

Detekce jednotlivých fotonů s využitím supravodivých nanodrátků

Technologie detekce viditelného a infračerveného záření využívající supravodivost se v posledních letech rychle rozvíjí a má potenciál nahradit doposud používané lavinové fotodiody v situacích, kde je potřeba detekovat slabé signály nebo dokonce jednotlivé fotony. Supravodivé detektory mají výhodu v tom, že materiál v supravodivém stavu je velmi citlivý a stačí energie jednoho fotonu na to, aby se supravodivý stav narušil. Tato vlastnost je zvláště užitečná v oblasti kvantové informatiky, kde se využívají jednotlivé fotony pro přenos kvantových stavů, a v astronomii při detekci velmi vzdálených objektů. Supravodivé detektory se vyznačují také vysokou rychlostí a nízkým šumem, což umožňuje získat vysokou přesnost a citlivost při detekci signálu. Na druhou stranu mají také několik nevýhod, jako jsou vysoké náklady na výrobu a údržbu a potřeba chlazení na velmi nízkou teplotu. Tyto faktory mohou omezovat jejich použití v některých oblastech. Nicméně, s dalším vývojem by mohly být tyto nevýhody částečně eliminovány, což by umožnilo širší použití supravodivých detektorů v různých oblastech v relativně blízké budoucnosti.

Klíčová slova: detekce jednotlivých fotonů, supravodivé detektory, nanodrátky, PEACQ

HISTORICKÝ PŘEHLED

Historie vývoje elektronických detektorů slabých světelných optických signálů na úrovni jednotlivých fotonů začíná již na počátku 20. století po objevení a vysvětlení fotoefektu. Ve 30. letech byl zkonstruován první fotonásobič, který umožňoval poprvé detekovat jednotlivé fotony. Tento typ detektoru se stal na desítky let standardem pro mnoho aplikací, jako je například detekce kosmického záření ze vzdáleného vesmíru nebo měření slabého světla a spektroskopie slabých luminiscenčních zdrojů. Tyto fotodetektory však svou konstrukcí vyžadovaly umístit senzor a elektrody do vakuované trubice. Pro provoz bylo také nutné připojit fotonásobič na napětí řádově tisíce voltů.

Následující rozvoj polovodičových technologií vedl k revolučním změnám. Namísto elektronek se začaly používat tranzistory a fotonásobičům začal konkurovat nový detektor, který se nazývá lavinová fotodioda. Ten byl poprvé zkonstruován v roce 1952 v Japonsku, ale k většímu prosazení došlo až v 70. letech 20. století. Lavinová fotodioda umožňovala detekovat slabší signály, než mohl fotonásobič, nebyla nutná vakuová technika a požadované napětí se snížilo na stovky voltů. Pro komerční rozvoj však bylo nutné zvládnout technologie výroby polovodičových součástek. Fyzikálně jsme se tedy přesunuli od vnějšího fotoefektu, kdy jsou světlem vyzařené elektrony urychlovány elektrickým polem a násobeny dynami, k vnitřnímu fotoefektu, kdy se v polovodiči generuje pár elektron a díra a následně dojde k efektu lavinového násobení. Takto vznikne zesílený signál, který lze již dobře zaznamenat elektronikou.

V 90. letech byly vyvinuty křemíkové lavinové fotodiody, které umožňují detekovat slabé signály až na úrovni jednotlivých fotonů. Principiálně jde o lavinovou fotodiodu provozovanou v Geigerově módu s nadprůměrným závěrným napětím. Geigerův mód znamená, že by se Hans Geiger (1882–1945) na konstrukci přímo podílel. Použitá technologie, kdy fotodetektor hlásí dopad každého jednotlivého fotonu, ale značně připomínala Geigerův-Müllerův čítač pro detekci částic produktů radioaktivního rozpadu. Lavinové fotodiody pracující v tomto módu se potom označují pomocí zkratky SPCM (*Single Photon Counting Module*). Tyto detektory jsou velmi citlivé a lze je využít v široké řadě aplikací, jako je například detekce optického záření v mikroskopii, zobrazování v lékařství a výzkum v oblasti kvantové optiky. Vysoká citlivost však s sebou přinesla i nutnost provozovat detektor v temnotě, neboť větší intenzity záření mohou tyto detektory nenávratně poškodit.

V posledních letech se výzkum zaměřuje na vývoj tzv. supravodivých detektorů, které umožňují detekovat jednotlivé fotony s extrémně vysokou citlivostí a časovým rozlišením. Tyto detektory využívají supravodivých materiálů, které reagují na dopad fotonu zvýšením teploty a změnou elektrických vlastností na hraně supravodivého přechodu. Tato technologie má potenciál být využita v řadě velmi citlivých aplikací, jako je například detekce gravitačních vln a měření kosmického záření nebo pro kvantovou komunikaci zajišťující bezpečný přenos dat, který není možné odposlouchávat, tzv. QKD (*Quantum Key Distribution*).

DETEKTORY ZALOŽENÉ NA SUPRAVODIVOSTI

Supravodivost kovů byla objevena v roce 1911 nizozemským fyzikem H. K. Onnesem [1]. V roce 1971 provedli v Bellových laboratořích v New Jersey experiment, kdy sledovali rychlost změny odporu oloveného supravodiče při osvětlení laserovým pulzem [2]. Změna odporu byla natolik rychlá, že ji nešlo vysvětlit teplotní difúzí. Navíc odezva rostla s teplotou zvyšující se blíž k hraniční teplotě supravodivosti T_c . Už o pár let později byl zkonstruován TES (*Transition-edge sensor*) pracující na hraně supravodivosti [3]. Nicméně jeho maximální čítecí frekvence se pohybuje jen v desítkách kHz. Je to v důsledku toho, že se dopadem fotonu musí ohřát podstatná část senzoru nad supravodivou teplotu a následné ochlazení zpět trvá výrazně dlouho. V roce 1996 dospěli A. M. Kadin a M. W. Johnson k tomu, že supravodivý senzor nejenže dokáže zaznamenat dopad jednotlivých fotonů, ale může pracovat i mnohem rychleji než termální bolometr, popř. lavinová fotodioda [4].

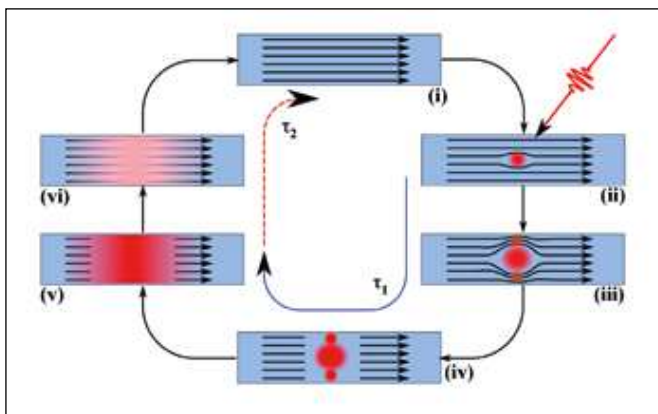
Za první funkční prototyp detektoru založeného na supravodivém nanodrátku (*Superconducting Nanowire Single-Photon Detector – SNSPD*) se považuje senzor sestavený v moskevských laboratořích G. N. Gol'tsmanem (Григорий Наумович Гольцман) a jeho kolektivem [5]. Tento rusko-americký tým použil místo plošného senzoru, jaký využívá TES, velmi tenký vodič, respektive supravodič. Je jen několik nanometrů tlustý a kolem sto nanometrů široký, proto se k jeho označování používá termín **nanodrátek** (*nanowire*).

PRINCIP NARUŠENÍ SUPRAVODIVOSTI

V současnosti existuje několik teorií, které se snaží vysvětlit narušení supravodivosti na mikroskopické úrovni. Největší podporu má teorie Bardeena, Coopera a Schrieffera [6]. Ta tvrdí, že při

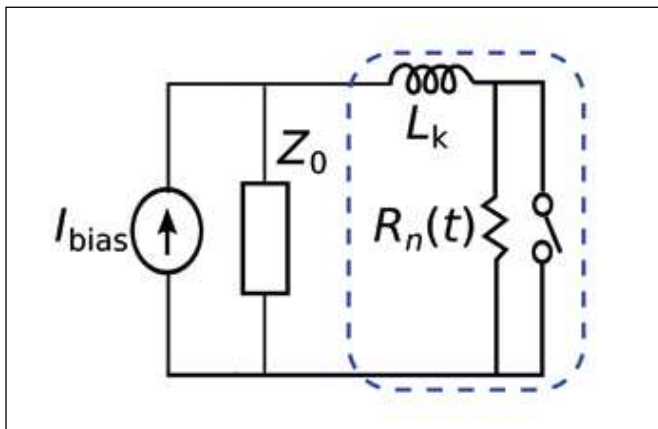
supravodivé teplotě vznikají vlivem elektron-fononové interakce Cooperovy páry s vazebnou energií v jednotkách meV (10^{-22} J). Takto vázané elektrony vedou proud materiálem bez odporu. Dopad fotonu s energií jednotek eV (10^{-19} J) excituje systém elektronů, a proto rozbíjí řádově stovky těchto párů. V oblasti dopadu je narušena supravodivost a vznikne tak v materiálu místo nazývané **hotspot**. (Pozn.: český překlad „horký bod“ není tak úderný, v české odborné literatuře se zatím neustálil odpovídající vhodný termín).

Hotspot má jen několik desítek nanometrů v průměru, viz *obr. 1* (ii), a difuzí se postupně rozšiřuje. Pokud supravodičem protéká proud, tak se tomuto místu s větším odporem snaží vyhnout (iii). Pokud je ale vodič úzký, naroste mezi hotspotem a okraji proudová hustota natolik, že se poruší supravodivý stav i tam (iv). Vznikne odporová bariéra přes celou šířku nanodrátku a proud se přesune do odporového bočnicku (v). Následně se začne celá oblast postupně ochlazovat, excitované elektrony předají energii fononům do substrátu (vi). Nakonec je obnoven supravodivý stav a proud se opět vrátí do nanodrátku (i).



Obr. 1 Detekční cyklus supravodivého nanodrátku. (i) – připravení k detekci, (ii) – absorpce fotonu, vznik hotspotu, (iii) – rozšiřování hotspotu, nárůst proudové hustoty na okrajích nanodrátku, (iv) – porušení supravodivosti v celé šířce nanodrátku, (v) – proud přerušen, (vi) – ochlazování nanodrátku, postupný nárůst proudu; τ_1 značí časový interval náběžné hrany a τ_2 potom interval úběžné hrany detekčního pulzu. Převzato z ref. [7]

Situace, kdy se tok proudu z nanodrátku přesouvá na odporový bočník a potom zpět, je doprovázena oscilací napětí v obvodu, viz *obr. 2*. Tento **detekční napěťový impuls** je velmi slabý (řádově v mikrovoltech), aby byl měřitelný, musí být výrazně zesílen. Pro omezení šumu vzniklého při zesilování se používají kryogenní



Obr. 2 Náhradní schéma elektrického zapojení. I_{bias} značí proud obvodem, Z_0 odporový bočník, L_k kinetickou indukčnost a $R_n(t)$ časově závislou změnu odporu supravodivého nanodrátku. Detekční událost se dá simulovat pomocí přepínače. Převzato a upraveno z ref. [7]

zesilovače přímo v kryostatu, které zesílí signál o 30 dB (šířka pásma 1–2 GHz). K propojení se používají pozlacené kontakty a zlaté vodiče, pokud možno co nejkratší. Další širokopásmový zesilovač již může být ve větší vzdálenosti od místa detekce a lze ho již provozovat při pokojové teplotě. Zde dojde k zesílení o dalších 20 dB s šířkou pásma 9 GHz. Výstupní detekční impuls, který takto získáme, bude mít amplitudu nad 300 mV a poměr signálu k šumu (SNR) 100:1.

Informace o počtu absorbovaných fotonů v jednom nanodrátku nemůže být zjištěna, neboť napěťová odezva je stejná pro různý počet fotonů, tato informace se ztratí v šumu. Supravodivé nanodrátky jsou chlazeny typicky na polovinu kritické teploty supravodivosti T_c a v obvodu protéká proud o hodnotě $0,9 I_{sw}$. Zde I_{sw} značí proud, který způsobí ohřev nad supravodivou teplotu.

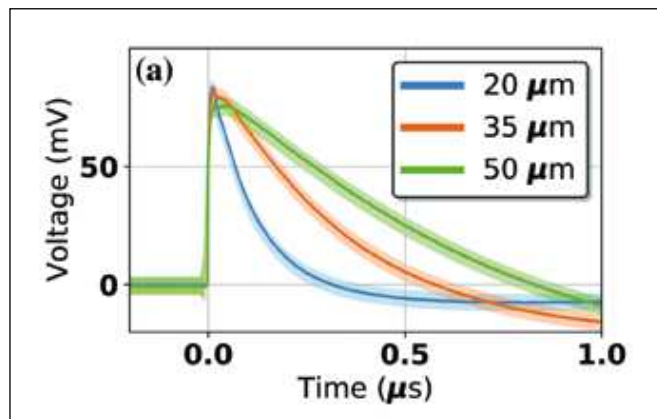
Vlastnosti

Kinetická indukčnost L_k

Jedná se o alternativu vodivostní indukčnosti. Důsledkem elektrického proudu vzniká magnetické pole, po přepólování napětí ale toto magnetické pole způsobuje setrvačnost směru proudu. Než se ustálí nová rovnováha mezi proudem a magnetickým polem, uběhne relaxační čas. Kinetická indukčnost je typicky pozorovaná právě u supravodičů s velmi vysokou hustotou proudu a při vysokých frekvencích.

Časové vlastnosti

Náběžná hrana detekčního pulzu τ_1 trvá přibližně 1 ns. **Úběžná hrana** τ_2 dosahuje od jednotek po stovky nanosekund v závislosti na délce nanodrátku, viz *obr. 3*. Dalším faktorem je tzv. **mrtvá doba**, po kterou není zasažený úsek nanodrátku v supravodivém stavu a senzor jako celek není tedy schopen detekovat. Rychlost relaxace je ovlivněna rychlostí difuze a délkou relaxačních časů generovaných kvazičástic v hotspotu nanodrátku. Pro zkrácení mrtvé doby je výhodné, aby teplota substrátu, který působí jako teplotní rezervoár, byla výrazně nižší než kritická teplota (tak jak to jen při těchto teplotách blízkých absolutní nule lze). Vyšší rozdíl teplot zajišťuje rychlejší zchlazení zpět pod kritickou teplotu.



Obr. 3 Časový průběh výstupního pulzu v závislosti na průměru aktivní plochy senzoru. Světle zbarvená oblast značí rozptýlené hodnoty. Převzato z [8]

U rychlých pulzních dějů je taktéž důležitým parametrem **timing jitter**, tedy časový rozptyl vzniku výstupního pulzu. V případě takto komplexního detektoru je více zdrojů časové nejistoty, má ji samotný detektor, ale i zesilovací elektronika, popřípadě zdroj fotonů nebo detekční osciloskop. Když se zaměříme pouze na detektor, potom jitter ovlivňuje nejvíce délka nanodrátku. Hotspot může vzniknout na různých místech po délce nanodrátku, čímž se počátek odezvy projeví s různým zpožděním. Taktéž jakékoliv nehomogenity v geometrii supravodiče zvětšují časovou nejistotu, stejně tak jako velikost proudu v nanodrátku a jeho kinetická indukčnost.

Kvantová účinnost

V odborné literatuře se používá několik různých definic a druhů účinností:

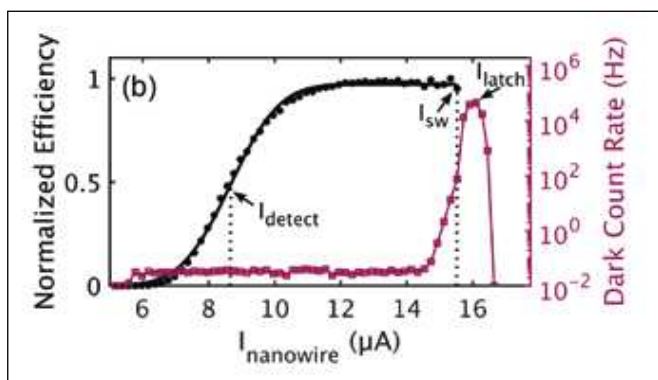
- **navázání** – pravděpodobnost, se kterou je foton přiveden k samotnému senzoru, nejčastěji jde o pravděpodobnost navázání do optického vlákna vedoucího na detektor,
- **absorpce** – podíl počtu absorbovaných a vstupních fotonů, část signálu se od senzoru může odrazit nebo jím projít bez absorpce,
- **záznamu** – podíl počtu výstupních napěťových pulzů k počtu absorbovaných fotonů, i když je totiž foton absorbován, nemusí vždy vyvolat dostatečně silnou, a tedy registrovatelnou odezvu.

Účinnost detektoru (DDE – *Device Detection Efficiency*) zahrnuje pouze účinnost absorpce a záznamu, kdežto **SDE** (*System Detection Efficiency*) zahrnuje účinnost celého detekčního systému včetně navázání. Typicky je kvůli kryogenním teplotám signál na detektor přiveden optickým vláknem. I ta nejlepší komerční vlákna mají konektory se ztrátami 0,1 dB, což způsobí pokles SDE o dvě procenta.

Temné detekce (DCR – *Dark Count Rate*)

Za temné detekce označujeme detekční události v případě, že na detektor nedopadl žádný signál. Jejich příčina je dvojitá, vnější nebo vnitřní. V případě **vnějších temných detekcí** jsou na vině fotony pozadí. Musíme si uvědomit, že excitační energie Cooperových párů je velmi malá. I kvanta elektromagnetického záření s vlnovou délkou odpovídající termálnímu záření (10 μm) mohou vyvolat falešnou detekci. K jejich potlačení se používají filtry propouštějící jen požadované vlnové délky, které samy o sobě musí být ale chlazeny na teplotu 40 K nebo i nižší. Tyto filtry mohou zavádět ztráty, tedy sníží SDE.

Vnitřní temné detekce jsou způsobené fluktuacemi protékajícího proudu. Čím více se proud blíží k I_{sw} , tím více se zvětšuje i šance, že nějaká fluktuace proudu způsobí zahřátí supravodiče nad kritickou teplotu. Tyto případy rostou exponenciálně s proudem, pro hodnoty menší než 0,9 I_{sw} jsou ale zanedbatelné, jak je patrné z obr. 4.



Obr. 4 Účinnost detekce a temné detekce (DCR) supravodivého nanodrátku v závislosti na proudu v obvodu. Senzor je schopný zaznamenat dopad fotonu s pravděpodobností $\text{SDE}/2$ pro proud I_{detect} . Proud I_{sw} poruší supravodivost. Převzato a upraveno z ref. [9]

Maximální frekvence čítání (CR – *Count Rate*)

Pro mnohé aplikace je potřeba, aby detektor mohl pracovat s co nejvyšší frekvencí. Ta se dá jednoduše vypočítat jako převrácená hodnota mrtvé doby. U supravodivých detektorů je maximální frekvence limitována 10 GHz kvůli termální relaxaci. Procesy vedení tepla jsou z fyzikálního hlediska pomalé, trvá to i několik stovek ps, než se nanodrátek uchládí.

Po mrtvou dobu je v supravodiči přerušen tok proudu a senzor není schopen další detekce. Jak se nanodrátek postupně ochlazuje, proud začíná růst a i detekční schopnost supravodiče pomalu vzrůstá.

V tomto časovém období již lze detekovat další foton, ale se sníženou pravděpodobností (kvantovou účinností). Maximální účinnosti dosahují detektory přibližně až po trojnásobku mrtvé doby.

Konstrukce

V současnosti se používají tři různé konstrukce supravodivých nanodrátků. Nejlepších parametrů dosahuje konfigurace, kdy je senzor v rovině kolmé k dopadajícím fotonům. Proto ji budeme věnovat nejvíce pozornosti.

Nanodrátek na kolmo

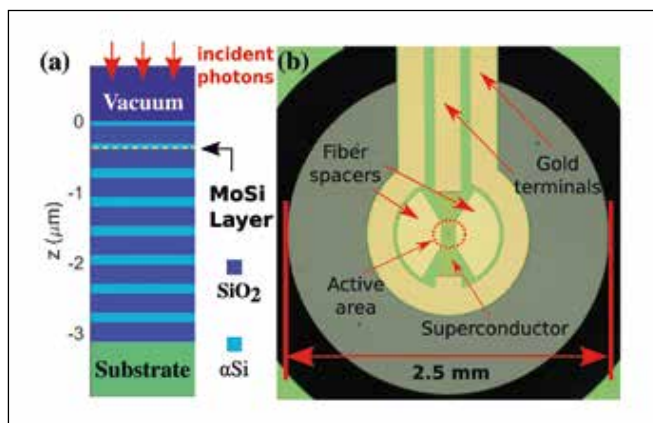
Jedná se o zatím nepoužívanější metodu detekce signálu z optického vlákna (viz obr. 5). Zde je potřeba si uvědomit, že výstupní konec optického vlákna je spolu s detektorem v kryostatu chlazen na teploty blízké absolutní nule. Během změny teploty musí zůstat jádro vlákna v ose se středem senzoru. To se buď zajistí pomocí nanoposuvů, nebo tzv. samocentrovací technikou [10].



Obr. 5 Vlevo snímek z elektronového skenovacího mikroskopu meandru z nanodrátku, vpravo senzor s vláknovým konektorem a SMA elektrickým konektorem. Převzato z ref. [11]

Dalším fyzikálním omezením je difrakční limit. Nelze zaostřit záření o vlnové délce 1 550 nm na 100 až 200 nm široký nanodrátek. Proto se začaly vytvářet z nanodrátků **meandry**, které při zachování šířky supravodiče pokrývají výrazně větší plochu. V případě výstupu optického svazku z telekomunikačního optického vlákna je potřeba pokrýt plochu typicky $10 \times 10 \mu\text{m}^2$.

Testovala se různá šířka a tloušťka nanodrátku v meandru pro různé vlnové délky tak, aby se maximalizovala účinnost absorpce. Pokud je supravodič užší, potom se zvyšuje pravděpodobnost záznamu, protože bude mít proud obtékající hotspot méně prostoru. Na druhou stranu se ale zmenšuje podíl zaplněné plochy a museli bychom prodloužit meandr, aby se zachovala dostatečná pravděpodobnost absorpce. Nicméně s tím vzrůstá délka elektrického obvodu a současně s tím se zvyšuje timing jitter. Jednoduše si to můžeme představit tak, že foton může být absorbován v různých vzdálenostech od koncových kontaktů detektoru a tudíž může být „zpráva o detekci“ zachycena v různých časech po dopadu fotonu.



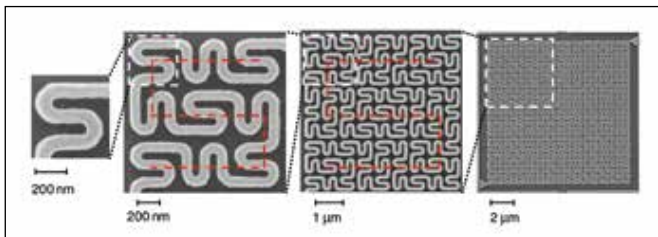
Obr. 6 (a) Schematický řez senzoru s MoSi supravodivým nanodrátkem (*MoSi Layer*) v rezonátoru z dielektrických vrstev pro dosažení maximální absorpce. (b) Čip senzoru při pohledu shora. Převzato z ref. [8]

Se zvětšující se plochou (objemem) smyčky také roste mrtvá doba, protože je potřeba po detekci uchlazení větší objem materiálu. Ve výsledku se dá najít pro danou aplikaci optimální kompromis.

Samotný meandr nanodrátku má ale pravděpodobnost absorpce pouze 30 %, část fotonů projde. Proto se detektory doplňují odrazným zrcadlem, které prošlé fotony nasměruje zpět na senzor. Toto zrcadlo ale musí být s nanodrátkem v těsném kontaktu, aby se neprodlužoval timing jitter. Používají se kovová zrcadla ze stříbra či zlata nebo vrstvená dielektrická (braggovská), viz obr. 6. S tímto zrcadlem lze dosáhnout až stoprocentní absorpce, ale jen v úzké oblasti spektra.

Jak už bylo popsáno výše, odezva nanodrátku je binární, tj. nedokáže rozlišit počty fotonů. Nicméně lze meandr rozdělit na několik segmentů, které se budou vyčítat zvlášť. Tím získáme schopnost rozlišit počet fotonů v pulzu, tedy za předpokladu, že každý foton dopadne do jiného segmentu. Při takovém využití je ale třeba počítat i s **přeslechy** (*crosstalk*). Když se absorpcí fotonu vytvoří hotspot v jednom úseku nanodrátku, může se blízký vedlejší nanodrátek také dostatečně ohřát a vyvolat rovněž detekci. Pokud patří oba takové hotspoty do jednoho segmentu, tak se zaznamená jen jedna událost. Pokud ale patří sekundární hotspot jinému segmentu, bude zaznamenána falešná detekční událost.

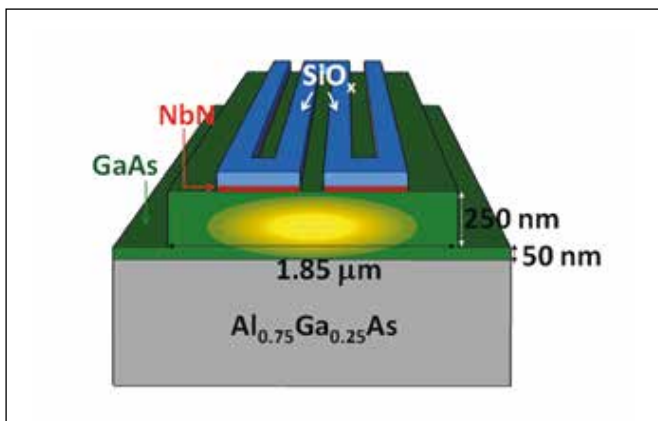
Dalším úskalím typického tvaru meandrů je jejich výrazná **anizotropie**, fotony s vektorem intenzity elektrického pole orientovaným ve směru nanodrátků budou mít větší absorpci než fotony s opačnou polarizací. K odbourání tohoto jevu se vytvořily komplikovanější geometrie supravodiče ve tvaru spirál nebo fraktálů, jak ukazuje obr. 7.



Obr. 7 Supravodivý nanodrátek stočený do fraktálu tak, aby nevýkazoval polarizační závislost. Základní tvar písmene S se opakuje při zvětšování fraktálu. Převzato z ref. [12]

Nanodrátek na vlnovodu

Detekce přímo na vlnovodu by byla výrazným benefitem integrované optiky, kdy jak generace, tak zpracování i detekce světla probíhají na stejné platformě. Odpadá tedy problém složitosti a málo účinného navázání nebo vyvázání z materiálu o velkém indexu lomu. Na druhou stranu musí být celé zařízení v kryostatu. Supravodivý nanodrátek je nanosen přímo na vlnovod a přenos energie se děje prostřednictvím evanescentní vlny. Tvar a délka

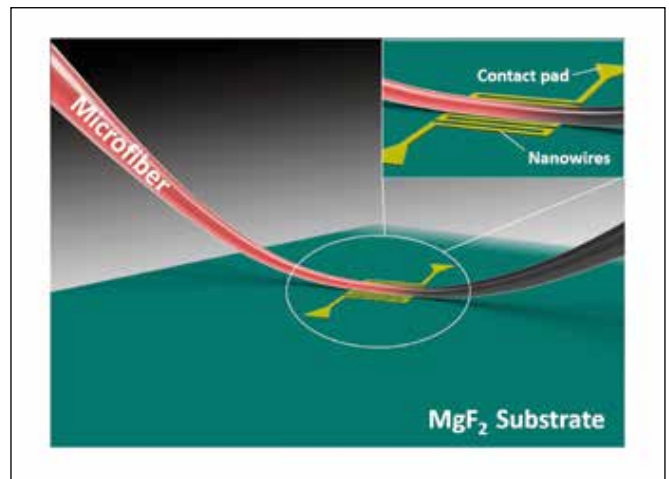


Obr. 8 Supravodivý nanodrátek z NbN integrovaný na GaAs vlnovodu. Převzato z ref. [14]

meandru jsou optimalizovány v závislosti na vlnové délce záření a profilu vedeného modu ve vlnovodu. Vzhledem k šířce vlnovodu se na něj vejde jen pár záhybů supravodiče, viz obr. 8. To zaručuje rychlejší odezvu, typicky ve stovkách MHz. Nicméně maximální DDE 66 % bylo dosaženo pro $0,96 I_{sw}$, což vedlo k velkému počtu temných detekcí 1,8 kHz [13]. Ty byly zapříčiněny i nedokonalým odfiltrváním signálu, který se nepodařilo dokonale navázat do vlnovodné struktury.

Fokusace mikrovlnám

Tato konstrukce také hodlá profitovat z krátkého meandru nanodrátku, nicméně volí jinou strategii. Optické vlákno, kterým je signál veden, je na svém konci zúženo. Typicky pro vlnovou délku 1 550 nm má průměr jádra optického vlákna kolem šesti mikrometrů. Mikrovlnáku je jádro zúženo až na 1,3 μm a navíc je mu odebrán plášť. Takto by signál při delším šíření vykazoval velké ztráty. Samo mikrovlnáko musí být tedy krátké a slouží pouze k fokusaci signálu na nanodrátek, viz obr. 9. K přenosu energie mezi mikrovlnákem a nanodrátkovým detektorem dochází opět evanescentní vlnou.



Obr. 9 Schematický náčrt navedení světla na supravodivý nanodrátek pomocí mikrovlnáku. Převzato z ref. [15]

Účinnost navázání výrazně klesá s rostoucí vlnovou délkou, kratší vlnové délky pociťují v mikrovlnkách menší ztráty, protože mají menší průměr vedeného modu. Experimentálně bylo pro 1 550 nm dosaženo SDE 45 % a DCR 50 Hz [16].

Materiály

Testovalo se mnoho kovů a jejich slitin s ohledem na absorpci pro danou vlnovou délku, kinetickou indukčnost, kritickou teplotu supravodivosti a v neposlední řadě i opracovatelnost v tom smyslu, jestli je lze použít v litografických postupech a jak je výsledný nanodrátek tvarově homogenní. Materiály s vyšší teplotou supravodivosti bohužel nesplňovaly poslední podmínku. Nižší kritická teplota je výhodná z toho hlediska, že jeden absorbovaný foton rozbije více Cooperových párů, detektor je tedy citlivější. Na druhou stranu je u nízkých teplot supravodivosti také malý kritický proud, velká kinetická indukčnost i timing jitter. V neposlední řadě vyžaduje nízká teplota supravodivosti také dražší provoz kryostatu.

V současnosti se nejčastěji používají slitiny Nb(Ti)N, WSi a MoSi, ty dosahují SDE nad 90 %. NbTiN má menší kinetickou indukčnost než NbN, má tedy rychlejší odezvu. NbN může detekovat záření s vlnovou délkou až do 5 μm, tedy ve střední infračervené oblasti, nicméně WSi, NbSi a TaN mají v této oblasti lepší citlivost.

Detektory pro kvantovou kryptografii

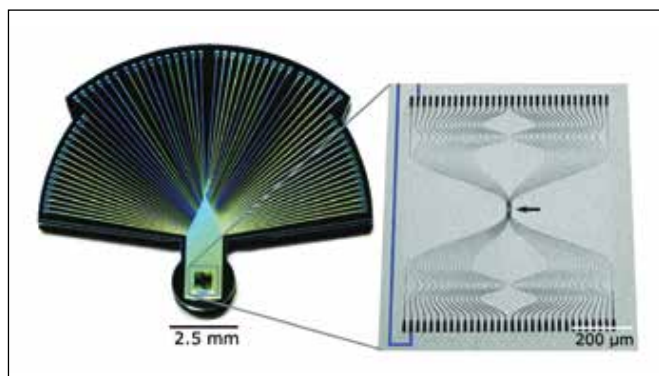
Jedinečné vlastnosti detektorů, které využívají nanodrátky v supravodivém stavu, zahrnují vysokou kvantovou účinnost, malou časovou nejistotu (timing jitter) a malý počet temných detekcí (DCR). Tyto detektory se mohou používat pro vlnové délky, které jsou typické pro optické vláknové komunikace na 1 550 nm. Dříve používané lavinové fotodiody SPCM mají na těchto vlnových délkách problém s příliš nízkou účinností, což byla jedna z hlavních motivací vývoje supravodivých nanodrátků.

Uvažujme typickou konfiguraci experimentálního uspořádání navrženého pro kvantovou kryptografii. Jako zdroj je použit laserový impuls, který je zeslabený na úroveň jednotlivých fotonů. I takto zeslabený impuls má stále poissonovskou statistiku počtu fotonů. Komunikační linka musí být pokud možno dedikovaná na přenos tohoto slabého signálu a nemůže mít po cestě žádné zesilovače. Ty by způsobily smazání kvantové informace přenášené jednofotonovým signálem. Na vlnové délce 1 550 nm, kde mají křemenná optická vlákna nejmenší útlum, lze na lince předpokládat ztráty přibližně 0,2 dB/km. Ztráty v počtu přenesených fotonů tedy snižují přenosovou rychlost náhodného kryptografického klíče (*Secret Bit Rate*). Pro dosažení dostatečné přenosové rychlosti je proto potřeba minimalizovat ztráty, maximalizovat účinnost detekce a zvýšit opakovací frekvenci zdrojového laseru. Vyšší frekvenci musí zvládat tedy i detektory. Jako minimum se bere desetina frekvence zdrojového laseru, což koresponduje s předpokládanými ztrátami na komunikační lince. Zvýšení frekvence je doprovázeno nutností přesnějšího časování a snížení časové nejistoty. Ta musí být mnohem menší než časová prodleva mezi jednotlivými pulzy, jinak by nebylo možné jednoznačně přiřadit časové značky k jednotlivým detekovaným signálům. Samozřejmě je nutná vysoká kvantová účinnost, ale současně s tím se musí udržet nízká hladina temných detekcí.

Vědci a inženýři se postupně snažili jednotlivé parametry nanodrátkového detektoru vylepšovat. Maximální kvantové účinnosti větší než 98 % dosáhli autoři článků [8, 17], temné detekce s nižší četností než $6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ byly změřeny u detektoru z ref. [18], časová nejistota (timing jitter) pouhé 3 ps (FWHM) s frekvencí detekce až 800 MHz byla realizována v ref. [19]. Maxima rychlosti čítání 10 GHz a větších bylo dosaženo v ref. [20, 21].

PEACOCK

Nicméně detektor pro kvantovou kryptografii by měl dosáhnout všech těchto hodnot současně. Letos publikovaná experimentální realizace I. Craiciua a jeho kolektivu [9] řeší tento problém jednoduchým způsobem – meandr se rozdělil na jednotlivé obvody. S pokrytím stejné plochy nemá senzor jednu smyčku, ale 32 jednotlivých rovných supravodičů. Tvary kontaktů jednotlivých segmentů byly navrženy tak, aby jejich délky byly geometricky všechny stejné (viz obr. 10). Tím se omezil timing jitter prakticky



Obr. 10 Tvar elektrických kontaktů senzoru rozložený do vějířového motivu. Zkratka PEACOCK značí *Performance-Enhanced Array for Counting Optical Quanta*, což má evokovat anglický výraz pro páva – peacock (převzato z [9])

jen na délku nanodrátku pod osvětlením mající délku přibližně 13 μm . Problémem s rozdělením na mnoho segmentů jsou přeslechly mezi supravodiči díky termálnímu přenosu. Aby se tento problém minimalizoval, musely být nanodrátky dostatečně daleko od sebe (400 nm). To snížilo pravděpodobnost absorpce, ale pravděpodobnost přeslechu dosahovala jen 0,5 % z počtu celkových detekcí.

Kvantová účinnost jednoho nanodrátku je samozřejmě malá, nicméně zde ji násobíme počtem segmentů. Navíc byla použita soustava nanodrátků v rezonátoru, jedno zrcadlo tvořila zlatá odrazná plocha pod supravodiči oddělená izolantem z SiO_2 , nad supravodiči bylo čtyřvrstvé braggovské zrcadlo.

Zkrácením obvodu se zvýšila rychlost odezvy. Kratší supravodič se též rychleji vychladí pod teplotu supravodivosti. Nutností je tedy použití rychlých elektronických zesilovačů za detektorem. Mrtvá doba jedné smyčky je přibližně 5 ns, poté roste pravděpodobnost, že by mohl nanodrátek detekovat další foton. Po patnácti nanosekundách je supravodič již plně regenerován. Pokud pustíme pouze částečnou připravenost (25 % maxima), potom je maximální frekvence čítání jednoho segmentu přibližně 147 MHz.

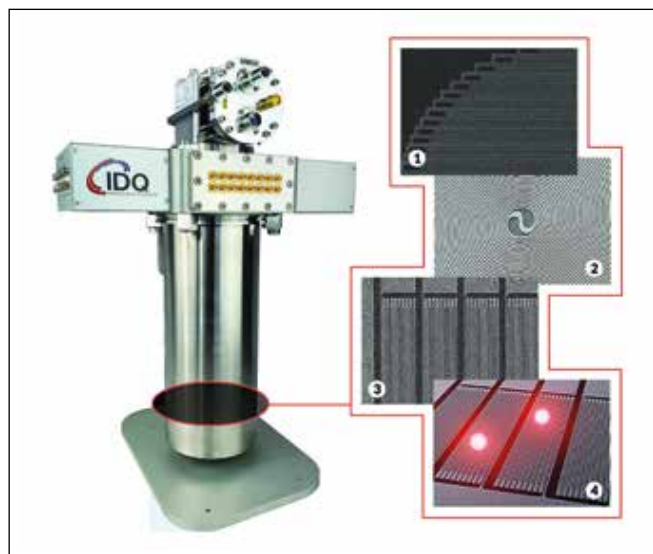
Když je ale jeden segment vyrazen po detekci, může foton zaregistrovat jiný segment. V principu by mohla být celková frekvence čítání detektoru rovna násobku počtu segmentů a jejich frekvencí. Fotony jsou nicméně na senzor rozptýleny v podobě gaussovského svazku, je tedy větší pravděpodobnost dopadu na středové segmenty. Násobný faktor proto není 32 ale pouze 25. Velká frekvence si ale vybere svou daň, jednotlivé nanodrátky při ní nejsou schopny se dostatečně zregenerovat, a tudíž klesá celková kvantová účinnost až na pouhých 50 % (pro 1 GHz, timing jitter 46 ps).

Jedna z výhod multiplexace spočívá v tom, že detektoru umožní pracovat také v režimu rozlišení počtu fotonů v pulzu. V tomto případě bychom byli schopni rozlišit typicky deset, maximálně až dvacet fotonů. Muselo by se k tomu účelu upravit zpracování signálů.

Jak by si nicméně vedl PEACOCK jako detektor použitý při kvantově kryptografickém přenosu tajného klíče? Pokud budeme uvažovat typický scénář kvantové kryptografie, tedy:

- přenos na vzdálenost 100 km, útlum v optickém vlákně 0,2 dB/km,
- frekvence zdroje 10 GHz,
- střední hodnotou počtu fotonů ve výstupním pulzu 0,025.

Potom dosáhneme přenosové rychlosti tajného klíče větší než 70 Mbit/s.



Obr. 11 Komerční detektor ID281 od ID Quantique zabudovaný v kryostatu může být osazen senzory optimalizovanými na SDE (1), polarizační necitlivost (2) nebo vícero nanodrátků s paralelním vyčítáním pro rychlé čítání nebo pro rozlišení v počtu fotonů (3,4). Převzato a upraveno z webu výrobce [22]

Komerčně dostupná zařízení

V současnosti víme o pěti firmách, které nabízejí supravodivý nanodrátkový detektor k prodeji.

Jako první zmíníme švýcarskou firmu **ID Quantique** [22]. Ta byla založena jako spin-off vědců kolem prof. Nicolase Gisina ze Ženevské university, kteří se věnovali kvantové kryptografii. Postupně se stali jedním z mála komerčních výrobců zařízení pro kvantově kryptografický přenos tajného klíče. Pro tuto aplikaci vyvinuli lavinovou fotodiodu **ID230** z InGaAs/InP, jejíž parametry udáváme v tab. 1 pro srovnání. Nicméně, aby jim neujel vlak, začali se též zabývat vývojem vlastního detektoru založeného na supravodivých nanodrátcích. Jejich až šestnáctikanálový model ID281 (viz obr. 11) překoná předchozí lavinovou fotodiodu ve všech parametrech, bohužel ho předčí i výrazně vyšší cenou.

Americkou firmu **Photon Spot** [23] založil doktor Vikas Anant. Neprezentuje žádný prodejní model, nicméně nabízí výrobu detektoru na míru podle zadání zákazníka pro danou aplikaci. Mimo jiné vlastní certifikát od NISTu, že jejich detektor dosahuje na vlnové délce 1 550 nm SDE 95,5 % s čítecí frekvencí 100 kHz.

Druhá americká firma **Quantum Opus** [24], založená doktorem Aaronem J. Millerem, prodejní model má, jmenuje se **Opus One**. Ten může být vybaven na přání senzorem optimalizovaným na vlnové délky 850 nm, 950 nm, 1 310 nm nebo 1 550 nm. Nejlevnější konfigurace spolu s elektronikou stojí 105 tisíc dolarů.

V Rusku vyrábí tyto detektory firma **SCONTEL** [25], ta byla založena v roce 2004 profesorem G. N. Gol'tsmanem a jeho studenty. Nabízí několik typů detektorů taktéž optimalizovaných pro různé aplikace.

Firma **Single Quantum** z Nizozemí [26] je na trhu od roku 2012. Je zapojena do projektu EuroQCI, v rámci kterého spolupracuje s vědeckými laboratořemi na rozšiřování kvantové komunikační infrastruktury. V nabídce má zařízení se senzory optimalizovanými na 800 nm, 900 nm, 1 064 nm, 1 310 nm a 1 550 nm.

ZÁVĚR

V tomto článku jsme se zaměřili na popis principu nového typu detektoru elektromagnetického záření pro intenzity na úrovni jednotlivých fotonů. Tato technologie je založena na supravodivosti a je úzce spojena s pokrokem v oblasti litografie. Nejdůležitější funkční část tvoří supravodivý nanodrátek, několik málo nanometrů široký proužek kovu pracující pod kritickou teplotou supravodivosti. Důvodem vývoje této technologie byla nízká kvantová účinnost lavinových fotodiód v blízké infračervené spektrální oblasti, používané ve vláknových telekomunikacích. Postupným vývojem se došlo k zařízení, které překonává lavinové fotodiody nejen v infračervené, ale i ve viditelné oblasti spektra prakticky ve všech sledovaných parametrech, tj. v kvantové účinnosti, v maximální rychlosti čítání, v přesnějším časování i v poměru signálu k šumu. Provozní a pořizovací náklady jsou vyšší z důvodu potřeby kryogenní technologie nutné pro práci senzoru.

Je zřejmé, že rozvoj v oblasti detekce slabých signálů vyžaduje vyřešení mnoha technologických aspektů. To znamená, že revoluční nápady se promítají do praxe jako použitelné detektory až po řadě desetiletí. V případě supravodivých nanodrátků to trvalo od prvního funkčního prototypu po komerční zařízení dvacet let. Dá se očekávat, že tato zařízení budeme potkávat stále častěji, hlavně pro detekci slabých signálů v infračervené oblasti.

Reference

- [1] H. K. Onnes. Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures etc. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures. KNAW, Proceedings (1911).
- [2] L. R. Testardi. Destruction of Superconductivity by Laser Light. *Phys. Rev. B* **4**, 2189 (1971).
- [3] J. Clarke, G. I. Hoffer, P. L. Richards, N.H. Yeh. Superconductive bolometers for submillimeter wavelengths. *J. Appl. Phys.* **48**, 4865 (1977).
- [4] A. M. Kadin, M. W. Johnson. Nonequilibrium photoninduced hotspot: A new mechanism for photodetection in ultrathin metallic films. *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3938 (1996).
- [5] G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, Roman Sobolewski. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 705 (2001).
- [6] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. Theory of Superconductivity. *Phys. Rev.* **108**, 1175 (1957).
- [7] Chandra 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.
- [8] D. V. Reddy, R. R. Nerem, Sae Woo Nam, R. P. Mirin, and V. B. Verma. Superconducting nanowire single-photon detectors with 98 % system detection efficiency at 1 550 nm. *Optica* **7**, 1649 (2020).
- [9] I. Craiciu, B. Korzh, A. D. Beyer, A. Mueller, J. P. Allmaras, L. Narváez, M. Spiropulu, B. Bumble, T. Lehner, E. E. Wollman, and M. D. Shaw. High-speed detection of 1 550 nm single photons with superconducting nanowire detectors. *Optica* **10**, 183 (2023).
- [10] A. J. Miller, A. E. Lita, B. Calkins, I. Vayshenker, S. M. Gruber, and Sae Woo Nam. Compact cryogenic self-aligning fiber-to-detector coupling with losses below one percent. *Opt. Express* **19**, 9102 (2011).

Tab. 1 Přehled parametrů jednotlivých výrobců pro detekční vlnovou délku 1 550 nm. Zařízení ID230 je lavinová fotodioda, jejíž parametry lze považovat za limitní pro tuto platformu. Z podkladů některých výrobců (označených *) není jasné, jestli těchto parametrů dosahuje jeden senzor, či se jedná o maximálně dosažitelné hodnoty různých senzorů.

	ID Quantique		Photon Spot *	Quantum Opus	SCONTEL	Single Quantum
	ID230	ID 287 *				
SDE [%]	25	95	85	80	90	85
DCR [Hz]	50	0,01	100	100	100	10
timing jitter [ps]	150	24	30	100	50	20
CR [MHz]	0,5	100	20	20	67	50

- [11] V. Zwiller, I. E. Zadeh, J. W. N. Los, R. B. M. Gourgues, V. Steinmetz, S. M. Dobrovolskiy, and S. N. Dorenbos. Single-photon detection with near unity efficiency, ultrahigh detection-rates, and ultra-high time resolution. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA*, pp. 1–2 (2017); arXiv quant-ph 1611.02726.
- [12] Xiaoming Chi, Kai Zou, Chao Gu, Julien Zichi, Yuhao Cheng, Nan Hu, Xiaojian Lan, Shufan Chen, Zuzeng Lin, Val Zwiller, and Xiaolong Hu. Fractal superconducting nanowire single-photon detectors with reduced polarization sensitivity. *Opt. Lett.* **43**, 5017 (2018).
- [13] P. Rath, O. Kahl, S. Ferrari, F. Sproll, G. Lewes-Malandrakis, D. Brink, K. Ilin, M. Siegel, Ch. Nebel, and W. Pernice. Superconducting single-photon detectors integrated with diamond nanophotonic circuits. *Light: Science & Applications* **4**, e338 (2015).
- [14] J. P. Sprengers, A. Gaggero, D. Sahin, S. Jahanmirinejad, G. Frucci, F. Mattioli, R. Leoni, J. Beetz, M. Lerner, M. Kamp, S. Höfling, R. Sanjines, and A. Fiore. Waveguide superconducting single-photon detectors for integrated quantum photonic circuits. *Appl. Phys. Lett.* **99**, 181110 (2011).
- [15] Lixing You, Junjie Wu, Yingxin Xu, Xintong Hou, Wei Fang, Hao Li, Weijun Zhang, Lu Zhang, Xiaoyu Liu, Limin Tong, Zhen Wang, and Xiaoming Xie. Microfiber-coupled superconducting nanowire single-photon detector for near-infrared wavelengths. *Opt. Express* **25**, 31221 (2017).
- [16] Xintong Hou, Ni Yao, Lixing You, Hao Li, Yong Wang, Weijun Zhang, Heqing Wang, Xiaoyu Liu, Wei Fang, Limin Tong, Zhen Wang, and Xiaoming Xie. Ultra-broadband microfiber-coupled superconducting single-photon detector. *Opt. Express* **27**, 25241 (2019).
- [17] J. Chang, J. W. N. Los, J. O. Tenorio-Pearl, N. Noordzij, R. Gourgues, A. Guardiani, J. R. Zichi, S. F. Pereira, H. P. Urbach, V. Zwiller, S. N. Dorenbos, and I. Esmaeil Zadeh. Detecting telecom single photons with $(99.5^{+0.5}_{-2.7})\%$ system detection efficiency and high time resolution. *APL Photon.* **6**, 036114 (2021).
- [18] J. Chiles, I. Charaev, R. Lasenby, M. Baryakhtar, J. Huang, A. Roshko, G. Burton, M. Colangelo, K. Van Tilburg, A. Arvanitaki, S. W. Nam, and K. K. Berggren. New constraints on dark photon dark matter with superconducting nanowire detectors in an optical haloscope. *Phys. Rev. Lett.* **128**, 231802 (2022).
- [19] B. Korzh, Qing-Yuan Zhao, J. P. Allmaras, S. Frasca, T. M. Autry, E. A. Bersin, A. D. Beyer, R. M. Briggs, B. Bumble, M. Colangelo, G. M. Crouch, A. E. Dane, T. Gerrits, A. E. Lita, F. Marsili, G. Moody, C. Peña, E. Ramirez, J. D. Rezac, N. Sinclair, M. J. Stevens, A. E. Velasco, V. B. Verma, E. E. Wollman, Si Xie, Di Zhu, P. D. Hale, M. Spiropulu, K. L. Silverman, R. P. Mirin, Sae Woo Nam, A. G. Kozorezov, M. D. Shaw, and K. K. Berggren. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector. *Nat. Photonics* **14**, 250 (2020).
- [20] H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto. Quantum key distribution over a 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors. *Nat. Photonics* **1**, 343 (2007).
- [21] X. Wang, B. A. Korzh, P. O. Weigel, D. J. Nemchick, B. J. Drouin, W. Becker, Q. Zhao, D. Zhu, M. Colangelo, A. Dane, K. Berggren, M. Shaw, and S. Mookherjee. Oscilloscopic capture of greater-than-100 GHz, ultra-low power optical waveforms enabled by integrated electro-optic devices. *J. Lightwave Technol.* **38**, 166 (2019).
- [22] <http://www.idquantique.com/> (05/2023)
- [23] <http://photonspot.com/> (05/2023)
- [24] <http://www.quantumopus.com/> (05/2023)
- [25] <http://www.scontel.ru/> (05/2023)
- [26] <http://www.singlequantum.com/> (05/2023)

Mgr. Antonín Černoch, Ph.D., doc. Mgr. Jan SOUBUSTA, Ph.D., Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, tř. 17. listopadu 50A, 772 07 Olomouc, e-mail: cernocha@fzu.cz

Jedná se o odborný článek

Odrážení na zpětných odražečích

Při listování červnovým číslem odborného časopisu **Electro Optics** mě zaujala fotografie, která se ukázala být fotografií Měsíce. V popisku k obrázku se píše, že astronauti z mise Apollo 11 zanechali na měsíčním povrchu v r. 1969 sadu koutových zpětných odražečů, které vědci až dosud stále využívají. Když jsem ale hledal na snímku nějakou ostrě svítící plošku jako odraz od zpětného odražeče, nenalezl jsem nic. Škoda, bylo by to velice atraktivní! Je to zřejmě tak, že při běžném pozorování nelze odraz zjistit! Dopravní článek *Keelyho Portwaye* odhaluje, jak široké je využití

zpětných odražečů a jak rozmanitá může být jejich konstrukce: od klasických hranolových ze skla, které vykazují disperzi, přes duté ze skleněných stmelených zrcadel, u nichž naopak disperze není, až po vyleštěné zrcadlové plochy v kovových ingotech. Zmiňuje se také o tzv. „kočičích očích“ zabudovávaných do vozovek, které ovšem podle mne využívají odrazecí schopnosti skleněných mikrokuliček rozptýlených v náterové hmotě (tzv. balotina).

Miroslav Miler

Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy, e-mail: miler@ufe.cz