

12.

FOTONPÁR-FORRÁSOK ÉS ALACSONY FOTONSZÁMÚ DETEKTÁLÁSI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

Holló Csaba Tamás¹, Illés Levente¹, Erdei Gábor¹, Lenk Sándor¹, Sarkadi Tamás¹, Koppa Pál¹,
Barócsi Attila¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Intézet, Atomfizika Tanszék

1. Fotonpár-források fejlesztése

A távközlés és az információfeldolgozás gyorsan fejlődő területei széles körben alkalmazzák a klasszikus és növekvő mértékben a kvantumoptikai megoldásokon alapuló adatátviteli és -feldolgozási technológiákat. Számos adatátviteli protokoll és számítási eljárás létezik – közülük már sok tesztelt is –, amely az egyedi fotonokat alkalmazza információbittékként. Két figyelemre méltó alkalmazási terület a kvantumkulcs-szétosztás, amely a biztonságos adatátvitel egy lehetséges módja [1, 2], illetve a teljesen optikai elvű kvantumszámítás, amely megoldást kínálhat klasszikusan komplikált problémákra, mint például a prímszámokra bontás [3]. Az egyes fotonállapotok időbeli korrelációja, amelyet széles körben összefonódásnak neveznek, az alapja olyan új technológiáknak, mint a kvantumállapot-teleportáció [4], vagy a kvantumállapot-ismétlés [5]. Az összefonódott fotonok olyan fotonpárok, amelyek kvantumállapotai csatoltak, azaz az egyik foton állapota nem írható le a másiktól függetlenül, még akkor sem, ha azok nagy távolságra vannak egymástól.

Az előző célokat szolgáló rendszerek megfelelő egyfoton-forrást vagy korrelált fotonpárokat keltő forrást igényelnek. Az ilyen eszközök különböző fizikai folyamatokat alkalmazó módokon valósíthatók meg, amelyek mindegyikének vannak előnyei és hátrányai. A források egy része izolált kétszintű rendszerek, például atomok [6], molekulák [7] vagy kvantumpöttyök [8] spontán emissziójára támaszkodik, amelyeket elektromos vagy optikai impulzusok gerjesztenek. Bár ezek igény szerint szolgáltatnak fotonokat, az elérhető fluxus (a fotonok egységnyi idő alatt vett teljes száma a nyaláb keresztmetszetén) korlátozott. A másik típus a spontán parametrikus lekonverziót (SPDC) folyamatát alkalmazza, amely erősen nemlineáris optikai anyagokban (például a β -bárium-borátban, BBO) figyelhető meg, ahol egy nagy energiájú pumpafoton egy alacsonyabb energiájú fotonpárra hasad [9]. Ezek az úgynevezett jel- (signal) és tétlen- (idler) fotonok időben korrelált tulajdonságokat mutatnak: az energia és az impulzus összefonódása a megmaradási törvények miatt magától adódik, és ha keletkezésük körülményeit gondosan megválasztják, a polarizációs összefonódás szintén megvalósítható [10]. Mivel a jelfoton érkezésének pillanatát az idler egyidejű detektálása jelzi, az SPDC-t gyakran használják egyetlen foton generálására is [11].

A fenti célokra alternatív megoldások léteznek mind az irodalomban, mind ipari termékek formájában (1. táblázat). Közös hátrányokkal rendelkeznek, mint például az alacsony integrációs szint, az instabilitás, a környezeti hatásokkal szembeni érzékenység, a modularitás hiánya, valamint a hosszú és nehézkes beállítási folyamat. A legtöbb ipari és laboratóriumi alkalmazás megköveteli, hogy a fotonokat egymódusú szálakba csatolják, ami további kihívásokat jelent a csatolási hatékonyság szempontjából.

A BME Fizikai Intézet Atomfizika Tanszékének Kvantumfotonikai laboratóriumában 4 különböző fotonpár-forrást fejlesztettünk (1. ábra). Szabadtéri alkalmazásokra 810 nm-en működő, BBO alapú, optikai szálba csatolt (1) hordozható, >200 nm sáv szélességű korrelált forrás 10^6 fotonpár/s koincidenciafluxussal [12], illetve (2) rack-szekrénybe építhető, TRL5 szintű, hullámfront-osztásos interferencián alapuló, polarizációban összefonódott, 10 nm sáv szélességű, 220×10^3 fotonpár/s koincidenciafluxussal [13]. A forrás saját fejlesztésű rezgésmentes alapra szerelt, hőmérsékletének és spektrális paramétereinek stabilizálása érdekében a pumpálása szálcsatolt

1. táblázat: Kereskedelmi forgalomban elérhető fotonforrások összehasonlító adatai. Az utolsó oszlop a saját hullámfront-osztásos (WFS), polarizációban összefonódott (P) forrás [13] adatait tartalmazza, kiemelve azokat a tulajdonságokat, amelyekben jobb paraméterekkel rendelkezik. Jelölések: hullámvezető (wg), ezer beütés másodpercenként (kcps), hullámhossz-osztás (WLS), frekvencia (F), intrinsic (I), rezonátor (rez.), polarizációs osztókocka (PBS), hullámhossz szerinti multiplexelés (WDM), Mach-Zehnder interferométer (MZI), periodikusan pólozott (pp, PP), lítium-niobát (LN), változtatható (...).

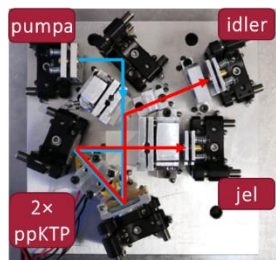
Paraméter	Aurea TPS_155 Q_TYPE_I I	OZ Optics BHEPS- 1000	OZ Optics BEPS- 1000	OZ Optics EPS-1000	OZ Optics HEPS- 1000	OZ Optics BCPS- 1000-B	OZ Optics BCPS- 1000-N	OZ Optics EPS-1000	Thorlabs SPDC810	Thorlabs SPDC 810N	ZERO/3	ZERO/3	Oxide EPS-PS	Oxide EPS-SN	Oxide EPS-SNα	AQLS	Saját forrás
Jel/idler hullámhossz, nm	min tip max	- 1550±2 -	- 1550±0.7 -	1530 1556±2 1580	1530 1566±2 1580	1550/810 1550/810	1550/810 1550/810	810±1 810±1	810±2 810±1	810±1 810±1	1560 1560	1550/156 0	810 810	810 810	1550 1550	795 jel, 825 idler	810
Fotonpár sávszélesség, FWHM, nm	min tip max	- 0.6 -	- 3 -	60 80 120	60 80 120	80 80	3 3	3 3	10 10	0.25 0.25	30 30	30 30				4.20E-04	10
Fotonpár-keltés mértéke, kcps	min tip max	- 1000 2000	- 1000 2000	2500 5000	1000 2000 4000	1000 3000 4000	10000 2000	100 100	450 100	100 100	135000 4500000	4500000 4500000	10 10	10 10		1000	220
Fényesség, kcps/mW			167	417			833	167	8	3	3	11250	11250			100	1.47
Spektrális fényesség, kcps/mW/nm			56	5			10	56	3	0	10	375	375			238095	0.15
Állapothűség	min tip max	- - -	- 98% -	- 98% -	97% 98% 99.5%	97% 98% 99%	n.a. n.a.	n.a. n.a.	98% 98%	n.a. n.a.	n.a. n.a.			98% 97%		n.a.	94.5%
Bell-féle láthatóság, S/(2 v2)	min tip max	- - -	94% 98% -	94% 98% -			n.a. n.a.	n.a. n.a.		n.a. n.a.						n.a.	
Pumpa teljesítmény, mW	min tip max	- - -	0 ... 12	0 ... 12			0 ... 12	0 ... 12	0 ... 12			12 400				10	150
Valós/véletlen koincidencia arány (CAR)	min tip max	- - -	- - -	- - -	100 1000	100 1000											
Láthatóság (H-V)	min tip max	- 98% 99%	- - -	- - -	97% 98% 99.5%		n.a. n.a.	n.a. n.a.		n.a. n.a.	99% 99%	99% 99%	96% 95%	95% 96%		n.a.	92%
Láthatóság (D-A)	min tip max	- 96% 99%	- - -	- - -	97% 98% 99.5%		n.a. n.a.	n.a. n.a.		n.a. n.a.	99% 99%	99% 99%	95% 96%	96% 96%		n.a.	97%
Előrejelzési (heralding) arány	tip	-	nagy??						>0.45	>0.3	0.4	0.4				>0.5	0.17
Fázisillesztés	type-II	type-II	type-0				type-0	type-2	type-2	type-2	type-2	type-0	type-0	type-2	type-2		type-1
SPDC anyag	ppLN wg	ppLN wg	ppLN wg	PP kvarc opt.szál	PP kvarc opt.szál	PP wg	PP wg	PP kristály	ppKTP	ppKTP	ppLN	ppLN	ppKTP	ppKTP	ppLN wg	ppKTP	BBO
Felépítés	lineáris	Sagnac	Sagnac	szálban	szálban	lineáris	lineáris	MZI	lineáris	lineáris	Sagnac	Sagnac	lineáris	Sagnac	Sagnac	rez.	WFS
Párosítás	WLS	I	WDM	WDM	WDM	WDM	PBS	I			DWDM	DWDM	PS	I		irány	
Összefonódás	P	P	P	P+F	P+F	nincs	nincs	P	nincs	nincs	P	P	P	P	P	nincs	P



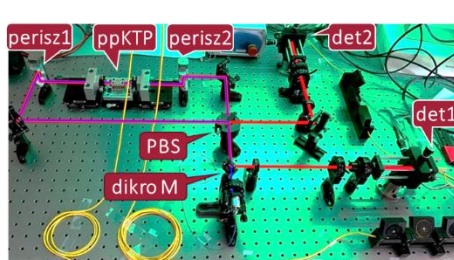
Hullámhossz: 810±3 nm
Fotonfluxus: 28000 kcps
Heralding arány: 20±3%
Sávszélesség: 202 nm
Koincidencia: 5700 kcps
Pumpa teljesítmény: 44 mW



Hullámhossz: 810 nm
Fotonfluxus: 8.33 kcps/mW
Heralding arány: 17±3%
Sávszélesség: 10 nm
Koincidencia: 1.47 kcps/mW
Állapothűség: 0,951±0,004



Hullámhossz: 810 nm
Anyag: ppKTP (kétszál)
Fotonpár: összefonódott
Kimenet: szálcsatolt
Interferométer: Sagnac
Méret: 19 cm × 19 cm

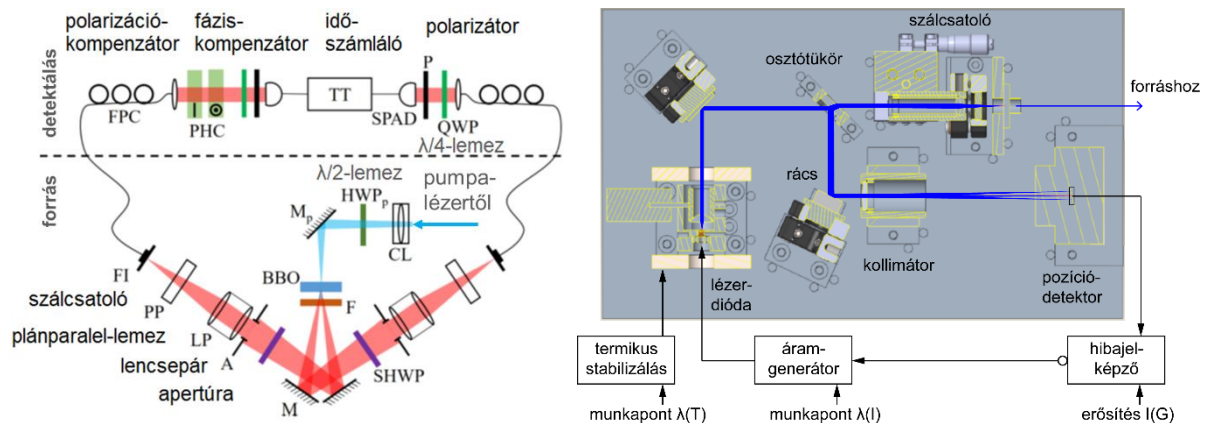


Hullámhossz: 1560 nm
Anyag: ppKTP
Fotonpár: összefonódott
Kimenet: szálcsatolt
Interferométer: Sagnac
Detektálás: SNSPD pár
Kivitel: fejlesztés alatt

1. ábra: A BME Fizikai Intézet Atomfizika Tanszékének Kvantumfotonikai laboratóriumában fejlesztett 4 fotonpár-forrás. Jelölések: periszkóp (perisz), dikroikus tükrök (dikro T), polarizációs osztókocka (PBS), detektor (det).

módon történik, a forrástól különálló házban elhelyezett, spektrálisan stabilizált lézerdíódával. A (3) forrás szintén ezen a hullámhosszon állít elő két egymást követő periodikusan pólozott (doméninvertált) kálium-titanil-foszfát (ppKTP) cellában fotonpárokat, mellyel hangolható fázisú inverz Hong–Ou–Mandel-kísérletet végeztünk [14]. A szintén ppKTP alapú, de az 1560 nm-es távközlési hullámhosszon működő (4) forrással és szupravezető nanoszál-as detektorpárral (SNSPD) demonstrátort építettünk az ikerfotonok polarizációs összefonódásának kimutatására, amelynek robusztus kivitelezése fejlesztés alatt van.

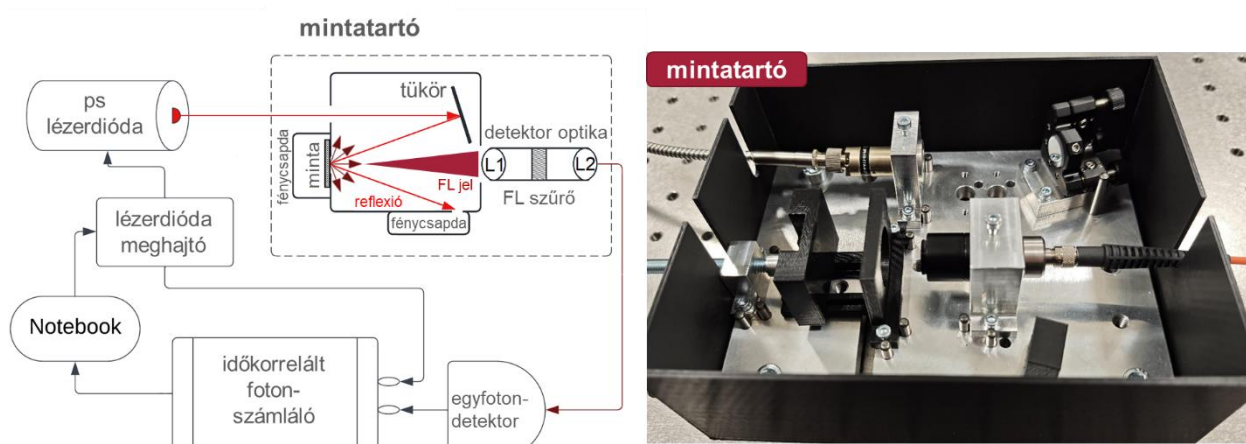
A források alapvető paramétereinek meghatározása speciális, alacsony fotonszámú mérési módszereket – egyfoton-spektrométert, kvantumállapot-tomográfot és Hanbury–Brown–Twiss interferométert – fejlesztettünk félvezető egyfoton-lavinadióda (SPAD) és SNSPD detektorok alkalmazásával. A SPAD alapú egyfoton-detektálást adaptáltuk biológiai minták és félvezető struktúrák nanoszekundum alatti fluoreszcencia-élettartamainak vizsgálatára [15]: egy példát mutat be a következő fejezet.



2. ábra: A hullámfront-osztásos interferencián alapuló, polarizációban összefonódott (2) forrás blokkvázlata (balra) és a szálcsatolt pumpálás megvalósítása spektrálisan stabilizált lézerdíódával (jobbra)

2. Fotovoltaikus anyagok időfelbontásos fotolumineszcencia-élettartam vizsgálata

Szerves fotovoltaikus (OPV) struktúrákat vizsgáltunk időkorrelált egyfotonszámlálás (TCSPC) segítségével az időfelbontásos fluoreszcencia dinamika feltárása érdekében alacsony injektálási körülmények között. A gerjesztéshez 650 nm hullámhosszú, néhány 10 pikoszekundumos (ps) impulzusokat kibocsátó lézerdíódát, a detektáláshoz SPAD-ot alkalmaztunk (3. ábra). A méréseket 11 mW/cm^2 intenzitású besugárzással végeztük, impulzusokként $1,2 \times 10^8$ fotonszám mellett, ami kellően alacsony ahhoz, hogy elkerüljük a minták károsodását. A fluoreszcencia-lecsengés jellemzőit a gerjesztéssel összemérhető időskála miatt iteratív rekonvolúcióval elemeztük. Az OPV minták különböző elnyelő anyagokat és szerkezeteket tartalmaztak, amelyek igen rövid, 30–500 ps tartományba eső lecsengési időket eredményeztek. Az ilyen gyors dinamika hagyományosan csak sokkal nagyobb intenzitású gerjesztéssel mutatható ki. Az eredmények azt mutatják, hogy míg az abszorpciós spektrumok a szerkezeti tulajdonságokkal (például a rétegvastagsággal) változnak, a lecsengési időket elsősorban az abszorber anyaga határozza meg. A TCSPC mérések így mélyebb betekintést nyújtanak a szerves félvezetők transzporttulajdonságaiba.



3. ábra. Az időkorrelált foton-számláláson alapuló mérés technika blokkvázlata (balra) és a félvezető vékonyrétegek vizsgálatához tervezett mintatartó (jobbra). Jelölések: fotolumineszcencia (FL), lencse (L).

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyar Államnak és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapnak a 2017-1.2.1-NKP-2017-00001 „Kvantumbitek előállítása, megosztása és kvantuminformációs hálózatok fejlesztése“, az NKFIH-873-4/2020, „Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium“, valamint a 2022-2.1.1-NL-2022-00004 „A Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium komplex fejlesztése” című projektek keretében nyújtott anyagi támogatásért.

Felhasznált irodalom

- [1] AK Ekert, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 661 (1991)
- [2] J Pseiner *et al.*, *Quantum Sci. Technol.* **6**, 035013 (2021)
- [3] JL O’Brien, *Science* **318**, 1567–1570 (2007)
- [4] D Bouwmeester *et al.*, *Nature* **390**, 575–579 (1997)
- [5] ZD Li *et al.*, *Nat. Photonics* **13**, 644–648 (2019)
- [6] DP Ornelas-Huerta *et al.*, *Optica* **7**, 813–819 (2020)
- [7] XL Chu *et al.*, *Nat. Photonics* **11**, 58–62 (2017)
- [8] YM He *et al.*, *Optica* **4**, 802–808 (2017)
- [9] C Couteau, *Contemporary Physics* **59**, 291–304. (2018)
- [10] J Szlachetka *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 144001 (2023)
- [11] PG Kwiat *et al.*, *Phys. Rev. A* **63**, 022303 (2001)
- [12] CT Holló *et al.*, *Opt. Eng.* **61**, 025101 (2022)
- [13] CT Holló *et al.*, *Phys. Rev. A* **106**, 063710 (2022)
- [14] CT Holló *et al.*, *Phys. Rev. A* **111**, 013531 (2025)
- [15] L Illés *et al.*, *Meas. Sci. Technol.* **35**, 085206 (2024)