

Dyakonov Ivan

**Quantum
Technology
Center**

Источник предвещённых фотонов на основе эффекта СПР с
применением принципа временного мультиплексирования

Докладчик: Дьяконов Иван



План

1. Введение
 1. Методы получения одиночных фотонов
 2. Мультиплексирование
2. Актуальность
3. Спонтанное параметрическое рассеяние
4. Чистота (Purity)
5. Эффективность оповещения (Heralding efficiency)
6. Схема эксперимента и результаты эксперимента
7. Заключение

Одиночные эмиттеры

Плюсы:

- + Высокая скорость генерации неразличимых фотонов
- + Возможность приготовления суперпозиций фоковских состояний
- + Возможность детерминистической генерации перепутанных состояний

Минусы:

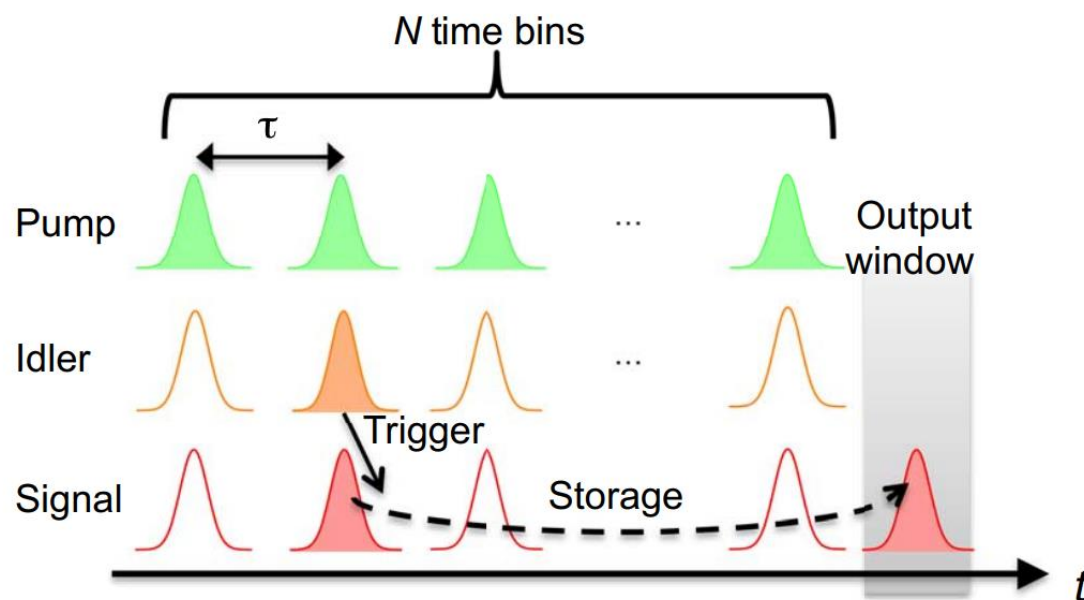
- Сложность изготовления и использования
- Проблемы с интеграцией на чип

Нелинейно оптические источники

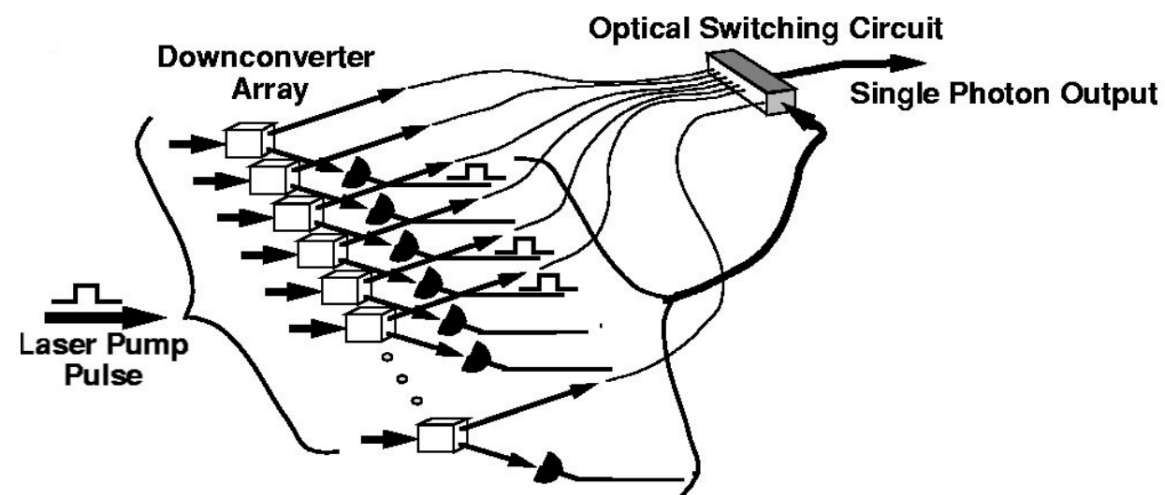
- + Простота сборки, настройки и интеграции на чип
- + Множество степеней свободы для управления и кодирования информации
- + Генерация предвещённых состояний

- Низкая эффективность генерации
- Трудности с повышением скорости генерации неразличимых фотонов

Временное [1]



Пространственное [2]



[1] F. Kaneda, P. G. Kwiat "High-efficiency single-photon generation via large-scale active time multiplexing"

[2] A. L. Migdall, D. Branning, S. Castelletto "Tailoring single-photon and multiphoton probabilities of a single-photon on-demand source"

Обзор источников одиночных фотонов

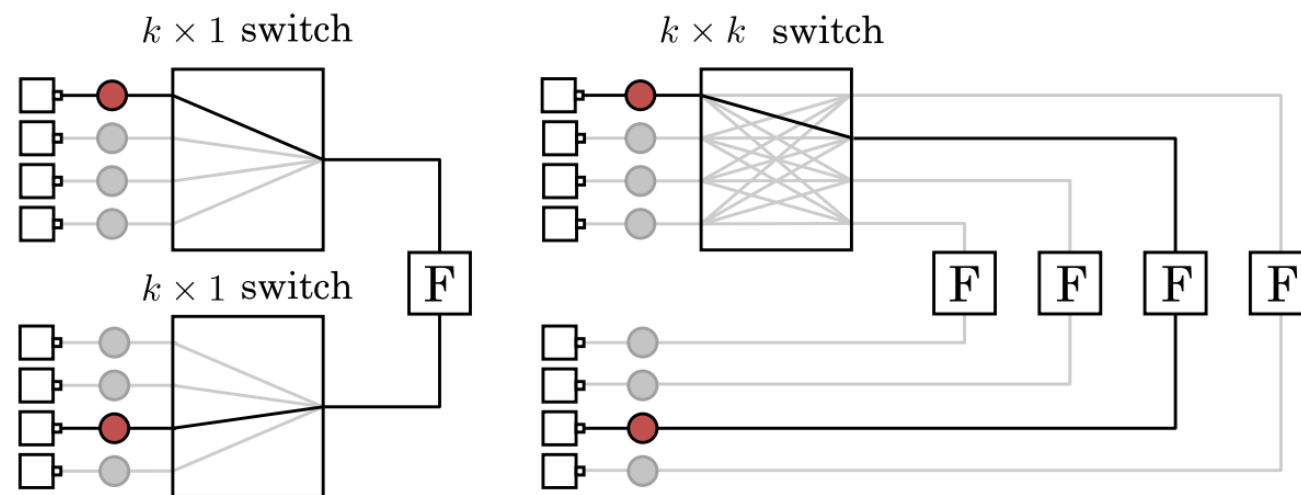
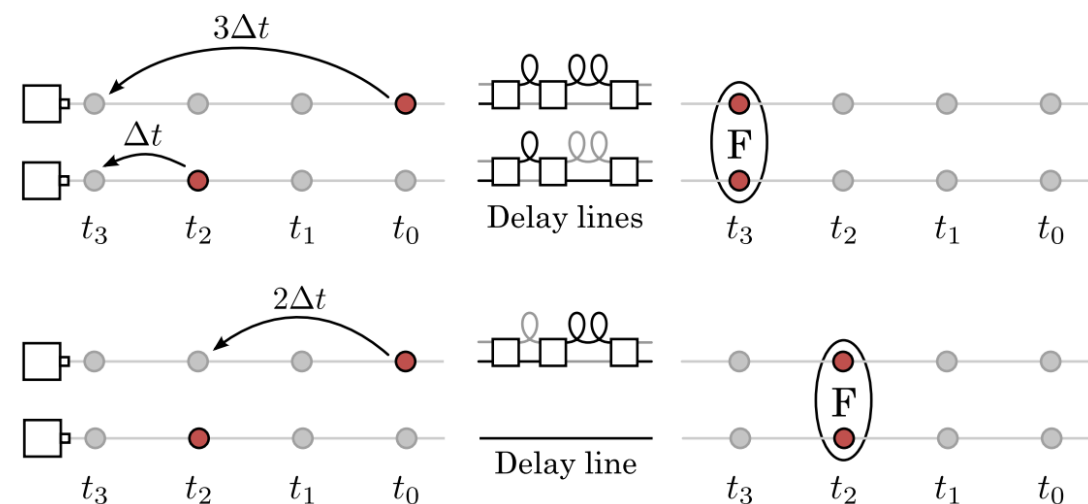
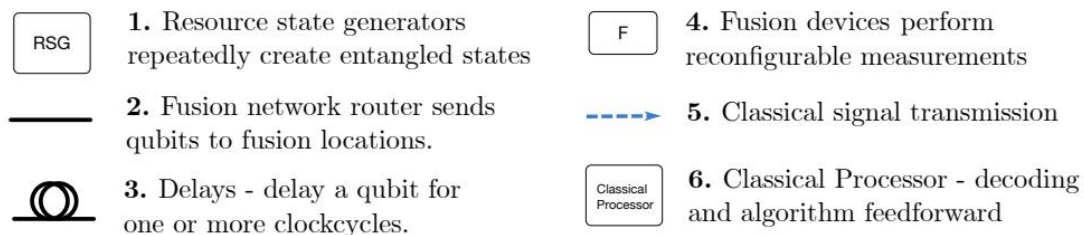
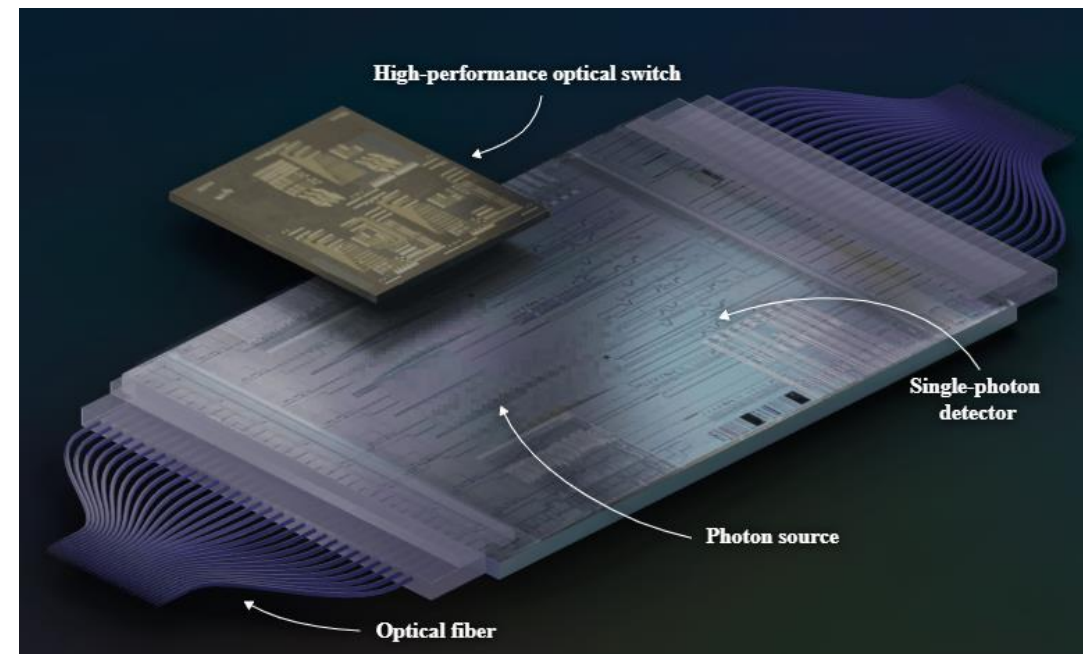
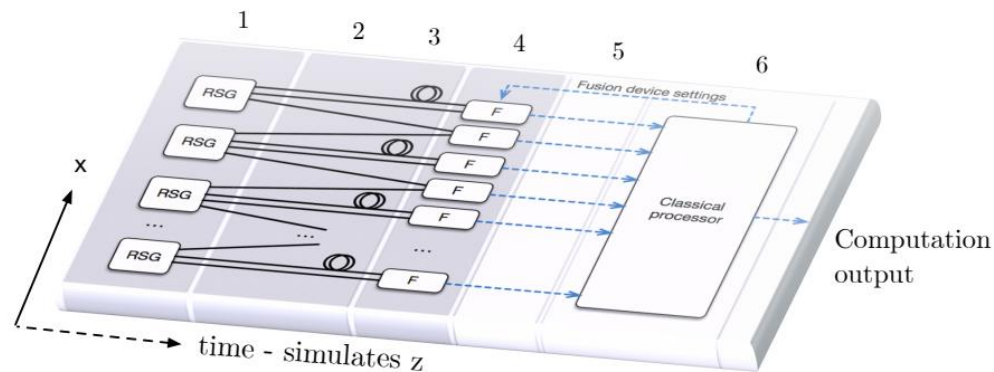
Ссылка	Тип источника	Частота генерации (МГц)	Вероятность генерации одиночного фотона $P^1(0)$
[2]	СПР	~170	~0.02
[3]	СПР	~80	~0.03
[4]	Мультиплексирование (пространственное)	80	~0.001
[5]	Мультиплексирование (временное)	0.05	0.386
[1]	Мультиплексирование (временное)	0.5	0.667
[6]	Квантовая точка	80	0.14
[7]	Квантовая точка	76	0.337



Ссылка	Тип источника	Частота генерации (МГц)	Вероятность генерации одиночного фотона	$g^{(2)}(0)$
[2]	СПР	~170	~0.02	~0.1
[3]	СПР	~80	~0.03	~0.1
[4]	Мультиплексирование (пространственное)	80	~0.001	~0.5
[5]	Мультиплексирование (временное)	0.05	0.386	0.48
[1]	Мультиплексирование (временное)	0.5	0.667	0.269
[6]	Квантовая точка	80	0.14	0.013
[7]	Квантовая точка	76	0.337	0.027

[2] Xi-Lin Wang, Luo-Kan Chen, W. Li, H.-L. Huang “Experimental Ten-Photon Entanglement”
[3] Han-Sen Zhong, Yuan Li, Wei Li, Li-Chao Peng “12-Photon Entanglement and Scalable Scattershot Boson Sampling with Optimal Entangled-Photon Pairs from Parametric Down-Conversion”
[4] X. Ma, S. Zotter, J. Kofler “Experimental generation of single photons via active multiplexing”
[5] F. Kaneda, B. G. Christensen, J. J. Wong “Time-multiplexed heralded single-photon source”
[6] J. C. Lored, N. A. Zakaria, N. Somaschi “Scalable performance in solid-state single-photon sources”
[7] H. Wang, Y. He, Y.-H. Li, Z.-E. Su “High-efficiency multiphoton boson sampling”

Актуальность



Цель работы: Создание источника одиночных фотонов на основе эффекта СПР с использованием принципа временного мультиплексирования, расчёт и моделирование его основных характеристик.

Спонтанное параметрическое рассеяние

$$|\Psi_{SPDC}\rangle = \iint d\Omega_s d\Omega_i \psi(\Omega_s, \Omega_i) \hat{a}_{\Omega_s}^\dagger \hat{a}_{\Omega_i}^\dagger |vac\rangle$$

$$\psi(\Omega_s, \Omega_i) = N \exp\left[-\frac{(\Omega_s + \Omega_i)^2}{4\sigma_p^2}\right] *$$

$$* \operatorname{sinc}\left[\frac{\Delta k L}{2}\right] \exp[-i\Delta k L] \exp\left[-\frac{\Omega_s^2}{4\sigma_s^2} - \frac{\Omega_i^2}{4\sigma_i^2}\right]$$

$\psi(\Omega_s, \Omega_i)$ - функция совместной спектральной амплитуды (Joint spectral amplitude)

N – нормировочный коэффициент

$\sigma_{(p,s,i)}$ - полуширина (FWHM) спектра/спектрального фильтра

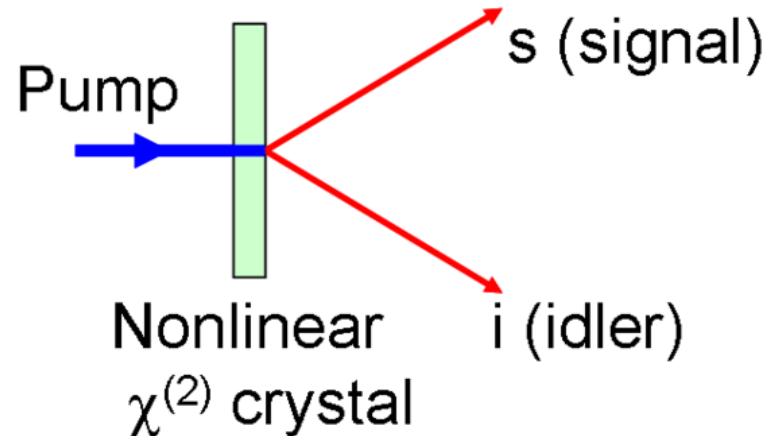
L – длина кристалла

Используемый кристалл – ppktp

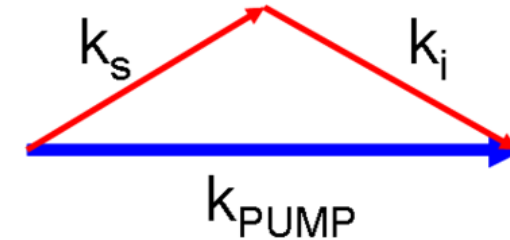
Длина кристалла – 2 мм

Период доменов – 29.4 мкм

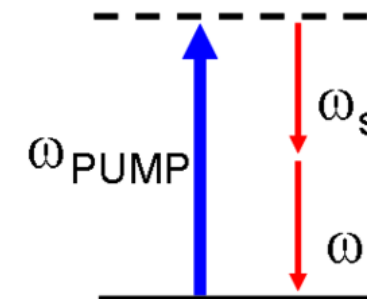
Фазовый синхронизм – тип II



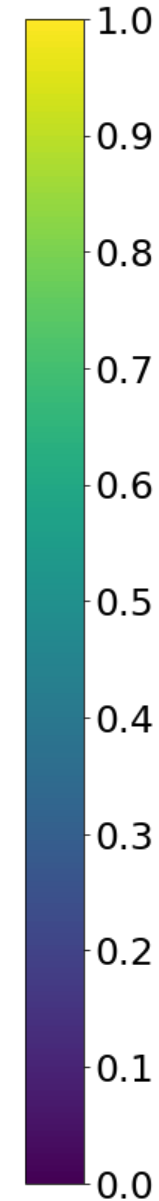
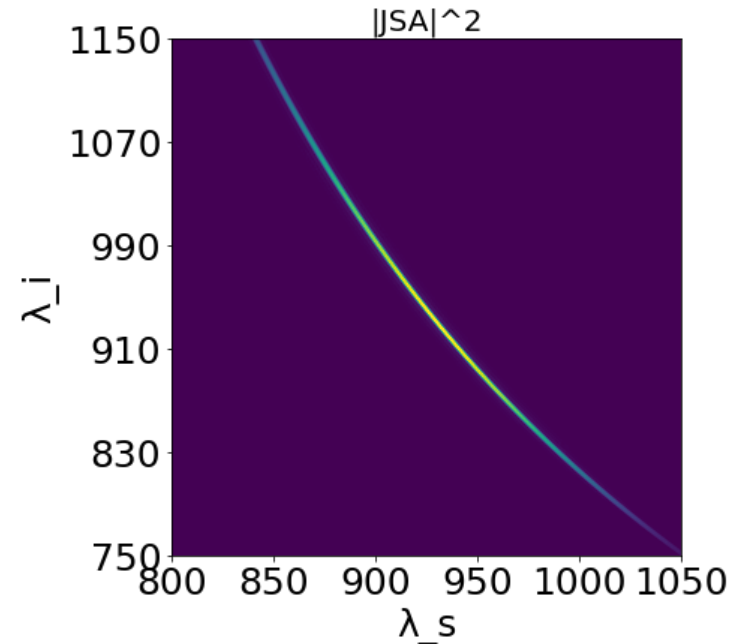
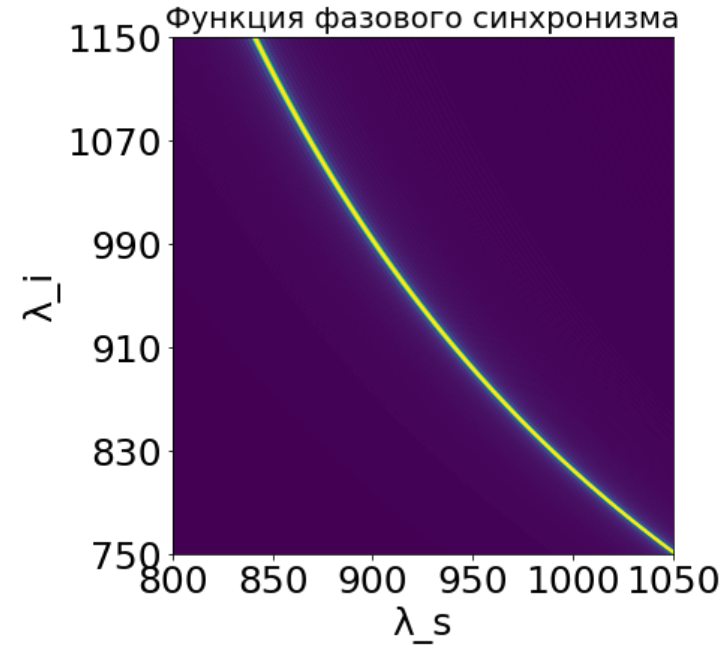
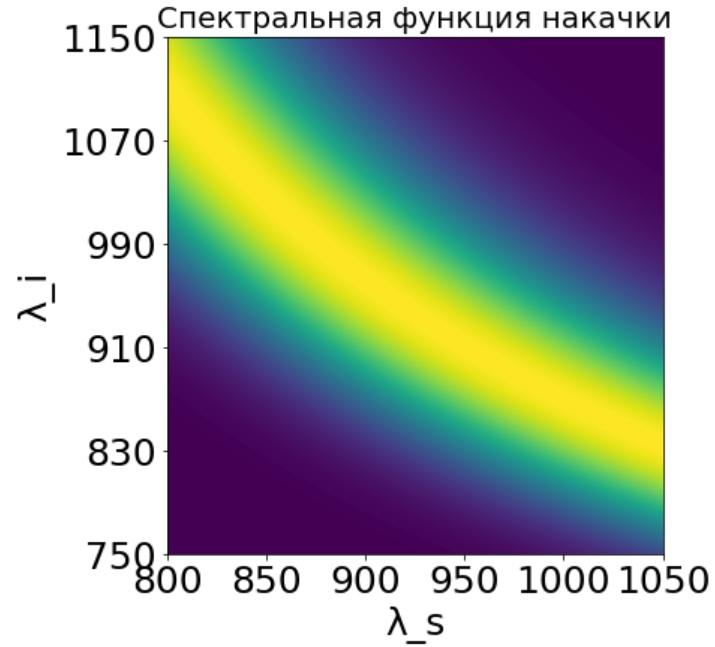
$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \text{ - фазовый синхронизм}$$



$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \text{ - частотный синхронизм}$$



Моделирование спектральной функции СПР



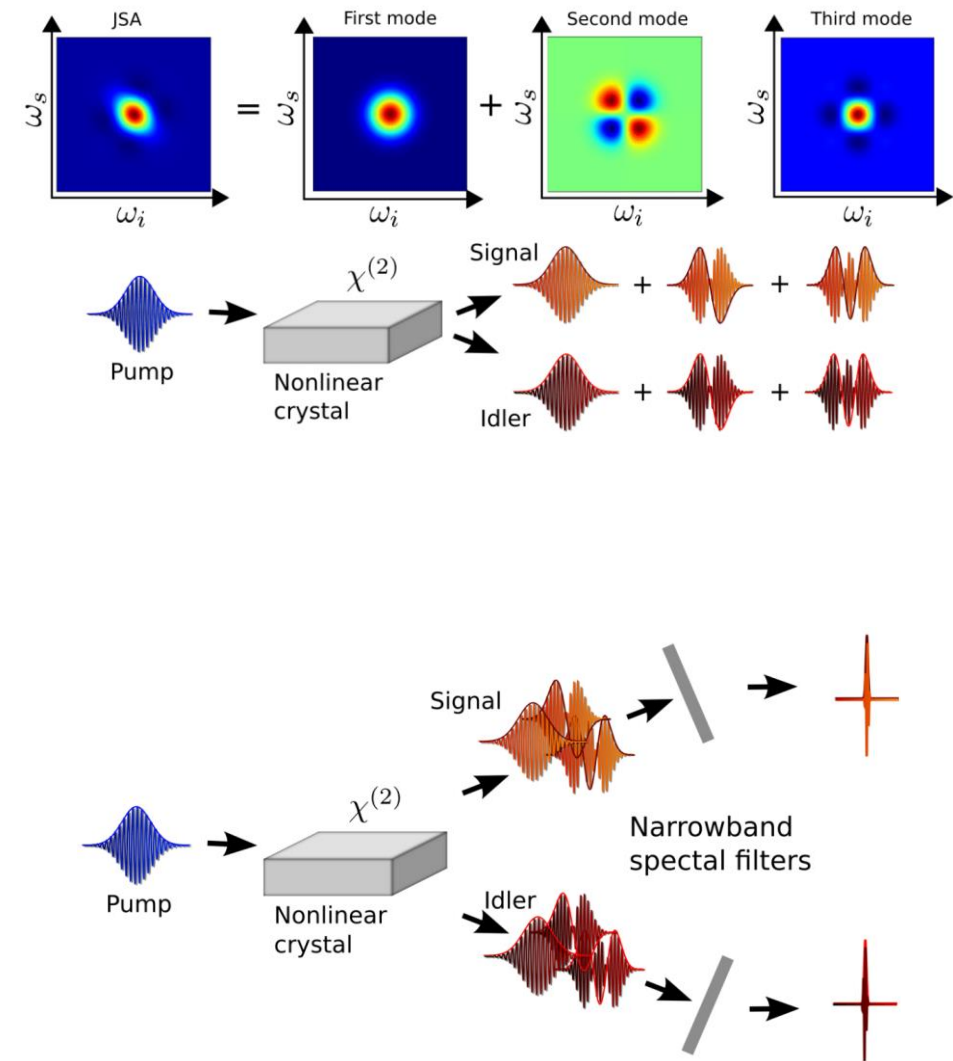
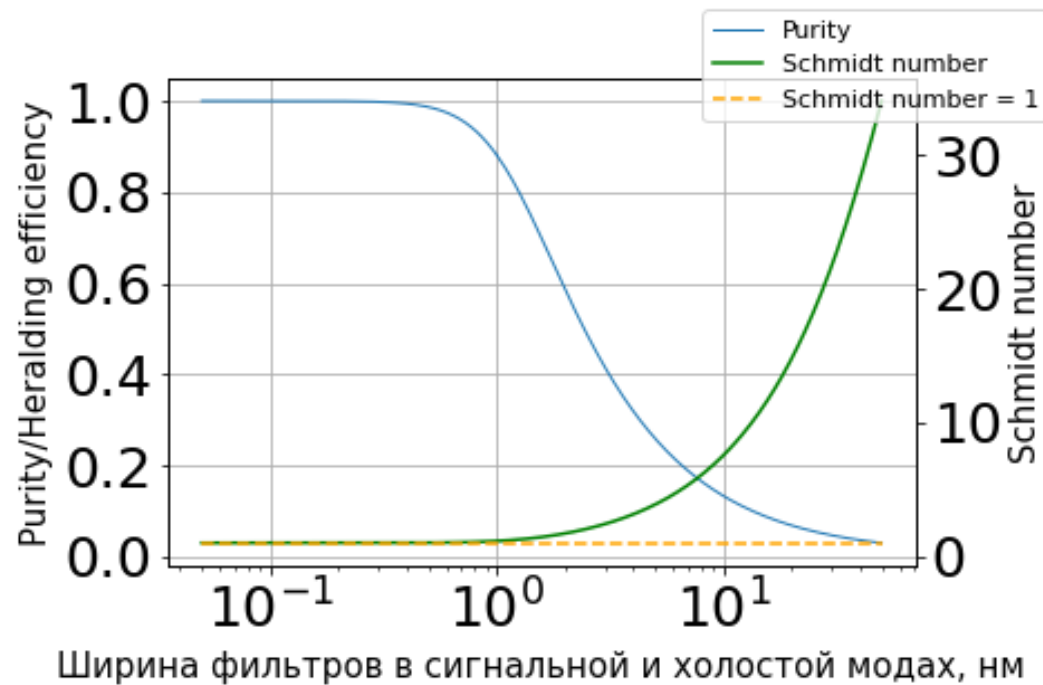
Чистота

$$P = \text{Tr}(\rho_s^2) \text{ [10]}$$

$$\rho_s = \text{Tr}_i(|\psi\rangle\langle\psi|)$$

$$\psi(\omega_s, \omega_i) = \sum_j \sqrt{\lambda_j} u_j(\omega_s) v_j(\omega_i) \text{ [11]}$$

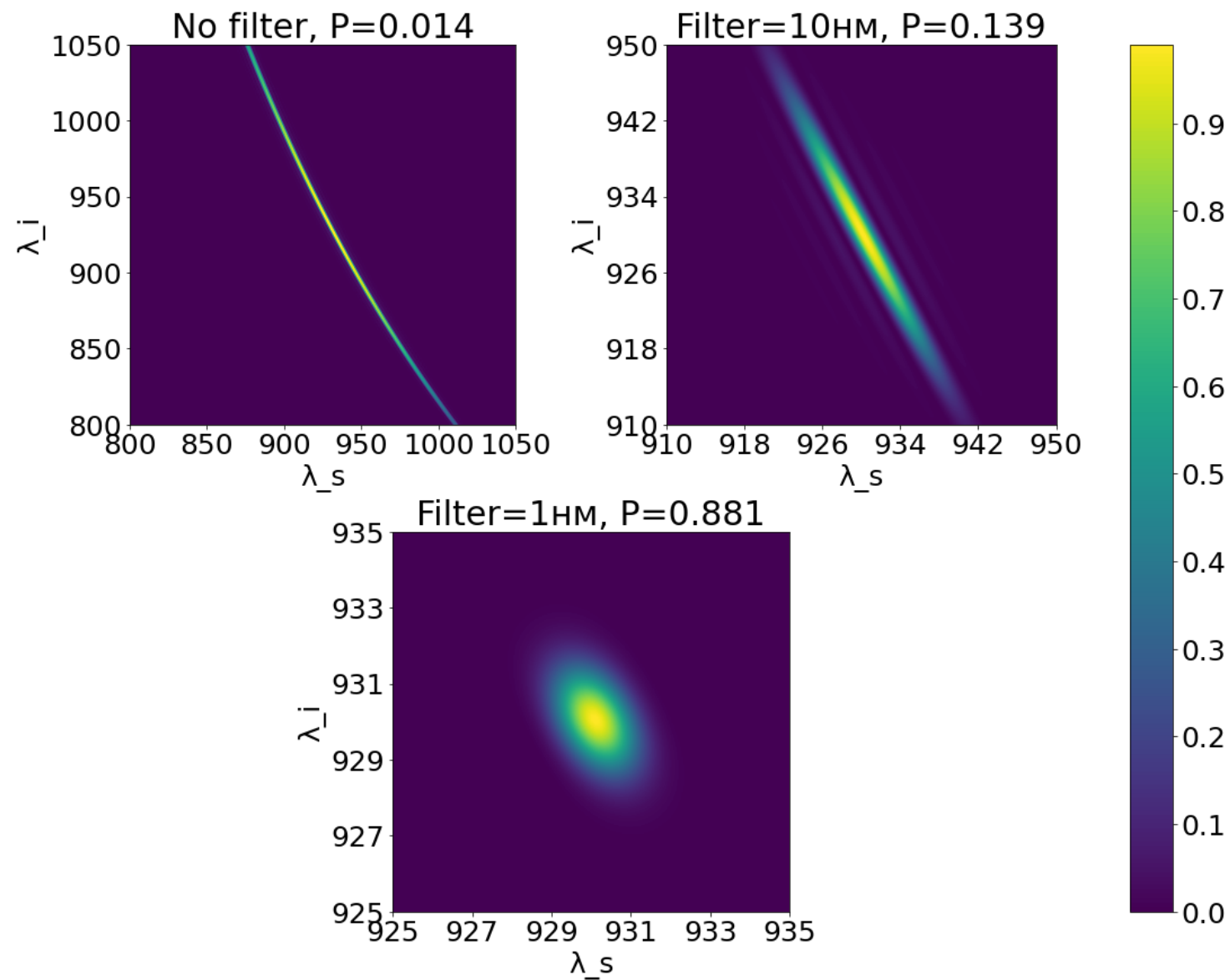
$$P = \sum_j \lambda_j^2$$



[10] Evan Meyer-Scott, Nicola Montaut "Limits on the heralding efficiencies and spectral purities of spectrally-filtered single photons from photon pair sources"

[11] Ryan S. Bennink "Optimal collinear Gaussian beams for spontaneous parametric down-conversion"

Чистота



Эффективность оповещения

$$\eta_{s(i)} = P_{si} / P_{i(s)}$$

$$\eta_c = P_{si} / \sqrt{P_s P_i}$$

$$P_{si} = \int |\psi(\omega_s, \omega_i)|^2 d\omega_s d\omega_i$$

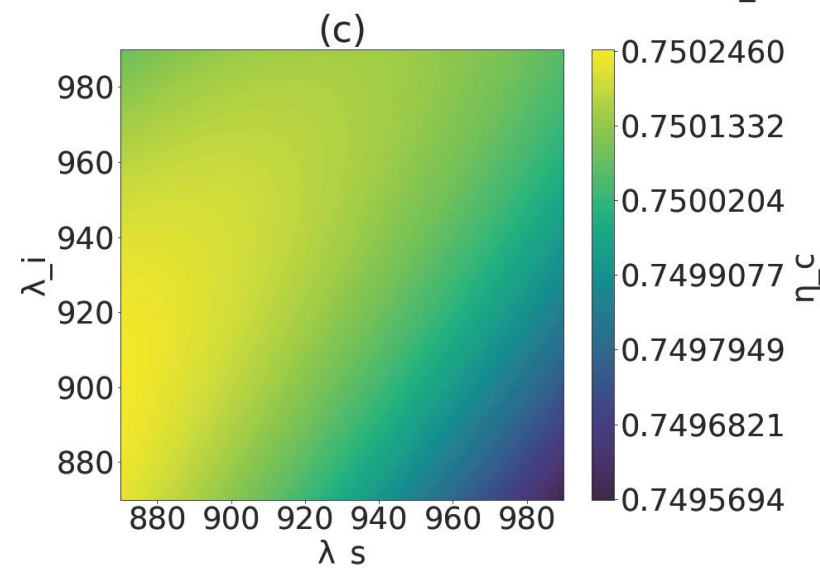
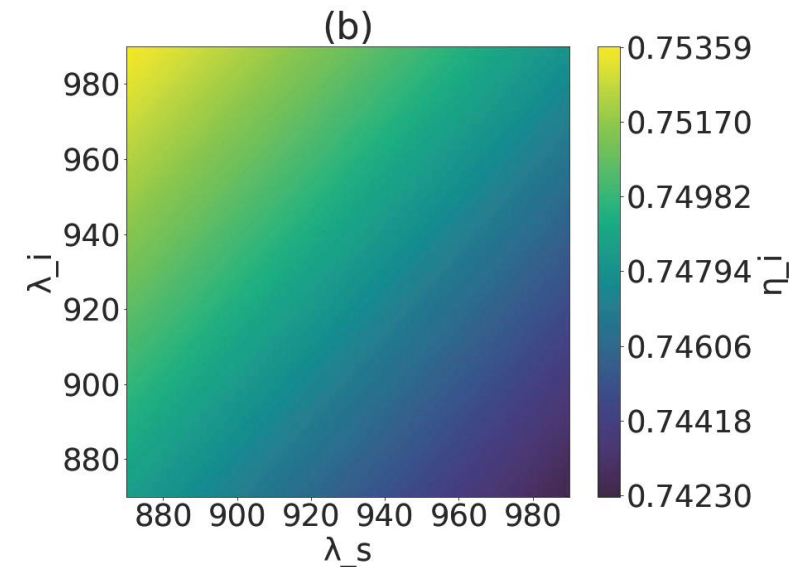
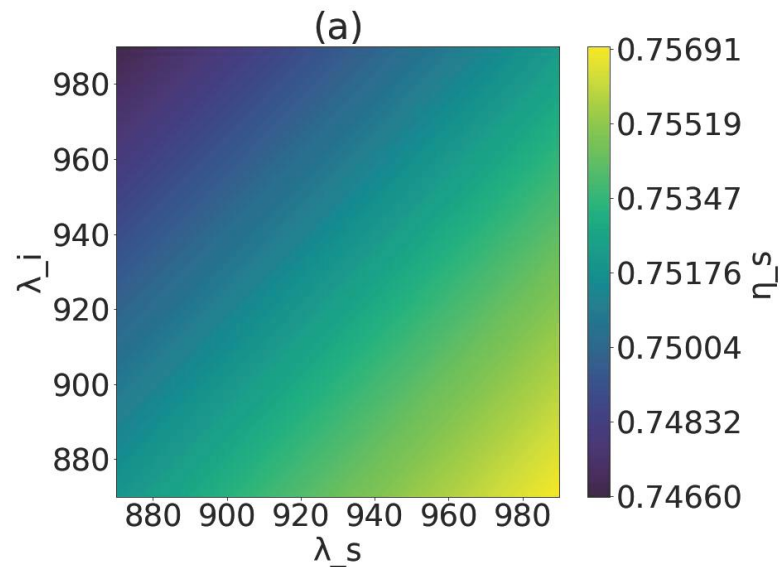
$$P_s = \int \sum_{n=0}^{\infty} |\psi_n(\omega_s, \omega_i)|^2 d\omega_s d\omega_i$$

P_{si} - вероятность сбора пары фотонов

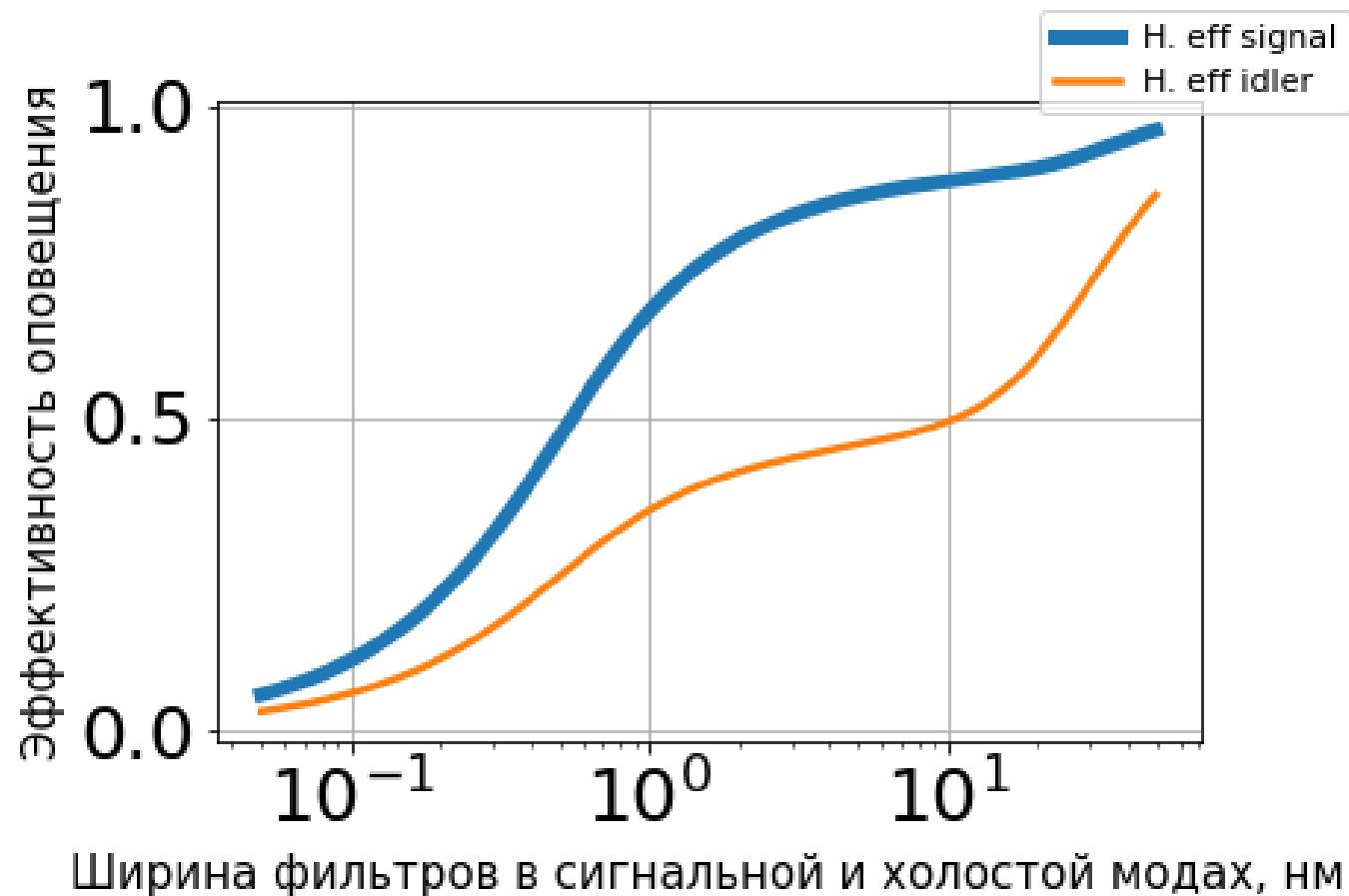
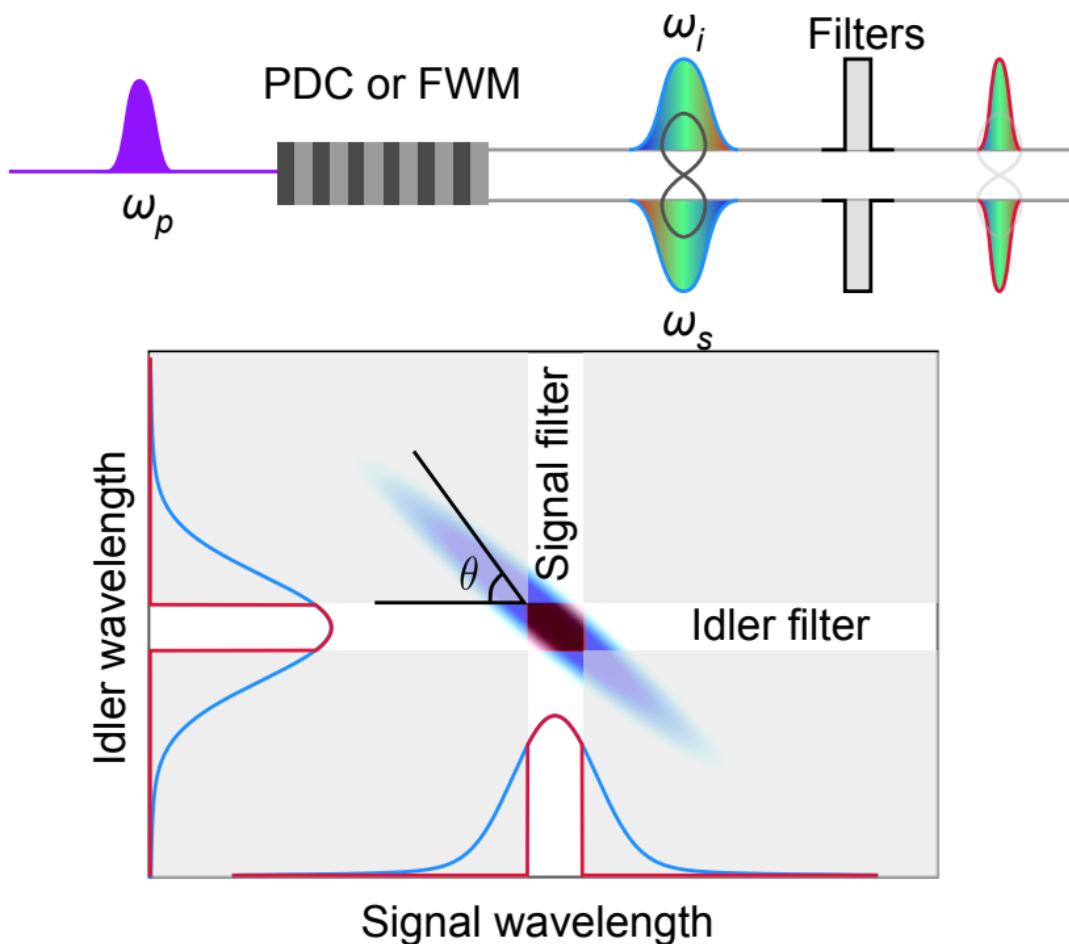
$P_{s(i)}$ - вероятность сбора

сигнального (холостого) фотона

$\psi_n(\omega_s, \omega_i)$ - поле раскладывается по пространственным модам idler фотона через моды Лаггера-Гаусса



Эффективность оповещения при использовании фильтров



Альтернативные способы увеличения чистоты

Зависимость чистоты от полуширины спектра накачки σ_λ и
длины кристалла L

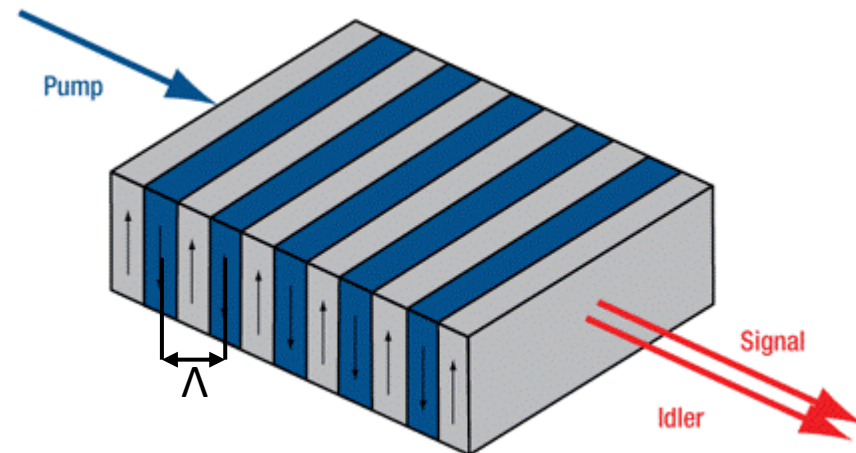
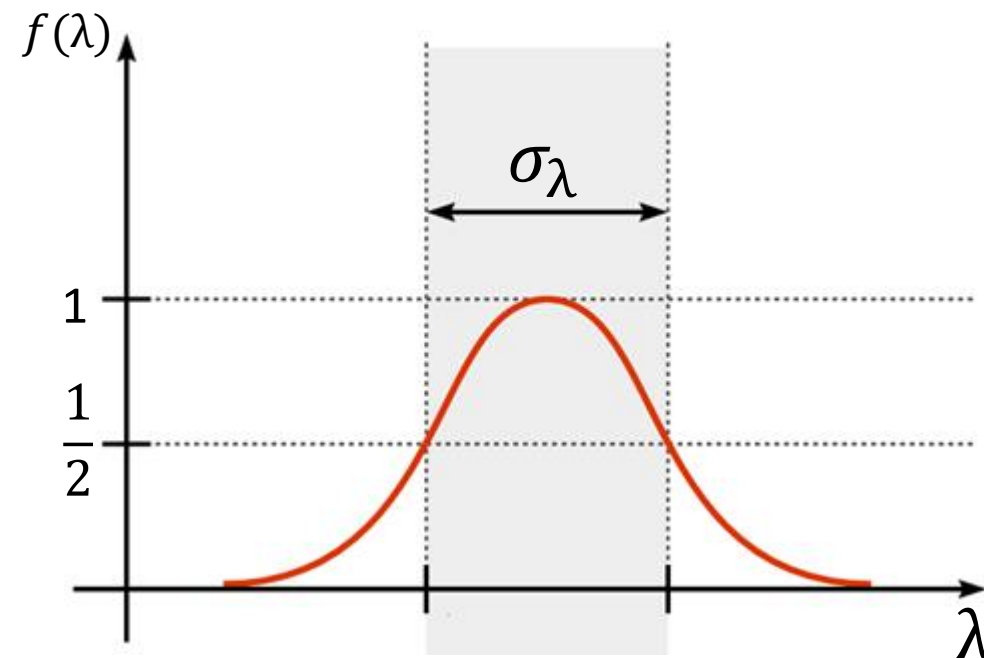
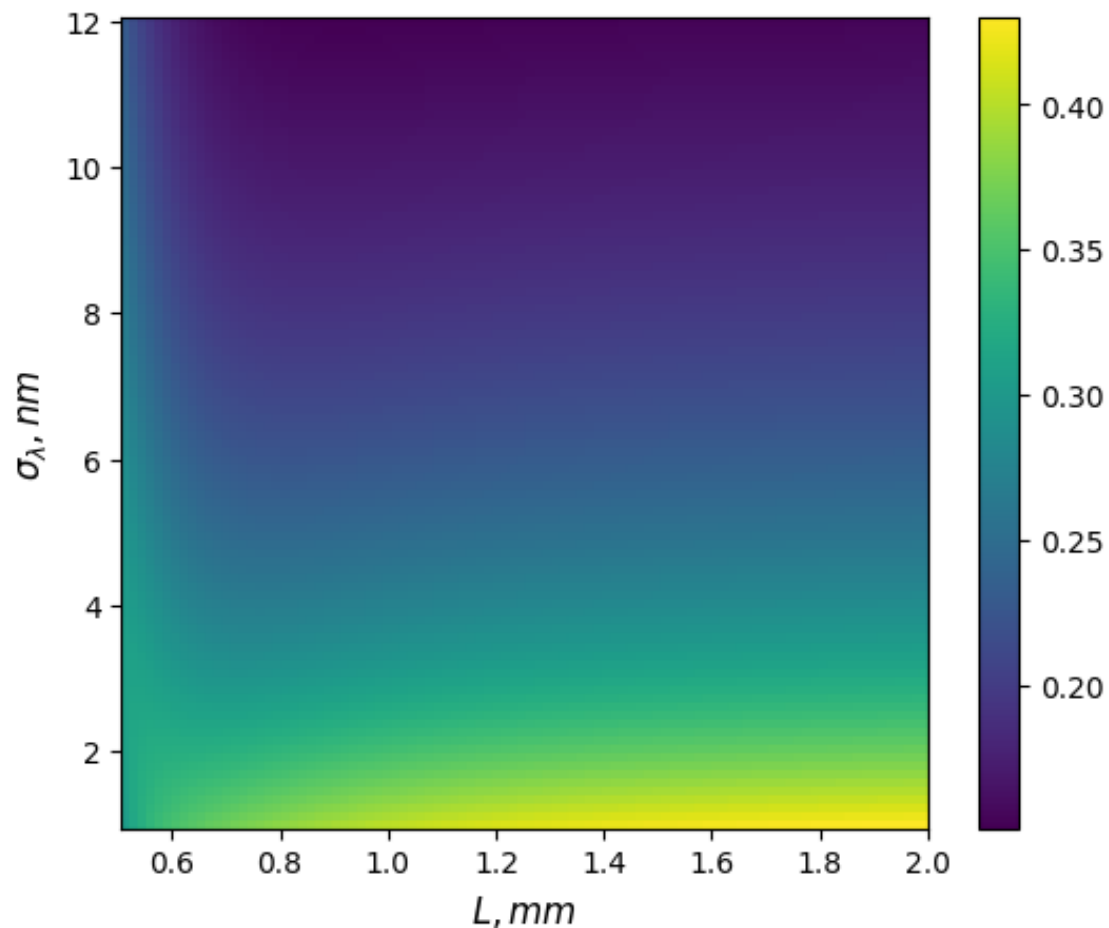
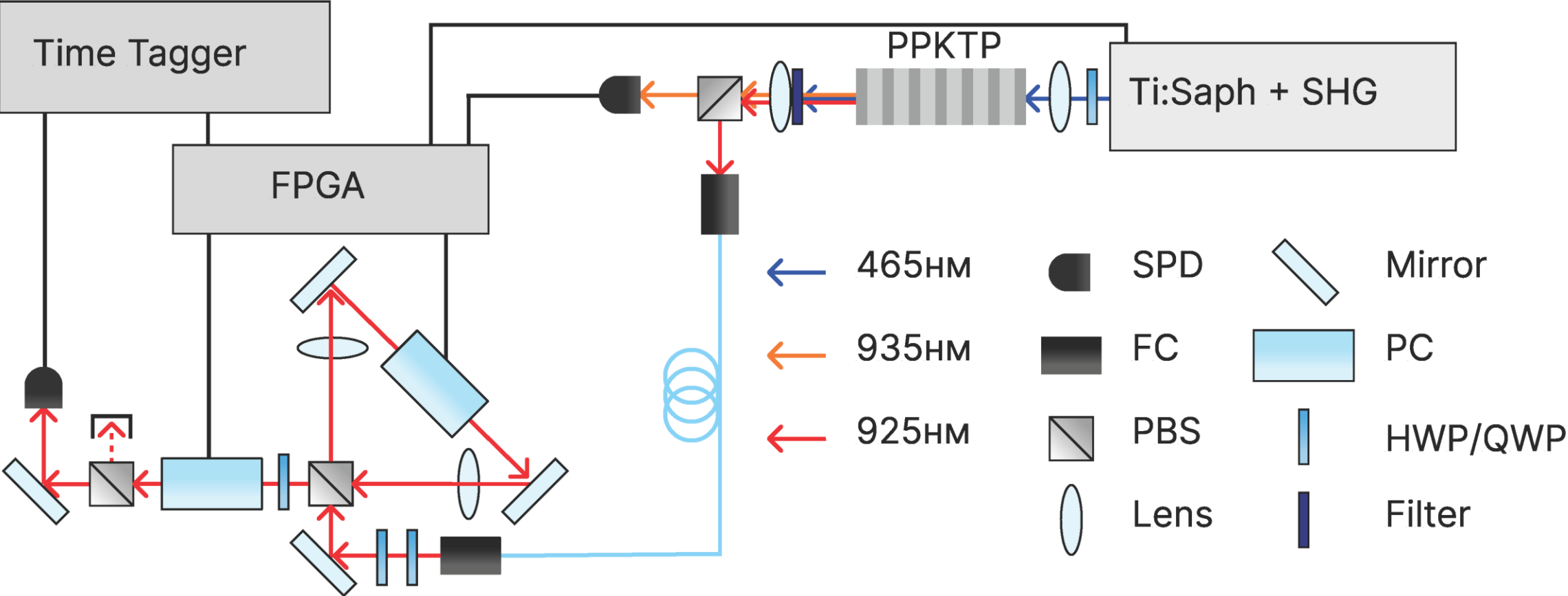
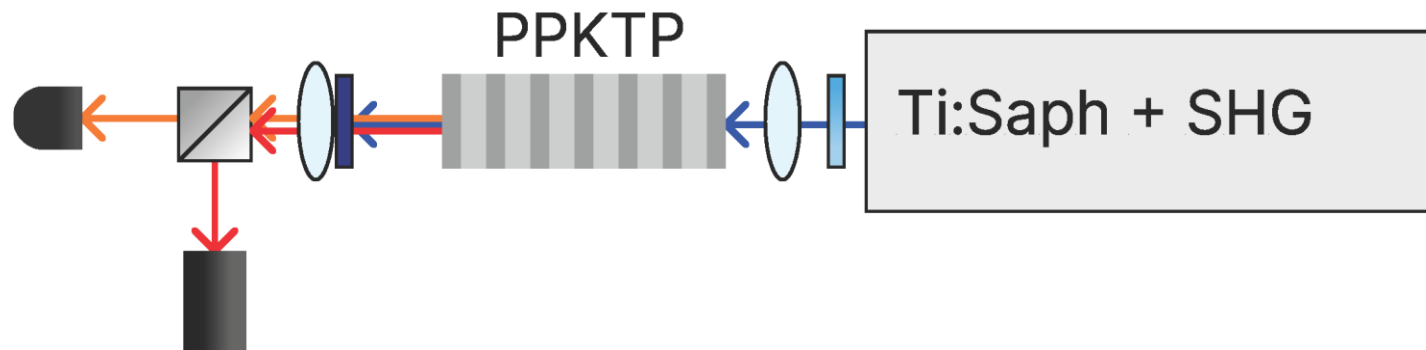
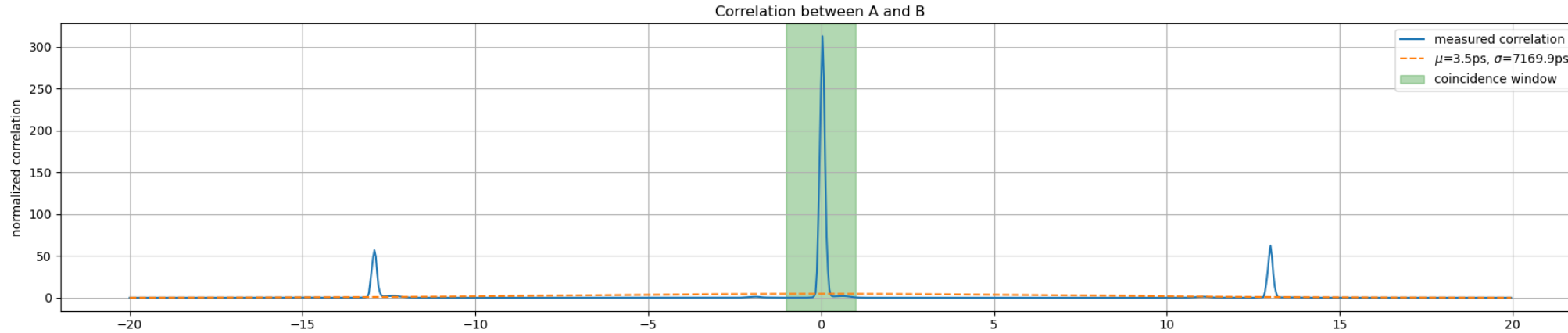


Схема эксперимента



Генерация СПР



Сигнал в H канале – 2,422 MHz

Сигнал в V канале – 2,548 MHz

Кол-во совпадений – 0,464 MHz

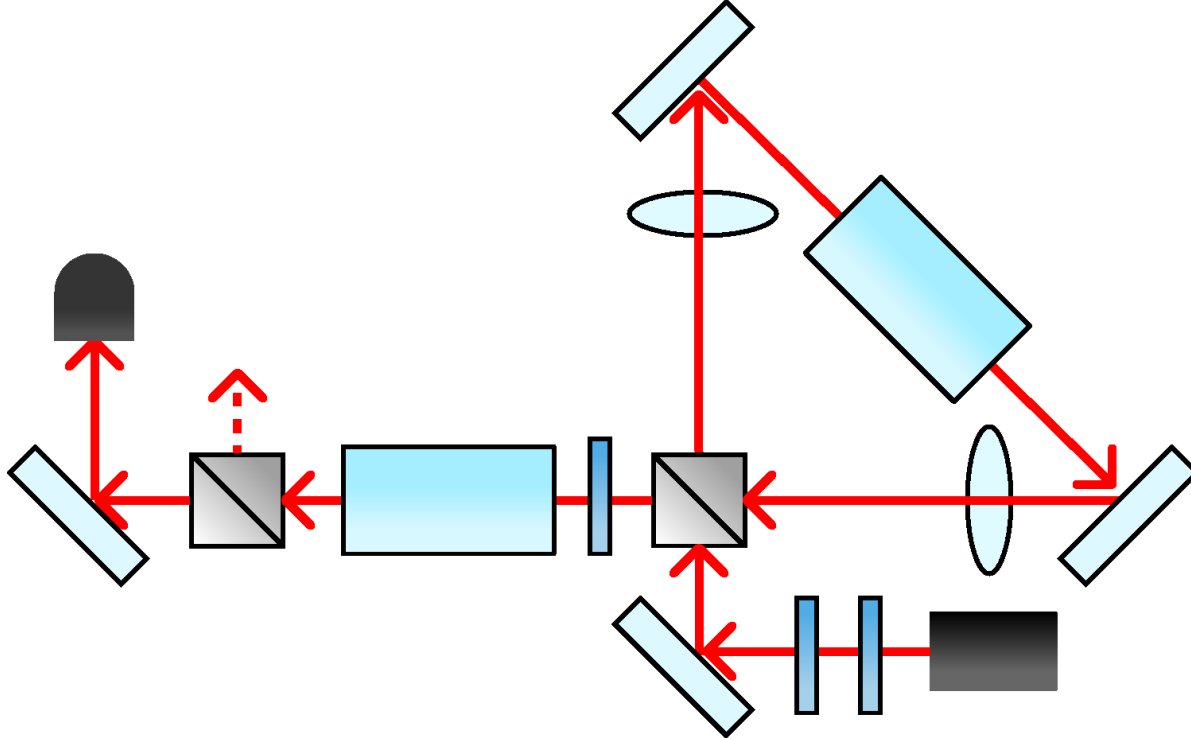
Оптические потери $\eta_t = 0.2$

Эффективности детекторов $\eta_{di} = 0.7, \eta_{di} = 0.67$

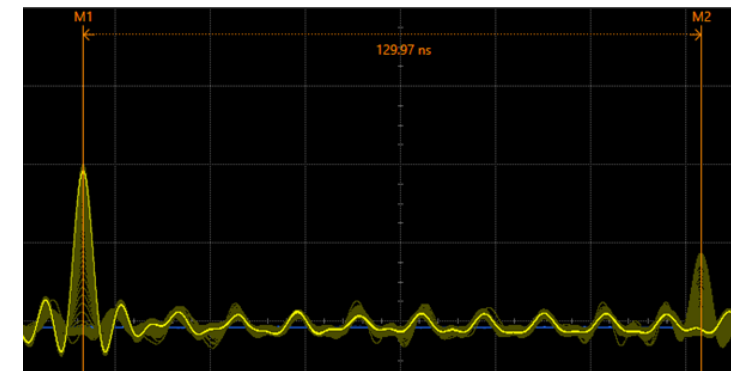
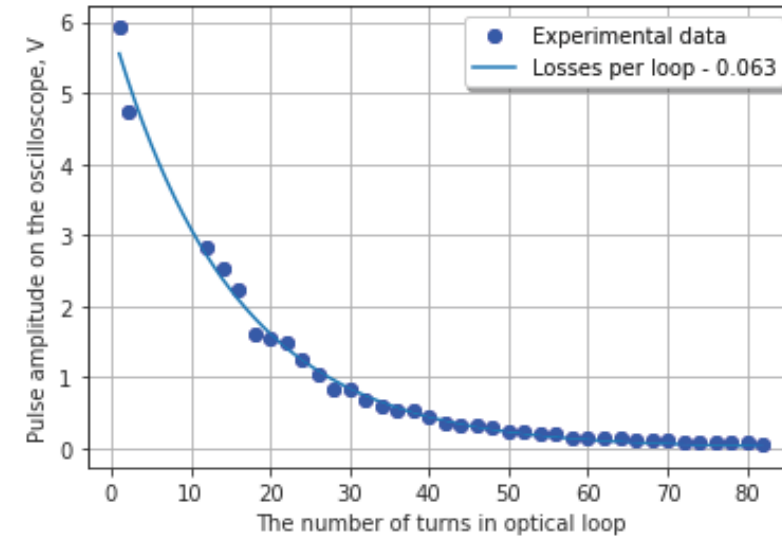
Heralding efficiency H – 0,338

Heralding efficiency V – 0,339

Настройка оптической петли



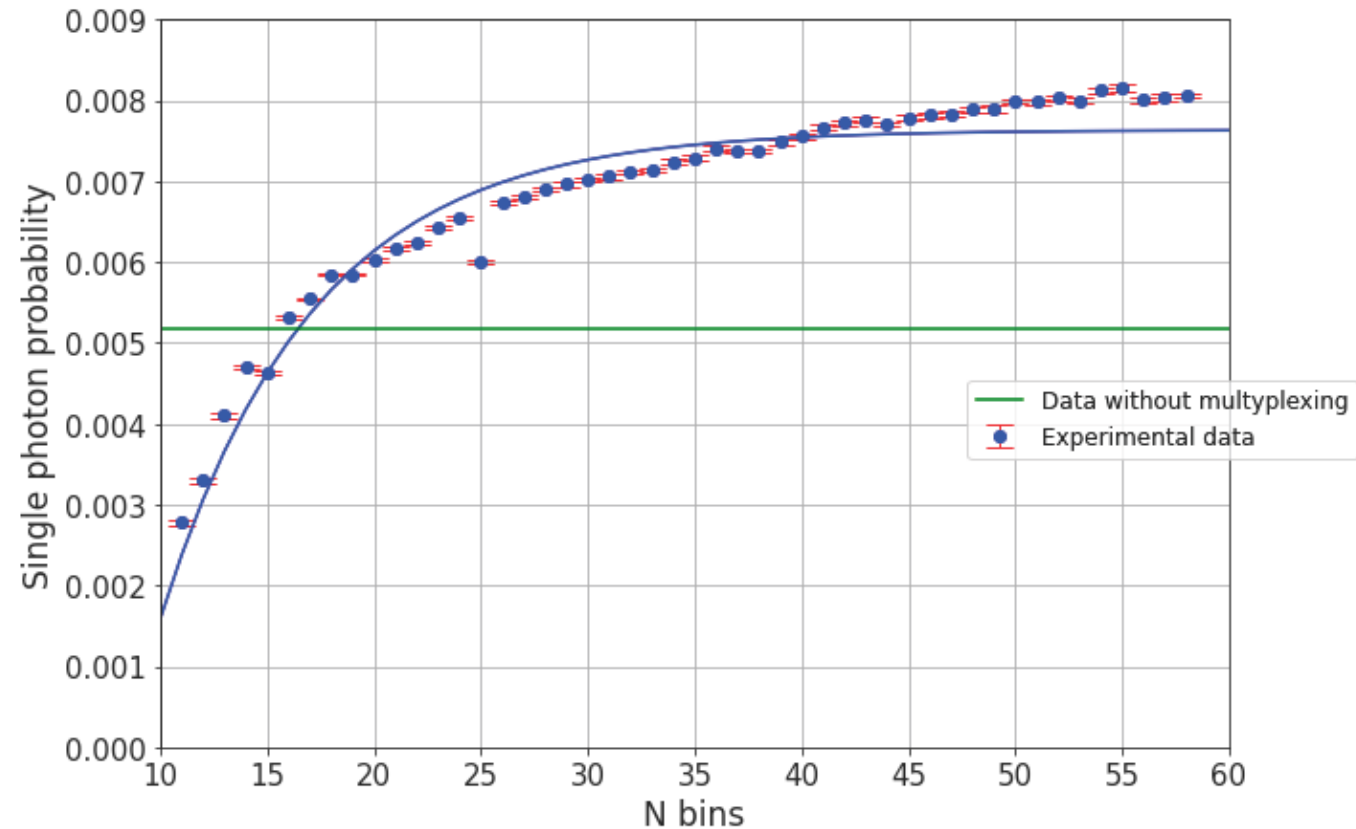
PBS – 3%
Линза 1 – 1.3%
Зеркало 1 – 0.77%
РС – 0.39%
Зеркало 2 – 0.64%
Линза 2 – 0.26%
Итого – 6.36%



12 циклов

32 цикла

Демонстрация мультиплексирования



$$P(1) = \frac{\mu \eta_{he}}{(1 + \mu)^2}$$

$$P = P(1)(1 - \eta_{sl}) + \sum_{k=6}^{N-5} P(1)(1 - P(1))^{N-k-4} (1 - \eta_{sl})^{N-k+1} =$$

$$= P(1)(1 - \eta_{sl}) + P(1)(1 - P(1))(1 - \eta_{sl})^6 \frac{(1 - P(1))^{N-10} (1 - \eta_{sl})^{N-10-1}}{(1 - P(1))(1 - \eta_{sl}) - 1}$$

μ – Среднее число фотонов на импульс накачки

η_{he} - Эффективность оповещения

η_{sl} - Потери в оптической петле

1. Построена модель расчёта функции JSA, характеризующей генерируемое состояние.
2. На основе полученной модели произведён расчёт характеристик генерируемого состояния – Чистоты и Эффективности оповещения.
3. Изучены различные методы повышения значений Чистоты.
4. Собрана экспериментальная установка для генерации одиночных фотонов с использованием принципа временного мультиплексирования.
5. Произведена настройка генерации СПР, наблюдение сигнала совпадений одиночных фотонов $\sim -0,464$ MHz.
6. Произведена настройка оптической ячейки памяти с потерями за один оборот $\sim 6\%$.
7. Произведена генерация одиночных фотонов с использованием принципа временного мультиплексирования. Вероятность генерации увеличилась с ~ 0.005 до ~ 0.008 .

Спасибо за внимание!