Акустооптические методы управления фемтосекундным лазерным излучением

К.Б.Юшков, В.Я. Молчанов

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"
НТУЦ Акустооптики, Москва

konstantin.yushkov@misis.ru

ИПТМ РАН, г. Черноголовка
27 ноября 2019 г.

МИСиС

Содержание

1. Акустооптические технологии в НИТУ «МИСиС»
2. Принцип управления фемтосекундными импульсами
3. Акустооптические дисперсионные линии задержки
4. Системные применения
5. Заключение

1. НТУЦ Акустооптики в НИТУ «МИСиС»

- **Научно-технологический и учебный центр Акустооптики** создан в НИТУ «МИСиС» в 2000 г.
- На базе центра в 2014 г. создана **Лаборатория акустооптических и лазерных систем биофотонки**

Наши направления деятельности:

- Прикладные НИР и ОКР в области разработки и применения акустооптических систем
- Разработка и конструирование уникальных акустооптических приборов
- Полный технологический цикл изготовления акустооптических устройств

2. Технологическая линейка производства

Технология внедрена в НТО «ИРЭ-Полюс» (г. Фрязино) для серийного производства

3. Классификация акустооптических приборов

По назначению:

- Модуляторы и лазерные затворы
- Частотосдвигатели
- Дефлекторы
- Пространственные модуляторы
- Анализаторы спектра ВЧ-сигналов
- Перестраиваемые спектральные фильтры
- **Дисперсионные линии задержки**

По типу фотоупругости:

- Изотропные (без смены оптической моды)
- **Анизотропные** (в двулучепреломляющих кристаллах)

4. Соотношение спектров в различных акустооптических устройствах

Тип устройства	Спектр акуст.	Спектр оптический	
		вход	выход
Дефлектор, модулятор			
Эквалайзер для WDM			
Анализатор ВЧ-спектра			
Фильтр (монохроматор)			
Дисперсионная линия			

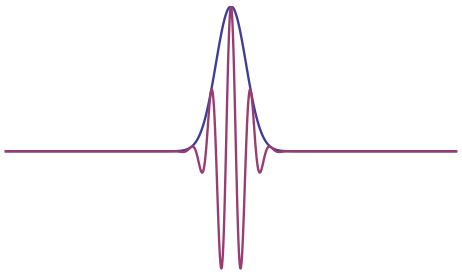
5. Задачи управления формой фемтосекундных импульсов (pulse shaping)

- **Компенсация дисперсий высших порядков**
  - сжатие импульсов в мощных CPA-системах
  - согласование стретчера и компрессора в OPCPA-системах и рамановских лазерах
- **Спектральная коррекция излучения**
  - компенсация искажений спектра при усилении
- **Формирование импульсов специальной формы**
  - генерация терагерцового излучения
  - лазерные драйверы фотокатодов
  - лазерный термоядерный синтез

Weiner A.M., ***Opt. Commun., 284***, *3669* (2011)

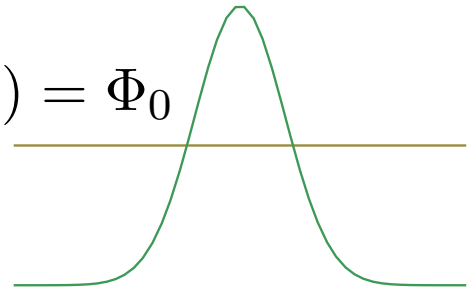
6. Задачи управления формой фемтосекундных импульсов

Спектрально-ограниченный импульс



Спектр:

$\Phi(\omega) = \Phi_0$



$S(\omega) \in \mathbb{R}$

$\Longrightarrow$

Дисперсионная среда или прибор

$$\Phi(\omega) = \sum D_n(\omega - \omega_0)^n$$

Комплексное пропускание

$$H(\omega) = e^{i\Phi(\omega)}$$

Нормальная дисперсия:

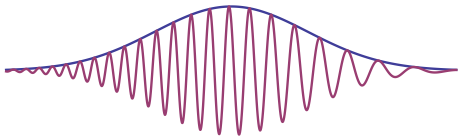
$$D_2 > 0$$

Аномальная дисперсия:

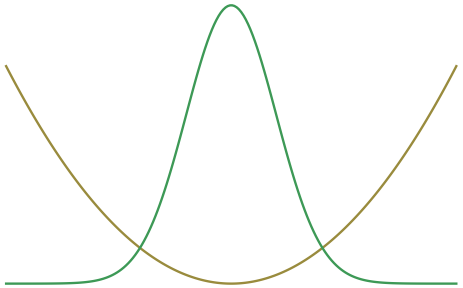
$$D_2 < 0$$

$\Longrightarrow$

Чирпированный импульс



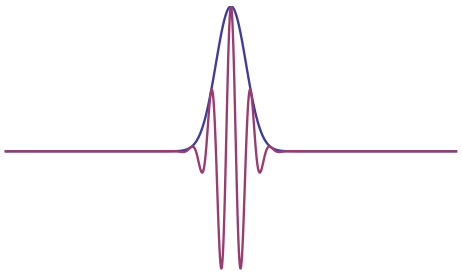
Спектр:



$S(\omega) \in \mathbb{C}$

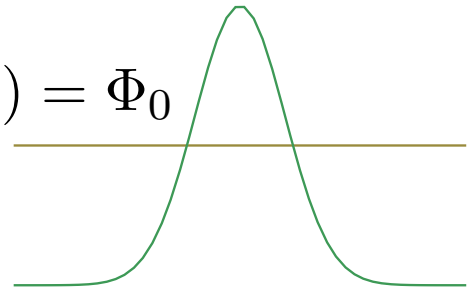
6. Задачи управления формой фемтосекундных импульсов

Спектрально-ограниченный импульс



Спектр:

$\Phi(\omega) = \Phi_0$



$S(\omega) \in \mathbb{R}$

$\Longrightarrow$

Дисперсионная среда или прибор

$$\Phi(\omega) = \sum D_n(\omega - \omega_0)^n$$

Спектральная модуляция:

$$H(\omega) = M(\omega)e^{i\Phi(\omega)}$$

Поглощение:

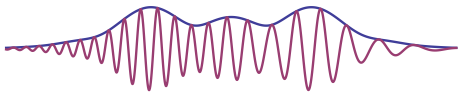
$$M(\omega) < 1$$

Усиление (активная среда):

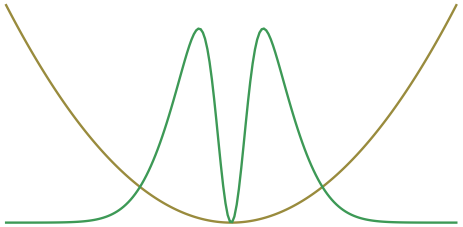
$$M(\omega) > 1$$

$\Longrightarrow$

Чирпированный импульс



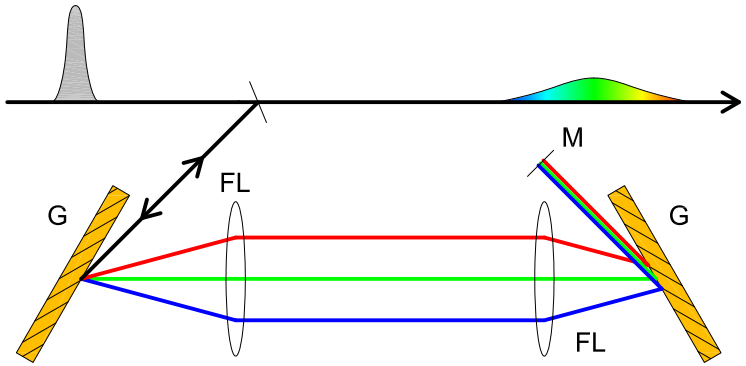
Спектр:



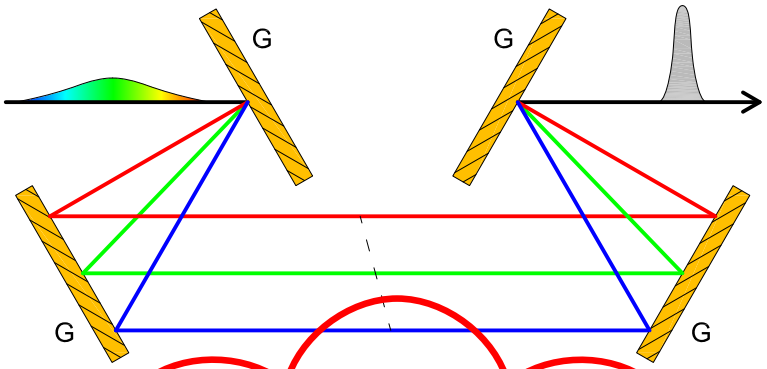
$S(\omega) \in \mathbb{C}$

7. Дисперсионные устройства

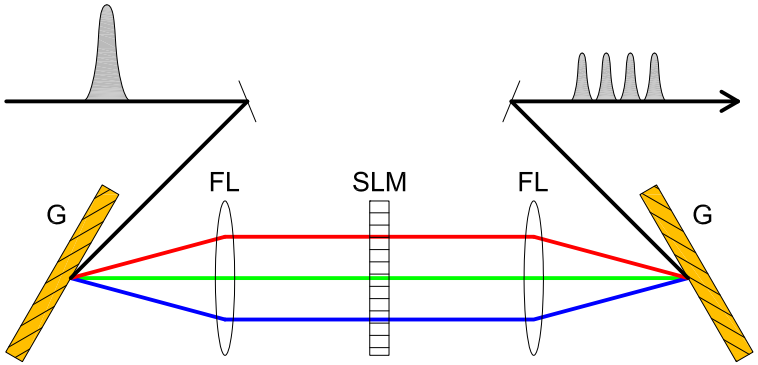
Стретчер: $D_2 > 0$



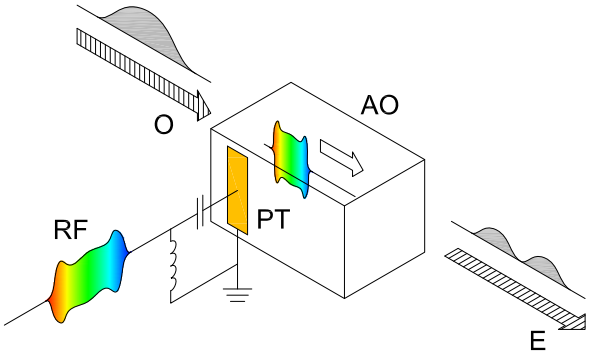
Компрессор: $D_2 < 0$



4F-Шейпер:

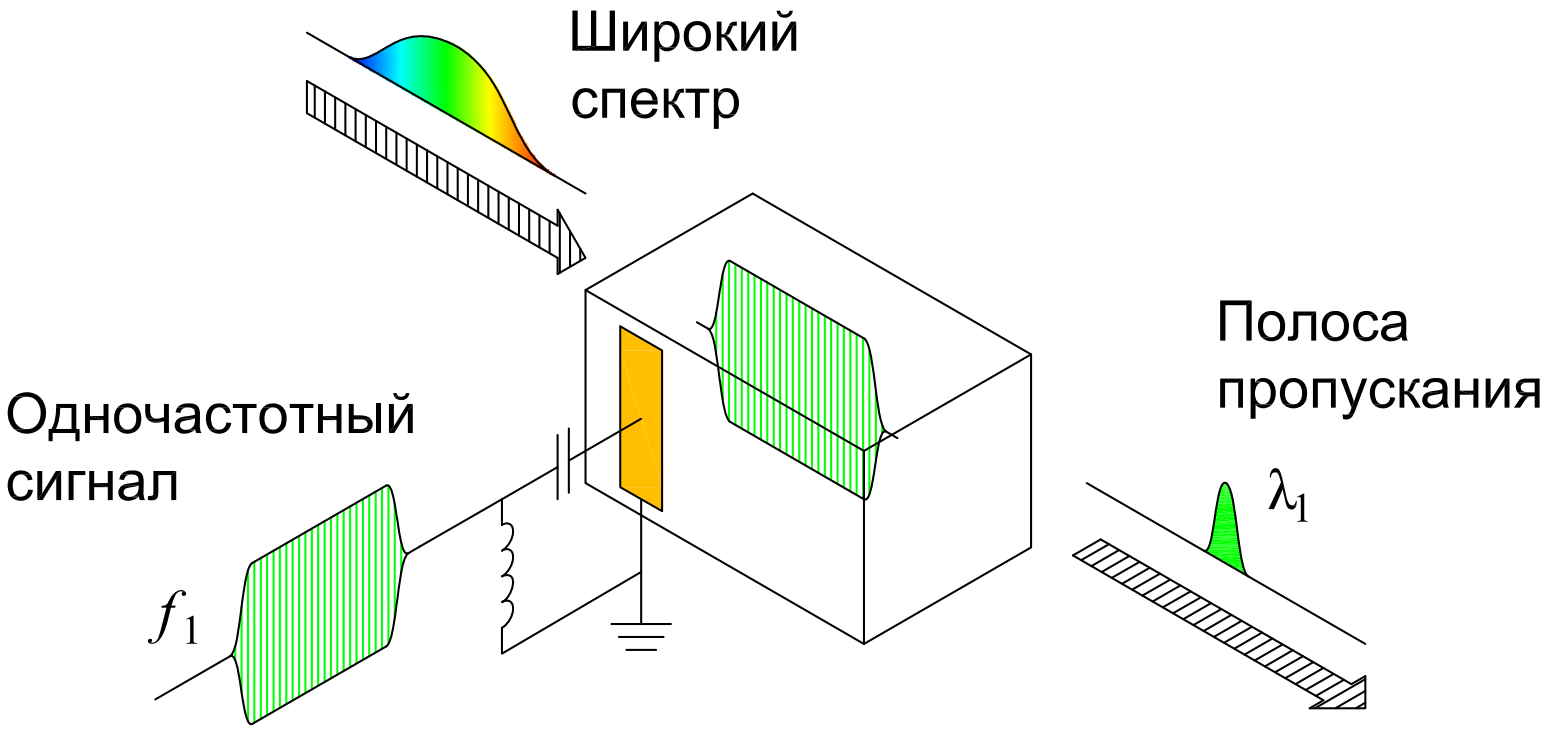


АОДЛЗ:



8. АО дисперсионная линия задержки (АОДЛЗ)

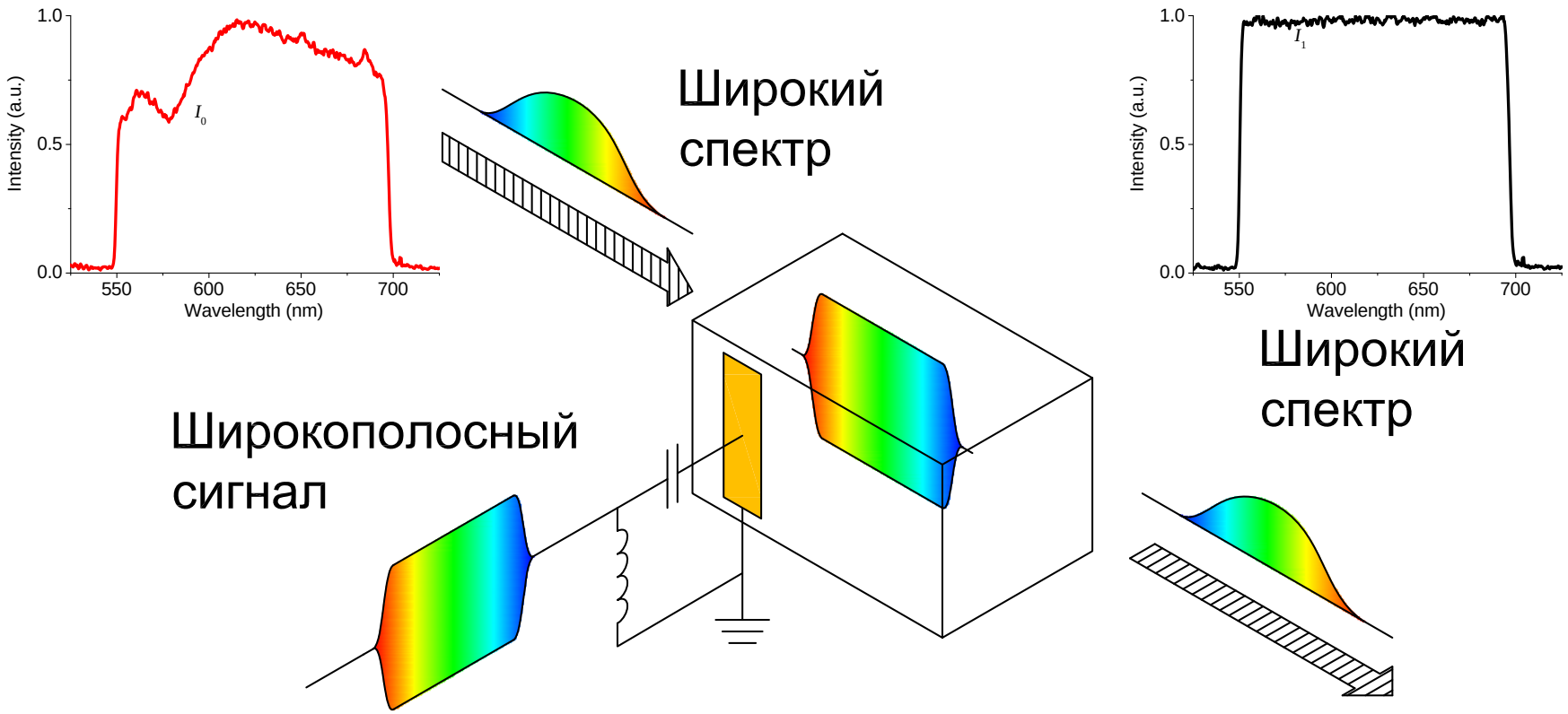
- Одночастотное управление $\Longrightarrow$ Монохроматор
- Широкополосное управление $\Longrightarrow$ Полосовой фильтр
- Распределенная анизотропная дифракция $\Longrightarrow$ Дисперсия задержки



Периодическая решетка

8. АО дисперсионная линия задержки (АОДЛЗ)

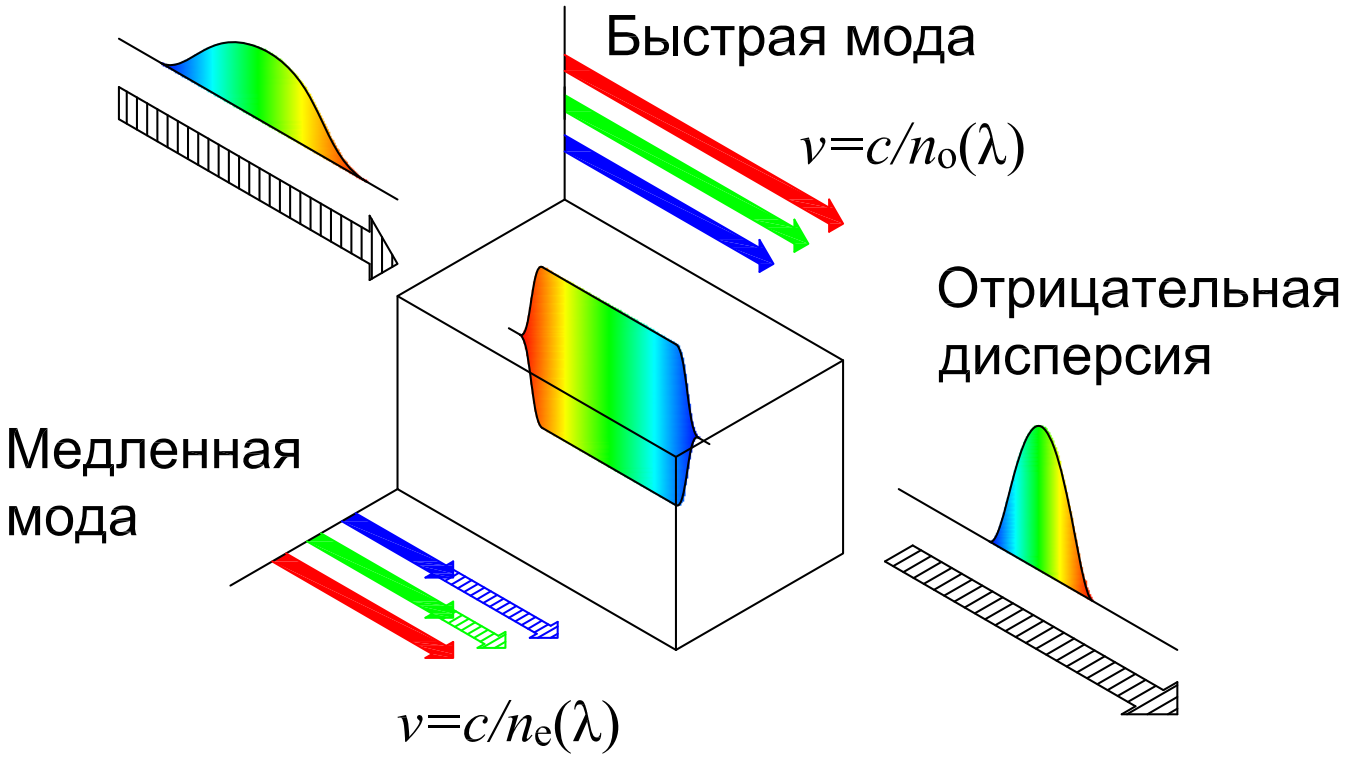
- Одночастотное управление $\Longrightarrow$ Монохроматор
- **Широкополосное управление $\Longrightarrow$ Полосовой фильтр**
- Распределенная анизотропная дифракция $\Longrightarrow$ Дисперсия задержки



Чирпированная решетка

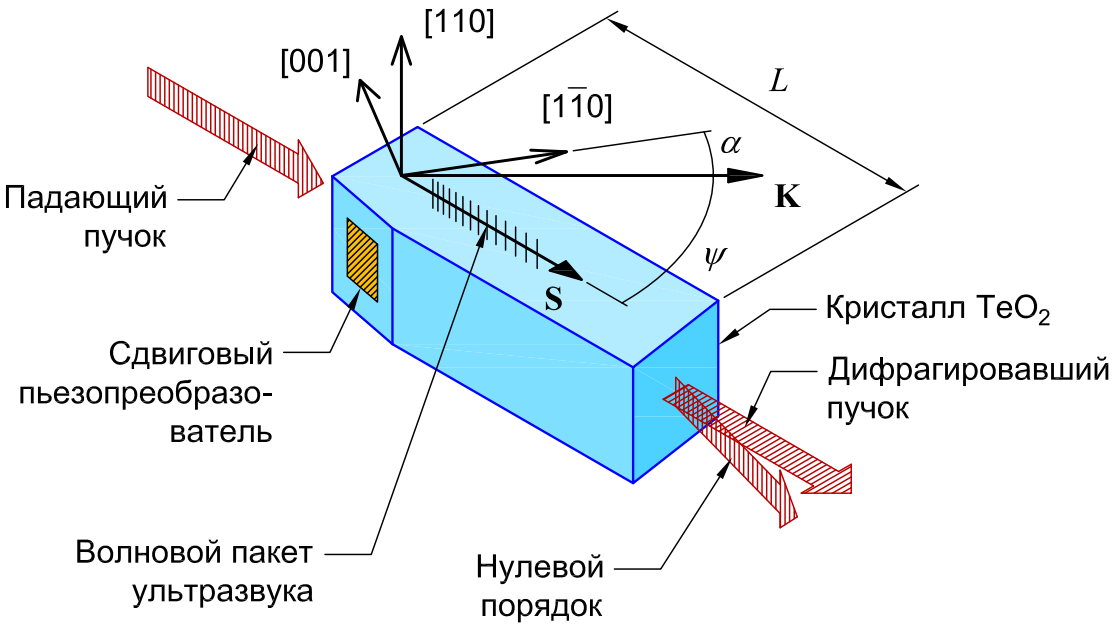
8. АО дисперсионная линия задержки (АОДЛЗ)

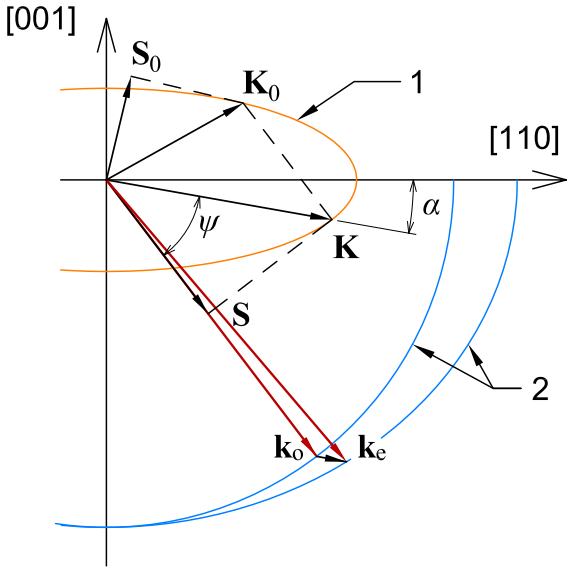
- Одночастотное управление $\Longrightarrow$ Монохроматор
- **Широкополосное управление** $\Longrightarrow$ **Полосовой фильтр**
- **Распределенная анизотропная дифракция** $\Longrightarrow$ **Дисперсия задержки**



Чирпированная решетка

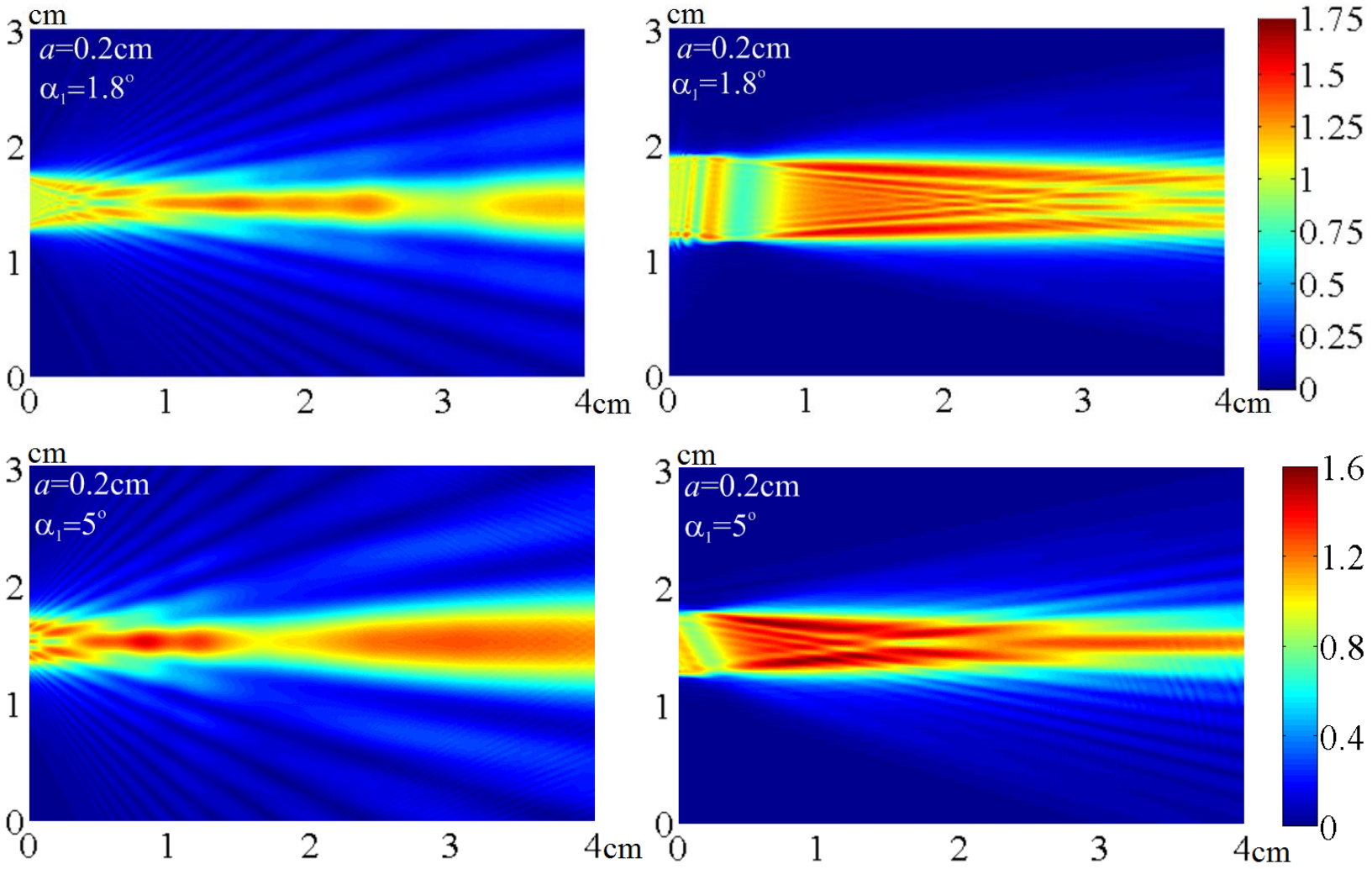
9. Схема квазиколлинеарной геометрии в TeO_2





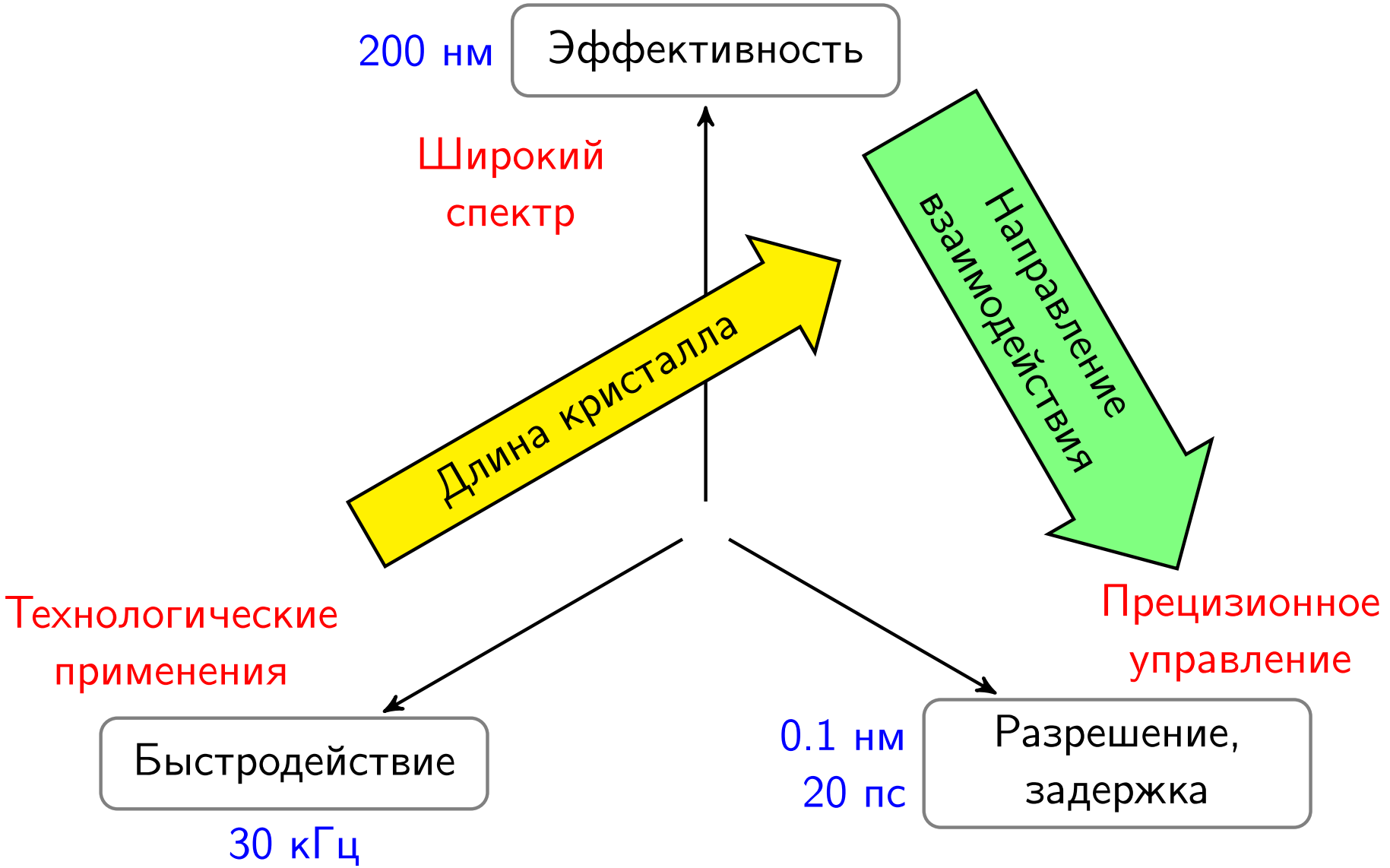
- Используется сильная акустическая анизотропия кристаллов
- Групповые скорости света и ультразвука параллельны
- Возможна гибкая оптимизация под параметры лазерной системы

10. Моделирование акустических полей в TeO_2



Автор расчётов: С.Н. Манцевич (МГУ им. М.В. Лмоносова)

11. Взаимосвязь параметров и конфигурации



12. Образцы приборов

- **парателлурит, 5°**
- длина кристалла 60 мм

Лазеры Ti:сапфир 800 нм, Cr:форстерит ∼1250 нм

- эффективность дифракции 70 %
- разрешение 3.6 см$^{-1}$
- **Широкий спектр**

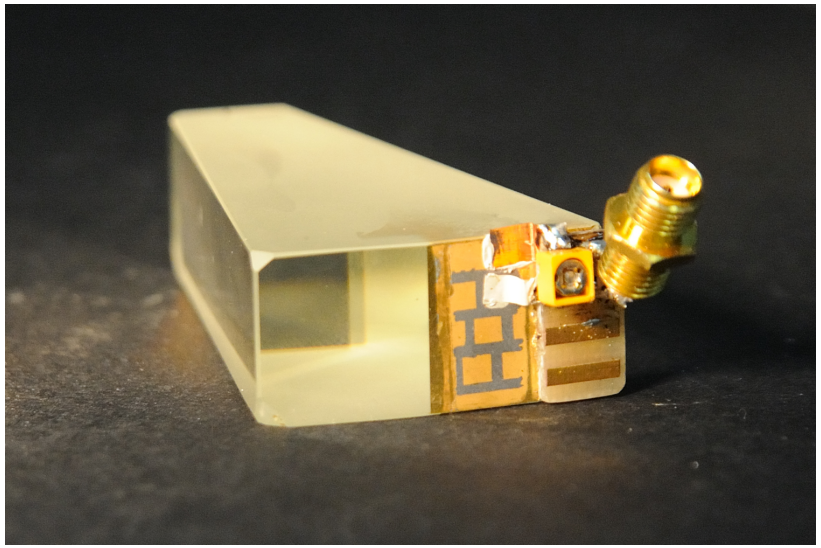
- **парателлурит, 1.8°**
- длина кристалла 67 мм

Лазеры Nd:стекло, волокно 1050–1060 нм

- эффективность дифракции 85 %
- разрешение 1.0 см$^{-1}$
- **Узкая полоса**

13. Образцы приборов

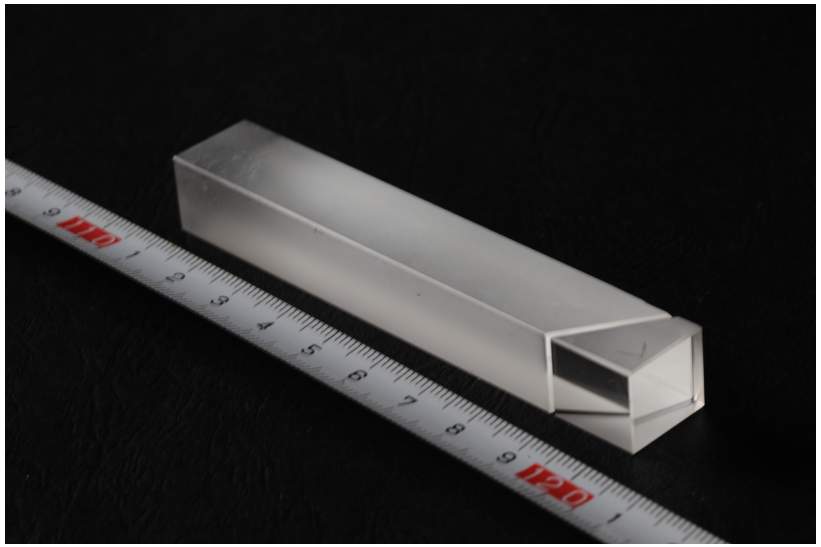
- **ниобат лития, Y-30°**
- длина кристалла 35 мм



Лазеры на оптоволокне 1–2 мкм

- эффективность дифракции $17\ \%$ (30 Вт)
- разрешение 4.1 см$^{-1}$
- **Быстродействие**

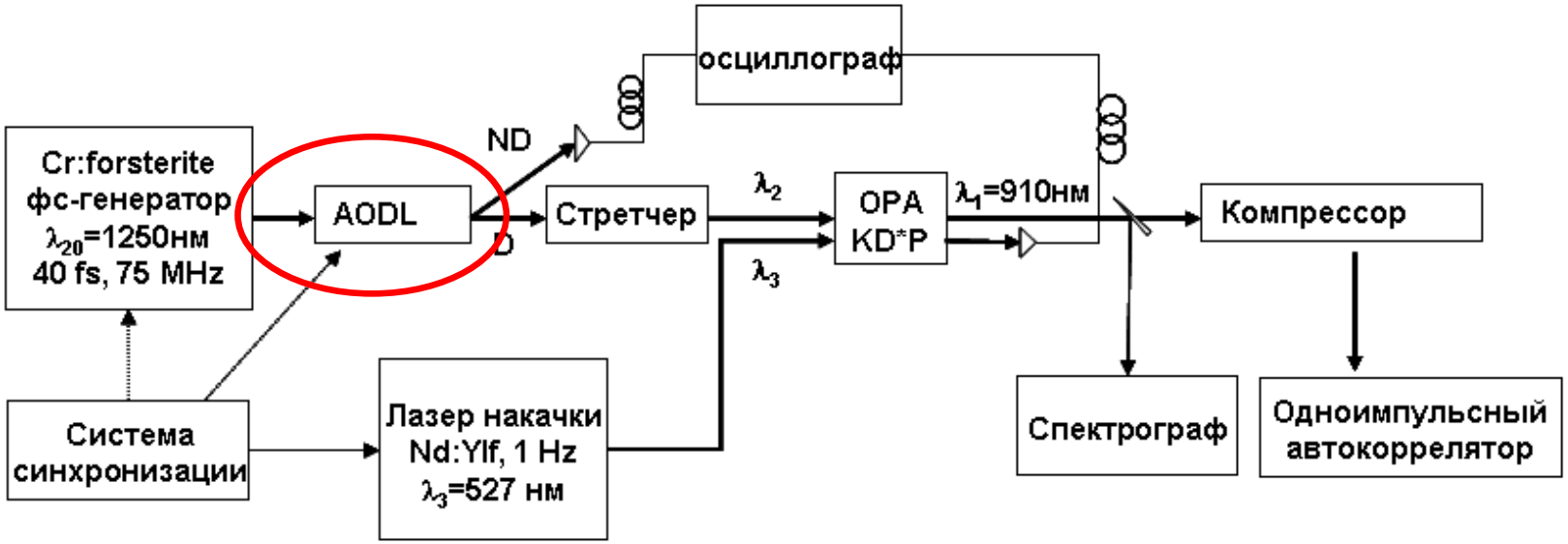
- **KDP, 35°**
- длина кристалла 67 мм



3-я и 4-я гармоники 260–270, 310, 350 нм

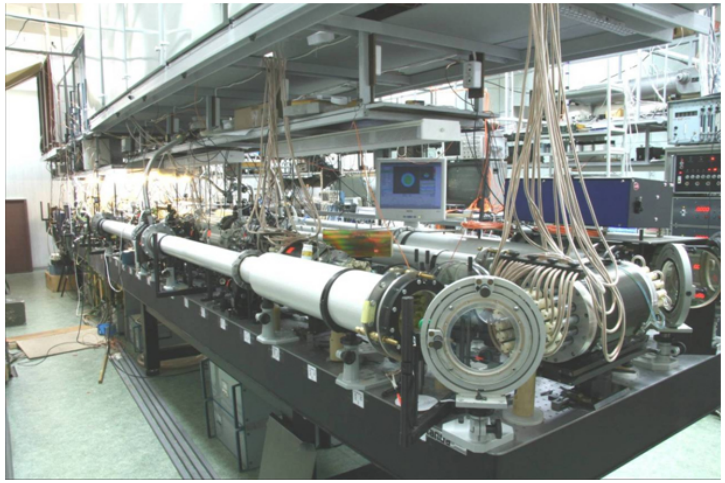
- эффективность дифракции $75\ \%$
- разрешение ~ 20 см$^{-1}$
- **УФ-диапазон**

14. Применения в установке PEARL, ИПФ РАН



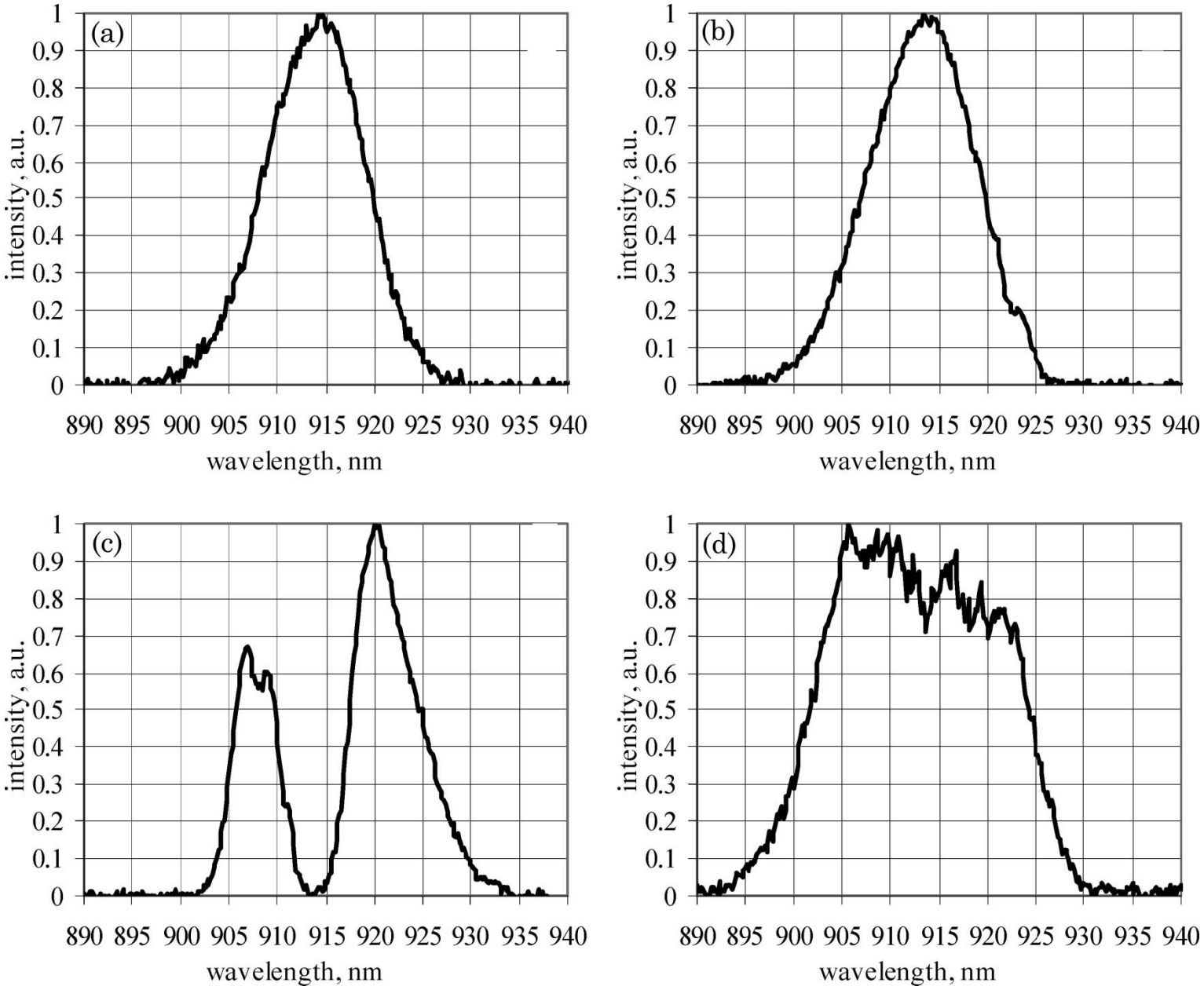
D — дифрагировавший пучок;
ND — нулевой порядок.

AODL — АО дисперсионная линия;
OPA — оптический параметрический усилитель.

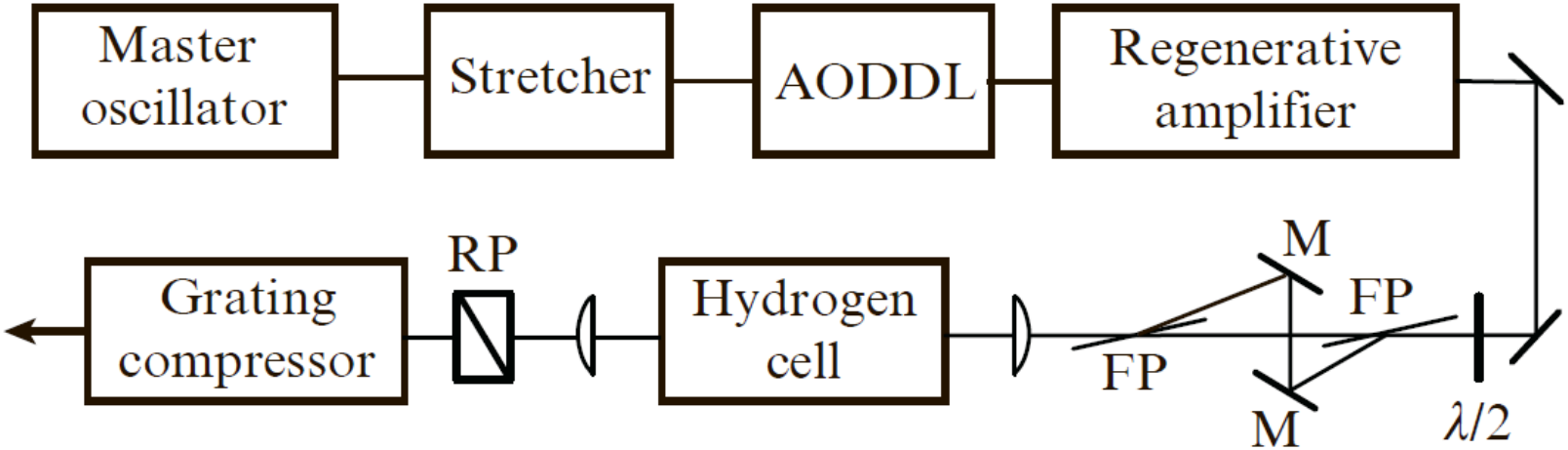


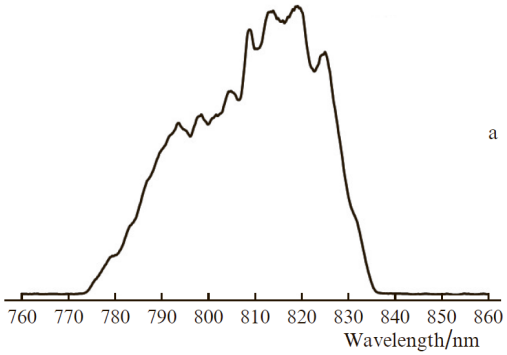
Molchanov V.Ya., ***Appl. Opt.*, *48***, C118 (2009).

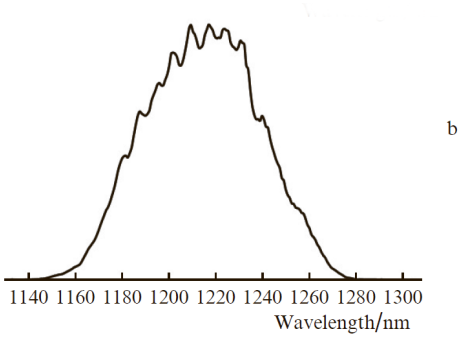
15. Управление спектром в OPCPA-системе

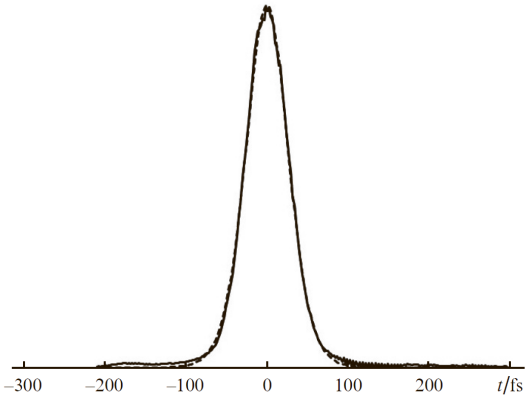


16. Рамановский лазер на сжатом водороде







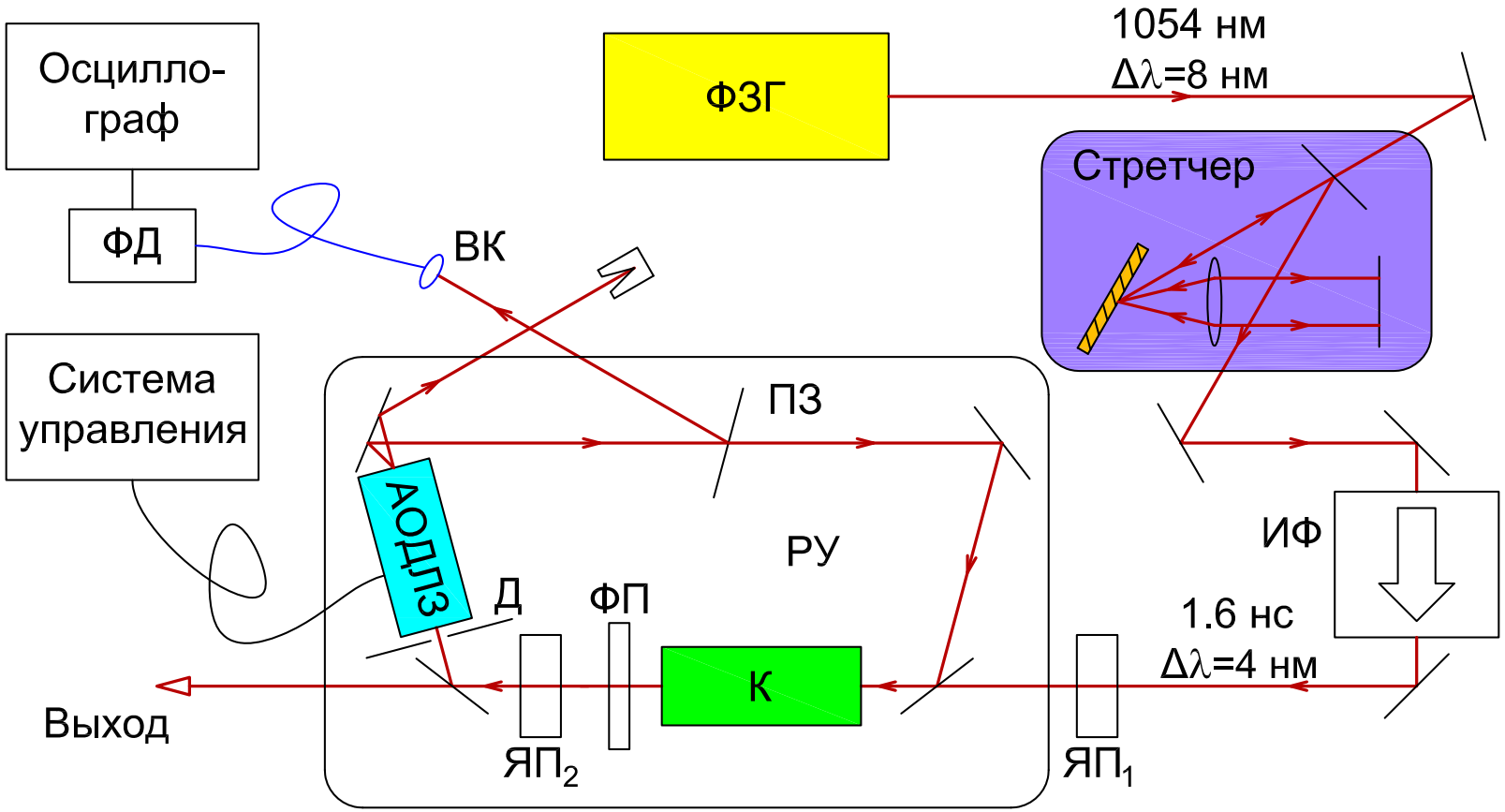


Спектры до и после преобразования

АКФ 40 фс

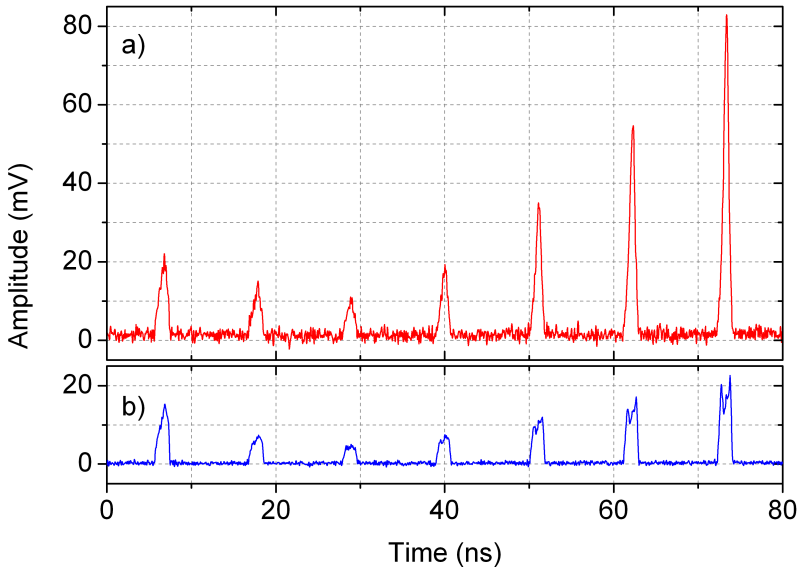
Диденко Н.В., ***Квант. Эл., 45***, 1101 (2015).

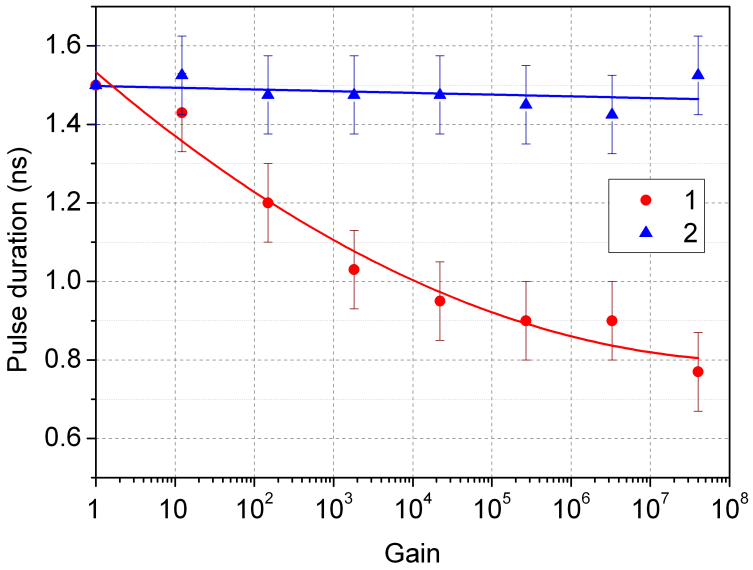
17. РУ на Nd-стекле с внутрирезонаторной коррекцией



Chizhikov S.I., ***Laser Phys. Lett., 10,*** 015301 (2013).

18. Коррекция формы и длительности импульсов

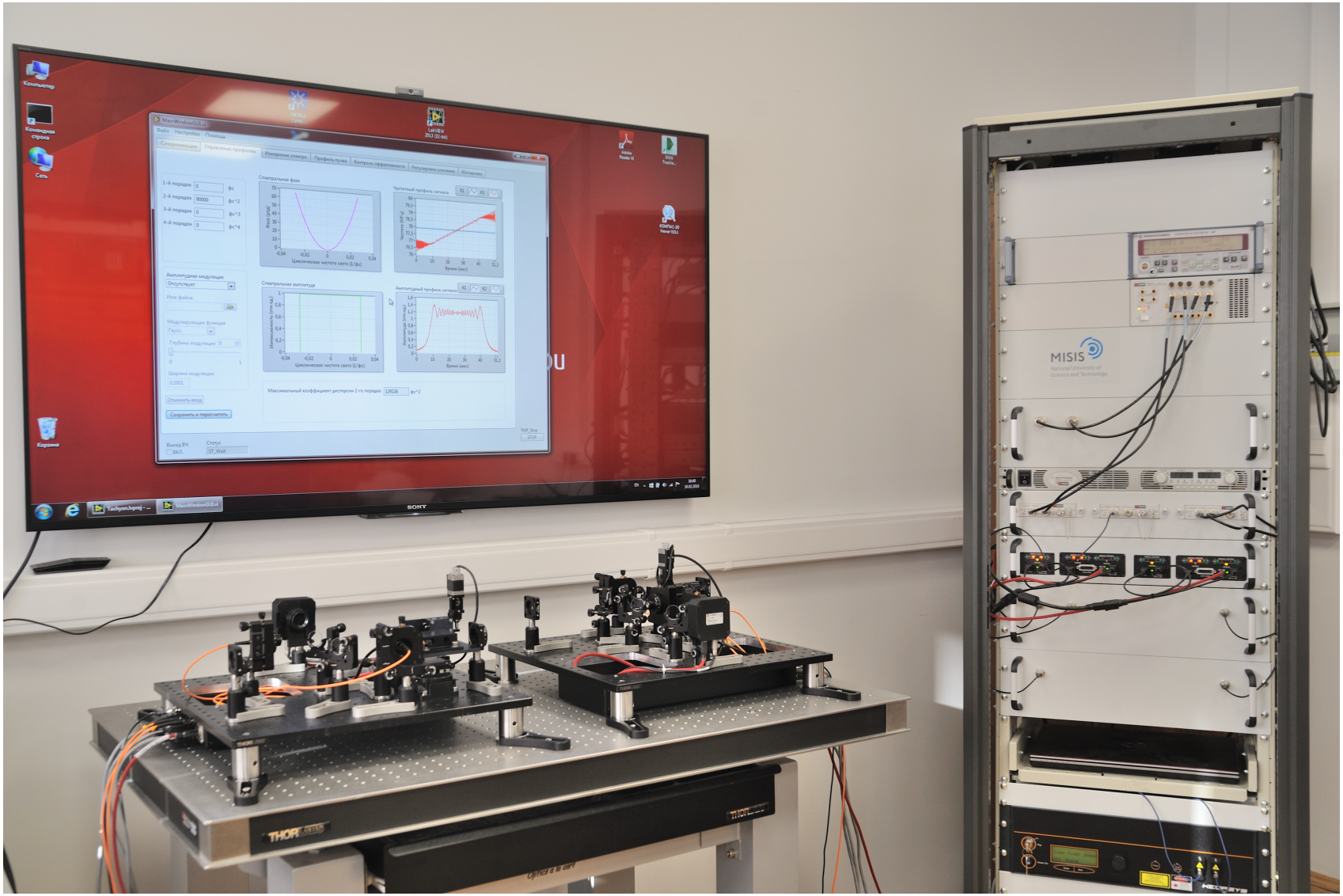




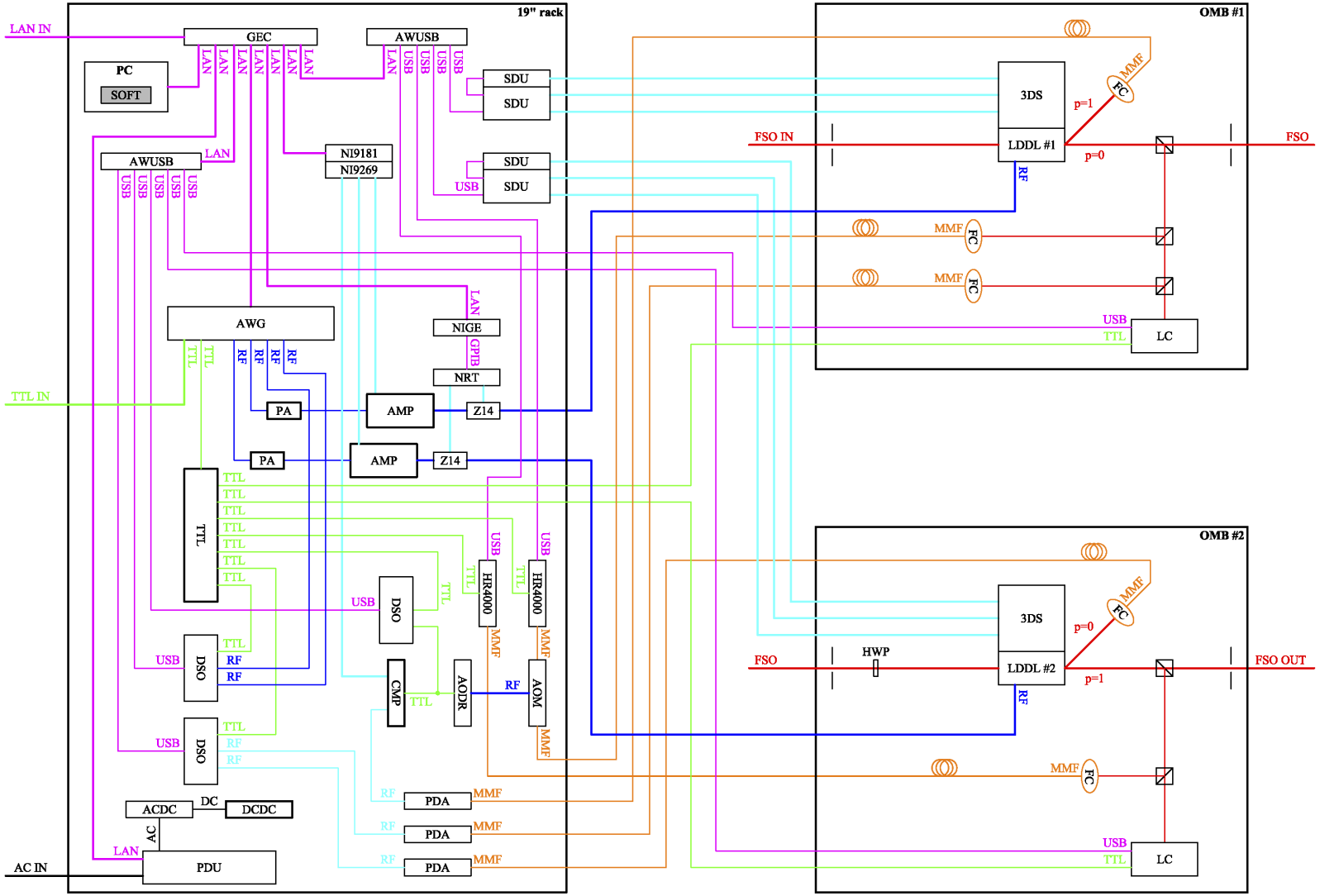
Особенности применения в неодимовом лазере:

- Сохранение ширины спектра
- Компенсация потерь коэффициентом усиления
- Высокое спектральное разрешение АОДЛЗ

19. Комплекс акустооптического дисперсионного управления субпикосекундными импульсами для ЛТС



20. Комплекс акустооптического дисперсионного управления субпикосекундными импульсами для ЛТС



21. Формирование импульсов специальной формы

Линейный временно-инвариантный фильтр описывается комплексной функцией пропускания

$$\widetilde{S}_{\mathrm{out}}(\omega) = \widetilde{S}_{\mathrm{in}}(\omega)\widetilde{H}(\omega). \tag{4.1}$$

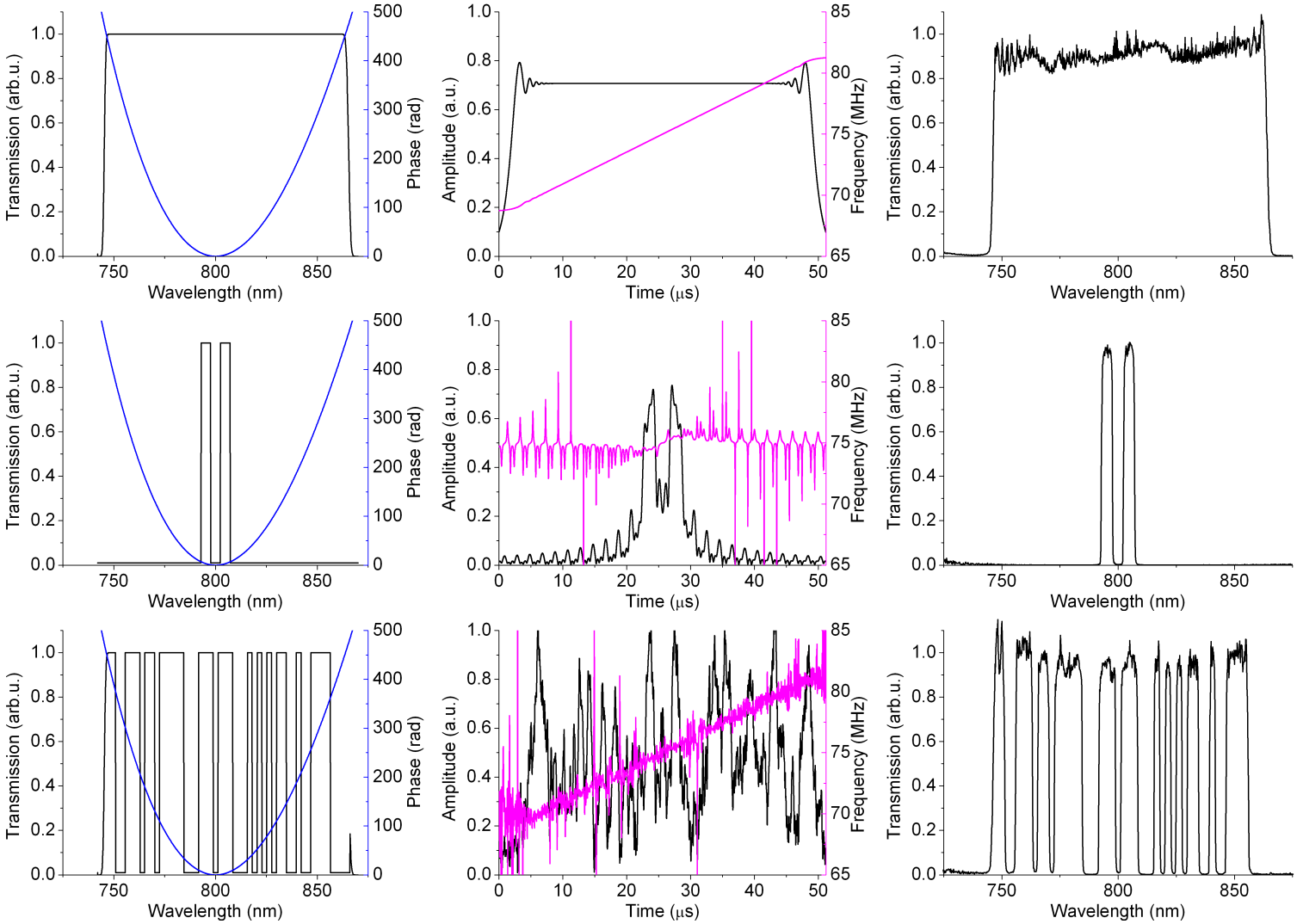
Поскольку задержка импульса на величину τ эквивалентна множителю $\exp(i\omega\tau)$ в его спектральном представлении, общий вид функции пропускания фильтра, создающей несколько реплик исходного импульса имеет вид

Задержки

$$\widetilde{H}(\omega) = M(\omega)\sum_{n=1}^{N} A_n M_n(\omega) \exp\left[i\omega\tau_n + i\sum_{k\geqslant 2} D_n^{(k)}(\omega-\omega_0)^k\right] \tag{4.2}$$

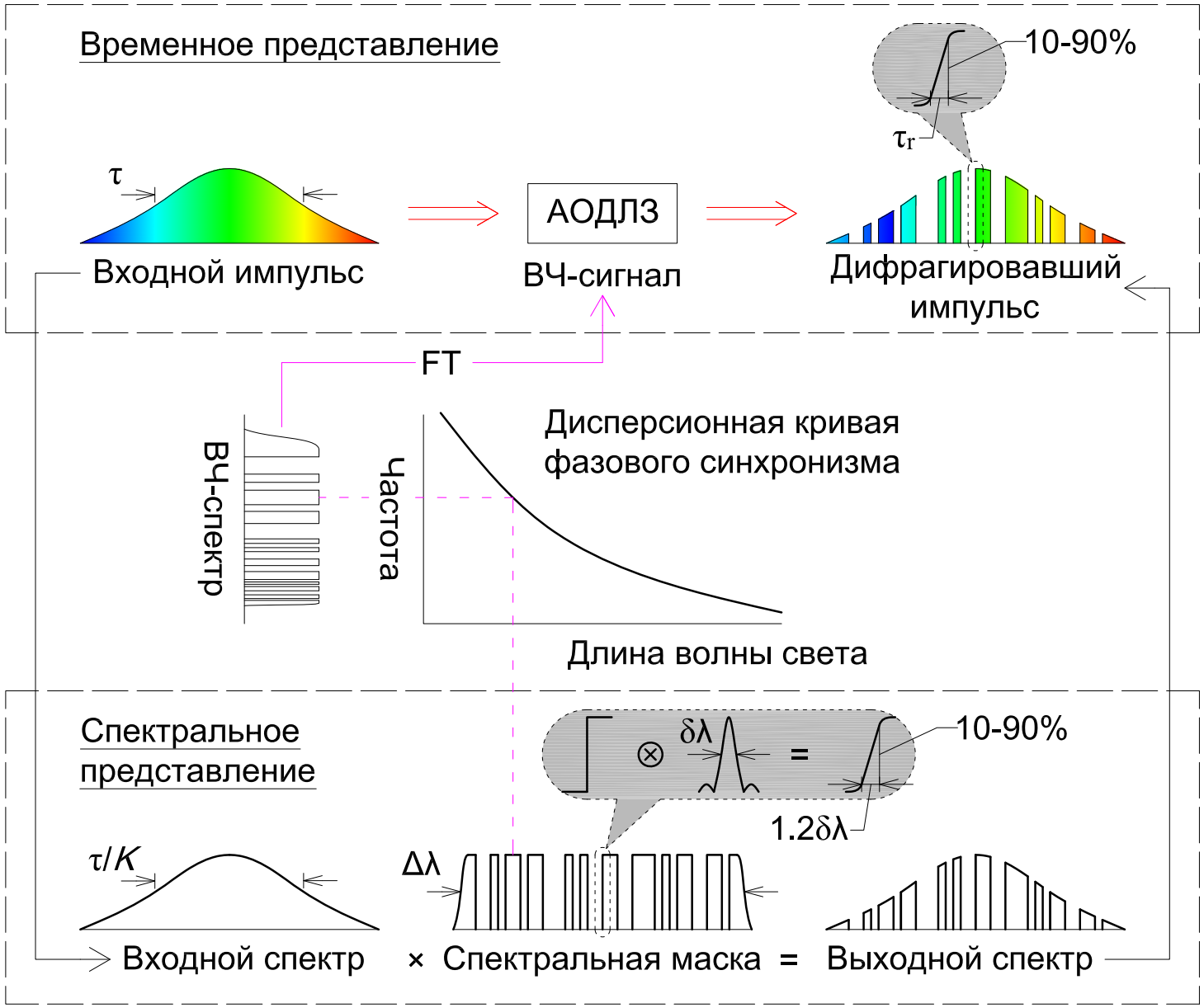
Функции спектральных масок

22. Спектральное кодирование фс-излучения

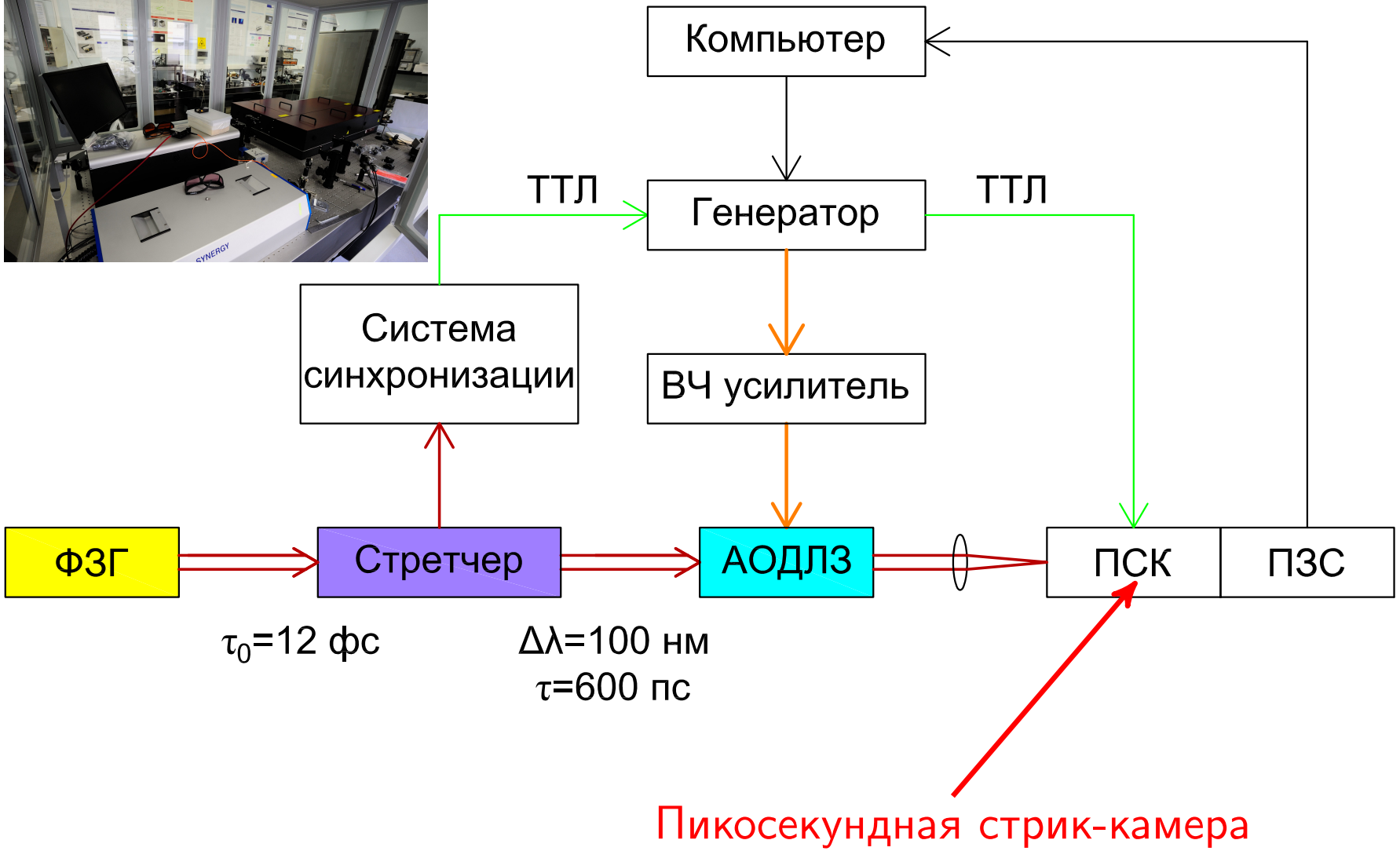


V.Ya. Molchanov, ***Opt. Express, 22,*** 15668 (2014).

23. Схема модуляции чирпированных импульсов

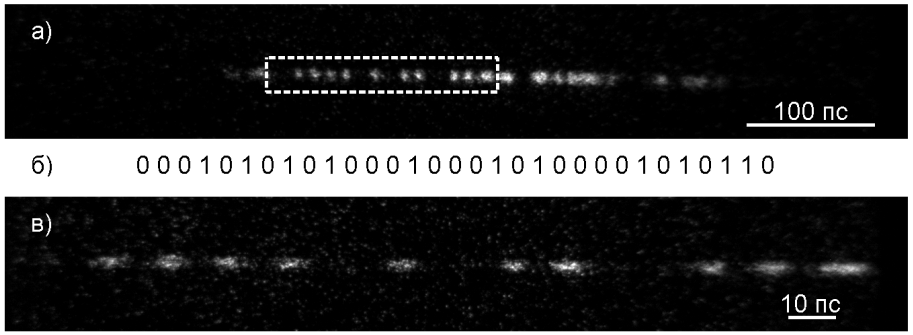


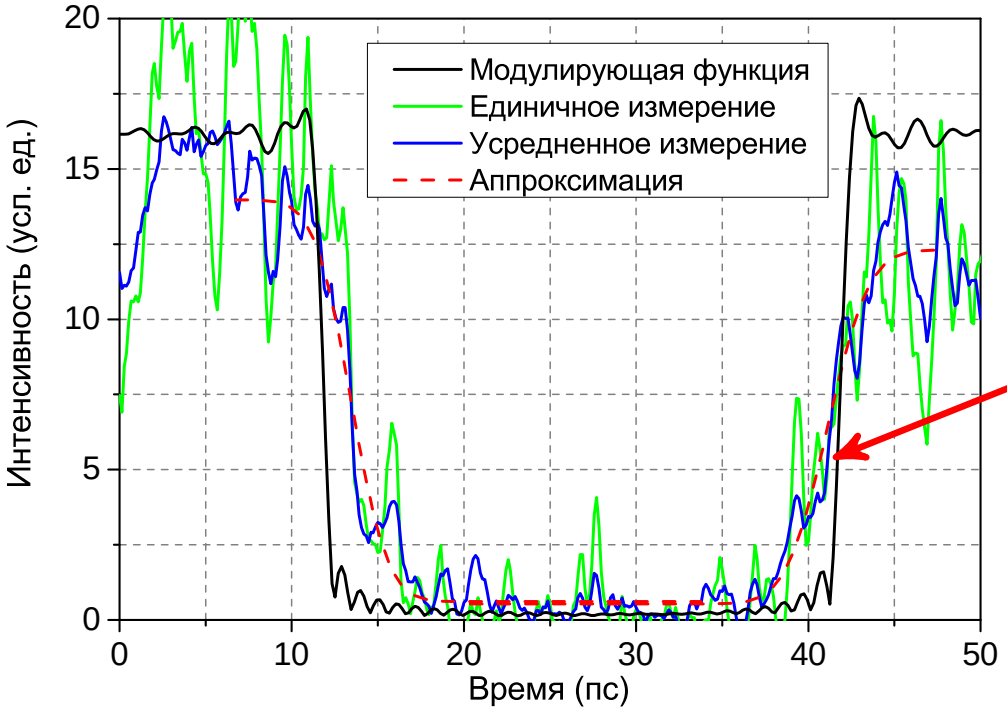
24. Экспериментальная установка – Ti:сапфир



Yushkov K.B., ***Opt. Lett.*, *41***, 5442 (2016).

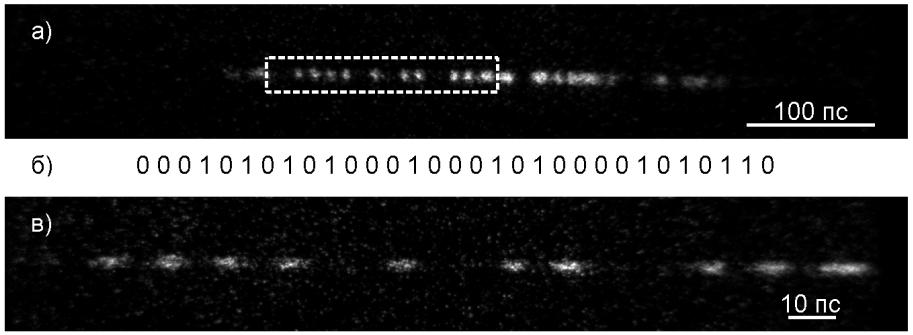
25. Произвольная бинарная модуляция импульса



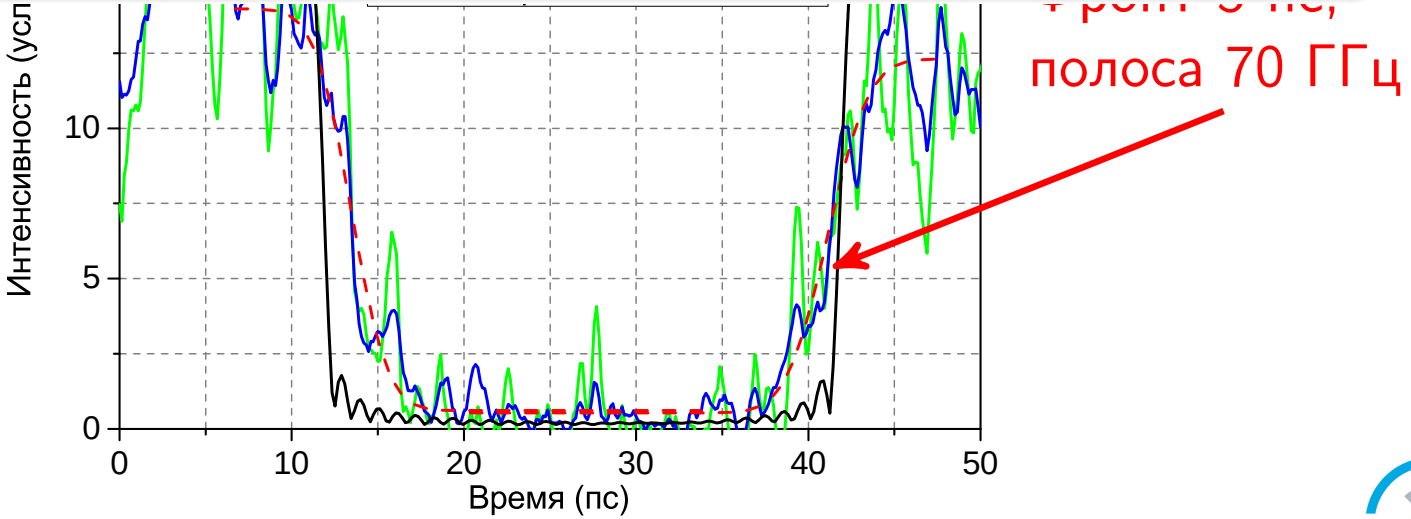


Фронт 5 пс,
полоса 70 ГГц

25. Произвольная бинарная модуляция импульса

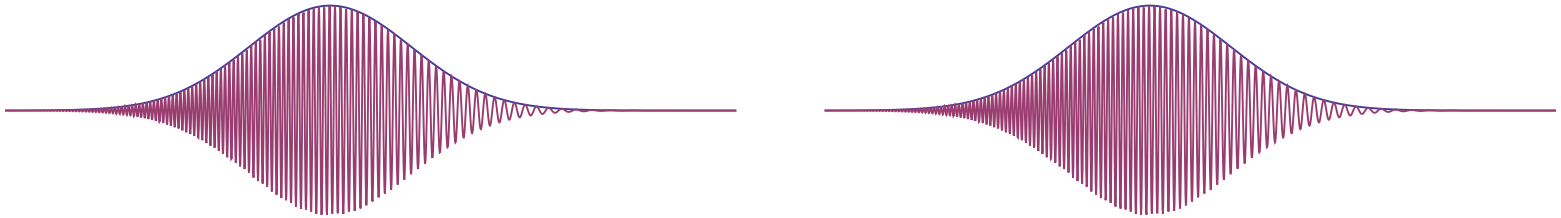


Модуляция излучения с частотами ~ 100 ГГц при помощи ОАВ на частотах ~ 100 МГц.

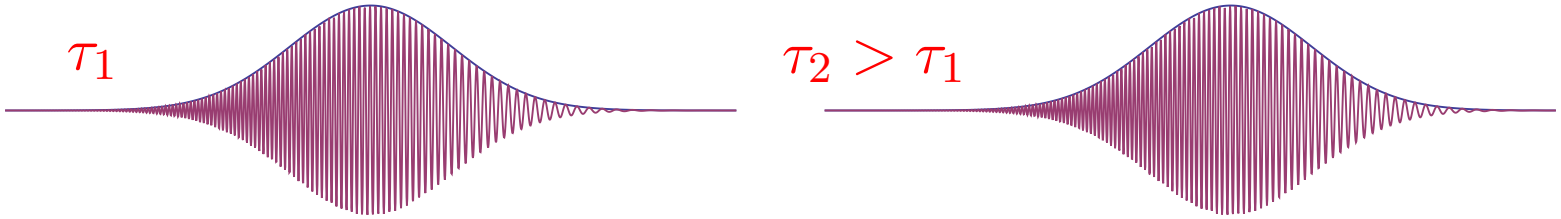


26. Принцип генерации терагерцового излучения

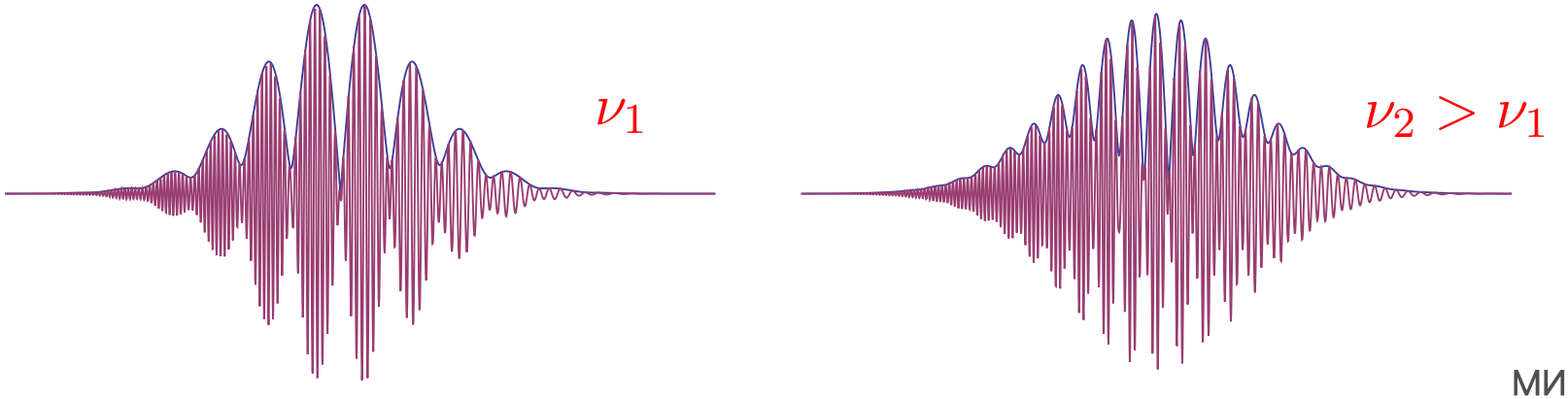
Исходный чирпированный импульс:



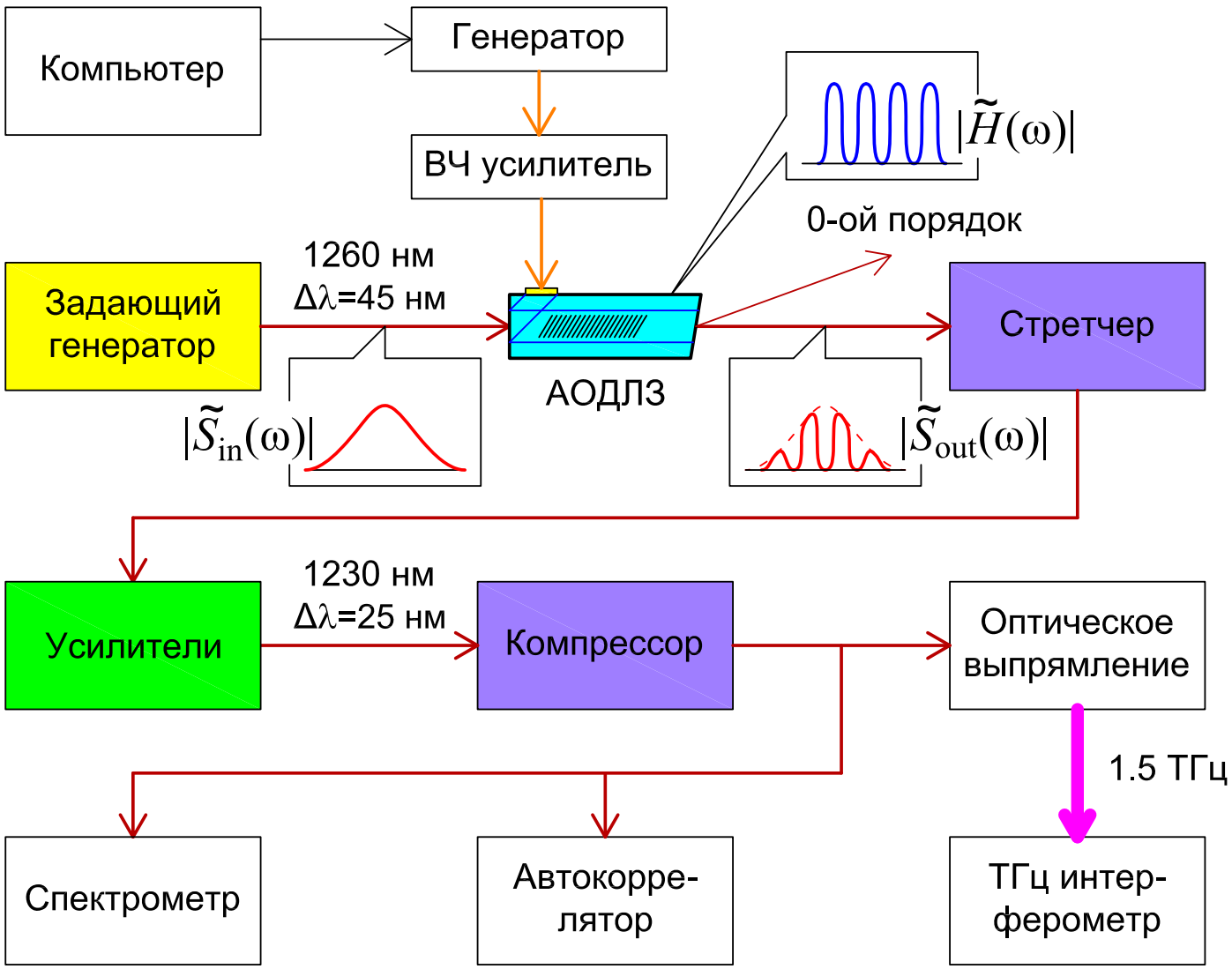
Задержанный импульс (реплика):



Когерентная сумма двух реплик:

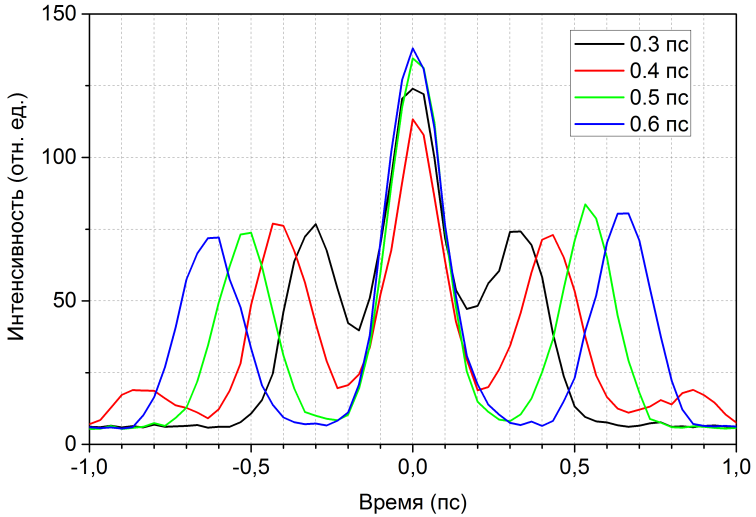


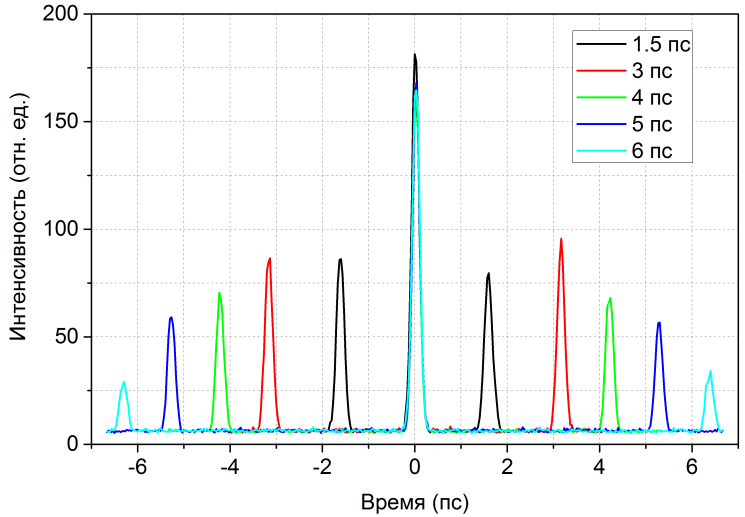
27. Экспериментальная установка ОИВТ РАН



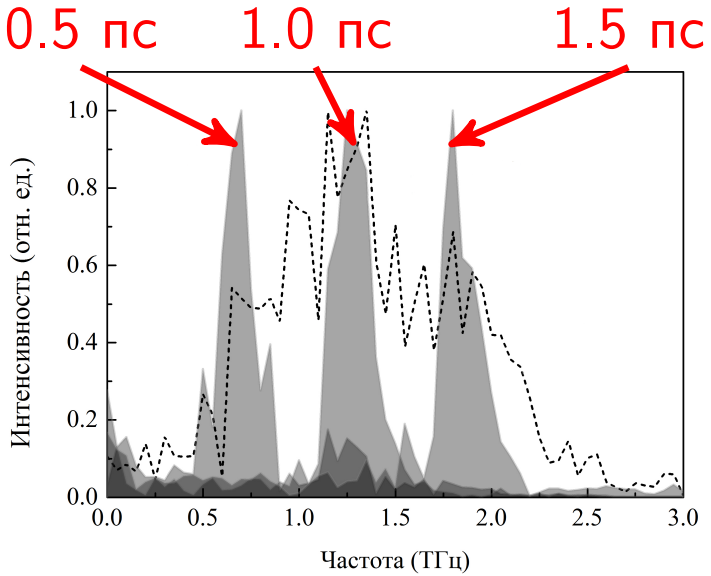
28. Прямая амплитудно-фазовая модуляция

Автокорреляционные функции двух реплик при различных $\Delta\tau$:





Спектр терагерцового излучения:



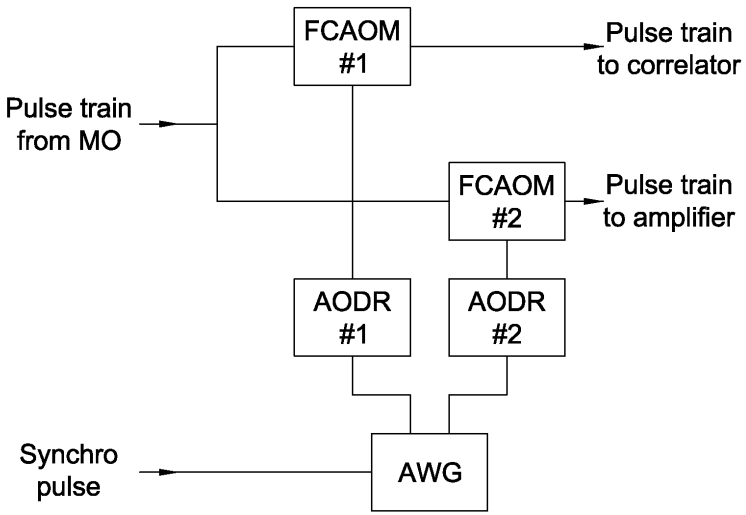
Овчинников А.В., ***Квант. Эл., 46***, 1149 (2016).

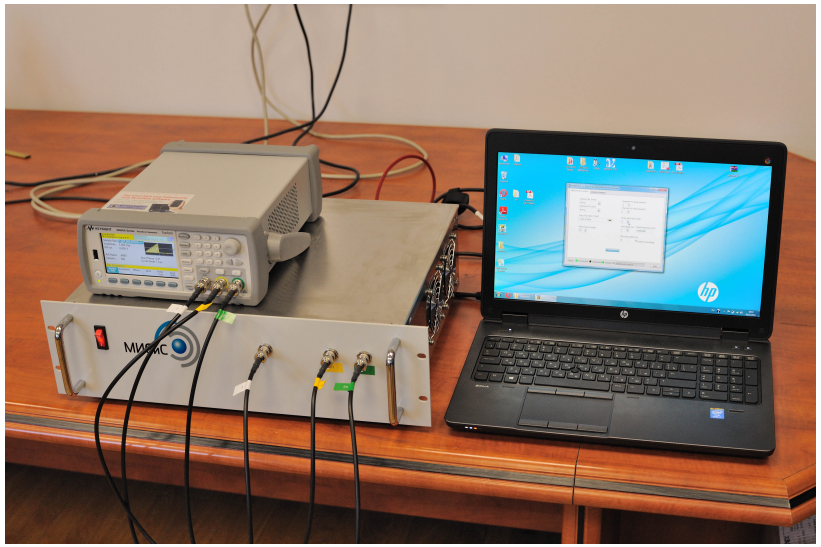
Yushkov K.B., ***Phys. Rev. A, 96***, 043866 (2017).

29. Модулятор с произвольной выборкой импульсов

3D-эллисоидальные импульсы: драйвер фотокатода ЛСЭ.

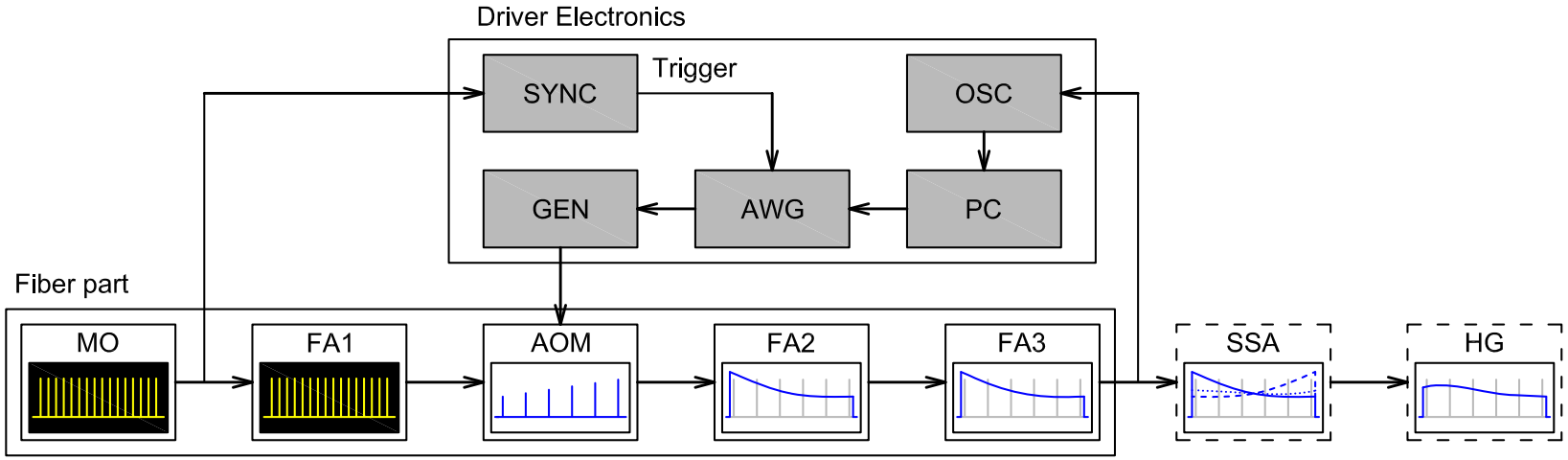
$$I(x, y, z) \neq I_1(x) I_2(y) I_3(z)$$

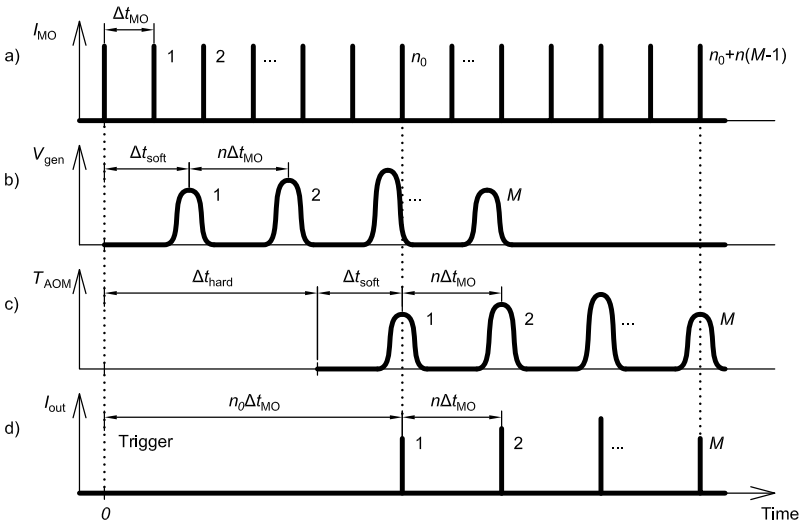


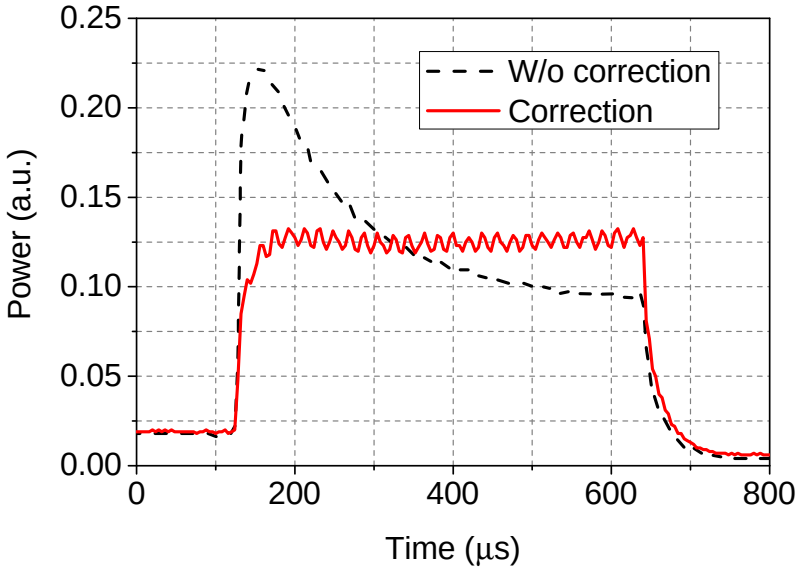


- Нарастание/спад фронтов модуляции $\leqslant 10$ нс.
- Индивидуальное программирование каждого импульса.
- Независимое двухканальное управление и синхронизация.

30. Волоконный лазер с динамической коррекцией цугов







Gacheva E.I., ***Photonics Res., 5***, 293 (2017).

31. Основные публикации

1. Molchanov V.Ya., ***Appl. Opt., 36***, C118 (2009).
2. Молчанов В.Я., ***Квант. Эл., 41***, 675 (2011).
3. Chizhikov S.I., ***Laser Phys. Lett., 10***, 015301 (2013).
4. Yushkov K.B., ***Opt. Lett., 38***, 3578 (2013).
5. Molchanov V.Ya., ***Opt. Express, 22***, 15668 (2014).
6. Диденко Н.В., ***Квант. Эл., 45***, 1101 (2015).
7. Yushkov K.B., ***Opt. Lett., 41***, 5442 (2016).
8. Овчинников А.В., ***Квант. Эл., 46***, 1149 (2016).
9. Gacheva E.I., ***Photonics Research, 5***, 293 (2017).
10. Yushkov K.B., ***Phys. Rev. A, 96***, 043866 (2017).
11. Rogozhnikov G.S., ***Appl. Opt., 57***, C36 (2018).
12. Romanov V.V., ***JSTQE, 25***, 0880110 (2019).
13. Yushkov K.B., ***IEEE Trans. UFFC, 67***, in press (2020).

32. Коллаборации и финансирование

Заказчики и соисполнители:

- Институт прикладной физики (ИПФ) РАН
- РФЯЦ–ВНИИЭФ (г. Саров)
- ИОФ РАН
- ФИАН
- ОИВТ РАН
- Авеста-проект

Бюджетное финансирование:

- РФФИ
- МинОбрНауки: госзадание, ФЦП
- Программа «Тор 5-100»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!