



**Системы скоростной визуализации  
на основе активных сред на парах галогенидов металлов**

Работа научного сотрудника  
Института оптики атмосферы СО РАН,  
к.т.н., Васнева Николая Александровича

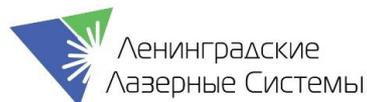
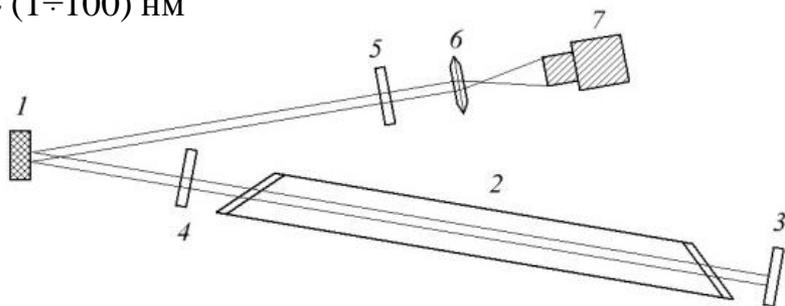
Томск - 2024

# Актуальность

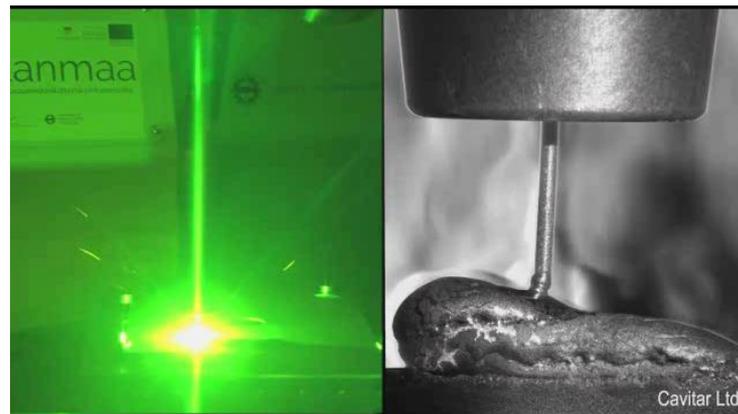
Примеры быстропротекающих процессов с мощной фоновой засветкой:

- обработка и модификация поверхностей с целью улучшения их эксплуатационных характеристик;
- сварочные процессы
- получение наночастиц;
- самораспространяющий высокотемпературный синтез и т.д.

$$\Delta\lambda \approx (1 \div 100) \text{ нм}$$

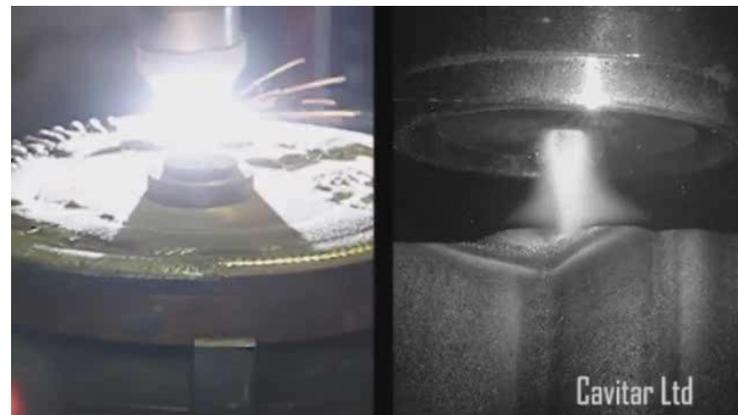


3D-печать методом СМТ  
(холодный перенос металла)



В собственном свечении    В лазерной подсветке

Плазменная наплавка

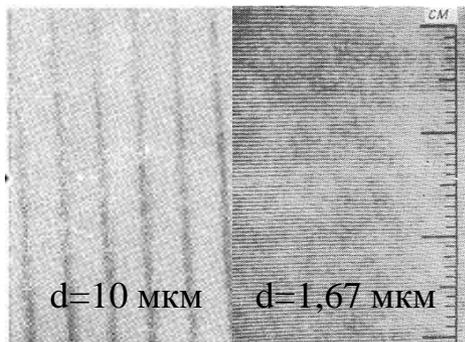


В собственном свечении    В лазерной подсветке

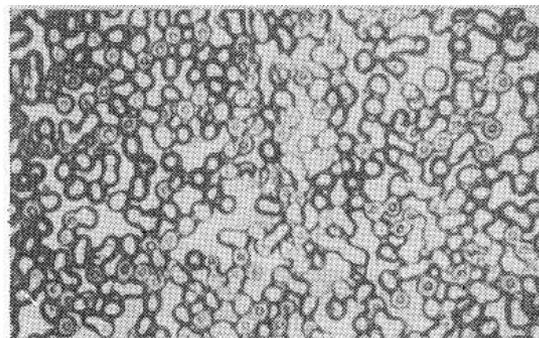
# Лазерные проекционные системы на самоограниченных переходах в парах металлов

## Достоинства:

- Узкая спектральная линия ( $\leq 10$  пм);
- Высокий коэффициент усиления ( $10^3 \div 10^4$ );
- Высокая оптическая однородность;
- Высокая ЧСИ (до 200 кГц)



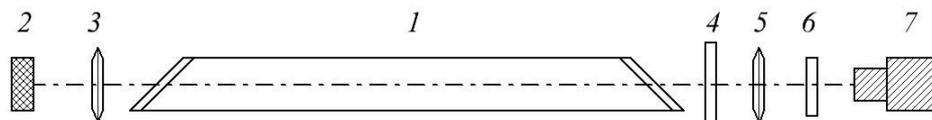
Объект-микрометр



Мазок крови

1. **Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г.** Лазерный проекционный микроскоп // Квантовая электроника. – 1974. – Т.1. №1. – С. 14-15.
2. **Земсков К.И., Казарян М.А., Савранский В.В., Шафеев Г.А.** Лазерный проекционный микроскоп в проходящем свете // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6, – № 11. – С. 2473–2475.
3. **Морозова Е.А., Прохоров А.М., Савранский В.В., Шафеев Г.А.** Скоростная покадровая регистрация изображений биологических объектов с использованием лазерного проекционного микроскопа // ДАН СССР. – 1981. – Т. 261, – № 6. – С. 1460–1462.
4. **Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г.** Проекционная система с усилителем яркости и автономным источником освещения // Известия академии наук СССР. Сер. Физ. – 1982. – Т. 46, – № 10. – С. 1898–1904.

# Лазерный монитор



- 1 – квантовый усилитель мощности/яркости,  
2 – объект наблюдения, 3 – собирающая линза (объектив),  
4 – полосовой фильтр, 5 – собирающая линза (объектив),  
6 – нейтральный фильтр, 7 – фото/видеорегистратор

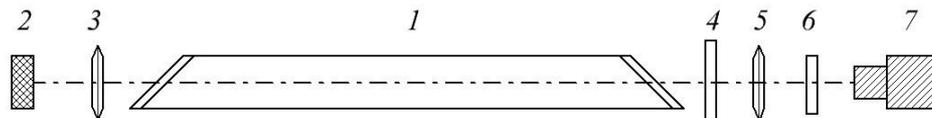
5. Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Применение оптических систем с усилителями яркости для исследования поверхностей электродов из графита и пирографита во время горения дуги // ТВТ. 1991. Т. 29. № 6. С. 1204

6. Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. Исследования областей замыкания тока на электродах слаботочной дуги атмосферного давления с помощью лазерного монитора // Теплофизика высоких температур. – 2001. – Т. 39, № 5. – С. 794–809.

7. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 6. – С. 569–575.

8. Trigub M.V., Platonov V.V., Fedorov K.V., Osipov V.V. CuBr laser for nanopowder production visualization // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016 – 29(4). P. 376-380.

# Лазерный монитор



- 1 – квантовый усилитель мощности/яркости,  
2 – объект наблюдения, 3 – собирающая линза (объектив),  
4 – полосовой фильтр, 5 – собирающая линза (объектив),  
6 – нейтральный фильтр, 7 – фото/видеорегистратор

## Недостатки:

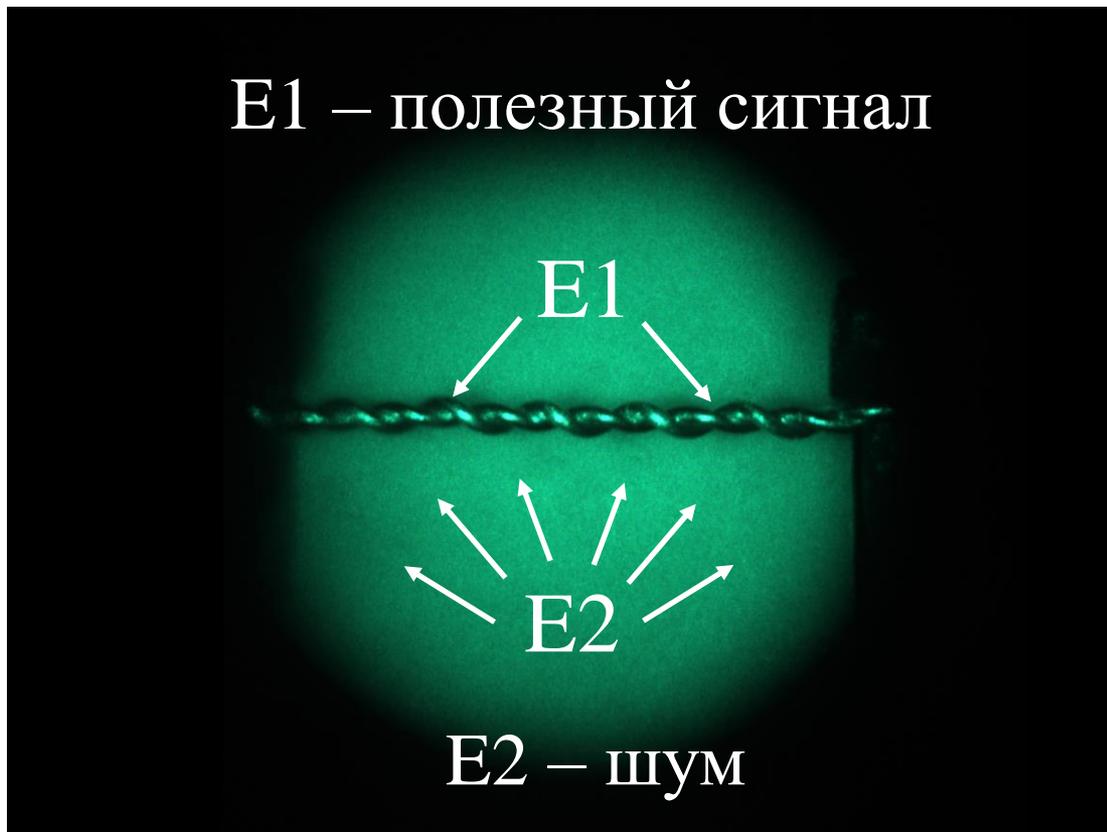
1. Сравнительно небольшая предельно допустимая дистанция визуализации (3,3 м).
2. Отсутствие возможности независимой регулировки параметров подсветки и параметров усиления.

Цель работы: расширение функциональных возможностей систем визуализации на основе активных сред на парах галогенидов металлов.

## Задачи:

1. Анализ ограничений лазерного монитора.
2. Увеличение предельно допустимой дистанции визуализации, яркости и контрастности изображений, поля зрения.
3. Расширение спектрального диапазона скоростных систем визуализаций.

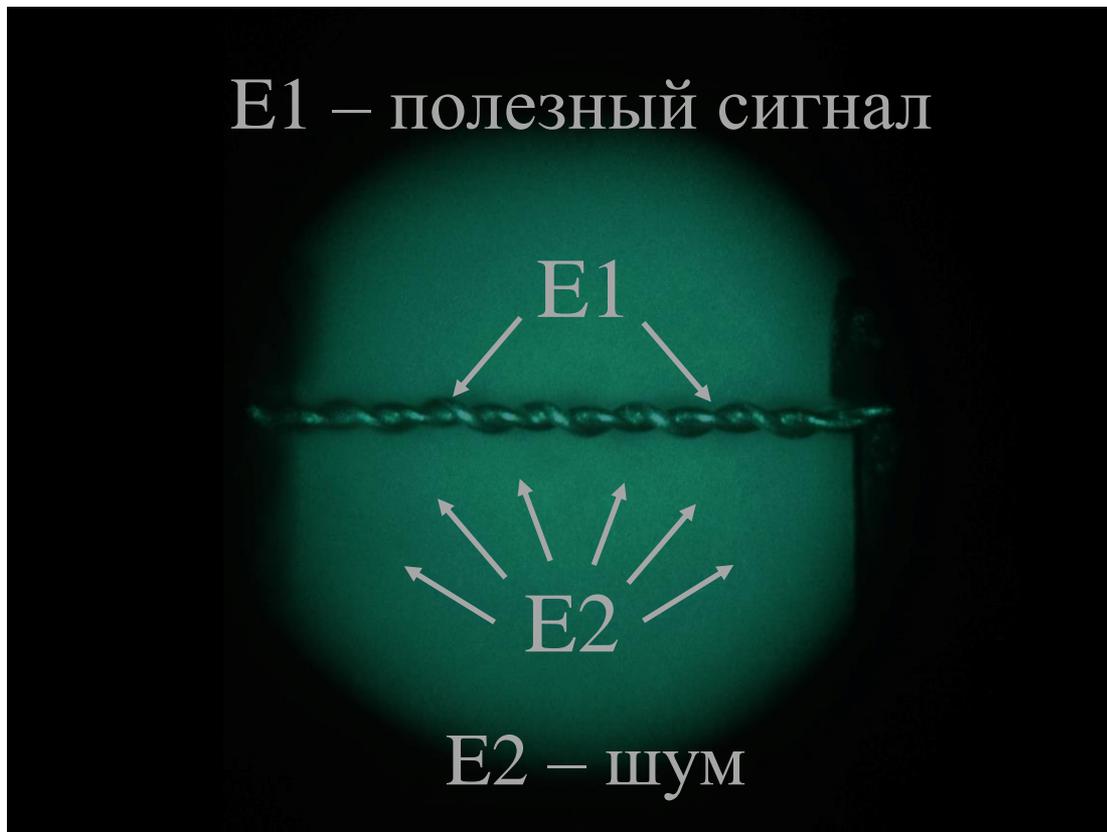
# Соотношение «сигнал/шум»



$$E1 > E2$$

$$C_{veb} = \frac{I - Ib}{Ib}$$

# Соотношение «сигнал/шум»



$$E1 > E2$$

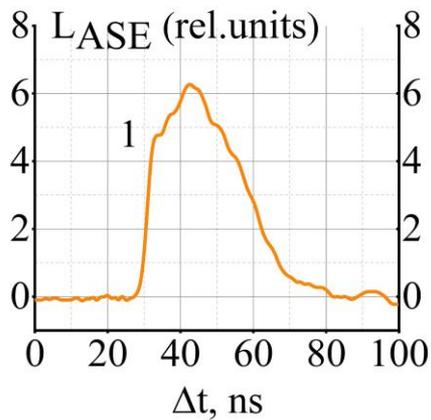
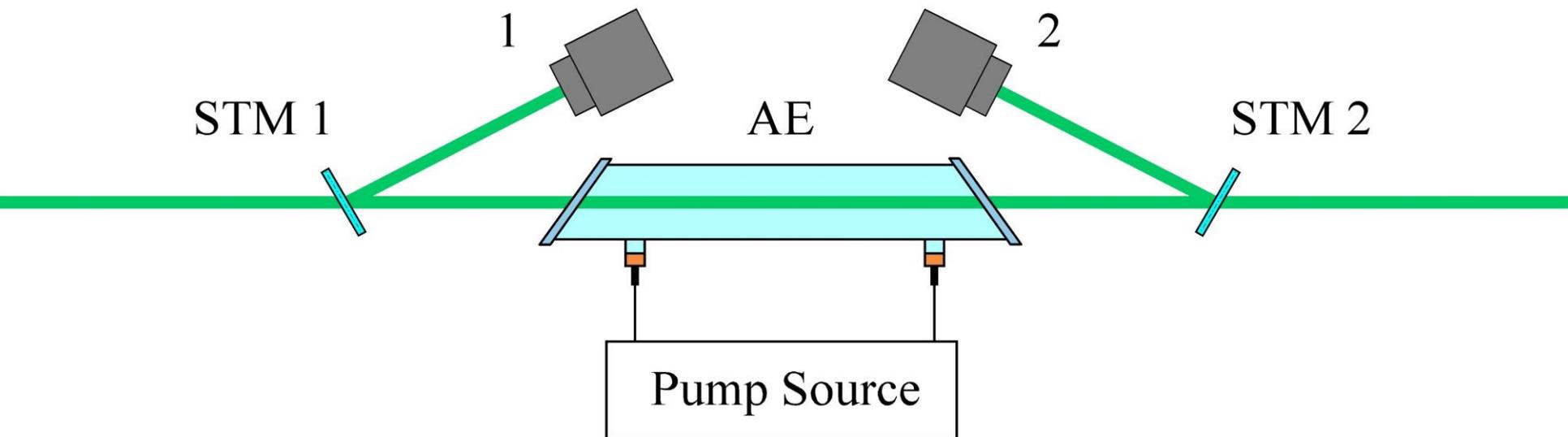
$$C_{veb} = \frac{I - Ib}{Ib}$$

## Соотношение «сигнал/шум»

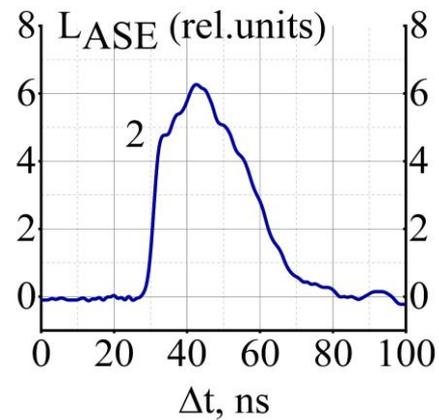
$$E1 > E2$$

$$C_{veb} = \frac{I - Ib}{Ib}$$

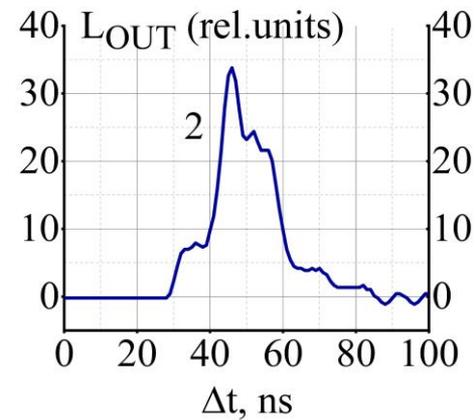
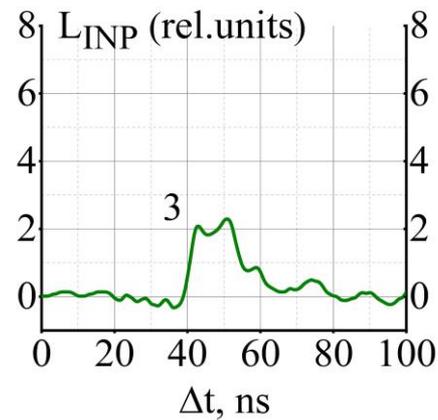
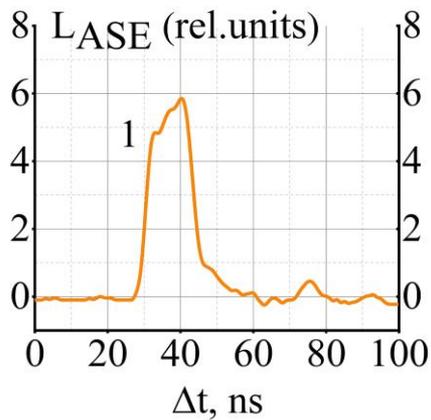
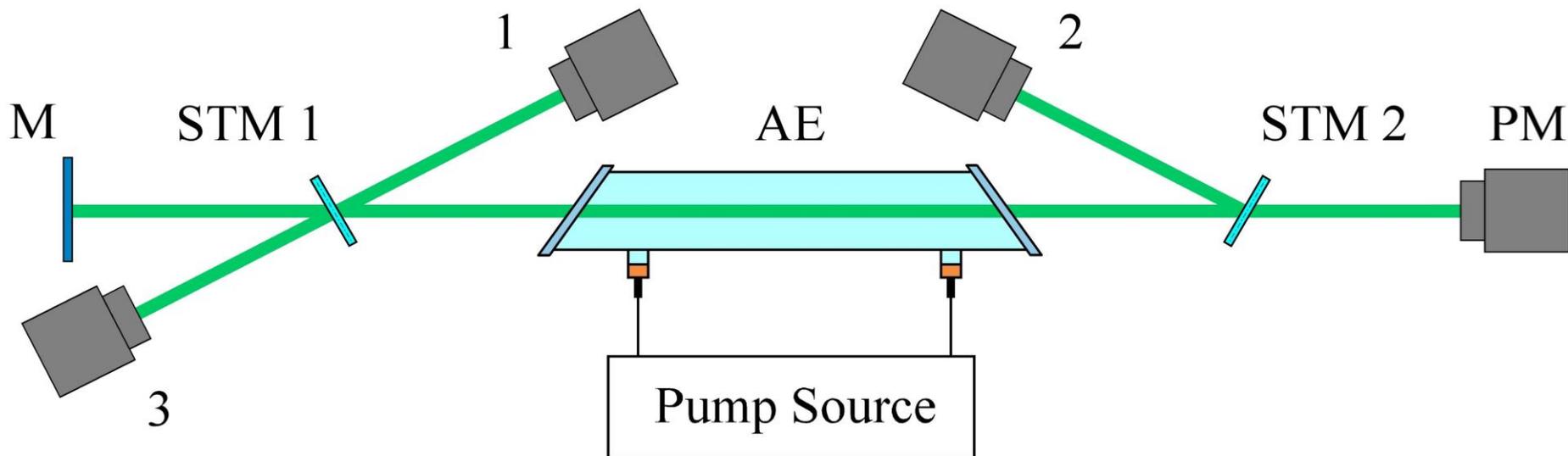
# Экспериментальная установка



Усиленное  
Спонтанное  
Излучение



# Экспериментальная установка



# Вклад усиленного спонтанного излучения в выходной сигнал

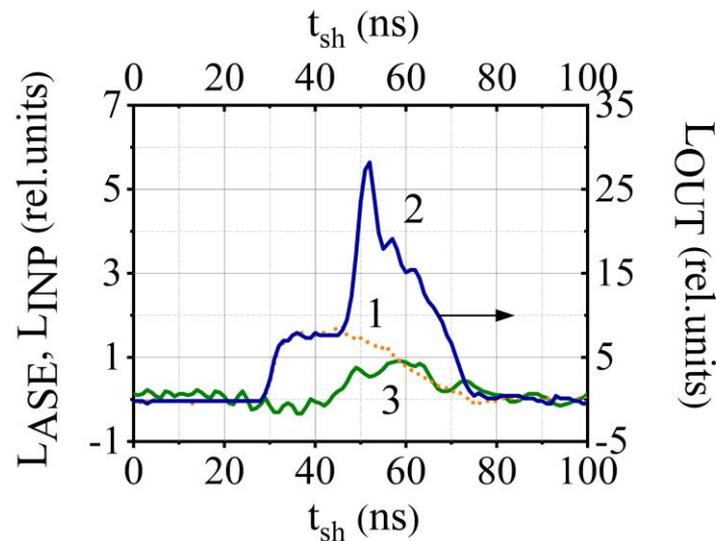
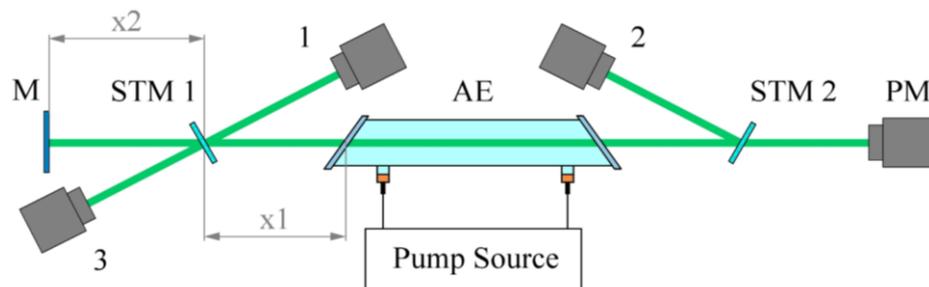
$$L1 = x1 + x2$$

$$x1 = 0,3 \text{ m}$$

$$x2 = (0,5 \div 3,2) \text{ m}$$

$$L1 = (0,8 \div 3,5) \text{ m}$$

$$\Delta t_c = 2 \text{ нс}$$



# Вклад усиленного спонтанного излучения в выходной сигнал

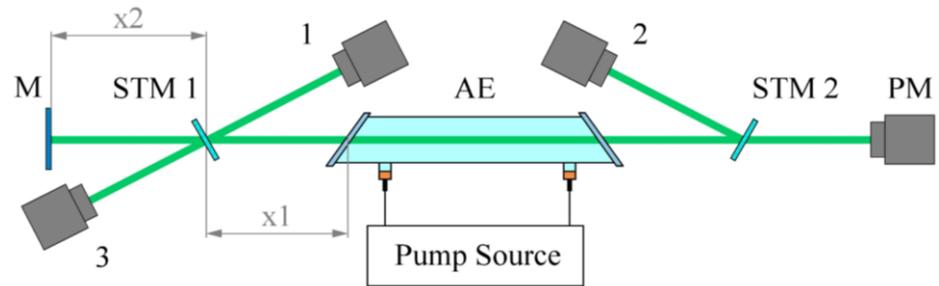
$$L1 = x1 + x2$$

$$x1 = 0,3 \text{ m}$$

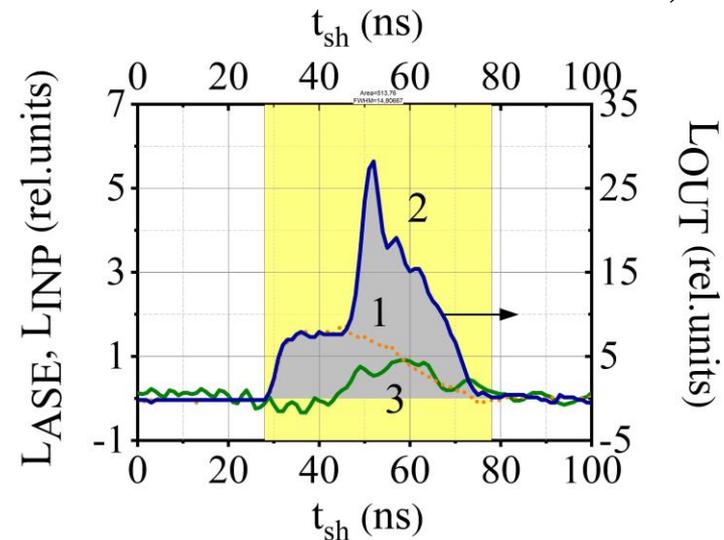
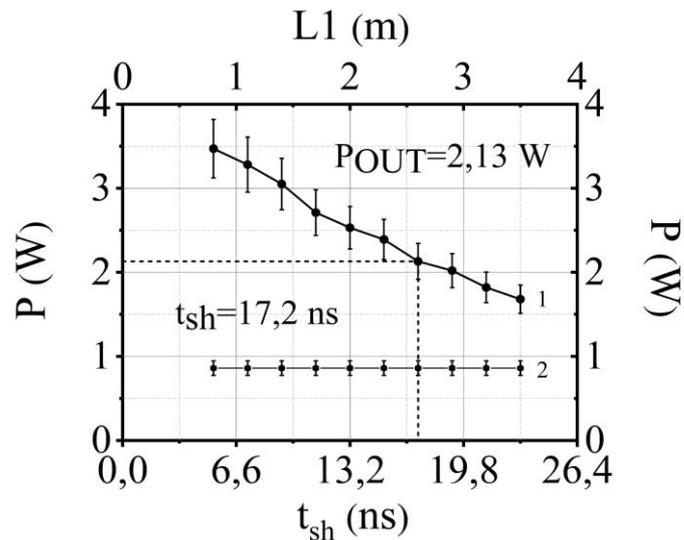
$$x2 = (0,5 \div 3,2) \text{ m}$$

$$L1 = (0,8 \div 3,5) \text{ m}$$

$$\Delta t_c = 2 \text{ нс}$$



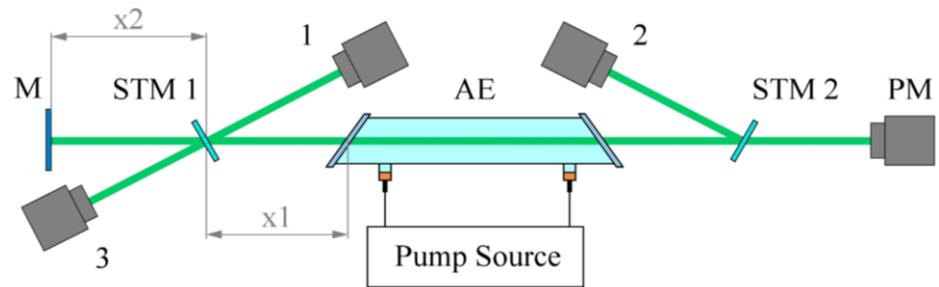
$P_{OUT} = 2,13 \text{ W}$



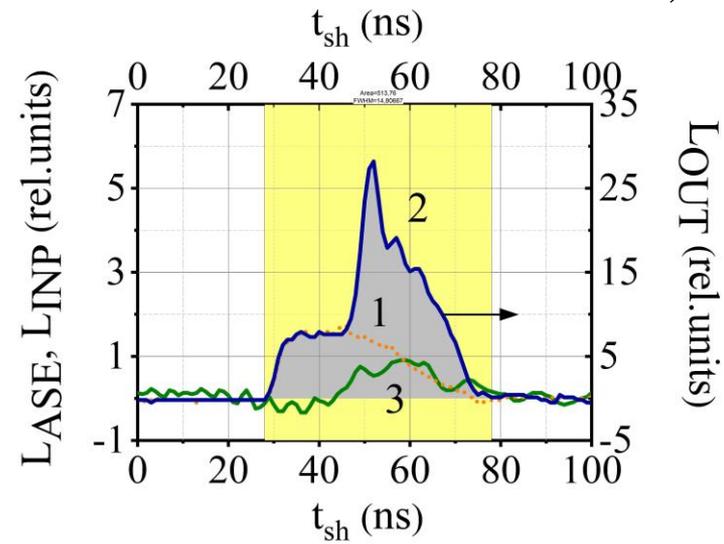
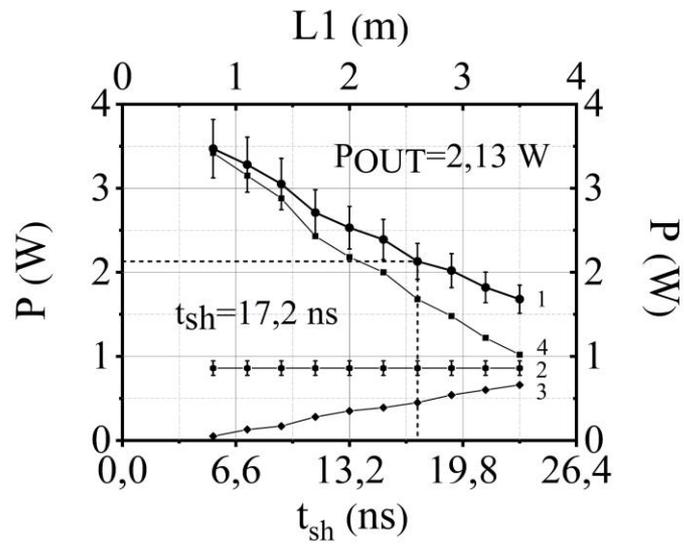
1. Vasnev N.A., Trigub M.V. Investigation of ASE contribution to copper bromide amplifier output signal // Optical and Quantum Electronics – 2024. – Vol. 56. – Iss. 2. – DOI: 10.1007/s11082-023-05724-6

# Вклад усиленного спонтанного излучения в выходной сигнал

100% –  $P_{OUT} = 2,13 \text{ W}$   
 21% –  $P_0 = 0,45 \text{ W}$   
 79% –  $P_1 = 1,68 \text{ W}$

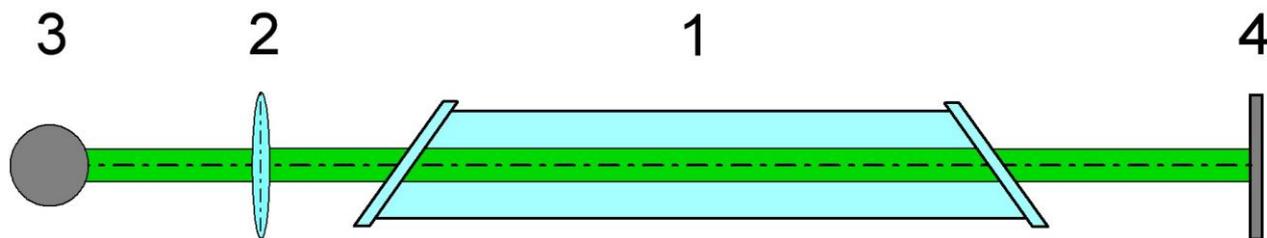


$P_{OUT} = 2,13 \text{ W}$



1. Vasnev N.A., Trigub M.V. Investigation of ASE contribution to copper bromide amplifier output signal // Optical and Quantum Electronics – 2024. – Vol. 56. – Iss. 2. – DOI: 10.1007/s11082-023-05724-6

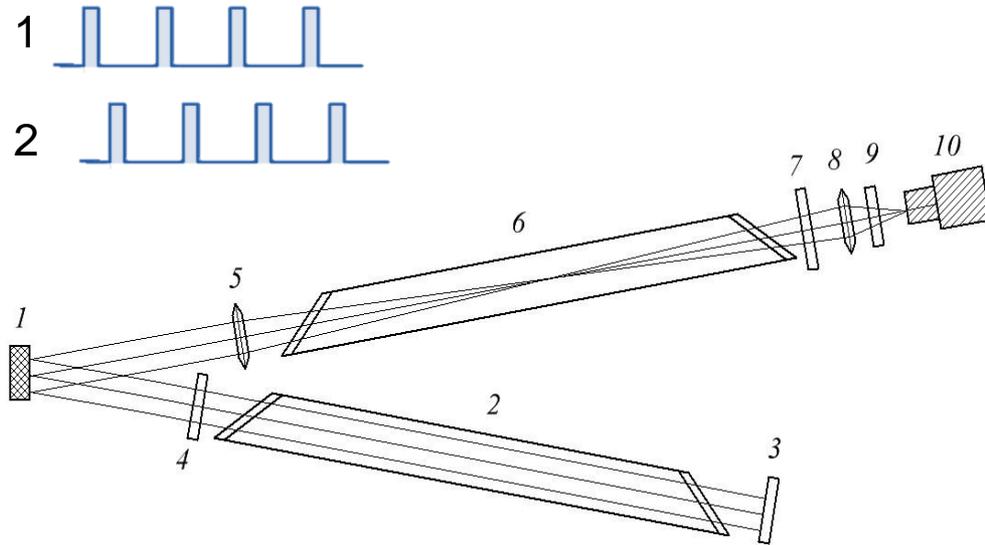
# Предельно допустимая дистанция визуализации



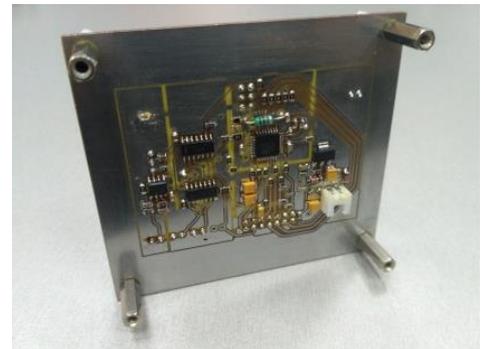
1 – активный элемент, 2 – объектив,  
3 – объект наблюдения, 4 – проекционный экран



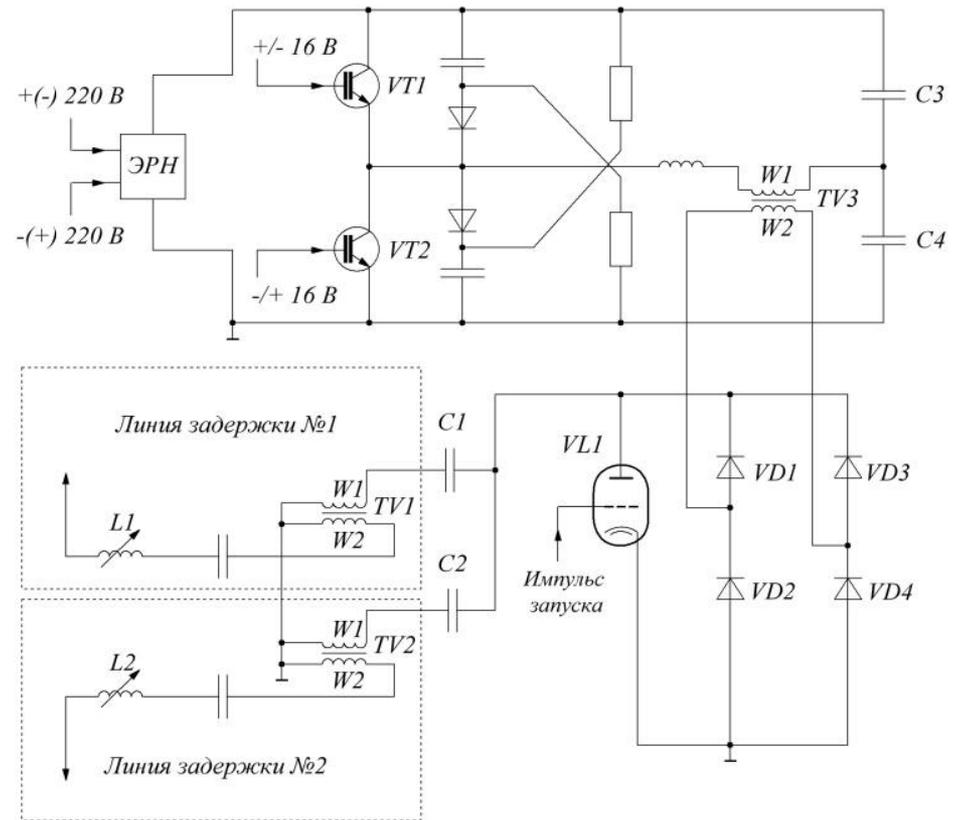
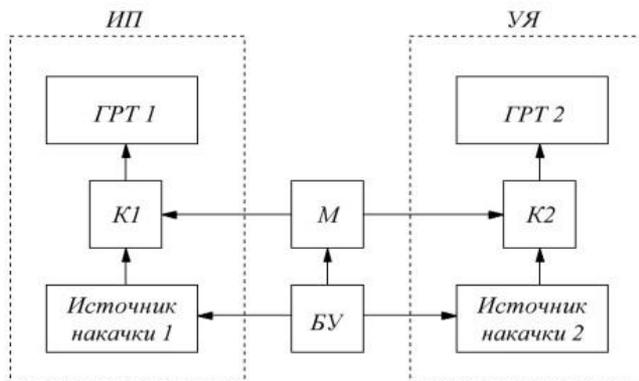
# Бистатистический лазерный монитор



- 1 – объект наблюдения,  
2 – внешний источник подсветки,  
3 – зеркало, 4 – плоскопараллельная пластина,  
5 – собирающая линза (объектив),  
6 – усилитель яркости, 7 – полосовой фильтр,  
8 – собирающая линза (объектив),  
9 – нейтральный фильтр,  
10 – видеорегистрирующее устройство



# Система синхронизации



Номинальное рабочее напряжение:  $(180 \div 220)$  В

Потребляемый ток  $(0,34 \div 0,78)$  А

Предельно-допустимая ЧСИ: 20 кГц ( $P=172$  Вт)

Анодное напряжение:  $(1,35 \div 1,65)$  кВ.

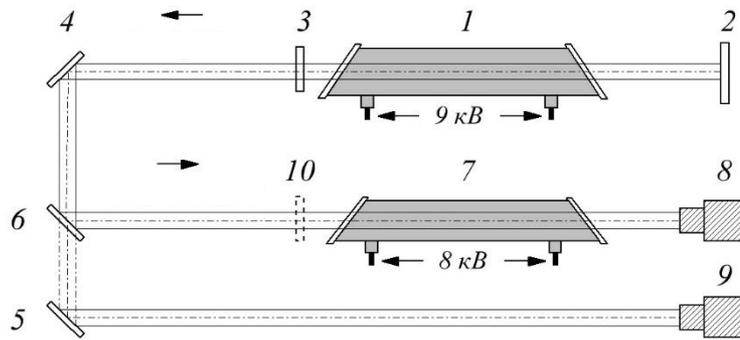
Точность:  $\leq 1$  нс

Джиттер импульсов излучения:  $\leq 7$  нс

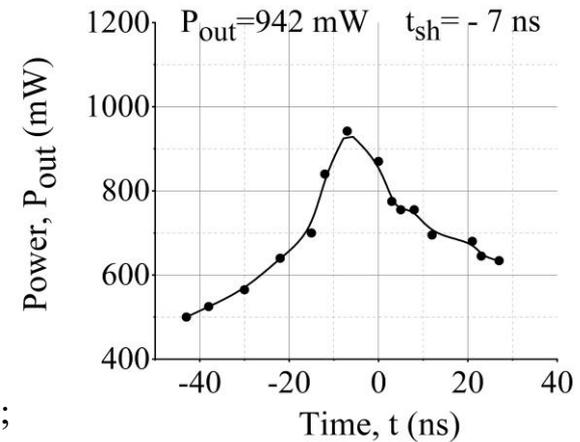
Диапазон регулировки составил от  $-55$  до  $+55$  нс.

- **Васнев Н.А., Тригуб М.В., Димаки В.А., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О.** Высоковольтный модулятор. Патент на полезную модель № 185671. Дата государственной регистрации 13.12.2018. Правообладатель: Институт оптики атмосферы СО РАН.
- **Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаки В.А., Троицкий В.О.** Бистатический лазерный монитор. Патент на изобретение № 2755256. Дата государственной регистрации 14.09.2021. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

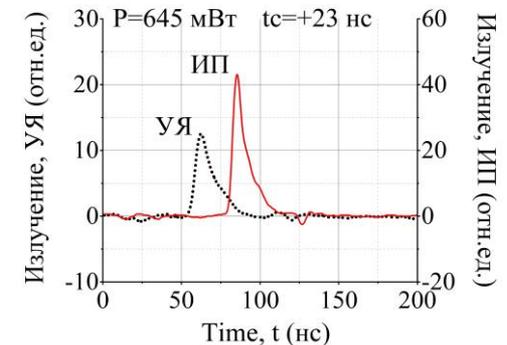
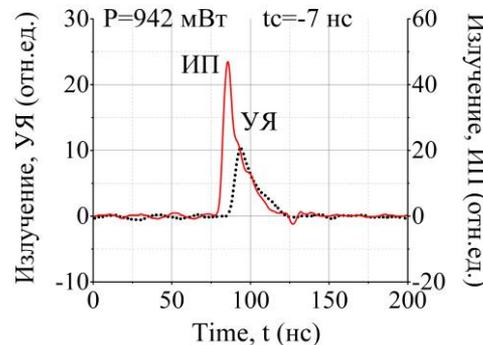
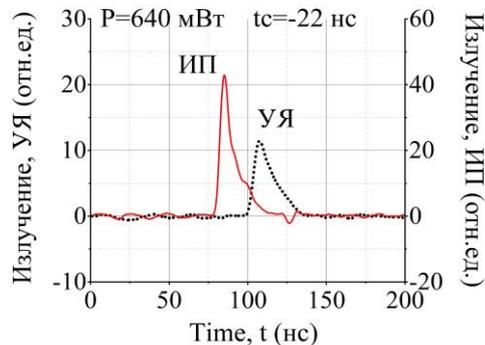
# Исследование усилительных характеристик



- 1 – задающий генератор; 2,3 – плоскопараллельный резонатор;  
 4, 5 – глухие зеркала; 6 – дихроическое зеркало;  
 7 – усилитель мощности; 8, 9 – фотоэлементы ФЭК-14К;  
 10 – полосовой фильтр.



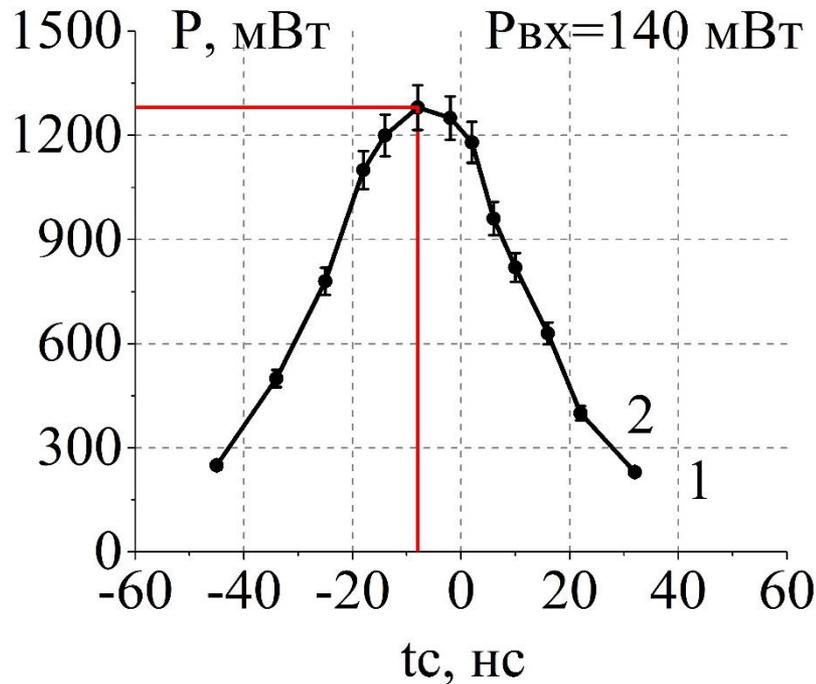
Зависимость мощности излучения от временного сдвига



Импульсы излучения источника подсветки (ИП) и усилителя яркости (УЯ)

2. Trigub M.V., Vasnev N.A. Optimization of the CuBr+Ne+HBr brightness amplifier operating mode for high-speed imaging // Optics Communications. – 2023. – P. 129768-1 - 129768-6. – DOI: 10.1016/j.optcom.2023.129768.

# Исследование усилительных характеристик



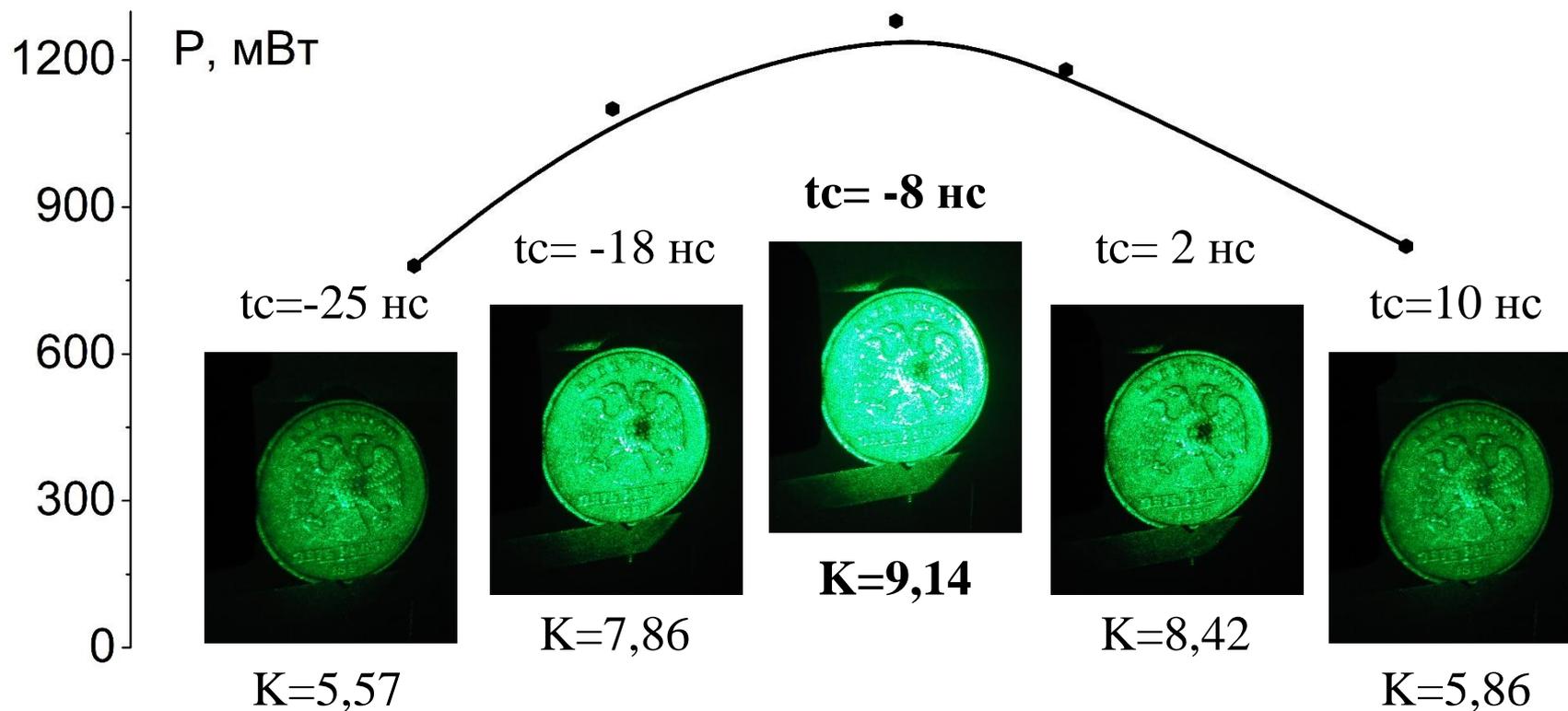
- $t_c = -25$  нс  $P_{\text{вых}} = 780$  мВт (70%)
- $t_c = -18$  нс  $P_{\text{вых}} = 1180$  мВт (85%)
- $t_c = -8$  нс  **$P_{\text{вых}} = 1280$  мВт (100%)**
- $t_c = 2$  нс  $P_{\text{вых}} = 1150$  мВт (90%)
- $t_c = 10$  нс  $P_{\text{вых}} = 820$  мВт (64%)

Зависимость мощности излучения  
от временного сдвига

$$P_{\text{вых}} = X \text{ мВт} \pm 5\%$$

3. Trigub, M.V., Vasnev, N.A. Laser active optical systems based on copper bromide active medium for high contrast and power images active formation // Optics and Laser Technology – 2023. – Vol. 161. – DOI: 10.1134/S102485602102010X.

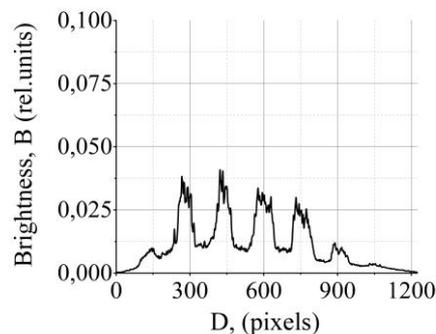
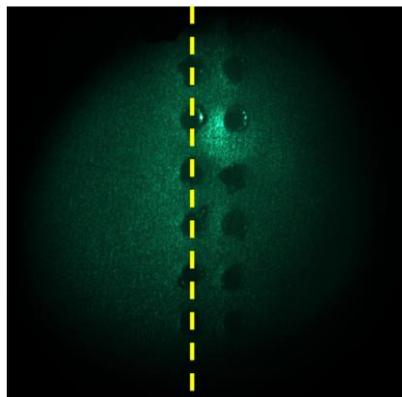
# Визуализация в бистатистическом лазерном мониторе



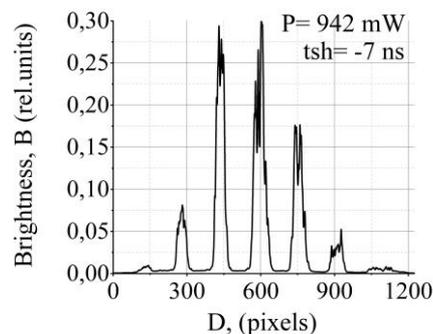
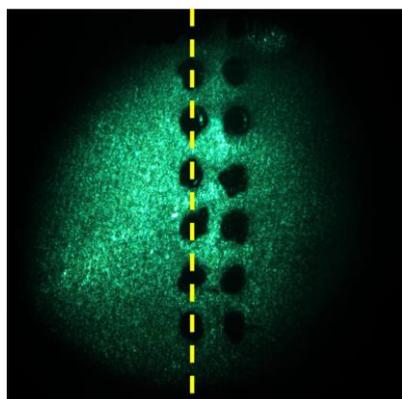
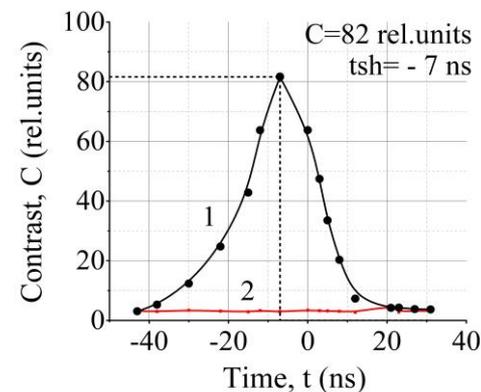
$K$  – коэффициент усиления

$$K = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}$$

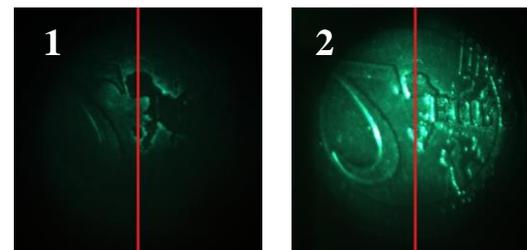
# Визуализация в бистатическом лазерном мониторе



Моностатический лазерный монитор



Бистатический лазерный монитор

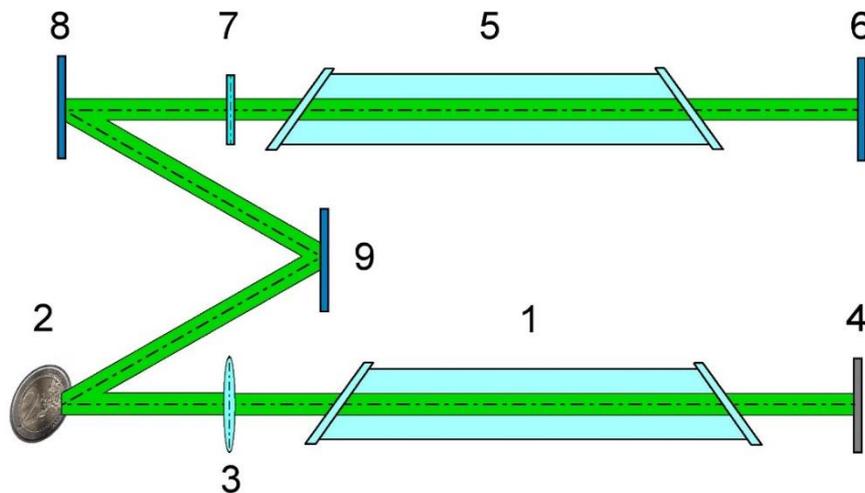


Поле зрения в моностатическом (1) и бистатическом (2) лазерном мониторе

3. Trigub, M.V., Vasnev, N.A. Laser active optical systems based on copper bromide active medium for high contrast and power images active formation // Optics and Laser Technology – 2023. – Vol. 161. – DOI: 10.1134/S102485602102010X.

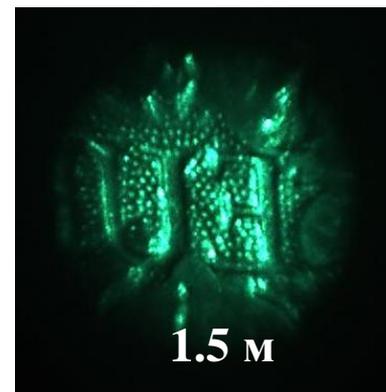
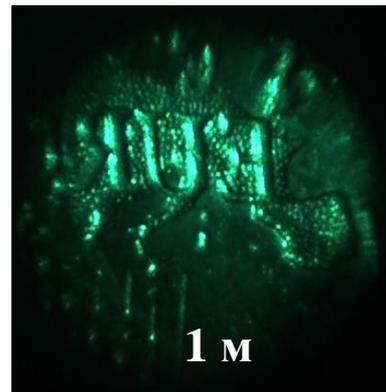
4. Тригуб М.В., Васнев Н.А. Особенности формирования изображения в бистатическом лазерном мониторе // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 12. – С. 1058-1063. – DOI: 10.15372/AOO20221214.

# Область зрения, яркость изображения



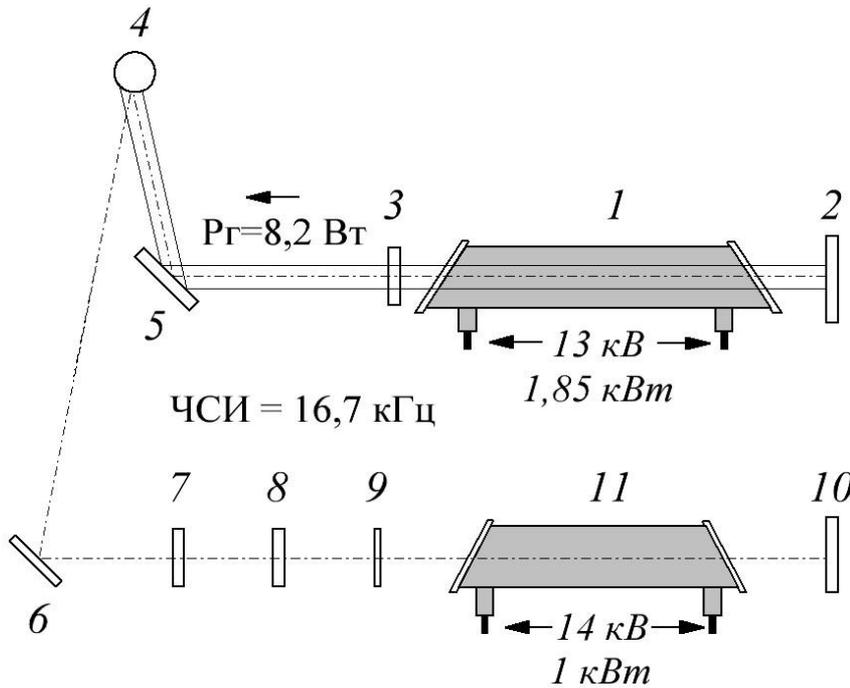
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f \uparrow} + \frac{1}{d \downarrow}$$

$$\Gamma = \frac{f}{d}$$



$P$  подсветки = 3,7 Вт;  $P_{\Gamma}$  УЯ= 655 мВт; ОКП1-350-1 ( $f=350$  мм)

# Визуализация удаленных объектов



Тестовый объект – щель монохроматора (440 мкм)

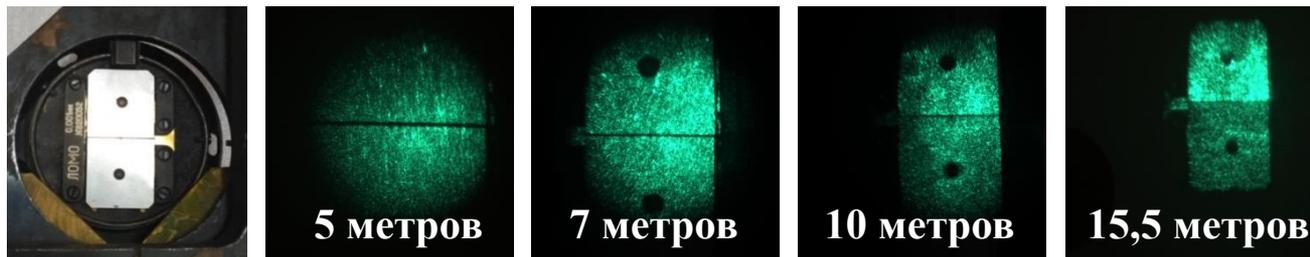
- 1 – источник подсветки;
- 2, 3 – плоскопараллельный резонатор;
- 4 – тестовый объект; 5 – зеркало;
- 6 – зеркало; 7 – полосовой фильтр;
- 8 – объектив; 9 – объектив;
- 10 – экран; 11 – усилитель яркости.

## Объективы:

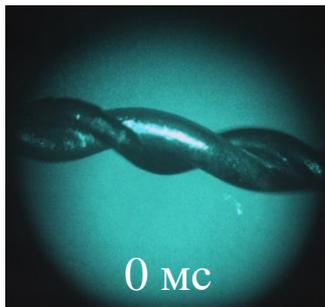
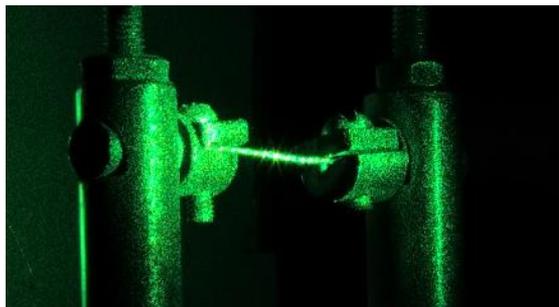
- 8 – ОКП1-350-1 ( $f=350$  мм)
- 9 – Hellios 44-2 ( $f=58$  мм)

## Активные элементы:

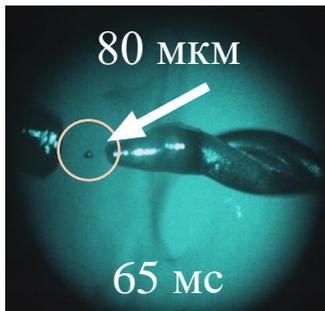
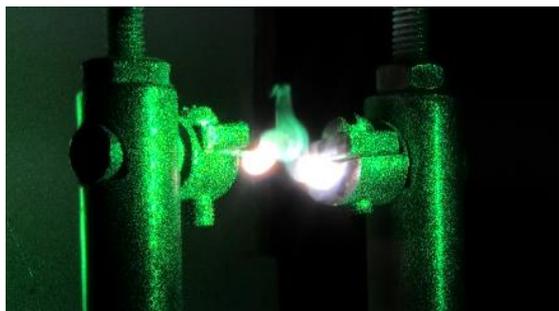
- 1 – Источник подсветки:  $L=90$  см,  $D=5$  см
- 11 – Усилитель яркости:  $L=30$  см,  $D=4$  см



# Визуализация быстропротекающих процессов

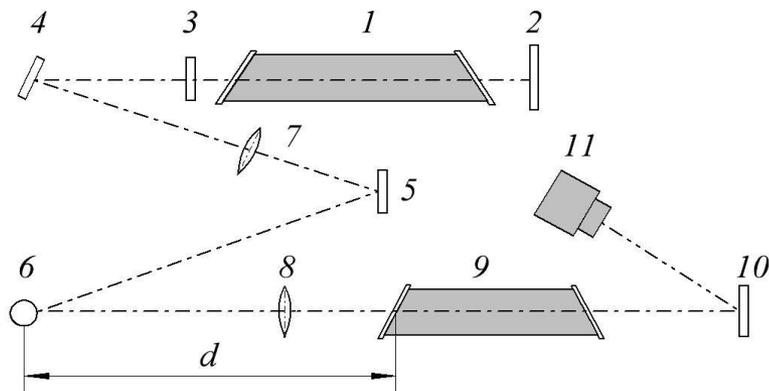


0 мс

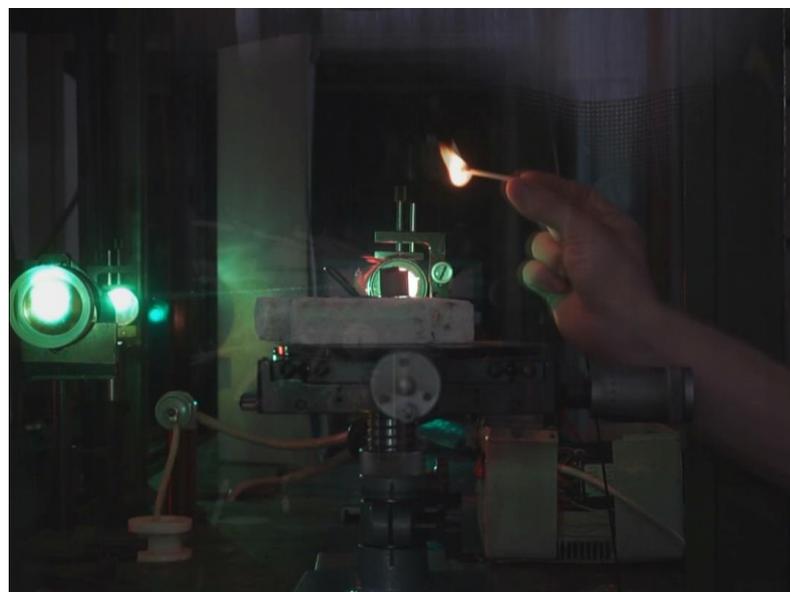


80 мкм

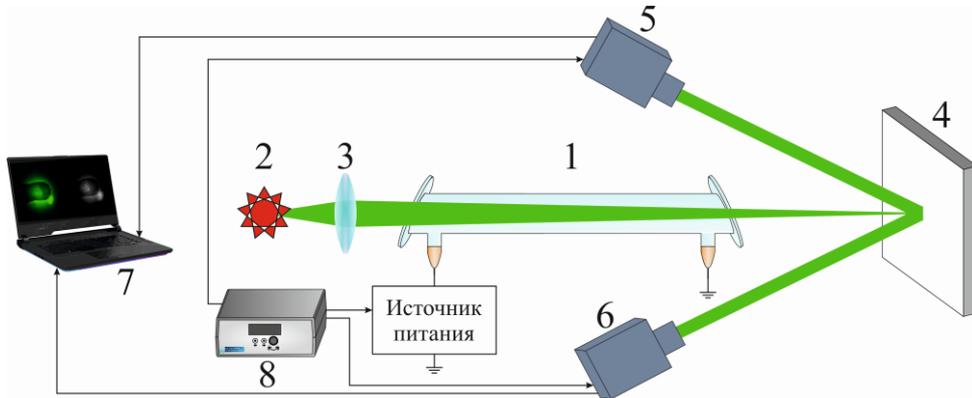
65 мс



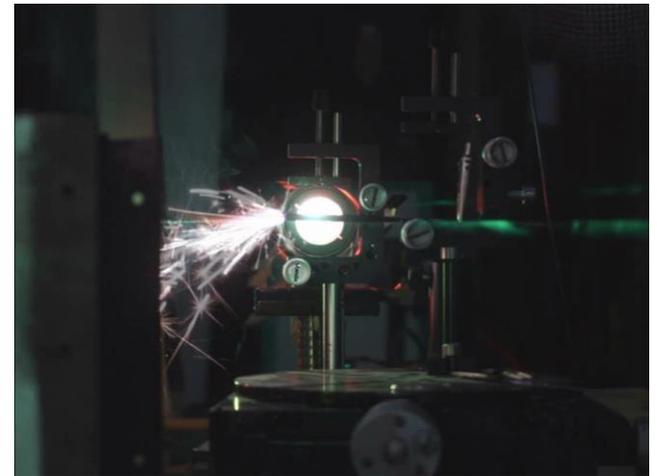
1. Горение бенгальской свечи. Скорость съемки 4000 кадр/с; поле зрения (3,5÷4,0) мм.
2. Разрушение графитовых электродов при зажигании дугового разряда. Скорость съемки 3000 кадр/с; поле зрения 3,5 мм.
3. Горение металлокерамического порошка. Скорость съемки (2200÷4000) кадр/с; поле зрения 10,5 мм, 4 мм.
4. Горение скрутки проволок из никеля (Ni) и алюминия (Al). Скорость съемки до 15000 кадр/с.



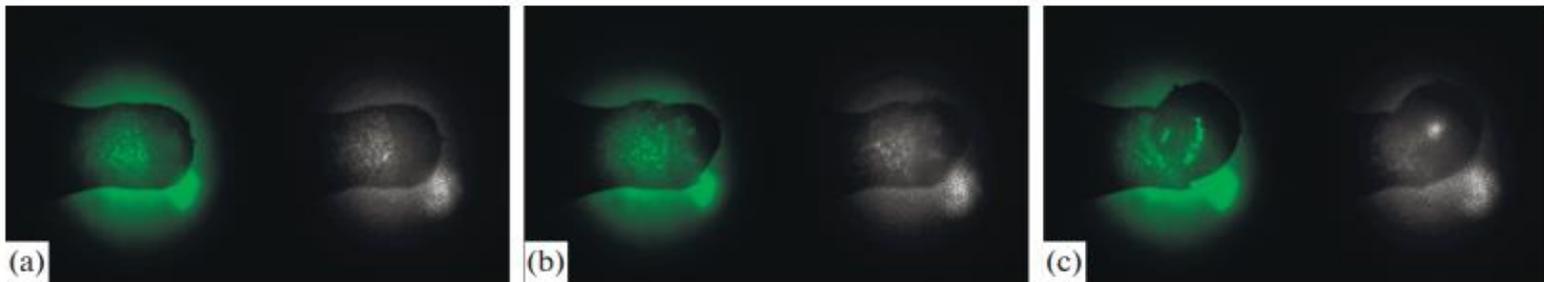
# Одновременная визуализация в видимом и ближнем ИК-диапазонах



Скорость горения свечи 2,8 мм/с.  
Скорость съемки – 4000 кадр/с



Видимый диапазон:  $\lambda_1=534,1$  нм;  $\lambda_2=542,0$  нм).  
ИК диапазон:  $\lambda_3=1,289$  мкм;  $\lambda_4=1,332$  мкм;  $\lambda_5=1,362$  мкм).  
 $P_T=715$  мВт,  $P_{0\_1}=17$  мВт,  $P_{0\_2}=9$  мВт.



5. Тригуб М.В., Гембух П.И., Васнев Н.А., Шиянов Д.В. Лазерный монитор для одновременной визуализации в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, – № 03. – С. 5.

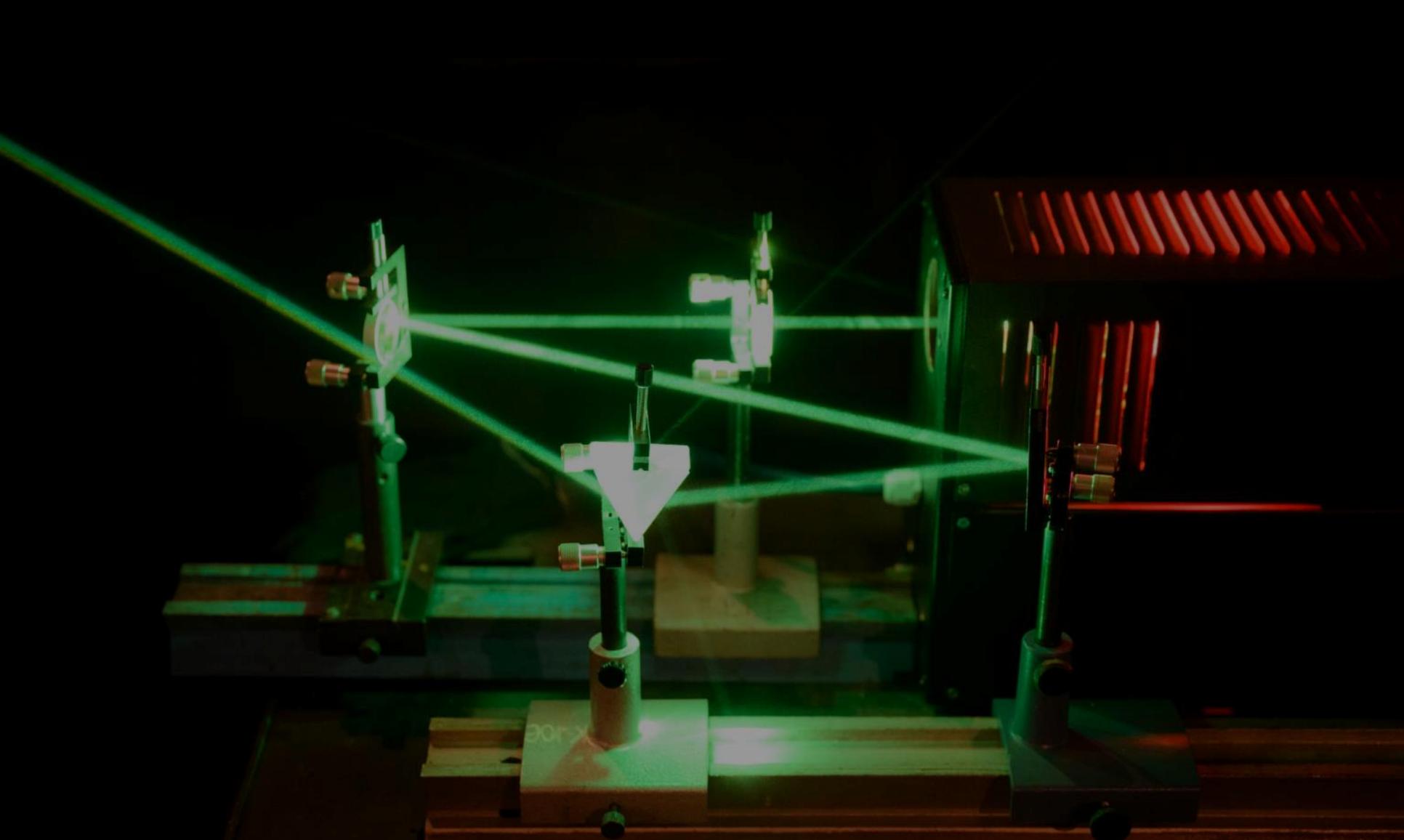
# Выводы

Разработка бистатического лазерного монитора на парах бромида меди позволила существенно расширить возможности традиционного (монстатического) варианта лазерного монитора:

- ✓ Дистанция визуализации (0,5÷15,5) м; предельно допустимая дистанция визуализации составила 15,5 м (в 4,7 раза выше, чем у монстатического лазерного монитора);
- ✓ Увеличение поля зрения по сравнению с монстатической схемой лазерного монитора в диапазоне (1,4÷4,6) раз в зависимости от используемой оптической системы;
- ✓ Увеличение яркости изображения по сравнению с монстатической схемой лазерного монитора в 2,73 раза (соотношение в относительных единицах зависит от оптической схемы);
- ✓ Увеличение локального контраста по сравнению с монстатической схемой лазерного монитора не менее, чем в 2 раза в периферийной части изображения, по другой оценке – в 3,85 раз;

Впервые проведена одновременная визуализация в видимом и ближнем ИК-диапазонах в лазерном мониторе на парах хлорида марганца.

Исследования особенностей формирования изображений в монстатическом и бистатическом лазерном мониторах, а также расширение их спектрального диапазона продолжаются.



Спасибо вам за внимание!



**Системы скоростной визуализации  
на основе активных сред на парах галогенидов металлов**

Работа научного сотрудника  
Института оптики атмосферы СО РАН,  
к.т.н., Васнева Николая Александровича

Томск - 2024