Лазеры для комптоновских источников и фотоинжекторов: опыт ИПФ РАН

Михаил Мартьянов

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Совещание по Комптоновскому источнику ИКИ НЦФМ
20-21 Марта 2023, Академгородок

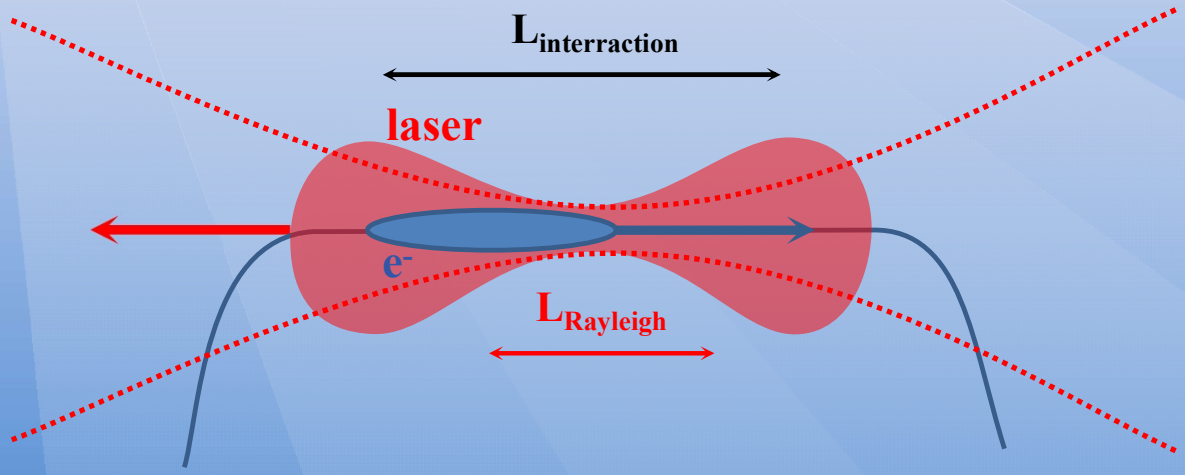
При лобовом столкновении двух 3D-Гауссовых банчей (пренебрегая дифракцией, т.е. $L_{int} \ll L_{Rayleigh}$)

кол-во γ-фотонов за столкновение

$$N_\gamma = \frac{\sigma_c N_e N_L}{2\pi}\left(\frac{1}{\sigma_{e\perp}^2} + \frac{1}{\sigma_{L\perp}^2}\right)$$

$$S_\gamma[1/s] = 0.343\ 10^{12} \cdot f_{rep}[Hz] \cdot E_L[J] \cdot Q_e[nC] \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{e\perp}^2[\mu m]} + \frac{1}{\sigma_{L\perp}^2[\mu m]}\right)$$

$$S_\gamma \sim f_{rep} \cdot E_L \cdot Q_e \sim P_L \cdot Q_e \sim \frac{P_L \cdot I_e}{f_{rep}}$$



$P_L = 1$ kW
$Q_e = 100$ pC
$\sigma_\perp = 30$ μm
$N_\gamma = 7.6 \cdot 10^{10}$ γ/s

Поток γ-фотонов в зависимости от параметров

$$S_\gamma[1/s] = 0.343\ 10^{12} \cdot P_L[W] \cdot Q_e[nC] \cdot \left(\frac{1}{\sigma^2_{e\perp}[\mu m]} + \frac{1}{\sigma^2_{L\perp}[\mu m]}\right)$$

$$N_\gamma \sim P_L \cdot Q_e \sim \frac{P_L \cdot I_e}{f_{rep}}$$

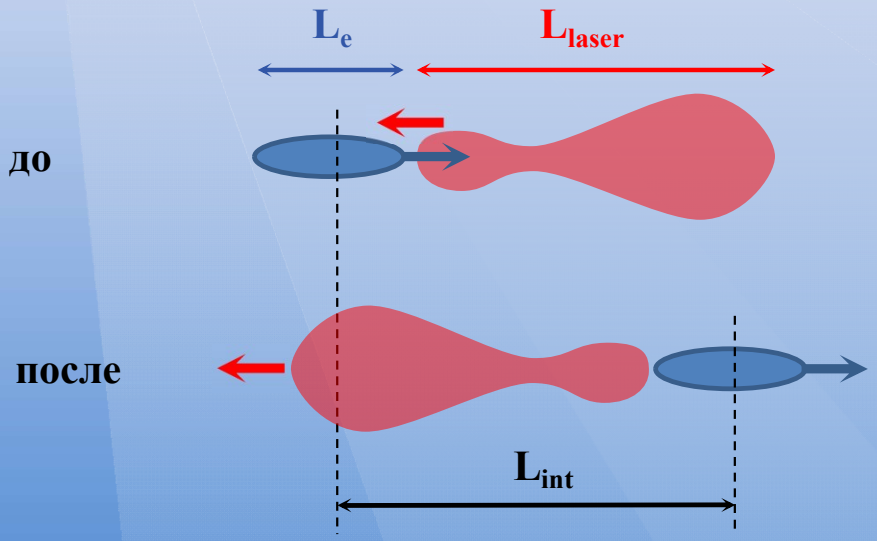
ИКИ	ИЯФ (кольцо)	МГУ	МИФИ
f_{rep}	90 MHz	1 kHz	100 Hz
buncj charge Q_e	1 nC	0.1 nC	0.2 nC ?
mean curent I_e	90 mA	0.1 μA	20 nA
bunch length τ_e	10-20 ps ?	10 ps	2-3 ps
photon rate N_γ, 1/s (assunming P_{laser} = 1 kW)	7.6e+11	0.76e+11	1.5e+11

Выход фотонов определяется средней мощностью лазера и зарядом банча!
Если зафиксированы максимальная мощность лазера и ток, то выход фотонов растет с уменьшением частоты f_{rep}

Аккуратный учет геометрии взаимодействия

Радиус лазерного пучка $\sigma = 30$ μm соответствует Рэлеевской длине $L_{Rayleigh} = 23$ mm = 75 ps

Длина взаимодействия $L_{int} = (L_e + L_{laser})/2$
Длину взаимодействия нет смысла делать больше, чем $L_{Rayleigh}$
Тогда получаем $L_{laser} = 2\,L_{Rayleigh} - L_e \approx 2\,L_{Rayleigh}$ при $L_e \ll L_{laser}$
В результате длительность лазера должна быть ~ 140 ps при $L_e = 10$ ps



Эффективная мощность непрерывного лазера

$$P_{eff} = P_{laser} \cdot 150\ ps \cdot f_{rep}$$

(фактически, P_{laser} на скважность)

При $P_{laser} = 10$ kW
$f_{rep} = 100$ MHz, $P_{eff} = 150$ W
$f_{rep} = 3$ GHz, $P_{eff} = 3$ kW

Многопроходовая геометрия лазера - для многократного использования лазерного импульса

Нужно сохранять изохронность обходов!

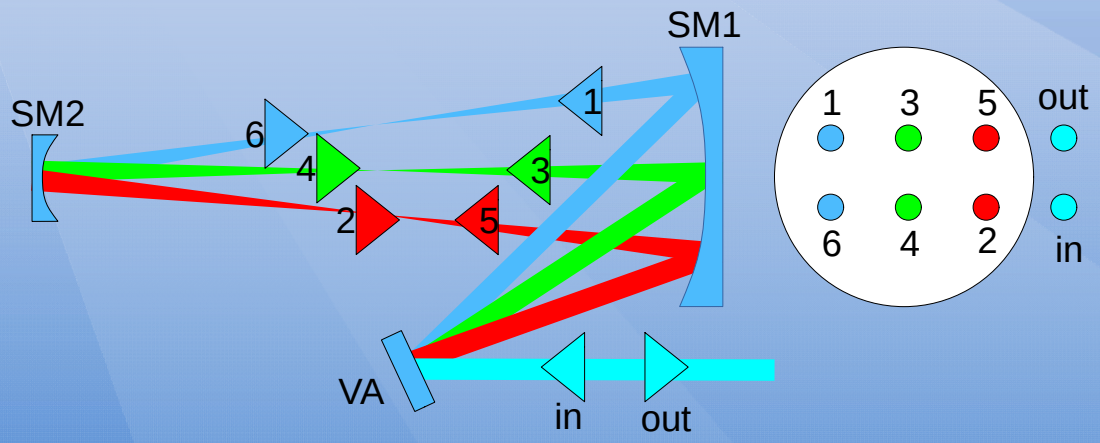
Имеет смысл при высокой частоте повторения банчей (> 40 MHz)

- Интерферометр Фабри-Перо

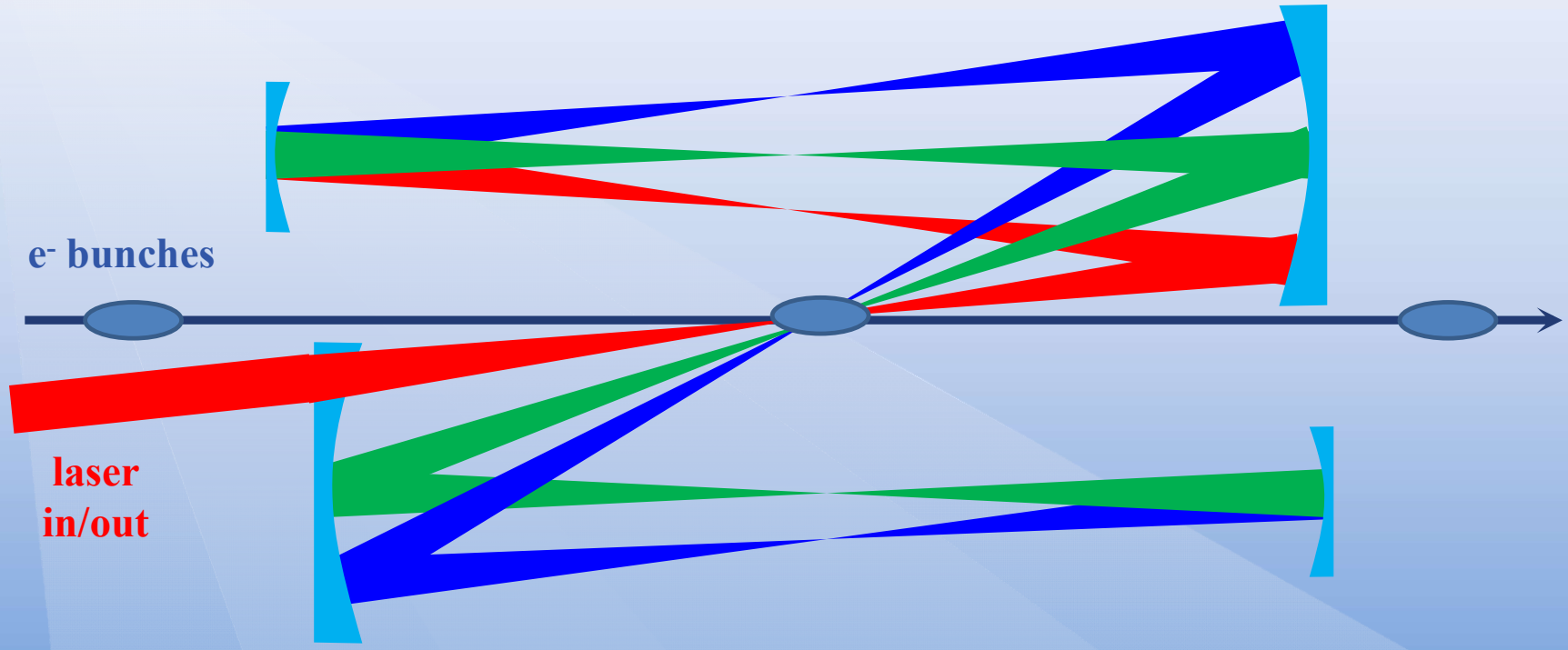
- накопление циркулирующей лазерной мощности/энергии (~1000 раз)
- лазер непрерывный ~OK
- лазер импульсный - нужна CEP-стабильность, для коротких трейнов не годится, не успеет заполниться

- Зеркальная схема

- много зеркал - технически сложно, особенно много проходов
- схема Уайта (from gas spectroscopy, White cell, 1942), прекрасно работает в усилителях (10-12 обходов)



Пример 3-х импульсной геометрии (unfolded White cell)

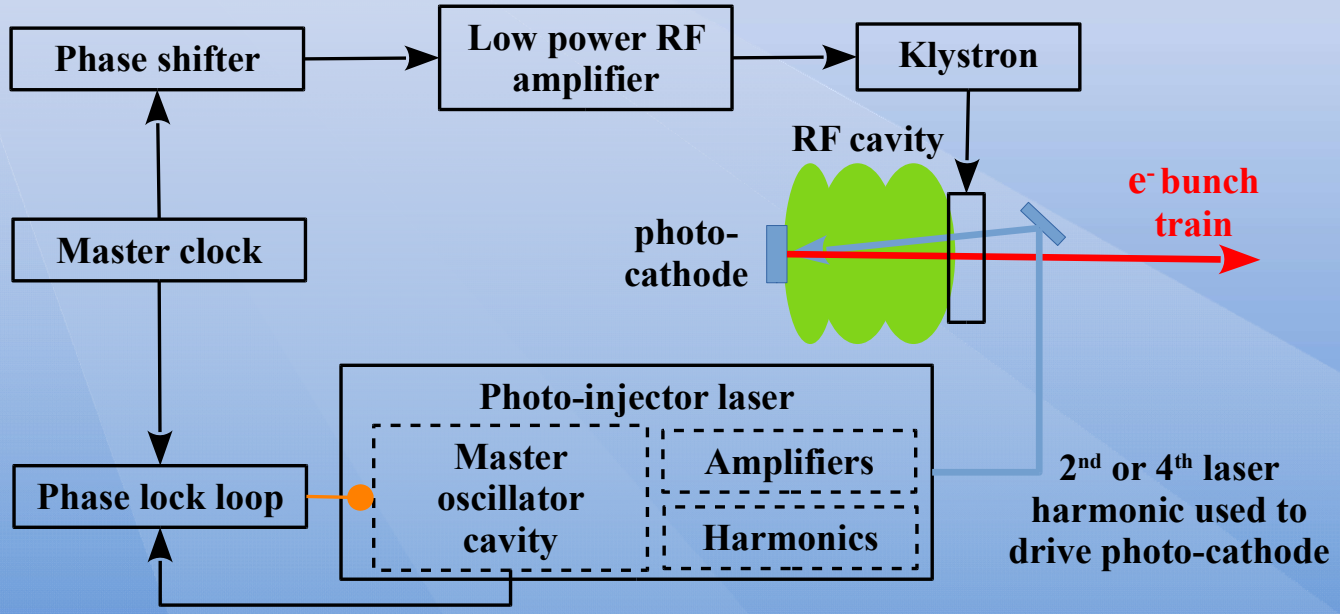


Нужно прорабатывать дизайн с учетом острой фокусировки и требуемой задержки за обход!

В ИПФ РАН достаточно большой опыт постройки лазеров для фотоинжекторов (хитрых)

Основная фишка - эффективное получение банч-трейнов, спектральный банч-шейпинг

Photo-injector is the heart of modern RF accelerators (f_{RF} i.e. S-band 3 GHz)
- It is driven by the powerful RF pulse and dedicated laser
- Laser : fs to ps mode-locked, rep.rate is a sub-harmonic of f_{RF} ← PLL is a must



Типичная диаграма работы лазерного драйвера

800 μJ/pulse @ 0.76 MHz
Plaser ~ 0.6 kW

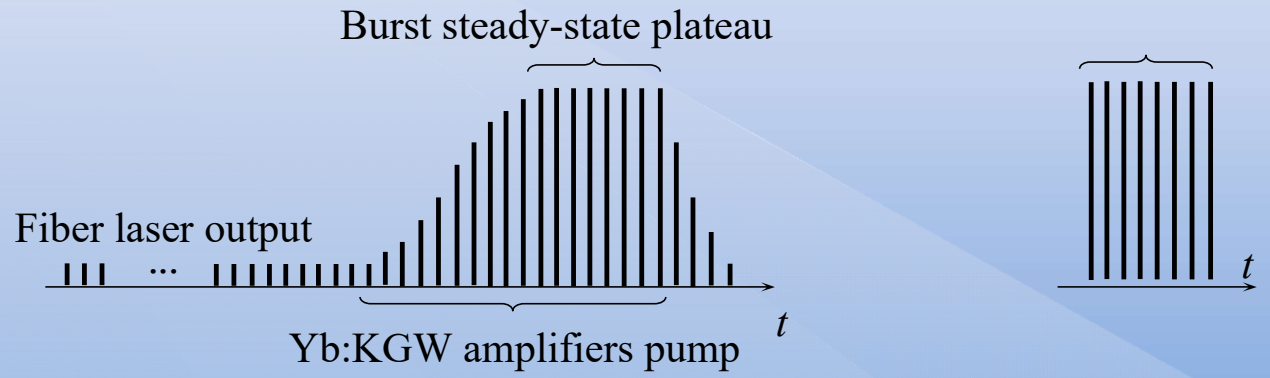
400 μJ/pulse

Femtosecond fiber Yb^{+3} laser
0.73 MHz, 200 ps, 10 μJ,
1033 nm, Δλ=6 nm

→ Multi-pass solid state amplifier
Yb:KGW, pump 1kW, 940 nm

→ Pockels cell

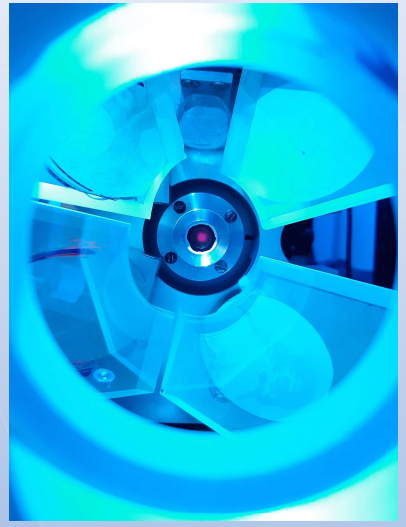
→ Optical compressor
200 ps → 200 fs →

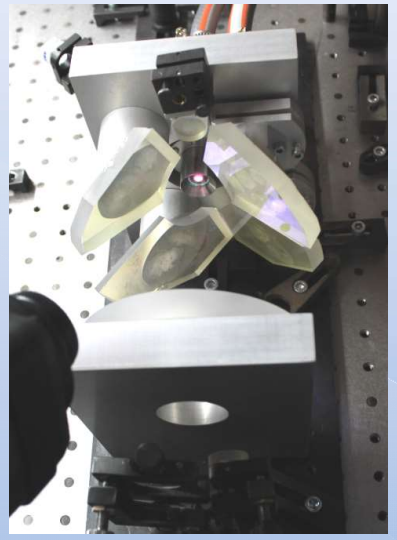


400 μJ @ 1030 nm => 100 μJ @ 258 nm
QE=1e-05 => Q_e = 200 pC

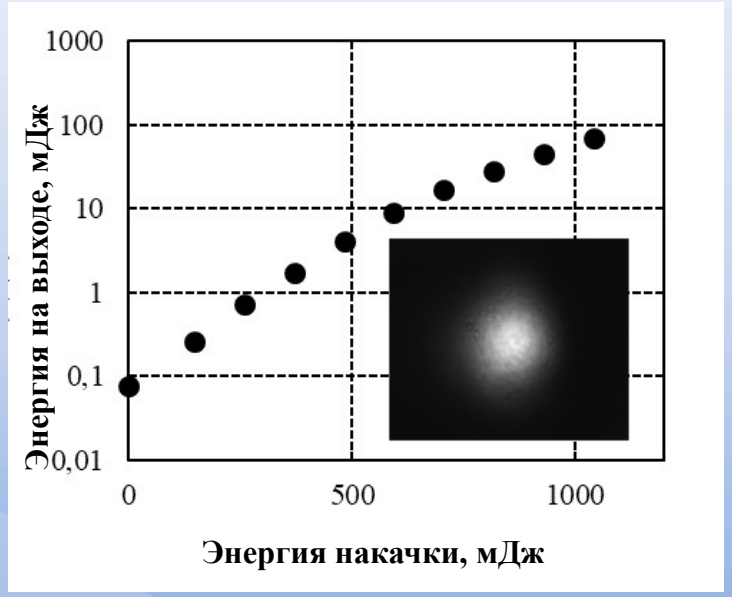
Высокомощные дисковые Yb:YAG лазеры в ИПФРАН

Дисковые усилители с охлаждением водой …





I.B. Mukhin et al 2020 Quantum Electron. 50 321



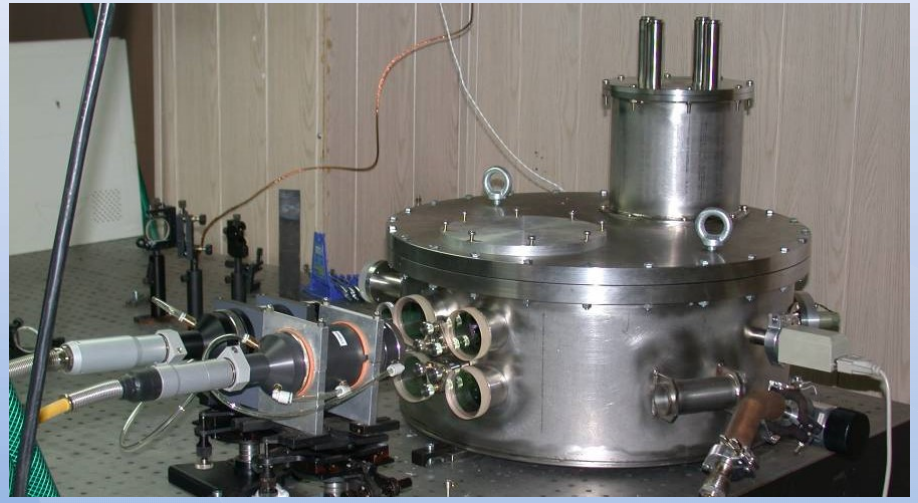
- Реализован 100 мДж уровень энергии на частоте повторения ~ 100 Гц
- Качество пучка $M^2<1.5$
- Минимальная длительность импульса ~0.5 нс => усиление пс импульсов с применением CPA
- **Разработанный дизайн масштабируется до > 500 мДж уровня**

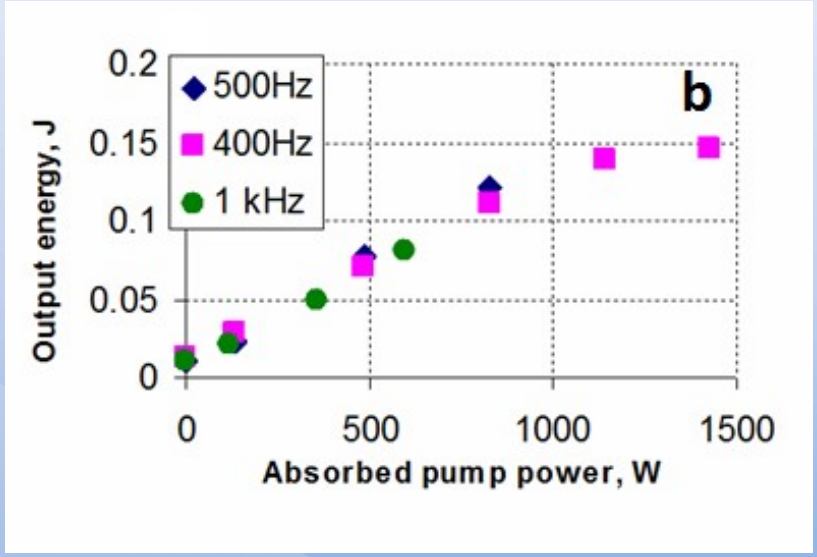
Pmax < 100 W :-(

[И. Б. Мухин, М. Р. Волков, И. А. Викулов, Е. А. Перевезенцев, О. В. Палашов, “Иттербиевая лазерная система для исследований параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны ~2 мкм”, Квантовая электроника, 50:4 (2020), 321–326]

Высокомощные дисковые Yb:YAG лазеры в ИПФРАН

Увеличение частоты повторения при криогенном охлаждении…





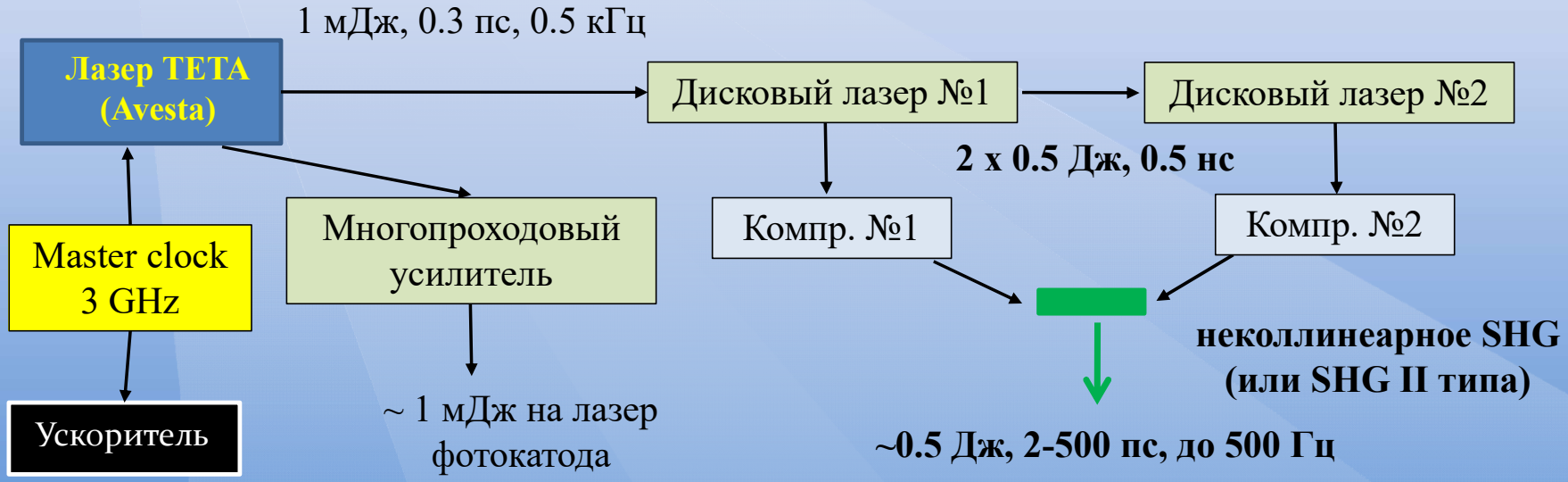
- Реализован 150 мДж уровень при частоте повторения 400 Гц
- **Разработанный дизайн масштабируется до > 500 мДж уровня с использованием современных криогенных чиллеров**

Pmax ~1 kW :-) ограничено криокулером

[*E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Cryogenic disk Yb : YAG laser with 120-mJ energy at 500-Hz pulse repetition rate // Quantum Electronics. - 2013. - Vol.43. - №3. - P.207-210]

Дисковый лазер для комптоновского источника

- длина волны 515 нм,
- Энергия в импульсе до 0.5 Дж с частотой повторения до 500 Гц
- Суб-нс длительность импульса с возможностью компрессии в пс диапазон
- Качество пучка $M^2<2$
- Оптическая синхронизация с фотокатодным источником
- Стабилизация задающего источника по внешним часам



Заключение

Непрпрывный лазер (~ 10 kW)

- оправдано при высокой (GHz) частоте повторения е-банчей
- основное достоиство - простота, коммерчески доступны
- гармоники существенно затруднены (не эффективны)

Импульсные лазеры (~ 1 kW)

- в режиме “bunch burst” требуют многопроходовой схемы
- простая генерация гармоник (x 1,2,3,4,5 - до 206 nm)
- можно думать о перестраиваемом OPG (=> перестройка γ-линии)
- на прямую или при помощи CAfCA подходят для нелинейного Комптона
  1 J / 100 fs / d=30 μm => I = 1e+18 W/cm^2 => a_0 = 0.88
- стартовая часть доступна коммерчески, финальные усилители ИПФ РАН

В ИПФ РАН разработаны все основные элементы импульсных лазеров с высокой средней мощностью и драйверов фотоинжекторов!

Требует существенной проработки геометрия точки взаимодействия!

Спасибо за внимание!