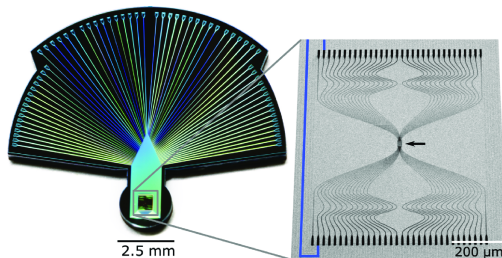


Supravodivé nanodrátky

Antonín Černoch a Jan Soubusta

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



Obsah

- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
- 3 Supravodivý nanodrátek
- 4 Konstrukce SNSPD
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii
- 6 Výrobci

Historický vývoj

- 1911 objevena supravodivost kovů nizozemským fyzikem Heike Kamerlingh Onnesem
- 1971 rychlost změny odporu supravodiče z Pb při osvětlení laserovým pulsem
- 1977 zkonstruován TES (Transition-edge sensor) pracující na hraně supravodivosti
- 1996 supravodivý senzor může pracovat i mnohem rychleji než termální bolometr
- 2001 první funkční prototyp detektoru založeného na supravodivém nanodrátku

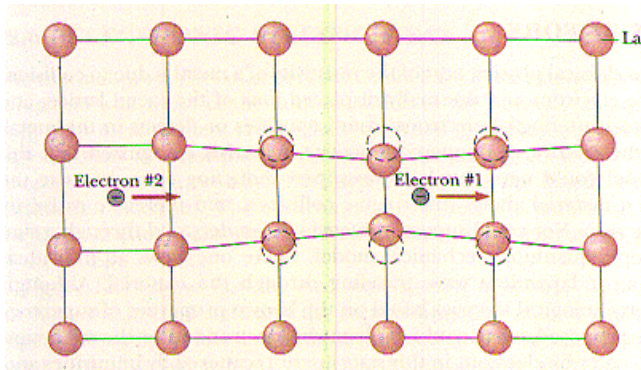
SNSPD – *Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors*

Cooperovy páry

- proč funguje supravodivost?
- vazební energie Cooperových páry v jednotkách meV
- dopad fotonu s energií jednotek eV rozbije stovky těchto párů
- v oblasti dopadu je narušena supravodivost a vznikne *hotspot*

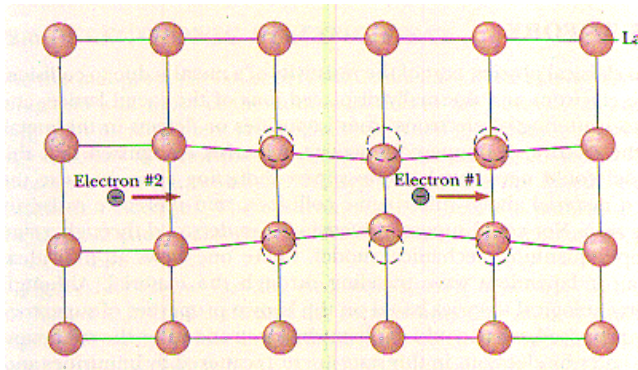
Cooperovy páry

- proč funguje supravodivost?
- vazební energie Cooperových páry v jednotkách meV
- dopad fotonu s energií jednotek eV rozbije stovky těchto párů
- v oblasti dopadu je narušena supravodivost a vznikne *hotspot*



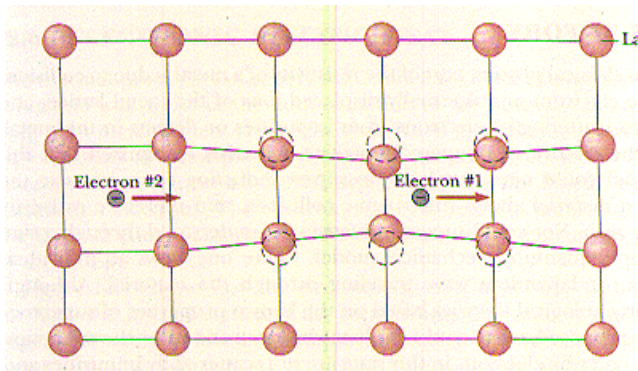
Cooperovy páry

- proč funguje supravodivost?
- vazební energie Cooperových páry v jednotkách meV
- dopad fotonu s energií jednotek eV rozbije stovky těchto párů
- v oblasti dopadu je narušena supravodivost a vznikne *hotspot*



Cooperovy páry

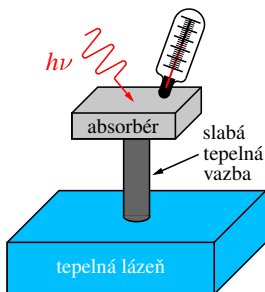
- proč funguje supravodivost?
- vazební energie Cooperových páry v jednotkách meV
- dopad fotonu s energií jednotek eV rozbije stovky těchto párů
- v oblasti dopadu je narušena supravodivost a vznikne *hotspot*



Obsah

- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES**
- 3 Supravodivý nanodrátek
- 4 Konstrukce SNSPD
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii
- 6 Výrobci

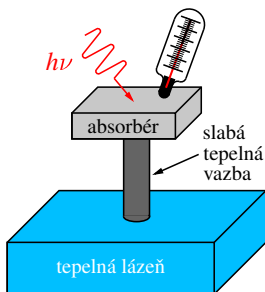
TES – *Transition Edge Sensor*



Mikrokolorimetr na hraně supravodivosti

- nárůst teploty → změna odporu
- teplota supravodivosti $T_c \sim 100 \text{ mK}$
- tenký wolframový film $25 \times 25 \times 0.035 \mu\text{m}^3$ na Si substrátu s Al konektory
- širokospektrální, nutná kalibrace podle energie fotonů ($E = hc/\lambda$)

TES – *Transition Edge Sensor*



Mikrokolorimetr na hraně supravodivosti

- nárůst teploty → změna odporu
- teplota supravodivosti $T_c \sim 100$ mK
- tenký wolframový film $25 \times 25 \times 0.035 \mu\text{m}^3$ na Si substrátu s Al konektory
- širokospektrální, nutná kalibrace podle energie fotonů ($E = hc/\lambda$)

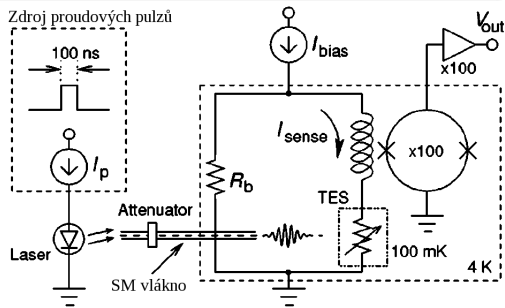
Kvantová účinnost

- teoreticky 80 %, v praxi 20 % (pro 1550 a 1310 nm)
- optická past nebo rezonátoru → 95 %
- malá absorpce, velká odrazivost

TES – Funkční schéma

Zpracování proudového pulzu

- Proudový pulz v obvodu detektoru úměrný změně teploty
- $100\times$ SQUID (supravodivé kvantové interferenční zařízení) @4 K
- další elektronika při pokojové teplotě



Miller *et al.*, App. Phys. Lett. **83**, 791 (2003)

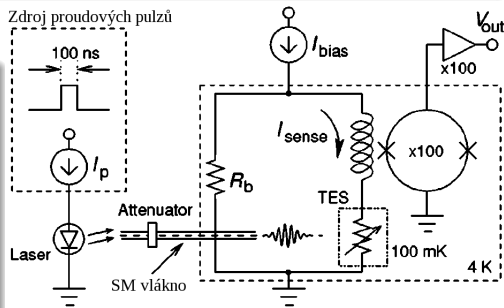
TES – Funkční schéma

Zpracování proudového pulzu

- Proudový pulz v obvodu detektoru úměrný změně teploty
- $100\times$ SQUID (supravodivé kvantové interferenční zařízení) @4 K
- další elektronika při pokojové teplotě

Vlastnosti TES

- pomalý (vedení tepla) – $\Delta t \approx 100$ ns, $\tau_D \approx 2$ μ s
- zanedbatelné $D \approx 3$ Hz
- rozlišení až 8 fotonů v rozsahu od 200 do 1800 nm



Miller *et al.*, App. Phys. Lett. **83**, 791 (2003)

Obsah

- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
- 3 Supravodivý nanodrátek**
- 4 Konstrukce SNSPD
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii
- 6 Výrobci

Něco za něco

Co chceme

- zvýšit účinnost
- zrychlit proces detekce
- zmenšit timing jitter
- zachovat malé D



Něco za něco

Co chceme

- zvýšit účinnost
- zrychlit proces detekce
- zmenšit timing jitter
- zachovat malé D

Co jsme ochotni obětovat

- NIC
- ...
- když už něco musí být, tak třeba rozlišení v počtu fotonů



Něco za něco

Co chceme

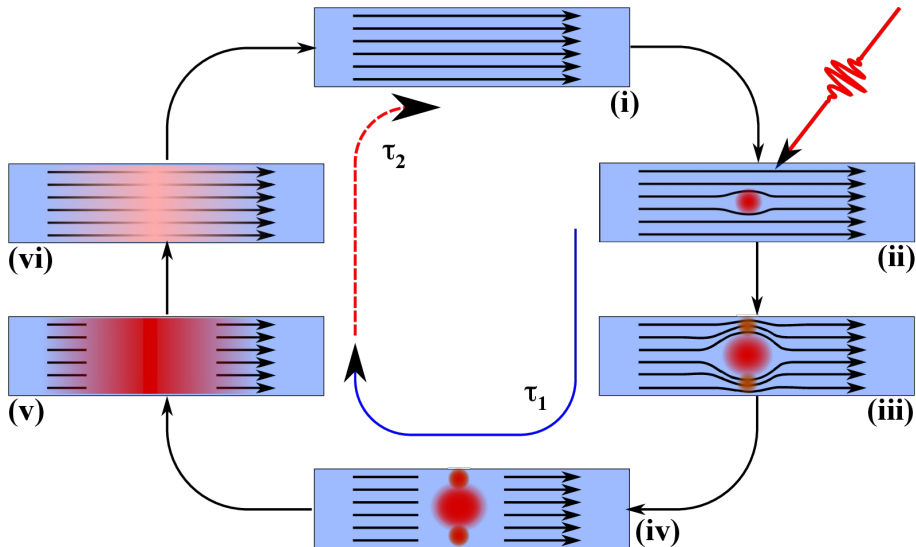
- zvýšit účinnost
- zrychlit proces detekce
- zmenšit timing jitter
- zachovat malé D

Co jsme ochotni obětovat

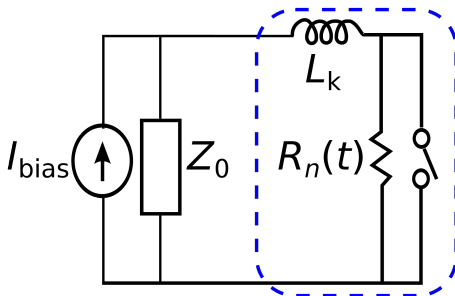
- NIC
- ...
- když už něco musí být, tak třeba rozlišení v počtu fotonů



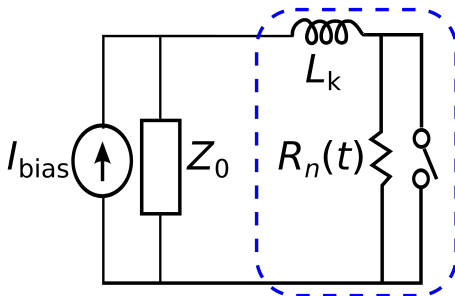
Princip detekce v nanodrátku



Náhradní elektrické schéma



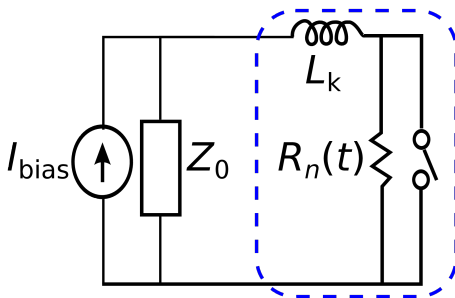
Náhradní elektrické schéma



kinetická induktaance L_k

induktance – magnetické pole způsobuje setrvačnost směru proudu
kinetická induktaance i bez cívky – u supravodičů s velmi vysokou hustotou proudu a při velmi vysokých frekvencích

Náhradní elektrické schéma



- detekční napěťový pulz velmi slabý (μV)
- kryogenní zesilovače 30 dB (1-2 GHz šířka pásma)
- další širokopásmový zesilovač při pokojové teplotě 20 dB (9 GHz)
- výstupní detekční puls 300 – 400 mV, SNR 100:1

kinetická induktance L_k

induktance – magnetické pole způsobuje setrvačnost směru proudu
 kinetická induktance i bez cívky – u supravodičů s velmi vysokou hustotou proudu a při velmi vysokých frekvencích

Kvantová účinnost

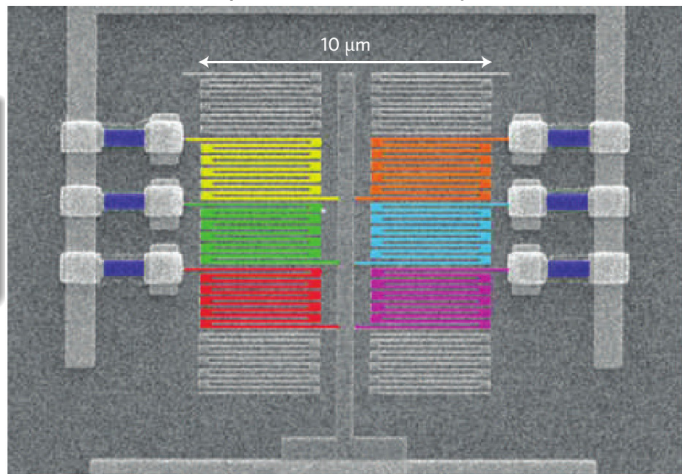
omezená šířka nanodrátku $\rightarrow$ malá plocha $\Rightarrow$ meandry

Účinnost

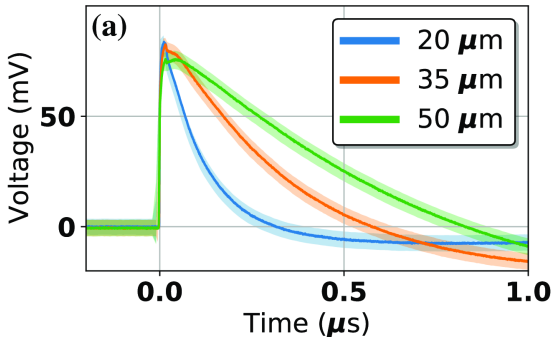
- navázání
- absorpce
- záznamu

DDE nebo SDE

Optimalizace na
různé aplikace
viz konstrukce



Časové vlastnosti



náběžná hrana τ_1

$\approx 1 \text{ ns}$

úběžná hrana τ_2

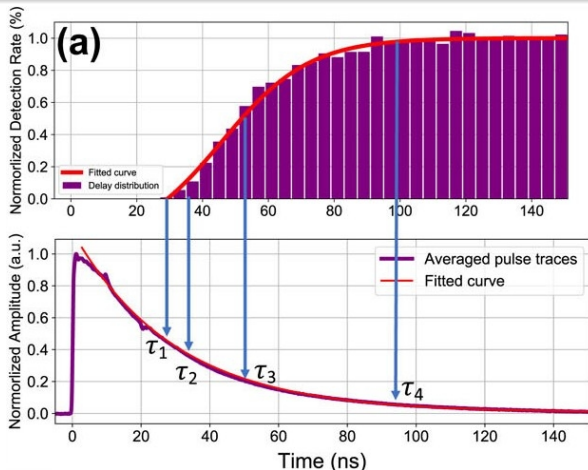
od jednotek po stovky nanosekund v závislosti na aktivní ploše meandru (délce nanodrátku)

timing jitter Δt

- více zdrojů: detektor, zesilovací elektronika, zdroj fotonů nebo detekční osciloskop
- největší vliv délka nanodrátku

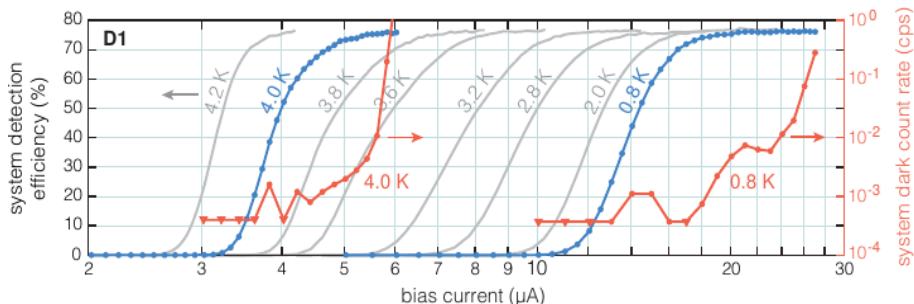
účinnost detekce $\times$ mrtvá doba τ_d

- zasažený úsek nanodrátku není v supravodivém stavu
- teplota substrátu (rezervoáru) výrazně pod T_c , tak jak to jen jde



Temné detekce D

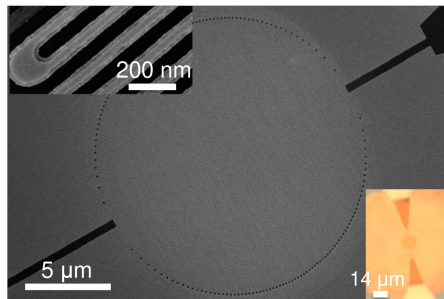
- vnější – malá excitační energie Cooperových párů $\Rightarrow$ chlazené filtry
- vnitřní – fluktuace proudu, rostou exponenciálně s I_{SW} , pro $0.9 I_{\text{SW}}$ jsou zanedbatelné
- nižší teploty $\rightarrow$ lepší SNR



Obsah

- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
- 3 Supravodivý nanodrátek
- 4 Konstrukce SNSPD**
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii
- 6 Výrobci

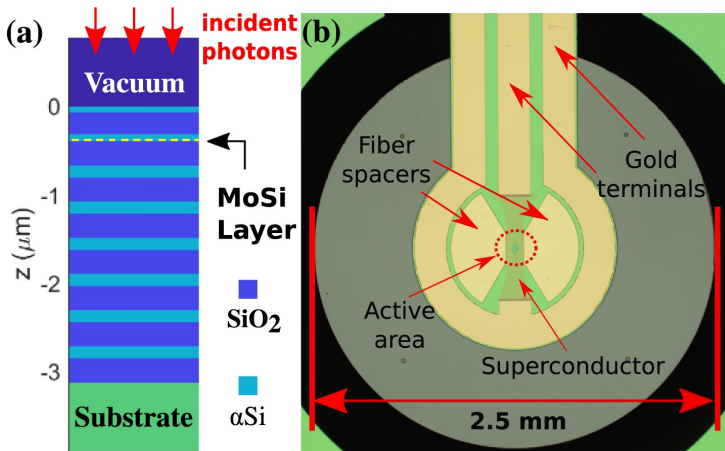
Na kolmo k výstupu optického vlákna



- difrakční limit resp. stopa svazku z optického vlákna $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ pro 1550 nm
- centrování optického vlákna vůči senzoru při změně teploty
- užší nanodrátek → větší pravděpodobnost záznamu, ale menší plocha → delší meandr → větší Δt
- optimalizace meandru pro různé aplikace a vlnové délky

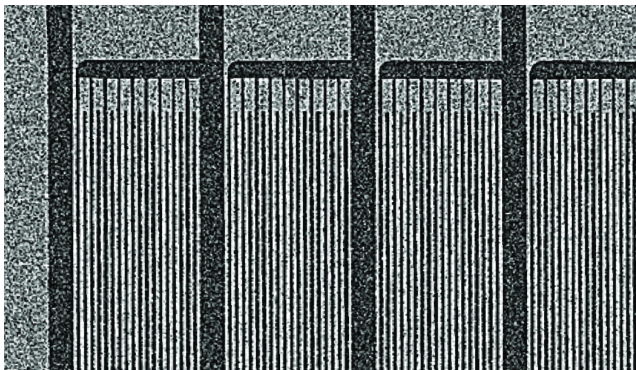
Nanodrátek v rezonátoru

- samotný nanodrátek má účinnost absorpce pouze 30 %
- zrcadla pod (i nad) z Au, Ag nebo dielektrických vrstev (Braggovská)



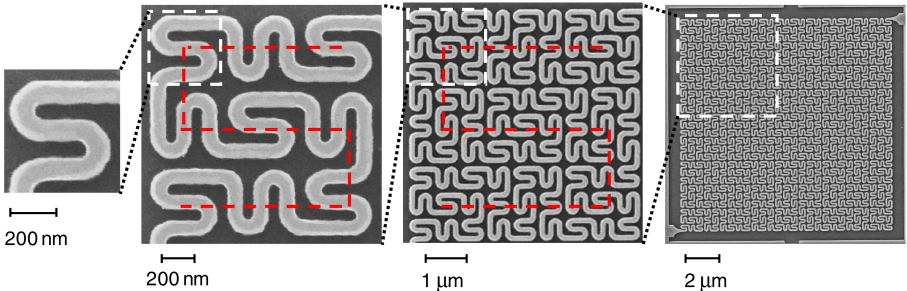
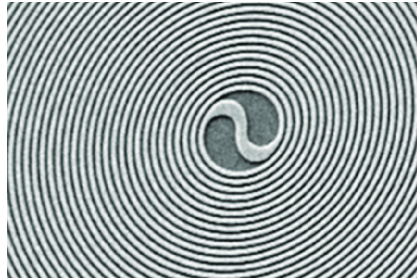
Segmentace

- rozdělení meandru na několik segmentů s odděleným vyčítáním
- zvýšení frekvence čítání nebo rozlišení v počtu fotonů
- možnost přeslechů, pokud jsou nanodrátky blízko sebe



Polarizační závislost

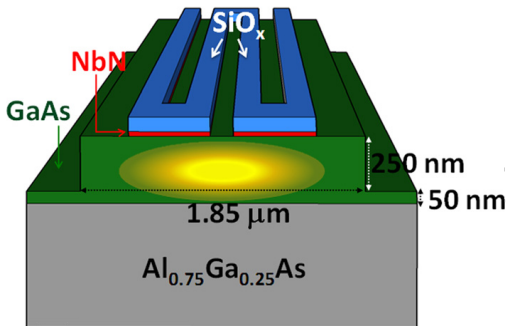
- výrazná anizotropie meandrů
- polarizace ve směru nanodrátku má menší absorpci než kolmá
- nové tvary - spirála, fraktály



Nanodráték na vlnovodu

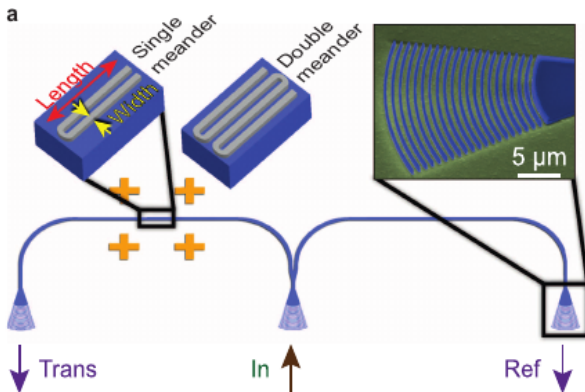


- integrovaná optika – generace, zpracování i detekce světla ve vlnovodu
- odpadá problém málo účinného navázání do popř. vyvázání z materiálu o velkém indexu lomu
- přenos energie skrz evanescentní vlnu

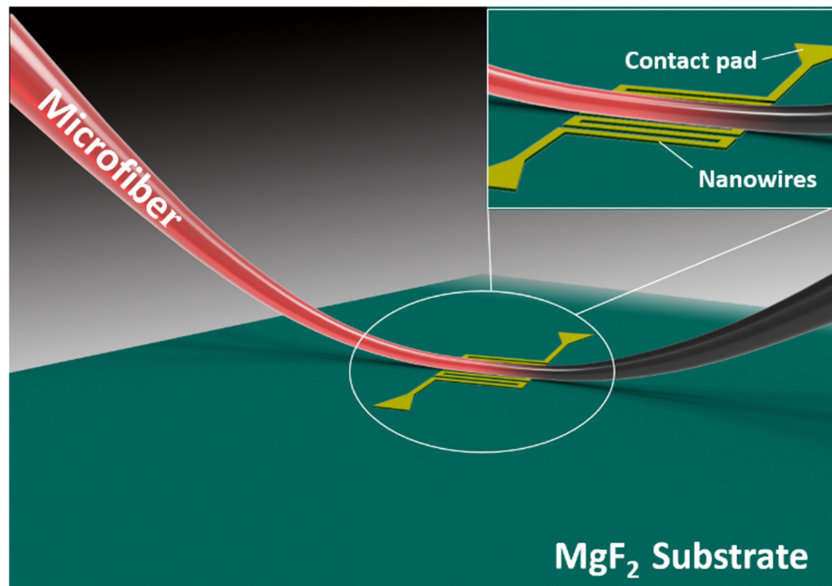


Zatím nic moc výsledky

- tvar a délka meandru optimalizovány vzhledem k vlnové délce a vedenému modu
- krátký meandr → rychlejší odezva (stovky MHz)
- maximální DDE 66 % (pro $0.96 I_{sw} \rightarrow D = 1.8 \text{ kHz}$)

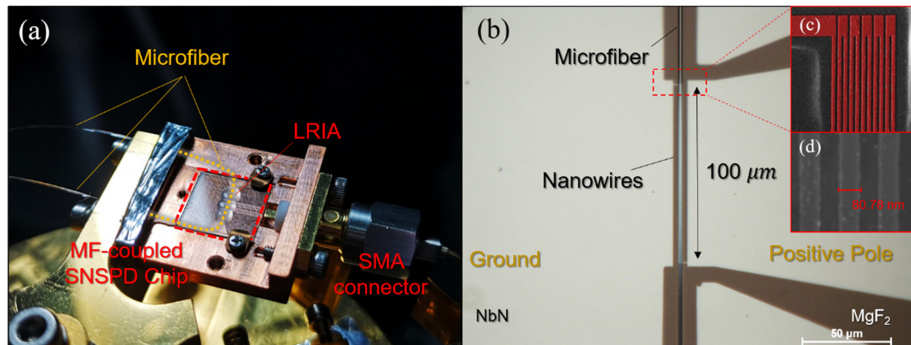


Fokusace mikrovláknem



Zatím nic moc výsledky

- typický průměr jádra vlákna pro 1550 nm $\sim 6 \mu\text{m}$
- mikrovláknem bez pláště zúženo až na $1.3 \mu\text{m}$ $\rightarrow$ výrazné ztráty, výraznější pro delší vlnové délky
- experimentální SDE 45 % a $D = 50 \text{ Hz}$ pro 1550 nm



Obsah

- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
- 3 Supravodivý nanodrátek
- 4 Konstrukce SNSPD
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii**
- 6 Výrobci

Maximální secret bit rate



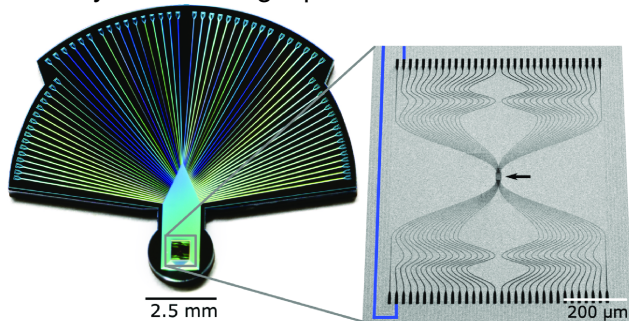
- frekvence čítání 10 GHz
- $\Delta t < 10$ ps (3 ps)
- SDE nejlépe 100 % (98 %)
- bez šumu (6×10^{-6} Hz)

(rekordmani v jednotlivých kategoriích)

kdo vyhraje moderní pětiboj?

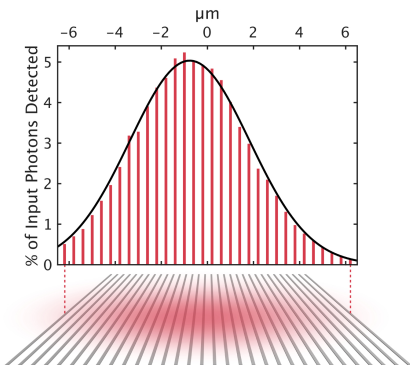
PEACOOQ *Optica* **10**, 183 (2023)

Performance-Enhanced Array for Counting Optical Quanta



- 32 zvlášť vyčítaných nanodrátků dlouhých $13\ \mu\text{m}$
- elektrické kontakty mají stejnou délku

Vlastnosti



- pravděpodobnost přeslechu 0.5 %
- účinnost jednoho segmentu násobíme 25 $\rightarrow$ SDE (78 ± 4) %
- mrtvá doba 5 ns + 2 ns pro SDE alespoň 25 % $\rightarrow$ 143 MHz
- polarizačně nezávislé
- technicky možné čítat počty fotonů

Celkem: pro 1 GHz má SDE 50 % a timing jitter 46 ps

QKD na 100 km (zdroj 10 GHz, $\langle n \rangle = 0.025$ na puls, 0.2 dB km^{-1})
dosáhne 70 Mbit s^{-1} tajného klíče

Obsah

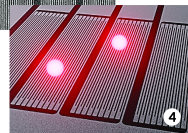
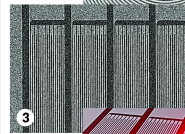
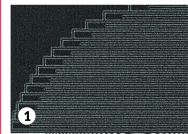
- 1 Historický vývoj
- 2 Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
- 3 Supravodivý nanodrátek
- 4 Konstrukce SNSPD
- 5 SNSPD pro kvantovou kryptografii
- 6 Výrobci**

Výrobci

ID Quantique

- spin-off prof. N. Gisin (Ženeva)
- doplněk jejich QKD
- až 16 různých senzorů v jednom kryostatu

www.idquantique.com



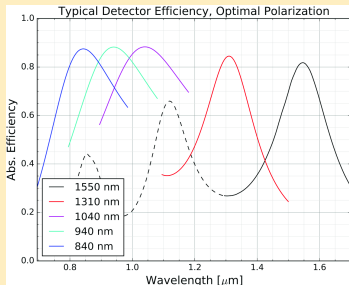
Photon Spot (USA)

www.photonspot.com

- spin-off dr. Ananta
- vyrábí na míru
- certifikát od NISTu:
na 1550 nm SDE
95.5 % při 100 kHz



Quantum Opus (USA)

www.quantumopus.com

- spin-off dr. A. J. Millera
- model Opus One, až 16 senzorů,
rack-mount
- nejlevnější konfigurace za \$105 000

Scontel (Rusko)

www.scontel.ru

- založena roku 2004 prof. G. Gol'tsmanem a jeho studenty
- 5 typů modelů optimalizovaných na účinnost, nízký šum, širokospektrální odezvu



Single Quantum (Nizozemí)

www.singlequantum.com

- na trhu od roku 2012, zapojena do projektu EuroQCI
- senzory optimalizované na 800, 900, 1064, 1310 a 1550 nm

Porovnání modelů pro 1550 nm

	ID Quantique		Photon Spot*	Quantum Opus	Scontel	Single Quantum
	ID230	ID287*				
SDE [%]	25	95	85	80	90	85
D [Hz]	50	0.01	100	100	100	10
Δt [ps]	150	24	30	100	50	20
CR [MHz]	0.5	100	20	20	67	50



Co říci závěrem

Doporučená literatura

- G. N. Gol'tsman *et al.*, "Picosecond superconducting single-photon optical detector", *Appl. Phys. Lett.* **79**, 705 (2001).
- Ch. M. Natarajan, M. G. Tanner and R. H. Hadfield, "Superconducting nanowire single-photon detectors: physics, and applications", *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 063001 (2012); ArXiv quant-ph 1204.5560.
- Lixing You, "Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors for Quantum Information", arXiv quant-ph 2006.00411 (2000).
- I. Craiciu *et al.*, "High-speed detection of 1550 nm single photons with superconducting nanowire detectors", *Optica* **10**, 183 (2023).

Při přípravě této prezentace byl využit AI, přesněji DALL-E pro generování kreseb