

Управление формой широкополосных лазерных импульсов

С. Ю. Миронов, А. К. Потемкин, Е. А. Хазанов

Институт прикладной физики РАН

Содержание

- Введение
- **Управление формой в лазерных драйверах для фотоинжекторов электронов**
 - Требования к лазерным драйверам для фотоинжекторов электронов
 - Использование фазовых модуляторов для управления 3D формой
 - Профилированные решетки Брэгга для генерации 3D эллипсоидальных импульсов
 - Генерация модулированных импульсов для ТГц приложений
 - Генерация второй и четвертой гармоники с сохранением формы
- **Управление временными параметрами у сверхмощных лазерных импульсов**
 - Метод CafCA (TFC, TPC): теория и эксперименты
 - Подавление ММСФ с использованием свободного пространства
 - Нелинейный интерферометр Маха-Цендера для повышения временного контраста
 - ГВГ для повышения контраста и дополнительного временного сжатия
 - Использование каскадной квадратичной нелинейности для временной самокомпрессии импульсов и повышения контраста
- Заключение



Управление формой импульсов в лазерных драйверах для фотоинжекторов электронов

Требования к лазерным драйверам для фотоинжекторов электронов

- Photo Injector Test Facility at DESY, Zeuthen, Germany (PITZ)
- Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation
- The High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Japan
- Stanford Linear Accelerator, USA
- Argonne National Laboratory, USA

Характерные параметры электронных сгустков на выходе инжектора:

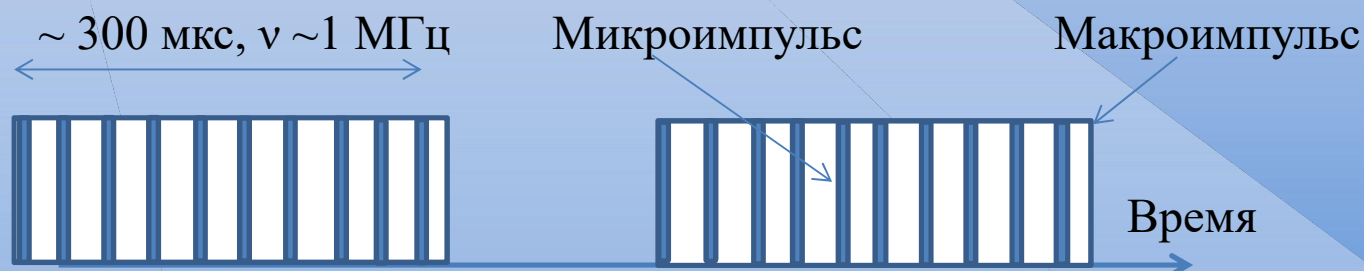
Заряд ~ 1 нКл

Длительность $\sim 7-50$ пс

Нормализованный поперечный эмиттанс $< 1 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$

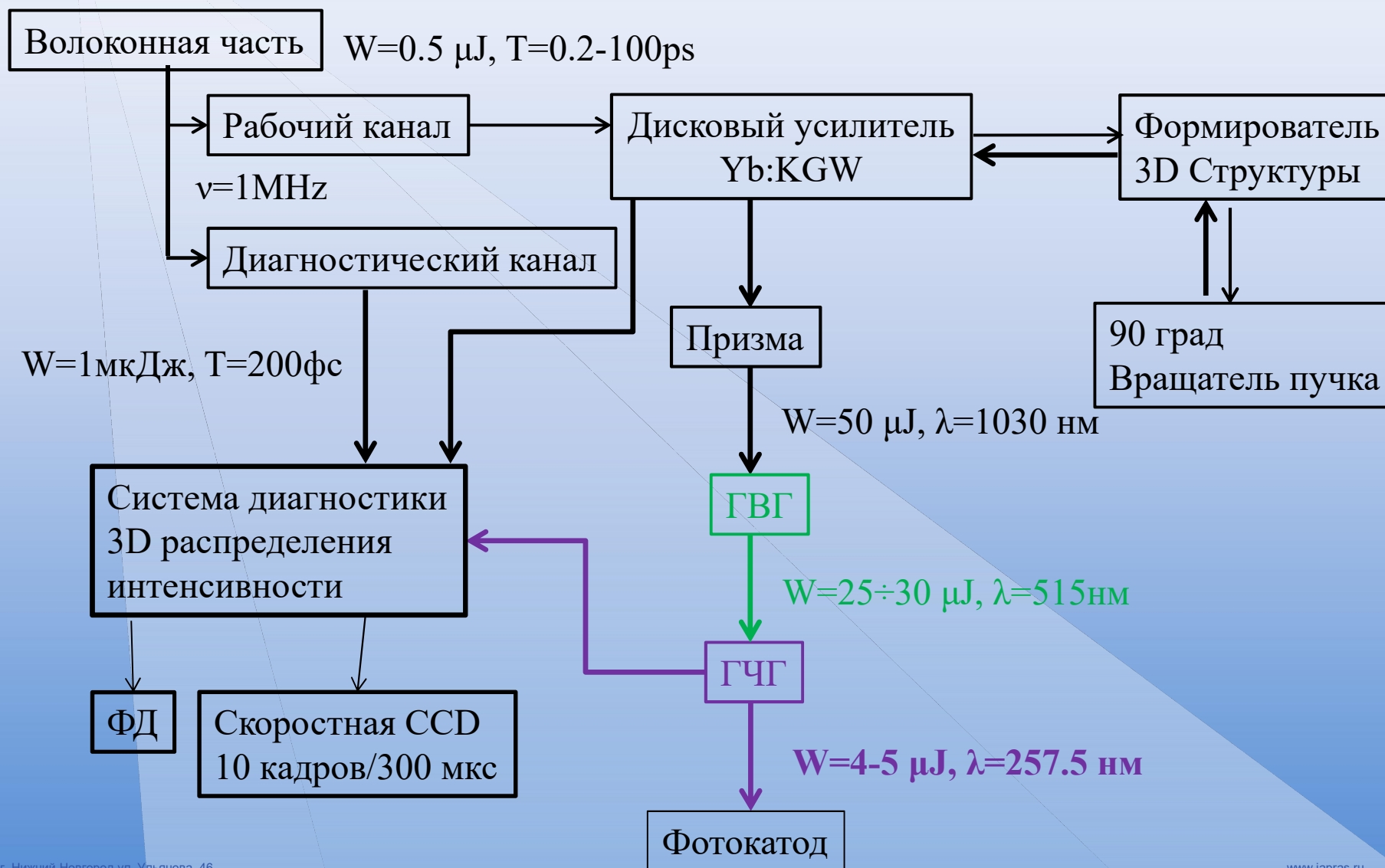
Лазерные импульсы для Cs_2Te_2 катодов

- УФ диапазон
- Энергия микроимпульса $0.5-2$ мкДж на катоде
- Длительность в диапазоне $7-50$ пс, с возможностью управления
- 3D профилирование интенсивности у каждого микроимпульса

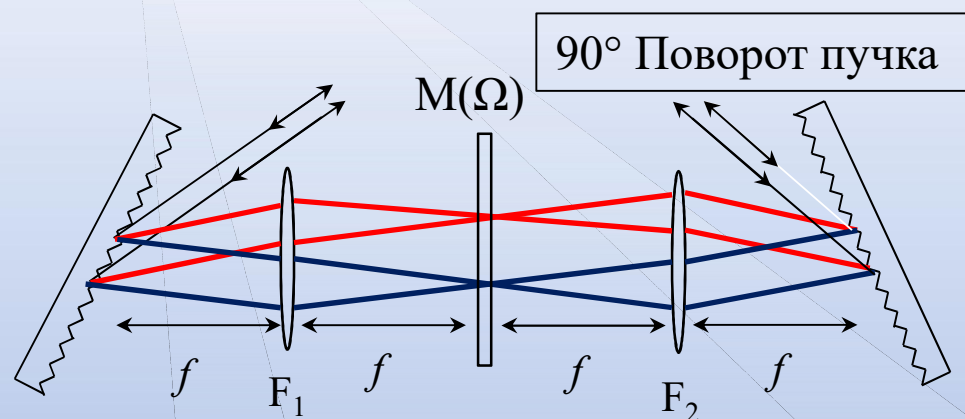


Миронов С.Ю., Андрианов А.В., Гачева Е.И., Зеленогорский В.В., Потемкин А.К., Хазанов Е.А., Бонпорнпрасерт П., Грос М., Гуд Д., Исаев И., Калантарян Д., Козак Т., Красильников М., Кьян Х., Ли К., Лишилиин О., Мелкумян Д., Опфельт А., Ренье И., Рублак Т., Фельбер М., Хук Х., Чен Й., Штефан Ф. Пространственно-временное профилирование лазерных импульсов для фотокатодов линейных ускорителей электронов // Усп. физ. наук, v.187, №10, p.1121-1133, 2017

Принципиальная схема лазерного драйвера для фотоинжектора электронов (DESY)



Формирование пространственно-временного распределения интенсивности с использованием пространственного модулятора света



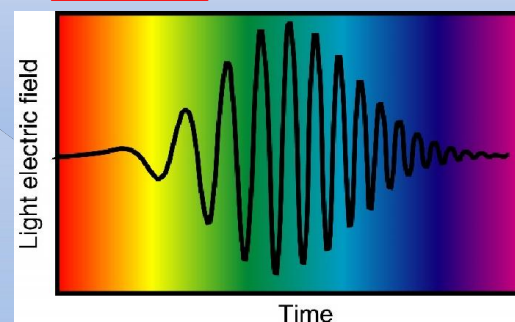
Управление спектром:

$$S_{req}(\Omega) = M(\Omega) \cdot S_{in}(\Omega)$$



Преобразование Фурье

$$A_{req}(t)$$



Для импульсов с ЛЧМ: $S(\Omega) = |S_0(\Omega)| \cdot e^{-i \frac{\alpha \cdot \Omega^2}{2}}$

$$|A(t)|^2 \propto |S(\Omega)|^2 \quad \Omega \propto t$$

Управление амплитудой спектра в частотной области линейно связано с управлением временной формой

Недостатки:

- Нет аксиальной симметрии
- Астигматизм от цилиндрического телескопа

Формирование квазипрямоугольных импульсов пс-длительности

$$S(\Omega) = S_0 \cdot e^{-2 \ln(2) \cdot \frac{\Omega^2}{\Delta\Omega^2} - i \frac{\alpha \cdot \Omega^2}{2}}$$

$$A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega) \cdot e^{i \cdot \Omega \cdot t} d\Omega = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\Omega \cdot S_0}{\sqrt{4 \cdot \ln(2) + i \cdot \alpha \cdot \Delta\Omega^2}} \cdot e^{-2 \ln(2) \frac{t^2}{T^2} + i \frac{\alpha_t \cdot t^2}{2}}$$

$$T = T_F \sqrt{1 + \frac{16 \cdot \ln(2)^2 \cdot \alpha^2}{T_F^4}},$$

$$\alpha_t = \frac{\alpha \cdot \Delta\Omega^2}{T_F^2 + \alpha^2 \cdot \Delta\Omega^2}$$

Амплитудные спектральные маски:

Формирует прямоугольник:

$$M_r(\Omega) = \begin{cases} \exp\left(4 \ln(2) \frac{\Omega^2 - \Lambda^2}{\Delta\Omega^2}\right), & |\Omega| < \Lambda \\ 0, & |\Omega| > \Lambda \end{cases}$$

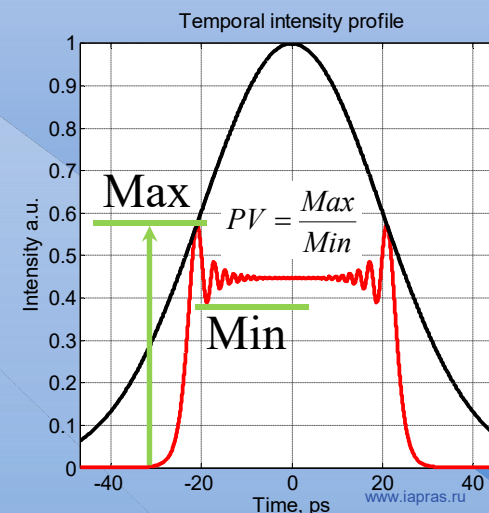
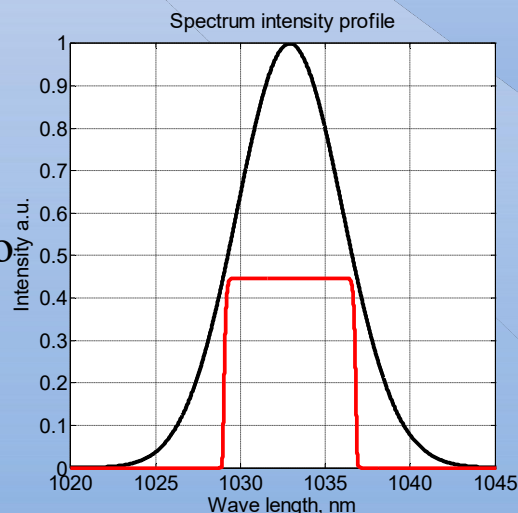
Формирует сглаженный прямоугольник:

$$M_G(\Omega) = \exp\left(-\left(\frac{\Omega}{\Lambda}\right)^{2N}\right) \cdot \begin{cases} \exp\left(2 \cdot \ln(2) \frac{\Omega^2 - \Lambda^2}{\Delta\Omega^2}\right), & |\Omega| < \Lambda \\ 1, & |\Omega| > \Lambda \end{cases}$$

Максимальная эффективность
48% по энергии

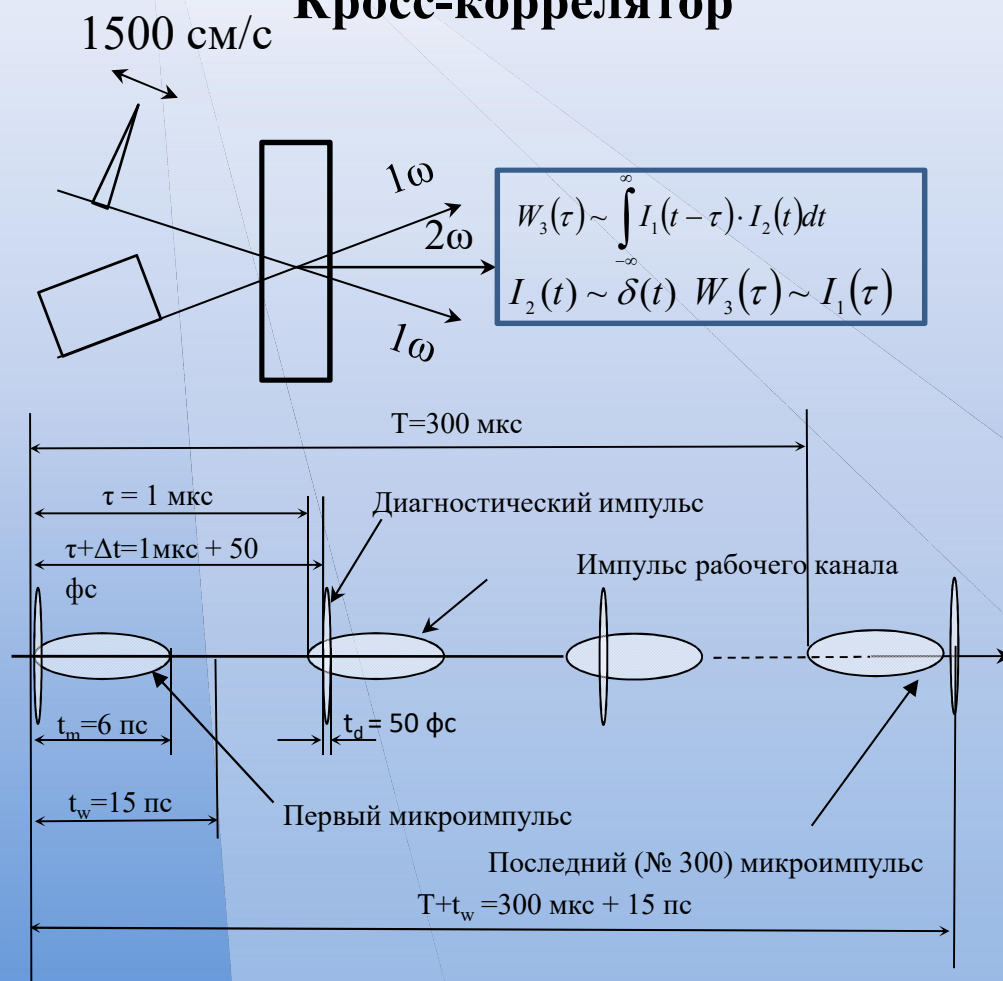
Соотношение длительностей исходного
импульса и прямоугольного:

$$T \approx \sqrt{2 \ln(2)} T_r \approx 1.17 \cdot T_r$$

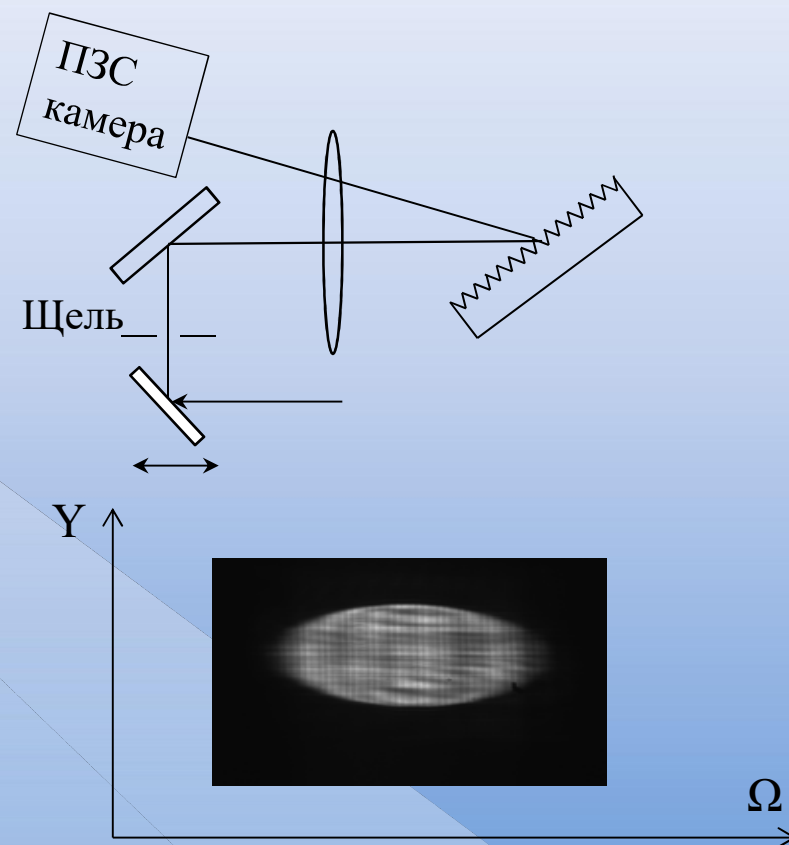


Методы 3D диагностики профилированных лазерных импульсов

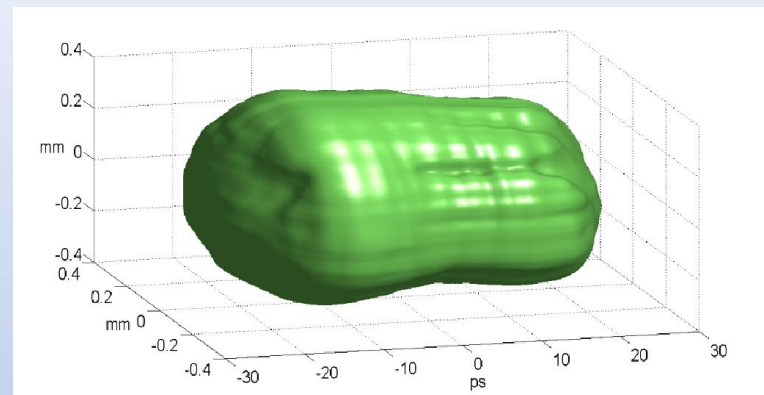
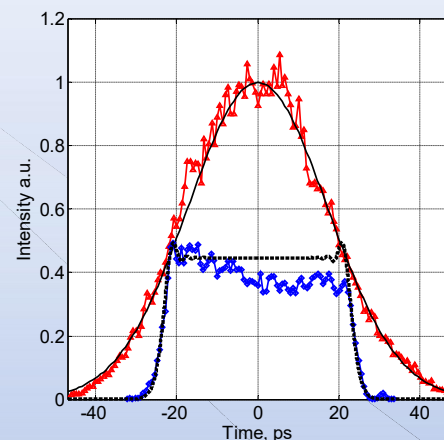
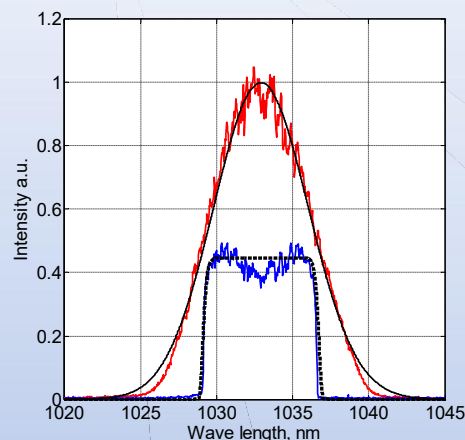
Кросс-коррелятор



3D спектрограф



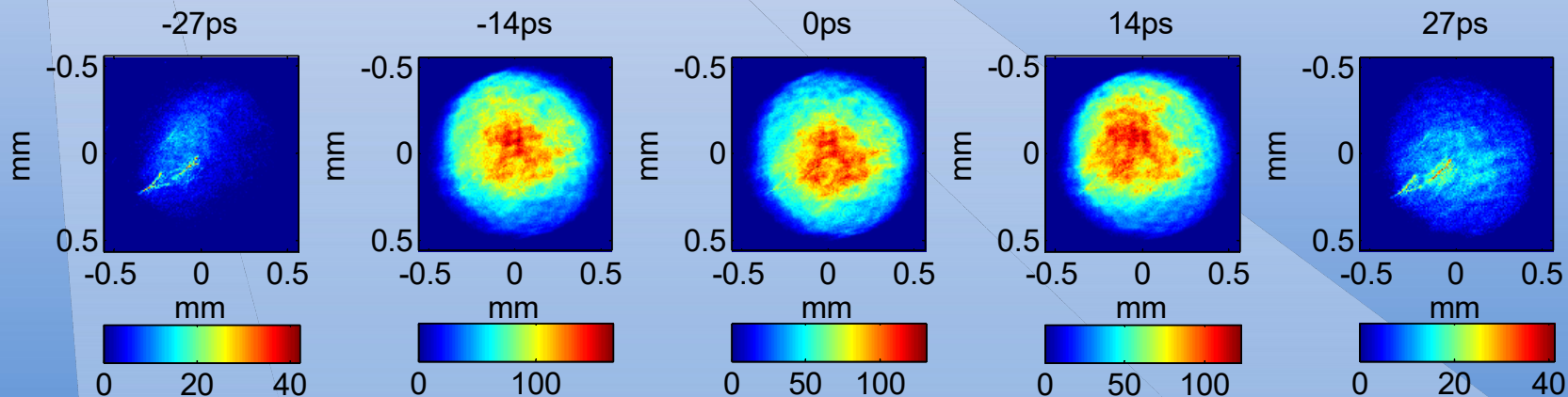
Формирование квазицилиндрических импульсов пс-длительности



Длительность импульса 41 пс

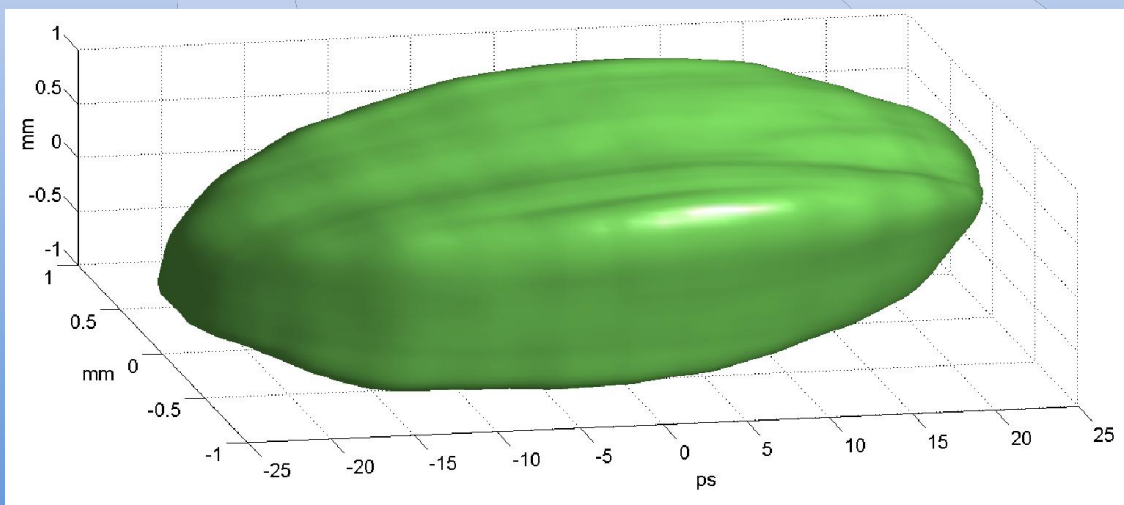
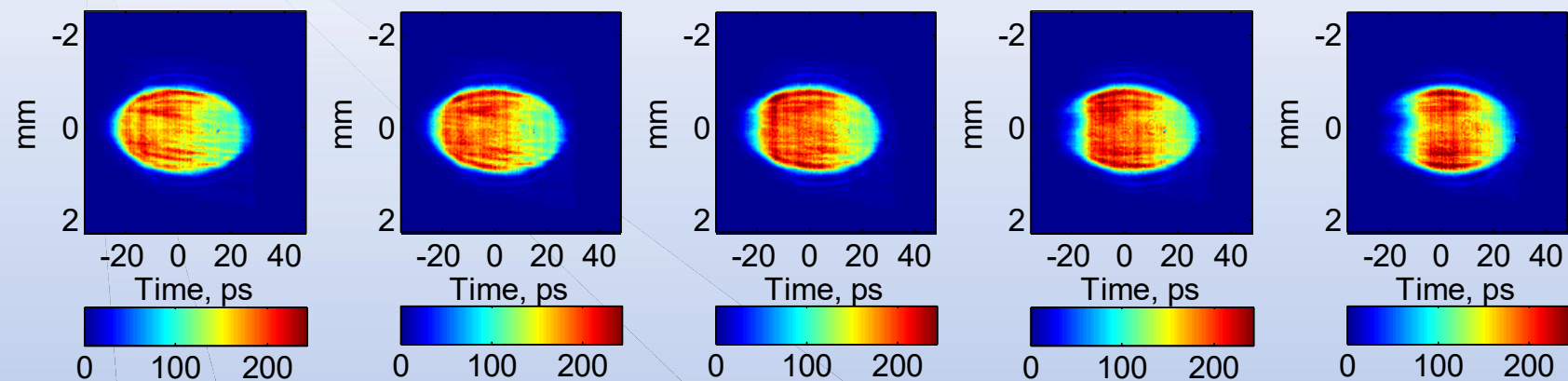
Фронт импульса: $\tau_F = 4\text{нс}$

Поперечное распределение интенсивности

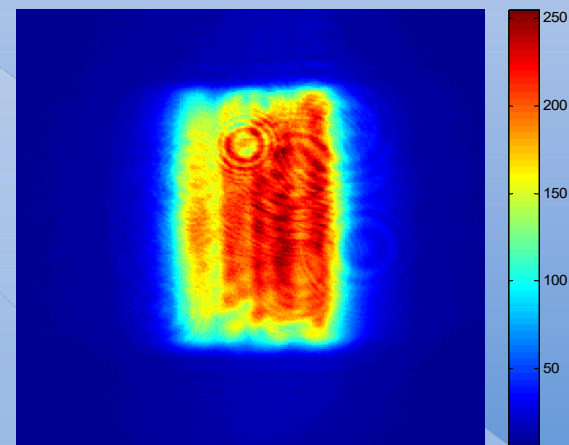


Mironov S.Y., Potemkin A.K., Gacheva E.I., Andrianov A.V., Zelenogorskii V.V., Krasilnikov M., Stephan F., Khazanov E.A. Shaping of cylindrical and 3D ellipsoidal beams for electron photoinjector laser drivers // Appl Opt, v.55, №7, p.1630-5, 2016

Формирование 3D квазиэллипсоидальных пучков



Ближняя зона



Формирование пространственно-временного распределения интенсивности с помощью объемной чирпирующей решетки Брэгга (3D CBG)

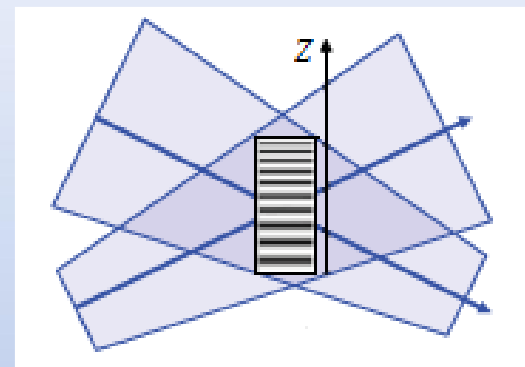
Материал:

Фото-термо-рефрактивное стекло

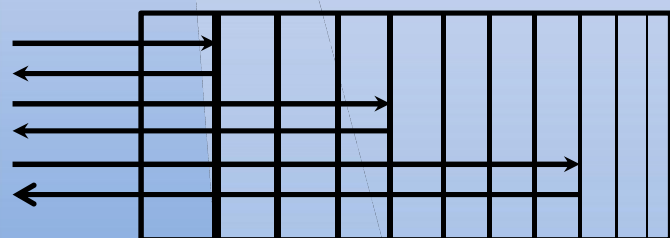
Метод записи:

Интерференция расходящегося и сходящегося пучков

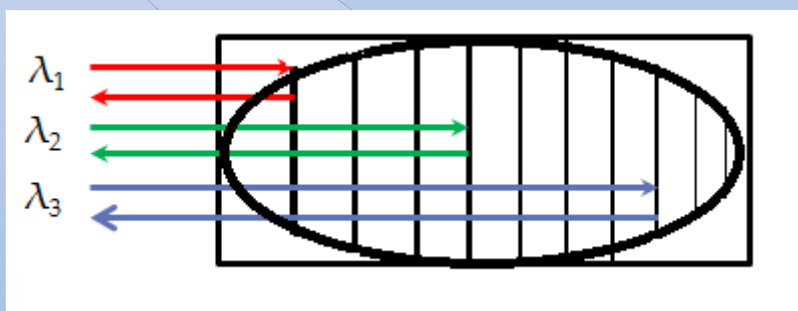
Производится для длин волн 800nm-2500 nm



Стандартная решетка



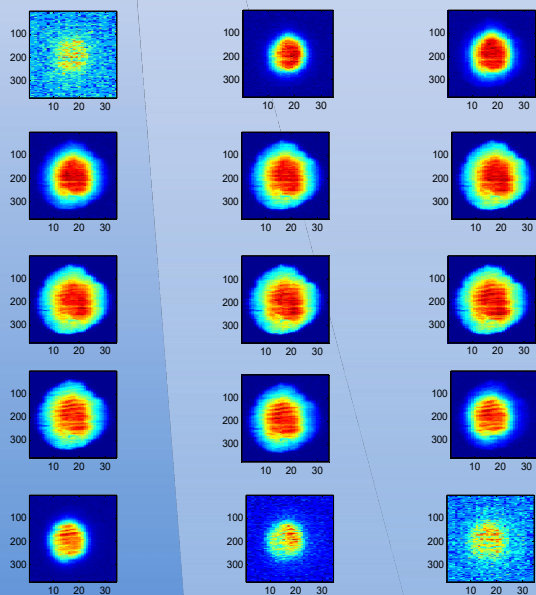
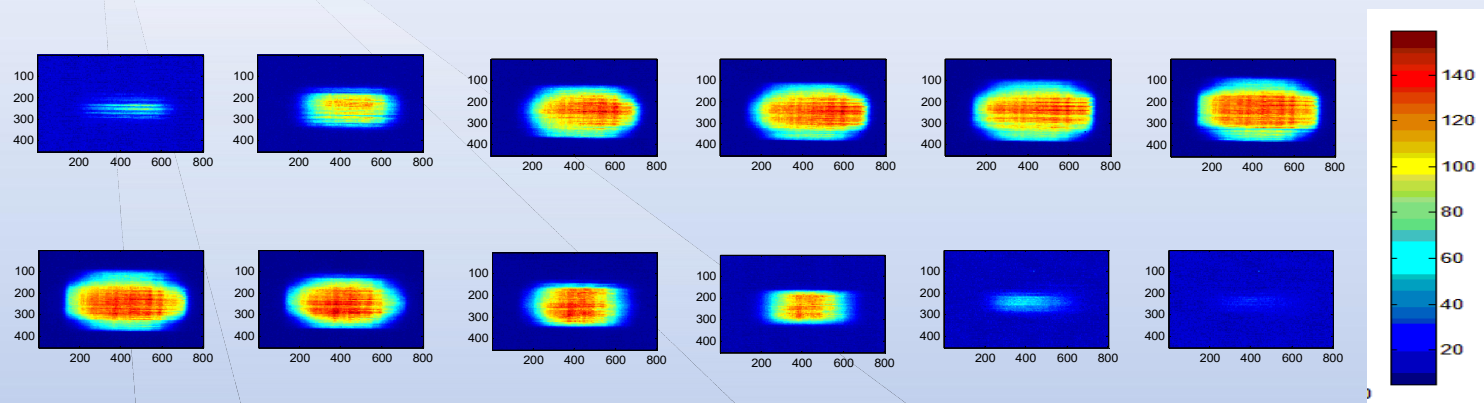
Профилированная CBG



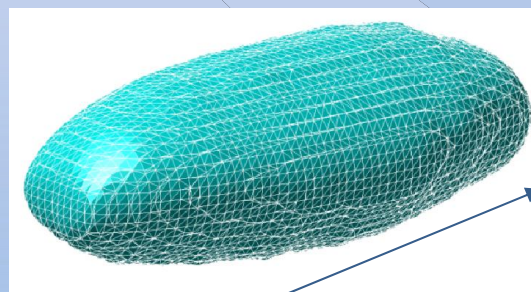
Метод формирования эллипсоида:

направляется на профилированную решетку цилиндрический импульс – отражается эллипсоидальный

Генерация 3D квазиэллипсоидальных импульсов

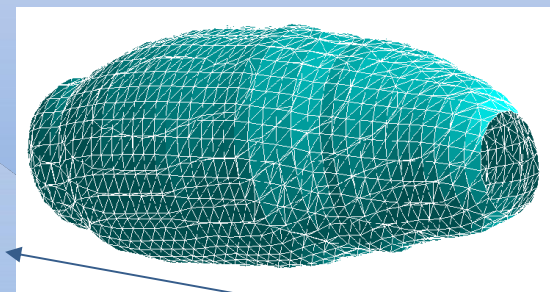


Со спектрографа



5 нм

С кросс-коррелятора



264 пс

Генерация 3D эллипсоидальных импульсов с периодической модуляцией для генерации ТГц излучения

Периодическая модуляция в лазерном импульсе перейдет в модуляцию пространственного заряда, что позволит:

- Генерировать ТГц излучение в ондуляторе не из дробового шума
- Отсутствие временного джиттера у ТГц импульса по отношению к электронному пучку

Исходный 3D эллипсоидальный импульс

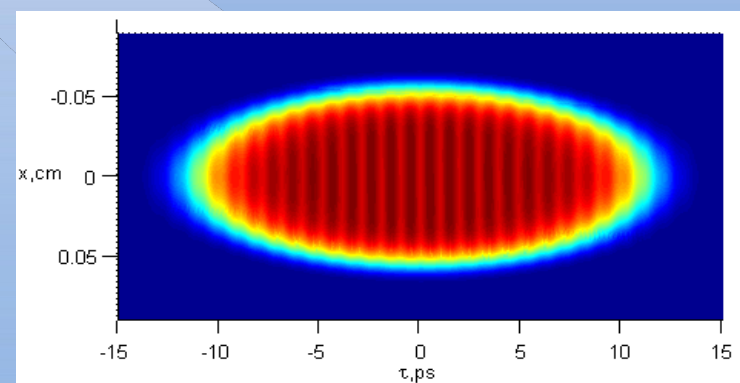
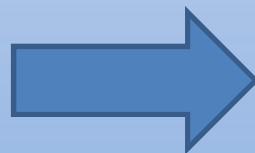
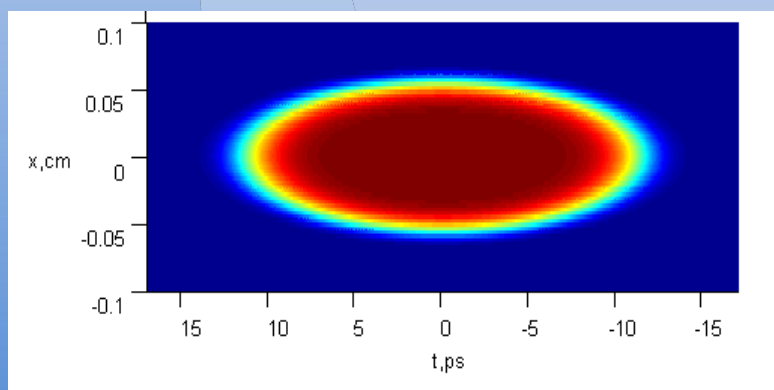
Поле: $A(x, y, t)$

Амплитуда спектра: $S(x, y, \Omega)$

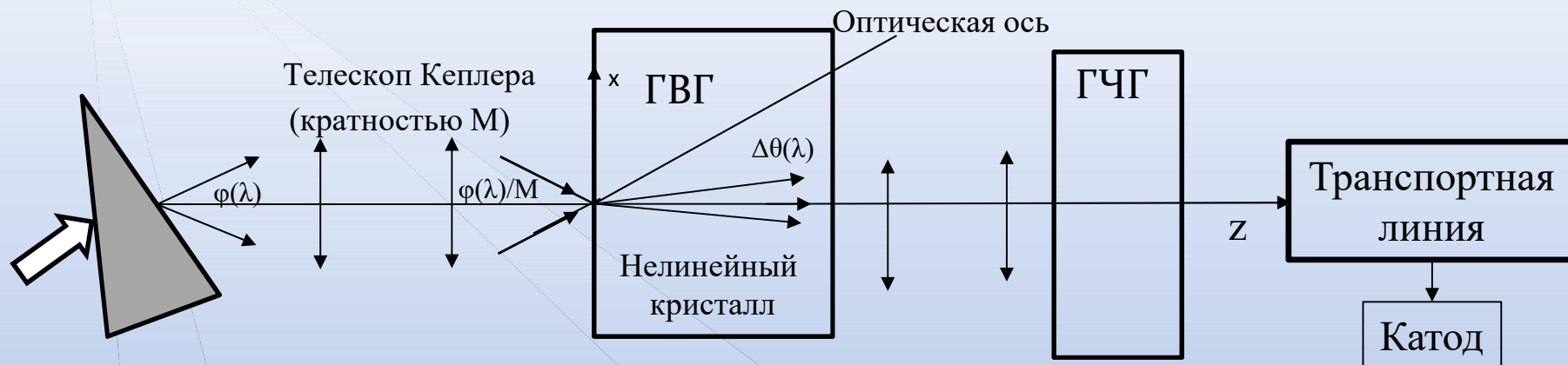
Модулированный 3D эллипсоидальный импульс

$$A_M(x, y, t) = \hat{F}(S(x, y, \Omega) \cdot e^{i \cdot M \cdot \sin(\Omega \cdot K)})$$

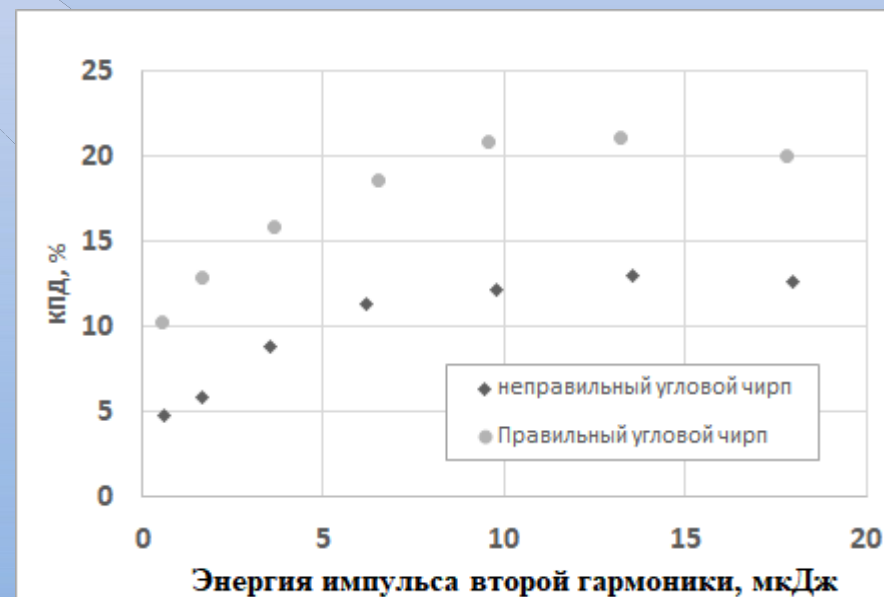
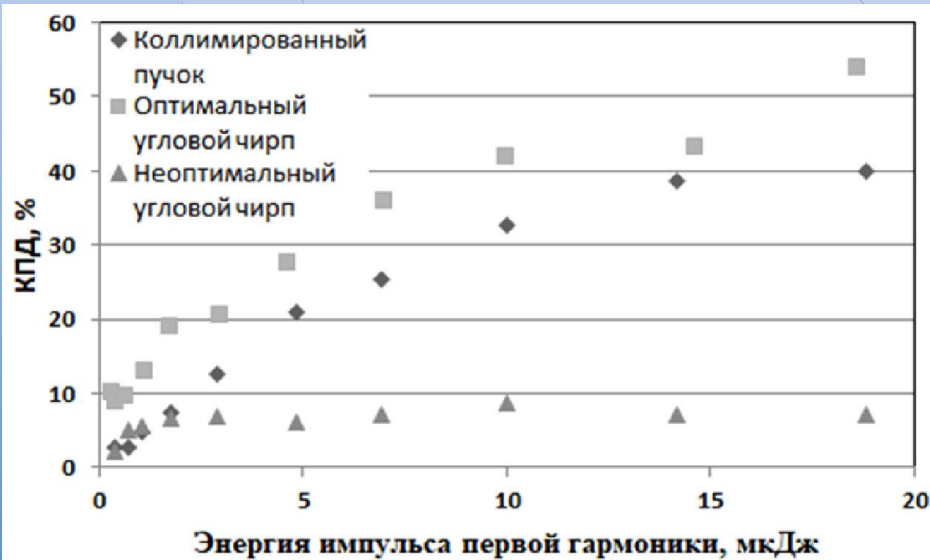
М и К свободные параметры



Генерация второй и четвертой гармоник с сохранением 3D распределения интенсивности лазерных импульсов



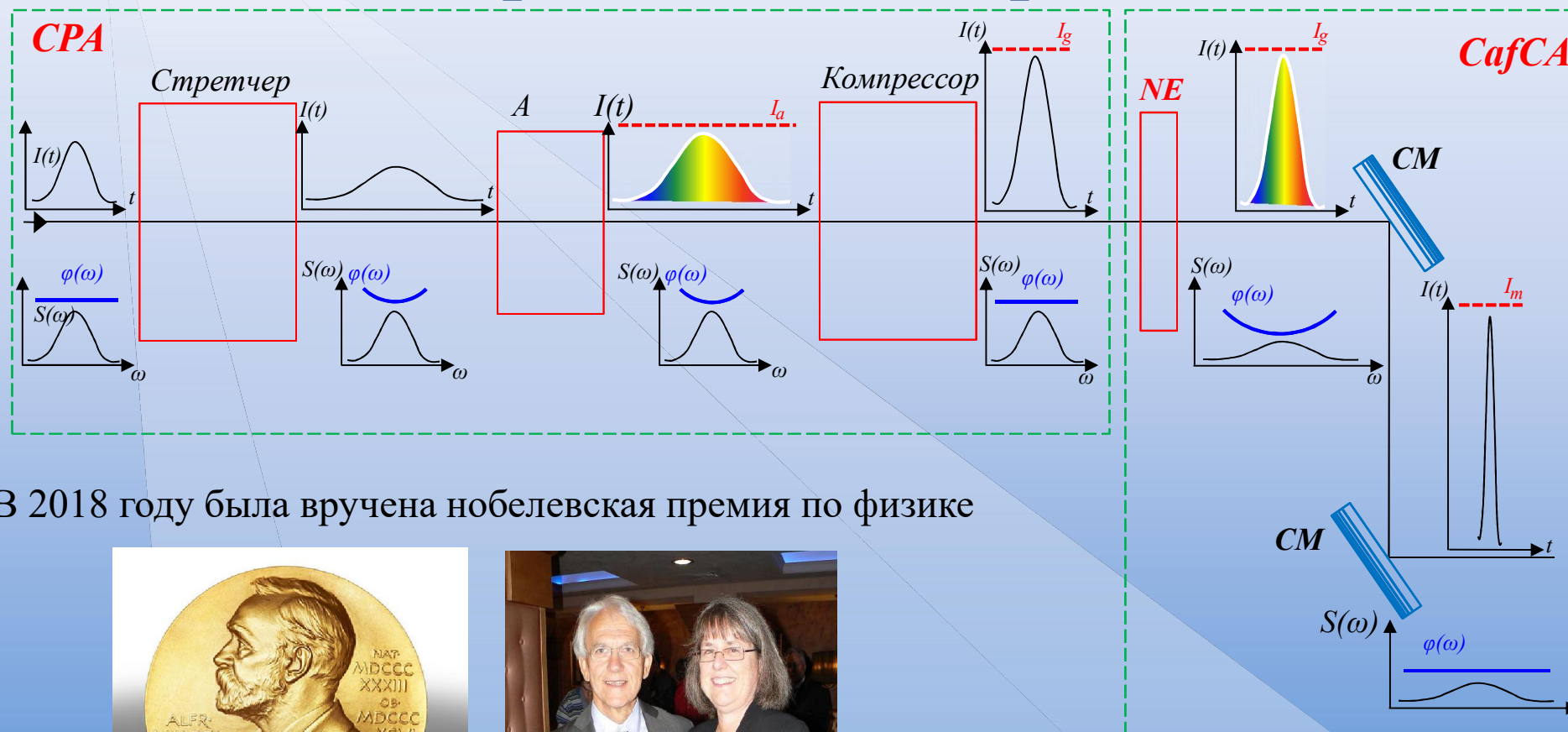
Каждая спектральная компонента поля распространяется под оптимальным углом



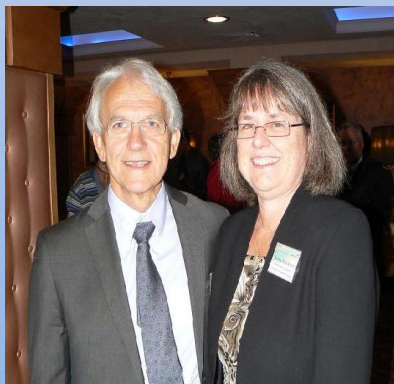
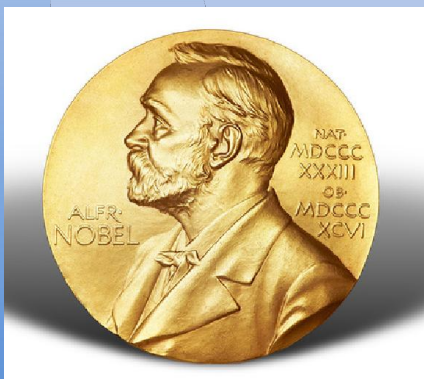


Управление спектрально-временными параметрами интенсивных лазерных импульсов

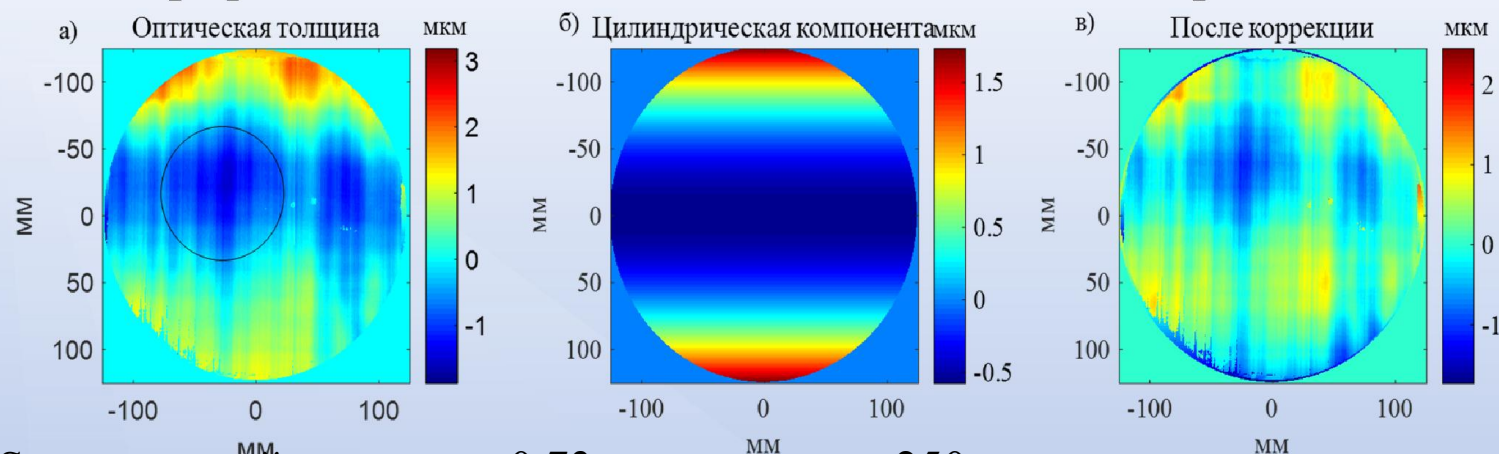
Методы **CRA** и **CafCA** в современных сверхмощных лазерах



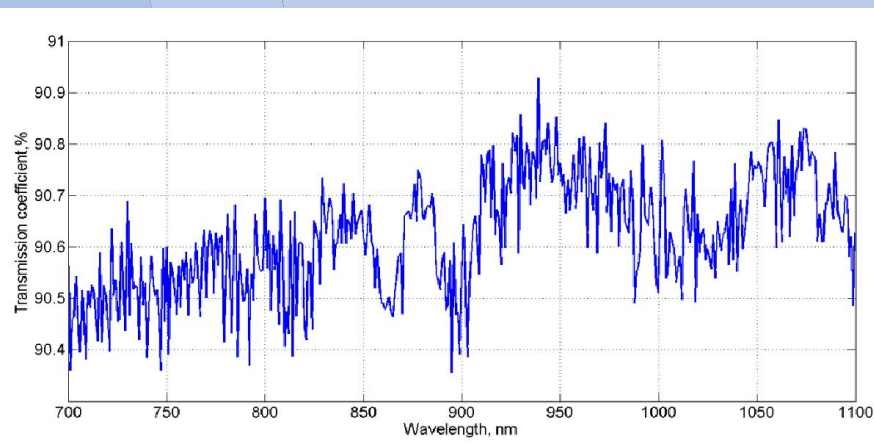
В 2018 году была вручена нобелевская премия по физике



Полиэтилентерефталат – новый нелинейно-оптический материал



RMS оптической толщины: 0.73 μ на апертуре 250 мм
 0.45 μ после коррекции цилиндрической компоненты
 0.3 μ на апертуре 100 мм



Уровень деполяризации:

Максимальный: 7%

Минимальный: 0.02%

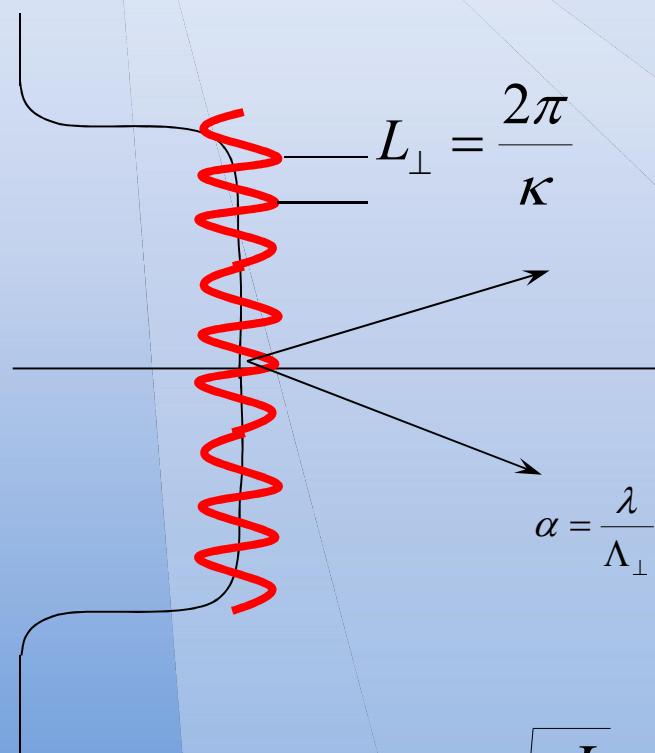
Структура повторяет профиль пучка

Коэффициент пропускания

В ближней ИК области однородный
 $n(\lambda=633\text{nm})=1.573$ для

Мелкомасштабная самофокусировка

В.И.Беспалов и В.И.Таланов «О нитевидной структуре пучка света в нелинейных жидкостях», Письма в ЖЭТФ за 9 апреля 1966 г.



$$E = (E_0 + E_1)e^{-i\delta z} \quad |E_1| \ll E_0$$

$$E_1 \propto \text{Re} \exp(-i\kappa r - ikz)$$

полоса неустойчивости $0 < \kappa < \kappa_{cr}$

максимальный коэффициент усиления

$$K = e^{2B}$$

$$\Psi(r) = B(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \gamma \int_0^L I(r, z) dz$$

$$\kappa_{cr} = 2k \sqrt{\frac{\gamma I}{n_0}}$$

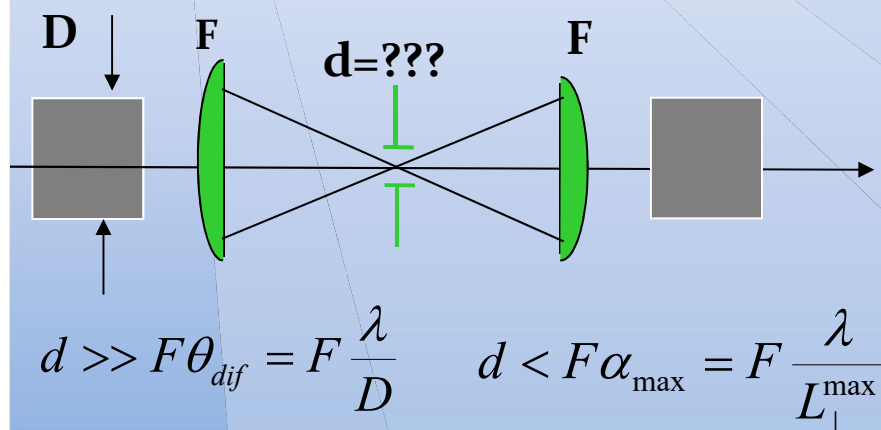
$$\kappa_{\max} = \kappa_{cr} / \sqrt{2}$$

Подавление ММСФ

Интенсивность менее 100 ГВт/см²

Вакуумные пространственные фильтры

$I \sim 1 \div 50 \text{ ГВт/см}^2$ 0.73 ÷ 5 мрад



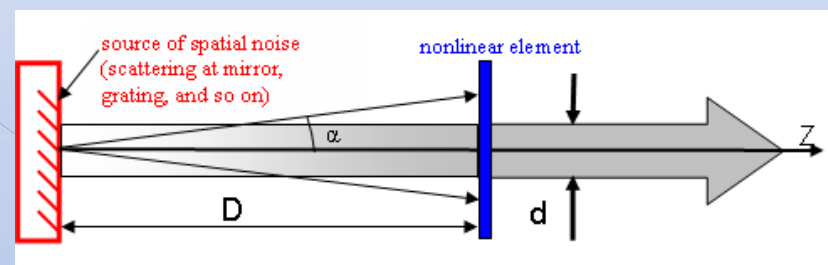
$F \gg D$

A. K. Potemkin et.al., "Compact 300-J/300-GW Frequency-Doubled Neodymium Glass Laser—Part I: Limiting Power by Self-Focusing," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 45, no. 4, pp. 336-344, April 2009. doi: 10.1109/JQE.2009.2013212

Интенсивность более 1 ТВт/см²

Вакуумируемое свободное пространство

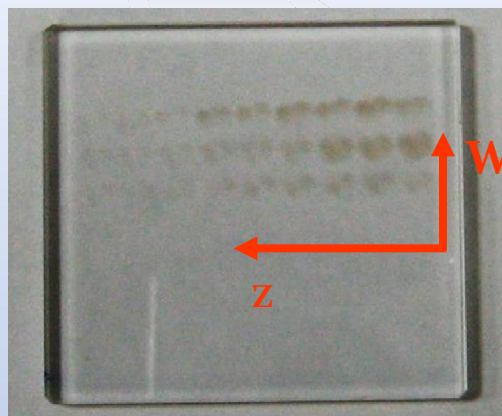
$I \sim 1 \div 5 \text{ ТВт/см}^2$ 23 ÷ 52 мрад



$I=1 \text{ ТВт/см}^2$, $D=100 \text{ мм}$ безопасное расстояние $D \gg 1.6 \text{ м}$

S. Y. Mironov et al., "Second-Harmonic Generation of Super Powerful Femtosecond Pulses Under Strong Influence of Cubic Nonlinearity," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 7-13, Jan.-Feb. 2012.

Экспериментальные результаты



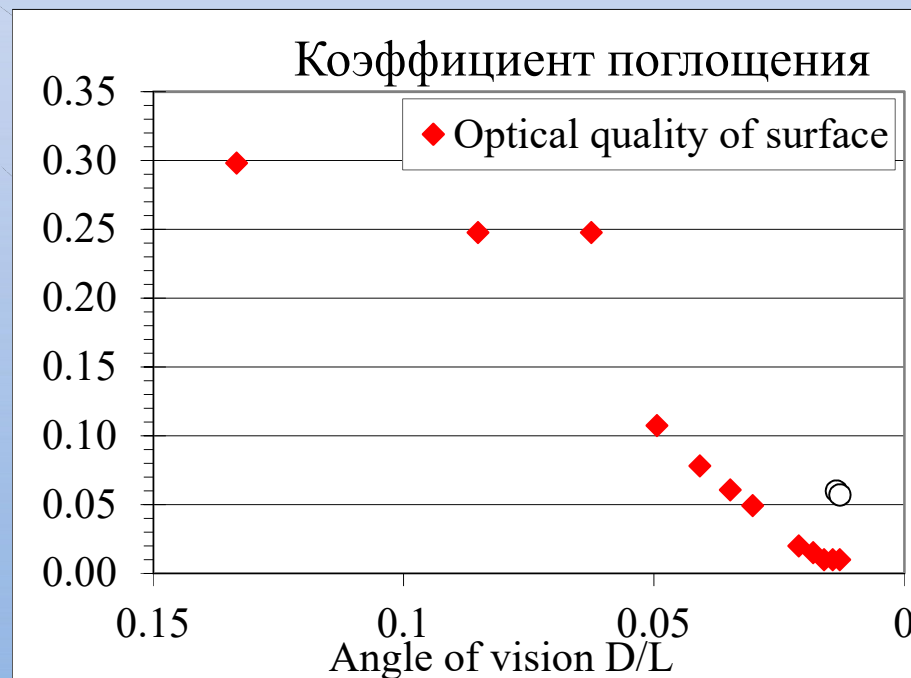
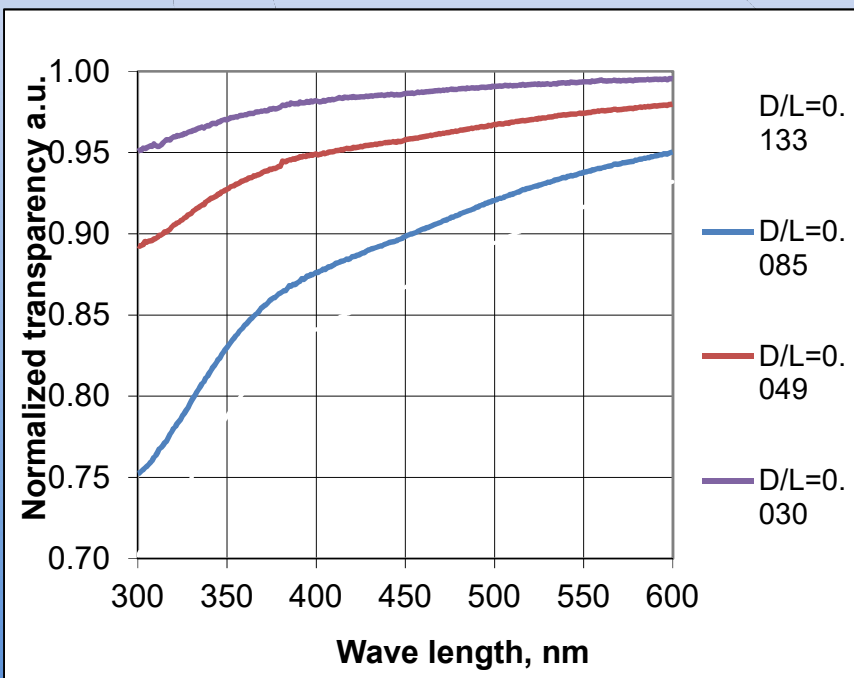
Стекло к8 толщина 4мм

Размер пучка 4мм

Длительность импульса ~ 70 фс

Пиковая интенсивность ~ 3 ТВт/см²

Mironov, S., Lozhkarev, V., Luchinin, G. et al. Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femtosecond radiation. Appl. Phys. B 113, 147–151 (2013).
<https://doi.org/10.1007/s00340-013-5450-1>



Математическое описание метода временного сжатия

Интенсивный $\sim \text{ТВт/см}^2$
Лазерный импульс

Тонкий ($< 1 \text{ мм}$) проходной
Оптический элемент

$$A_c(t) = F^{-1} \left(e^{-\frac{i\alpha\omega^2}{2}} F(A_{out}(t, L)) \right)$$

Корректор
фазы спектра

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{u} \frac{\partial A}{\partial t} - i \frac{k_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 A + \frac{3\pi \cdot \chi^{(3)}}{n \cdot c} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) = 0$$

$$k_2 = \left. \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} \quad \text{Дисперсия групповых скоростей;} \quad \gamma = \frac{3\pi \cdot k_0 \cdot \chi^{(3)}}{(2 \cdot n_0^2)} \quad \text{Коэффициент кубической нелинейности}$$

Начальные условия на границе

$$A(t, z=0) = F(S(\Omega, z=0)) \quad S(\Omega) = S_0 \cdot e^{-2 \ln(2) \cdot \frac{\Omega^2}{\Omega_{FWHM}^2} - i\varphi(\Omega)} \quad \varphi(\Omega) = \frac{\beta}{6} \Omega^3 + \frac{\delta}{24} \Omega^4$$

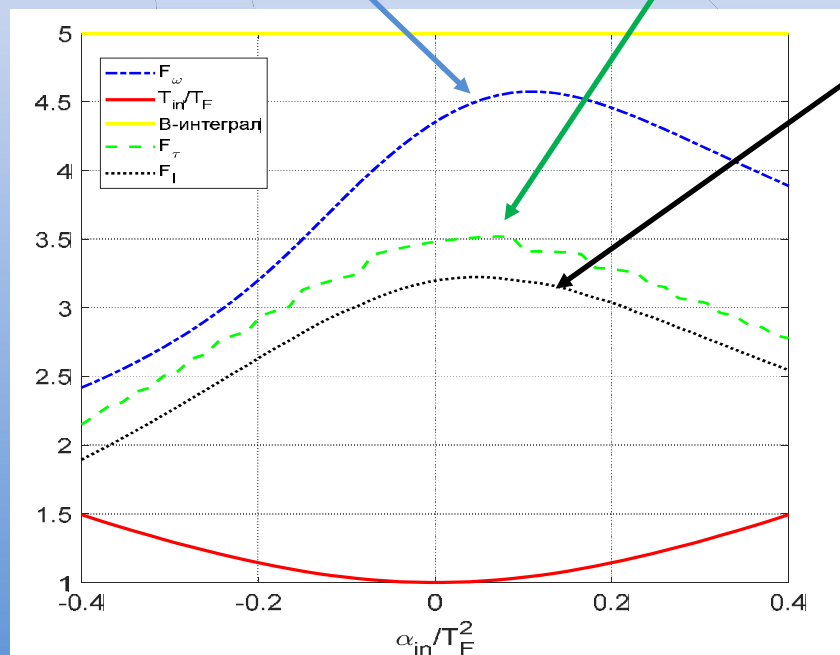
Временное сжатие при фиксированном В-интеграле в зависимости от **второй дисперсии**

$$A(t, z=0) = F(S(\Omega, z=0)) \quad S(\Omega) = S_0 \cdot e^{-2 \ln(2) \cdot \frac{\Omega^2}{\Omega_{FWHM}^2} - i\varphi(\Omega)} \quad \boxed{\varphi(\Omega) = \frac{\alpha}{2} \Omega^2}$$

$$\boxed{F_\omega = \frac{\Delta\Omega_{out}}{\Delta\Omega_{in}}}$$

$$\boxed{F_\tau = \frac{T_F}{T_{out}}}$$

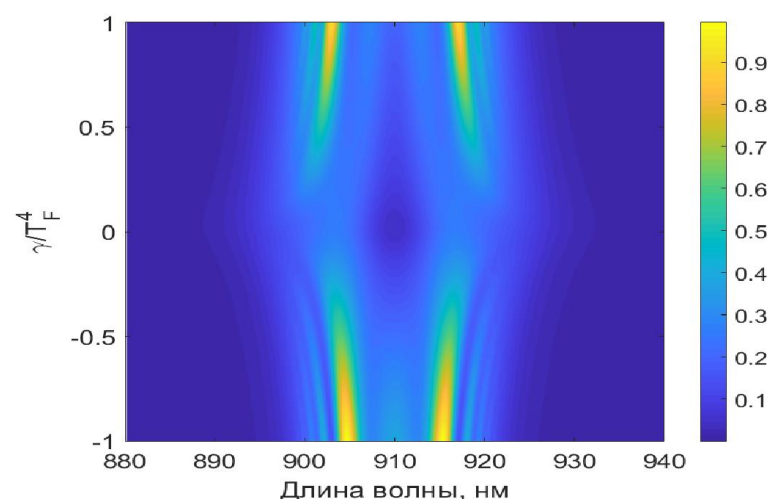
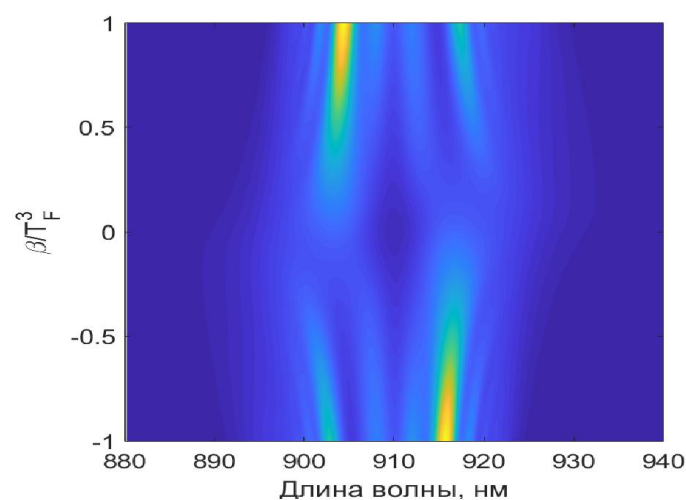
$$\boxed{F_I = \frac{I_{out}}{I_{in}}}$$



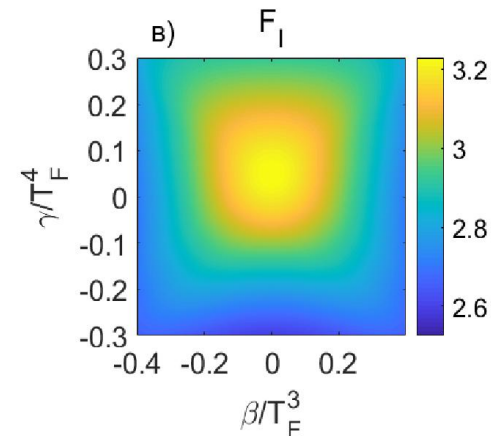
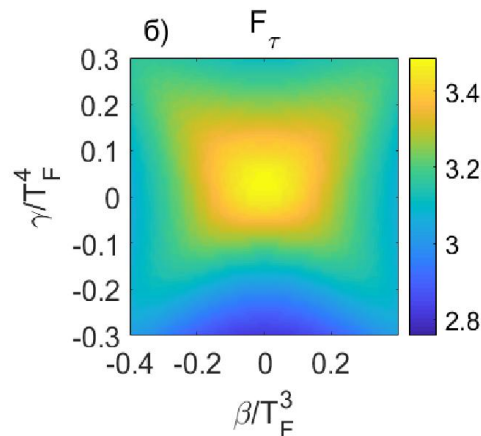
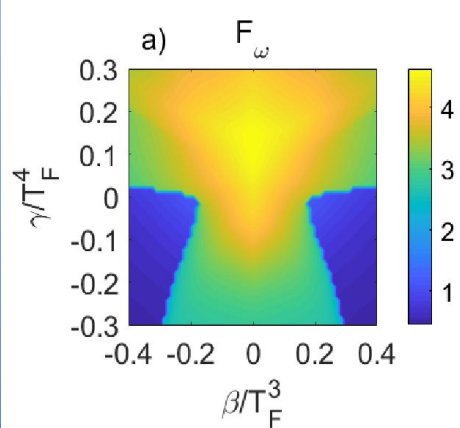
Оптимальное уширение спектра при **положительном чирпе**

Модификация спектра и временное сжатие при фиксированном В-интеграле в зависимости от фазовых aberrаций

$$A(t, z=0) = F(S(\Omega, z=0)) \quad S(\Omega) = S_0 \cdot e^{-2 \ln(2) \frac{\Omega^2}{\Omega_{FWHM}^2} - i\varphi(\Omega)} \quad \varphi(\Omega) = \frac{\beta}{6} \Omega^3 + \frac{\delta}{24} \Omega^4$$



Из-за фазовой самомодуляции происходит формирование пиков в спектре



Влияние дисперсии линейной части показателя преломления на эффективность **CafCA**

$$\frac{\partial a}{\partial \xi} - i \frac{D}{2} \frac{\partial^2 a}{\partial \eta^2} + iB|a|^2 a = 0$$

$$\xi = z/L, \quad \eta = (t-z/u)/T_F, \quad a = A(t,z)/A_{10}$$

$$L_d = \frac{T_F^2}{k_2} \quad D = L/L_d$$

Без дисперсии рост мощности

$$F_{\text{spectrum}} = 1 + 0.9B(1 - 1.5D^{1/2})$$

$$F_{\text{pulse}} = 1 + 0.6B(1 - 1.25D^{1/2})$$

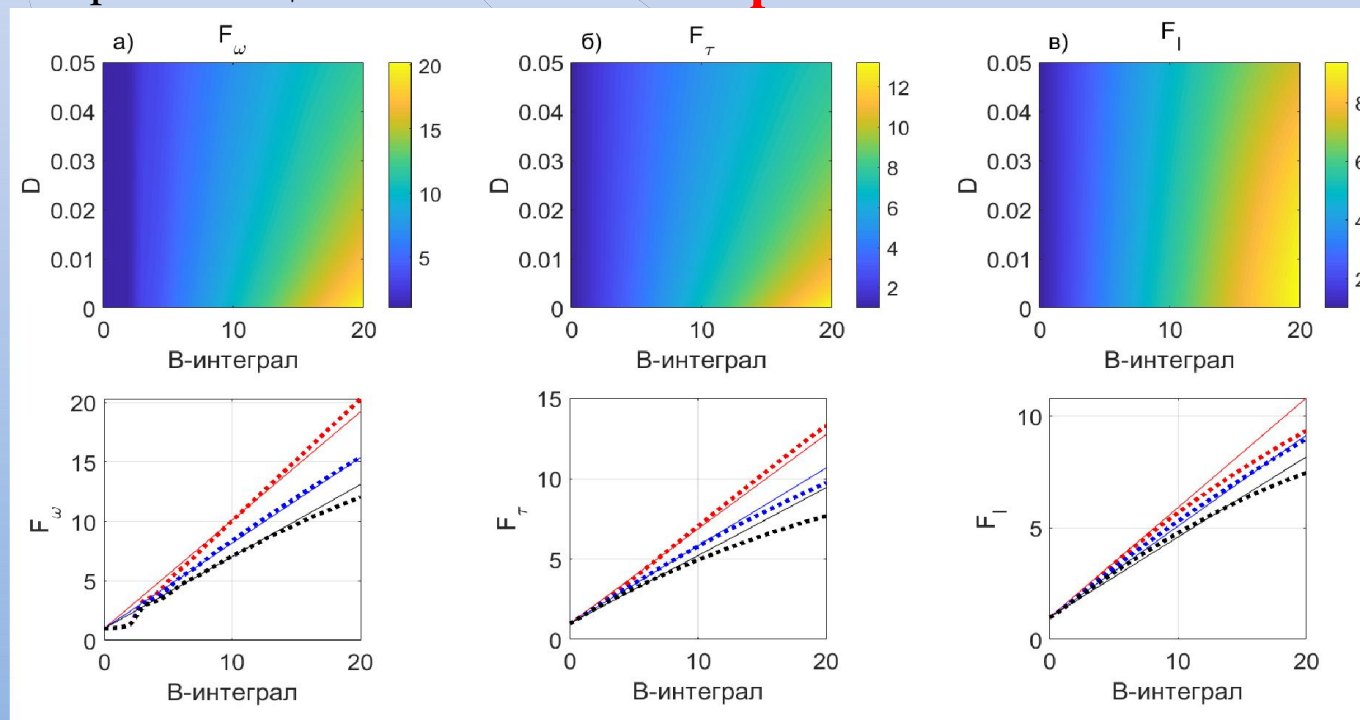
$$F_{\text{power}} = 1 + 0.5B(1 - 1.2D^{1/2})$$

$$F_{\text{power}} \approx 1 + B/2$$

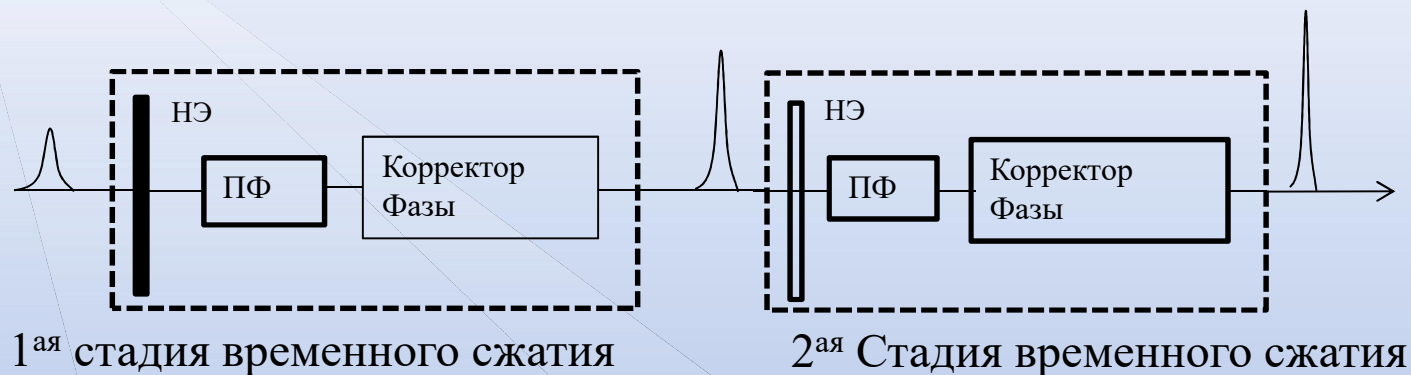
D=0

D=0.02

D=0.05



Двухкаскадное временное сжатие для генерации импульсов петаваттного уровня мощности длительностью в один период светового поля



Предел сжатия ~ период осцилляций поля

Параметры лазера Apollon

$W=15$ Дж

$T=16$ фс

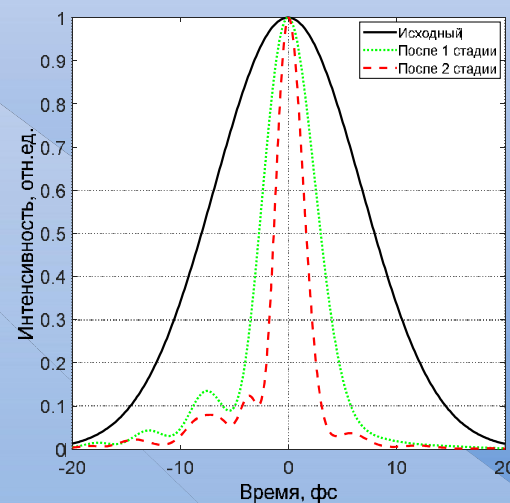
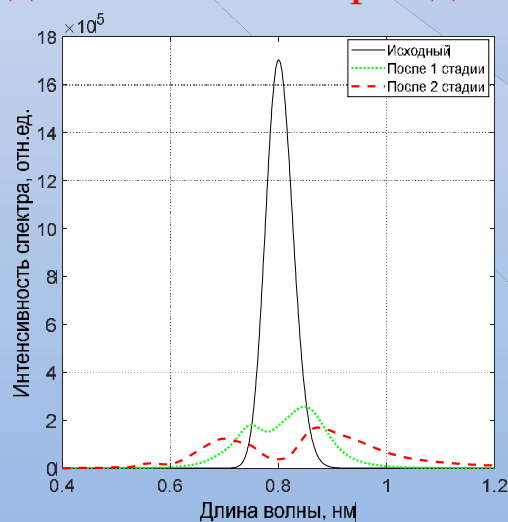
$D=14$ см

$I=6.5$ ТВт/см²

Толщины:

$L1=300$ мкм ($B=3.7$) 4.1 фс

$L2=70$ мкм ($B=2.2$) 2.5 фс



G. Mourou, S. Mironov, E. Kazanov, A. Sergeev, "Single Cycle Thin Film Compressor Opening the door to Zeptosecond-Exawatt Physics", Eur. Phys. J. Special Topics, 223 (6), 1181-1188 (2014)

Mironov S., Lozhkarev V., Luchinin G., Shaykin A., Khazanov E. Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femtosecond radiation // Applied Physics B, v.113, №1, p.147-151, 2013

Экспериментальные результаты метода CafSA для интенсивных (ТВт/см²) лазерных пучков

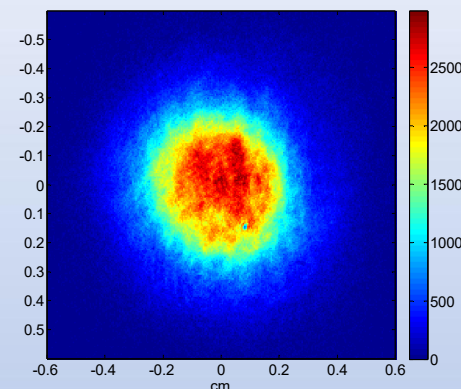
Параметры лазера:

Центральная длина волны 800нм

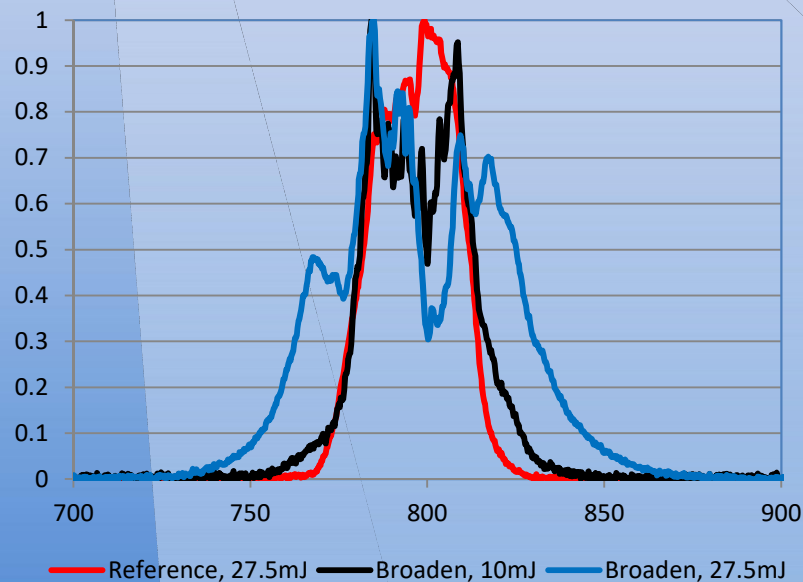
Энергия до 30 мДж, Длительность 40-45фс

Пиковая интенсивность до 3ТВт/см²

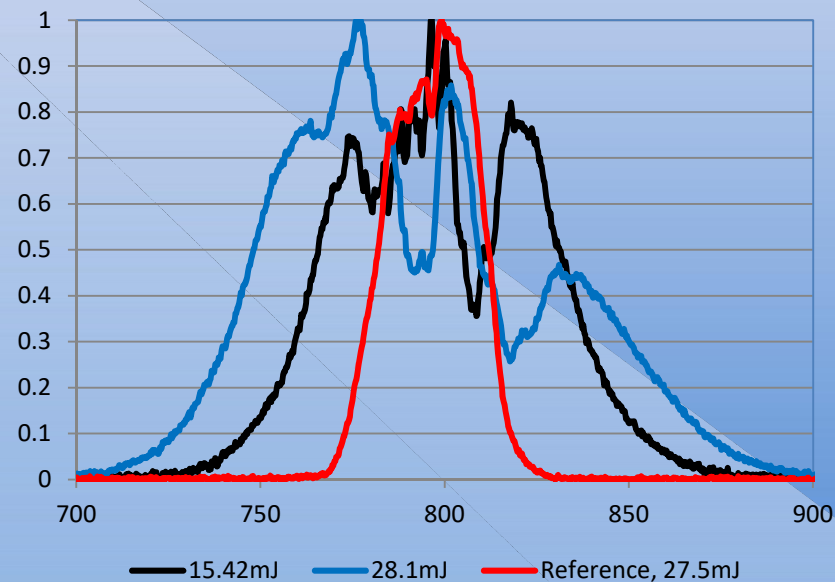
Частота повторения: 10Гц

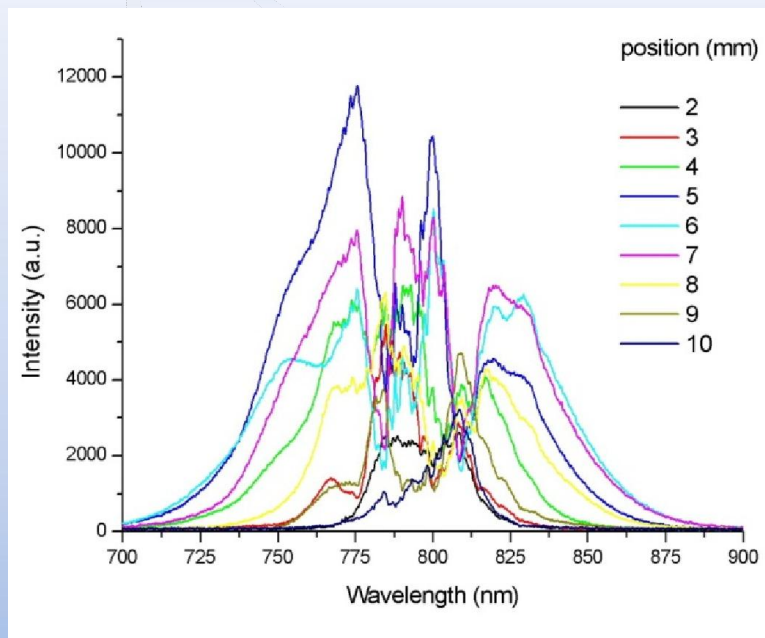


Уширение спектра в 1мм клине

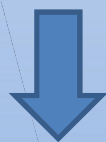


Уширение спектра в 1мм клине+2мм пластина

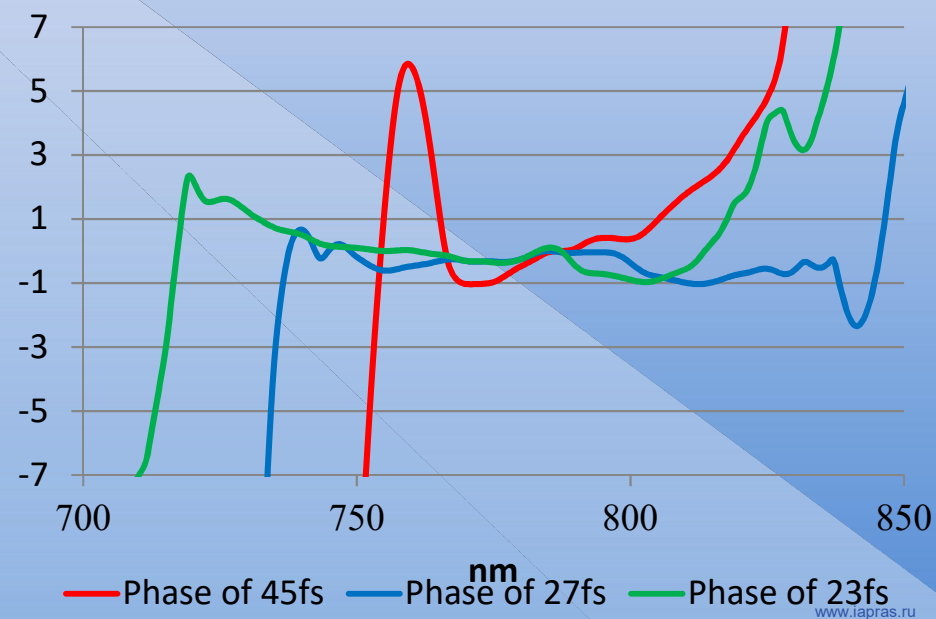
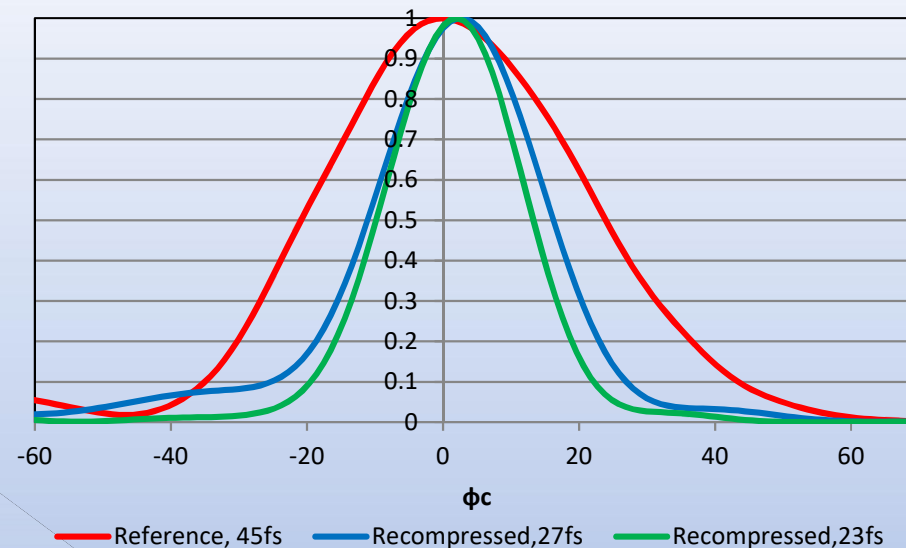




**Неоднородное уширение спектра
По сечению пучка**

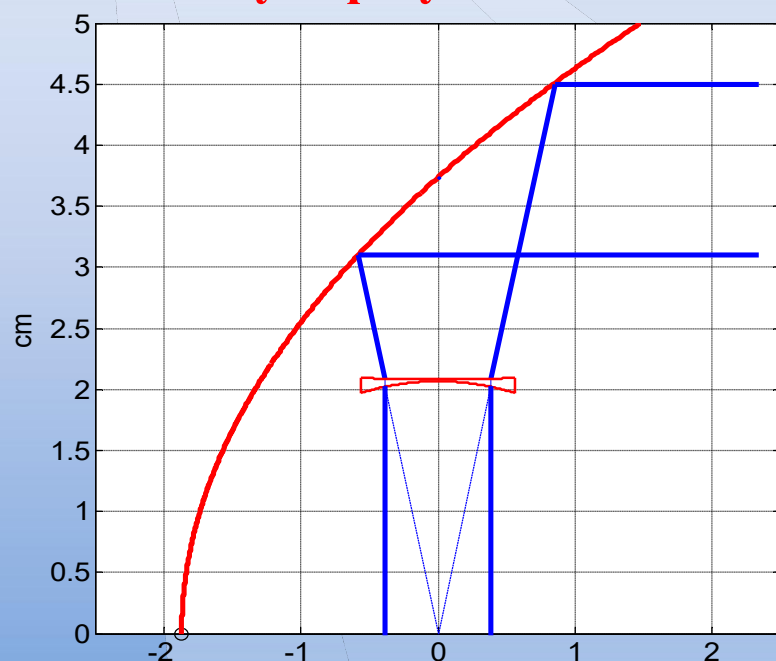


**Неоднородное временное сжатие
По сечению пучка**



Квазиоднородное временное сжатие 3D гауссовых импульсов

Основная задача для однородной рекомпрессии – накопить однородную нелинейную фазу по сечению пучка



Для гауссовых пучков:

дефокусирующая линза –

Три свободных параметра:

Толщина d

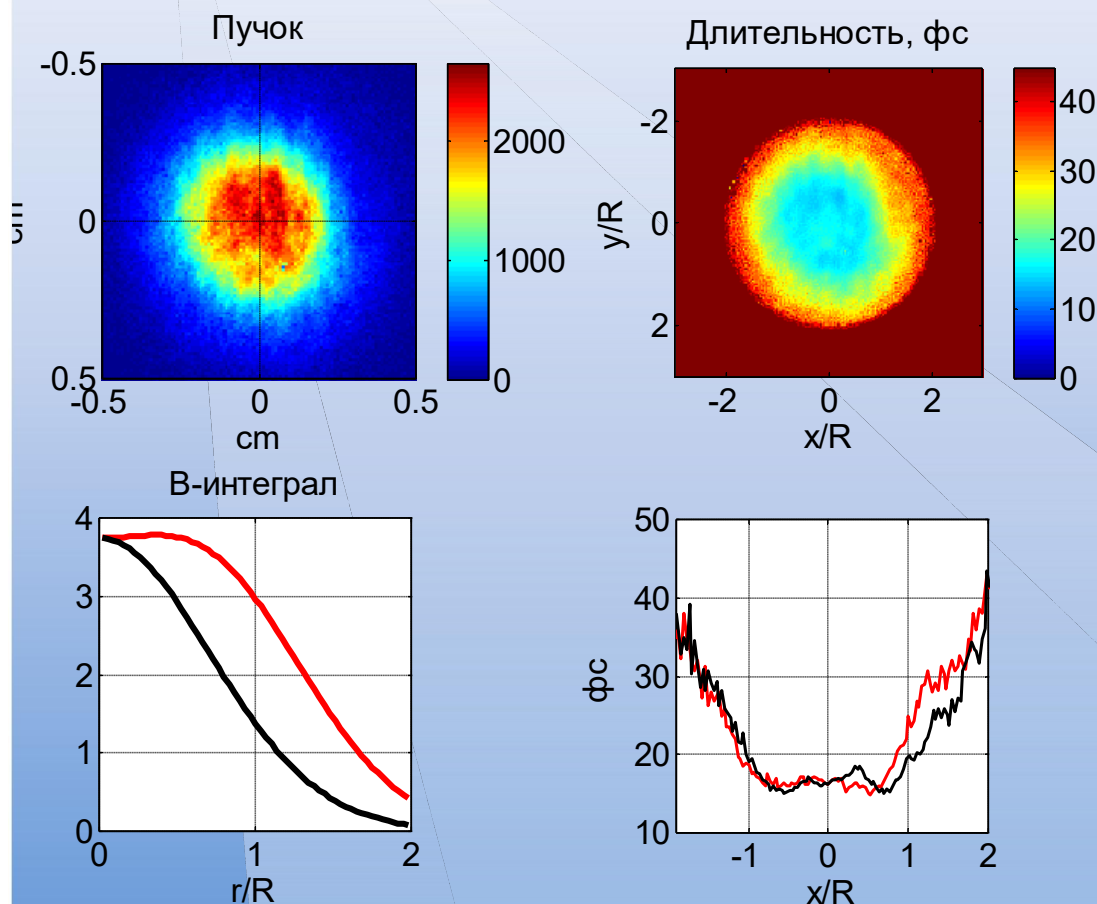
Радиусы кривизны поверхностей входной (R1) и выходной (R2)

$$B(r, t) = \frac{2\pi}{\lambda} \gamma_2 \cdot \int_0^L I(r, t, \xi) d\xi$$

$$B(r_1, t) = B_o \int_0^{L(r_1)} e^{-\frac{(r_1 + \Delta r(\xi))^2}{(R_1 + \Delta R(\xi))^2} - 4 \ln(2) \frac{t^2}{T^2}} d\xi \cong B_o \cdot e^{-\frac{r_1^2}{R_1^2} - 4 \ln(2) \frac{t^2}{T^2}} \cdot \frac{L(r_1)}{d}$$

$$\min_{R_1, R_2} |B(r_1) - B_o|$$

Численное моделирование с учетом экспериментального поперечного распределения интенсивности



Уравнение, описывающее процесс:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{u} \frac{\partial A}{\partial t} - i \frac{k_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \gamma_1 |A|^2 A + \frac{3\pi \cdot \chi^{(3)}}{n \cdot c} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) = 0$$

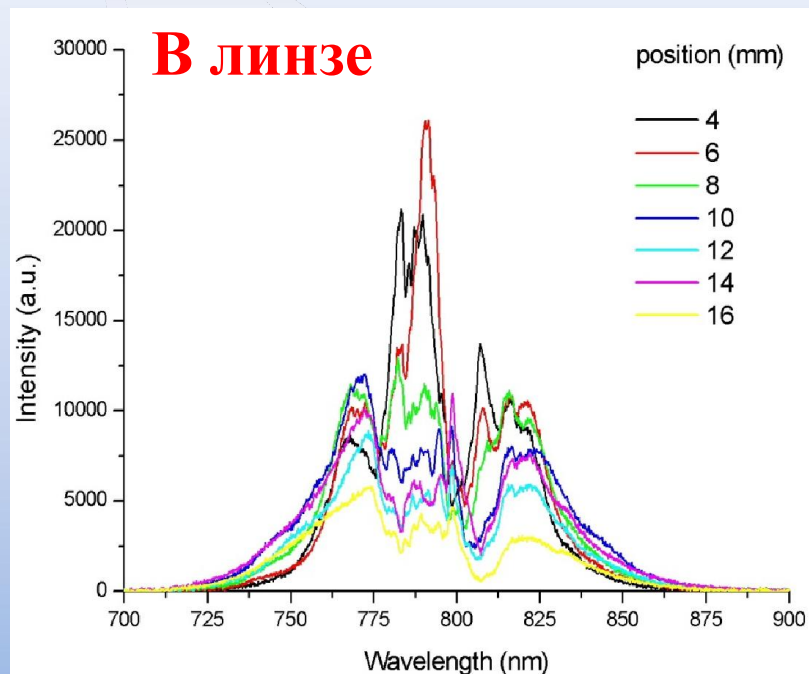
Граничные условия:

$$A(x, y, t) = \sqrt{I(x, y)} \cdot \exp\left(-\frac{2 \log(2) \cdot t^2}{T^2}\right)$$

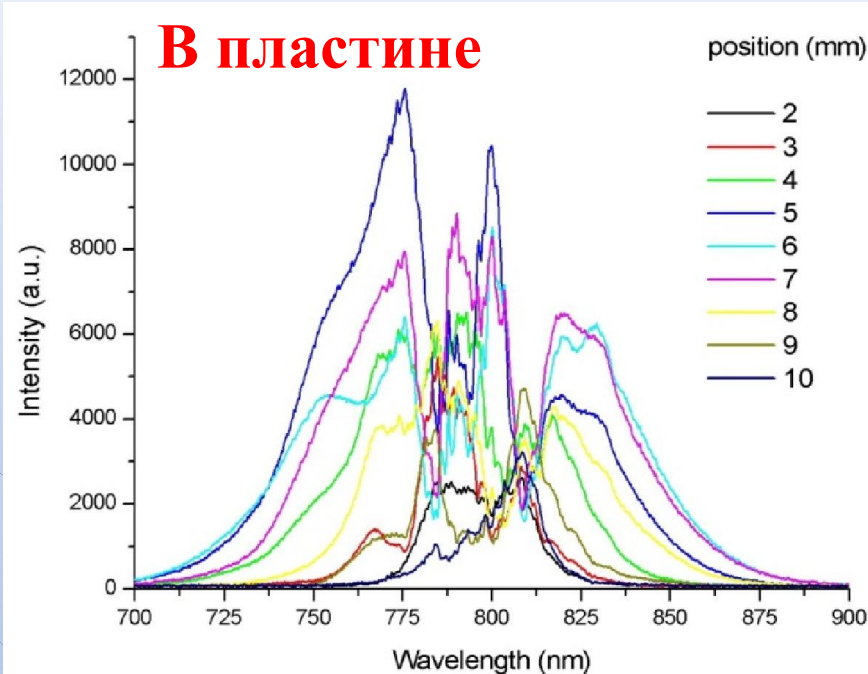
Временная рекомпрессия:

$$A_{comp}(t) = F \left[e^{i\alpha\omega^2} \cdot F^{-1} [A_1(z=L, t)] \right]$$

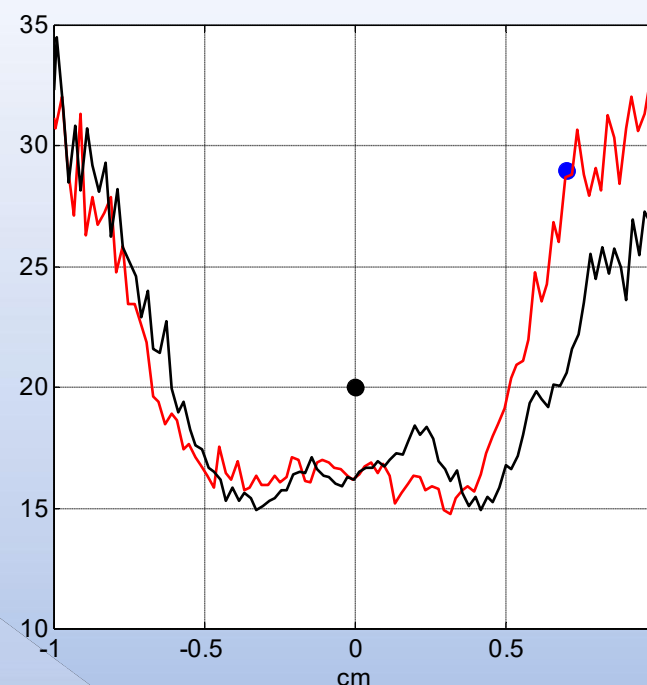
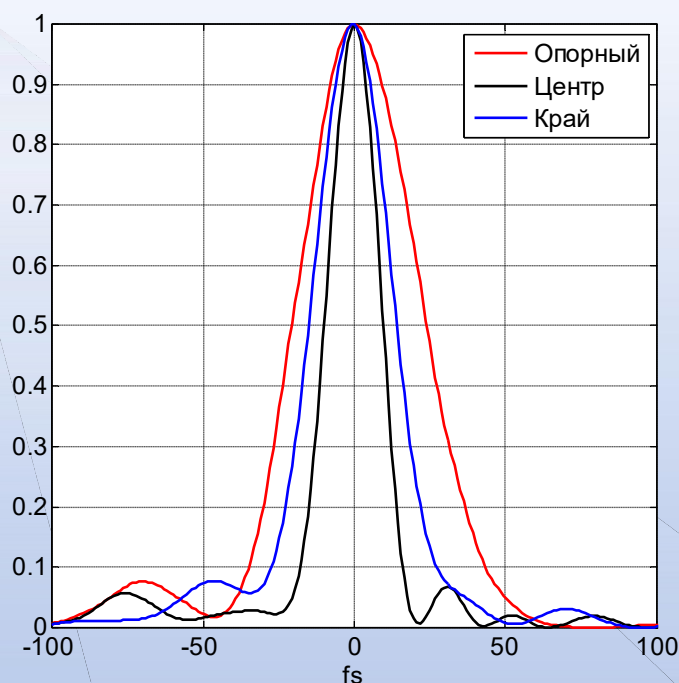
Уширение спектра из-за ФСМ в среде с нелинейностью Керра



Спектр уширяется квазиоднородно по сечению пучка



Неоднородное уширение спектра по сечению пучка



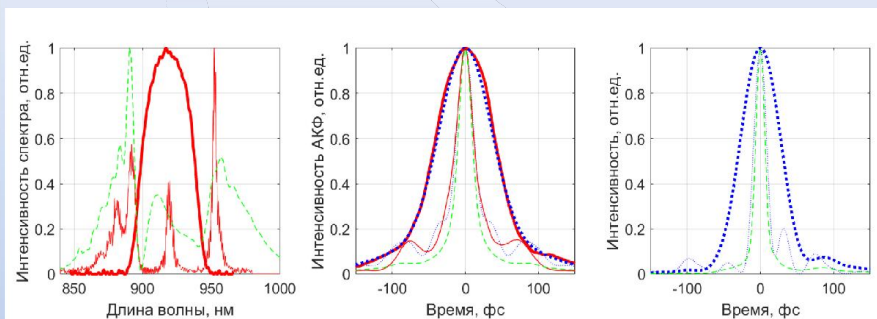
В эксперименте получено временное сжатие:
С 45фс до 20фс в центральной части пучка
С 45фс до 27фс в 7мм от центра

$$\frac{30mJ}{40fs} = 0.75TW \rightarrow \frac{30mJ}{20fs} = 1.5TW$$

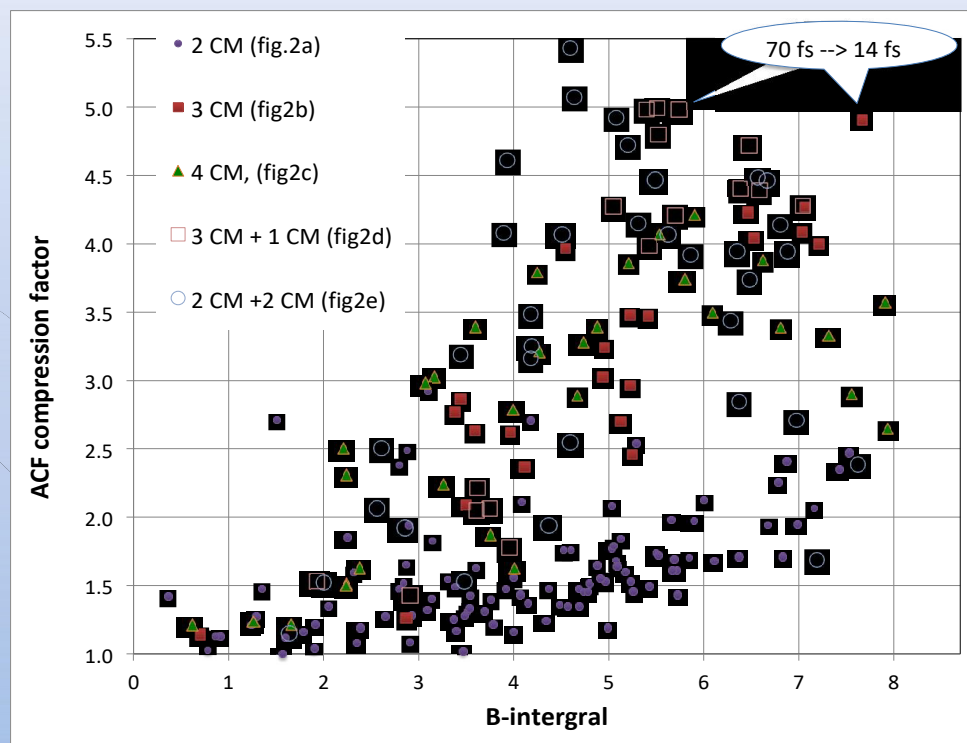
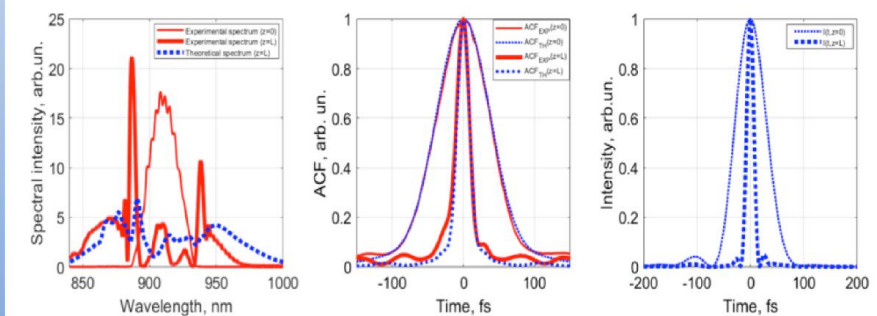
1. Миронов С.Ю., Ложкарев В.В., Хазанов Е.А., Муру Ж.А. Компрессия фемтосекундных импульсов с гауссовыми временным и пространственным распределениями интенсивности // Квантовая Электроника, v.43, №8, p.711-714, 2013.
2. Mironov S., Lassonde P., Kieffer J.C., Khazanov E., Mourou G. Spatially-uniform temporal recompression of intense femtosecond optical pulses // The European Physical Journal Special Topics, v.223, №6, p.1175-1180, 2014.
3. Lassonde P., Mironov S., Fourmaux S., Payeur S., Khazanov E., Sergeev A., Kieffer J.C., Mourou G. High energy femtosecond pulse compression // Laser Physics Letters, v.13, №7, p.075401, 2016

Эксперименты на лазере PEARL (Нижний Новгород)

$\varnothing 160\text{mm}$, $W=12\text{J}$, $T_{\text{pulse}}=63\text{fs} \rightarrow 21\text{fs}$, $L_{\text{glass}}=3\text{ mm}$, $B\sim 6$



$\varnothing 160\text{mm}$, $W=17\text{J}$, $T_{\text{pulse}}=70\text{fs} \rightarrow 14\text{fs}$, $L_{\text{glass}}=3\text{ mm}$, $B\sim 7.5$



V. N. Ginzburg, I. V. Yakovlev, A. S. Zuev, A. A. Korobeinikova, A. A. Kochetkov, A. A. Kuz'min, S. Y. Mironov, A. A. Shaykin, I. A. Shaykin, and A. E. Khazanov, "Compression after compressor: threefold shortening of 200-TW laser pulses," *Quantum Electronics*, 49, 299, 2019

V. N. Ginzburg, I. V. Yakovlev, A. S. Zuev, A. A. Korobeinikova, A. A. Kochetkov, A. A. Kuz'min, S. Y. Mironov, A. A. Shaykin, I. A. Shaykin, and A. E. Khazanov, PRA, 2020

Повышение временного контраста у сверхмощных лазерных импульсов

Временной контраст

$$K(\tau) = \frac{I_{\text{peak}}}{I_{\text{wing}}(\tau)}$$

Ближний контраст $K(\tau)$ $\tau = 1 \div 10$ ps

Дальний контраст: $K(\tau)$ $\tau > 50$ ps

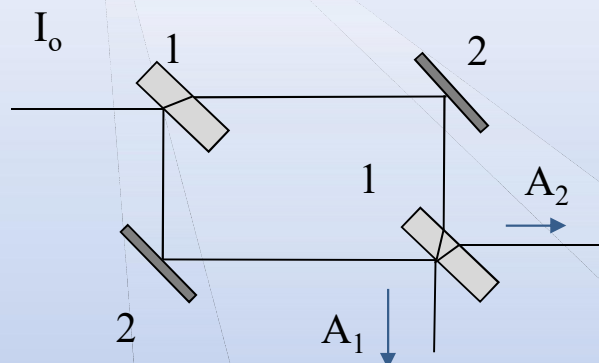
Определяется

Согласованность работы
стретчера и компрессора,
Размерами диф. решеток и др.

Уровнем параметрической и лазерной
люминисценции, конструктивными
особенностями лазера

Методы: нелинейный интерферометр, ГВГ, XPW, плазменные зеркала и др..

Использование нелинейного интерферометра Маха-Цендера для повышения временного контраста сверхмощных лазерных импульсов



Импульс с улучшенным
Контрастом +CafCA

$$I_1(t) = \frac{c}{8\pi} |A_1|^2 = (1 - 2 \cdot (1 - R) \cdot R + 2 \cdot (1 - R) \cdot R \cdot \cos(\Delta\phi_L + 2 \cdot (1 - R) \cdot B(t))) \cdot I_o(t)$$

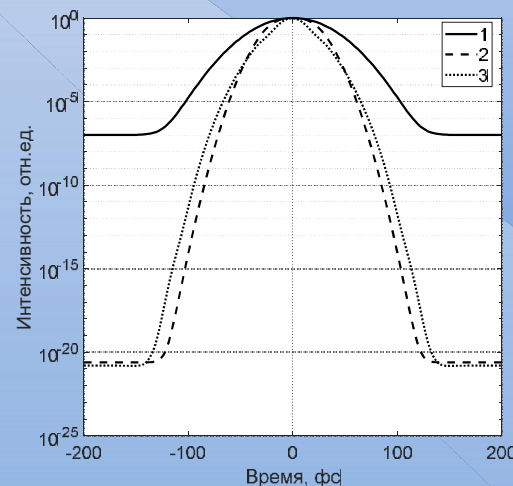
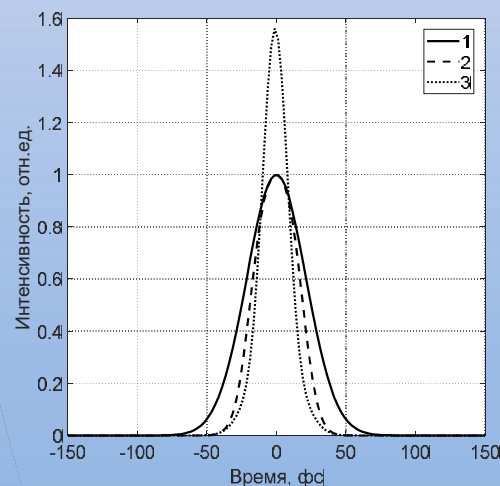
$$I_2(t) = \frac{c}{8\pi} |A_2|^2 = (2 \cdot (1 - R) \cdot R - 2 \cdot (1 - R) \cdot R \cdot \cos(\Delta\phi_L + 2 \cdot (1 - R) \cdot B(t))) \cdot I_o(t)$$

$\Delta\phi_L$ – разность линейных фаз

$B_o(t) = 2\pi/\lambda \cdot I_o(t) \cdot \gamma \cdot h$ – нелинейная фаза

$$I_o(t) = I_1(t) + I_2(t)$$

$\Delta\phi_L = \pi$, $R = 0.5$ и $B(0) = \pi$ I_1 имеет максимальное значение



ГВГ для повышения временного контраста

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} - \frac{ik_2^{(1)}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{i}{2k_1} \Delta_{\perp} A_1 = -i\beta \cdot A_2 A_1^* e^{-i\Delta k z} - i\gamma_{11} |A_1|^2 \cdot A_1 - i\gamma_{12} |A_2|^2 \cdot A_1$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} - \frac{ik_2^{(2)}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{i}{2k_2} \Delta_{\perp} A_2 + \rho \frac{\partial A_2}{\partial y} = -i\beta \cdot A_1^2 e^{i\Delta k z} - i\gamma_{21} |A_1|^2 \cdot A_2 - i\gamma_{22} |A_2|^2 \cdot A_2,$$

Оптимальная угловая отстройка

$$\Delta\Theta = \frac{\Delta n}{n_1^3 \left(n_o^{-2} - n_l^{-2} \right)} \sqrt{\frac{n_l^{-2} - n_o^{-2}}{n_e^{-2} - n_l^{-2}}}$$

$$\Delta n = \frac{\lambda A_{10}^2 \cdot (2\gamma_{11} + 2\gamma_{12} - \gamma_{21} - \gamma_{22})}{8\pi}$$

В KDP, оо-е взаимодействие

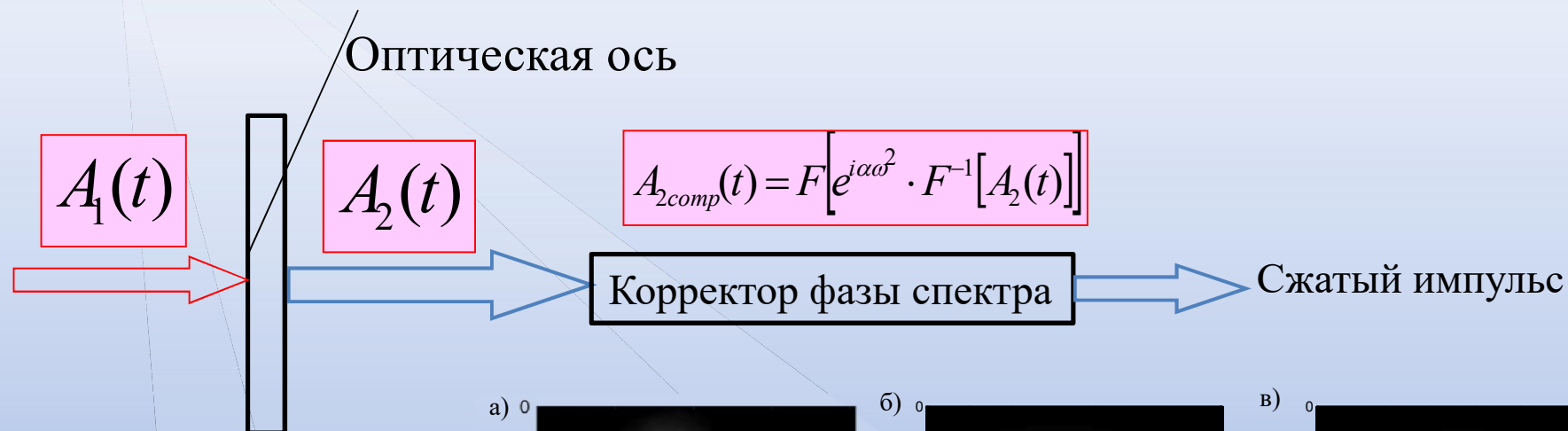
$$I=4.5\text{ТВТ/см}^2$$

$$|\Delta\theta|=0.45^\circ$$

В модели ПМВ отстройка полностью компенсирует нелинейный набег фазы. В модели, учитывающей пространственную и временную структуру, отстройка повышает эффективность преобразования

Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Кирсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности // Квантовая электроника, v.41, №11, p.963–967, 2011

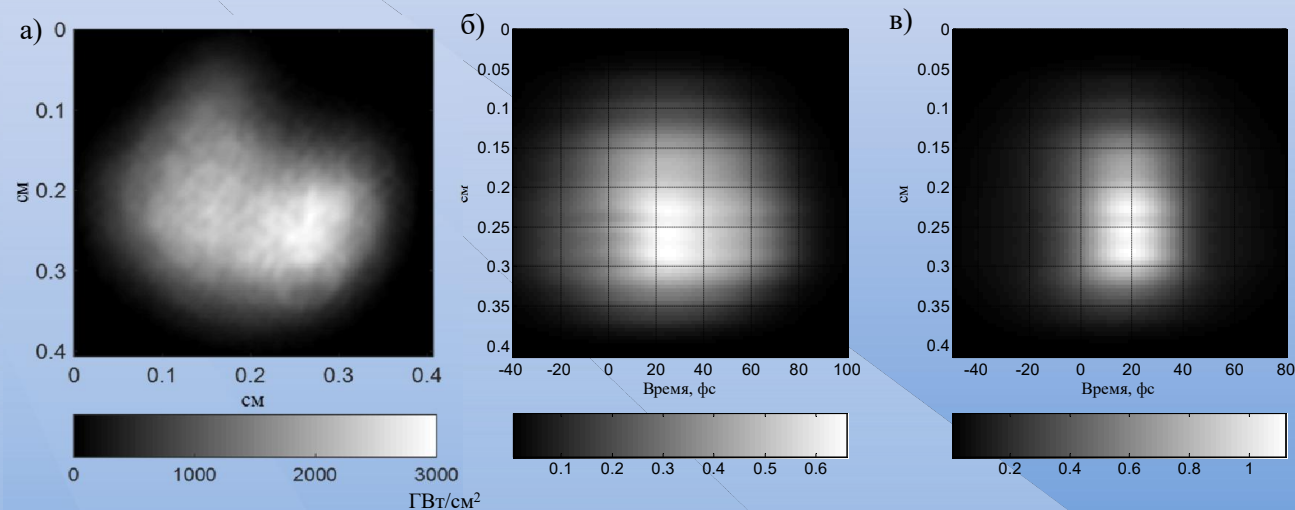
ГВГ + CafCA на примере стартовой части лазера PEARL



Кристалл KDP, 1 мм

5 мДж, 70 фс $\rightarrow$ 34 фс

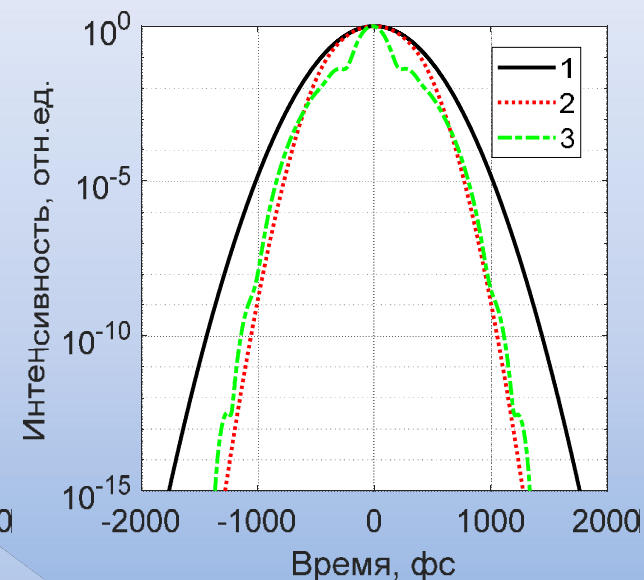
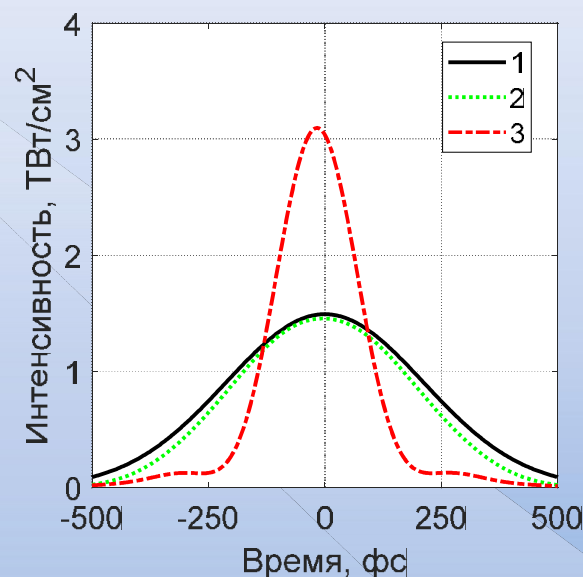
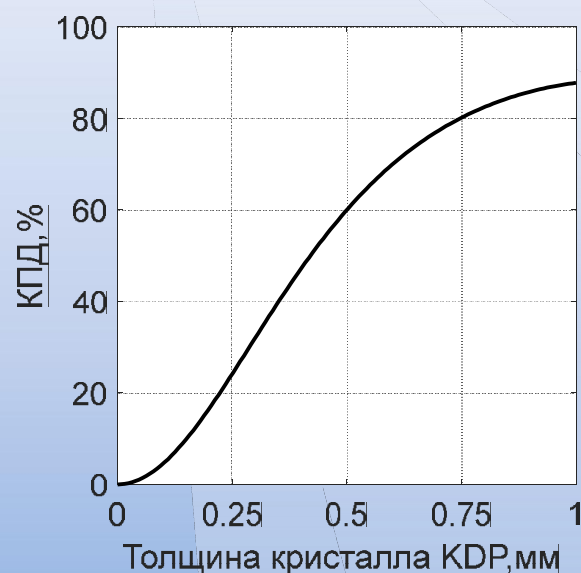
9 мДж, 70 фс $\rightarrow$ 20 фс



Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Кирсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности // Квантовая электроника, v.41, №11, p.963–967, 2011

ГВГ +CafSA на примере лазера PETAL

Численное моделирование проведено для параметров лазерного комплекса PETAL



$W=1$ кДж, $T=500$ фс, $D=400$ мм, однородное поперечное распределение интенсивности
Кристалл KDP, 1мм, угловая отстройка от направления синхронизма -2.68 мрад

Миронов С.Ю., Уилер Д., Гонин Р., Кожокару Г., Унгуреану Р., Баници Р., Сербанеску М., Дабу Р., Муру Ж., Хазанов Е.А. О сжатии импульсов с энергией на уровне 100 Дж с целью повышения пиковой мощности // Квантовая электроника, v.47, №3, p.173-178, 2017

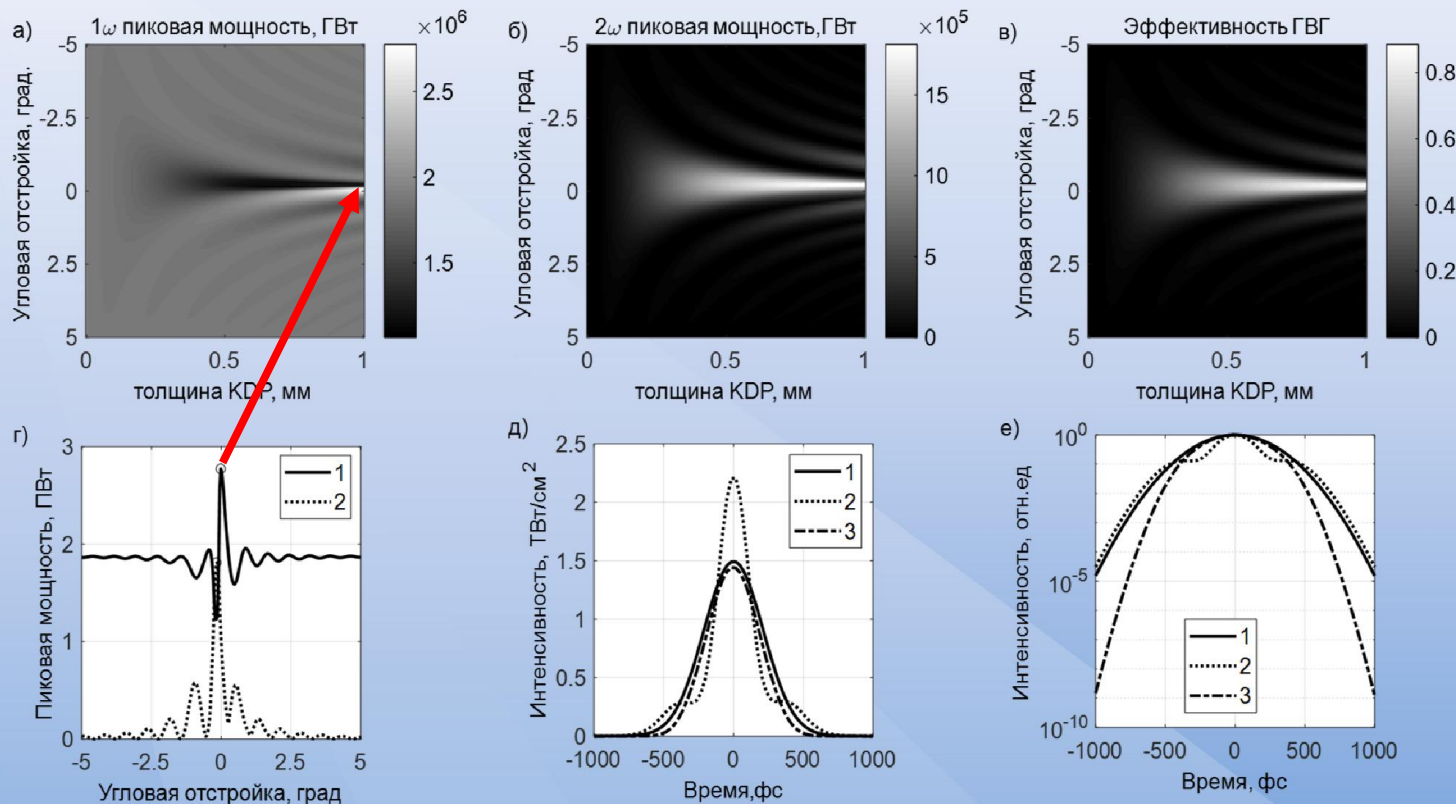


Временное самосжатие из-за каскадной квадратичной нелинейности (на примере лазера PETAL)

$$n_{2,casc}^I \sim \frac{d_{eff}^2}{\Delta k}$$

$$n_{2,casc}^I < 0 \quad n_{2,Kerr}^I > 0$$

Отстройка от синхронизма
Позволяет создать отрицательный n_2

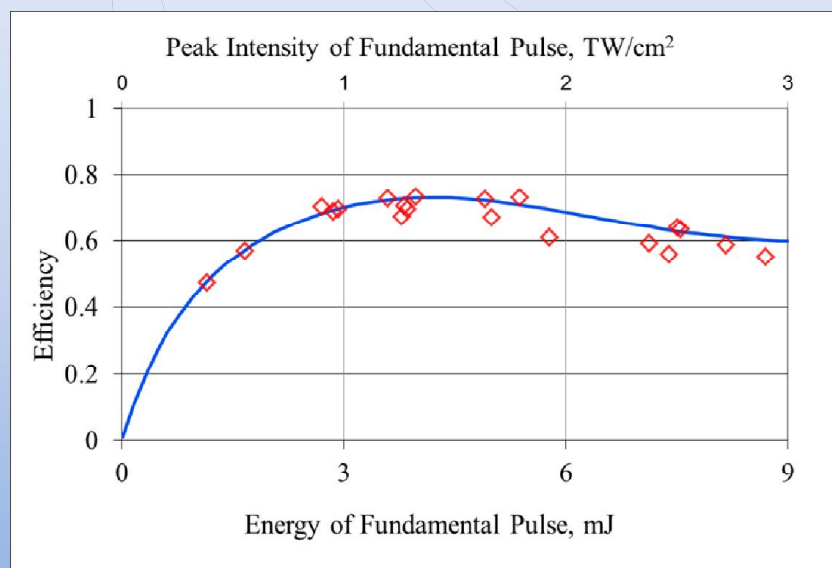


$W=1$ кДж, $T=500$ фс, $D=400$ мм, однородное поперечное распределение интенсивности
Кристалл KDP, 1 мм, угловая отстройка - параметр

Миронов С.Ю., Уилер Д., Гонин Р., Кожокару Г., Унгуреану Р., Баници Р., Сербанеску М., Дабу Р., Муру Ж.,
Хазанов Е.А. О сжатии импульсов с энергией на уровне 100 Дж с целью повышения пиковой мощности // Квантовая электроника, v.47, №3, p.173-178, 2017

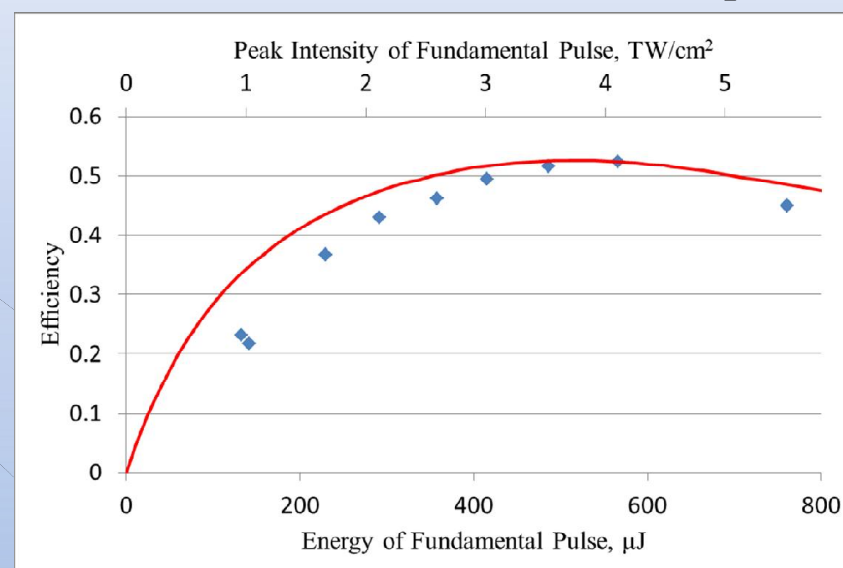
Экспериментальные результаты (стартовая часть лазеров PEARL и ASUR)

KDP 1 мм, $\lambda=910$ нм, T=70 фс



73% эффективность преобразования

KDP 0.5 мм, $\lambda=800$ нм, T=40 фс



50% эффективность преобразования

Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Кирсанов А.В., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности // Квантовая электроника, v.41, №11, p.963–967, 2011

Заключение

Лазерные драйверы для фотоинжекторов электронов (часть I)

- Для управления формой удобно использовать – спектроны
- Управление амплитудой и фазой спектра позволяет сформировать импульсы со “сложным” распределением интенсивности в пространстве
- Для фотоинжекторов электронов необходимы импульсы УФ диапазона с 3D эллипсоидальным распределением интенсивности
- Сохранить форму в процессах ГВГ и ГЧГ можно за счет создания углового чирпа

Управление спектрально-временными параметрами интенсивных лазерных импульсов (часть II)

- Метод CafSA – увеличение мощности за счет сокращения длительности
- Две стадии CafSA – путь к генерации однопериодных импульсов ПВт уровня мощности
- ГВГ +СМ в тонких кристаллах позволяет увеличить временной контраст, сократить длительность и увеличить пиковую мощность по сравнению с исходным импульсом
- Использование каскадной квадратичной нелинейности позволяет реализовать временную самокомпрессию