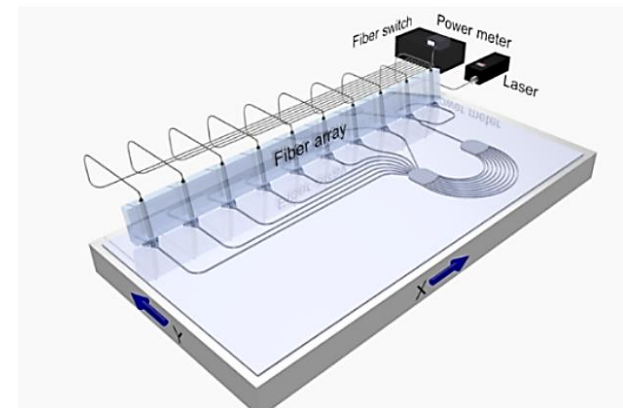
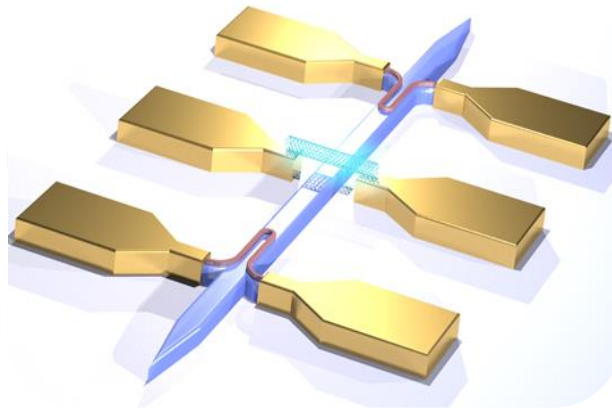
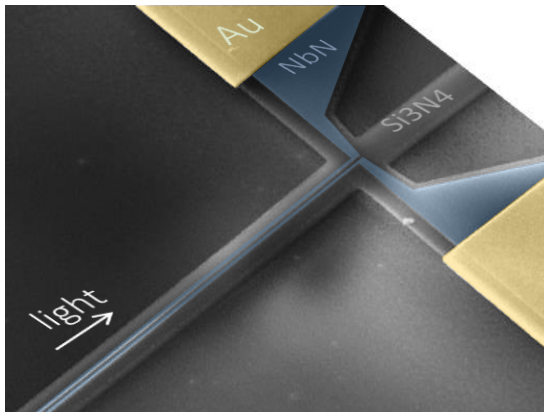


# Сверхпроводниковый однофотонный детектор на оптическом волноводе из нитрида кремния

Ковалюк Вадим

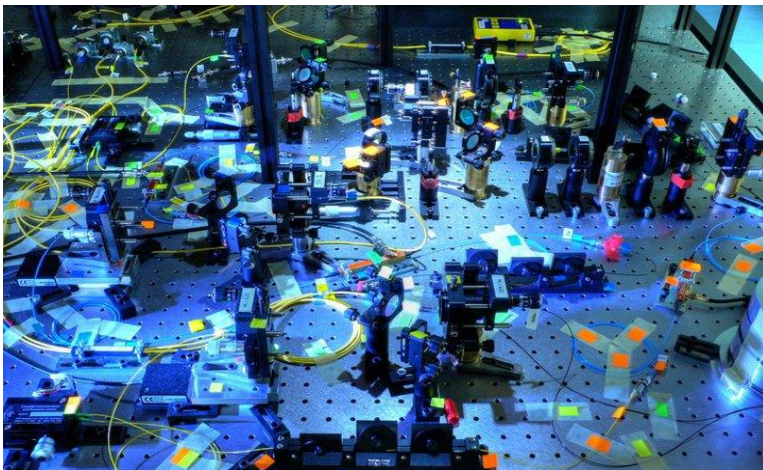
Лаборатория квантовых детекторов (МПУ)



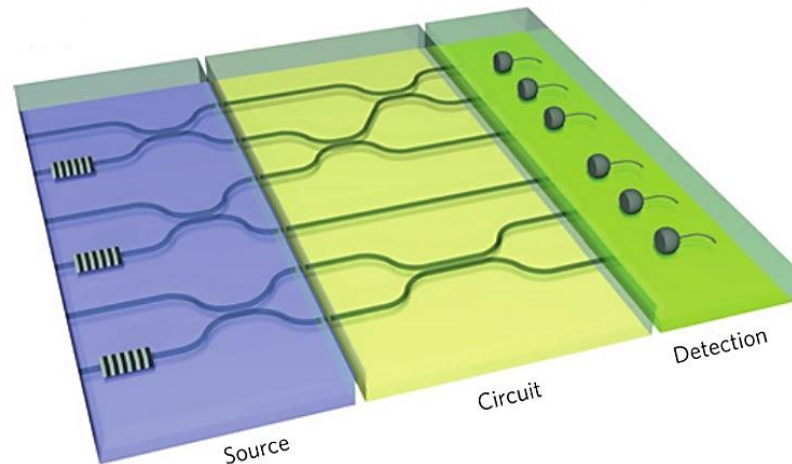
1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

Схемы на оптическом столе ( $\sim M^3$ )



Квантово-оптическая микросхема QPIC ( $\sim cm^2$ )



## Преимущества QPICs:

- ✓ Большая плотность оптических элементов
- ✓ Высокая температурная стабильность
- ✓ Отсутствие необходимости выравнивания
- ✓ Низкое энергопотребление
- ✓ Масштабируемость
- ✓ Линейный квантовый компьютер

## Проблемы:

- Отсутствие материала, имеющего все необходимые свойства (гибридные схемы)
- Необходимость компонентов с низкими потерями (уровень шума 1%, 0,1-0,01%, 33%)

TABLE I  
TECHNOLOGY PLATFORMS FOR QUANTUM PHOTONICS

Metric	Silicon	Silica	Direct-Write	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	InP	GaAs	LiNbO <sub>3</sub>
Density ( $1/r^2$ )	●●●●●	●●	●	●●●	●●●	●●●●●	●●
Loss ( $1/\alpha r$ )	●●●●●	●●●●	●●	●●●●	●●●	●●●●	●●●
Passive optics	●●●●●	●●●●●	●●●●	●●●●	●●	●	●●●
Active optics	●●●	●	●	●	●●●●	●●●	●●●●●
Photon sources	●●●	●	●●	●●●●	●●	●●●●●	●●●●

[1] J. W. Silverstone *et. al* "Silicon Quantum Photonics," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 309–402, 2016.

[2] S. Bogdanov *et.al* "Material platforms for integrated quantum photonics," *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 1, pp. 111–132, 2016.

## Особенности нитрида кремния

- ✓ **Широкая запрещённая зона** → широкий спектральный диапазон работы
- ✓ **Высокий показатель преломления относительно окружения** → маленькие радиусы поворота, компактный дизайн
- ✓ **Отличный от нуля коэффициент нелинейности** → возможность реализации однофотонных источников на чипе
- ✓ **Хорошие механические свойства**
- ✓ **Совместимость с КМОП технологией и Si электроникой**
- ✓ **Совместимость с NbN технологией**

# Сверхпроводниковые детекторы на чипе

## SSPD на кремнии

- + Эффективность: 91%
- + Джиттер: 18пс
- + Мертвое время: ~1 нс
- + Скорость счёта: ~100 МГц)

## SSPD на GaAs

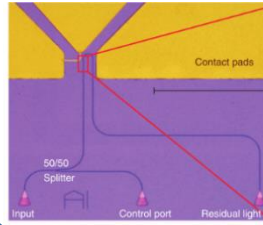
- Эффективность:  $\approx 20\%$ @1310нм
- +/- Джиттер:  $\approx 60$ пс

## TES на оксиде кремния

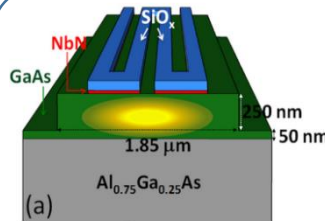
- + Эффективность:  $\sim 80\%$ @1550нм
- + Энергетическое разрешение
- Мёртвое время:  $\sim 1$  мкс
- Временное разрешение:  $\sim$ мкс
- Рабочая температура:  $\sim 100$  мК
- Дорогостоящее оборудование

## SSPD на алмазе

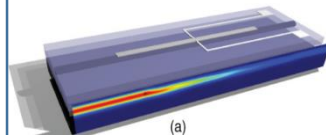
- + Эффективность:  $\sim 80\%$ @1550нм
- Джиттер:  $\sim 160$  пс



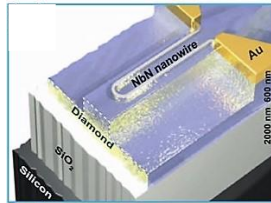
W. H. P. Pernice, C. Schuck, O. Minaeva, M. Li, G. N. Goltsman, A. V. Sergienko, and H. X. Tang, *Nat. Commun.*, vol. 3, p. 1325, 2012. (arxiv. Submitted on 26 Aug 2011)



J. P. Sprengers, A. Gaggero, D. Sahin, S. Jahanmirinejad, G. Frucci, F. Mattioli, R. Leoni, J. Beetz, M. Lerner, M. Kamp, S. Hfiling, R. Sanjines, and A. Fiore, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 181110, 2011.



T. Gerrits, N. Thomas-Peter, J. C. Gates, A. E. Lita, B. J. Metcalf, B. Calkins, N. A. Tomlin, A. E. Fox, A. L. Linares, J. B. Spring, N. K. Langford, R. P. Mirin, P. G. R. Smith, I. A. Walmsley, and S. W. Nam, *Phys. Rev. A*, vol. 84, no. 060301(R), p. 60301, 2011.



P. Rath, O. Kahl, S. Ferrari, F. Sproll, G. Lewes-Malandrakis, D. Brink, K. Ilin, M. Siegel, C. Nebel, and W. Pernice, *Light Sci. Appl.*, vol. 4, no. 10, 2015.

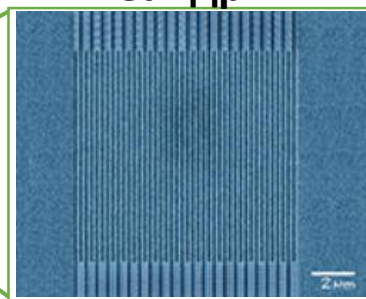
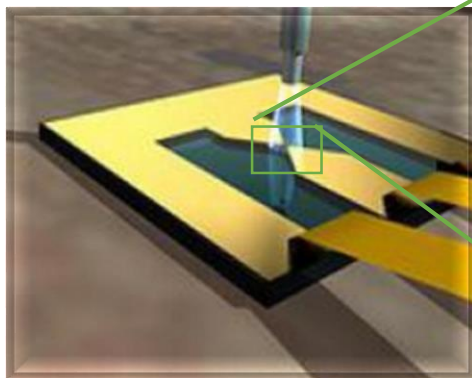
1. Мотивация работы
- 2. Механизм работы WSSPD**
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

## Первая работа по SSPD 2001 год (МПУ)

G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, "Picosecond superconducting single-photon optical detector," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 6, pp. 705–707, **2001**.

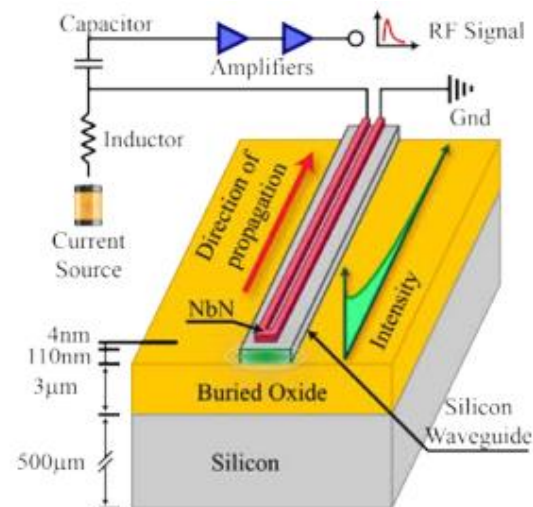
Позднее

Меандр



## Первая работа по WSSPD 2011 год

W. Pernice, C. Schuck, O. Minaeva, M. Li, G. N. Goltsman, A. V Sergienko, and H. X. Tang, "High Speed and High Efficiency Travelling Wave Single-Photon Detectors Embedded in Nanophotonic Circuits," *arXiv*, vol. 20, no. 5, pp. 1–14, 2011.

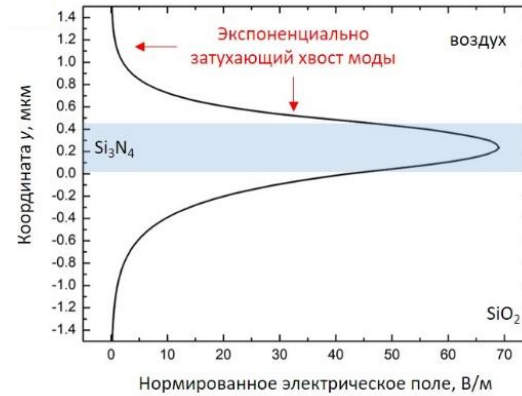
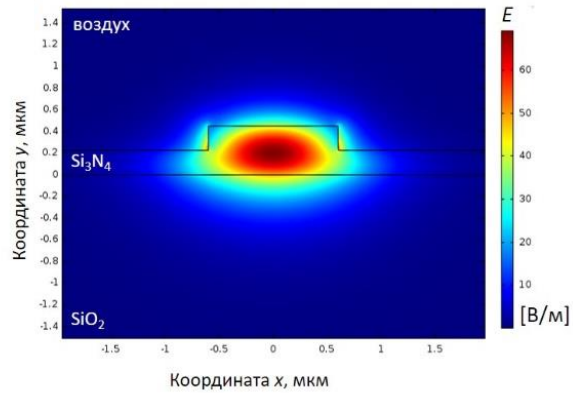


**Отличие** – способ реализации поглощения света, механизм детектирования один и тот же

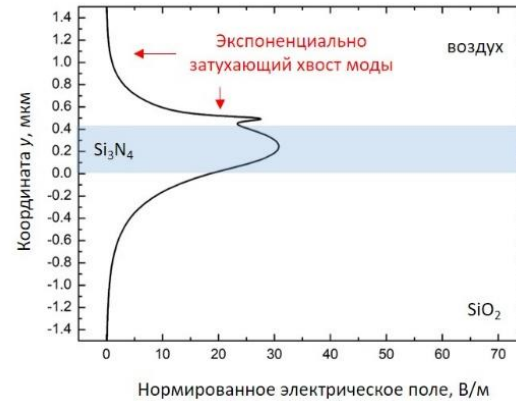
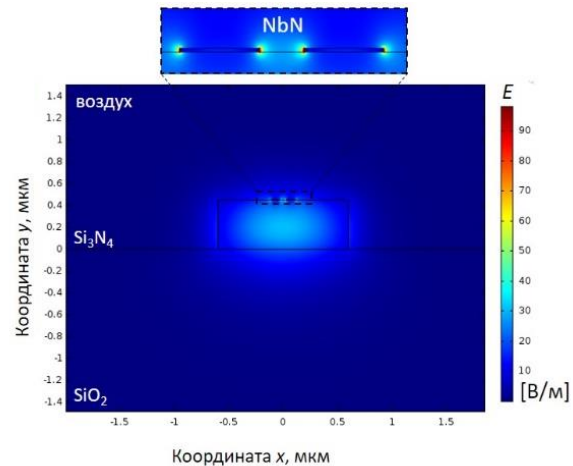


# Механизм работы WSSPD (поглощение)

## TE – мода без нитрида ниобия



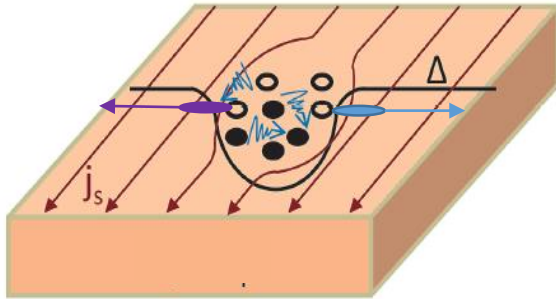
## TE – мода с нитридом ниобия



**Механизм – взаимодействие сверхпроводниковой нанополоски с экспоненциально затухающим хвостом основной моды волновода**

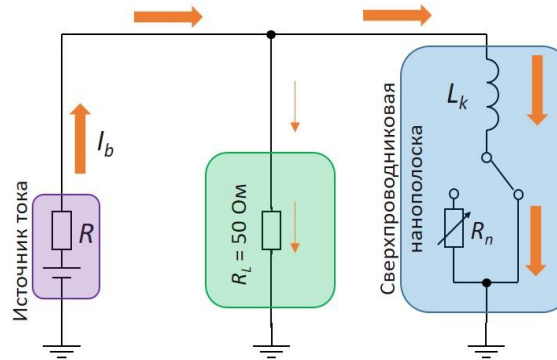
# Механизм работы WSSPD (формирование отклика)

## Образование горячего пятна

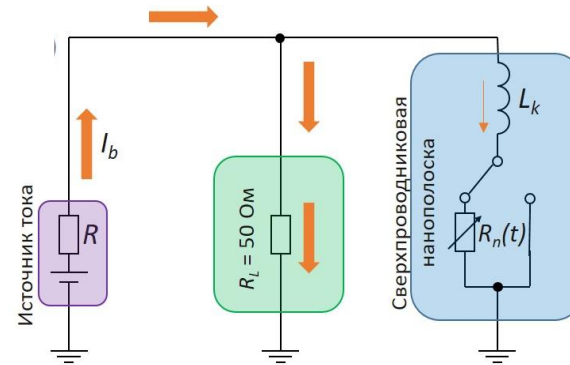


Если подавление  $\Delta$  и ток смещения достаточны, то рождается вихрь или пара вихрь-антивихрь

## До поглощения фотона

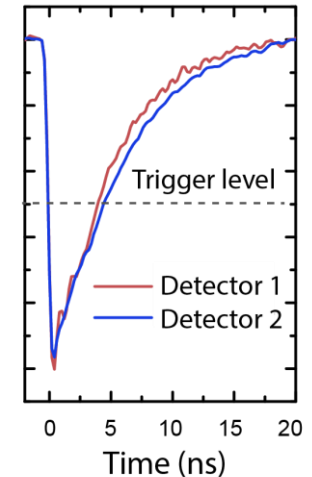


## После поглощения фотона



$$\tau_{fall} = \frac{L_k}{R_L + R_n}$$

$$\tau_{rise} = \frac{L_k}{R_L}$$

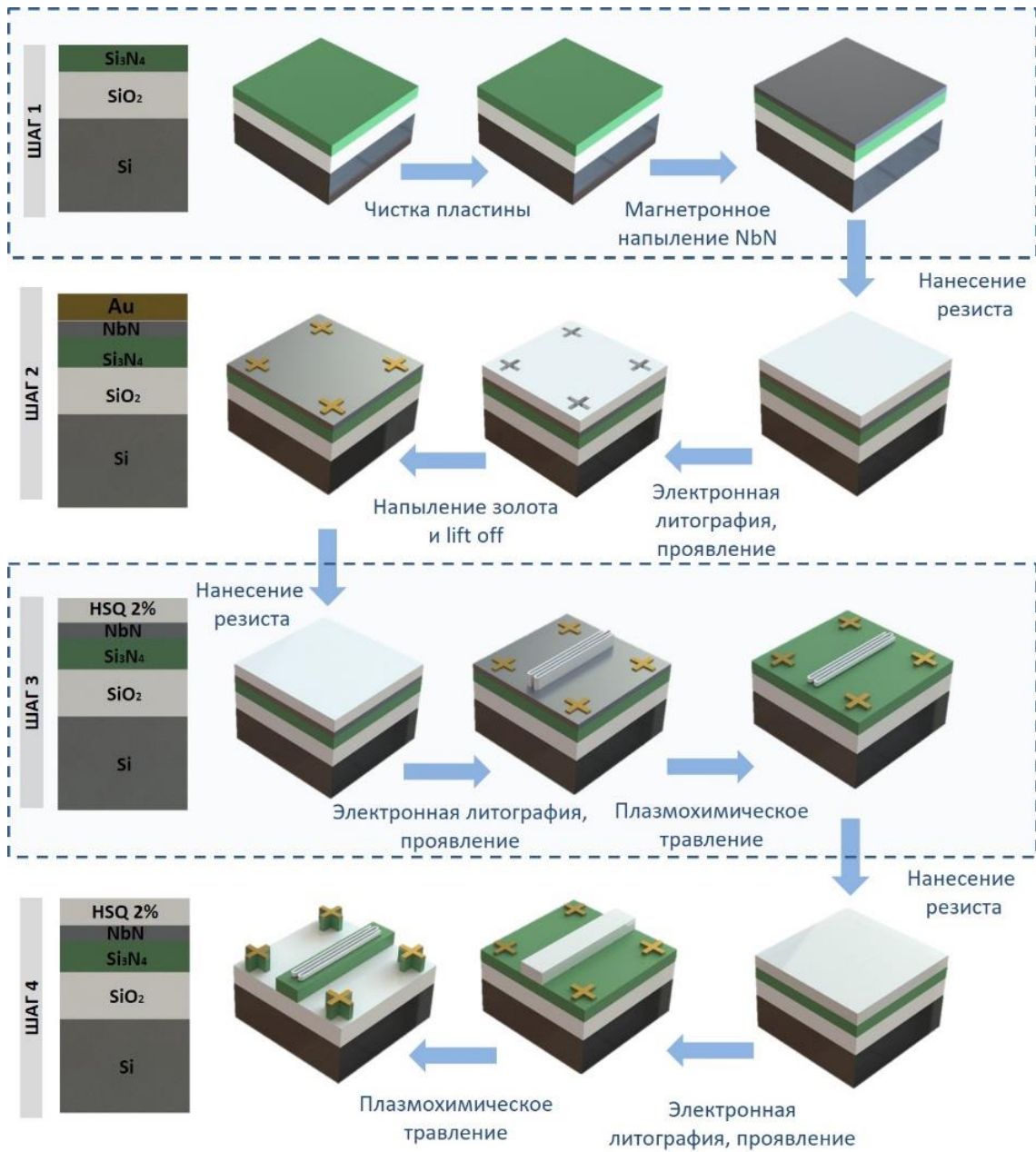


## Особенности сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SNSPDs)

- ✓ Высокая эффективность детектирования
- ✓ Низкая скорость темнового счета (ложных срабатываний)
- ✓ Высокое временное разрешение (джиттер)
- ✓ Высокая скорость счета
- ✓ Отсутствие «послеимпульсов» (afterpulsing)
- ✓ Компактный дизайн

1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
- 3. Технология изготовления WSSPD**
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

# Технология изготовления



## Особенности

Контроль толщины резиста и слоёв с помощью рефрактометра

Коррекция эффекта близости

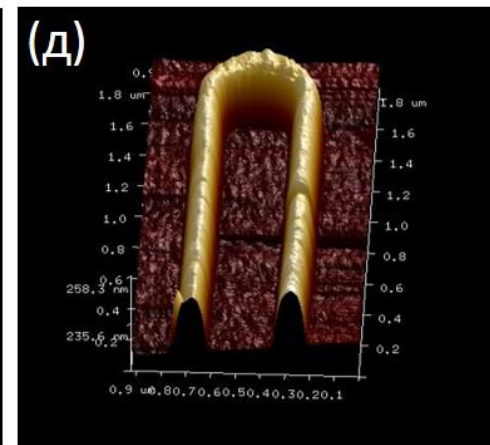
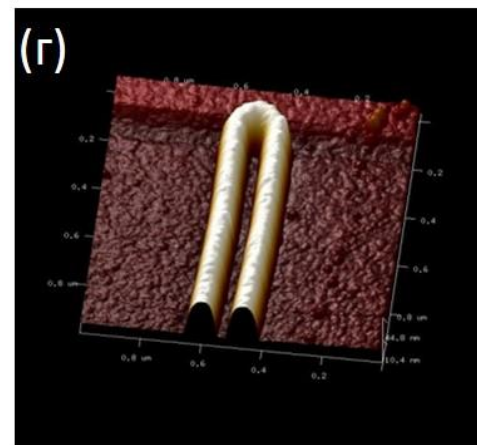
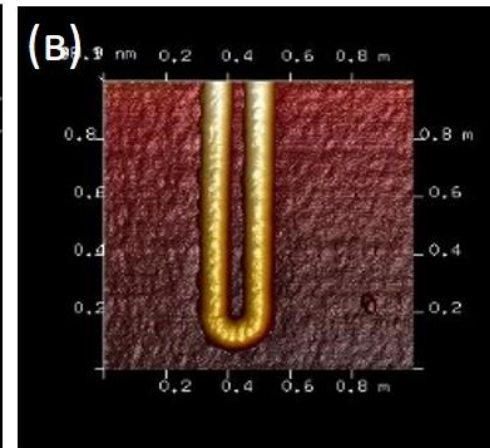
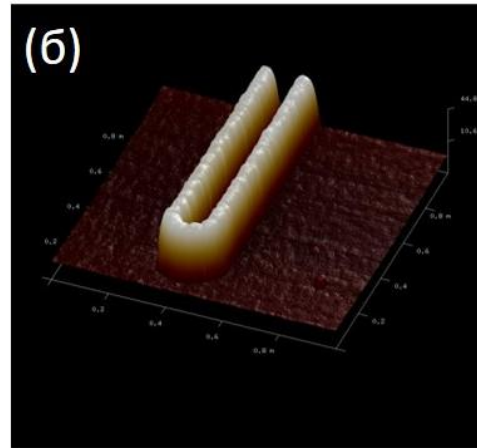
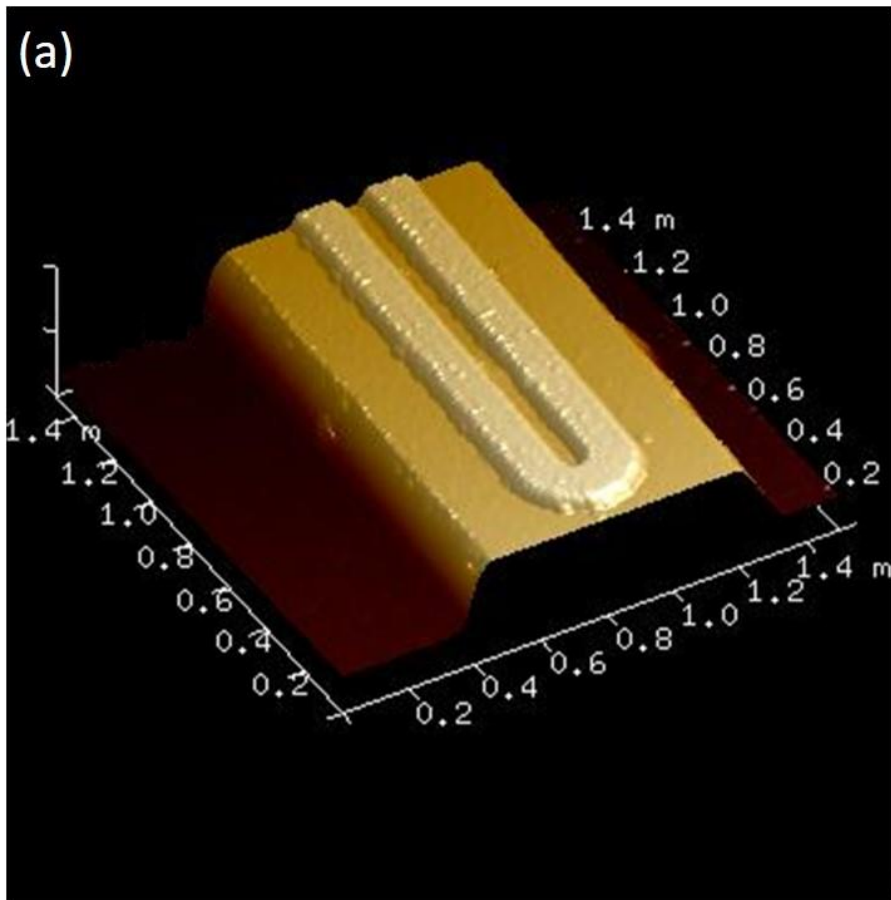
Нагрев менее 150 С

Адгезионный слой SiO<sub>2</sub> для HSQ

Оплавление резиста

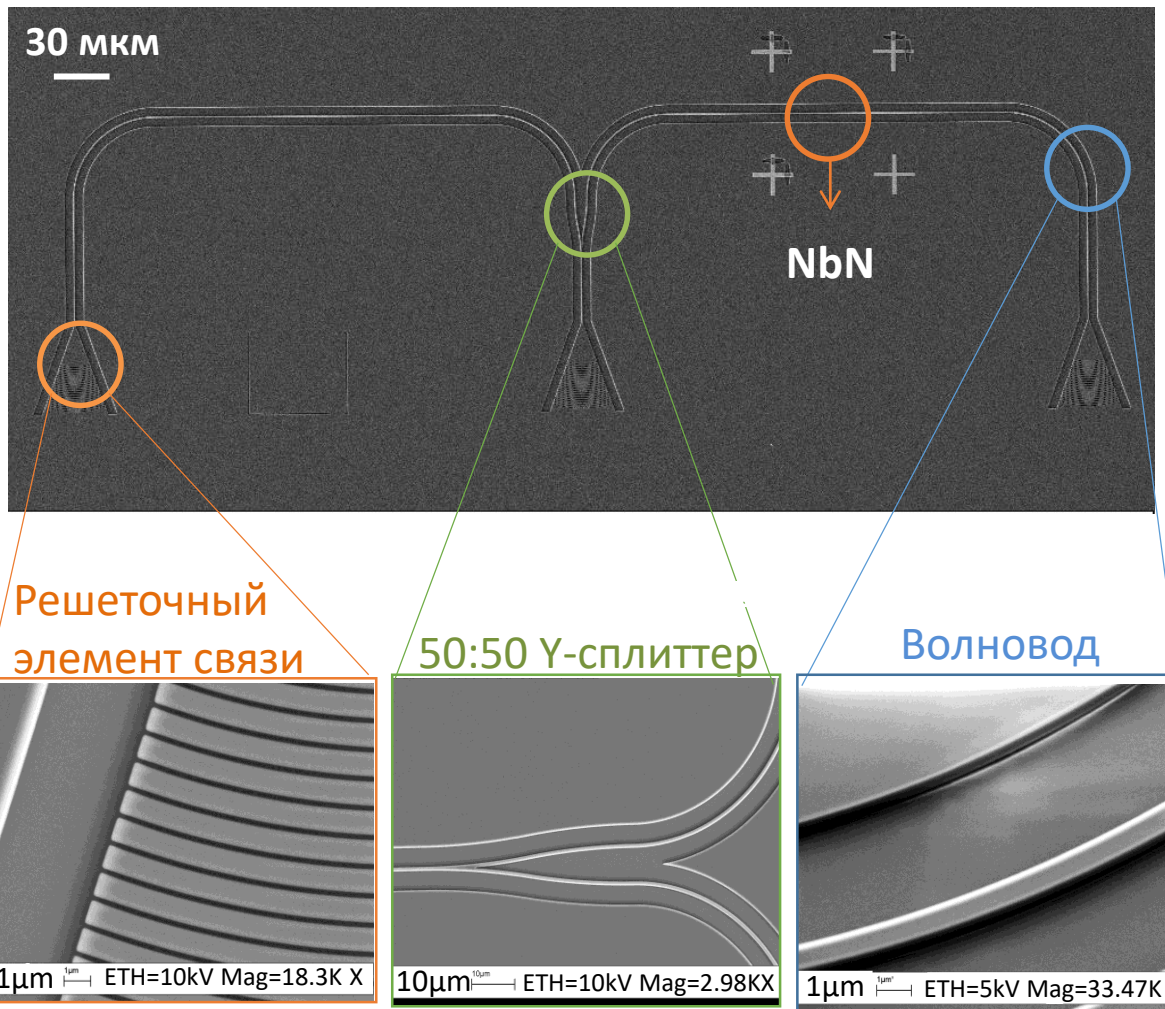
Ступенчатое травление

## Микрофотографии с атомно-силового микроскопа

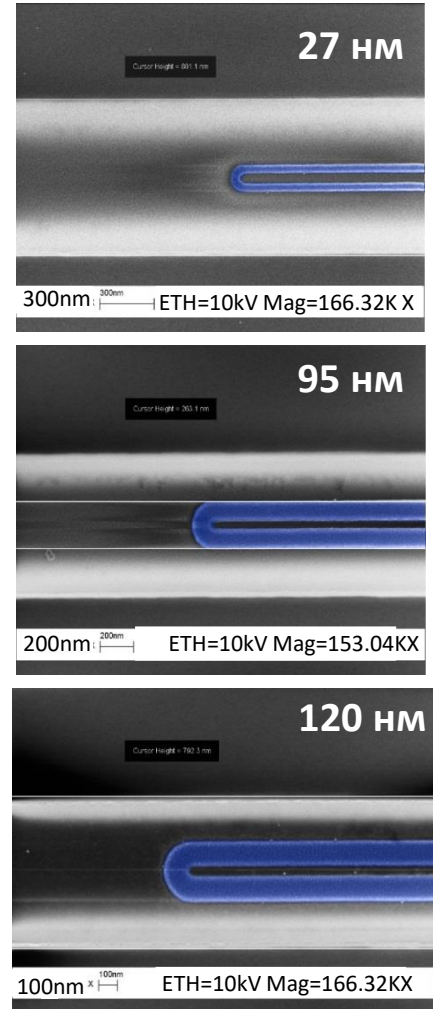


1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
- 4. Основные характеристики WSSPD**
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

## Микрофотография интегральных устройств с оптическими и сверхпроводниковыми компонентами

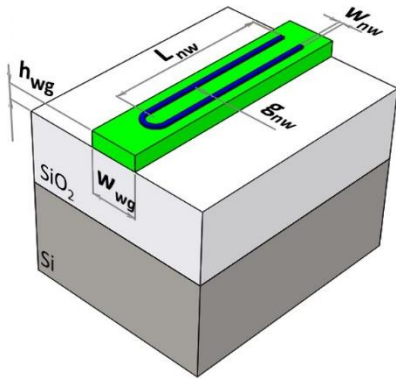


## Сверхпроводниковые нанополоски NbN

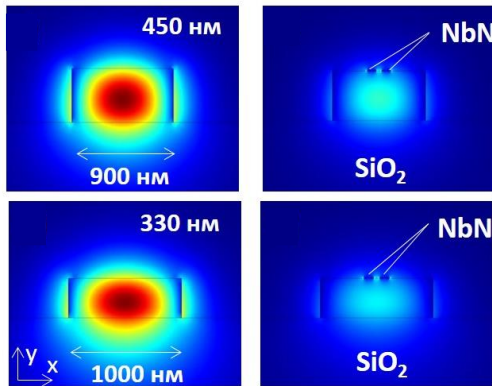


# Поглощение NbN нанополоски на полосковом волноводе

## Полосковый волновод с нанополоской NbN

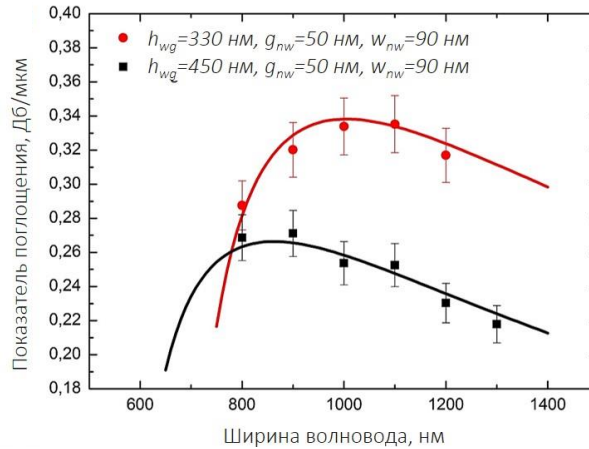


$L_{nw}$  – длина нанополоски  
 $g_{nw}$  – зазор  
 $w_{wg}$  – ширина волновода  
 $h_{wg}$  – глубина травления

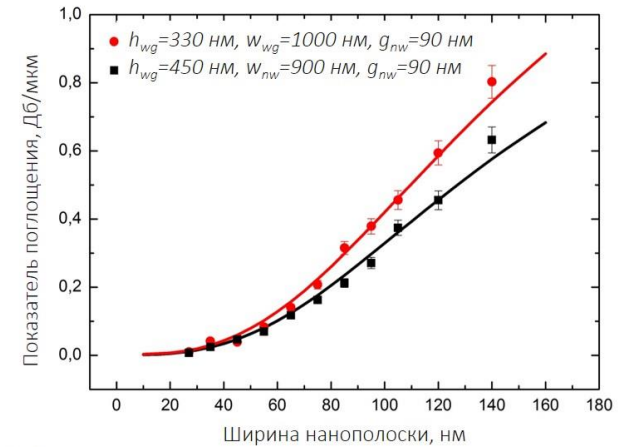


TE- мода волновода

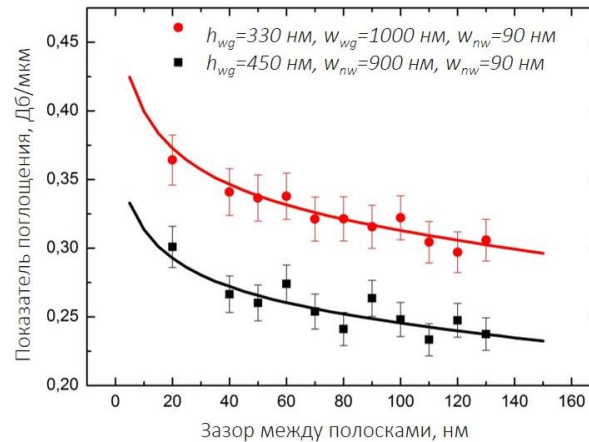
## Показатель поглощения от ширины волновода



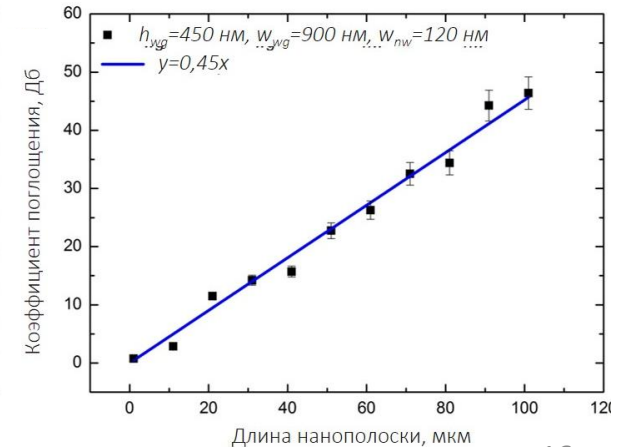
## Показатель поглощения от ширины нанополоски



## Показатель поглощения от зазора м/д нанополосками



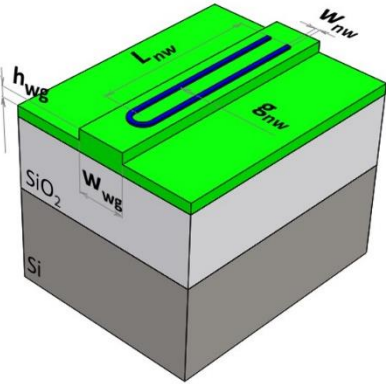
## Показатель поглощения от длины нанополоски



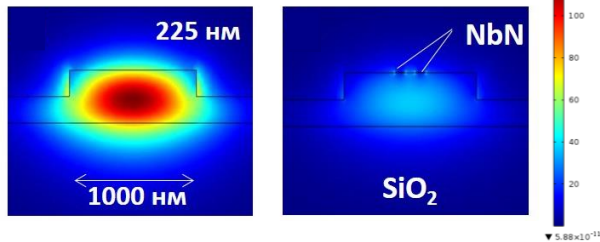


# Поглощение NbN нанополоски на гребенчатом волноводе

## Гребенчатый волновод с нанополоской NbN

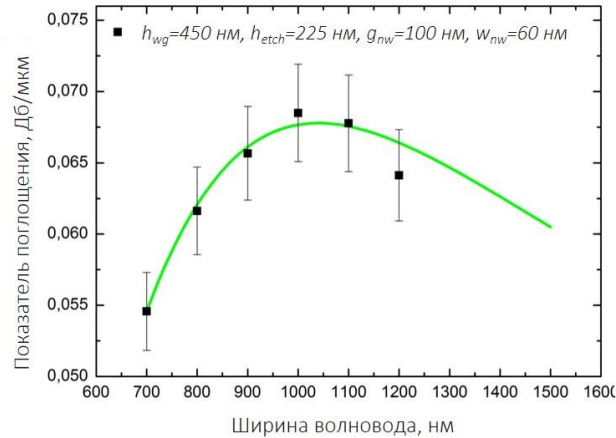


$L_{nw}$  – длина нанополоски  
 $g_{nw}$  – зазор  
 $w_{wg}$  – ширина волновода  
 $h_{wg}$  – глубина травления

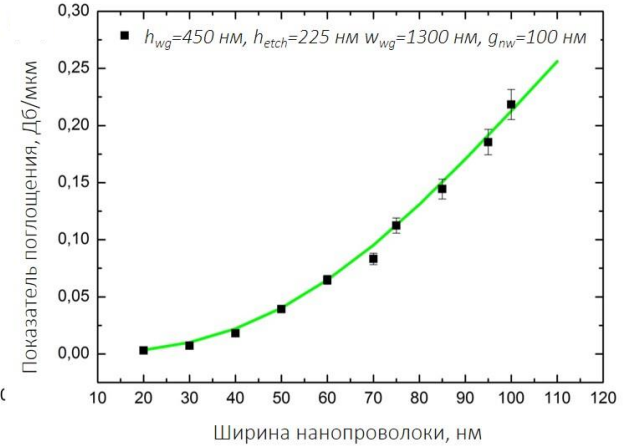


## TE- мода волновода

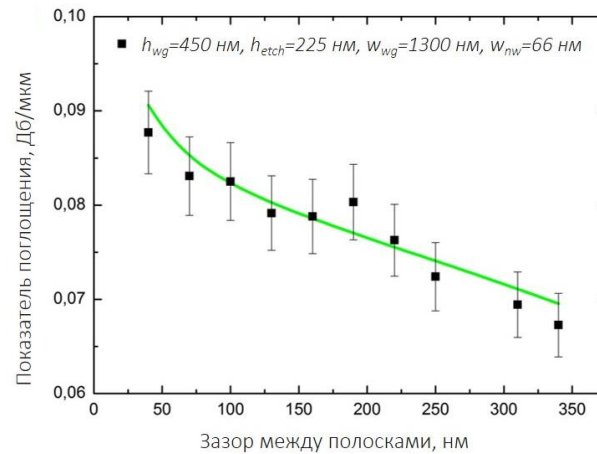
## Показатель поглощения от ширины волновода



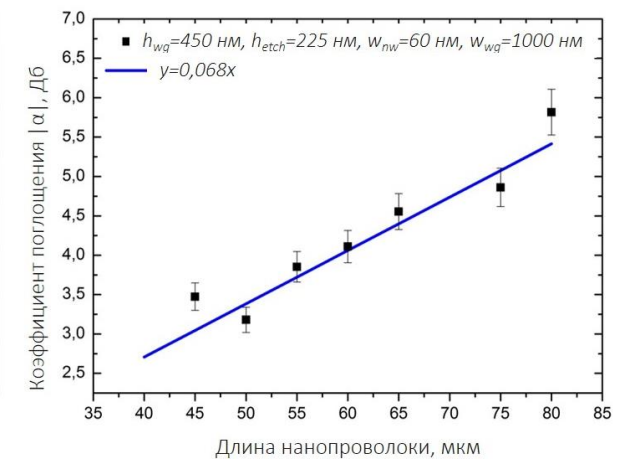
## Показатель поглощения от ширины нанополоски



## Показатель поглощения от зазора м/д нанополосками

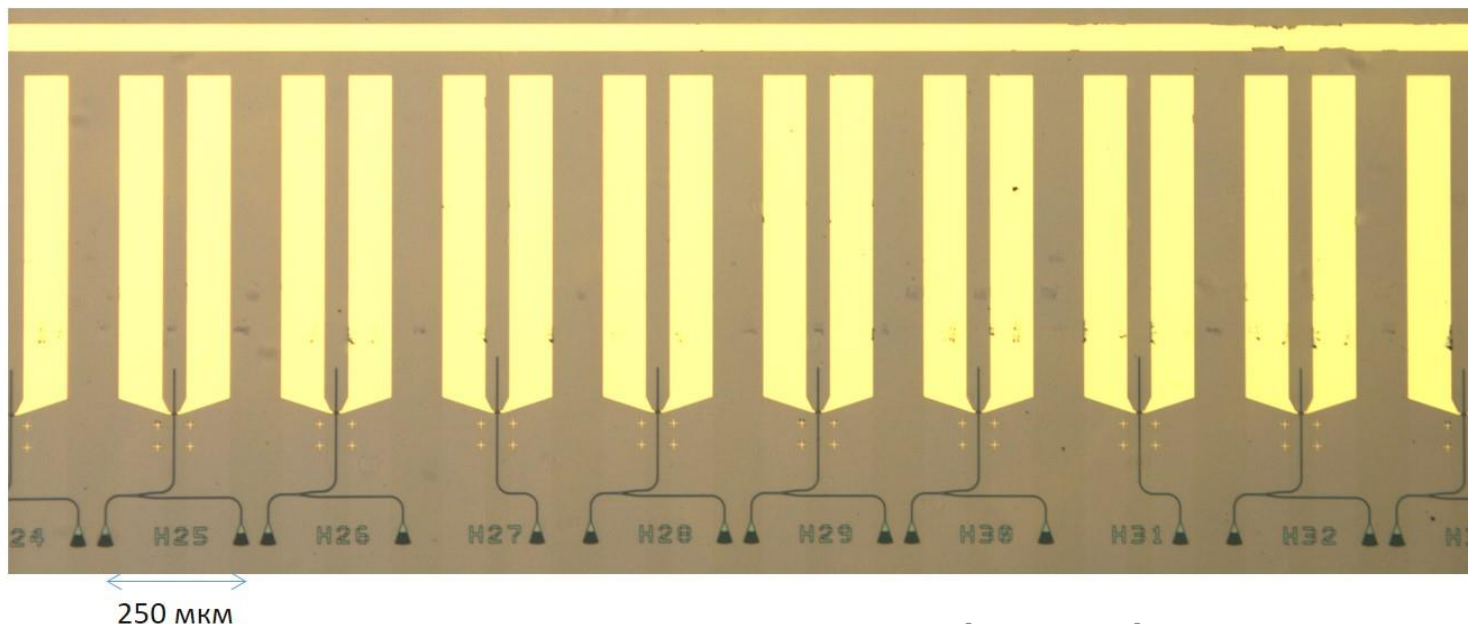


## Показатель поглощения от длины нанополоски

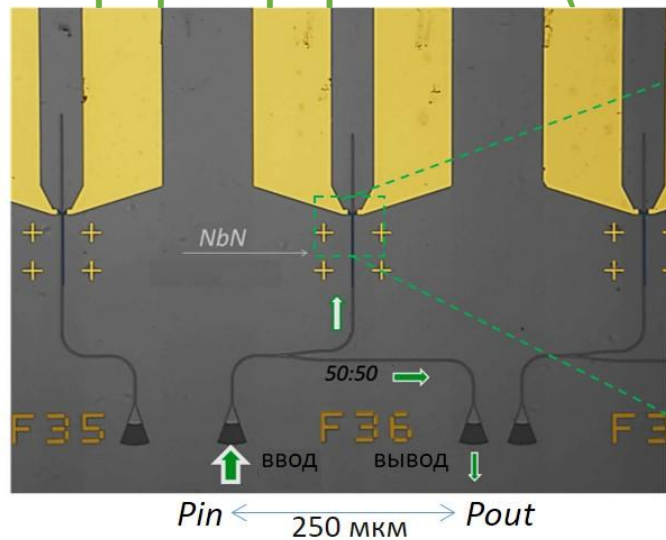


# Микрофотография изготовленных WSSPDs

## Оптическая микрофотография



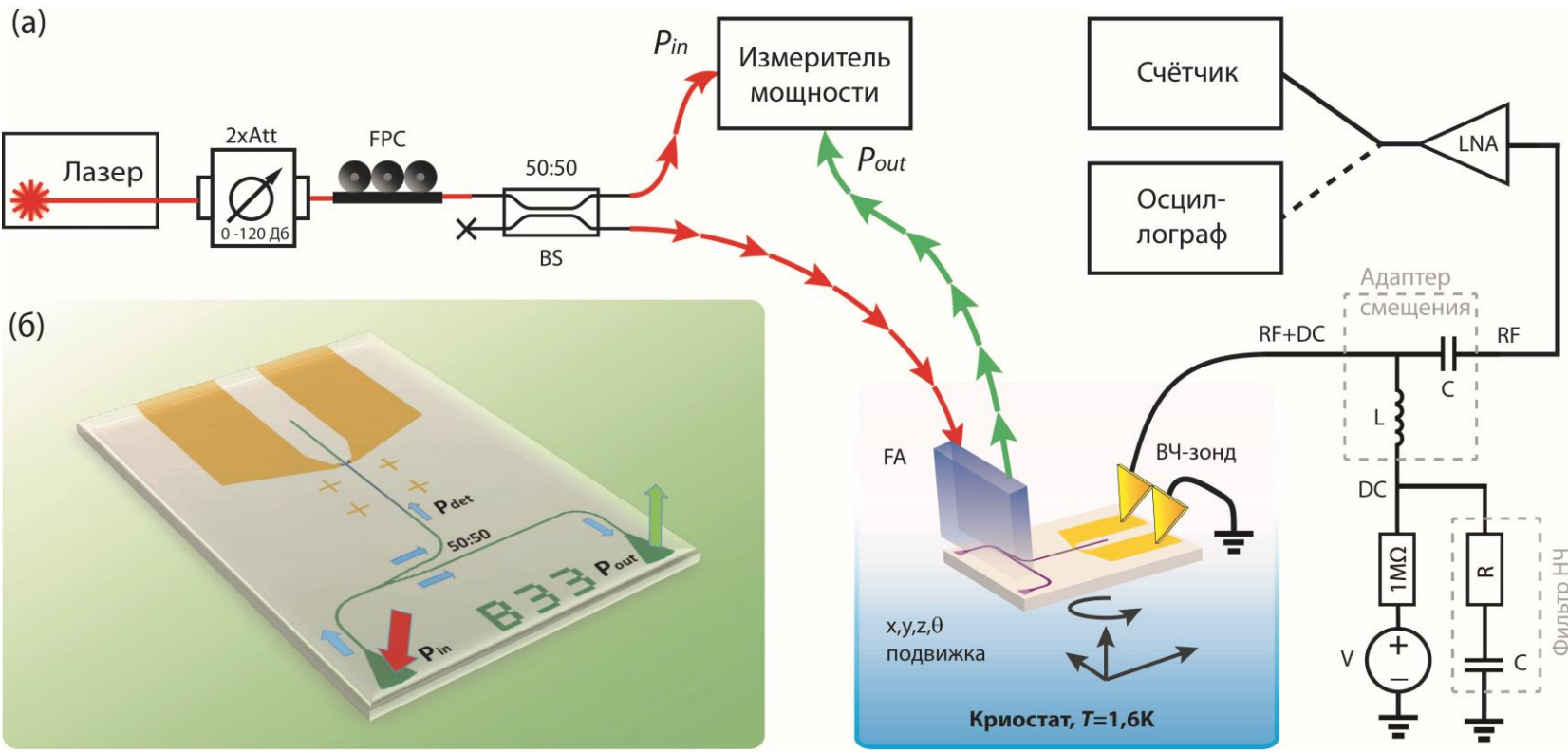
## Микрофотография WSSPD (SEM)



## Микрофотография нанополоски



# Экспериментальная установка



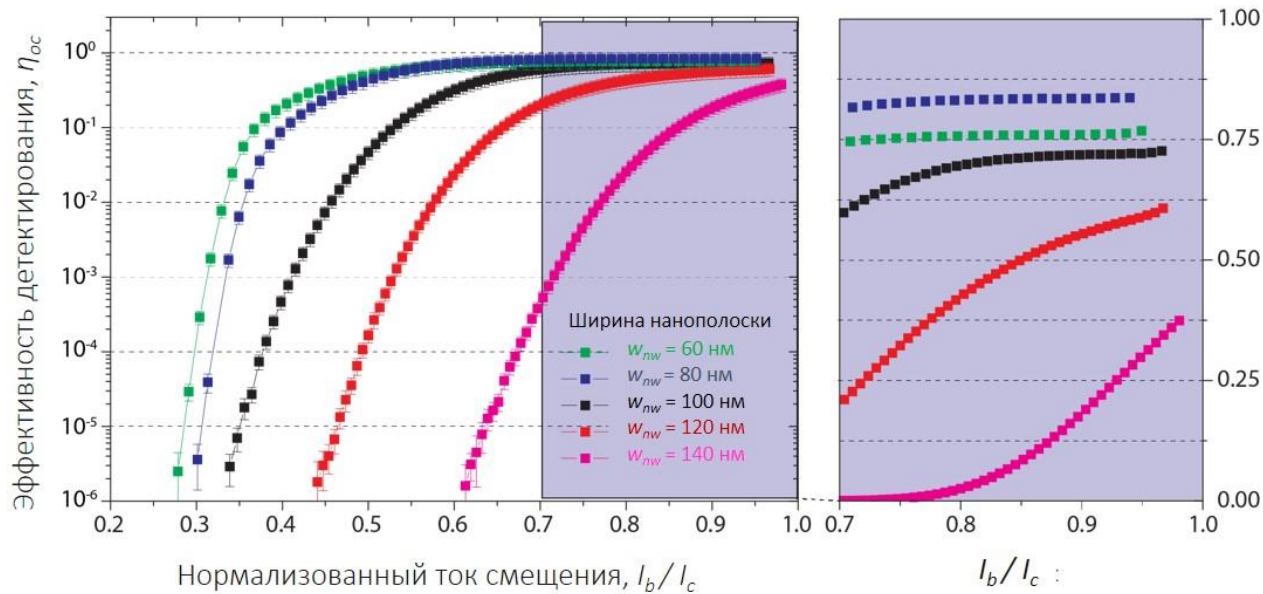
Поток фотонов, достигающий детектора

$$\Phi_{det} = \sqrt{\frac{P_{out} P_{in} S T_{nw} \lambda}{T_{ref} hc}}$$

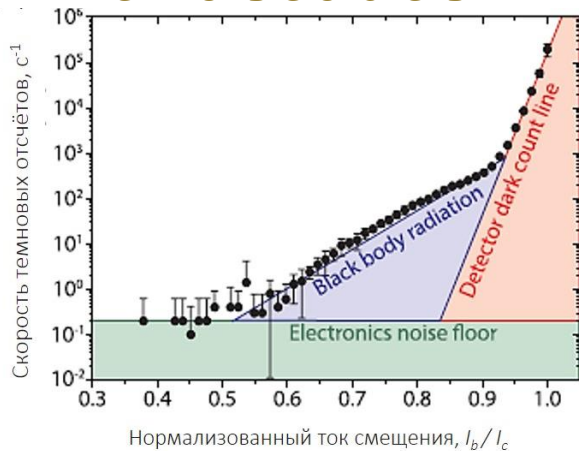
Эффективность детектирования на чипе

$$\eta_{oc} = \frac{N_{clicks} - N_{SDC}}{\Phi_{det}}$$

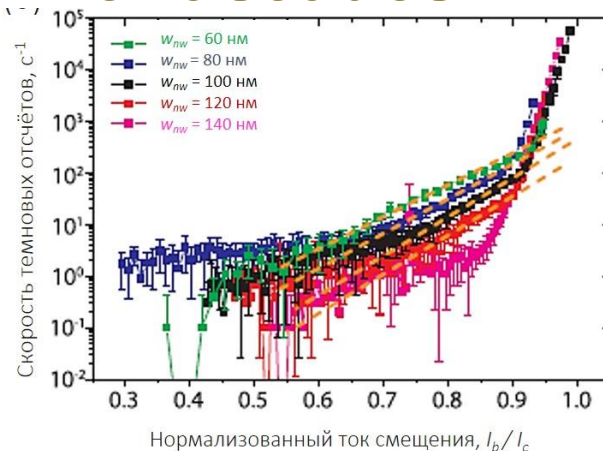
## Зависимость эффективности детектирования от тока смещения



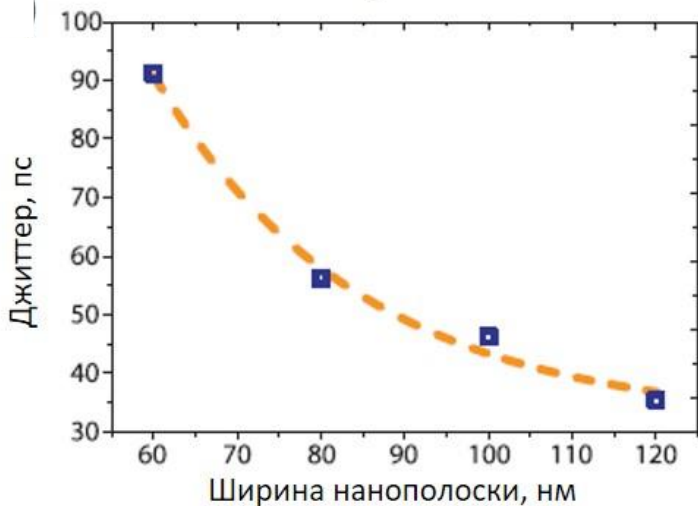
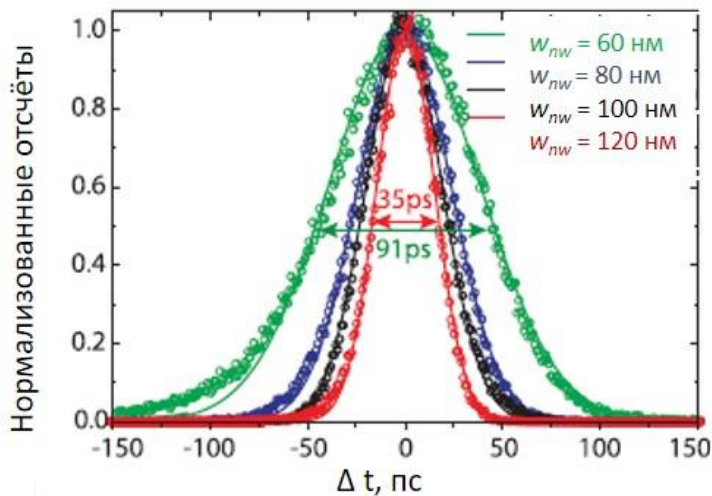
## Темновые отсчёты



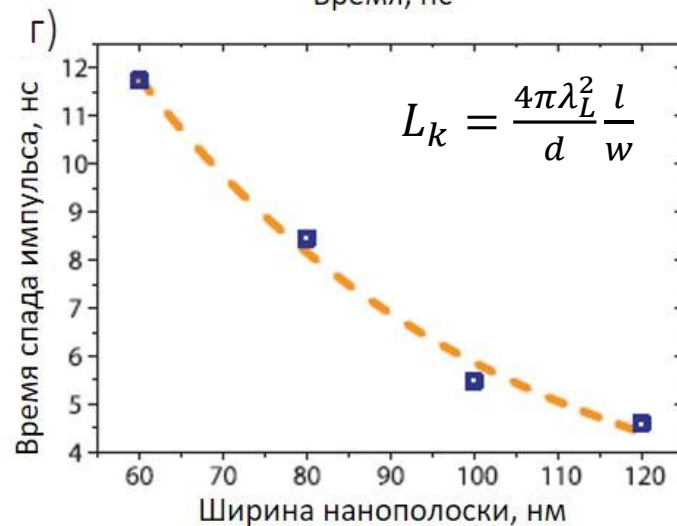
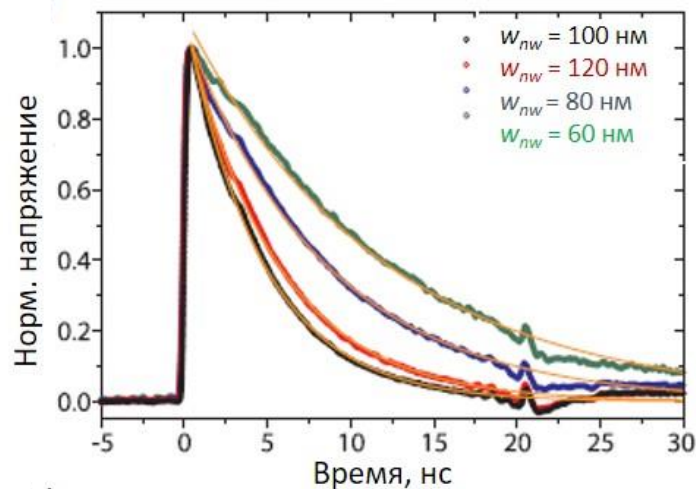
## Темновые отсчёты



## Временное разрешение

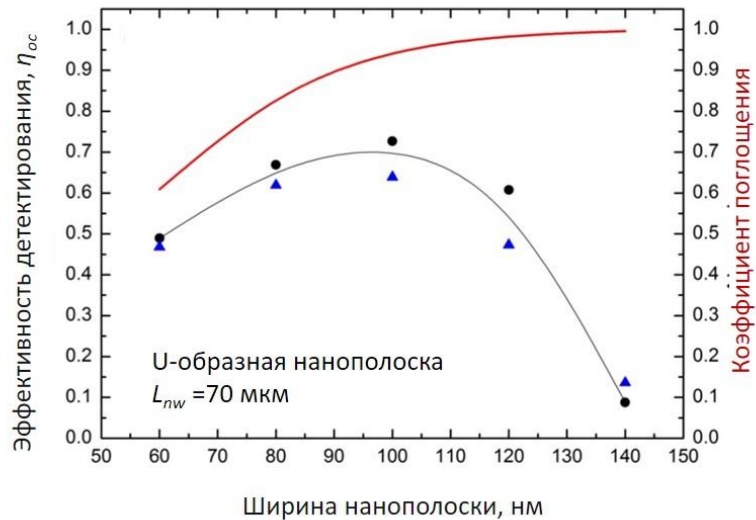


## Время спада

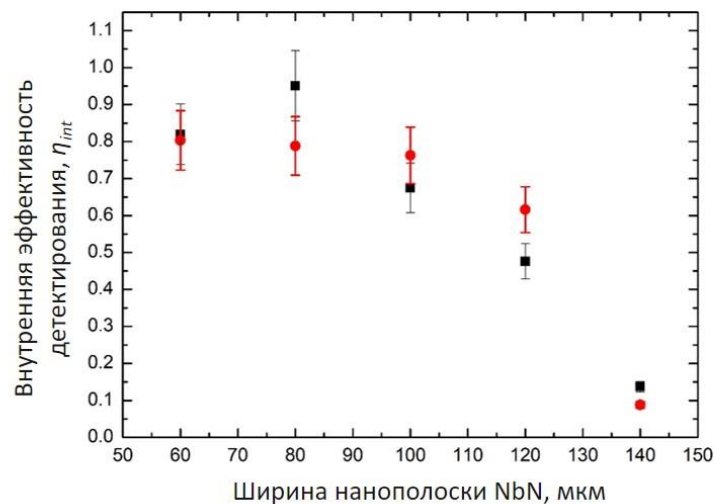
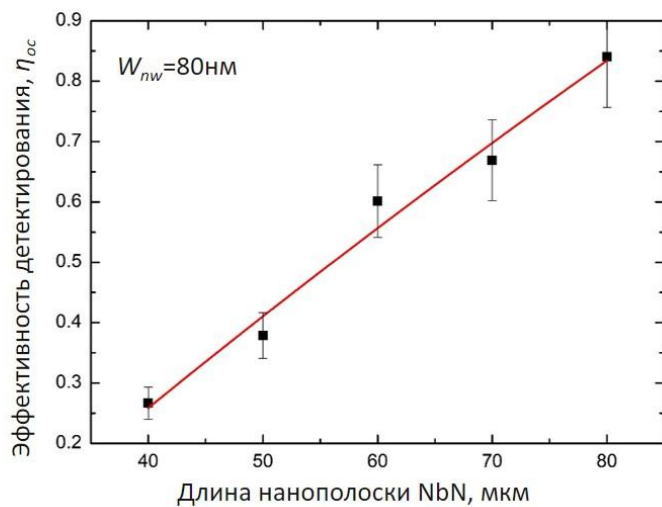
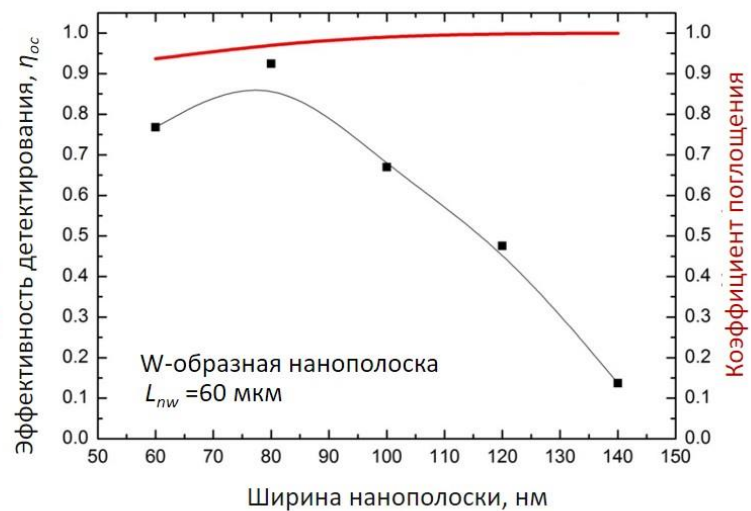


# Внутренняя эффективность детектирования

## Короткая полоска NbN (140 мкм)

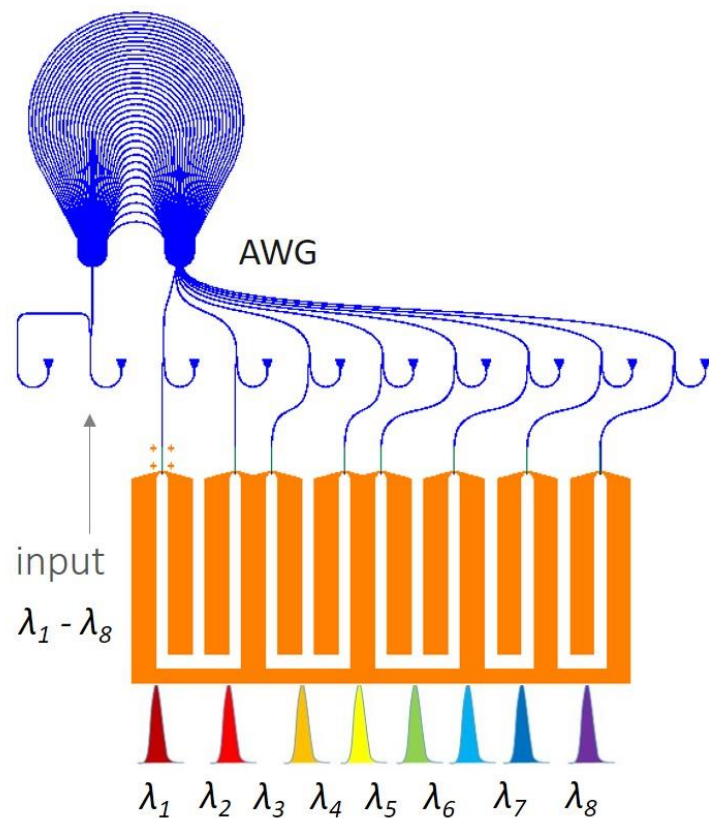


## Длинная нанополоска NbN (240 мкм)



1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
- 5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона**
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

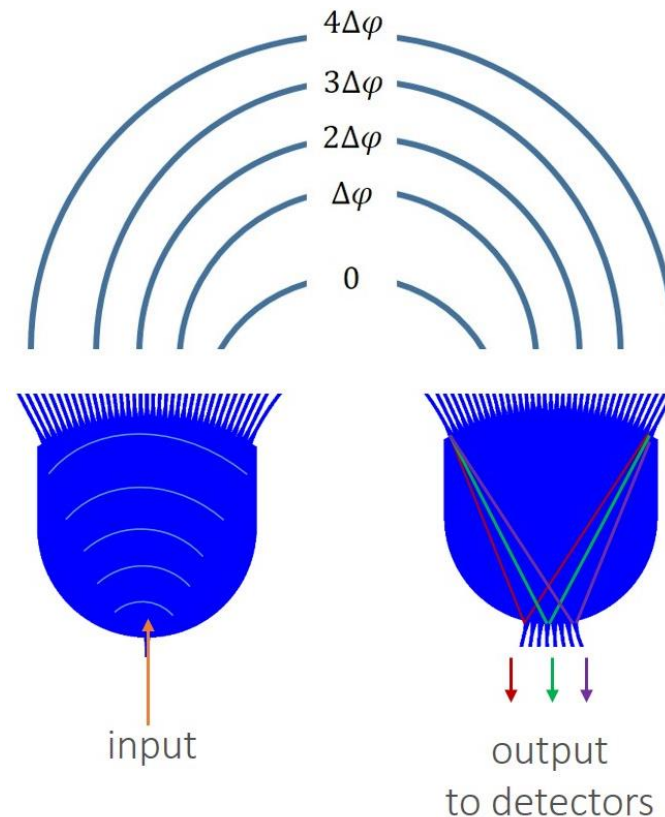
## Общий дизайн спектрометра



Phase shift  $\sim 1/\lambda$

$$\Delta\phi = \beta\Delta L, \quad \beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad \Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_{eff}}$$

## Интегральный оптический демультиплексор



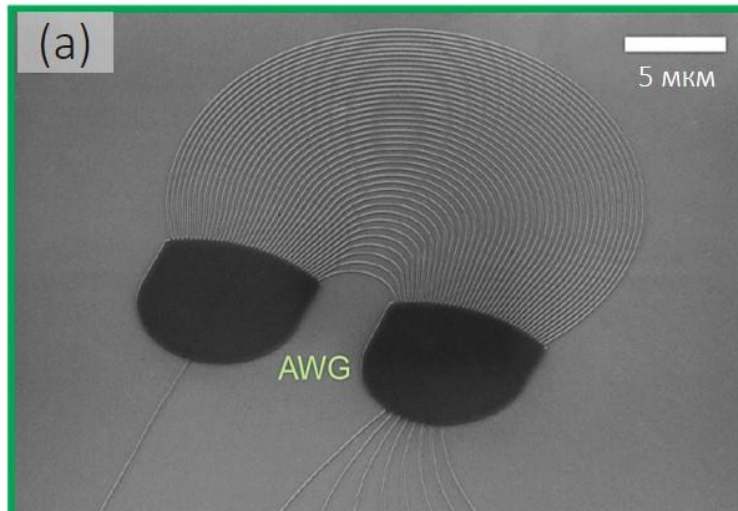
Dispersion

$$D = \frac{ds}{df} = R_a \frac{d\theta}{df} = \frac{\lambda}{c} \frac{n_g}{n_{eff}} \frac{\Delta L}{\Delta\alpha}$$

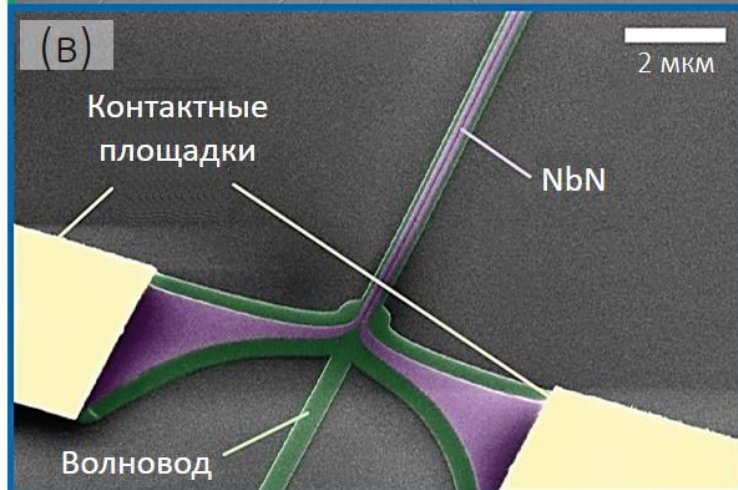
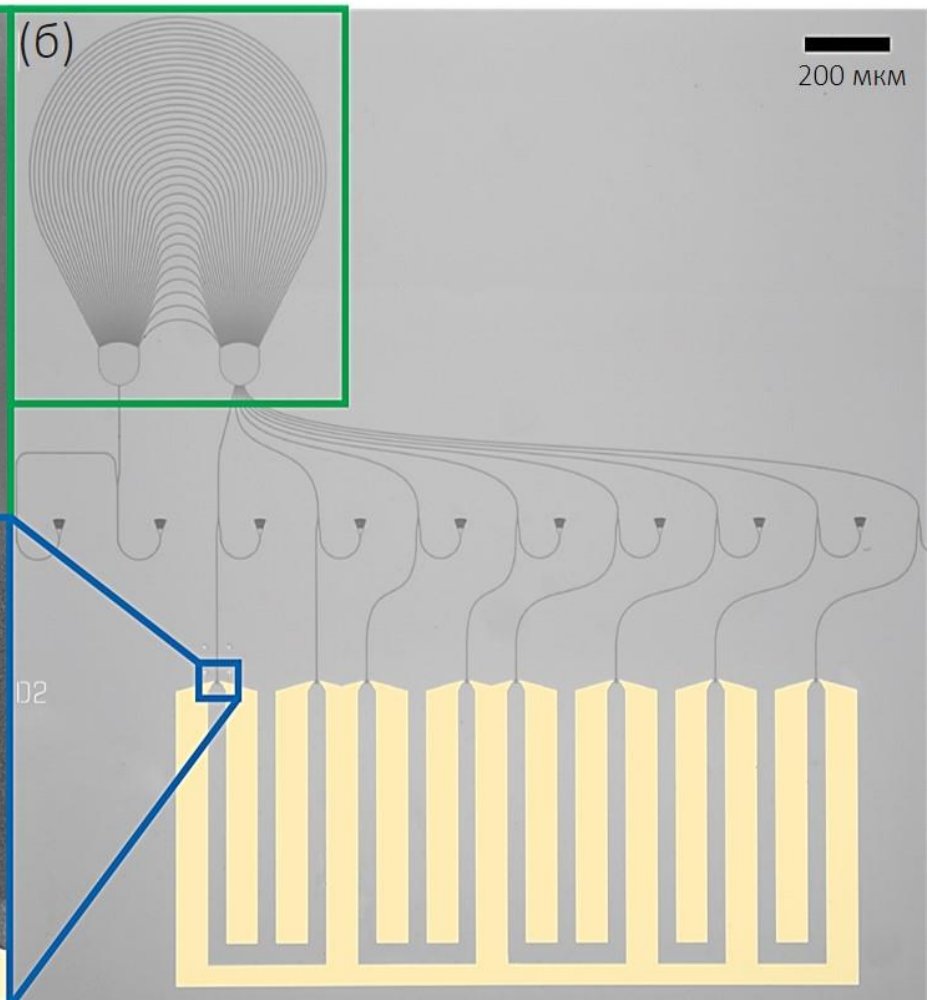


# Микрофотографии однофотонного спектрометра

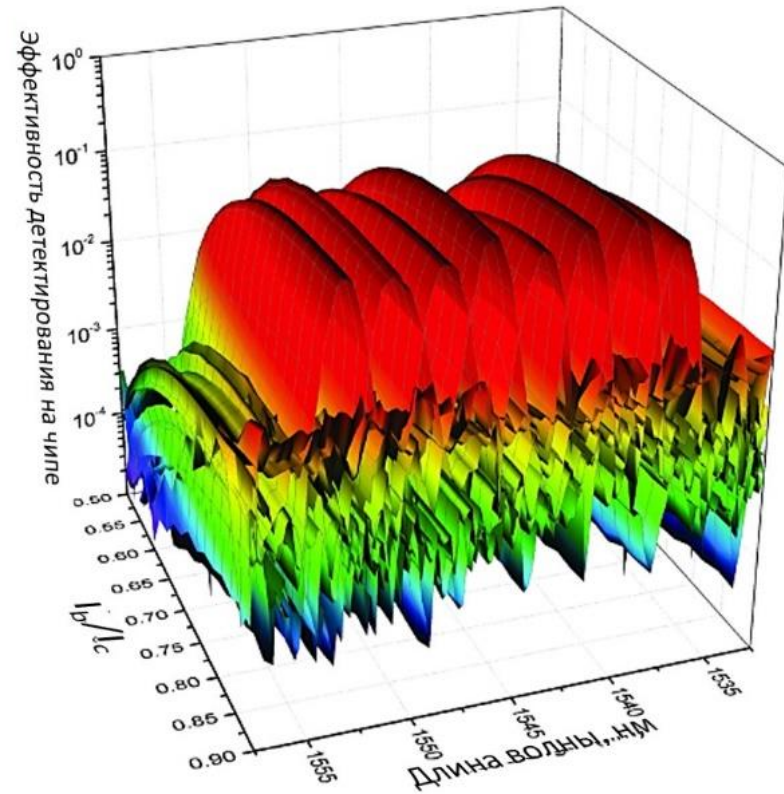
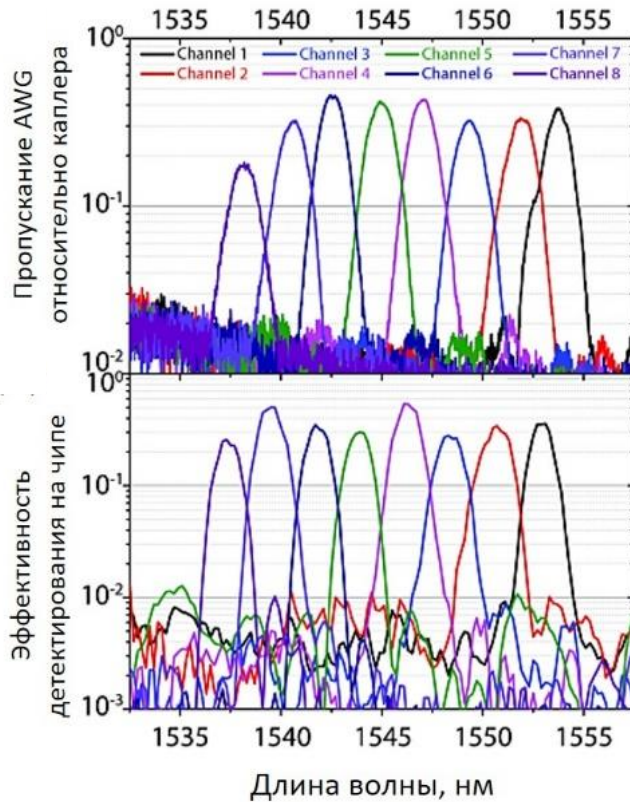
Микрофотография SEM спектрометра  $\lambda_c = 740$  нм



Микрофотография SEM спектрометра  $\lambda_c = 1500$  нм



## Эффективность детектирования в зависимости от длины волны и тока смещения



Эффективность детектирования на чипе

$$\eta_{oc}^{SPS} = \frac{1}{i} \sum_{1}^{i} \eta_i = 19 \pm 6 \%$$

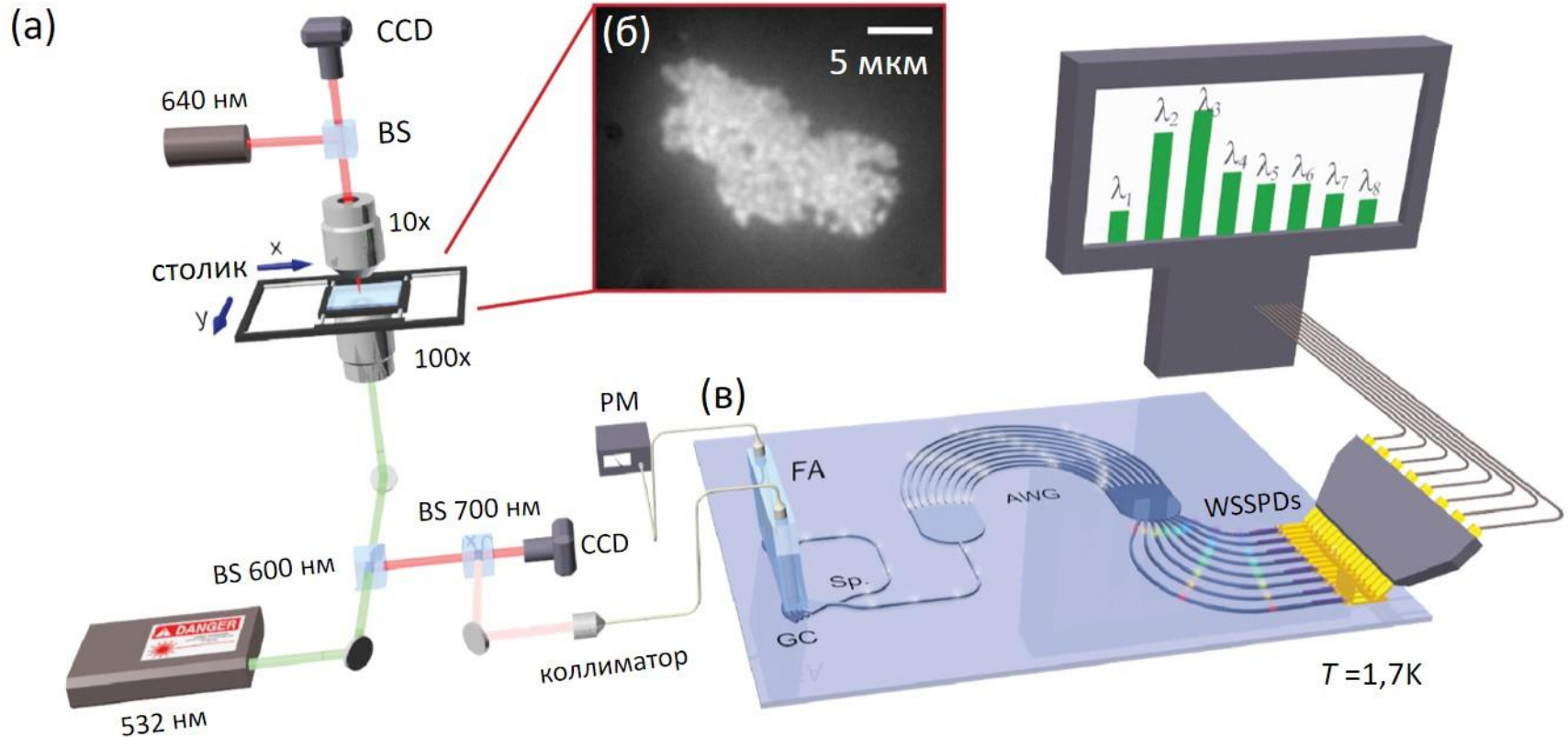
$i$  – номер канала

Системная эффективность детектирования

$$\eta_{system}^{SPS} \approx 2\%$$

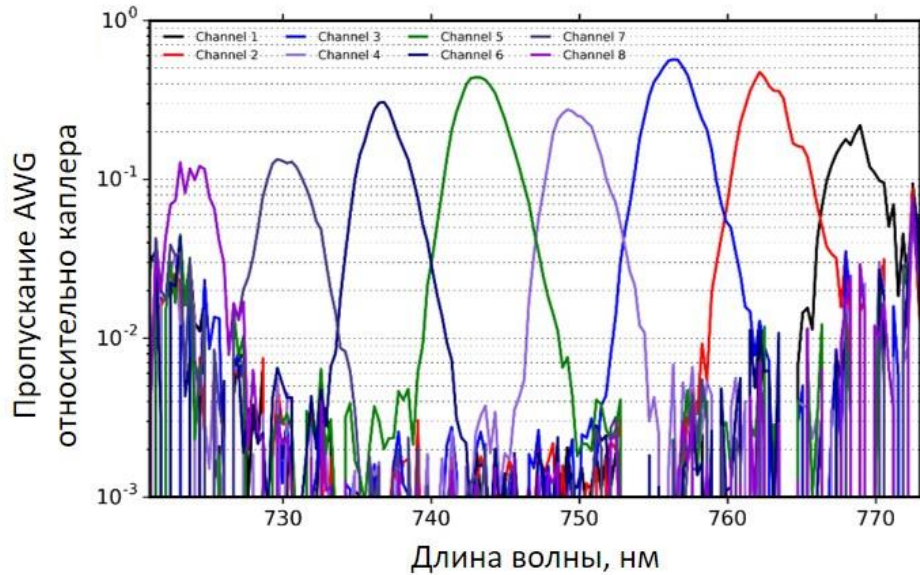
## Конфокальный микроскоп

## Нанокластер SiV

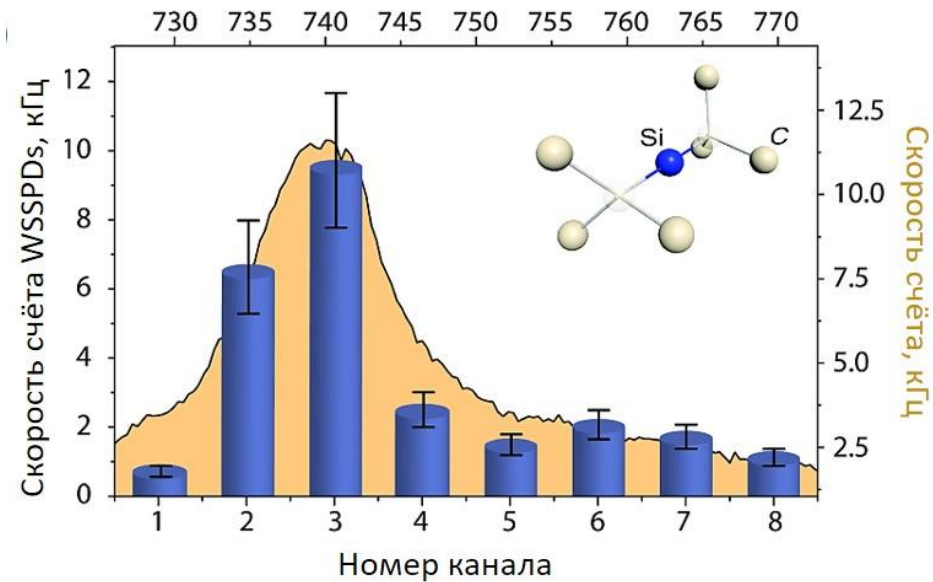


## Однофотонный спектрометр на чипе

## Спектр пропускания AWG



## Спектр пропускания AWG



Эффективность детектирования на чипе

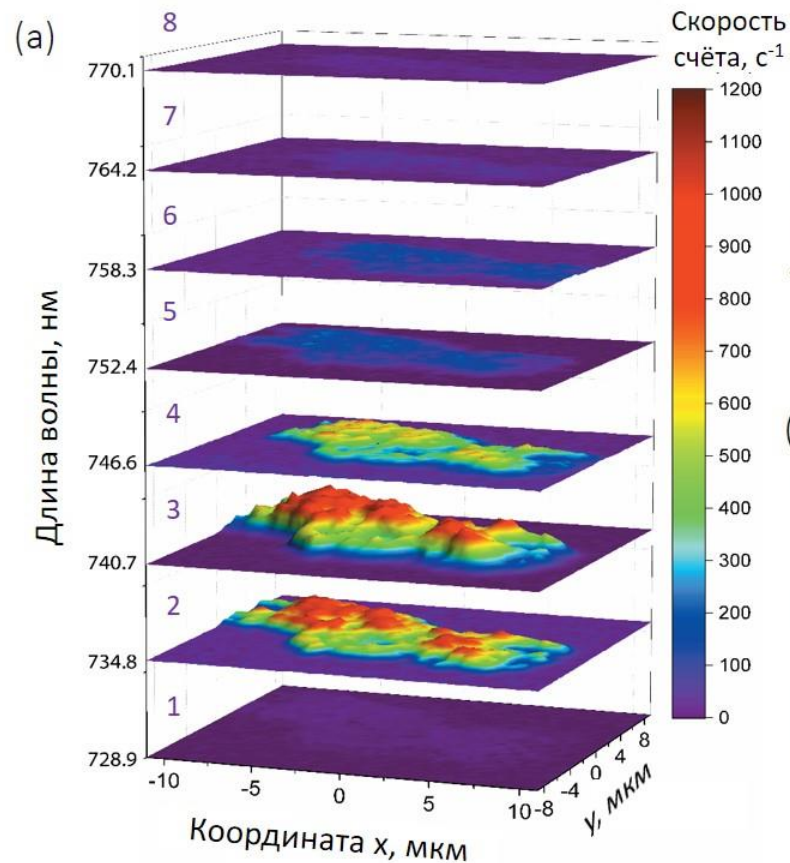
$$\eta_{oc}^{SPS} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^i \eta_i = 21 \pm 14\%$$

$i$  – номер канала

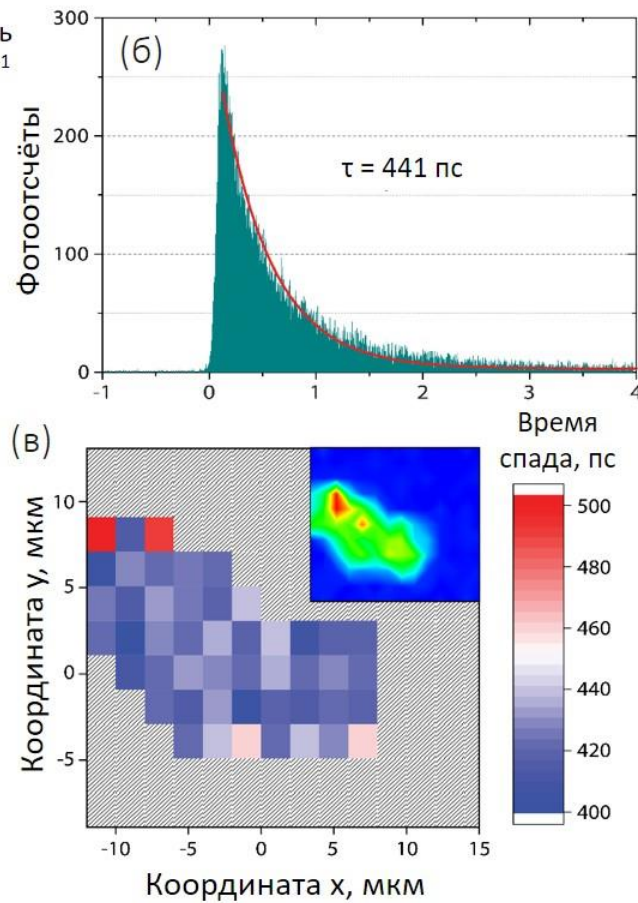
Системная эффективность детектирования

$$\eta_{system}^{SPS} \approx 0,42\%$$

## Изображение кластера в разных спектральных каналах



## Время жизни

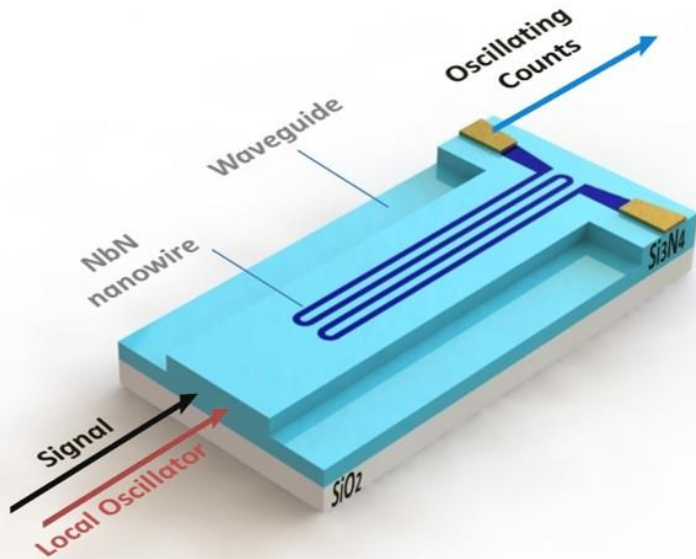


Временное разрешение детектора

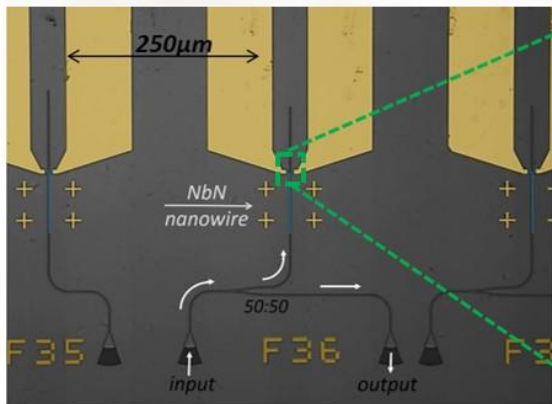
$$\tau_{jitter} = 47,5 \text{ пс}$$

# Гетеродинный спектрометр (принцип работы)

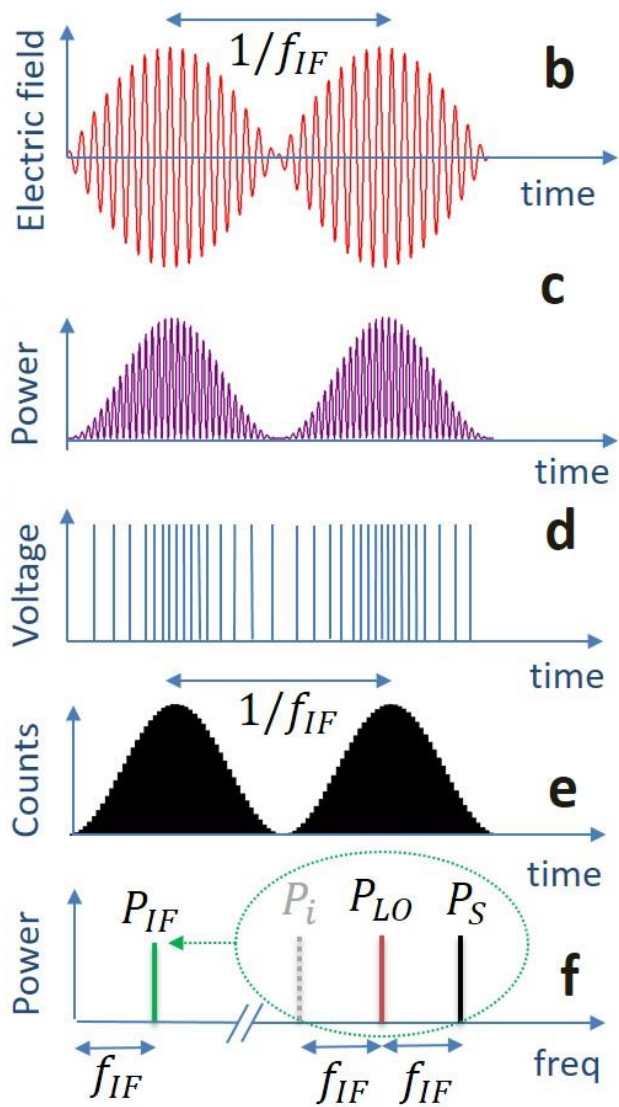
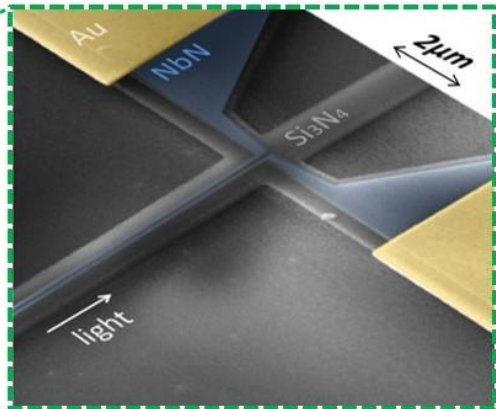
**a**



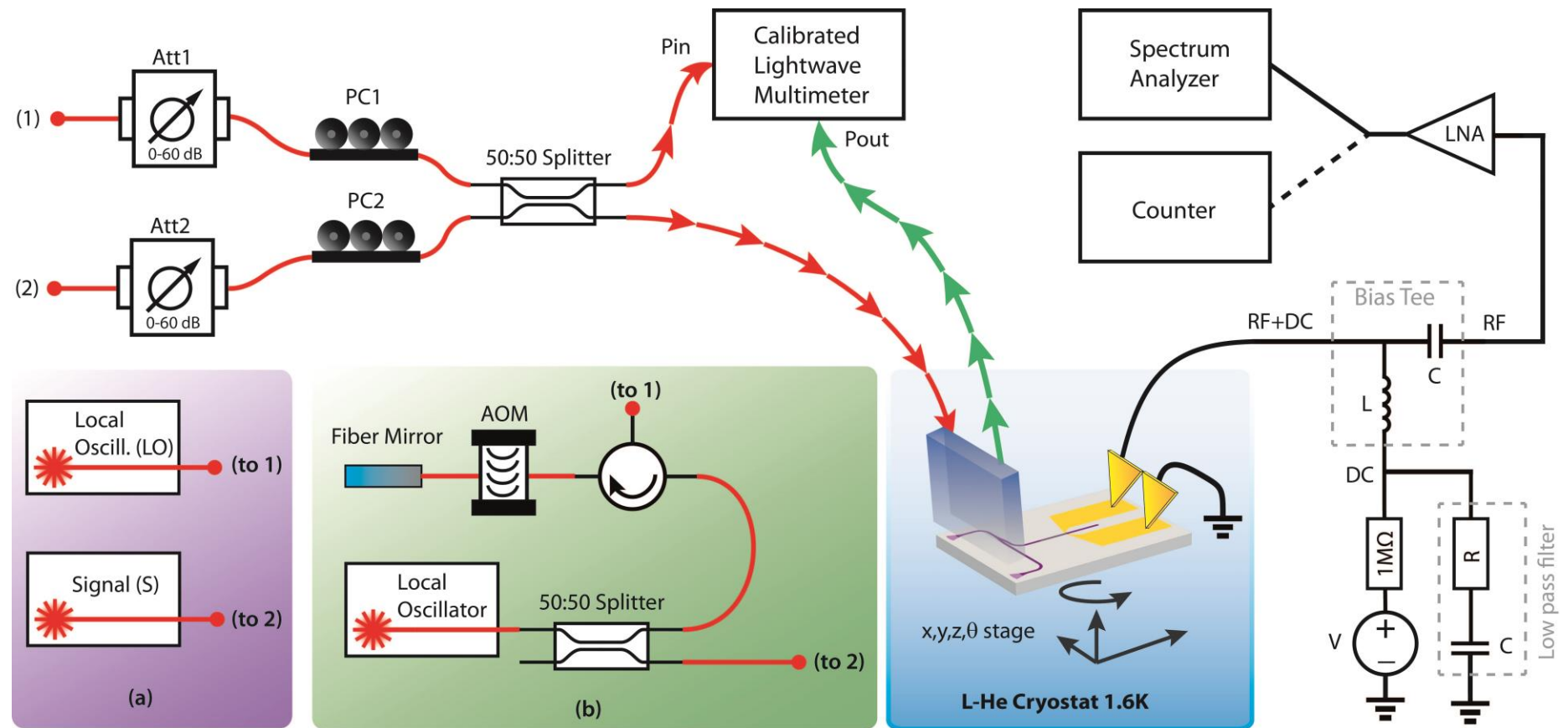
**g**



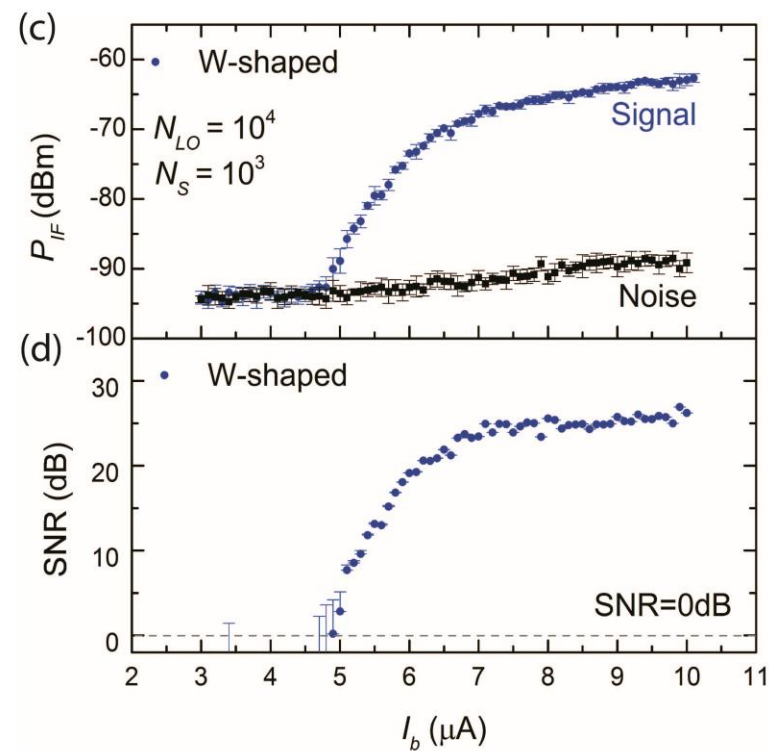
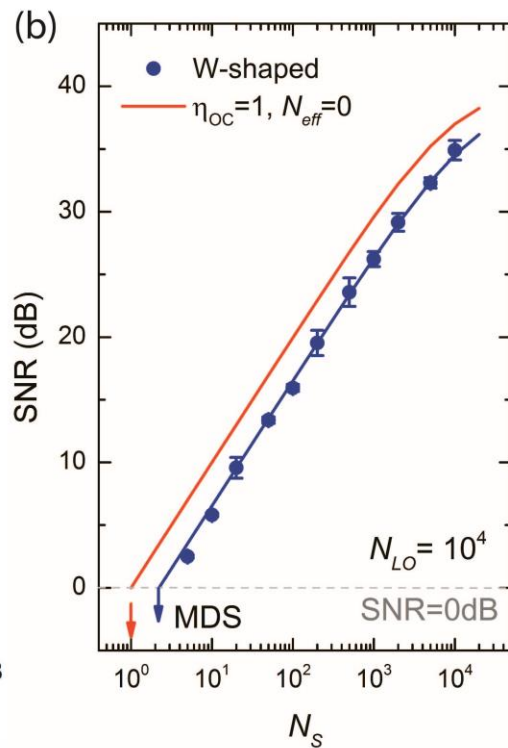
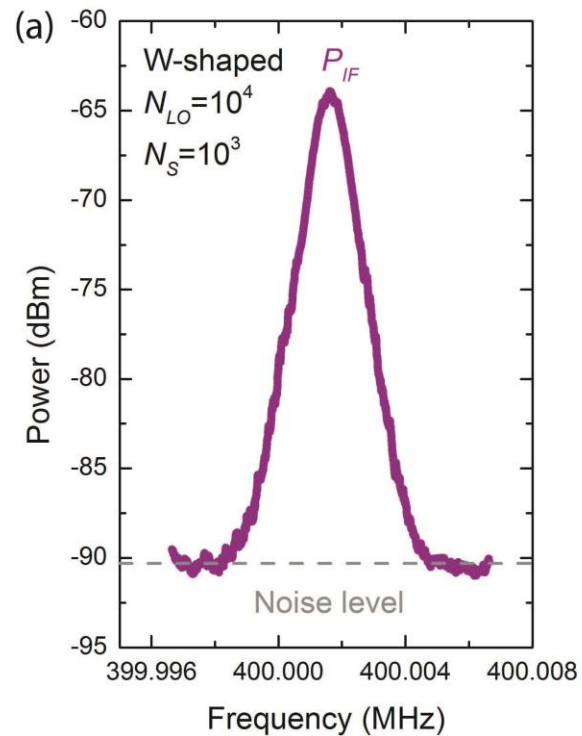
**h**



# Гетеродинный спектрометр (экспериментальная установка)



# Гетеродинный спектрометр ( )



$$N_{S,LO} = \Phi_{S,LO} / RBW$$

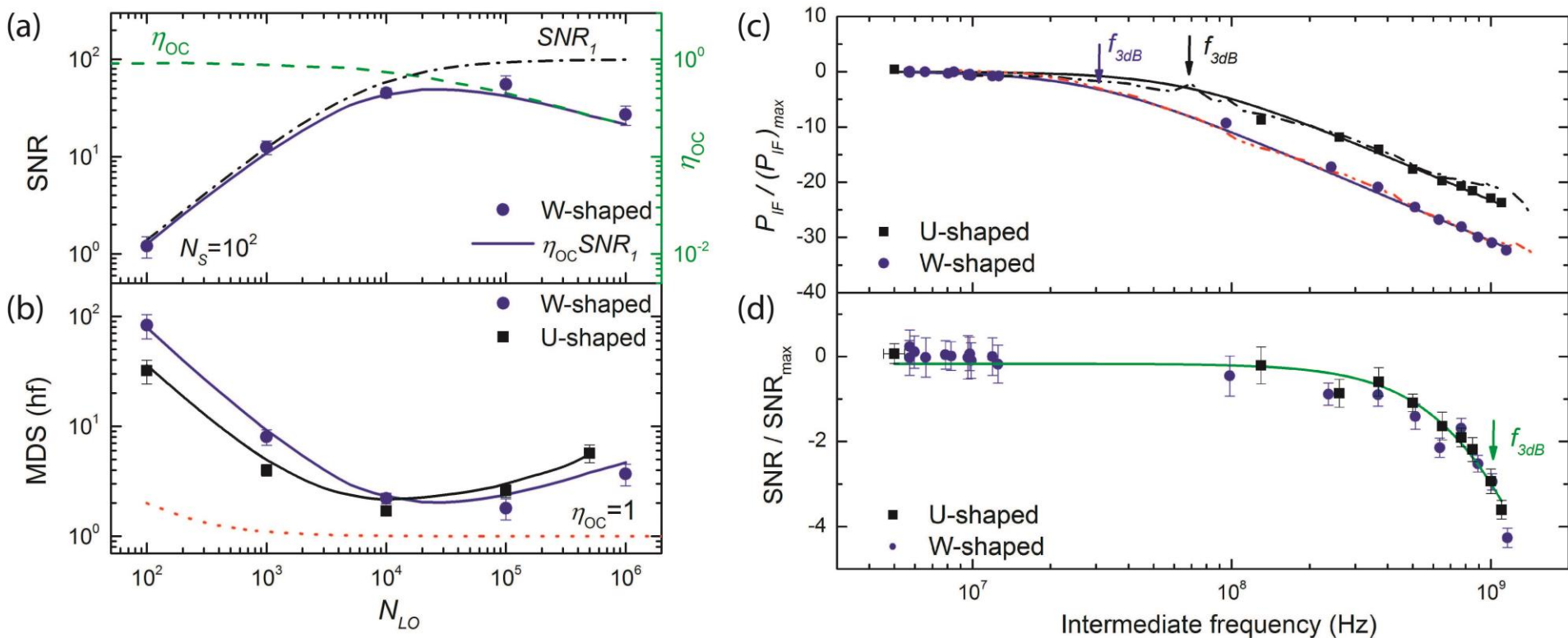
Number of photons accumulated for  $t=1/RBW$

$$SNR = (P_{IF} - P_{noise}) / P_{noise}$$

Signal-to-noise ratio



## Сигнал/шум и минимальный детектируемый сигнал на промежуточной частоте от мощности гетеродина

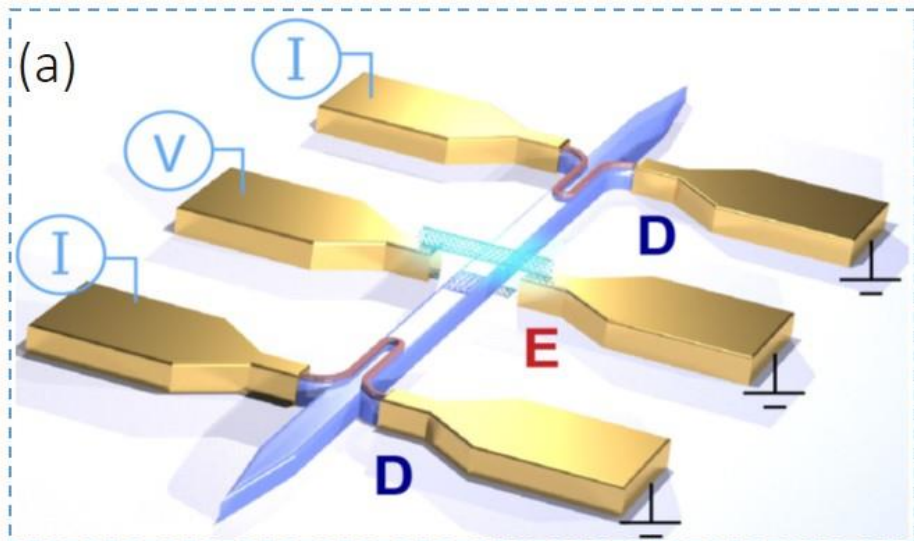


$$SNR = \eta_{oc} m^2 \frac{N_s N_{LO}}{N_s + N_{LO} + N_{SDC} + N_{eff}} \equiv \eta_{oc} SNR_1$$

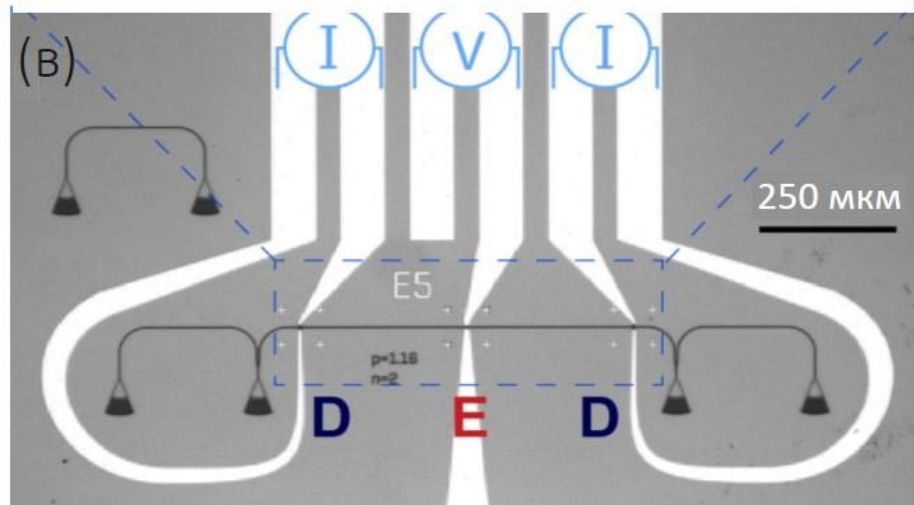
1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
- 6. Прототип полностью интегральной микросхемы**
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
8. Дальнейшая работа

# Прототип квантово-оптической интегральной схемы

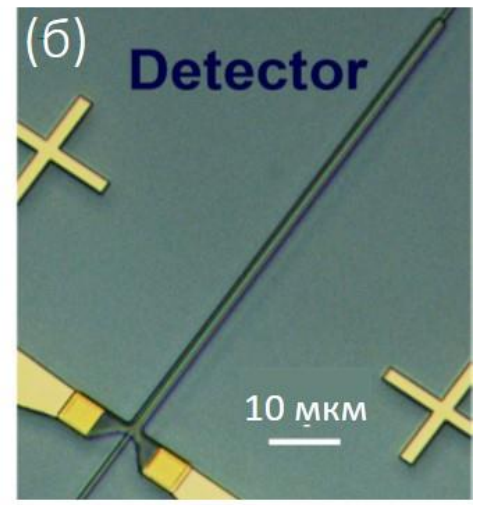
## Углеродная нанотрубка и 2WSSPDs (схема)



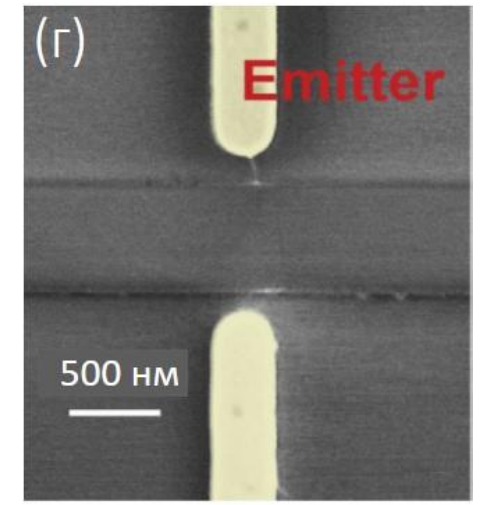
## Микрофотография

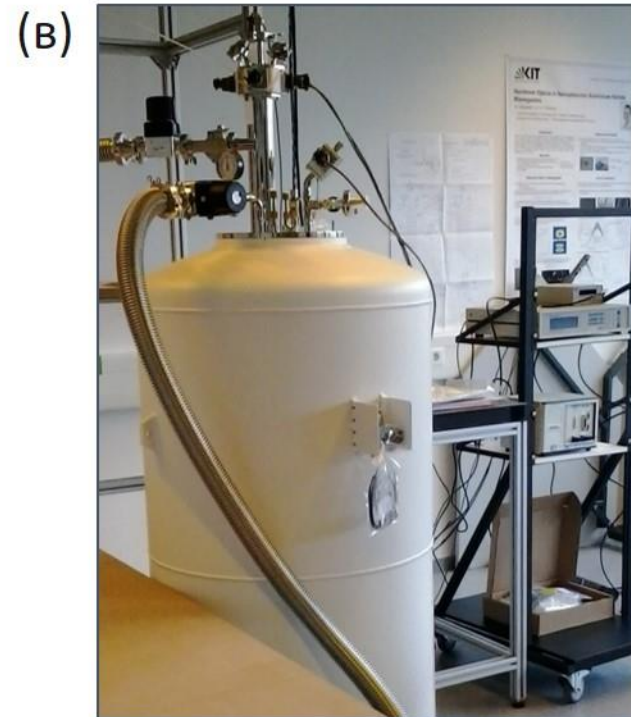
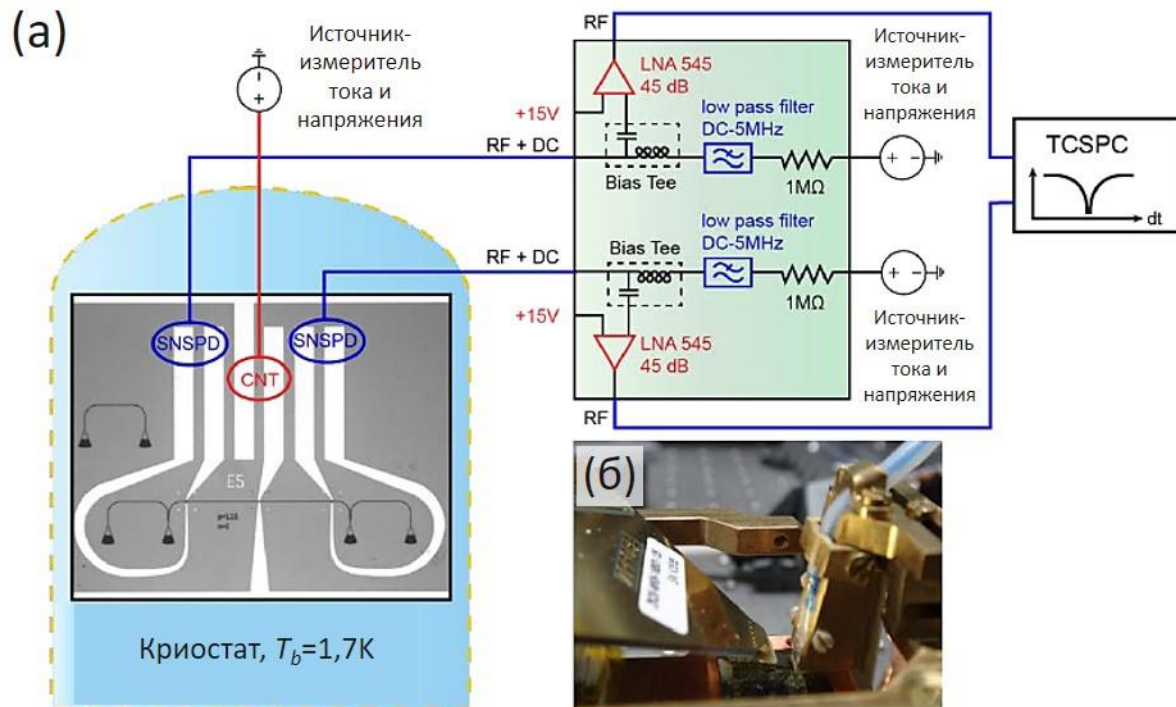


## WSSPD

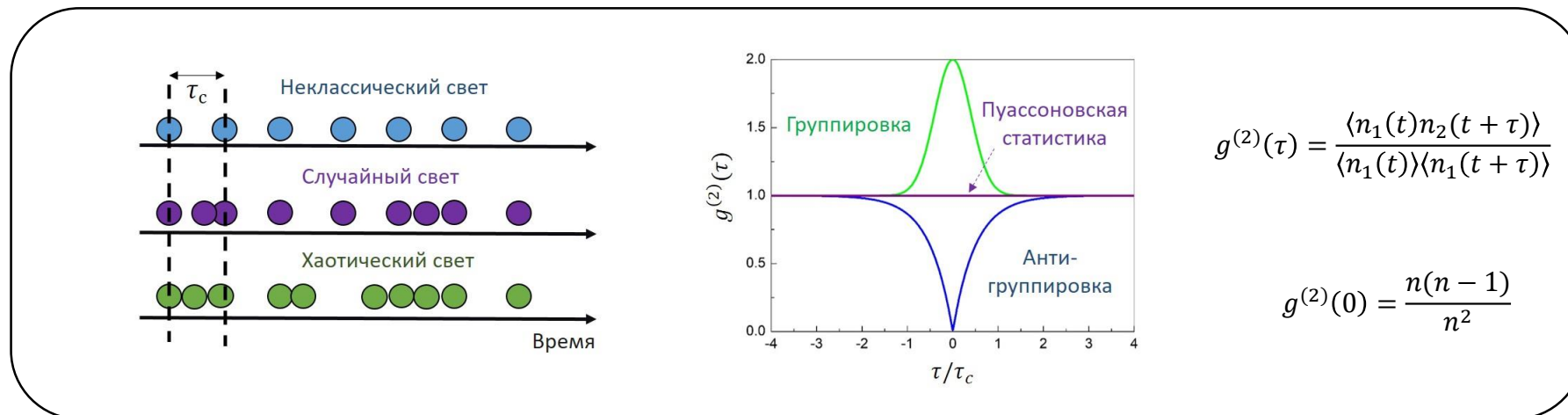
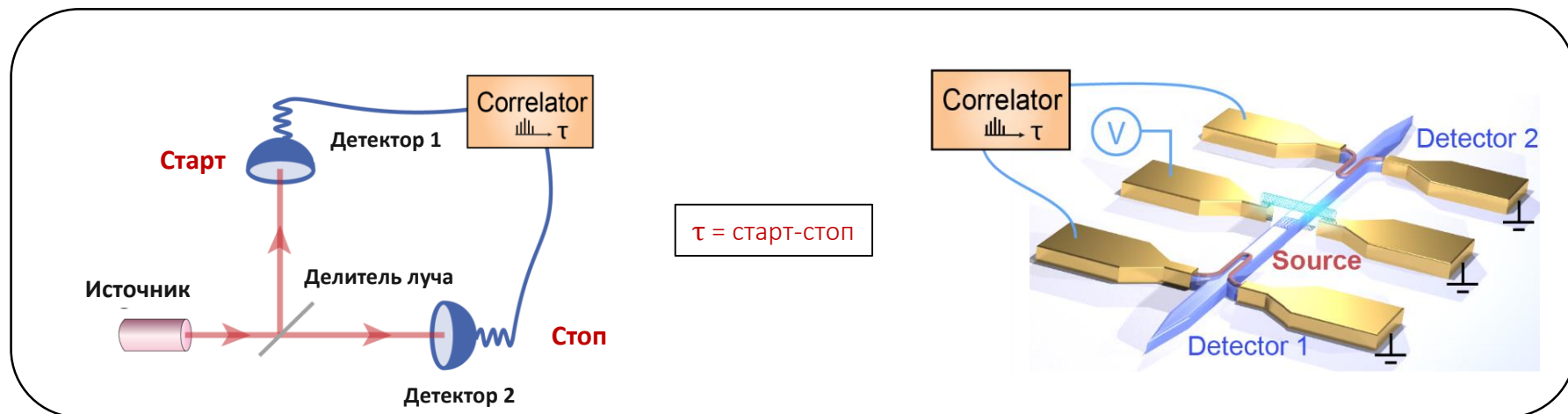


## Углеродная нанотрубка



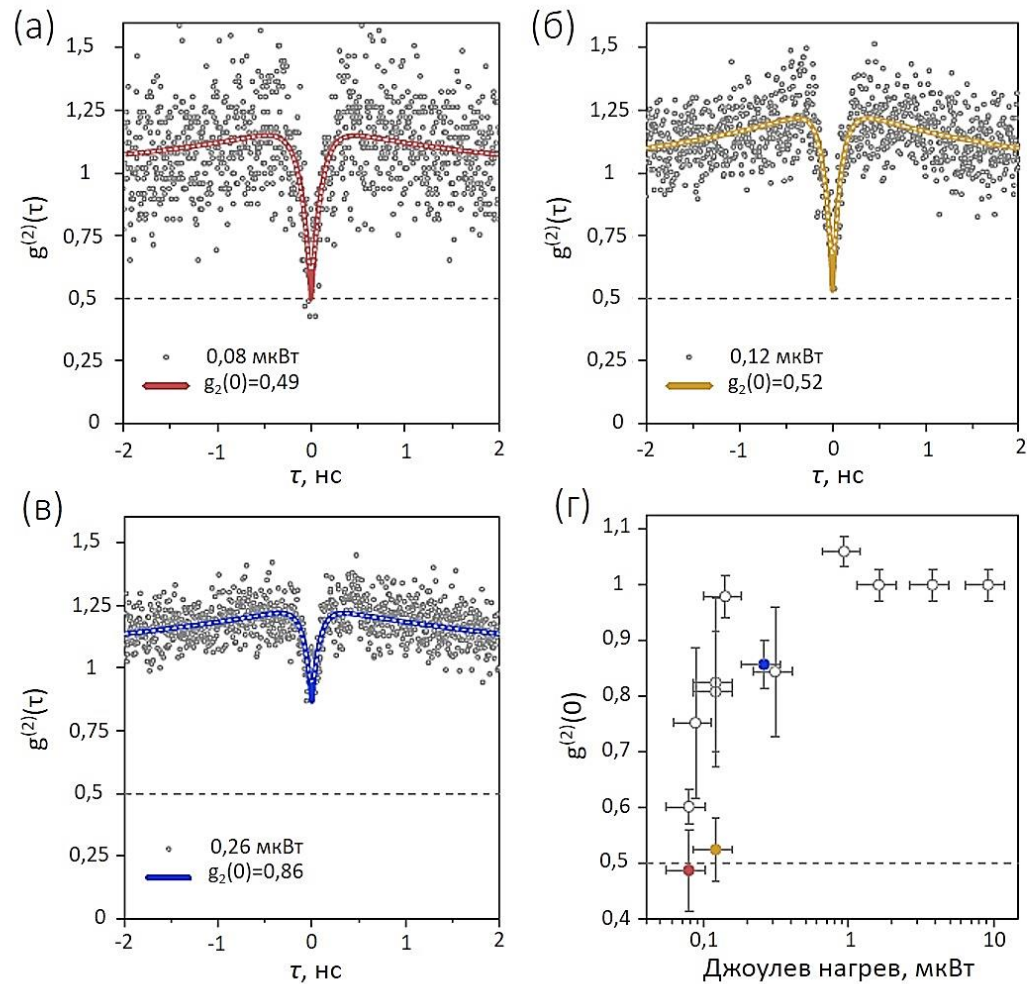


## Схема Хэнбри Брауна-Твисса, реализованная на чипе



Измерение корреляционной функции второго порядка позволяет найти однофотонные ИСТОЧНИКИ

# Прототип квантово-оптической интегральной схемы



Аппроксимация:  $g^{(2)}(\tau) = 1 - c_1 e^{-\gamma_1 |\tau - \tau_0|} - c_2 e^{-\gamma_2 |\tau - \tau_0|}$

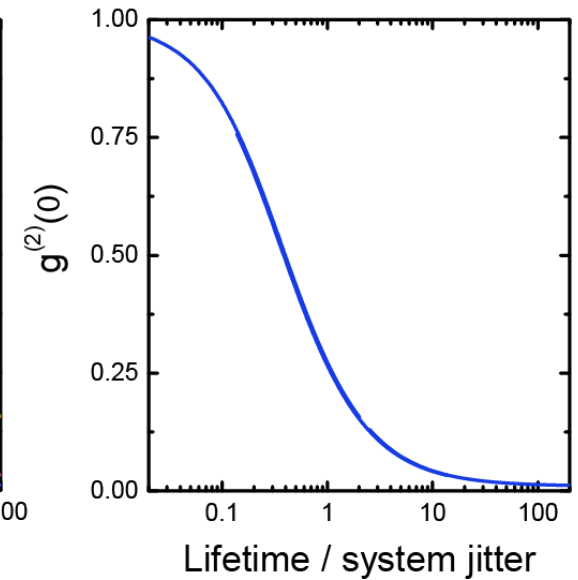
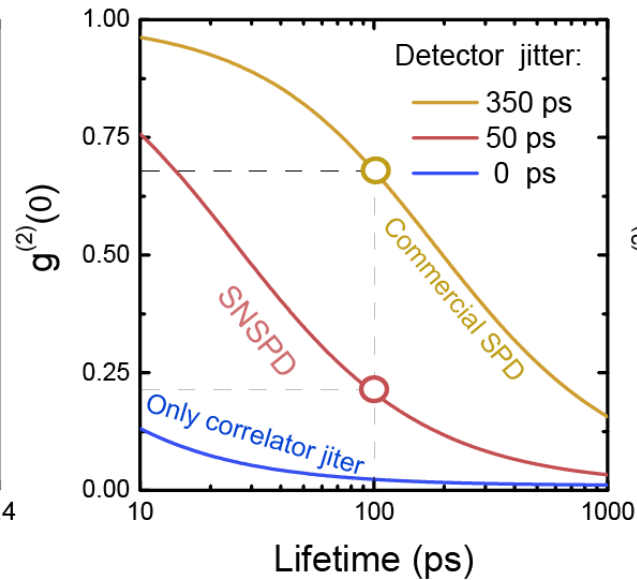
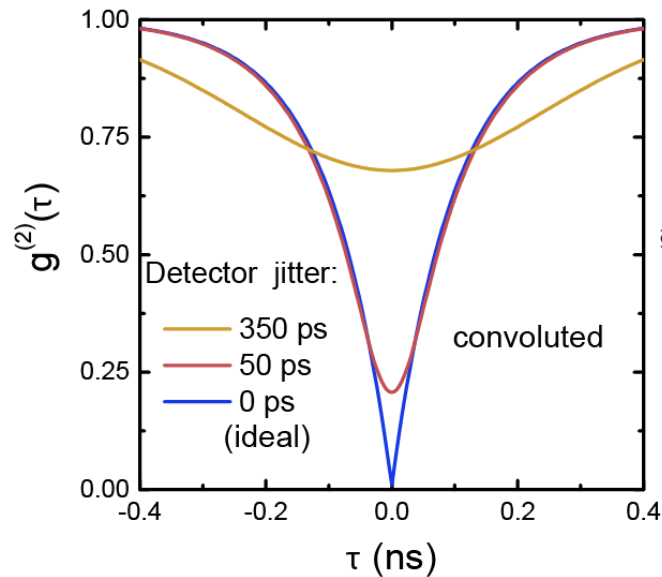
Параметры:  $c_1 < 0$ ,  $c_2 > 0$  – амплитуды,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – скорость спада

# Прототип квантово-оптической интегральной схемы

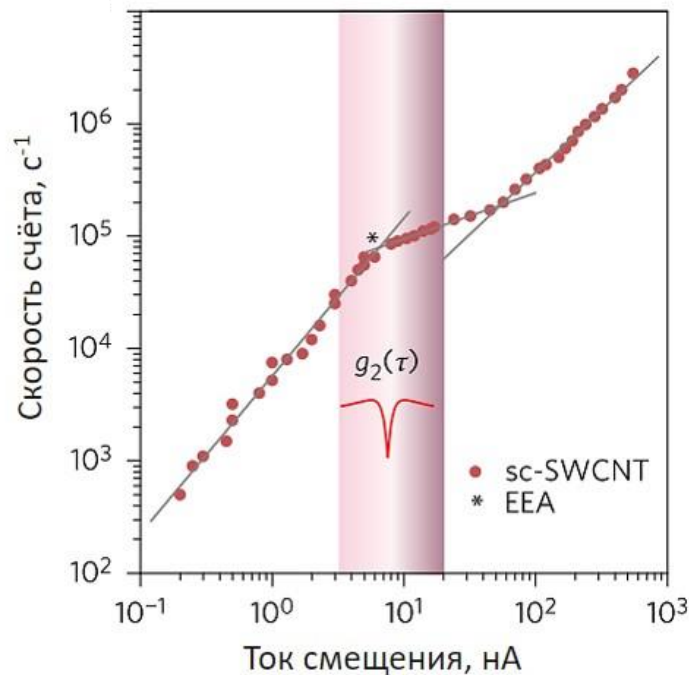
Джиттер детектора  $\sim 50$  пс

Джиттер APD  $\sim 300$  пс

Время жизни экситона в ловушке  $\sim 100$  пс

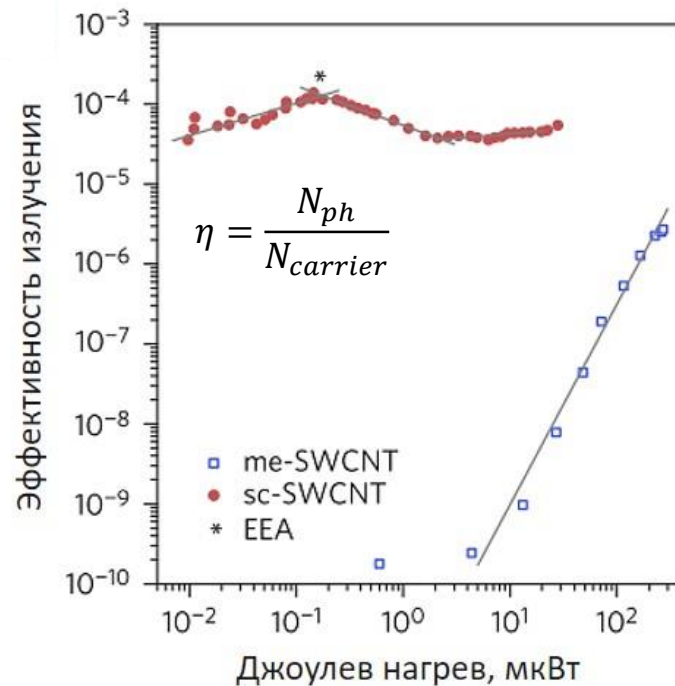


## Скорость счёта от тока смещения



- до EEA (\*)  $\sim \sqrt{P}$  или  $\sim \sqrt{T}$  Более сильная зависимость, чем в экспериментах по фотолюминисценции. Причина - увеличение диффузионной длины экситона и вероятности достижения ловушки ( $\sim 0.5$  мкм) от контакта, где он генерируется  $v = \sqrt{kT/m}$

## Эффективность излучения



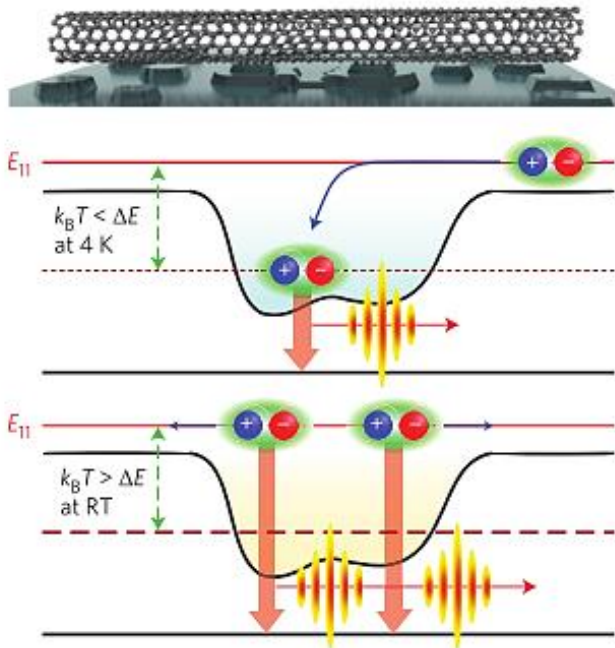
- падение эффективности из-за EEA  
 - небольшой рост из-за нагрева (термический свет),



Модель взята из работы Ma:

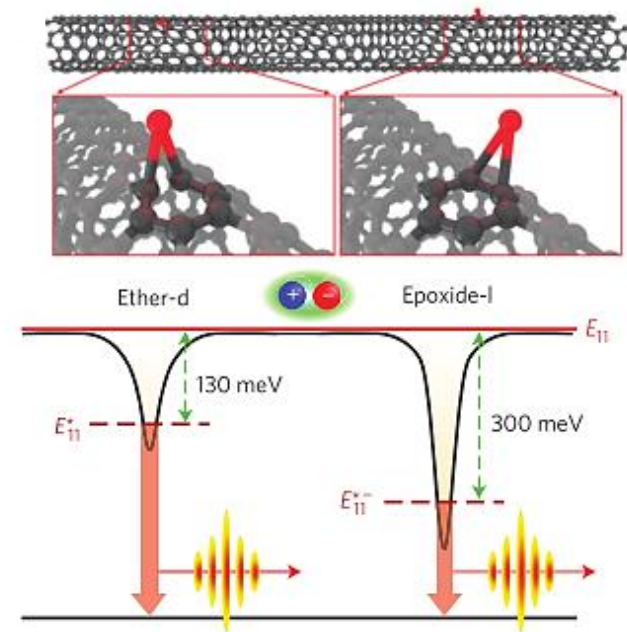
X. Ma, N. F. Hartmann, J. K. S. Baldwin, S. K. Doorn, and H. Htoon, "Room-temperature single-photon generation from solitary dopants of carbon nanotubes," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 8, pp. 671–675, 2015.

## Квантовая яма для не допированных трубок (~10 мэВ)



При гелиевой температуре наблюдается однофотонная эмиссия

## Квантовая яма с низкой энергией для допированных нанотрубок (~100 мэВ)

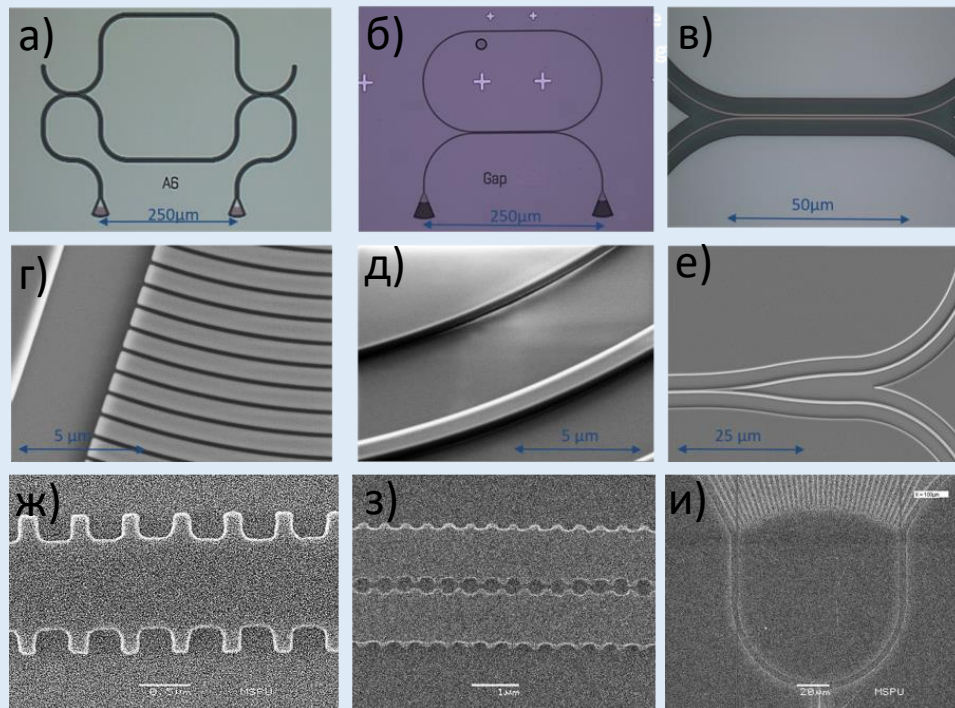


При комнатной температуре наблюдается однофотонная эмиссия

1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
- 7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы**
8. Дальнейшая работа

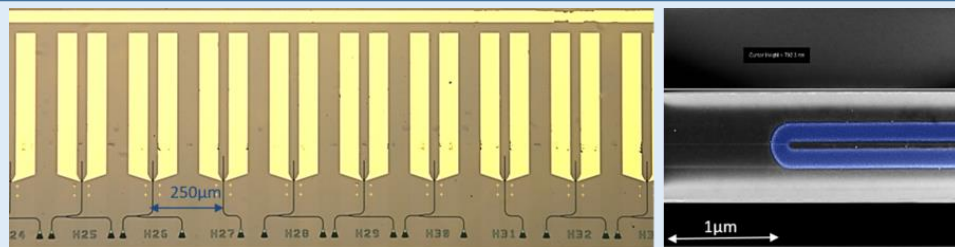
## Не требующие охлаждения:

- а) интерферометры Маха-Цендера
- б) кольцевые резонаторы
- в) направленные ответвители
- г) дифракционные решетки (каплеры)
- д) волноводы
- е) делители луча
- ж) брегговские волноводы
- з) антинаправленные ответвители
- и) демультимплексоры (AWG)



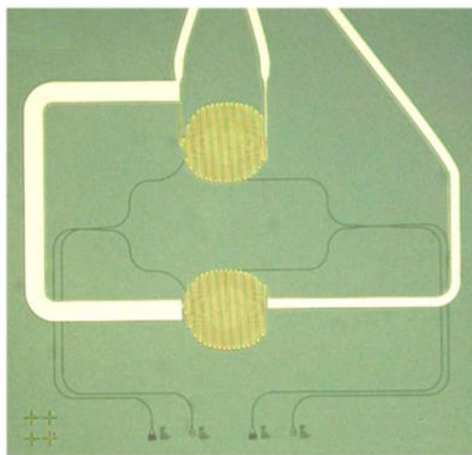
## Требующие охлаждения до 2K

- ✓ Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPDs или SNSPDs)
- ✓ Однофотонный спектрометр



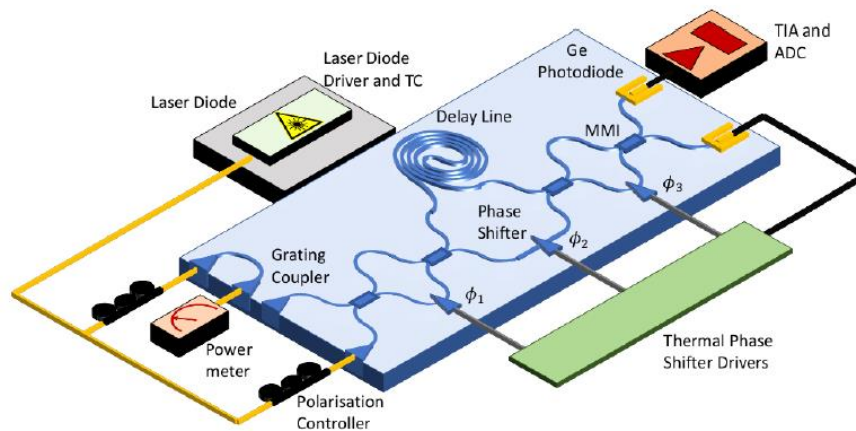
1. Мотивация работы
2. Механизм работы WSSPD
3. Технология изготовления WSSPD
4. Основные характеристики WSSPD
5. Однофотонный спектрометр видимого и ИК диапазона
6. Прототип полностью интегральной микросхемы
7. Изготавливаемые интегральные оптические элементы
- 8. Дальнейшая работа**

## Перестраиваемые элементы



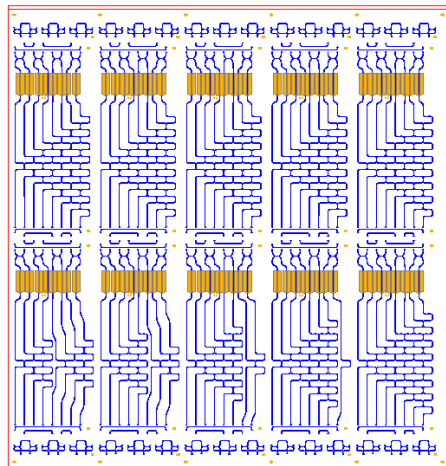
A. P. Ovvyan et al. *J. Opt.*, vol. 18, no. 6, 2016.

## Генератор случайных чисел



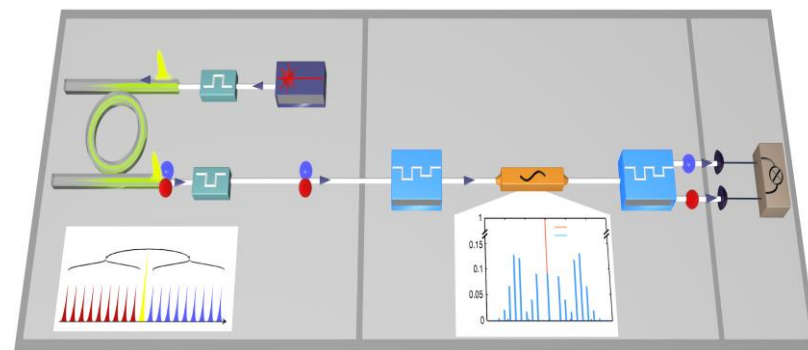
F. Raffaelli et al. arxiv no. 1, pp. 1–8, 2018.

## Бозонное сэмпирование



C. Taballione et al. arxiv 2018.

## Высокоразмерные состояния на чипе



M. Kues et al Nature, **546**, 622-626 (2017)

1. V. Kovalyuk, W. Hartmann, O. Kahl, N. Kaurova, A. Korneev, G. Goltsman, W. H. P. Pernice, “Absorption engineering of NbN nanowires deposited on silicon nitride nanophotonic circuits,” ***Optics Express***, vol. 21, no. 19, pp. 22683–22692, 2013.
2. S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, G. N. Goltsman, A. Korneev, W. H. P. Pernice, “Waveguide-integrated single- and multi-photon detection at telecom wavelengths using superconducting nanowires,” ***Applied Physics Letters***, vol. 106, no. 15, p. 151101, 2015.
3. O. Kahl, S. Ferrari, V. Kovalyuk, G. N. Goltsman, A. Korneev, W. H. P. Pernice, “Waveguide integrated superconducting single-photon detectors with high internal quantum efficiency at telecom wavelengths.,” ***Scientific Reports***, vol. 5, no. February, p. 10941, 2015.
4. S. Ferrari, V. Kovalyuk, W. Hartmann, A. Vetter, O. Kahl, C. Lee, A. Korneev, C. Rockstuhl, G. Gol’tsman, W. Pernice, “Hot-Spot Relaxation Time Current Dependence in Niobium Nitride Waveguide- Integrated Superconducting Nanowire Single- Photon Detectors,” ***Optics Express***, vol. 25, no. 8, pp. 8739–8750, 2016.
5. S. Khasminskaya, F. Pyatkov, K. Słowik, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, F. Henrich, M. M. Kappes, G. Gol’tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, W. H. P. Pernice, “Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source,” ***Nature Photonics***, vol. 10, pp. 727–733, 2016.
6. A. Vetter, S. Ferrari, P. Rath, R. Alaee, O. Kahl, V. Kovalyuk, S. Diewald, G. N. Goltsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, W. H. P. Pernice, “Cavity-Enhanced and Ultrafast Superconducting Single-Photon Detectors,” ***Nano Letters***, vol. 16, no. 11, pp. 7085–7092, 2016.

7. M. Shcherbatenko, Y. Lobanov, A. Semenov, V. Kovalyuk, A. Korneev, R. Ozhegov, A. Kazakov, B. M. Voronov, G. N. Goltsman, “Potential of a Superconducting Photon Counter for Heterodyne Detection at Telecommunication Wavelength,” ***Optics Express***, vol. 179, no. 1980, pp. 1178–1181, 2016.
8. Y. Lobanov, M. Shcherbatenko, A. Semenov, V. Kovalyuk, O. Kahl, S. Ferrari, Korneev A., Ozhegov R., Kaurova N., Voronov B. M., Pernice W. H. P., Gol'tsman G. N. “Superconducting nanowire single photon detector for coherent detection of weak signals,” ***IEEE Transactions on Applied Superconductivity*** 2017.Vol.27, no.4
9. O. Kahl, S. Ferrari, V. Kovalyuk, A. Vetter, G. Lewes-Malandrakis, C. Nebel, A. Korneev, G. Goltsman, W. Pernice, “Spectrally multiplexed single-photon detection with hybrid superconducting nanophotonic circuits,” ***Optica***, vol. 4, no. 5, p. 557, 2017.
10. F. Pyatkov, S. Khasminskaya, V. Kovalyuk, F. Henrich, M. M. Kappes, G. N. Goltsman, W. H. P. Pernice, R. Krupke, “Sub-nanosecond light-pulse generation with waveguide-coupled carbon nanotube transducers,” ***Beilstein Journal of Nanotechnology***, vol. 8, pp. 38–44, 2017.
11. V. Kovalyuk, S. Ferrari, O. Kahl, A. Semenov, M. Shcherbatenko, Y. Lobanov, R. Ozhegov, A. Korneev, N. Kaurova, B. Voronov, W. Pernice, G. Gol'tsman, “On-chip coherent detection with quantum limited sensitivity,” ***Scientific Reports***, vol. 7, no. 4812, 2017.

## KIT/Muenster



Prof. W. Pernice



Dr. S. Khasminskaya



M.Sc. S. Ferrari



Dr. O. Kahl

## МПУ/ВШЭ



Prof. G. Gol'tsman

## TU Darmstadt/KIT



Prof. R. Krupke



M.Sc. F. Pyatkov

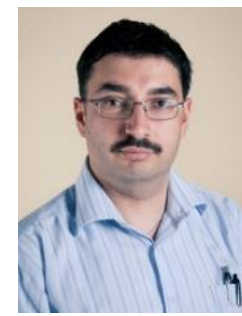


Dr. F. Hennrich



Prof. M. Kappes

## МПУ/МФТИ



Dr. A. Korneev



Спасибо за внимание!

