

13.

SAGNAC INTERFEROMÉTER ALAPÚ FOTONPÁR FORRÁSOK FEJLESZTÉSE KÖZELI INFRAVÖRÖS ÉS TELEKOM HULLÁMHOSSZ TARTOMÁNYOKON

Holló Csaba Tamás¹, Perényi Barnabás¹, Erdei Gábor¹, Barócsi Attila¹, Koppa Pál¹,
Sarkadi Tamás¹

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

1. Bevezető

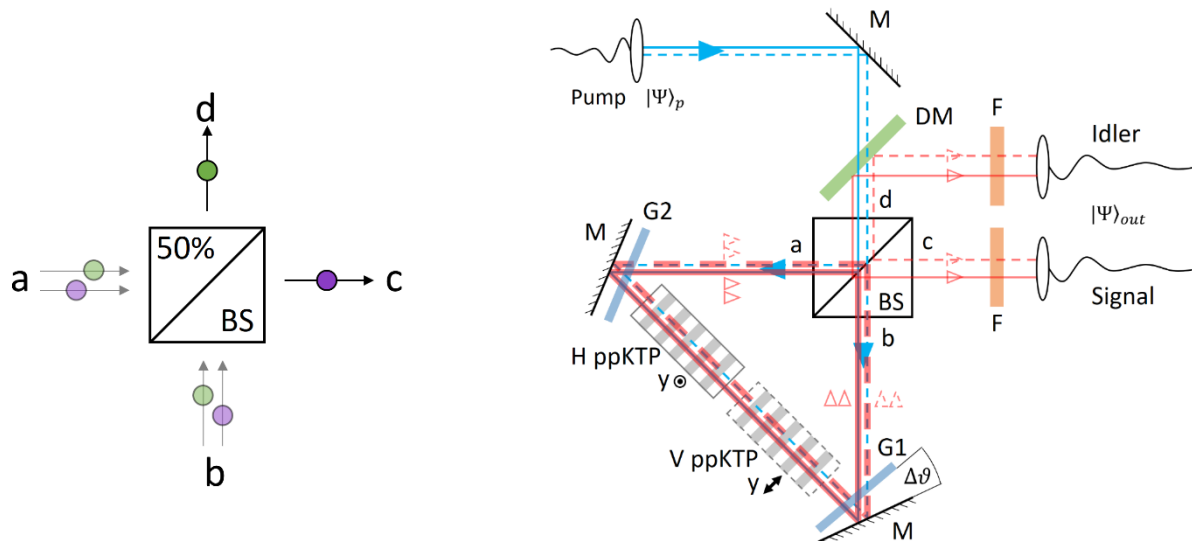
A távközlés és az információfeldolgozás gyorsan fejlődő területei egyre szélesebb körben alkalmazzák a kvantumoptikai megoldásokon alapuló technológiákat is. Számos adatátviteli protokollt és számítási eljárást javasoltak és teszteltek, amelyekben az egyedi fotonok szolgálnak információhordozóként. Két jelentős alkalmazási terület: a kvantumkulcs-megosztás [1, 2], amely fizikai alapokon nyugvó biztonságos adatátvitelre kínál ígéretes lehetőséget, valamint az optikai elven működő kvantumszámítógépek [3], amelyek megoldást nyújthatnak a klasszikusan túlzottan időigényes problémák megoldására, mint például nagy számok prímtenyezős felbontása.

Az ilyen rendszerekhez megfelelő egyfoton- vagy korrelált fotonpárokat kibocsátó forrás szükséges. Ezeket különféle megközelítésekkel lehet megvalósítani, mindegyiknek megvannak az előnyei és hátrányai. Egyes megvalósítások elszigetelt kétállapotú rendszerek spontán emisszióján alapulnak. Bár ezek a források képesek determinisztikusan fotont kibocsátani, a hozamuk meglehetősen alacsony. Egy másik módszer a nemlineáris optikai anyagokban lejátszódó spontán parametrikus konverzió (SPDC) alapul [4], ahol egy nagyenergiájú pumpafoton két alacsonyabb energiájú fotonná alakul. Ezek az úgynevezett jel és idler fotonok időbeli korrelációt mutatnak: energiájuk, impulzusuk, és megfelelő körülmények esetén a polarizációjuk is összefonódott lehet. A polarizációban összefonódott fotonpárok előállítására az SPDC vált a domináns módszerré relatív egyszerűsége és a párok tagjai közt megvalósítható kiváló minőségű összefonódás miatt.

Az Atomfizikai Tanszék részt vett a HunQuTech (Nemzeti Kvantumtechnológiai Program) projektben, és jelenleg is aktív közreműködője a QNL (Quantum Information National Laboratory Hungary) programnak, amely a kvantumoptikai technológiák kutatására és fejlesztésére irányul. Kutatásunk középpontjában az SPDC források tervezése és optimalizálása áll. A Tanszék kvantumoptikai kutatócsoportjának munkatársaival arra törekedtünk, hogy a fotonpár források gyakorlati alkalmazása során felmerülő kihívások közül a lehető legtöbbre megoldást dolgozzunk ki. A technikai akadályok leküzdésén túl munkánk során hatékonyabb források létrehozását szolgáló új fizikai elveket is kidolgoztunk.

2. 810 nm-es, inverz Hong-Ou-Mandel interferencián alapuló fotonpár forrás [5]

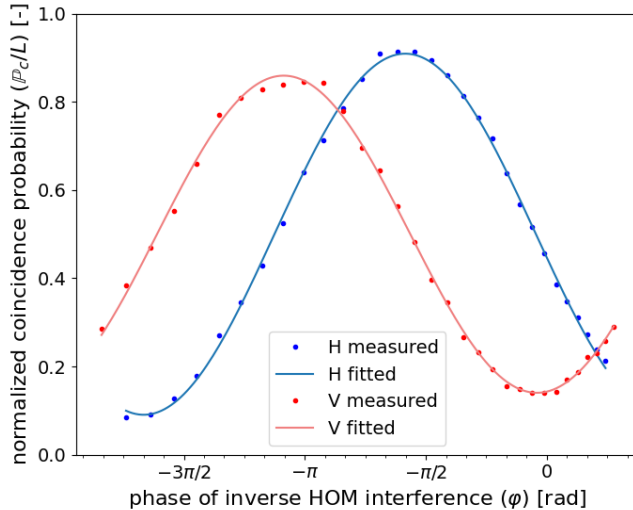
A frekvencia degenerált, polarizációban összefonódott fotonpárok szétválasztása a mai napig kihívást jelent, hiszen ez esetben nem alkalmazható a párok dikroikus tükörrel, sávszűrővel vagy egyéb spektrális elven alapuló szétválasztása. Megoldásunkban az inverz Hong-Ou-Mandel (HOM) interferenciát hívtuk segítségül. Ehhez ugyanazon fotonpárnak egyszerre kell egy féligáteresztő osztótükör mindkét bemenetére érkeznie (lásd 1. ábra bal). Ezt a speciális igényt az 1. ábra jobb oldalán látható Sagnac interferométer segítségével valósítottuk meg. Az interferométerbe helyezett 0-ás típusú fázisillesztésű nemlineáris kristályt a pumpalézer egyszerre az óramutató járásával megegyezően és azzal ellentétesen is pumpálja, tehát a lekonvertált fotonpár is egyszerre ezen két irány szuperpozíciójában keletkezik. Az „a” és „b” bemenetekre érkező állapotok közti fázistolás hangolásával szabályozható a párok szétválásának valószínűsége a „c” és „d” kimeneteken.



1. ábra: bal) Inverz Hong-Ou-Mandel interferencia egy 50%-os osztórétegen, jobb) az interferenciát megvalósító Sagnac interferométer alapú fotonpár forrás sematikus rajza. M: tükör, DM: dikroikus tükör, BS: 50%-os neutrális osztókocka, G1, G2: plán-parallel üveglemez, F: 810 ± 5 nm-es sáváteresztő szűrő

A HOM interferencia fázisának hangolását egy, az interferométerbe helyezett hangolható diszperzív elem segítségével valósítottuk meg. Esetünkben ez egy plánparallel üveglemez (G1), melyen az óramutató járásával megegyező irányban a pumpa, míg ellentétes irányban a lekonvertált nyaláb halad át. A lemez döntésével a pumpanyaláb és a lekonvertált nyaláb optikai úthossza eltérő mértékben állítható, melynek oka az anyagi diszperzió. Az eltérés biztosítja az osztókockára érkező állapotok közti hangolható fázistolást. A párok szétválasztásának valószínűsége a HOM fázis hangolásának függvényében a 2. ábrán látható.

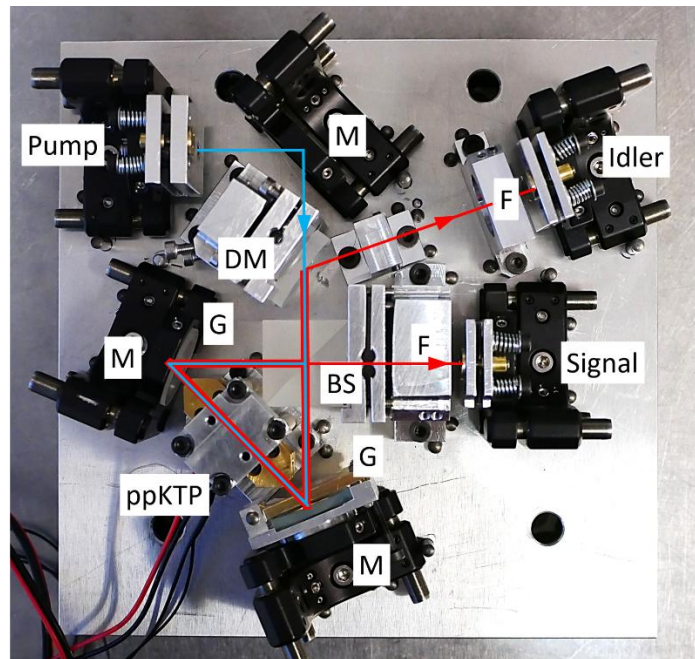
Polarizációban összefonódott párok létrehozásához az interferométerbe kettő, egymáshoz képest ortogonálisan orientált kristályt helyeztünk. A HOM interferencia fázisának hangolásával és ezután a pumpa polarizáció megfelelő beállításával elérhető, hogy a szétválasztott párok egymással polarizációban összefonódottak legyenek. A forrás paramétereit az 1. táblázat foglalja össze, míg fizikai megvalósítása a 3. ábrán látható.



2. ábra: Koincidencia valószínűség a forrás kimenetein a párok szétválasztására használt inverz Hong-Ou-Mandel interferencia fázisának függvényében

Fényesség	533 ± 22.5 pár/s/mW/nm
Előrejelzési arány	$7.0 \pm 0.16 \%$
Sáv szélesség	10 nm
Állapothűség	91.4 %
Inverz HOM láthatóság (H)	0.820 ± 0.0102
Inverz HOM láthatóság (V)	0.720 ± 0.0072

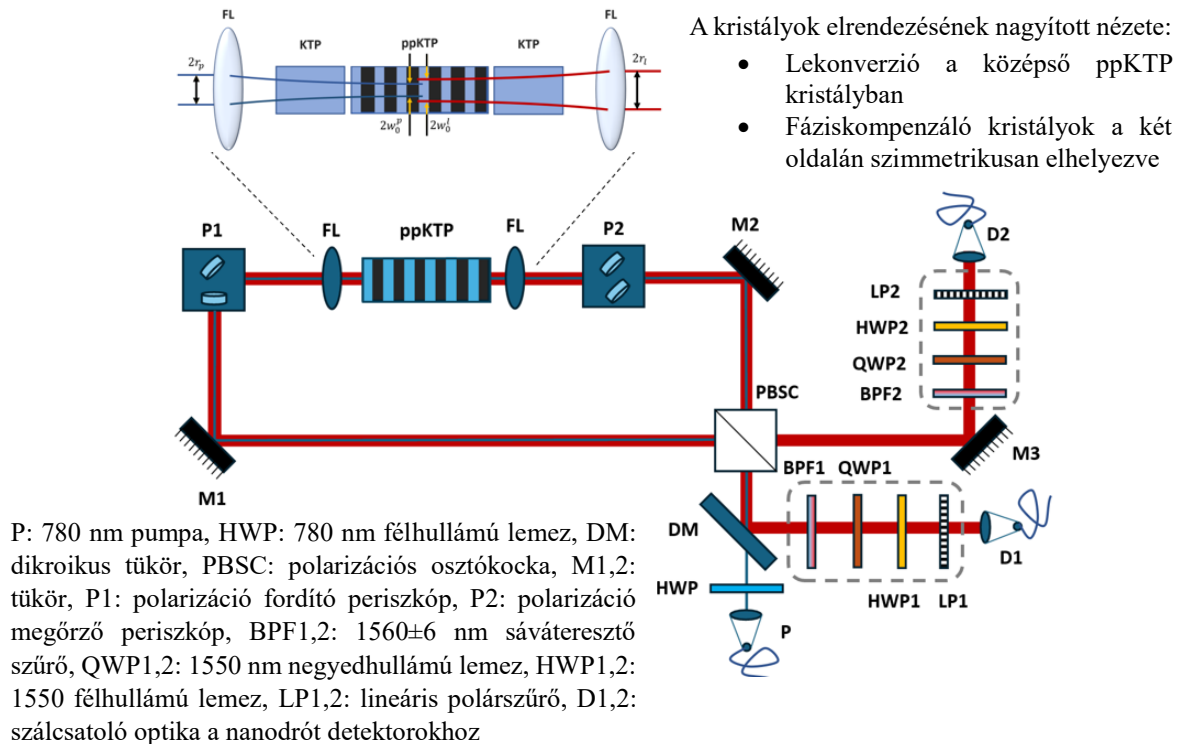
1. táblázat: A forrás paramétereit



3. ábra: A megvalósított Sagnac interferométer alapú, inverz Hong-Ou-Mandel interferenciát létrehozó fotonpár forrás mechanikai felépítése.

3. 1560 nm-es telekom hullámhosszú fotonpár forrás [6]

Célunk telekom hullámhossz tartományban működő, polarizációban összefonódott fotonpár forrás előállítása is, mely alkalmas a meglévő száloptikai hálózatra csatlakoztatva kvantumos titkosítás megvalósítására, illetve akár kvantuminformáció továbbítására is. Ezen forrás alapját szintén egy Sagnac interferométerbe helyezett nemlineáris kristály adja. Az elrendezés sematikus vázlata a 4. ábrán látható.

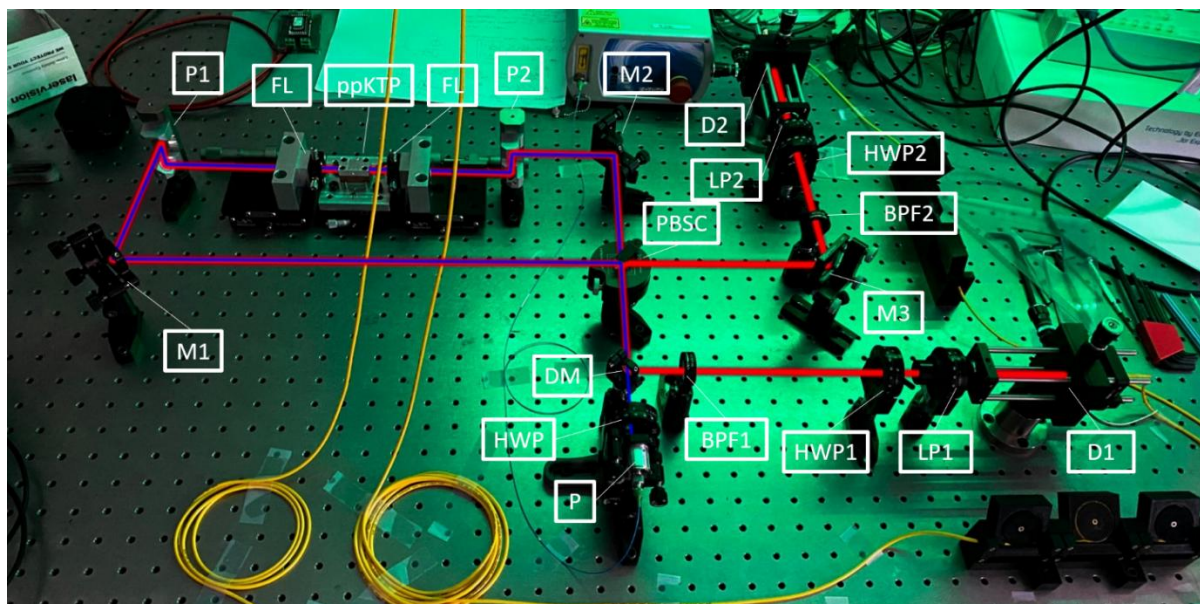


4. ábra: 1560 nm-es telekom hullámhosszú polarizációban összefonódott fotonpár forrás vázlatos felépítése. A forrás alapja egy Sagnac interferométer.

A kristály mindkét irányból megfelelő polarizációjú pumpálását egy, az interferométerben elhelyezett

polarizációfordító nyalábemelő periszkóp biztosítja. Ez az elem a polarizáció 90° -os elfordítását geometriai úton éri el, így mind a pumpa, mind a lekonvertált hullámhosszra egyaránt működik. A II-es típusú fázisillesztés során keletkező egymásra merőleges polarizációjú jel és idler fotonokat, az interferométer polarizációs osztókockája választja szét egy körüljárást követően.

A forráson polarizációs állapottomográfiát végrehajtva megállapítottuk, hogy állapothűsége jelenleg 86%, melyet fáziskompenzációs eljárásokkal, illetve az interferométer nyalábjainak jobb átfedésével tovább javíthatunk. A felépített forrást az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: 1560 nm-es telekom hullámhosszú polarizációban összefonódott fotonpár forrás fizikai felépítése, a pumpa (kék) és lekonvertált (piros) fénnyel.

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] C Couteau, *Contemporary Physics* **59**, 291-304. (2018)
- [5] CT Holló *et al.*, *Phys. Rev. A* **111**, 013531 (2025)
- [6] B Perényi, *BME AFT szakdolgozat* (2025)