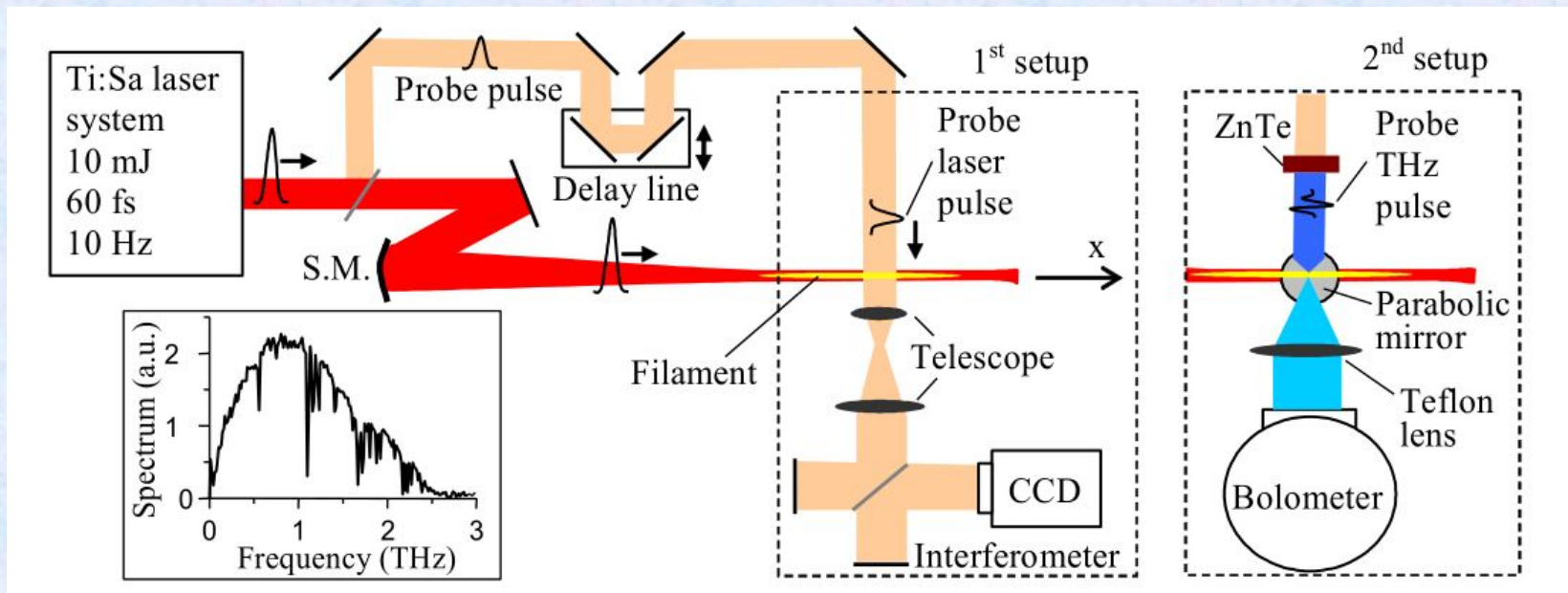
Построение изображений



Построение изображений



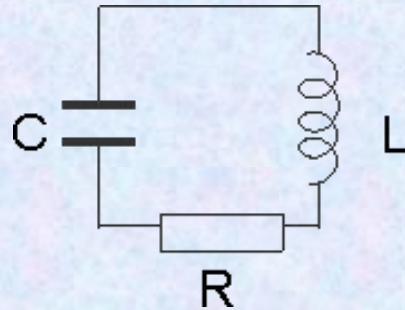
Диагностика плазмы



S. Bodrov, V. Bukin, M. Tsarev, A. Murzanev, S. Garnov, N. Aleksandrov, A. Stepanov, "Plasma filament investigation by transverse optical interferometry and terahertz scattering," *Opt. Express* **19**, 6829-6835 (2011)

Терагерцовая электроника

- RLC-контур:



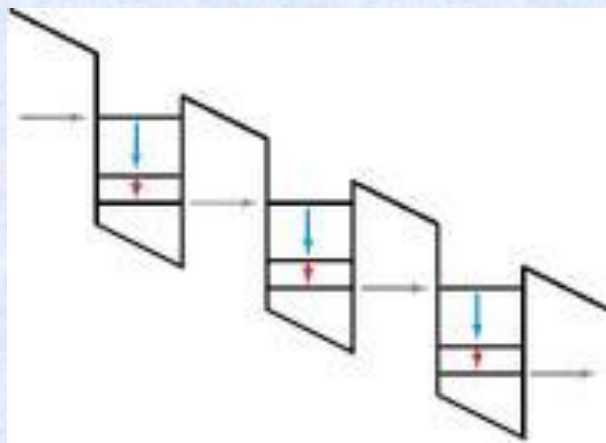
- Возникновение колебаний: $R < 0$
- Отрицательное дифференциальное сопротивление

Лазер с оптической накачкой

- Газовые лазеры на вращательных переходах
- Активные среды — дипольные молекулы (CH_3F , CH_2F_2 , CH_3OH и др.)
- Источник накачки — CO_2 -лазер
- Мощность ~ 100 мВт, диапазон перестройки несколько ТГц

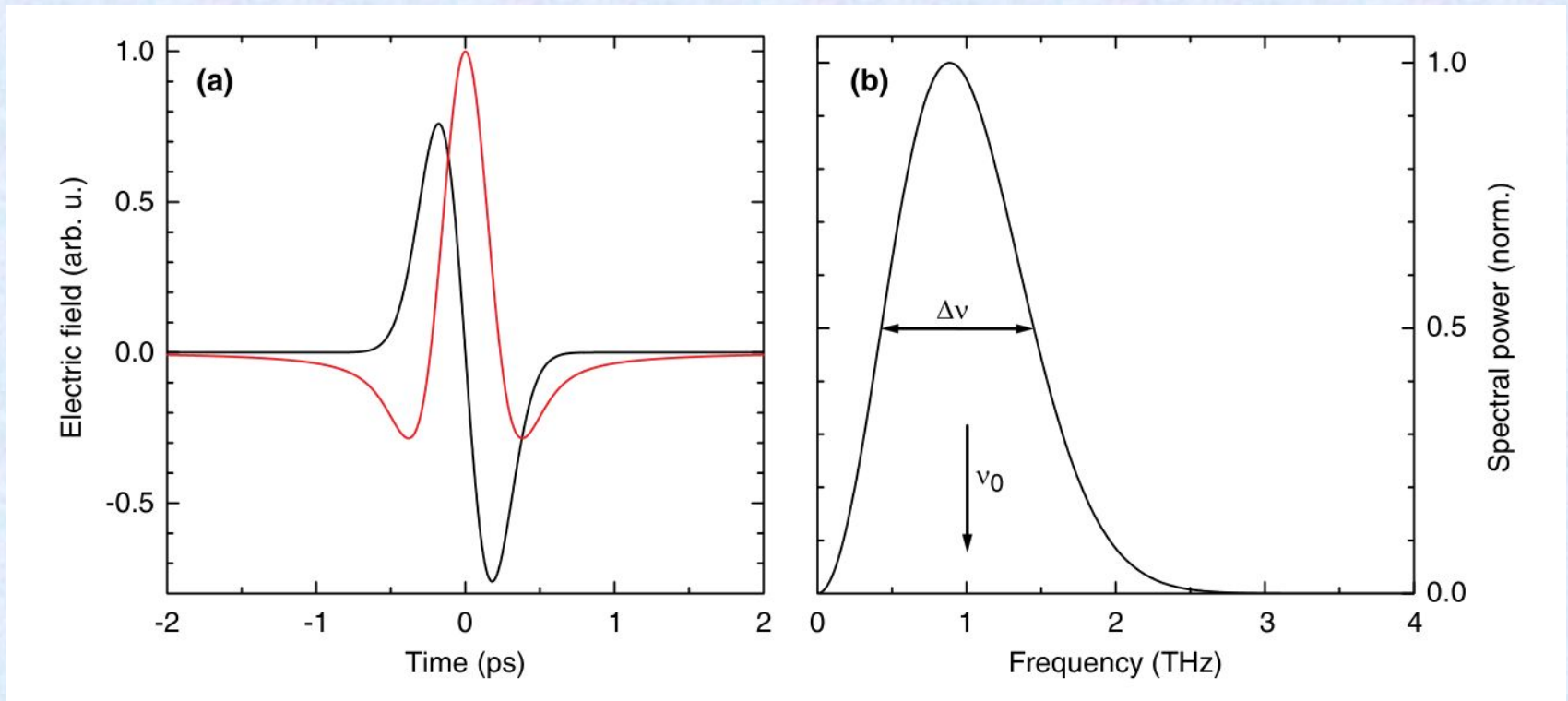
Квантово-каскадный лазер

- Набор квантовых ям (~ 100)
- Каскадный процесс генерации
- Охлаждение (до He для ТГц генерации)

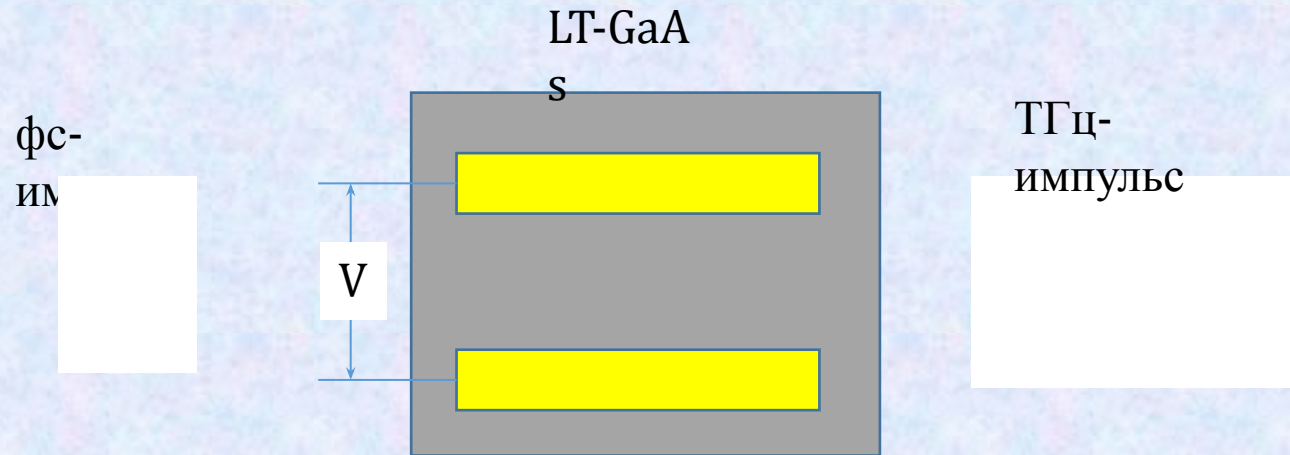


Источники ТГц-излучения

- ТГц импульсы

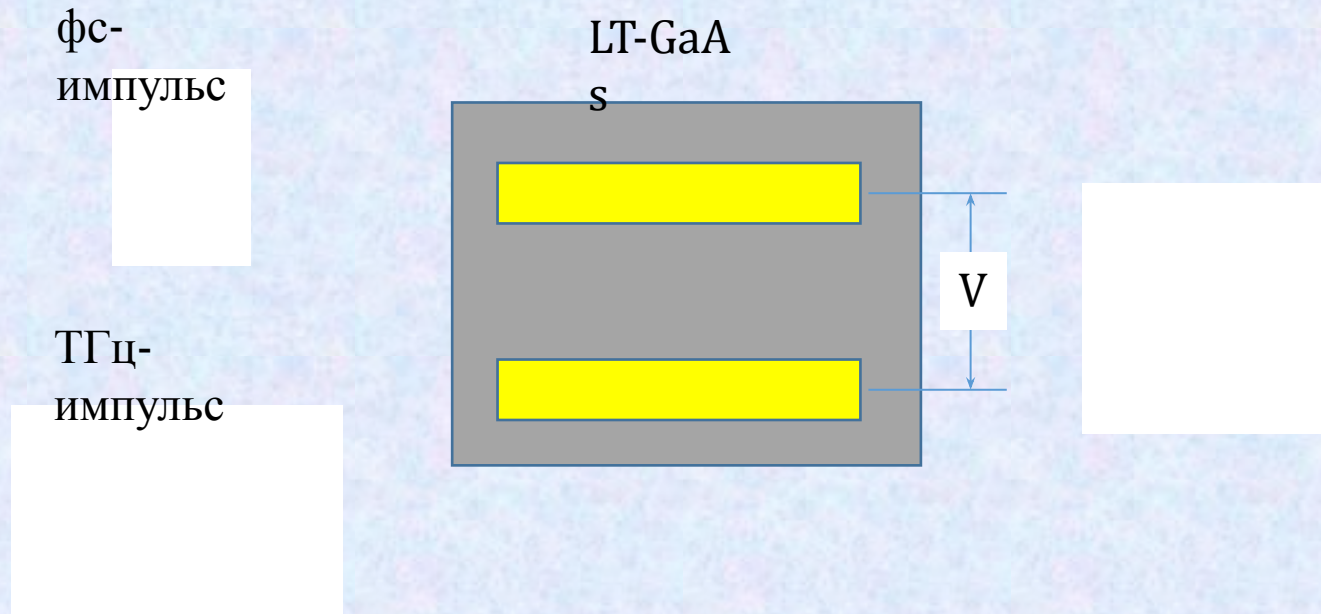


Фотопроводящая антенна



- Быстрая генерация и релаксация фототока
- Оптическое смешение (гетеродинирование) биений

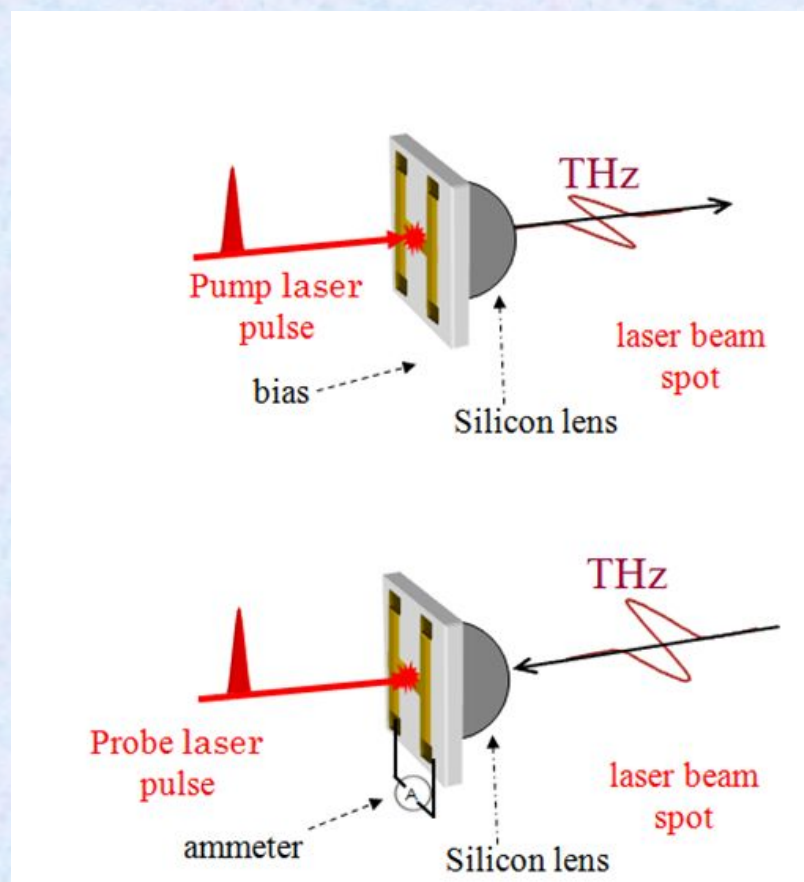
Фотопроводящая антенна



- Можно «стробировать» ТГц-импульс с помощью лазерного излучения.
- Ширина полосы такого метода ~ 5 ТГц и выше

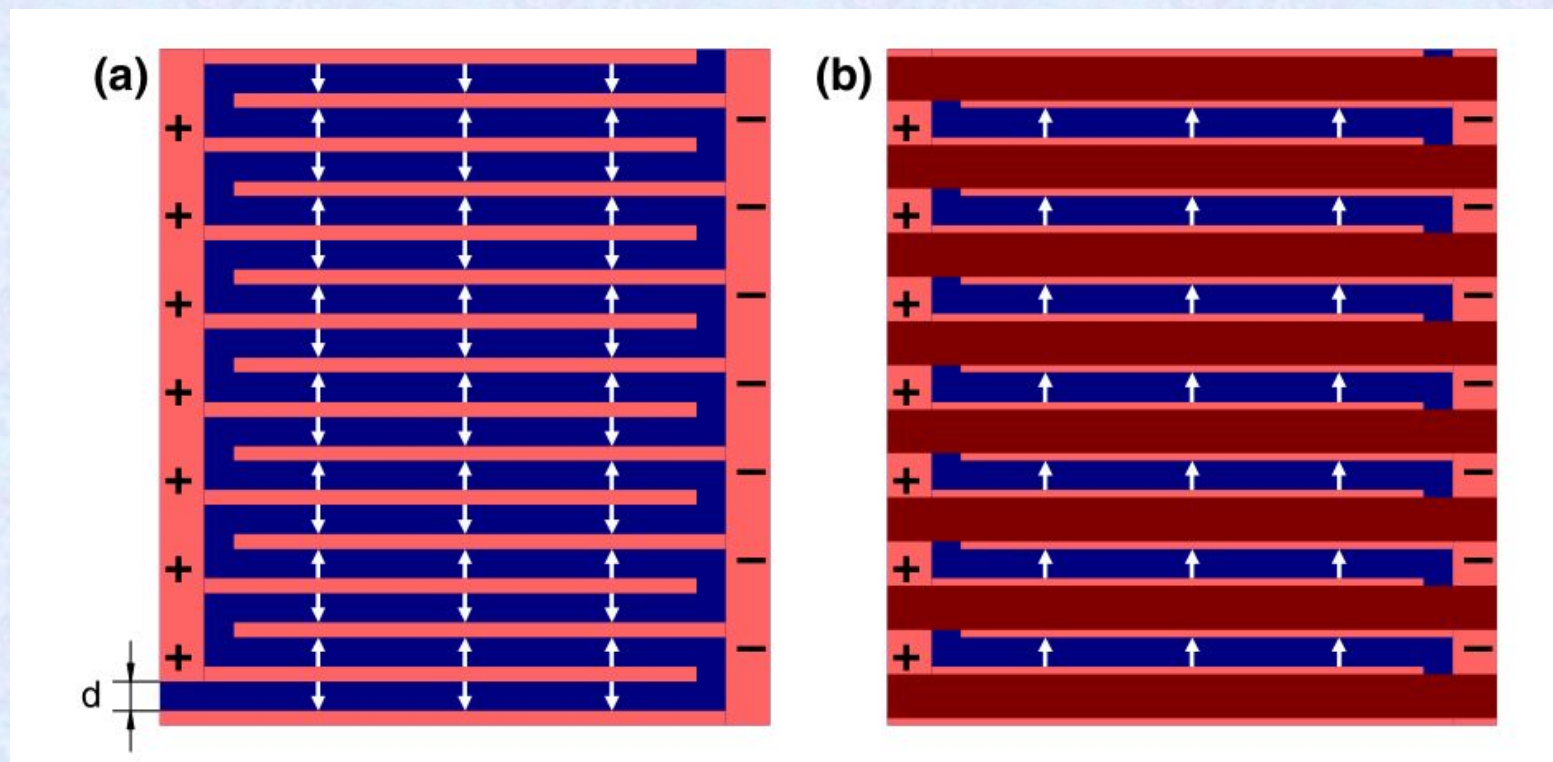
Фотопроводящая антенна

Генерация и детектирование ТГц импульсов



Фотопроводящая антенна

Топология фотопроводящих антенн



Генерация разностной частоты

- Квадратичная нелинейность:

$$P = \chi E + \chi^{(2)} E^2 + \dots$$

- Оптическое выпрямление импульсов — генерация импульса поляризации
- Терагерцовое излучение:

$$E_{THz} \sim \frac{\partial^2}{\partial t^2} P$$

Среды для ГРЧ

- Основные требования:

 - Большая квадратичная нелинейность (d_{eff})

 - Малое поглощение в оптическом и терагерцовом диапазонах

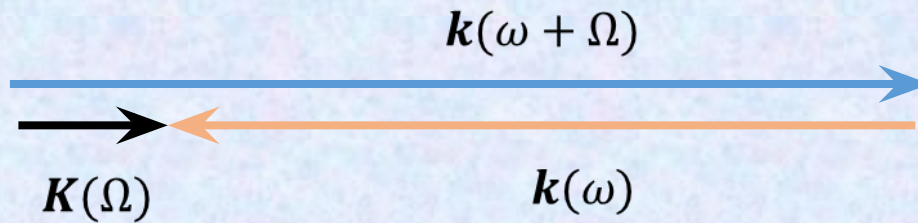
 - Получение синхронизма

- Наиболее распространенные кристаллы:

 - LiNbO₃, GaAs, ZnTe, GaP, GaSe, DAST

Обеспечение синхронизма

- Для эффективной генерации терагерцового излучения нужно обеспечить условие синхронизма.



$$\Delta k = k(\omega + \Omega) - k(\omega) - K(\Omega) = 0$$

Или

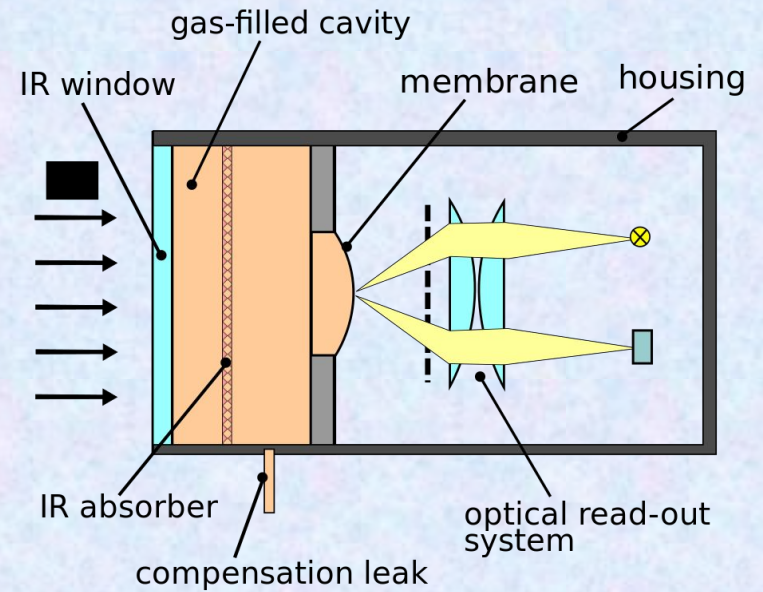
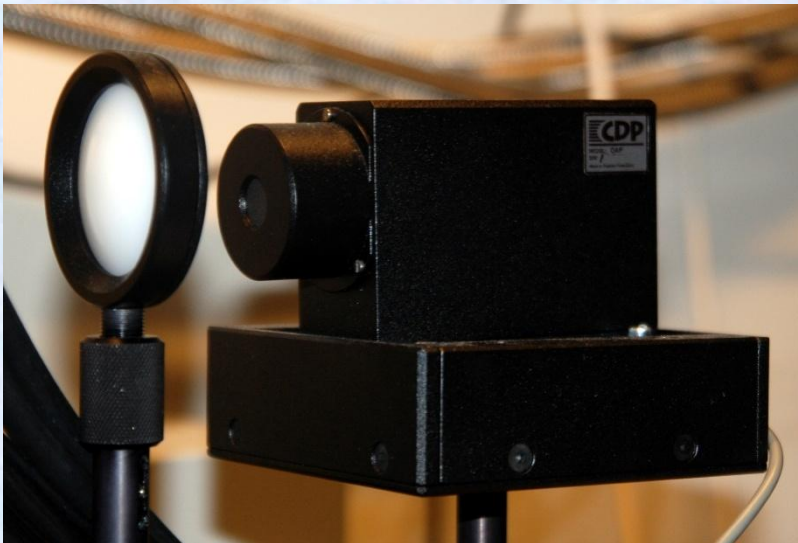
$$v_{opt}^{gr} = v_{THz}$$

Приемники ТГц излучения

- Тепловые приемники
- Электронные приемники
- Измерители напряженности поля

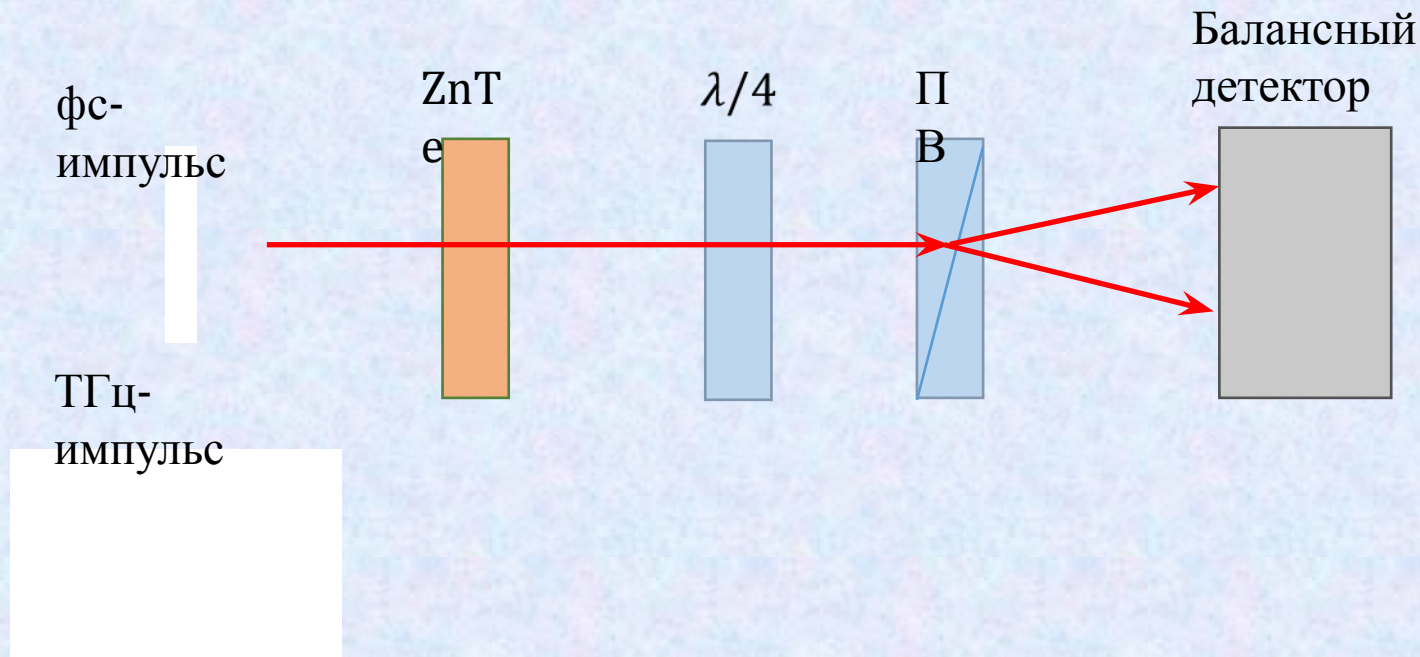
Ячейка Голея

- Газовый термометр
- Измеряемая мощность от 1 нВт



Электрооптическое детектирование

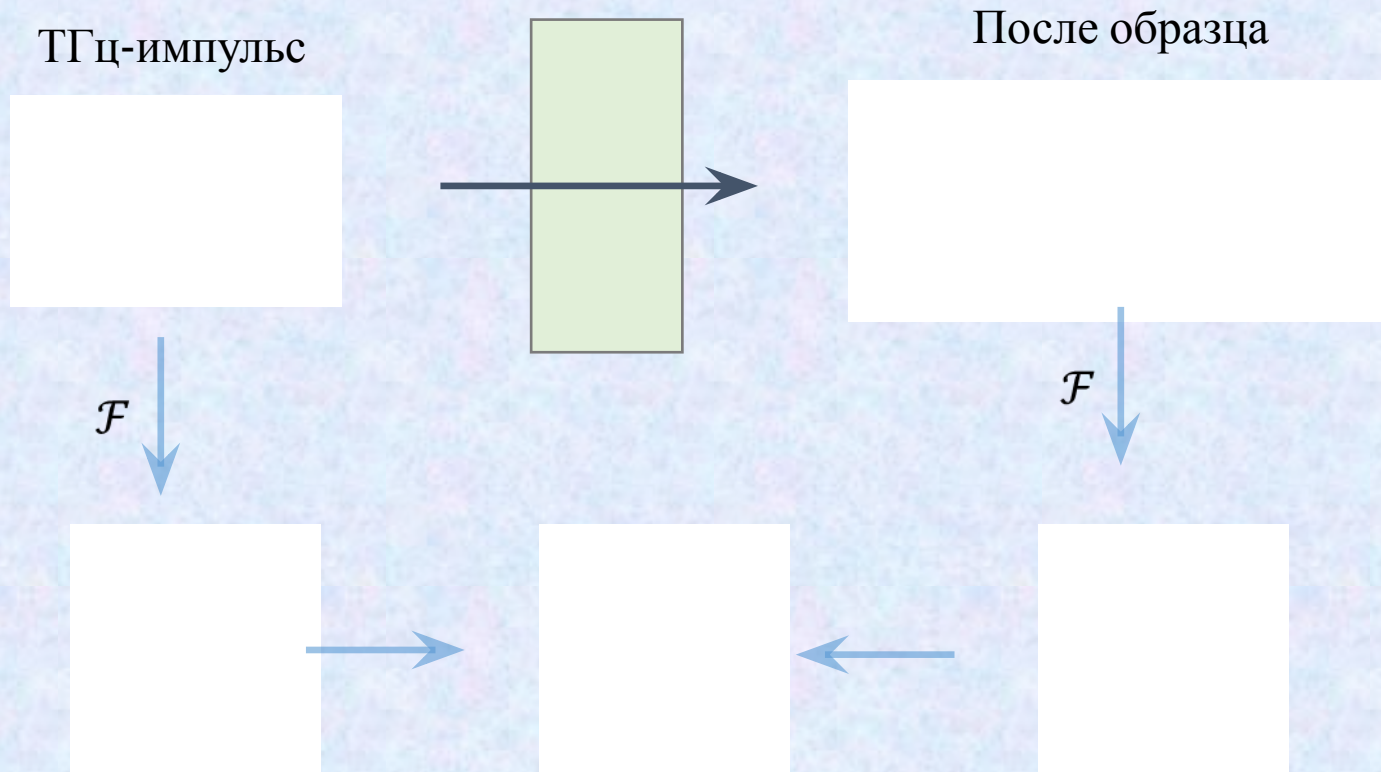
- Квадратичную нелинейность можно использовать для регистрации терагерцовых импульсов



Спектроскопия во временной области

- Можно *измерить* зависимость напряженности электрического поля от времени
- Фурье-образ сигнала содержит как амплитудный так и фазовый спектр излучения
- Можно измерить спектр поглощения и преломления образца (АЧХ и ФЧХ)

Спектроскопия во временной области

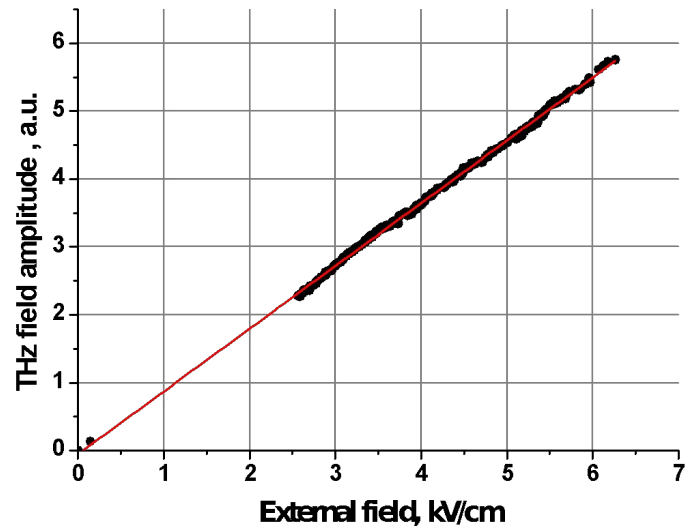


Time-dependent amplitude of THz pulse and its spectrum

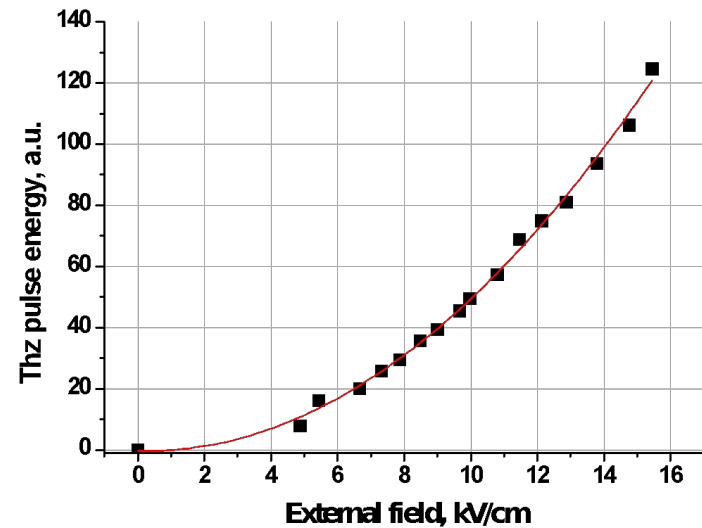
Water absorption
lines
0.557 THz
1.098 THz
1.164 THz

Dependences of intensity and amplitude of THz field on the external field

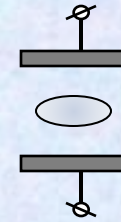
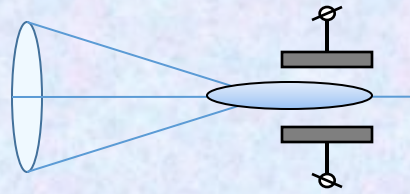
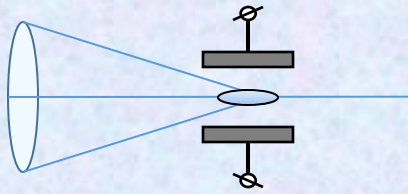
Electro- optic detection system



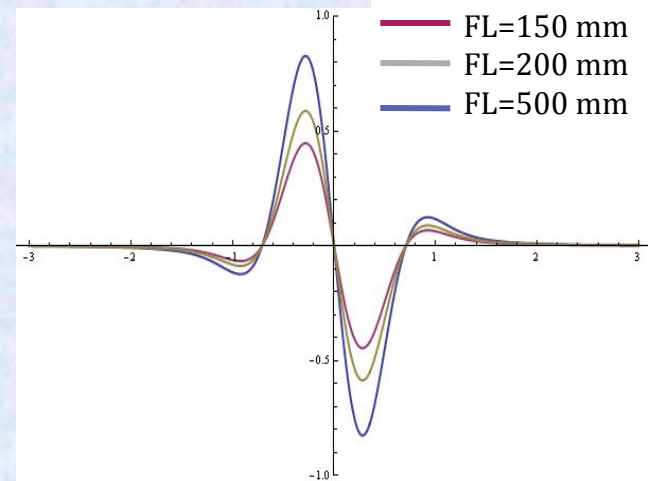
Golay cell



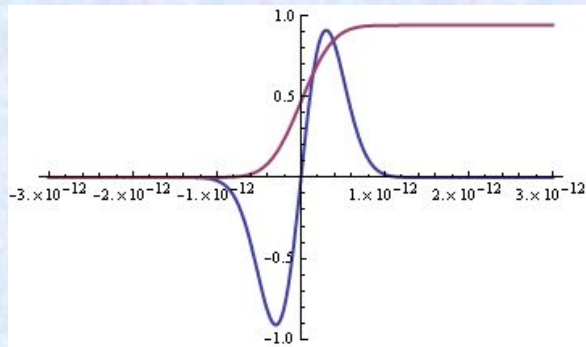
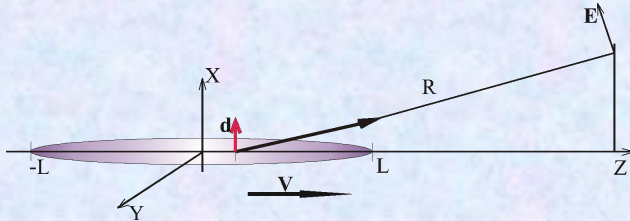
Dependence of THz amplitude on energy of laser pulse



P=10 GW- critical self focusing power

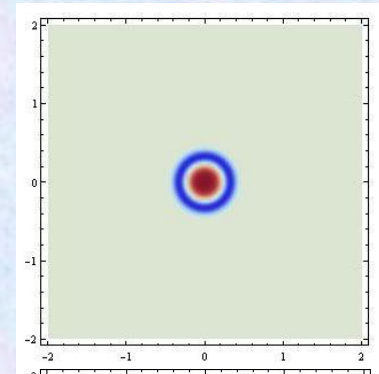


Mathematical modeling of distribution of THz radiation

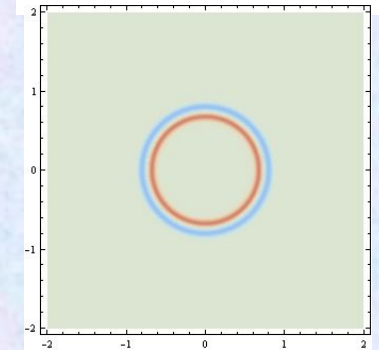


$$\mathbf{E}\left(t - \frac{R}{c}\right) = \frac{1}{c^2 R} [\ddot{\mathbf{d}}(t) \mathbf{n}] \mathbf{n}$$

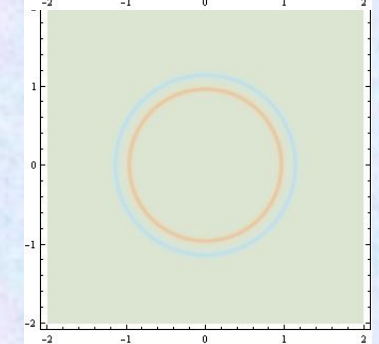
$$\mathbf{d}(t) = \alpha f\left(t - \frac{l}{v}\right) \mathbf{e}$$



$t = 0.3 \text{ ps}$



$t = 3 \text{ ps}$



$t = 6 \text{ ps}$

Генерация ТГц излучения в лазерной плазме

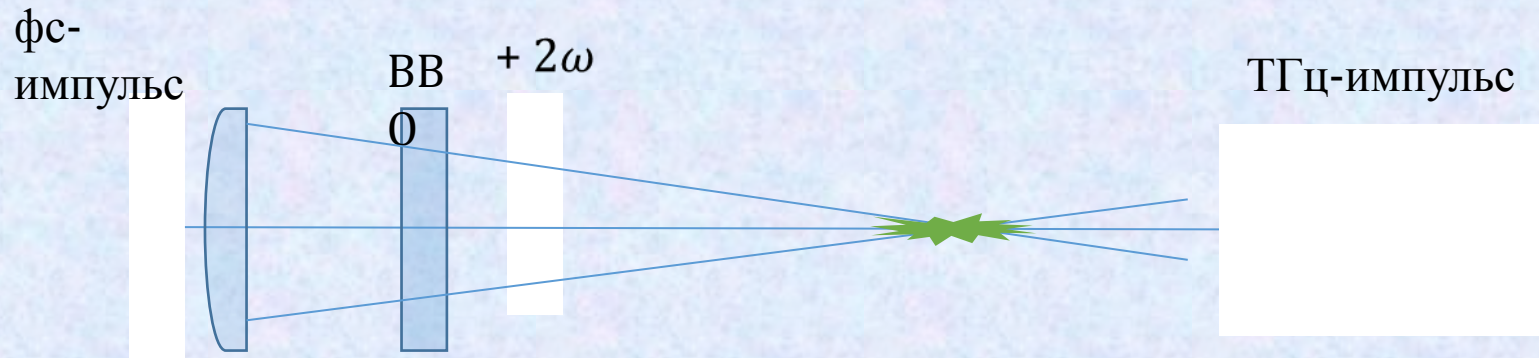
- Генерация терагерцового излучения в твердотельной плазме
- Генерация токов при оптическом пробое газа

Терагерцовое излучение из плазмы оптического пробоя газов

- Продольное ускорение электронов
низкая эффективность
- Пробой во внешнем поле
аналог фотопроводящей антенны
- Пробой двухчастотным импульсом

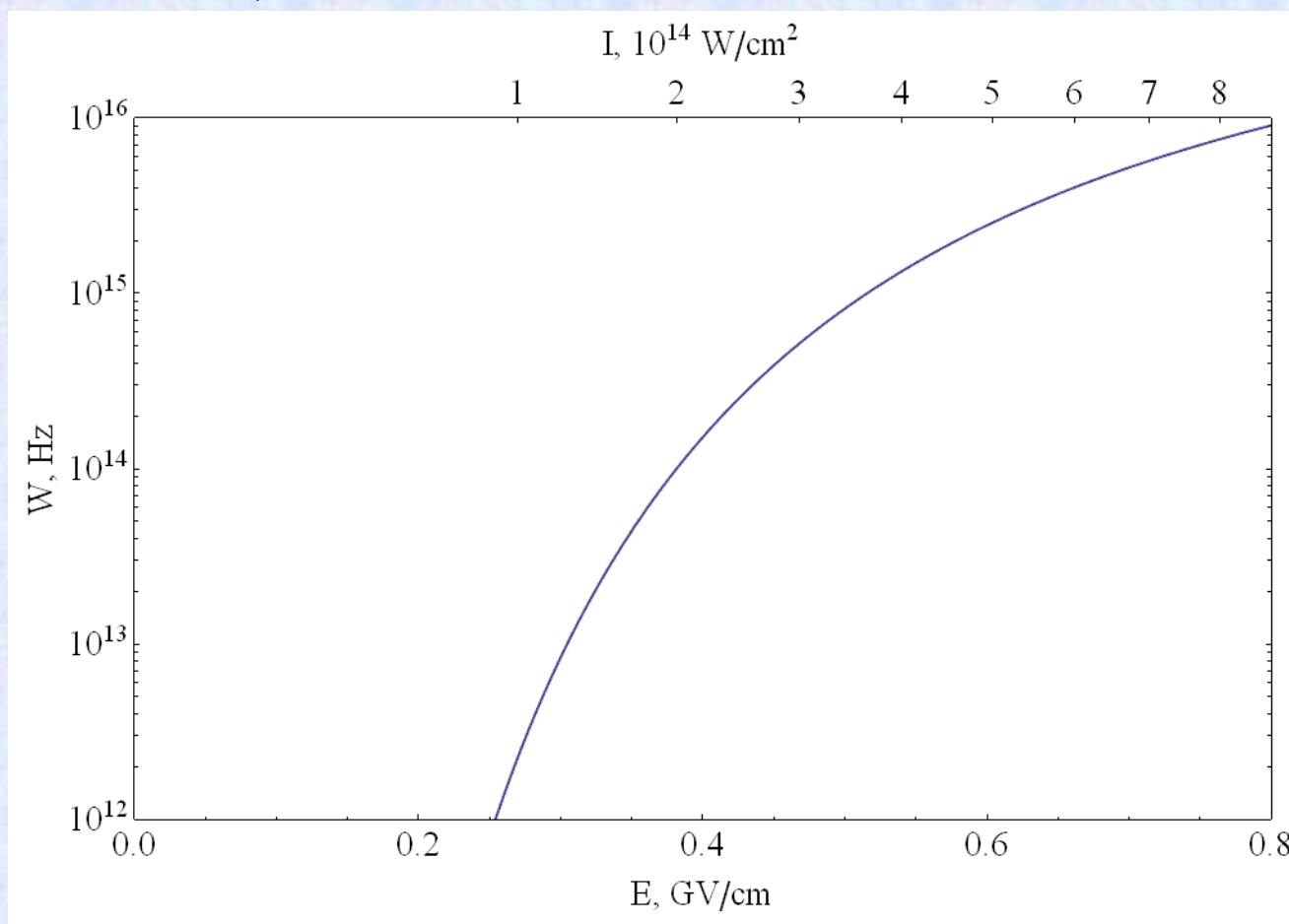
Бихроматическое излучение

- Одновременная фокусировка излучения основной и второй гармоник

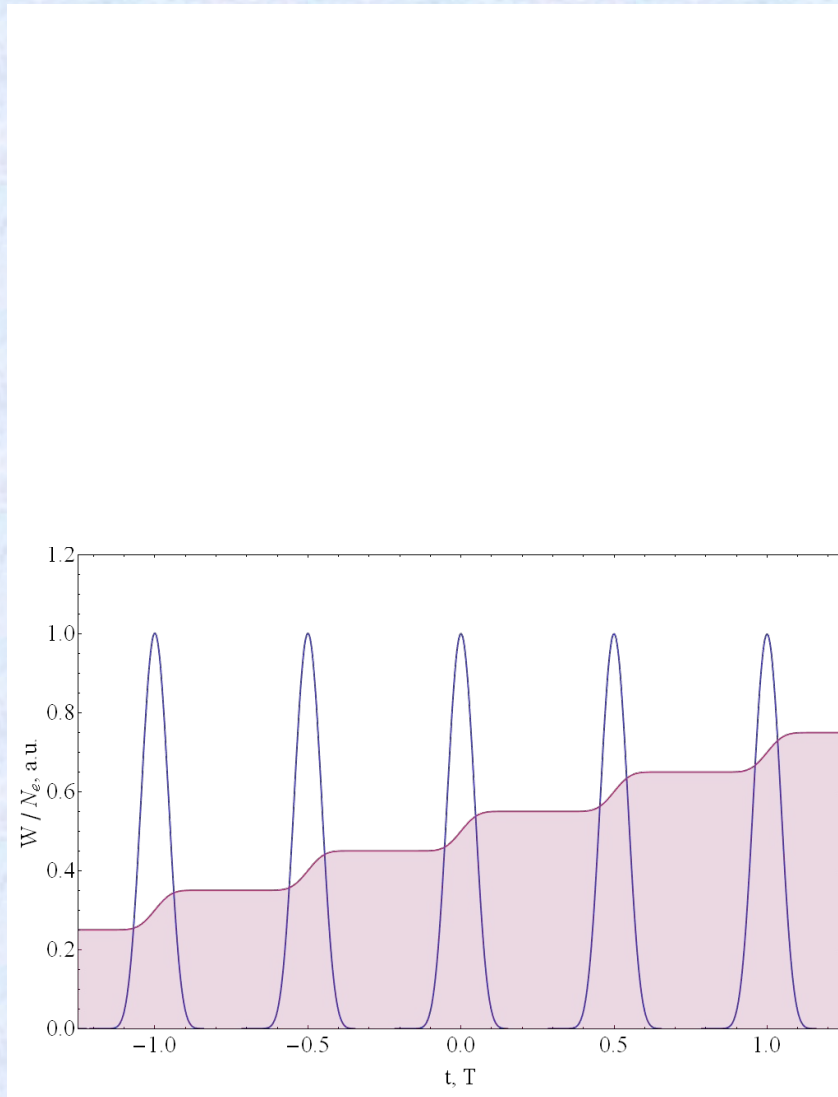


- Наиболее эффективный способ генерации при оптическом пробое

Туннельная (полевая) ионизация



Ионизация полем волны



$$E \sim \cos \omega t$$

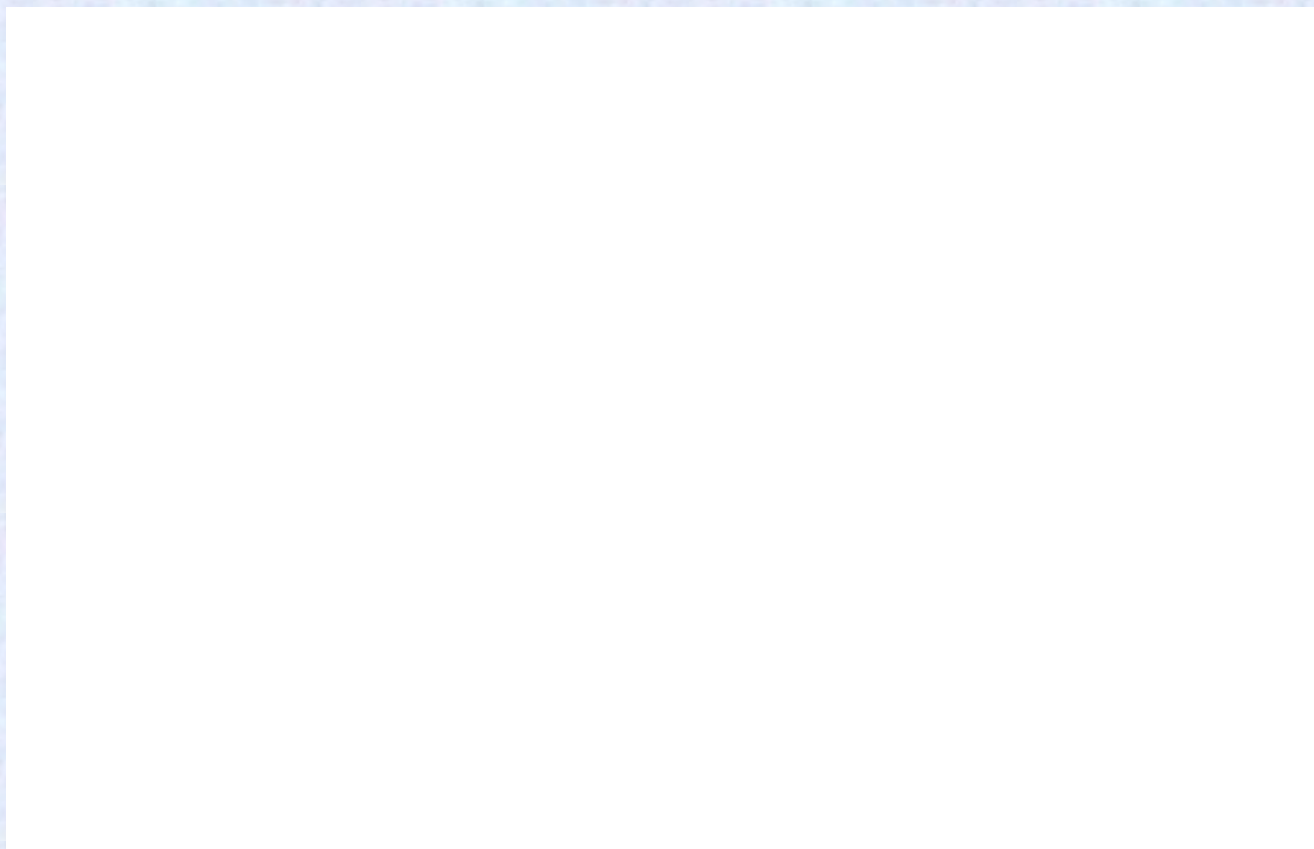
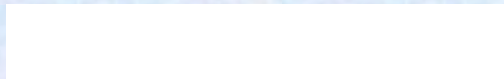
$$W = W(|E|),$$
$$\dot{N}_e = WN_0$$

Ионизация полем волны

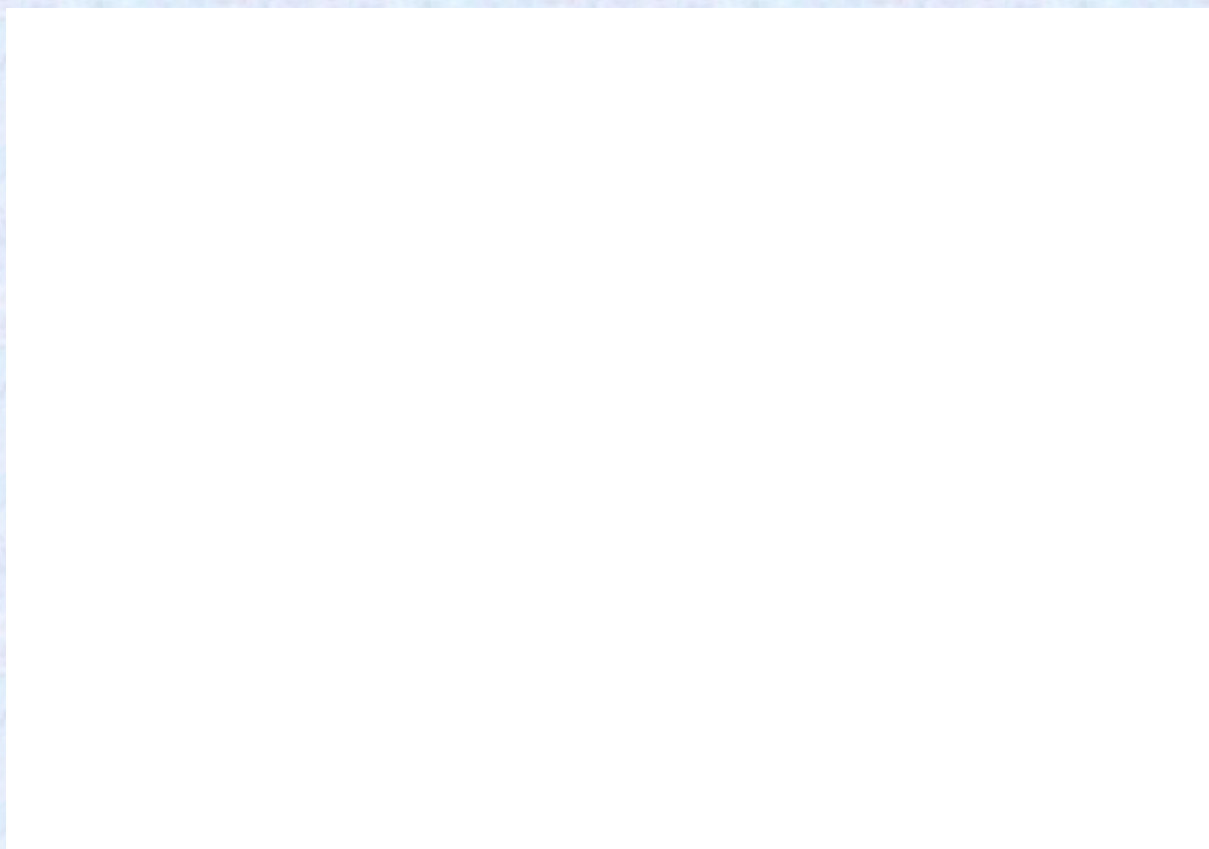
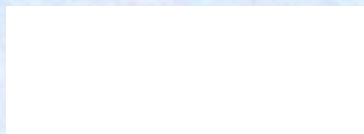
$$\dot{v} = \frac{e}{m} E$$

$$v(\tau) = 0$$

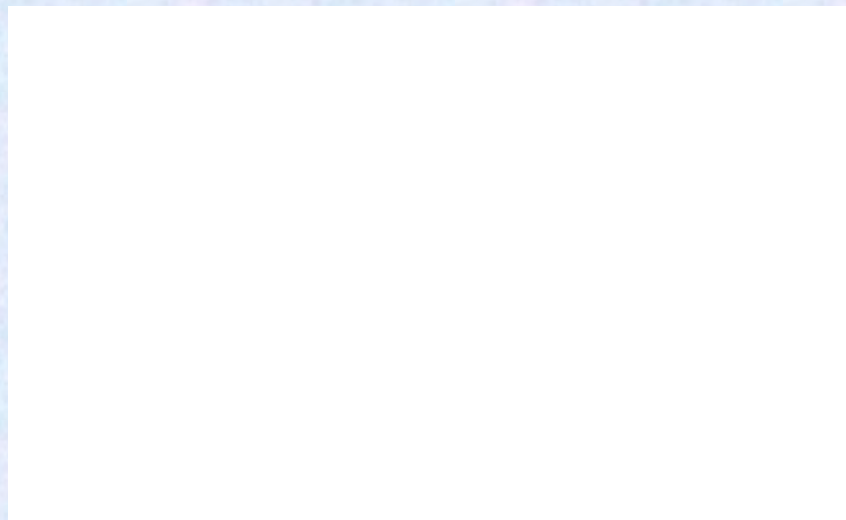
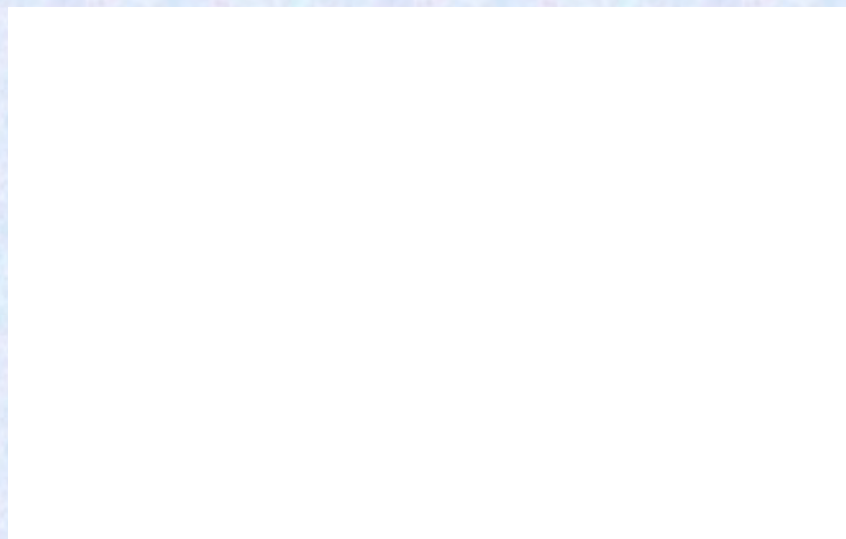
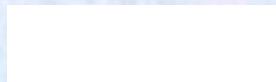
Ионизация полем волны



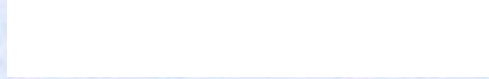
Генерация тока



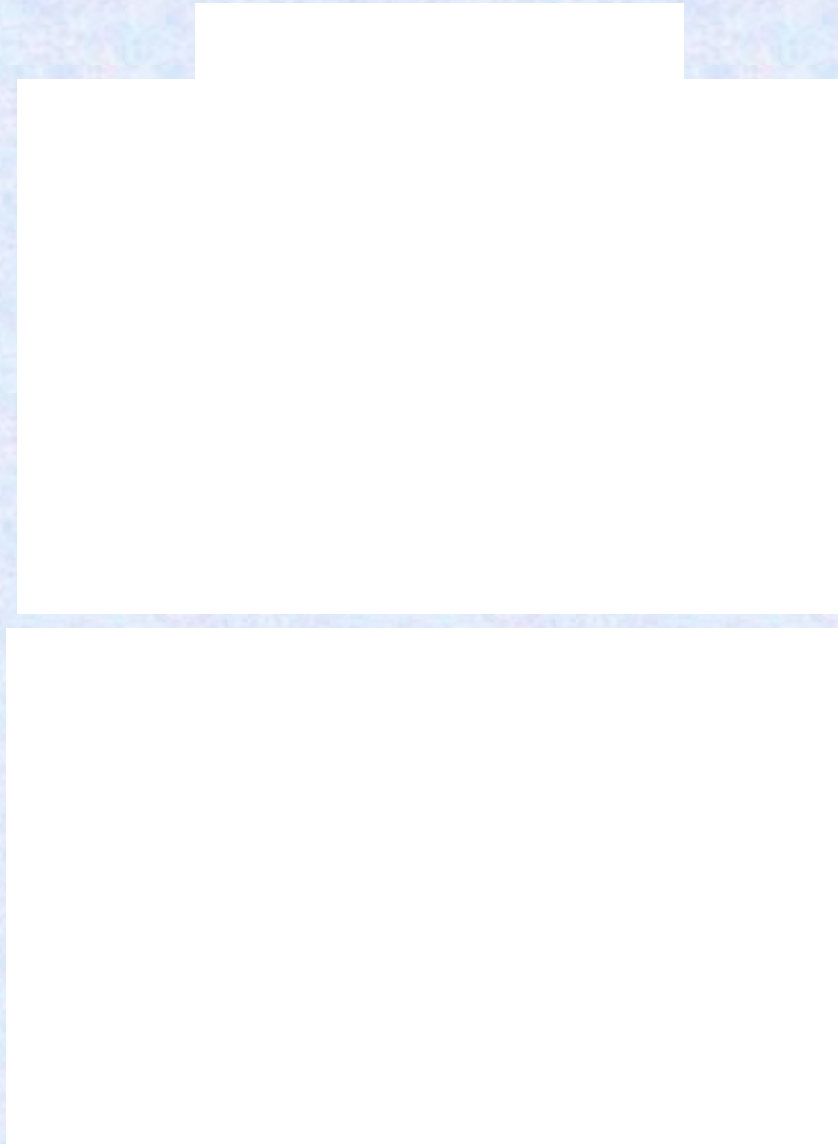
Ионизация двухчастотным полем



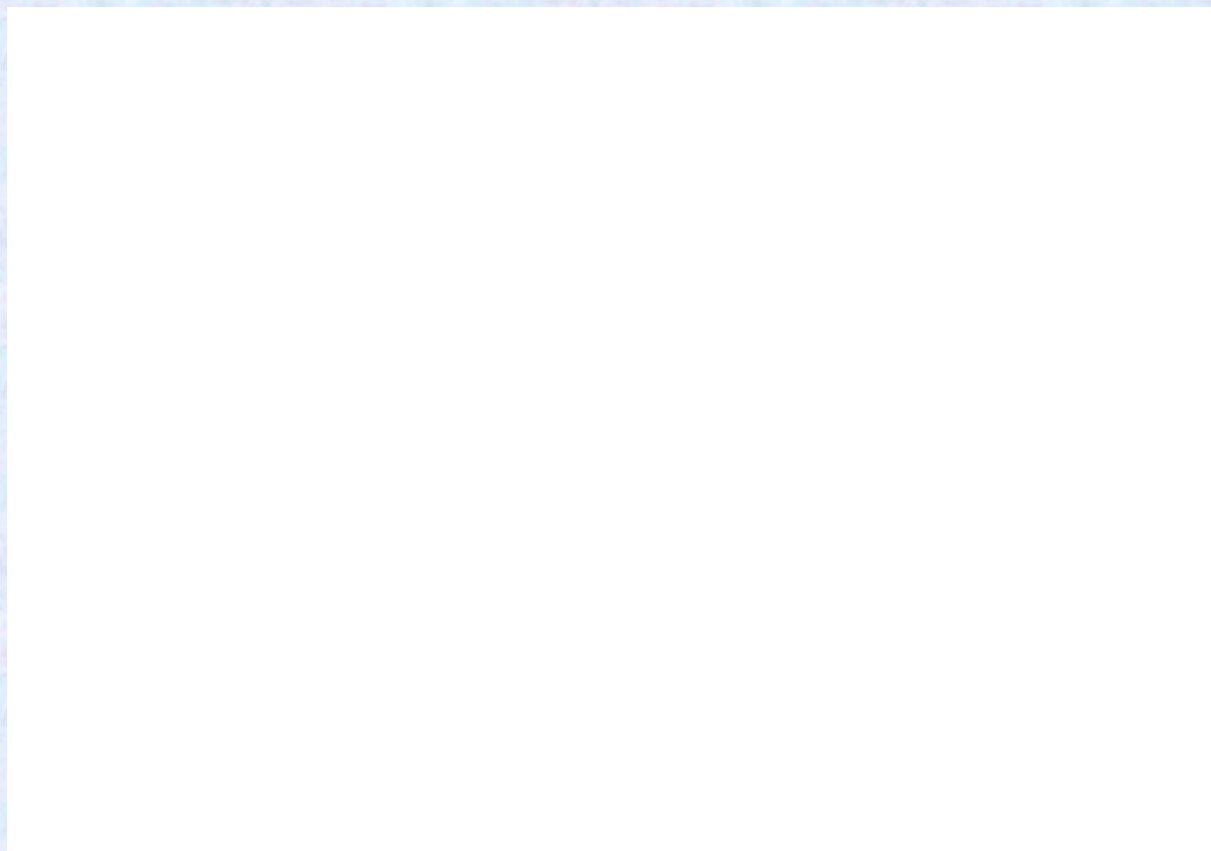
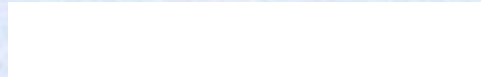
Ионизация двухчастотным полем



Ионизация двухчастотным полем



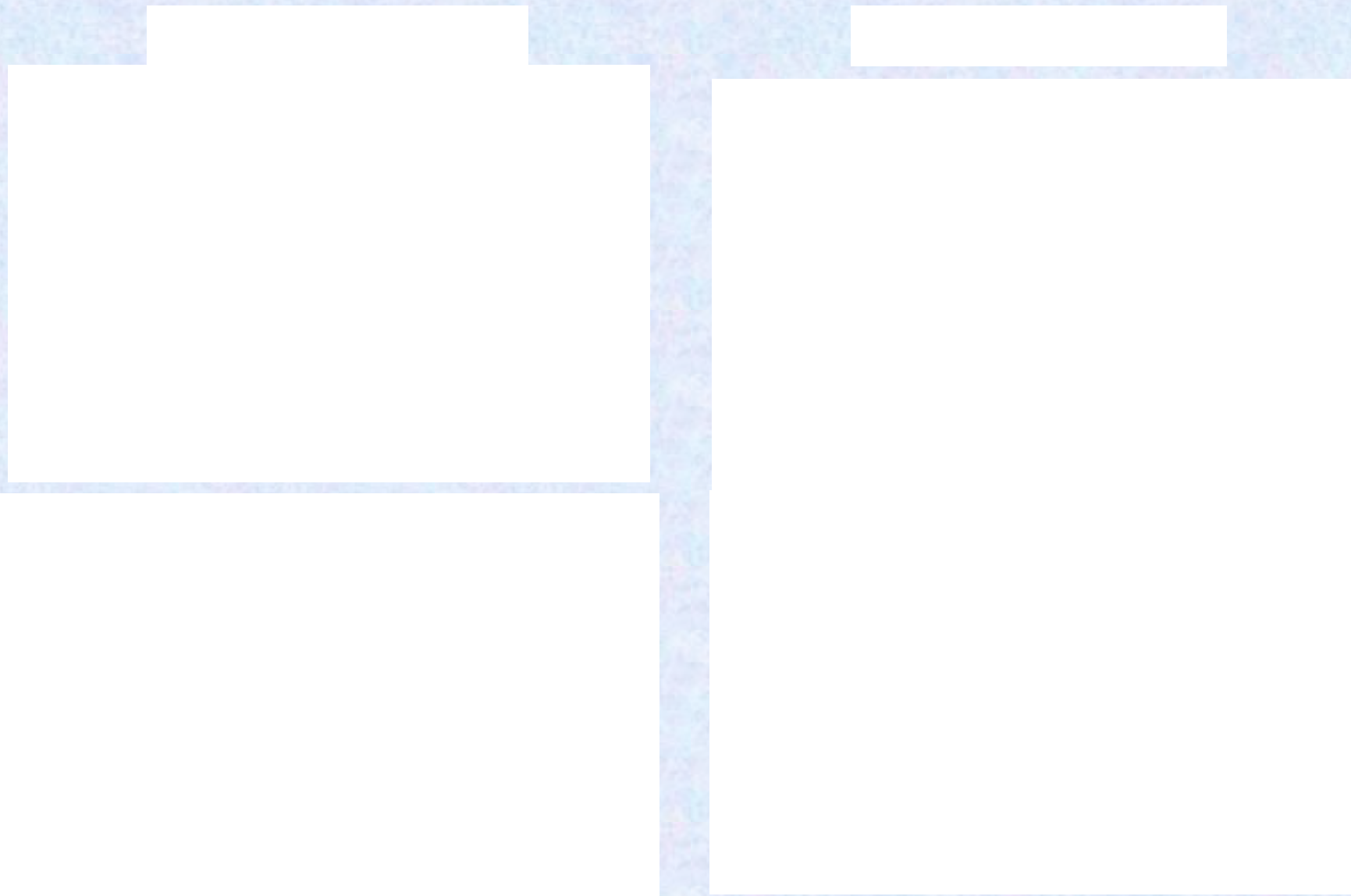
Ионизация двухчастотным полем



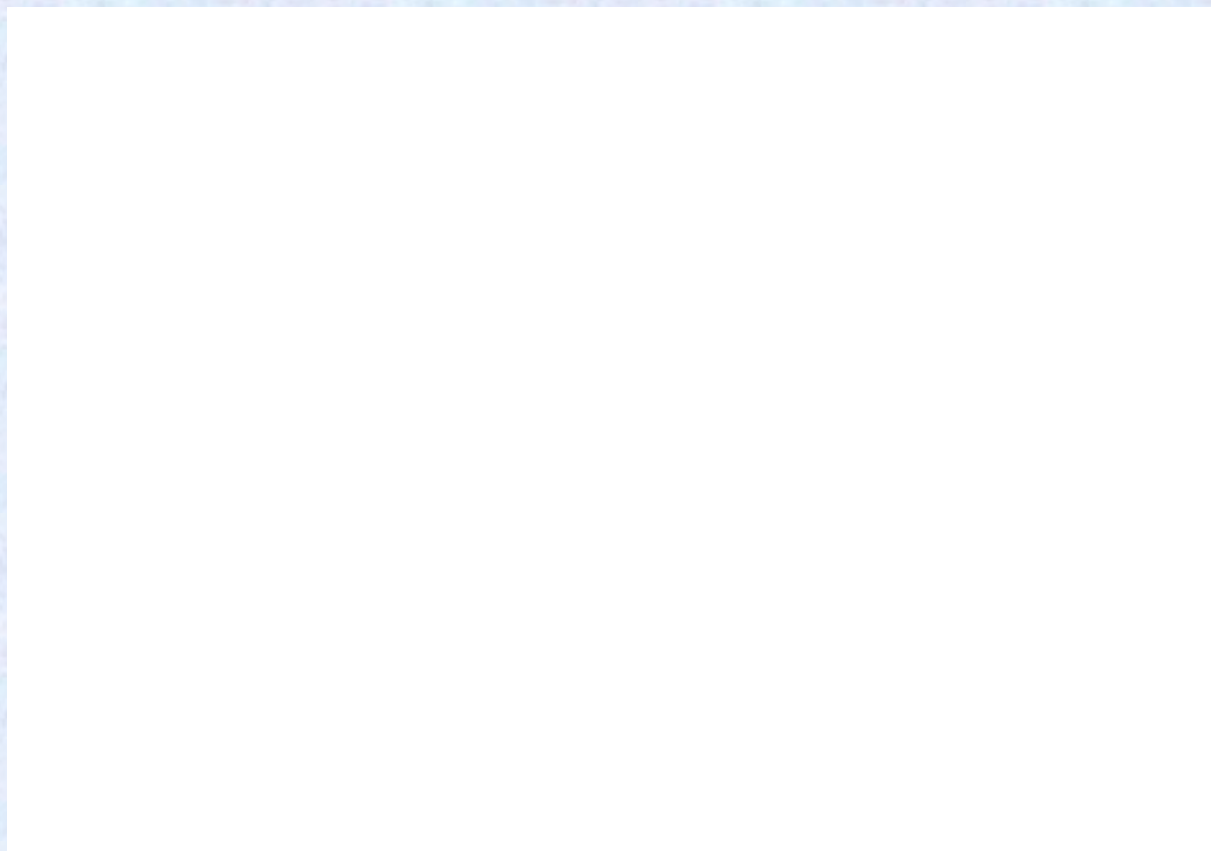
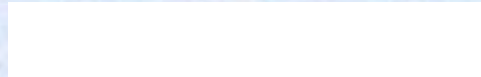
Ионизация двухчастотным полем



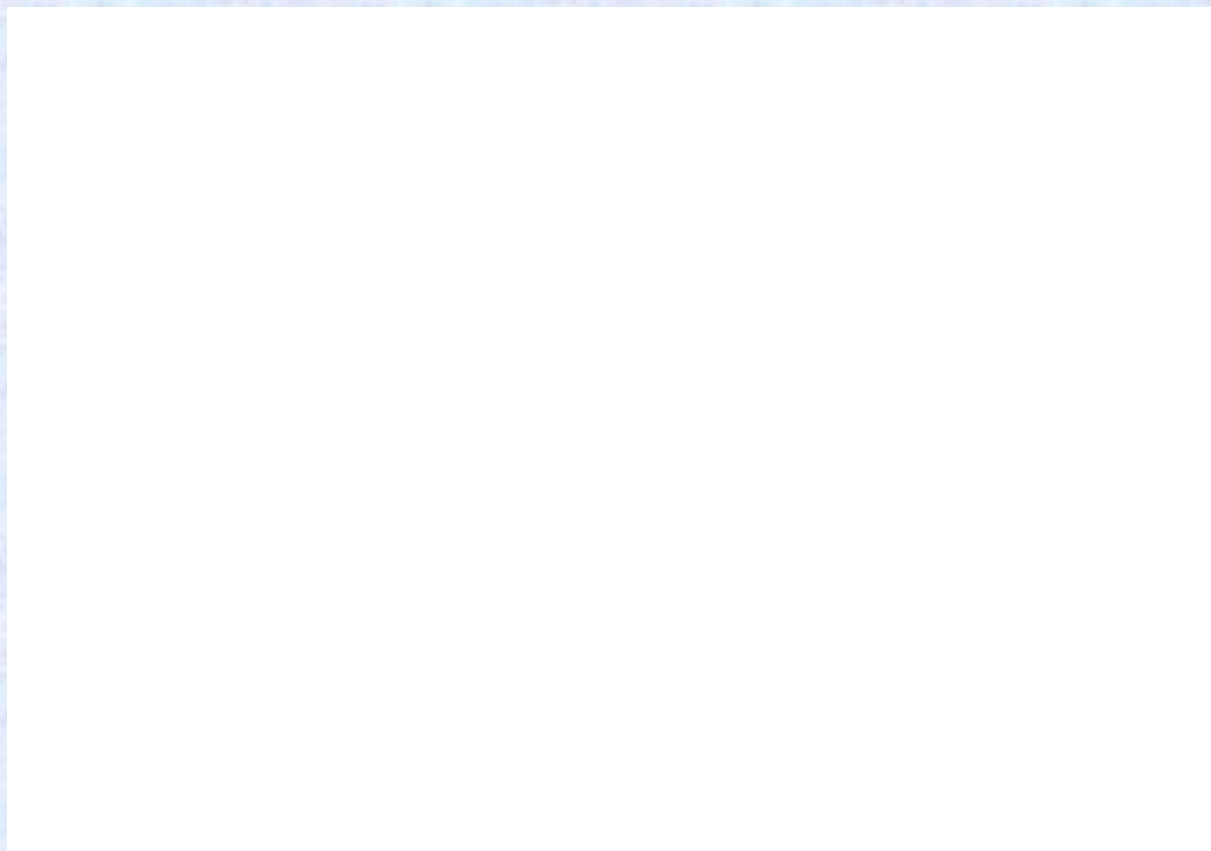
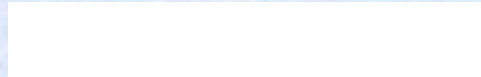
Ионизация двухчастотным полем



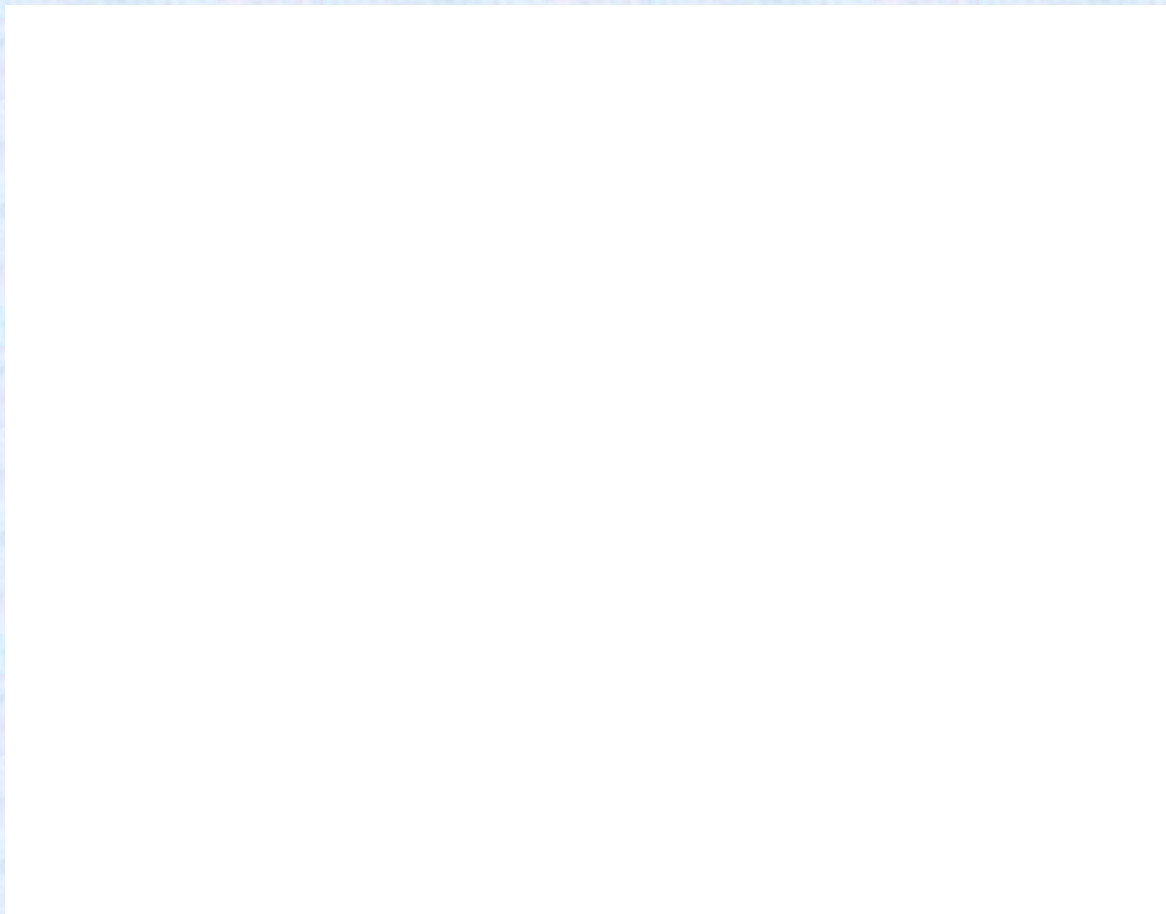
Ионизация двухчастотным полем



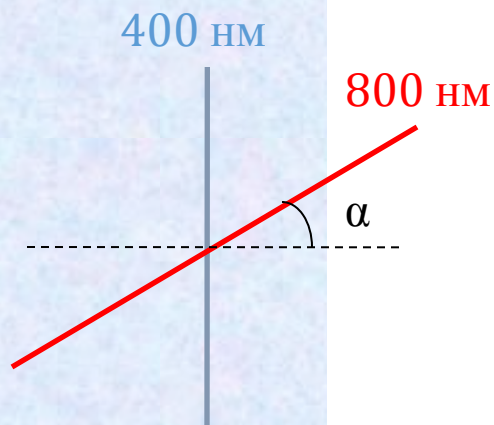
Ионизация двухчастотным полем



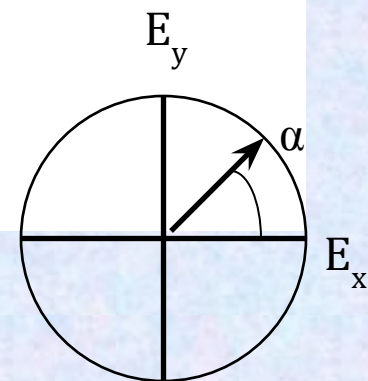
Зависимость ТГц сигнала от угла между линейными поляризациями основной и второй гармоник



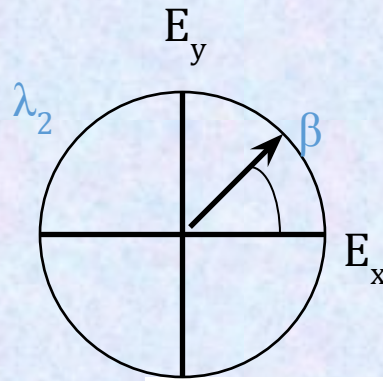
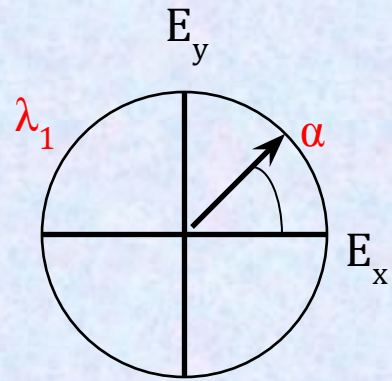
Зависимость ТГц сигнала от угла между линейными поляризациями основной и второй гармоник



Зависимость ТГц сигнала от эллиптичности поляризации основной гармоники при
линейной поляризации второй гармоники



Зависимость ТГц сигнала от эллиптичности поляризации основной гармоники при фиксированных состояниях поляризации второй гармоники а) эллиптическая, б) круговая.

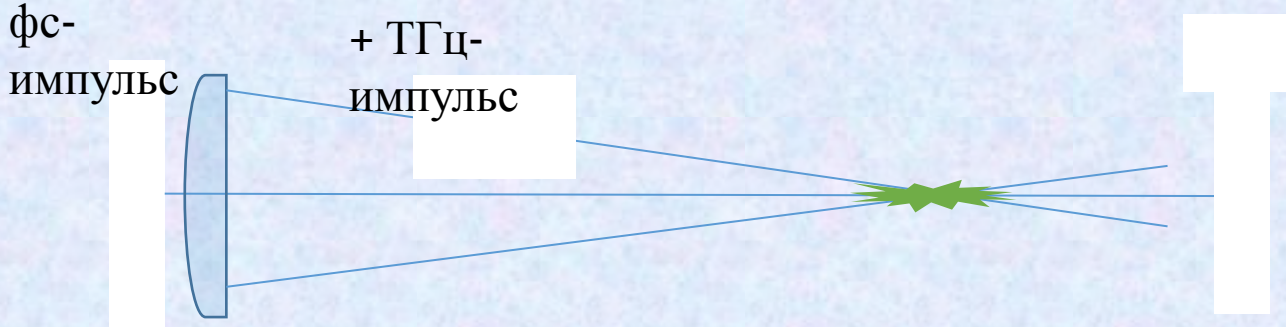


а) $\beta=15$

б) $\beta=45$

Детектирование в плазме

- Возможен обратный процесс:



- Полоса ограничена длительностью импульса (десятки ТГц)