

Нелинейные процессы в мощных фемтосекундных лазерных системах

В.Е.Яшин

*Институт лазерной физики
АО Государственный оптический
институт им. С.И.Вавилова*

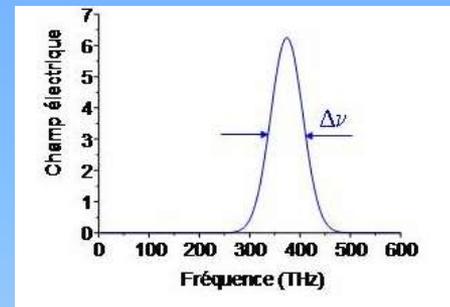
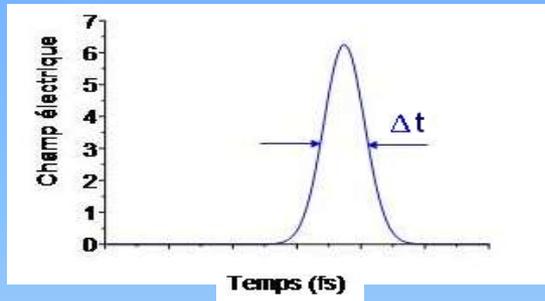


**17 Научная школа
«НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ»
27.02-4.03. 2016 г.**

- Фемтосекунды и лазеры
- Проблемы усиления коротких импульсов
- Оптический пробой
- Дифракция
- Самофокусировка и фазовая самомодуляция
- ВРМБ и ВКР
- Насыщение усиления
- Методы подавления нелинейных эффектов
- Пространственная фильтрация
- Фазовые и поляризационные эффекты
- Примеры лазеров прямого усиления
- Лазеры с компрессией импульсов
- Компрессия при ВРМ и ВКР
- Чирпированные импульсы
- Лазеры, использующие метод CPA
- Посткомпрессия импульсов
- Лазер на основе Yb:KGW в качестве front-end системы

Introduction

A **femtosecond pulse** is **10^{-15} second**

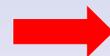


Pulses are Fourier limited if:

$$\Delta \nu \cdot \Delta t = 0,315$$

Pulses with $\Delta t = 100$ fs \Rightarrow $\Delta \nu = 12$ nm
centered at 1050 nm

Shorter pulses



broader spectrum

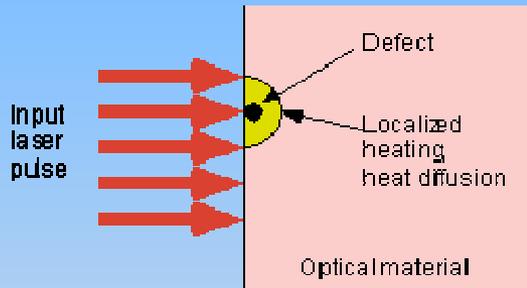


Проблемы, возникающие при усилении сверхкоротких импульсов

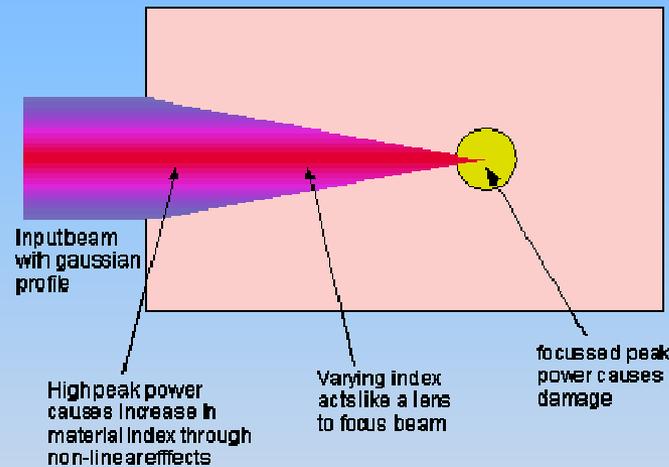
- Оптический пробой
- Самофокусировка
- Вынужденные рассеяния
- Насыщение усиления при общем высоком коэффициенте усиления
- Модификация спектра, влияющие на контраст и удлинение сжатого импульса

Limitations of Peak Power

Damage



Self-focusing & Filamentation

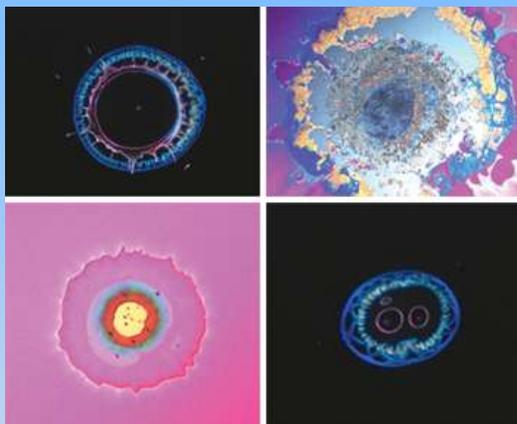


$$W(\text{J}/\text{cm}^2) \approx (3 \dots 15) \sqrt{t_{\text{pulse}}(\text{ns})}$$

Filamentation FOM is Break-up integral:
$$B = \frac{8\pi^2 n_2}{\lambda c n} \int_0^L I(z) dz$$

B is limited on the level $B < 2$, that limits intensity $I < 1 \dots 10 \text{ GW}/\text{cm}^2$

Оптический пробой



Механизмы:

- Линейное поглощение в объеме
- Многофотонное поглощение
- Электронная лавина
- Поглощение дефектами (платина, иридий....)

Причины:

- Модуляция интенсивности (дифракция интерференция...)
- Самофокусировка

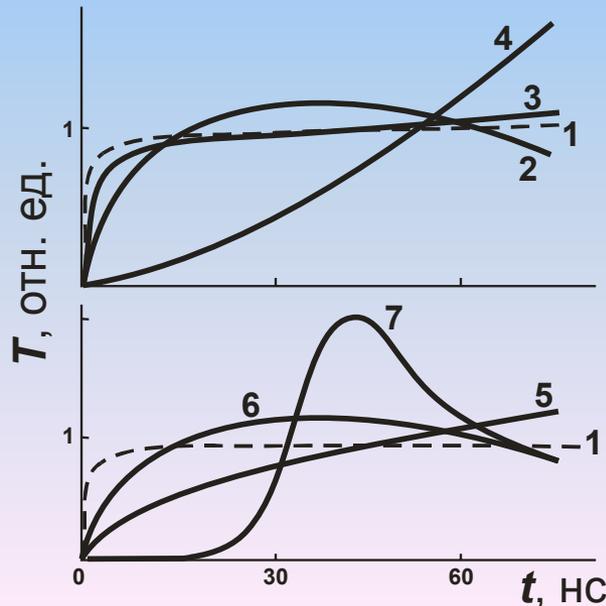
ОПТИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ

Пороги разрушения поверхностей и объемов
некоторых стекол и оптических покрытий.

	Пороговая плотность энергии Дж/см ²					
	3 пс	0,3 нс	1,2 нс	30 нс	50 нс	150 нс
Стандартное электронно-лучевое высокоотражающее зеркало на основе системы слоев HfO ₂ /SiO ₂		8	15	60		81
Стандартное электронно-лучевое высокоотражающее зеркало на основе системы слоев HfO ₂ /SiO ₂		10	20	60		90
«Градиентное» просветляющее покрытие		10	19	70		
Поверхность стекла К-8	8	33	34	120		160
Фосфатное неодимовое стекло ГЛС-22			15		90/12	190/25
Фосфатное неодимовое стекло ОПС-1242						350/130
Силикатное неодимовое стекло ГЛС-1					55/74	100/126
Силикатное неодимовое стекло ГЛС-6					60/69	115/145

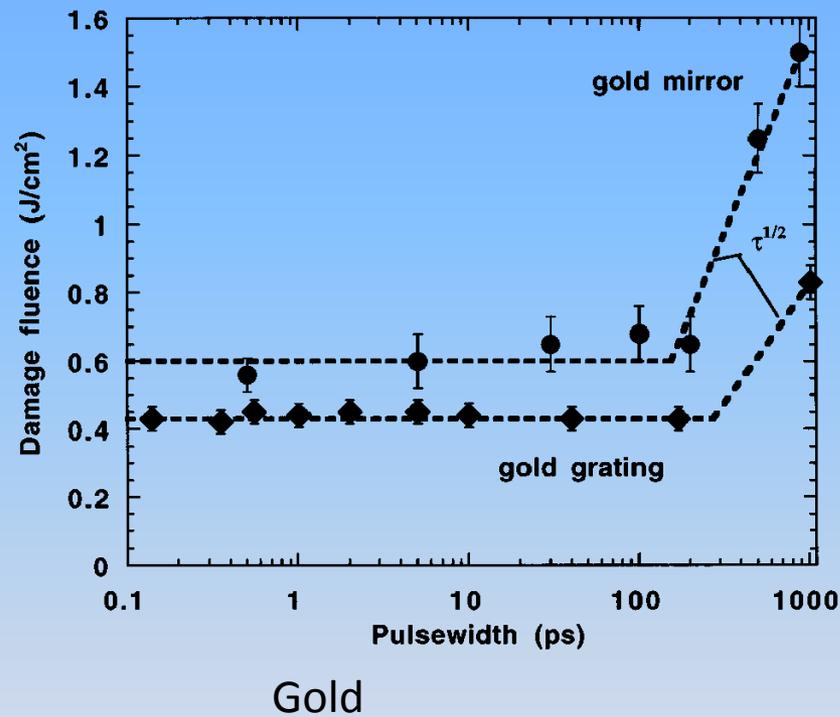
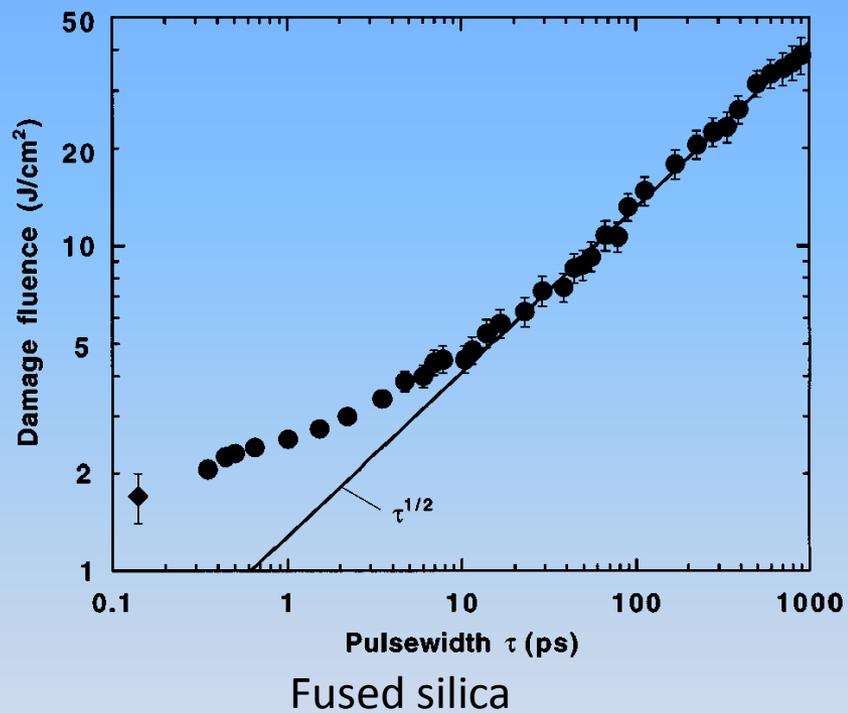
$W_{\text{пор}} = At^p$, где A и p – функции типа поверхности и покрытия

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА



1. $I \sim t^{-0.5}$
2. $I \sim t - B = \text{const}$
3. $I \sim (t_0 - t)/t_0$
4. $I \sim t/t_0$
5. $I \sim \text{const}$
6. $I \sim \exp(-t^2)$, 10:1
7. $I \sim \exp(-t^2)$, 75:1

Оптический пробой: временная зависимость

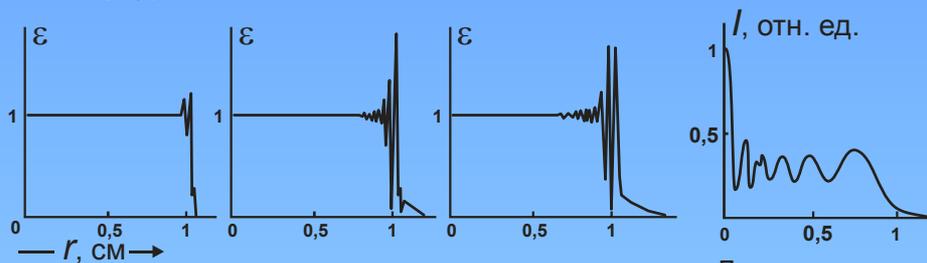


B.C. Stuart et al. JOSA B, V. 13, p. 459 (1996)

ДИФРАКЦИЯ



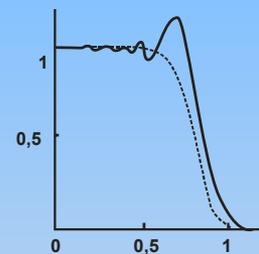
Апертура



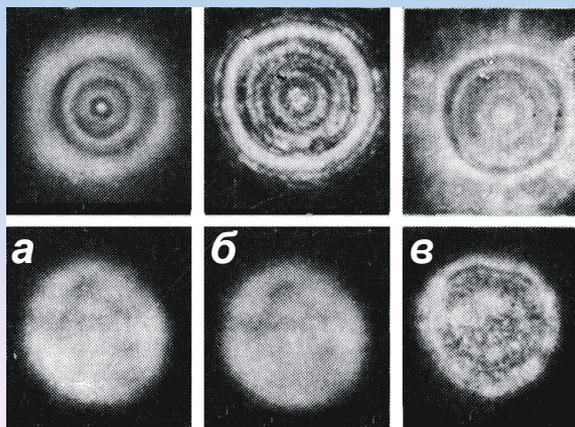
Ближняя зона

$$\frac{I_c}{I_p} = |1 + \kappa^{1/2}|^2$$

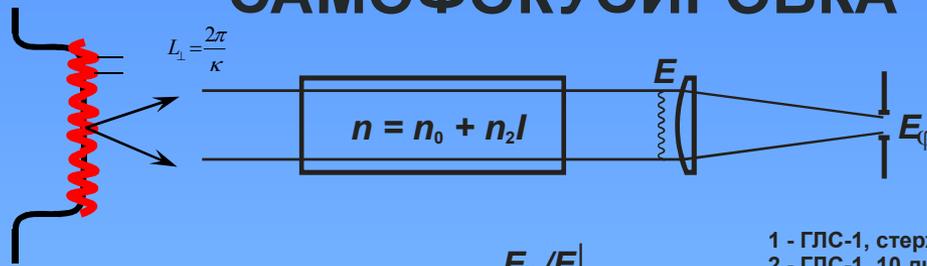
Дальняя зона



Дифракция и самофокусировка



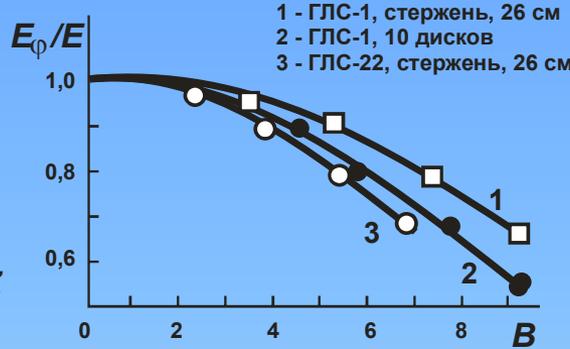
САМОФОКУСИРОВКА



В линейном приближении

$$I_{\text{возм}} = I_0 \exp(2B)$$

$$B_{\text{max}} = \frac{8\pi^2 n_2}{\lambda c n} \int_0^L I(z) dz$$



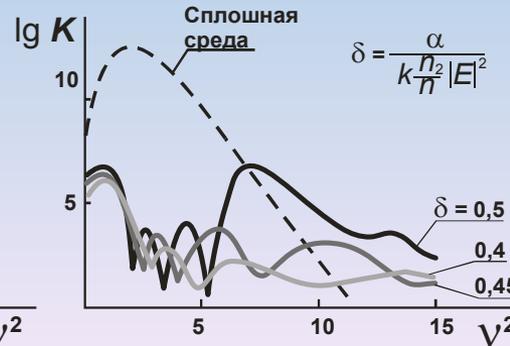
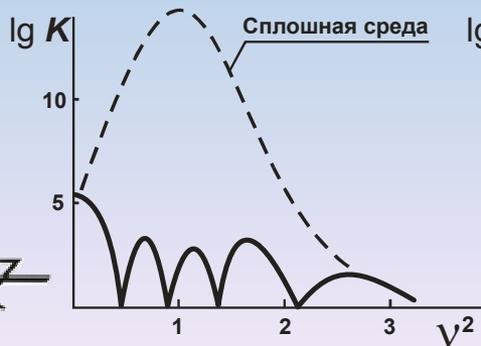
Коэффициент передачи - функция пространственной частоты

$$K = \frac{(|\mathbf{e}_1|^2 + |\mathbf{e}_2|^2)_{\text{ВЫХ}}}{(|\mathbf{e}_1|^2 + |\mathbf{e}_2|^2)_{\text{ВХ}}}$$

$$v = \frac{\kappa}{k \frac{n_2}{n} |E|^2}$$

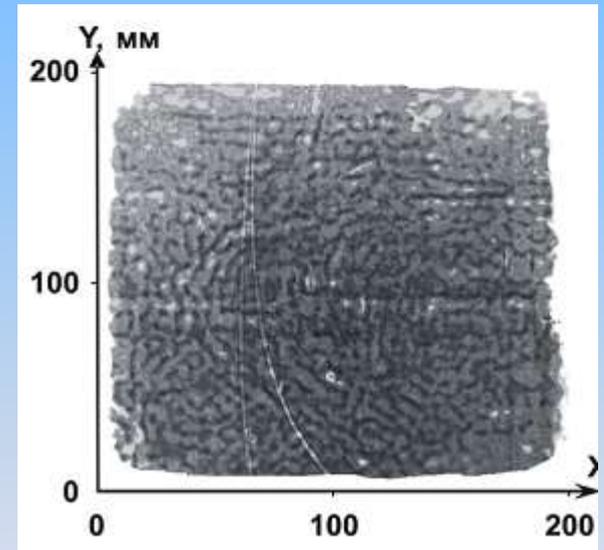
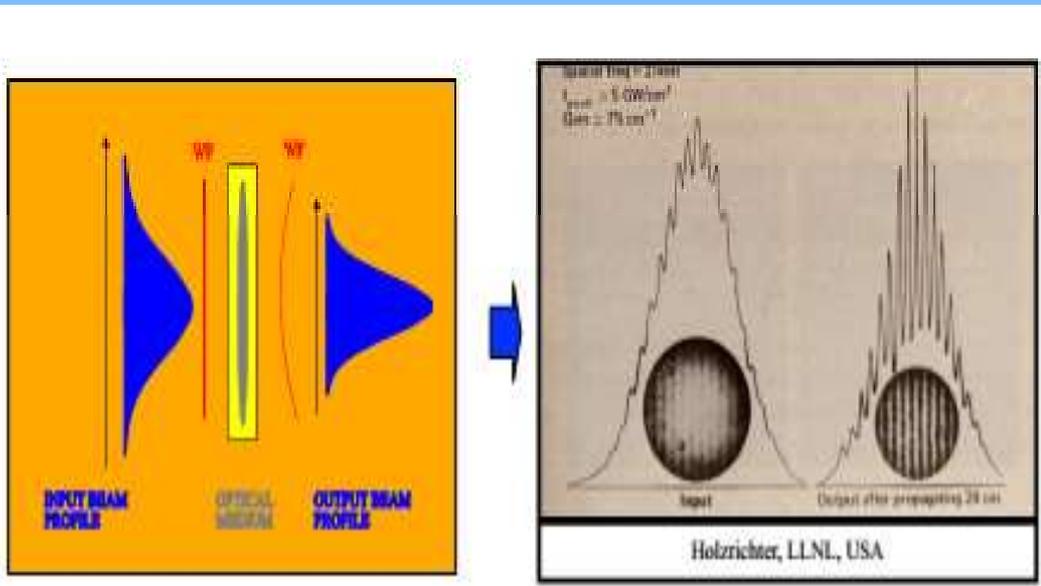
5 пассивных элементов

5 усилителей



В.И.Беспалов и В.И.Таланов
 «О нитевидной структуре пучка света в нелинейных жидкостях», Письма в ЖЭТФ, т.3, с.471-476 (1966).

MMC



The B integral

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 I(z) dz$$

should be smaller than $\approx 2\pi$ to avoid catastrophic self-focusing

This becomes limiting when exceeding pulse energies of 1 μJ with sub-100 fs pulse duration !

Two possible solutions: ***Scale up diameter or increase pulse duration***

Electronic Kerr nonlinearity

- Nonlinear contribution to the index of refraction

$$N=n_0+n_2I$$

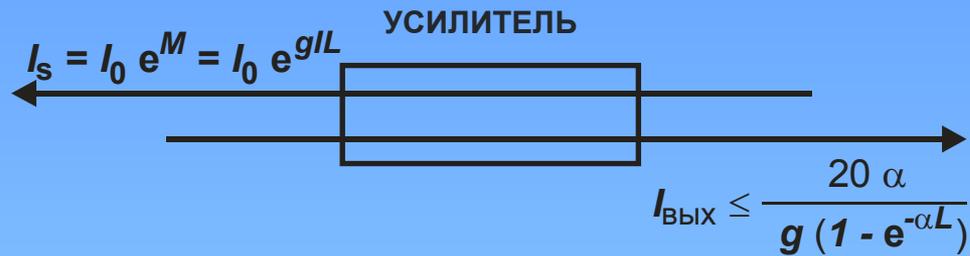
- Instantaneous nonlinear response (< 5 fs)
- The nonlinear index n_2 leads to:
 - ✓ self-focusing (large and small scale)
 - ✓ frequency chirp
 - ✓ spectral broadening
 - ✓ Rotation of polarization ellipse

Керровская нелинейность

Table I
Measured values n_2 of obtained by FROG and Z-scan techniques

	n_0	n_2 (10^{-16} cm ² /W)	$n_2(10^{-13}$ esu)	
1064 nm (Z-scan):				
Fused silica	1.45	2.07 ± 0.4	0.72 ± 0.13	(near top-hat)
		2.10 ± 0.4	0.73 ± 0.13	(Gaussian)
LHG-8	1.52	3.15 ± 0.5	1.15 ± 0.19	(near top-hat)
LG-750	1.52	3.16 ± 0.5	1.15 ± 0.19	(near top-hat)
LG-770	1.52	2.9 ± 0.5	1.06 ± 0.18	(near top-hat)
		3.35 ± 0.7	1.22 ± 0.23	(Gaussian)
BK-7	1.51	2.41 ± 0.5	0.87 ± 0.16	(near top-hat)
KDP(e)	1.46	2.50 ± 0.5	0.88 ± 0.16	(near top-hat)
KDP(o)	1.49	2.78 ± 0.5	0.99 ± 0.19	(near top-hat)
		2.75 ± 0.5	0.98 ± 0.19	(Gaussian)
KD*P(o)	1.46	3.18 ± 0.6	1.11 ± 0.22	(near top-hat)
		3.20 ± 0.6	1.12 ± 0.22	(Gaussian)
KD*P(oe)	1.47	2.84 ± 0.5	1.00 ± 0.18	(near top-hat)
KBr	1.54	6.36 ± 1.4	2.35 ± 0.50	(Gaussian)
804 nm (FROG):				
Fused silica		2.48 ± 0.23	0.86 ± 0.08	
KDP(o)		2.93 ± 0.31	1.05 ± 0.11	
KDP(e)		2.75 ± 0.26	0.96 ± 0.09	
402 nm (FROG):				
Fused silica		3.25 ± 0.37	1.14 ± 0.13	
KDP(o)		4.07 ± 0.49	1.48 ± 0.18	
KDP(e)		4.09 ± 0.48	1.43 ± 0.17	
355 nm (Z-scan):				
Fused silica	1.47	2.74 ± 0.4	0.97 ± 0.15	(top-hat)
KDP(e)	1.49	5.00 ± 0.8	1.79 ± 0.30	(top-hat)
KDP(o)	1.53	5.90 ± 1	2.16 ± 0.35	(top-hat)
KD*P(o)	1.53	8.35 ± 1.5	3.06 ± 0.55	(top-hat)
KD*P(oe)	1.50	6.06 ± 1	2.18 ± 0.35	(top-hat)

ВРМБ

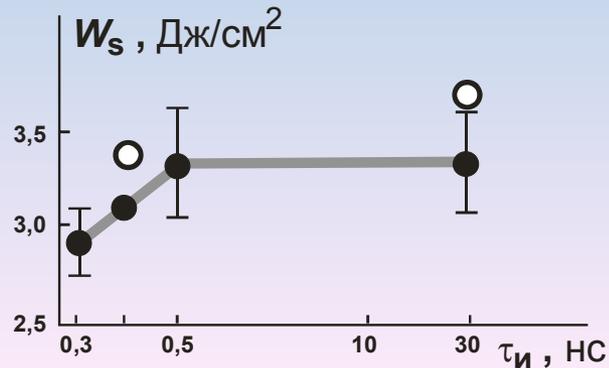


Стекло	Скорость звука, м/с	Стоксов сдвиг частоты, МГц	Погонный инкремент g , см/ГВт
ГЛС-22	4545	13670	1,5/1,2
ГДС-1			1,2/2,2
ГЛС-6	5070	14800	2

НАСЫЩЕНИЕ УСИЛЕНИЯ

$$W_{\text{ВЫХ}} = W_s \ln [1 + e^{\alpha L} (e^{W_{\text{ВХ}}/W_s} - 1)]$$

$$W_s = kh\nu/\sigma$$



○ — ОПС-3106

$$W_s = 2,91 + 0,45 \ln W_{\text{ВЫХ}}$$

● — ГЛС-22

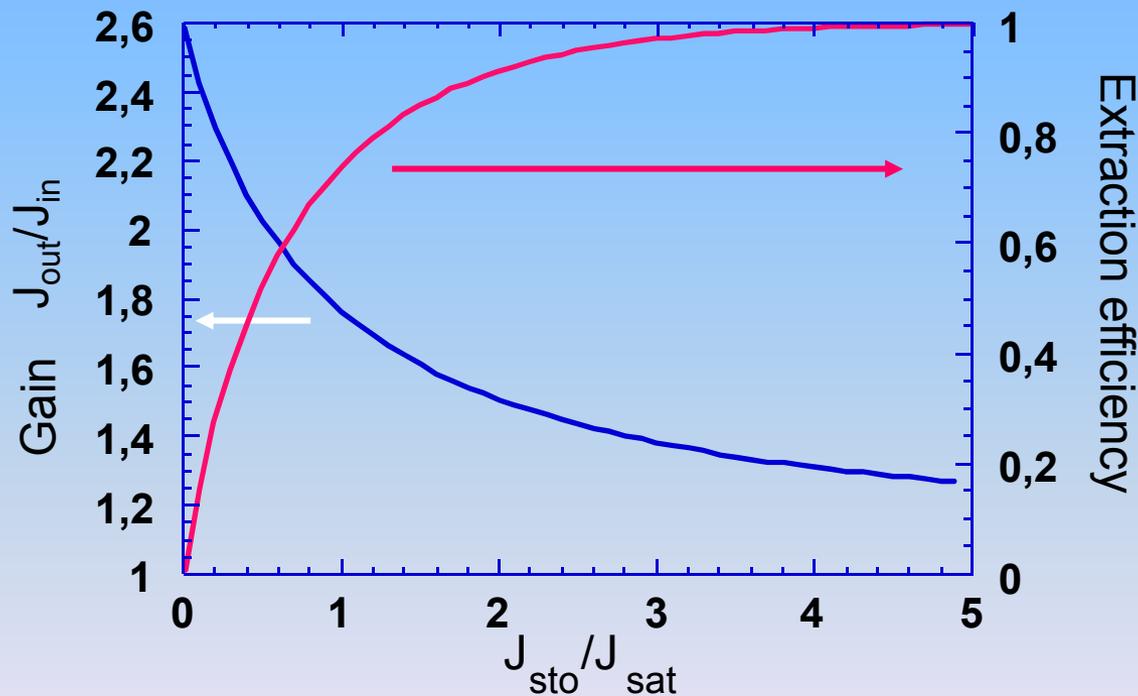
$$W_s = 3,27 + 0,425 \ln W_{\text{ВЫХ}}$$



Насыщение усиления

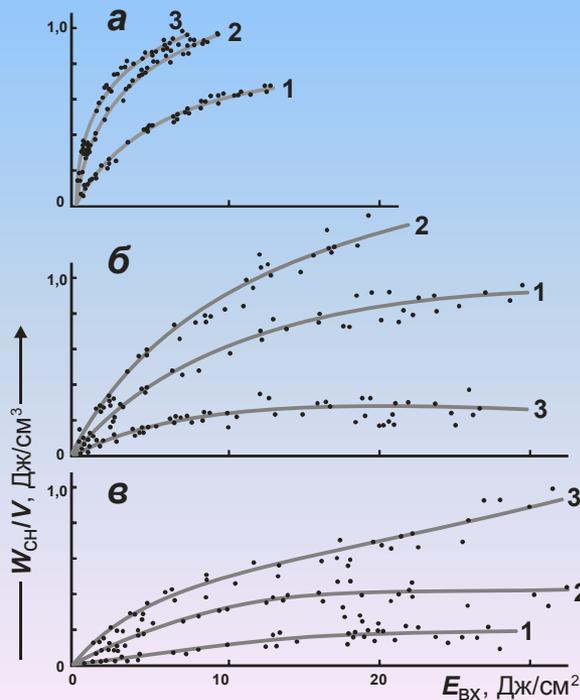
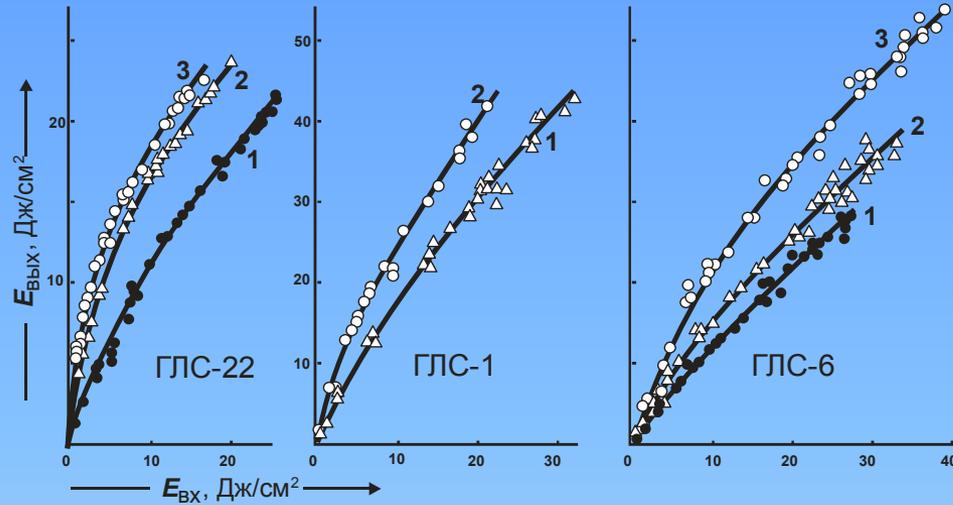
$$J_{out} = J_{sat} \log \left\{ G_0 \left[\exp \left(\frac{J_{sto}}{J_{sat}} \right) - 1 \right] + 1 \right\}$$

$$G_0 = \exp(g_0 L) = \exp \left(\frac{J_{sto}}{J_{sat}} \right)$$



Чем выше усиление тем меньше энергосъем

ЭНЕРГОСЪЕМ



ЭНЕРГОСЪЕМ

$$\eta = \frac{W_{ВЫХ} - W_{ВХ}}{W_{НАС} \cdot kl}$$

ГЛС-22 - $\eta \approx 95\%$

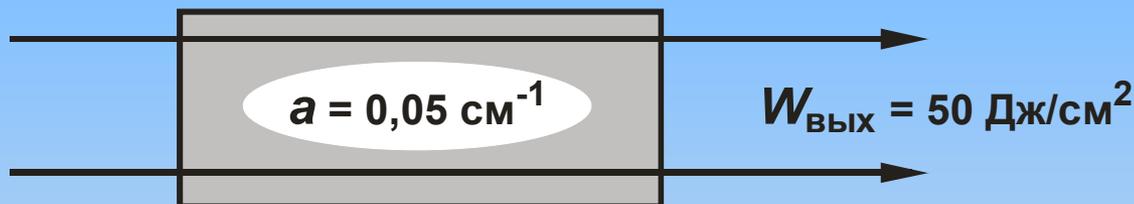
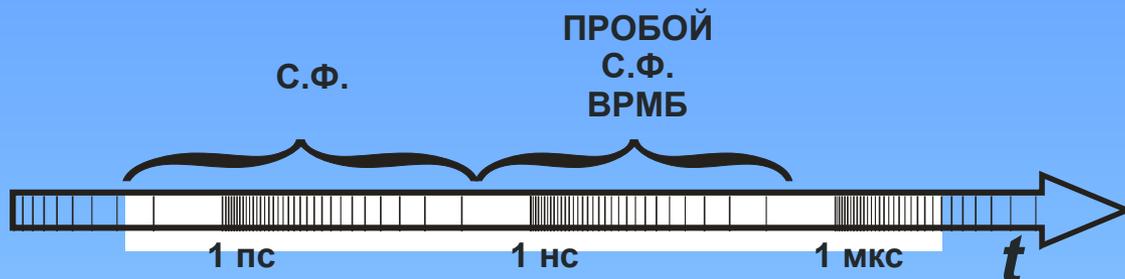
ГЛС-1 - $\eta \approx 60\%$



Laser Materials Examples

Laser Material	Absorption Wavelength	Average Emission λ	Band Width	Pulse Width
Nd:YAG	808 nm	1064 nm	0.45 nm	~ 6 ps
Nd:YLF	797 nm	1047 nm	1.3 nm	~ 3 ps
Nd:LSB	808 nm	1062 nm	4 nm	~ 1.6 ps
Nd:YVO ₄	808 nm	1064 nm	2 nm	~ 4.6 ps
Nd:fiber	804 nm	1053 nm	22-28 nm	~ 33 fs
Nd:glass	804 nm	1053 nm	22-28 nm	~ 60 fs
Yb:YAG	940, 968 nm	1030 nm	6 nm	~ 300 fs
Yb:glass	975 nm	1030 nm	30 nm	~ 90 fs
Ti:Al ₂ O ₃	480-540 nm	796 nm	200 nm	~ 5 fs
Cr ⁴⁺ :Mg ₂ SiO ₄ :	900-1100 nm	1260 nm	200 nm	~ 14 fs
Cr ⁴⁺ :YAG	900-1100 nm	1430 nm	180 nm	~ 19 fs

ПОРОГИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ



Стекло	Длина, см	Интеграл распада	Инкремент ВРМБ	Эффективность энерго-съемы, %	Плотность входной энергии, Дж/см ²	Контраст входного импульса
ГЛС-22	200	1,51	45,3	74,4	3,51	8000
ОПС-1242	247	1,28	61,6	75,3	2,93	80000
ГЛС-1	120	0,82	88,5	70,2	6,08	140
ГЛС-6	67	0,247	23	62,2	11,1	13,5

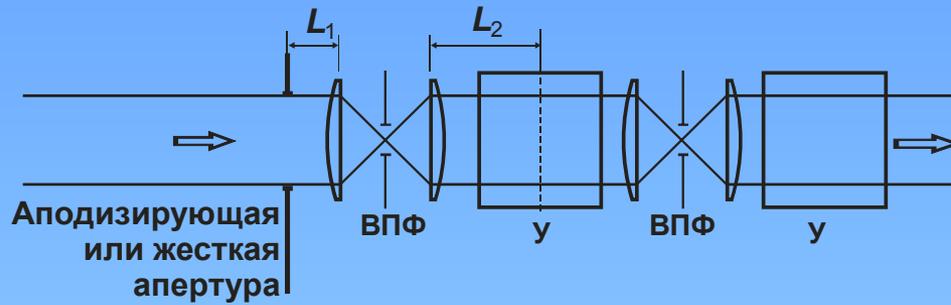


Output Power & Intensity Limitations

- Damage of final optical elements
(Fluence $W(\text{J}/\text{cm}^2) < (1 \dots 10)(t_p(\text{ns}))^{0.5}$)
- Self-focusing
(Breakup integral $B < 1 \dots 3$)
- Gain saturation
($W_{\text{sat}} = 1 \dots 10 \text{ J}/\text{cm}^2$)

Методы подавления нелинейных эффектов

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ



$$F = \frac{2\pi \int_0^a r I(r) dr}{I_{\max} \pi a^2} \rightarrow \max$$

$$L_{\text{eff}} = L_1 - \frac{F_2}{F_1} (F_1 + F_2) + \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2 L_2 \quad L \leq \frac{an}{\lambda} \left(\frac{P_{\text{ср}}}{I}\right)^{0,5}$$

ЖЕСТКАЯ
АПЕРТУРА

АПОДИЗИРУЮЩАЯ
АПЕРТУРА

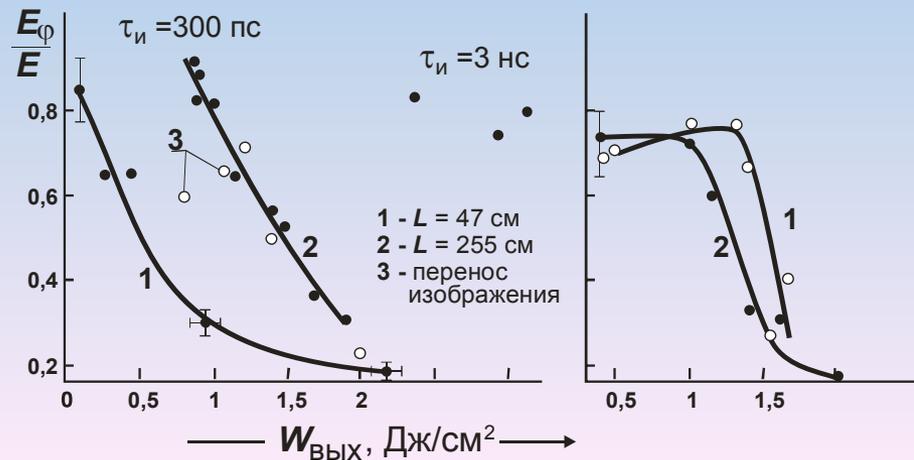
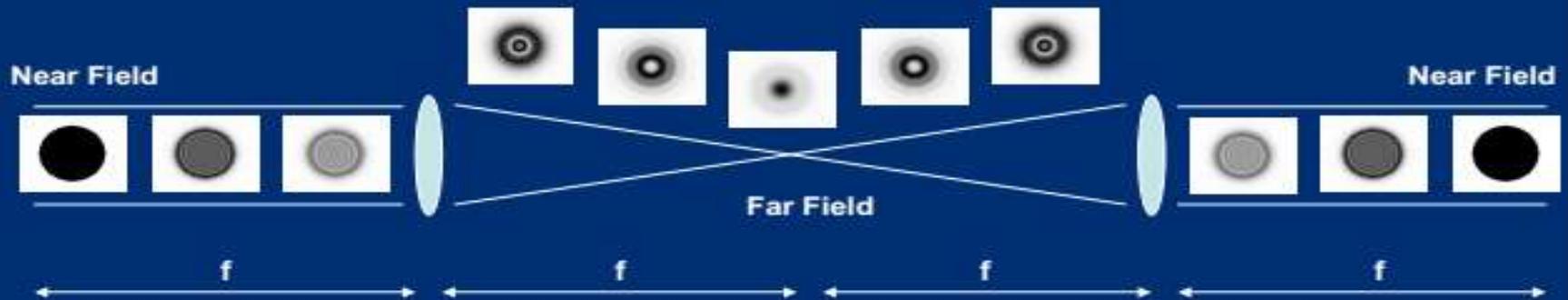


Image Relay Beam Transport



WITHOUT IMAGE RELAY

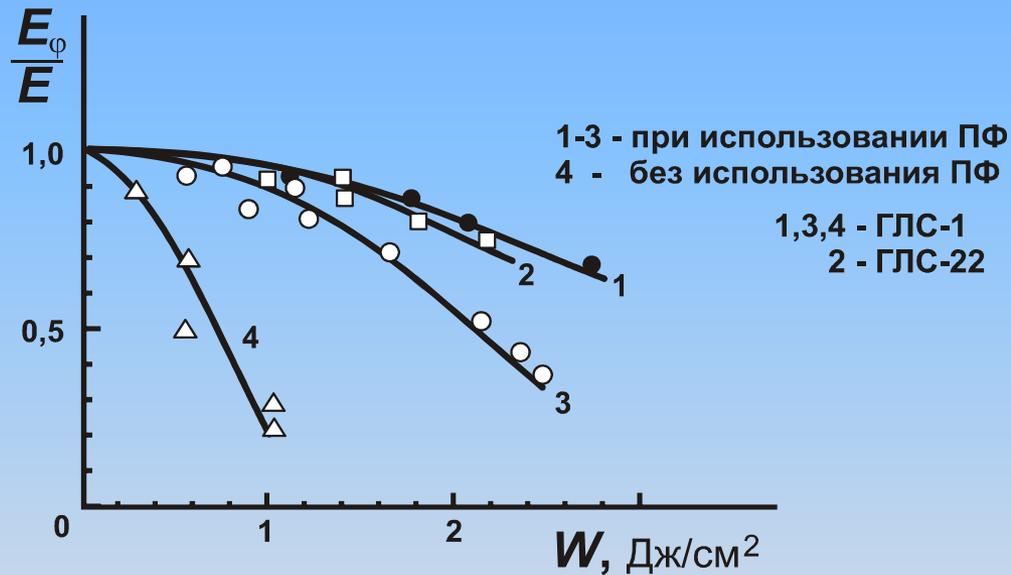
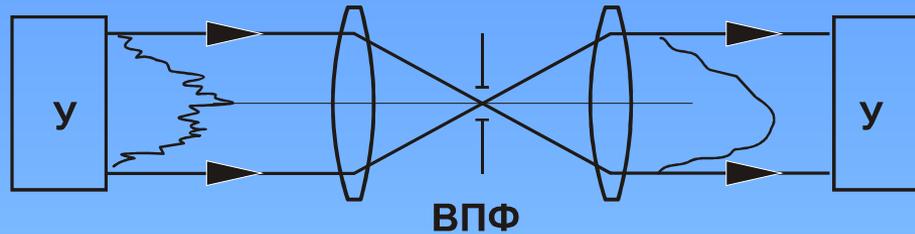


WITH IMAGE RELAY



Ensures that when sending the beam over long distances
the modulation is small
It is possible however that it is still not enough !
Need Spatial Filtering

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ



УСЛОВИЯ ПОДАВЛЕНИЯ М.М.С.:

$$B_{\max} = \frac{8\pi^2 n_2 l}{\lambda c n} \int_0^L I(z) dz < 2 \dots 4$$

$$\theta_{SF} < \theta_{\max} = \frac{\kappa_{\perp \max}}{k} = \left(\frac{8\pi n_2 l}{c n_0^2} \right)^{1/2}$$



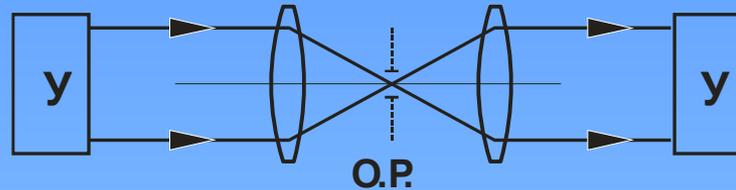
Проблемы пространственной фильтрации

- Перекрытие диафрагмы плазмой: выбор материала и формы диафрагмы, увеличение диаметра диафрагмы при использовании фазовых эффектов
- Большие габариты (1...20 м): использование асферической оптики
- Необходимость глубокого вакуумирования

ФАЗОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

Нарастание

Затухание



Условия подавления М.М.С.

$$B \leq \pi/2$$

$$L = F_1 + F_2 = (L/n) G(M, \alpha)$$

С.Н.Власов, В.Е.Яшин.
КЭ, 8, 510 (1981)

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Инкремент нарастания М.М.С.

зависит от состояния поляризации:

$$B = \frac{\kappa}{2k} \left(\kappa^2 - \frac{2\pi n_2 k^2}{cn^2} f(h) I \right)^{1/2}$$

$$f(h) = \frac{2}{3} \frac{(1+h^2) + \sqrt{(1-h^2)^2 + 16h^2}}{1+h^2}$$

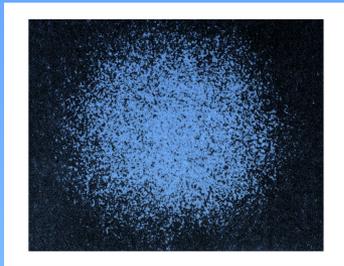
$$h = E_- / E_+$$

$$B_{\text{лин}} / B_{\text{круг}} \approx \sqrt{2}$$

С.Н. Власов, В.И. Крыжановский
В.Е.Яшин КЭ, 9, 14 (1982)



ПОДАВЛЕНИЕ ММС В НЕОДНОРОДНЫХ ПУЧКАХ

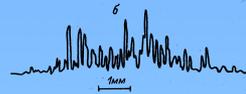


Условия подавления ММС

$$P_{\rho} < P_{\text{кр}}$$

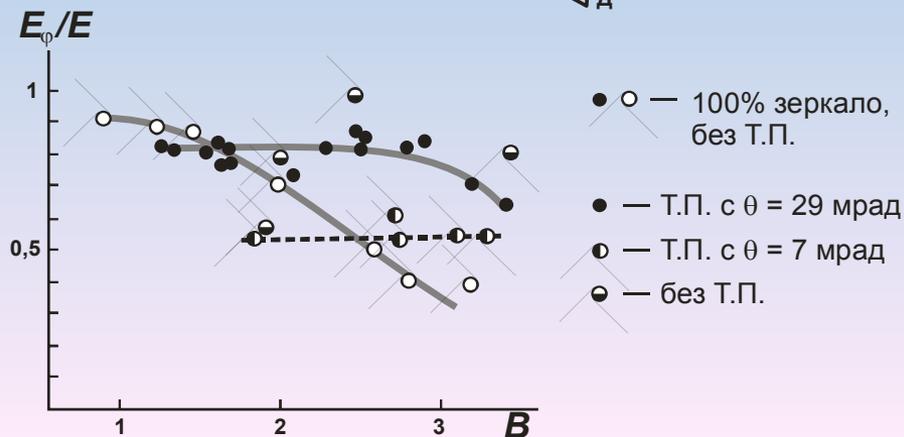
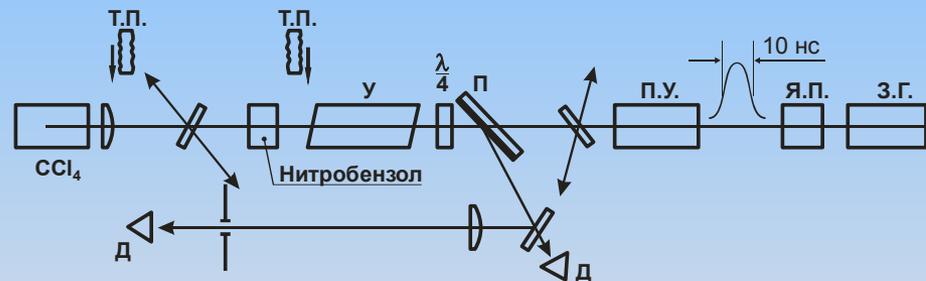
или

$$\rho < (\pi P_{\text{кр}} / 2I)^{1/2}$$

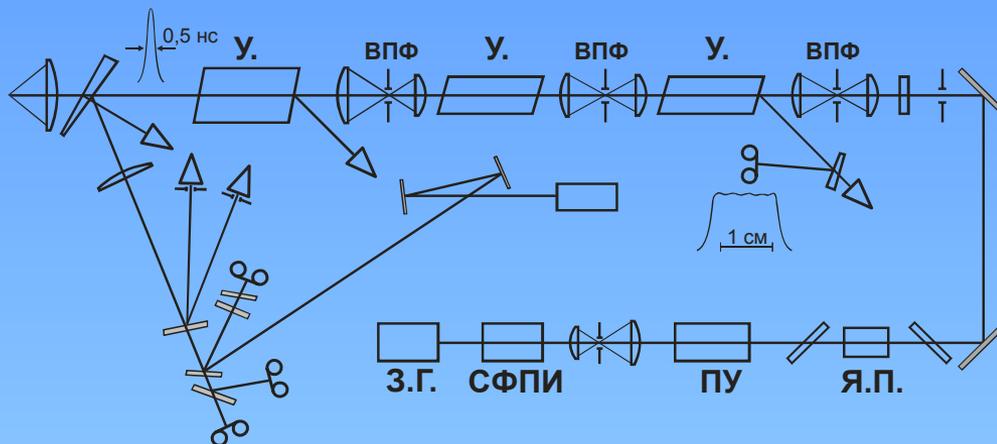


$\theta = \lambda / \rho$, рад	0,007	0,016	0,029	0,04
$W_{\text{пор}}$, Дж/см ²	1,5	2,5	3,4	>4

Восстановление однородности при ОВФ



МОЩНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА

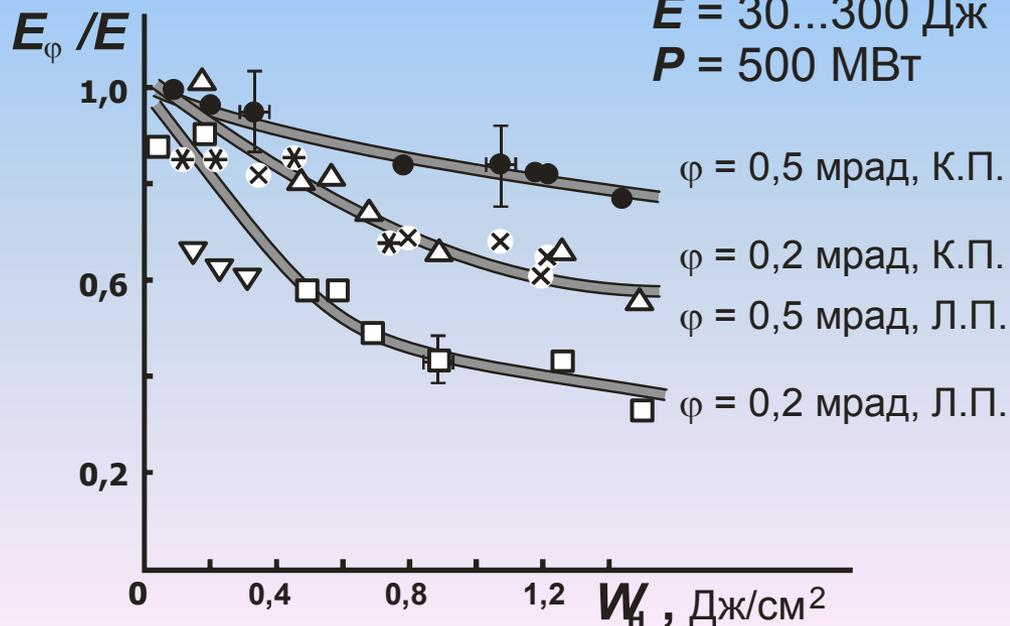


Параметры

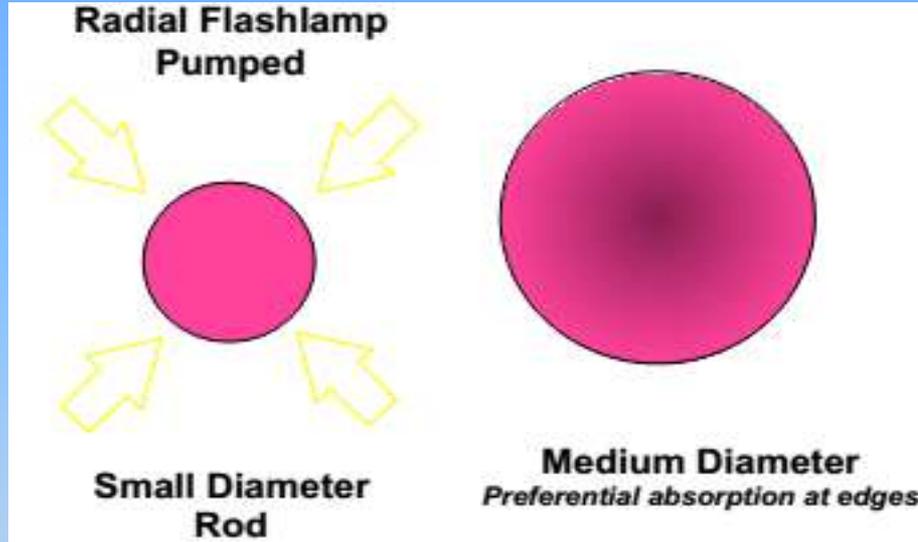
$t = 0,3 \dots 10$ нс

$E = 30 \dots 300$ Дж

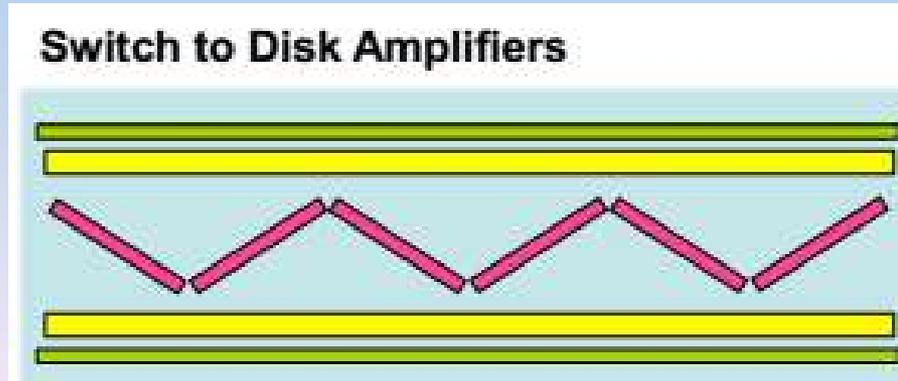
$P = 500$ МВт



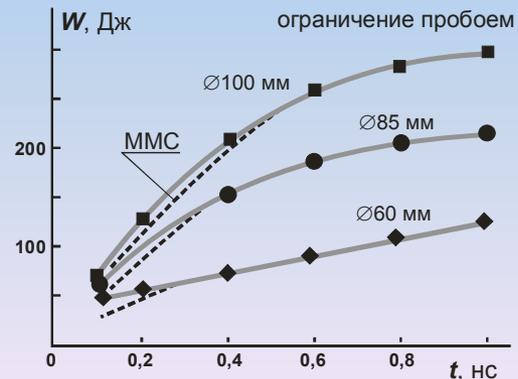
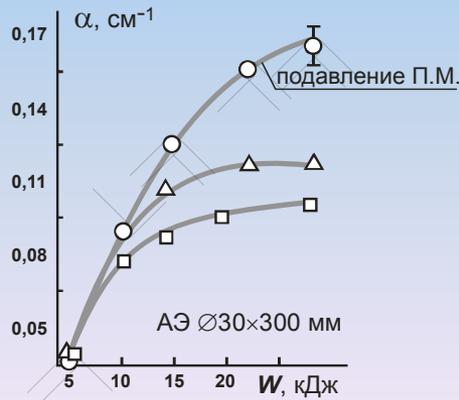
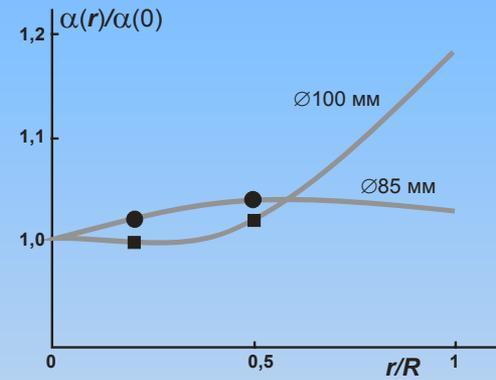
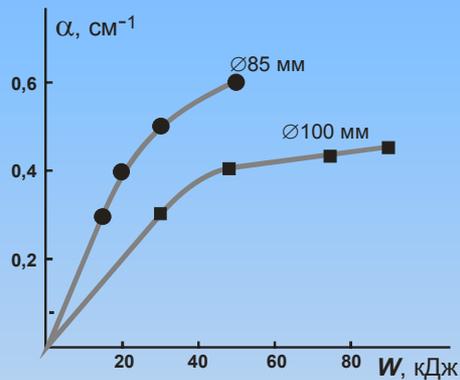
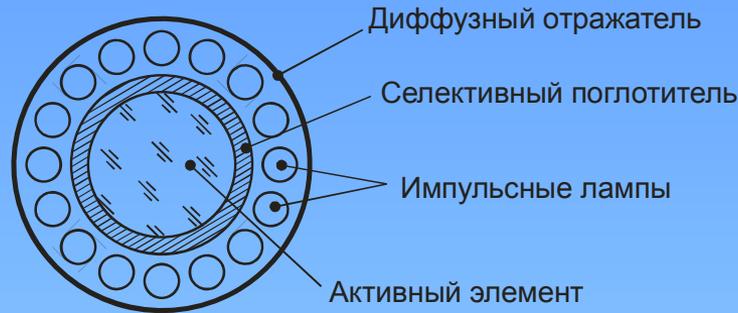
Усилители большой апертуры



Какой размер оптимален ?



ЛАЗЕРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ БОЛЬШОЙ АПЕРТУРЫ



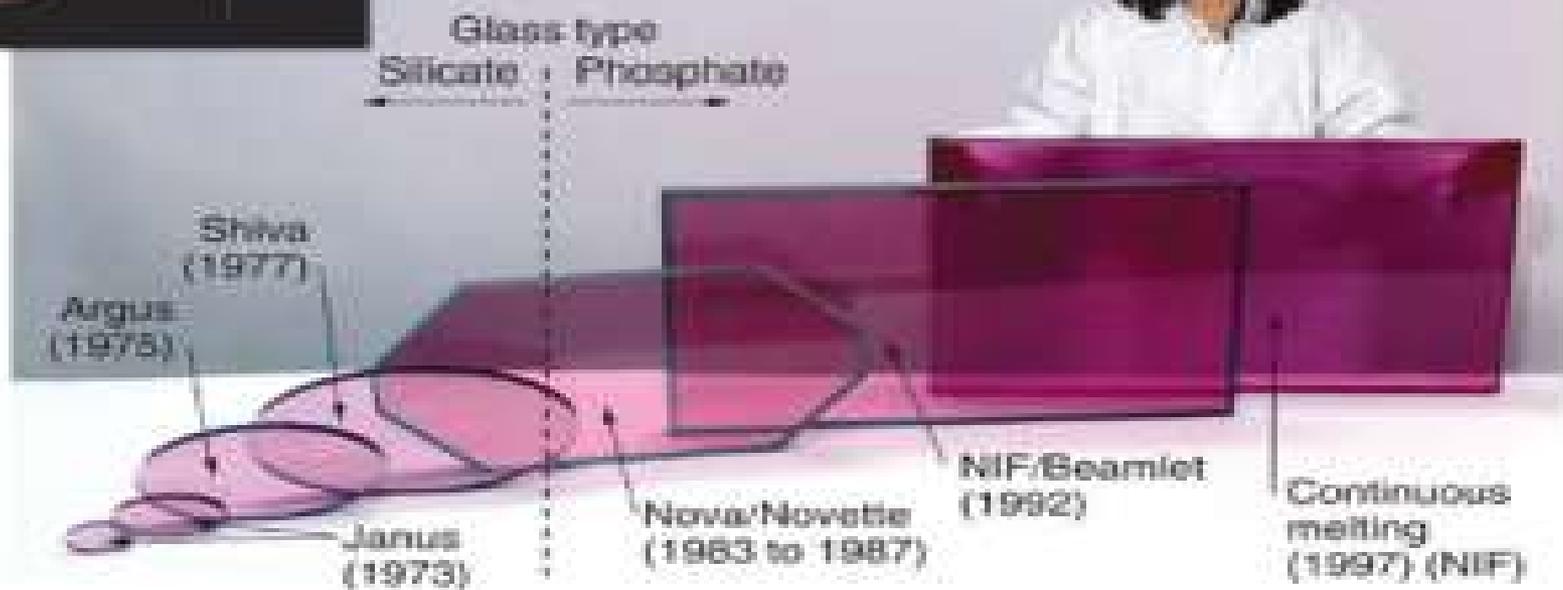
$$\alpha (\text{см}^{-1}) = 0,21D^{-0,57} \text{ для } D = 1,5 \dots 14 \text{ см}$$

Усилители большой апертуры

Стержневой усилитель $D=150$ мм
($E_{\text{зап}}=500$ Дж) внедрен в лазер накачки
ПВТ установки PEARL

А.А. Шайкин и др. КЭ, 44, 426 (2014)

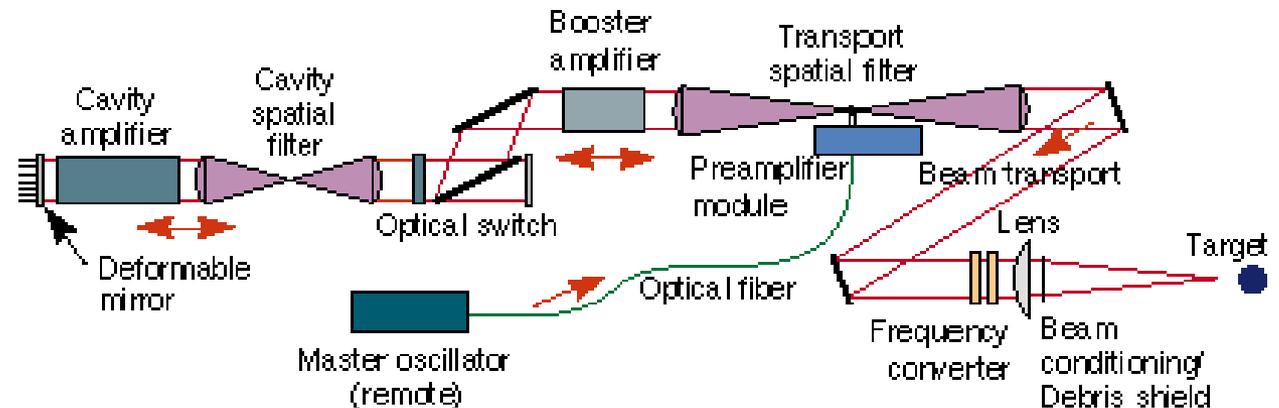
АЭ для дисковых усилителей



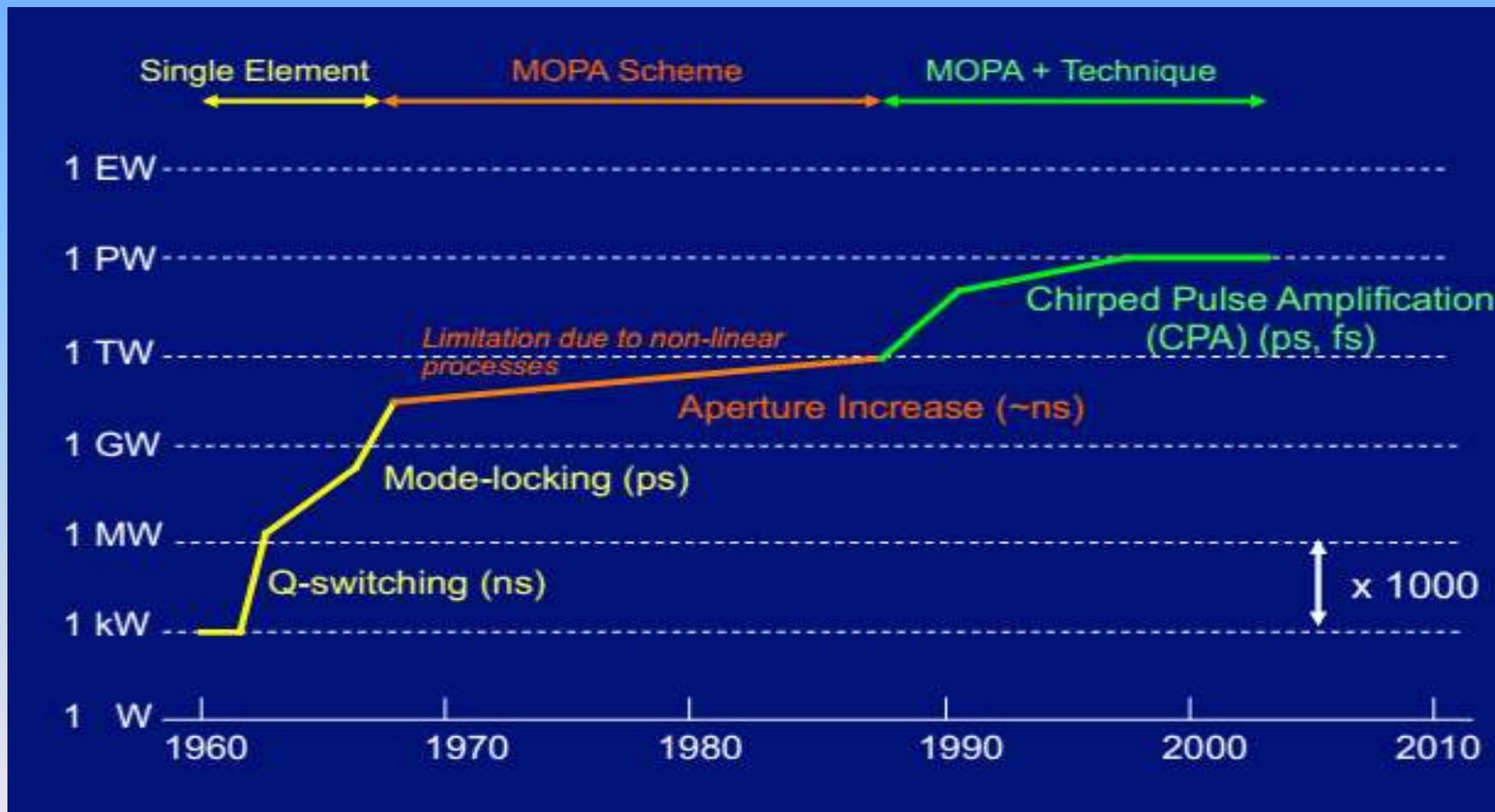
Even Higher Intensities!

National Ignition Facility (NIF)

- 192 shaped pulses
- 10.4 kJ per beam in UV
- 21 kJ per beam in IR
- >1.8 MJ total energy
- Profiled pulses 0.2 to 25 ns in length

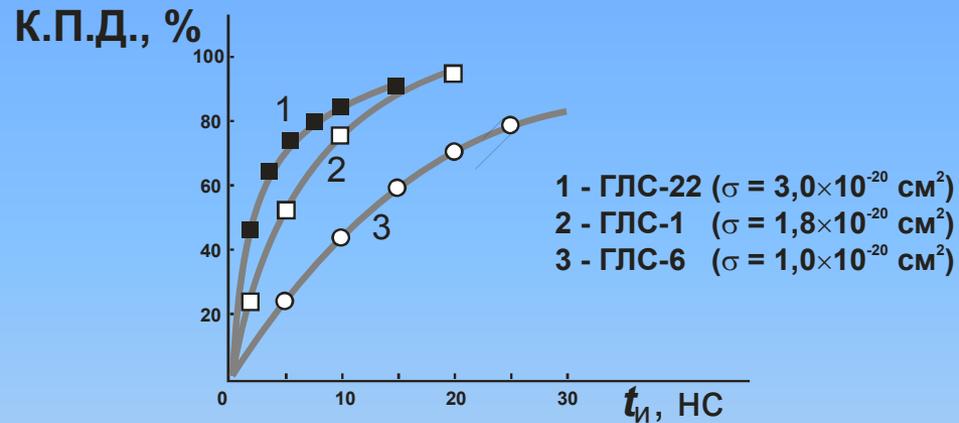


Ограничения мощности

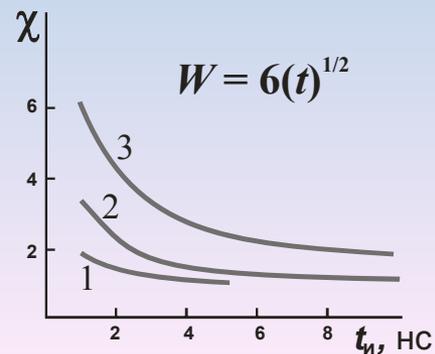
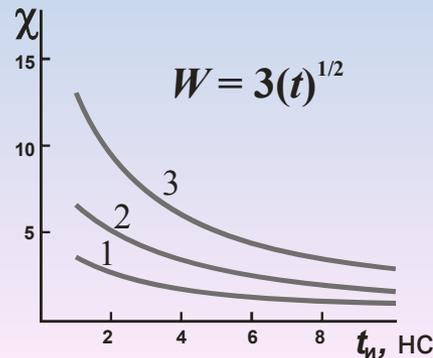


ЛАЗЕРЫ С КОМПРЕССИЕЙ ИМПУЛЬСОВ

Основные ограничения систем прямого усиления:
пробой, М.М.С. - низкий энергоъем,
большая апертура



Выигрыш в эффективности



МАСШТАБИРОВАНИЕ ВРМБ-КОМПРЕССОРОВ

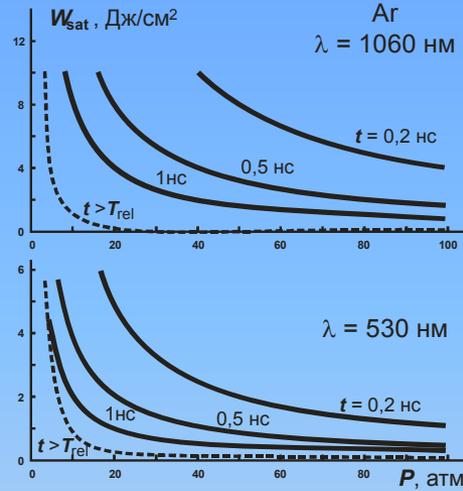
Условие эффективного энергосъема: $W > W_{\text{sat}}$

$$W_{\text{sat}} = \frac{\omega_s}{\omega_p} \frac{n_p + n_s}{gc}$$

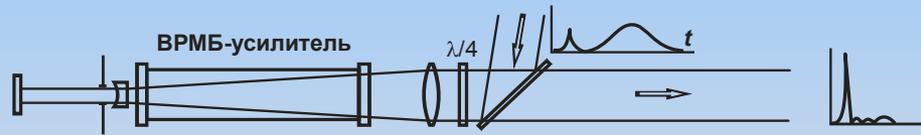
для $t_s > T_r$

$$W_{\text{sat}} = \frac{\omega_s}{\omega_p} \frac{n_p + n_s}{gc}$$

для $t_s < T_r$

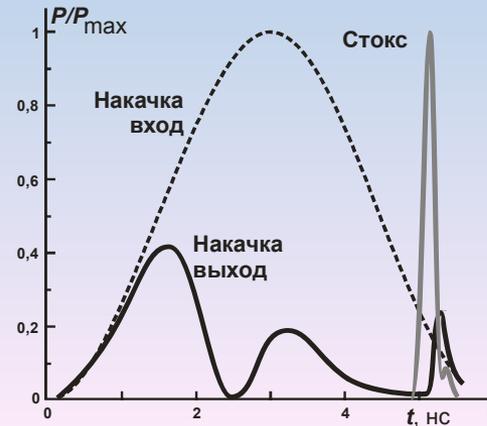


Двухимпульсная схема

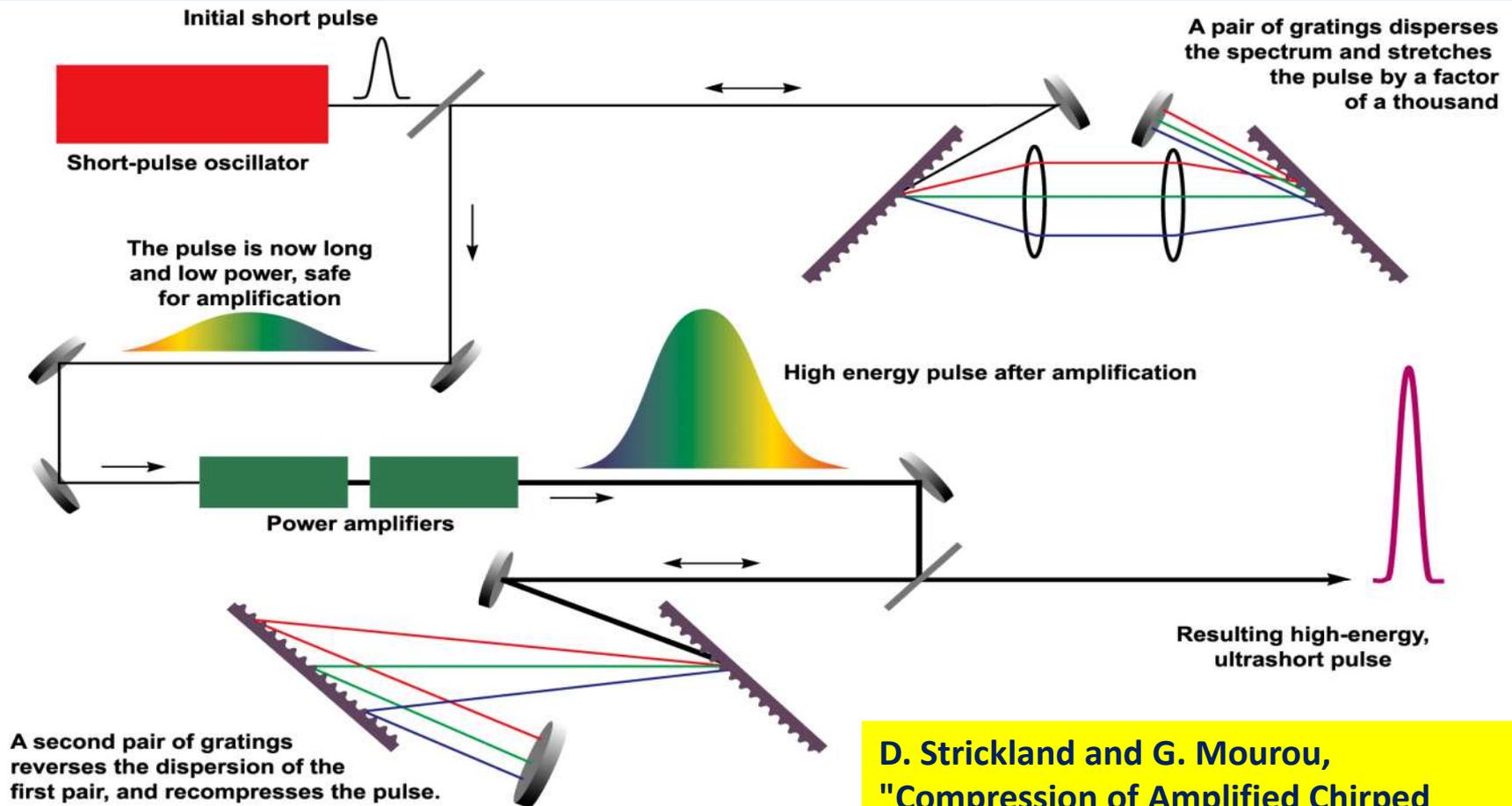


Сфера или цилиндр

$E = 0,01-10$ Дж



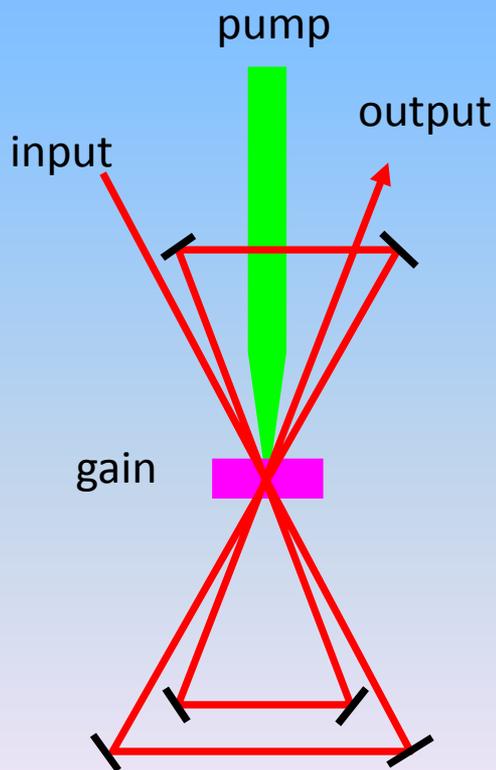
Chirped Pulse Amplification



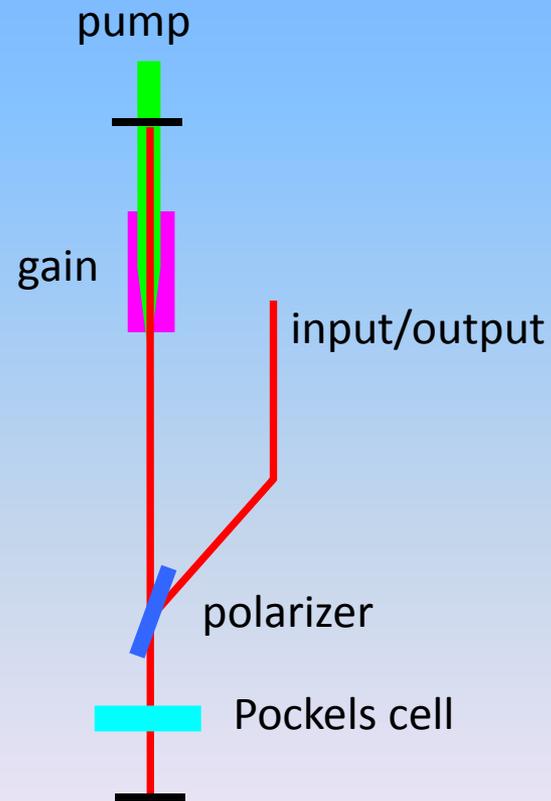
D. Strickland and G. Mourou,
"Compression of Amplified Chirped
Optical Pulses," *Optics Comm.* 56, 219
(1985).

High gain amplifiers

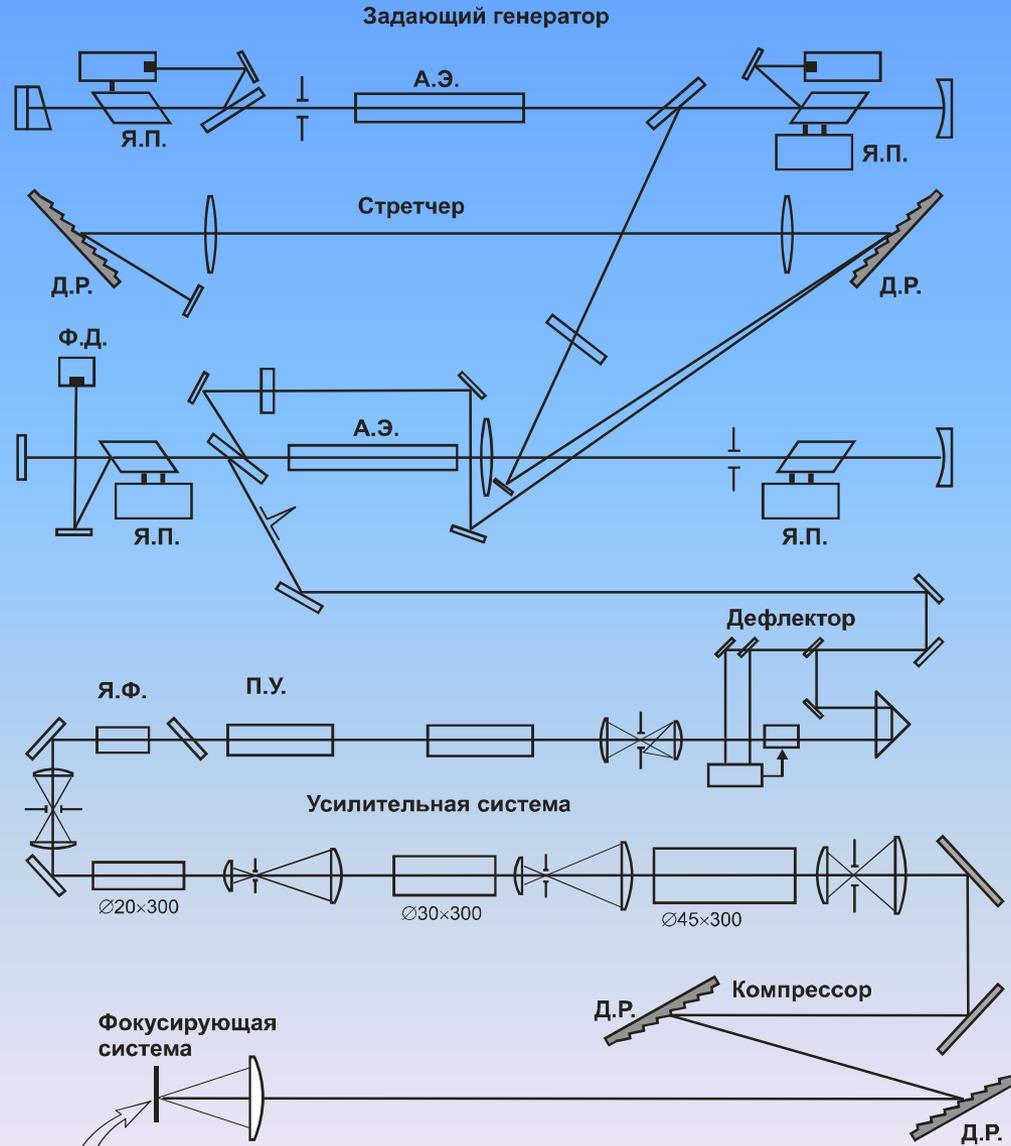
Multi-pass



Regenerative



ТВТ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА



$I_{\max} = 1000 \text{ ПВт/кв.см}$ $P = 5 \text{ ТВТ}$, $t = 1,2 \text{ пс}$



Approaches & Limitations

- Direct Laser CPA

Limited bandwidth (Nd:glass, Yb:glass)

Low damage threshold of diffraction gratings

- Parametrical CPA

Pump – signal temporal synchronization

Low damage threshold of diffraction gratings

- Additional compression

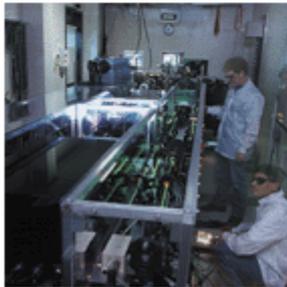
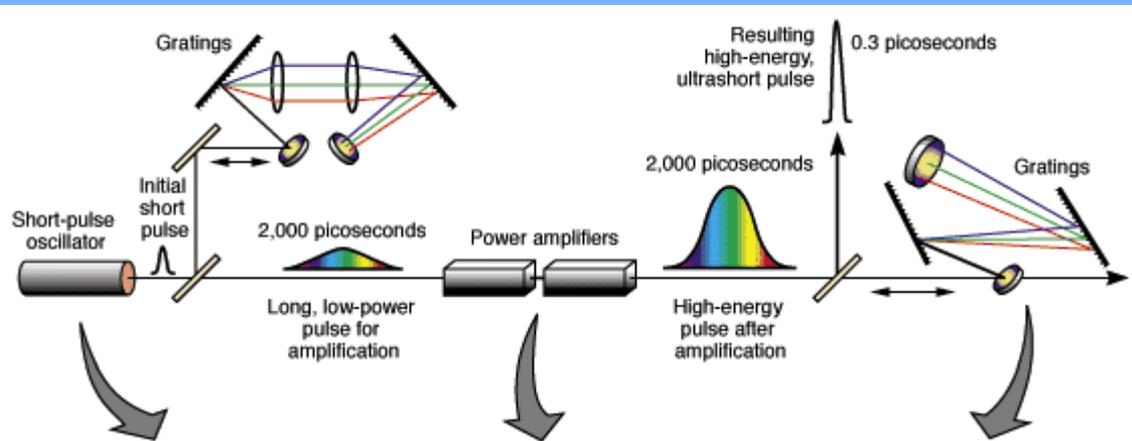
Temporal shape of compressed pulses

Low damage threshold of diffraction gratings

- SRS or SBS amplification in plasma

Efficiency

Direct Laser CPA (LLNL PW, 1996)

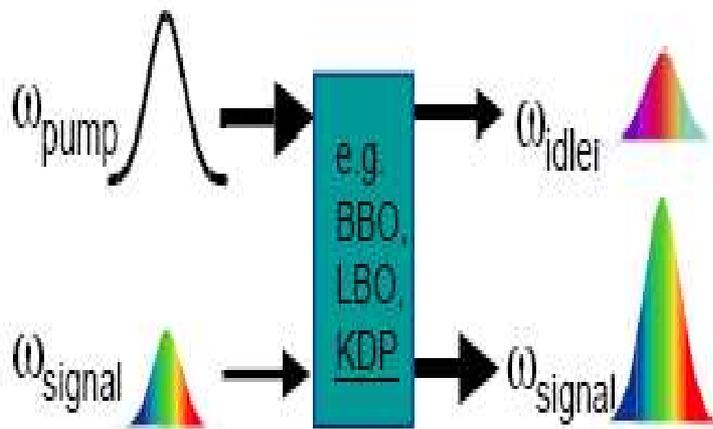


The chirped-pulse amplification technique makes it possible for the Petawatt laser's high-power pulses to pass through laser optics without damaging them. Before amplification, low-energy laser pulses are passed through diffraction gratings to stretch their duration by as much as 25,000 times. After amplification, the pulses are recompressed back to near their original duration. Because the pulses pass through the laser optics when they are long, they cause no damage.

D.M. Pennington et al. Proc. SPIE, 3047, 490 (1997)

Optical Parametric CPA (OPCPA)

OPA + CPA



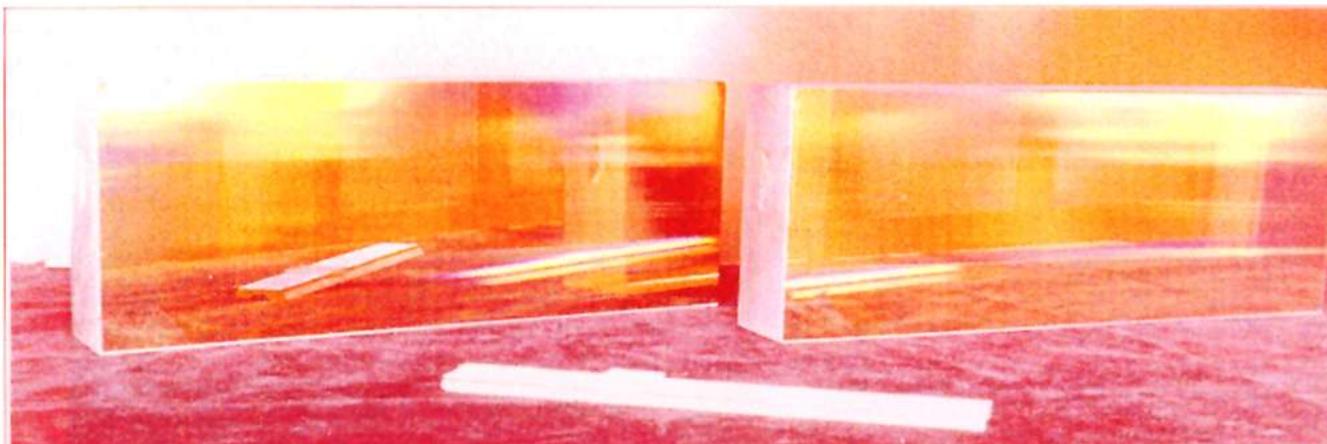
- very large bandwidth
($\Delta\nu \cong 100 \text{ THz} \Rightarrow \tau \cong \underline{10 \text{ fs}}$)
- λ_{pump} and λ_{signal} independent
- no energy deposition in the OPA medium
- high quality of the output beam
- KDP: large size, no problem with damage

Петаваттные лазерные системы

Активная среда	Nd:glass	Ti:sapphire	OPCPA/DKDP
Накачка	Flashlamps LD	2 ω , Nd:glass	2 ω , Nd:glass
Длительность нак-ки, нс	100000	<30	<1
Макс. Апертура, см	40x40	10	40x40
Плотность энергии насыщения, Дж/см ²	3...20	1	-----
Лучевая стойкость	Высокая	Высокая	Высокая
Мин. длительность импульса, фс	200...500	20	20
Мах. достигнутая пик. мощность, ПВт	1,3 LLNL, 1996	0,85 JAEA, 2004	0,56 IAP, 2006
Эффективность (1 ω Nd в Fs)%	85	15	10

ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ МУЛЬТИТЕРАВАТТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

METALLIC DIFFRACTION GRATINGS



TYPE	N, mm ⁻¹	METAL	MAX. SIZE, mm	W _{th} , mJ/cm ² (1ns/1 ps)
RULED	1740	Au	170x170	360/240
HOLOGRAPHIC	1700	Au	210x420	320/100
HOLOGRAPHIC	1700	Overcoated Au	210x420	560/300

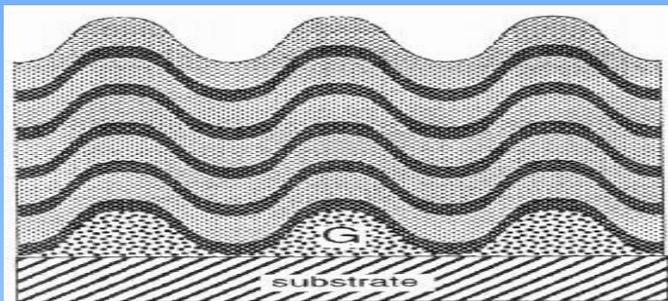
Improvements of Diffraction Gratings

- Improvements of Au technology deposition and overcoating of metal by dielectrics increase damage threshold by a factors 2...10
- Higher damage thresholds of dielectric materials (5...10 times more compared with Au) offer potential for multi-kilojoule EW-level pulse generation

Методы повышения порогов оптического разрушения решеток

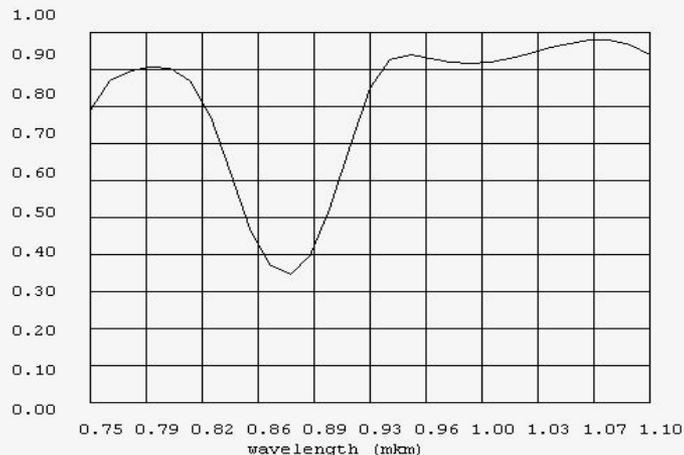
- Объемные решетки (самофокусировка?)
- Упрочнение слоя металла.
- Защитное многослойное диэлектрическое покрытие.
- Дифракционные решетки на диэлектрическом зеркале.

Дифракционные решетки с многослойным диэлектрическим покрытием



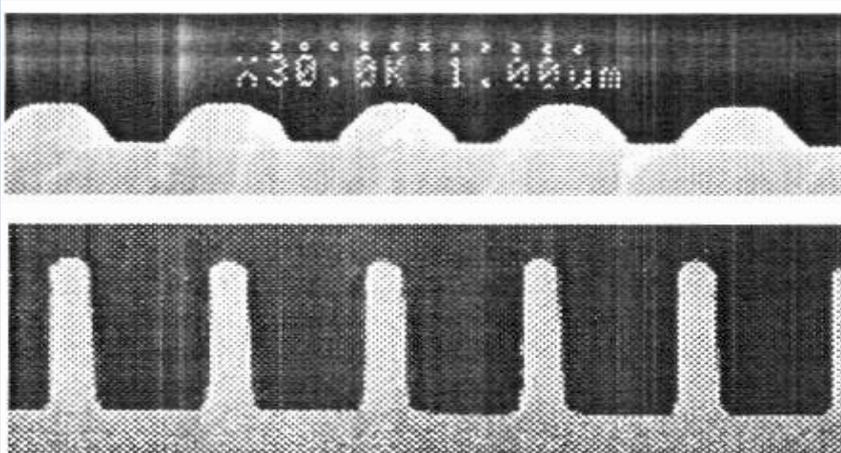
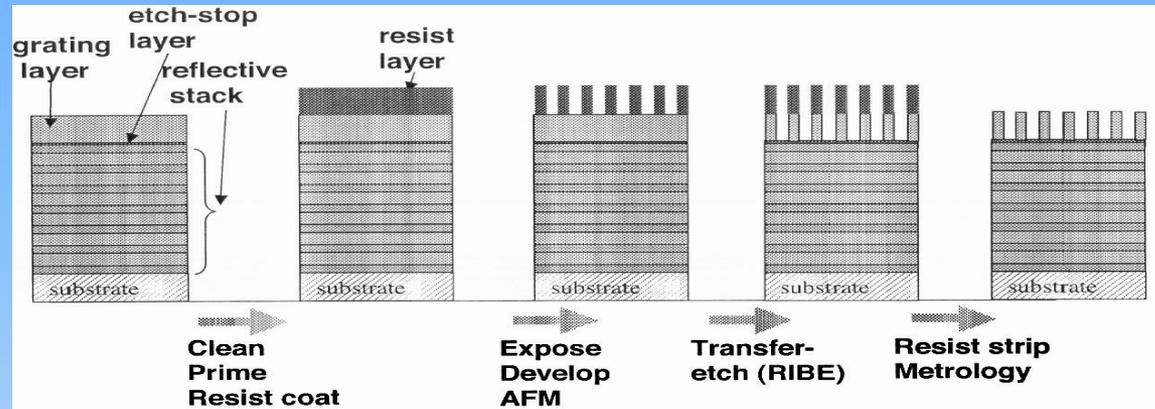
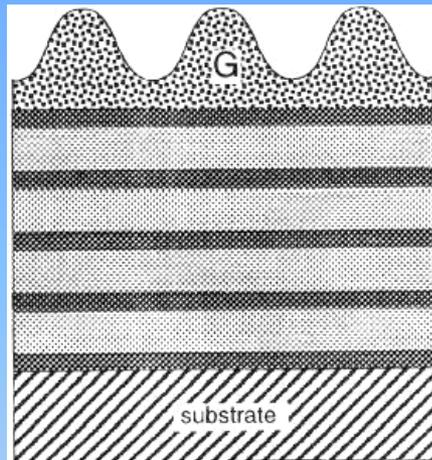
Diffraction efficiency of a multicoated grating as a function of the wavelength.

Au grating with 1750 lines/mm, H/D= 0.35, coatings pair number 2
 n1= 1.95, thicnes=0.140 mkm
 n2= 1.45, thicnes=0.200 mkm



	Дифракционная эффективность для $\lambda=1.05$ мкм	Лучевая стойкость по сравнению с мет. реш.
Au	95%	1
Au+2 пары диэл. слоев (расчет/измерение)	98%	2.2
	94%	2
Au+4 пары диэл. слоев (расчет)	74%	3

Дифракционные решетки на диэлектрическом зеркале



- Технология изготовления – травление ионным пучком.
- Максимальная апертура решетки – 30 см (ГОИ).
- Лучевая стойкость 6.6 Дж/см^2 для импульса длительностью 10 пс (по данным Barty, 2004г)

Additional Pulse Compression

- New postpulse compression techniques is necessary to overcome the issue posed by limited bandwidth gain amplifier materials.
- High energy systems are presently limited to about 300 fs (Nd:glass).
- The post compression could be done by using system in free propagation mode using nonlinear effects or plasma compression.

Self-Phase Modulation & Pulse Compression

Refractive index depends on optical intensity as (Kerr effect)

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2 I(t)$$

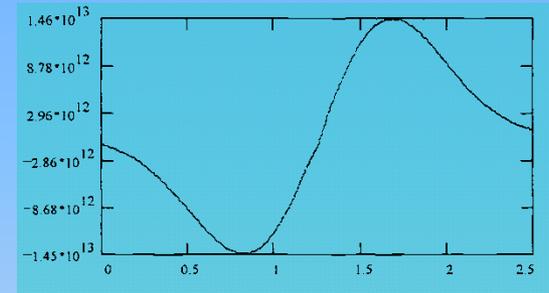
Intensity dependence leads to nonlinear phase shift

$$\phi_{NL}(t) = (2\pi/\lambda)n_2 I(t)L$$

An optical field modifies its own phase (SPM).

Phase shift varies with time for pulses.

Each optical pulse becomes chirped.



As a pulse propagates along the nonlinear media, its spectrum changes because of SPM:

$$\Delta\omega = \omega n_2 LI / c\tau$$

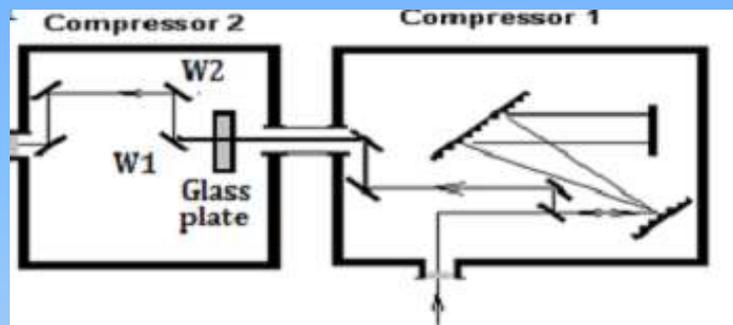
Pulse compression through SPM was suggested by 1969: R. A. Fisher and P. L. Kelley, APL 24, 140 (1969)

Pulse compression in gas-filled lightguide in Nisoli M., Silvestri S. De, Svelto O., Szipocs R., Ferencz K., Spielmann Ch., Sartania S., Krausz F. // Opt. Lett.. — 1997. — Vol. 22. — P. 522.

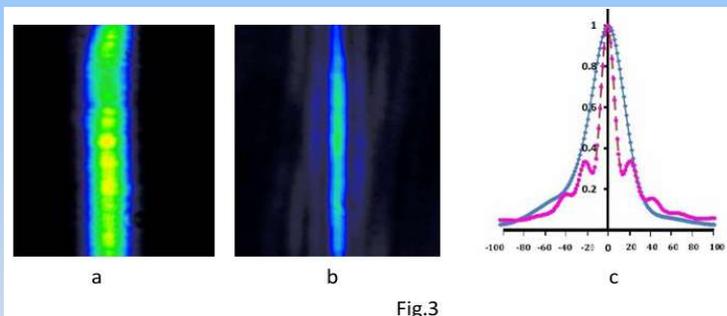
Power and Energy Limitations in Fibers

	d, μm	E, μJ	P, MW
Single mode fused silica fibers	10	1	1
Microstructured fibers	100	100	100
Gas filled hollow fibers	100	100	100

Уширение спектра в объемной среде и сжатие импульсов



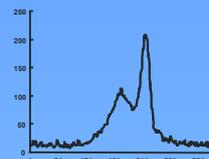
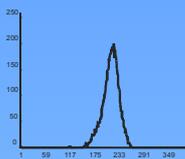
Степень сжатия при уширении спектра в одном нелинейном элементе порядка 2 из-за ограничения интеграла распада ММС



V. Chvykov, C. Radier, G. Chériaux, G. Kalinchenko, V. Yanovsky, G. Mourou.
CLEO-2010, paper JThG4

С. Ю. Миронов, В. В. Ложкарев, Е. А. Хазанов, Ж. Муру
Квантовая Электроника, 43, 711 (2013).

СПЕКТРАЛЬНОЕ УШИРЕНИЕ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ



Спектральное уширение $\Delta\omega = -\frac{\partial B}{\partial t}$

Общий интеграл распада $B_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N B_i \gg 3$

Условия для большой величины
спектрального уширения:

1. Подавление М.М.С. $B_1 < B_{\text{max}} \approx 2 \div 3$
2. Высокий коэффициент заполнения

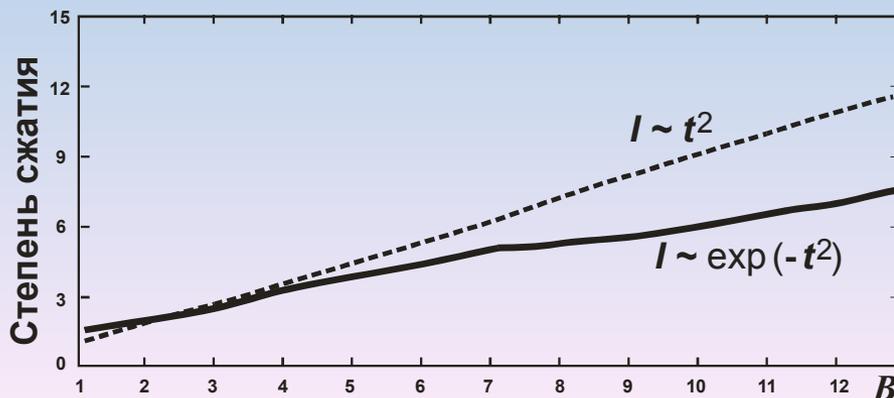
Основные ограничения:

Оптический пробой: $I = 1-10$ ГВт/см²
ВКР: $B < 70-100$

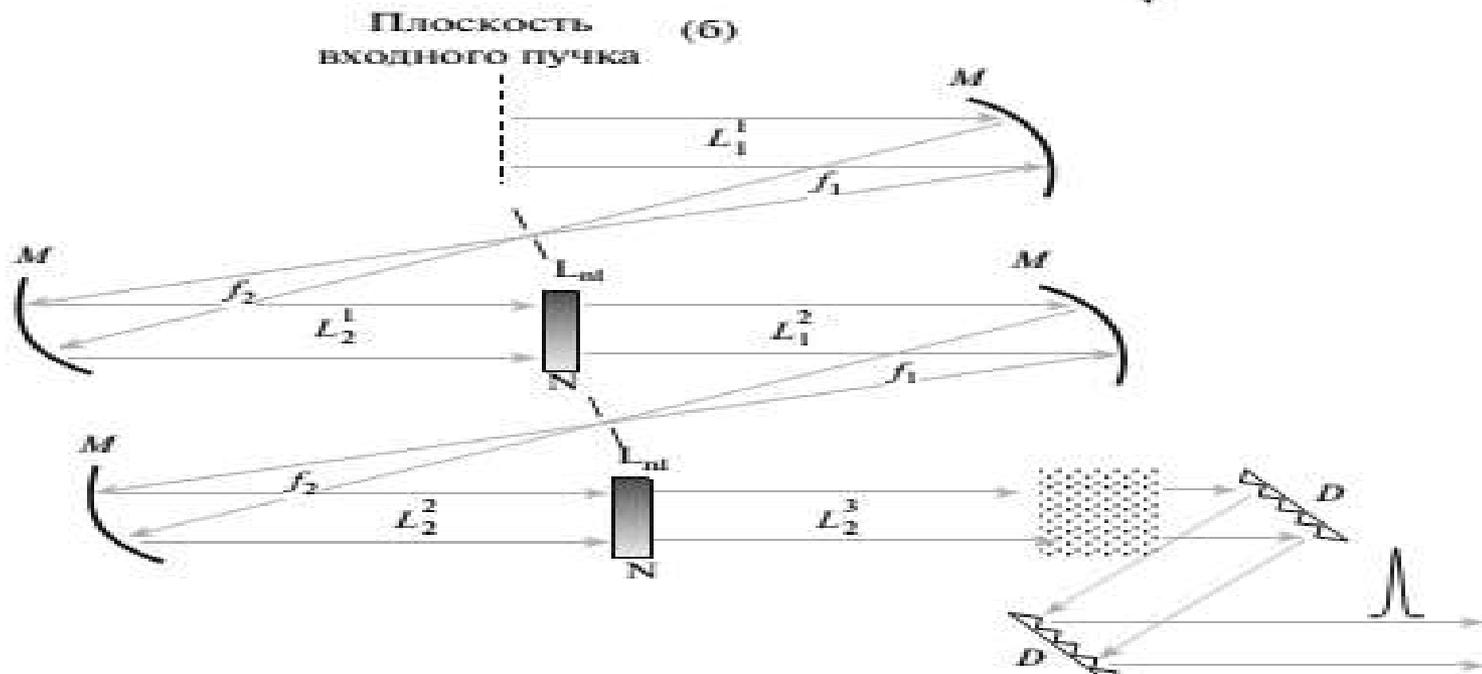
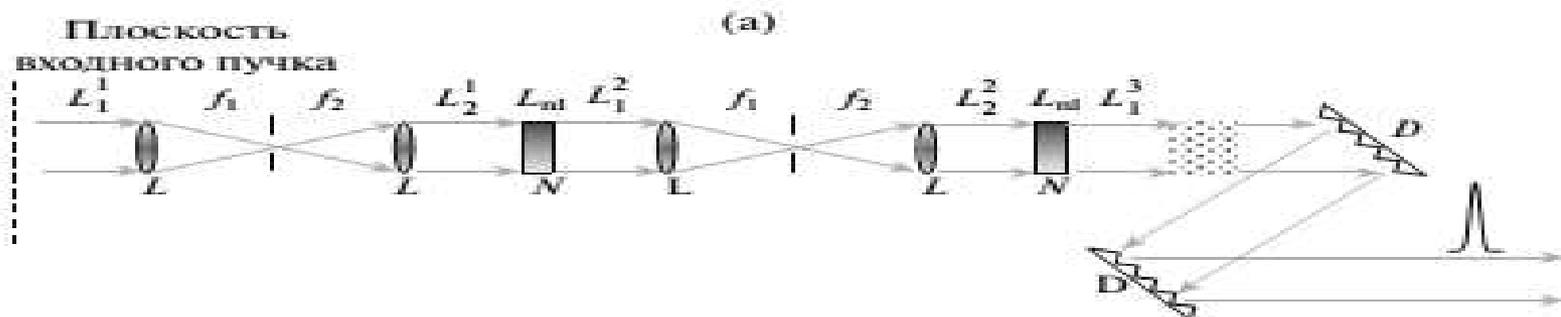
А.А.Мак, В.Е.Яшин. Оптика и спектроскопия, 1991, т.70, в.1 с.3-5

Н.В.Высотина, Н.Н. Розанов, В.Е.Яшин Оптика и спектроскопия, 2011, Т.110, 36, с.1117-1122.

С.Н.Власов, Е.В. Копосова, В.Е.Яшин Квантовая электроника, 2012, Т.42, №11, с.989-995.



Линзовые и зеркальные системы



Пучки и импульсы

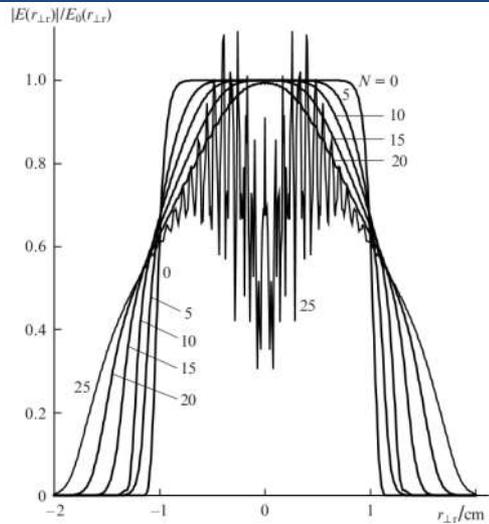


Figure 4. Cross sections of the field after passing through a different number of stages N .

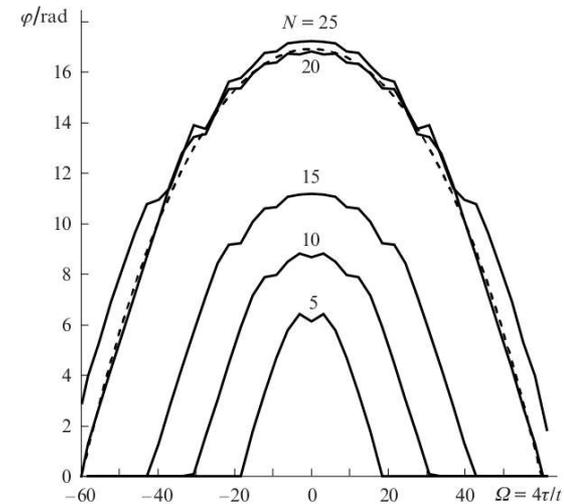


Figure 5. Phase φ of the pulse spectrum for different number of stages N . Dashed curve is approximation for $N = 20$.

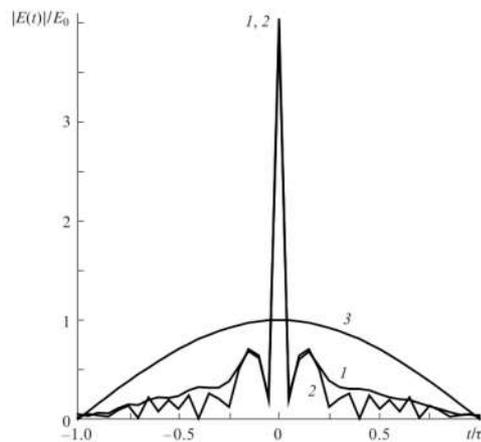


Figure 6. Structure of the pulse after compression at the 22nd (optimal) cascade: minus the total phase of the spectrum (1) and the phase, approximated by a polynomial of the fifth degree (2). Curve (3) is the initial pulse.

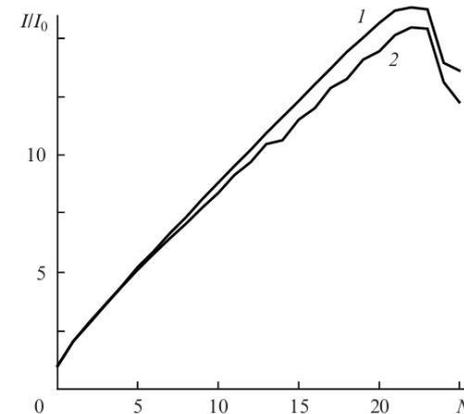
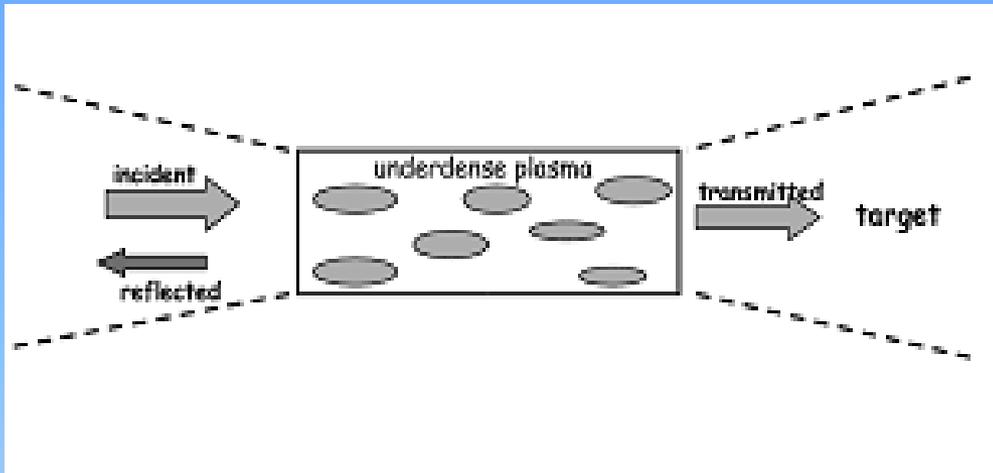


Figure 7. Dependences of the normalised intensity on the number of stages: minus the total phase of the spectrum (1) and the phase, approximated by a polynomial of the fifth degree (2).

SBBS pulse compression in underdense plasma slab

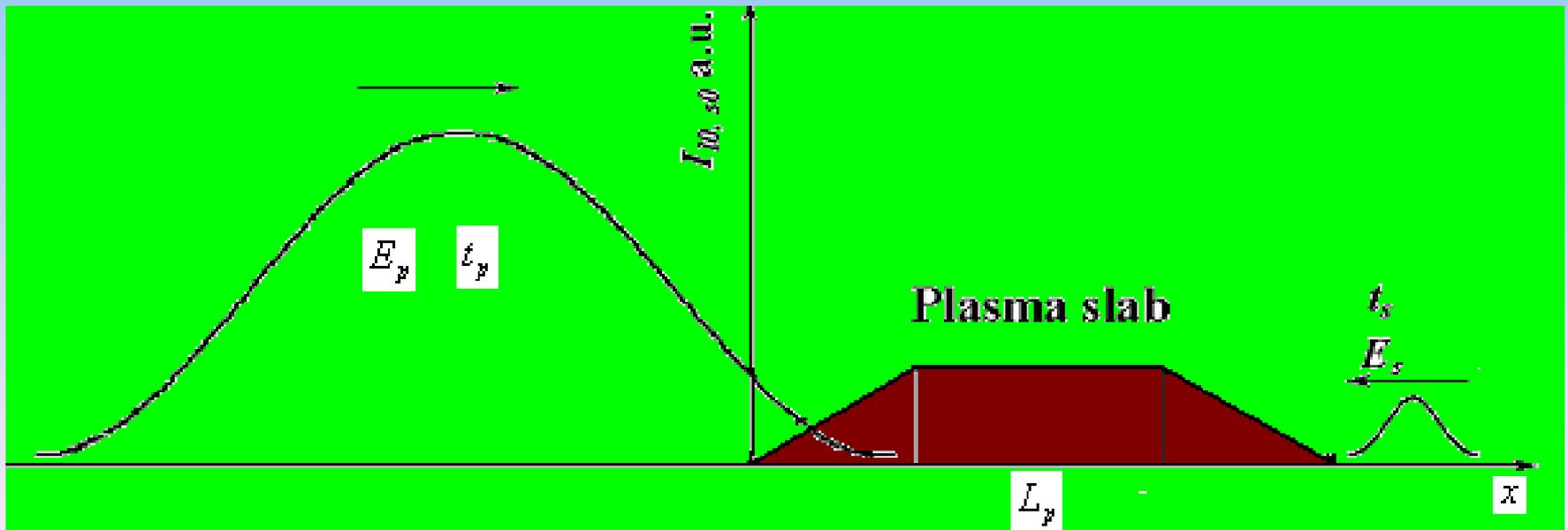


3-wave resonant coupling conditions:

$$k_0 = k_s + k_{is} \quad \omega_0 = \omega_s + \omega_{is}$$

$$k_s = -k_0 \quad \omega_{is} = k_{is} c_s \quad (\text{WCR})$$

$$k_{is} = 2k_0 \quad \omega_{is} \approx \omega_{pi} \sqrt[3]{\frac{3v_{os}^2}{4c^2} \frac{\omega_0}{\omega_{pi}}}$$



Заключение

- ❑ Основными нелинейными эффектами, ограничивающими яркость излучения мощных лазеров являются оптический пробой и мелкомасштабная самофокусировка
- ❑ Пространственная фильтрация и оптическая ретрансляция являются основными методами контроля за нелинейными эффектами
- ❑ Лазерные системы с усилением «длинных» импульсов с их последующим сжатием дают возможность существенного увеличения пиковой мощности импульсов
- ❑ Дополнительное уширение спектра в результате фазовой самомодуляции с последующим сжатием импульса в диспергирующей системе позволяет увеличить пиковую мощность фемтосекундных импульсов в 2...10 раз.

Спасибо за внимание