

**Időben korrelált fotonpárforrások
fejlesztése**

PhD téziszfüzet

Holló Csaba Tamás

Témavezető: Dr. Erdei Gábor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Atomfizika Tanszék

(2025)

Bevezetés

A távközlés és az információfeldolgozás gyorsan fejlődő területei széles körben alkalmaznak klasszikus és kvantumoptikai megoldásokon alapuló technológiákat. Számos adatátviteli protokollt és számítási sémát javasoltak már, közülük többet teszteltek is, amelyekben egyedi fotonokat használnak információs egységként. Két kiemelkedő alkalmazási terület a kvantumkulcs-megosztás, amely a biztonságos adattovábbítás egy ígéretes módja, valamint az optikai elven alapuló kvantumszámítógépek, melyekről úgy vélik, hogy megoldást nyújthatnak nagy számítási kapacitást igénylő problémákra, például a prímfaktorizációra.

Az említett célokat szolgáló rendszerek megfelelő egyfoton-forrást vagy korrelált fotonpár-forrást igényelnek. Az ilyen eszközök különböző megközelítésekkel valósíthatók meg, mindegyiknek megvannak az előnyei és hátrányai. Egyesek izolált kétállapotú rendszerek spontán emissziójára építenek. Bár ezek igény szerinti időpillanatban képesek fotonokat kibocsátani, az elérhető fluxus meglehetősen korlátozott. Egy másik típus a nagymértékben nemlineáris optikai anyagokban létrejövő spontán parametrikus lekonverziót (SPDC) használja, amelynek során egy nagy energiájú pumpafotonból két kisebb energiájú foton keletkezik. Ezek az ún. jel- és idler- (tétlen) fotonok időben korrelált tulajdonságokkal rendelkeznek: energiájuk, impulzusuk nem független egymástól, és megfelelő előállítási körülmények mellett polarizációs összefonódás is létrehozható közöttük.

A polarizációban összefonódott fotonpárok SPDC segítségével történő előállítása a 20. század vége óta a kísérleti kvantumoptika, a kvantuminformáció-feldolgozás és a kvantumkommunikáció egyik sarokkövének számít. A nemlineáris kristályokban létrejövő

SPDC vált domináns módszerré viszonylagos egyszerűsége és a megvalósítható összefonódás magas állapothűsége miatt.

Az első demonstrációk óta a polarizációban összefonódott fotonpárok előállítására számos forrást fejlesztettek ki a különböző kísérleti és gyakorlati igények kielégítésére. Ezek közé tartoznak olyan interferometrikus konfigurációk melyek nagyobb stabilitás és a fáziskontrollt érték el, távközlési hullámhosszon működő források a száloptikás kvantumhálózatokhoz, valamint az űrbéli alkalmazásra optimalizált elrendezések. Megjelentek az impulzusüzemű források is, amelyek javítják a keltett párok időbeli felbontását és lehetővé teszik a más kvantumrendszerekkel való egyszerűbb szinkronizációt.

Ezeket a forrásokat sikeresen alkalmazták a kvantumkulcsmegosztás kísérleti demonstrációjára, ugyanakkor közös hátrányokkal rendelkeznek, mint például az alacsony integráltsági szint, instabilitás, érzékenység a környezeti hatásokra, modularitás hiánya, bonyolult felépítés, hosszú és nehézkes beállítási folyamat. Ráadásul az ipari és laboratóriumi alkalmazások többségében szükséges a fotonokat egymódusú optikai szálakba csatolni, ami további kihívásokat jelent a csatolási határfok szempontjából.

Célkitűzések

Az Atomfizikai Tanszék részt vett a HunQuTech (Nemzeti Kvantumtechnológiai Program) projektben, valamint közreműködője a jelenleg is folyamatban lévő QNL (Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium) programnak, amelyek célja a kvantumoptikai folyamatok és technológiák kutatása és fejlesztése. Kutatásom középpontjában az SPDC-források tervezése és optimalizálása áll a fent említett kihívások megoldása érdekében. A tanszék kvantumoptikai

kutatócsoporthoz munkatársaival együttműködve arra törekedtem, hogy a lehető legtöbb említett problémára megoldást találjak. Különböző nemlineáris anyagokat és forráskonfigurációkat vizsgáltam az optimális működési paraméterek azonosítása érdekében. Kiemelt szempont volt a modularitás és a rugalmasság, amelyek lehetővé teszik az üzemmódok közötti könnyű átmenetet, ezzel támogatva a sokrétű kísérleti és oktatási célú alkalmazást. Egy másik fontos szempont a hordozhatóság volt, amely biztosítja, hogy a forrásokat a laboratóriumi környezeten kívül is lehessen használni.

A technikai akadályok leküzdésén túl munkámban jelentős hangsúlyt kap a fotonforrások új működési elveinek kidolgozása is. Dolgozatom bemutatja az egyes források terveit és a működésük alapjául szolgáló fizikai elveket, továbbá részletesen ismerteti a beállítási folyamatokat. Az elméleti és gyakorlati fejlesztések integrálásával céloim, hogy hatékony és sokoldalú fotonforrásokkal járuljak hozzá a kvantumoptika ezen rohamosan fejlődő területéhez.

Eredmények

A projekt során három különböző, SPDC-alapú fotonforrást terveztem és építettem meg. A tervezési folyamat magában foglalta az elméleti modellezést és a gyakorlati mérnöki munkát egyaránt, beleértve az optikai elrendezés megtervezését, az egyedi mechanikai alkatrészek kialakítását és a precíz összeszerelést. Két forrást különösen a mérnöki kihívásoknak szentelt figyelemmel fejlesztettem ki, mint például a környezeti hatásokkal szembeni ellenállóképesség, a száloptikai kompatibilitás és a kompaktság – olyan tulajdonságok ezek, melyek elengedhetetlenek a laboratóriumon kívüli alkalmazásokhoz. Minden általam készített forrás egymódusú optikai szálcsatolt kimenettel rendelkezik, ezzel

megkönnyítve a meglévő kvantumoptikai rendszerekkel való közvetlen összekapcsolhatóságot.

Az egyik eszköz jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Karának Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén üzemel egy kísérleti kvantumkulcs-megosztási elrendezésben. Ez nemcsak a gyakorlati használhatóságot igazolja, hanem a kifejlesztett fotonforrás által elért 5-ös technológiai készültségi szintet is (TRL 5).

A források mérnöki fejlesztésén túl két különböző fizikai elvet is javasoltam és kísérletileg demonstráltam polarizációs összefonódás létrehozására. Az első a transzverzális impulzus-korrelációt alakítja át polarizációs összefonódássá hullámfront-osztásos interferometria segítségével. Ez a módszer minimális számú optikai elemet igényel és nem követeli meg az aktív fázisstabilizációt, így egyszerű, de hatékony konfigurációt kínál összefonódott fotonok előállításához. A második, szokatlanabb megközelítés az inverz Hong–Ou–Mandel (HOM) interferenciát használja ki egy Sagnac-interferométerben két egymás után elhelyezett, 0-ás típusú nemlineáris kristály felhasználásával – teljesen mellőzve a polarizációs optikát. Bár ezt a megoldást a rendelkezésre álló komponensek tulajdonságai korlátozzák, a koncepciót sikerült demonstrálni, és javasoltam egy lehetséges megoldást a keltett összefonódás állapothűségének javítására is.

Ezenfelül bemutattam egy eljárást a frekvenciadegenerált, polarizációban összefonódott fotonpárok szétválasztására, amely egy optikai üveg diszperziós tulajdonságait kihasználva képes a szétválasztáshoz használt inverz HOM-interferencia fázisának szabályozására. Ezt a módszert egy egyedileg készített forrásba integrálva mutattam be. Az eljárás kiterjeszti a HOM-alapú

eszközök funkcionalitását azáltal, hogy lehetővé teszi a fotonpárok szétválasztásának finomhangolását.

Összességében kutatásom egyaránt érinti a fotonpár-források tervezésének alapvető fizikai elveit és alkalmazott aspektusait. Új összefonódás-keltési módszerek bemutatásával, valamint a rendszerek kompaktságának, száloptikai kompatibilitásának és robusztusságának javításával célozom, hogy hozzájáruljak a kvantumoptika fejlődéséhez.

Új tudományos eredmények

- 1) Megterveztem és megépítettem egy hordozható, egymódusú optikai szálba csatolt korrelált fotonpárforrást, mely I-es típusú kritikus fázisillesztésű frekvenciadegenerált spontán parametrikus lekonverzióan alapul, és nagyobb a fotonpár kibocsájtási rátája ($1.3 \cdot 10^5$ pairs/s/mW) és a sáv szélessége (202 nm), mint a hasonló elven működő forrásoké. [H1],[H2],[H3]
- 2) Megmutattam hogyan lehetséges a fotonpárok transzverzális impulzusbeli korrelációját polarizációs összefonódássá alakítani hullámfrontosztásos interferencia és egymódusú szálcsatolás segítségével. Az 1)-es tézispontomban bemutatott fotonpárforrásba beépítve demonstráltam az eljárást, és igazoltam a működést $F=0.95$ állapotűség kísérleti mérésével. [H4]
- 3) Bemutattam egy egyszerű és megbízható eljárást egy Sagnac-interferométerben létrehozott inverz Hong-Ou-Mandel interferencia fázisának hangolására egy optikai üveg hullámhossz-diszperziójának felhasználásával. Leírtam a folyamat elméletét és kísérletileg alátámasztottam az effektus

működését frekvencia-degenerált fotonpárok szétválasztásán keresztül, egy saját készítésű fotonpár-forrásban. [H5]

- 4) Ismertettem egy eljárást polarizációs összefonódás létrehozására két 0-ás típusú kollineáris fázisillesztéssel rendelkező, egymás után helyezett nemlineáris kristállyal egy Sagnac-interferométerben, az inverz Hong-Ou-Mandel interferenciát felhasználva, (két hullámhosszon működő) polarizációs optika használata nélkül. Kísérletileg bizonyítottam az eljárás működését azáltal, hogy a 3)-as tézispontomban bemutatott forrást hangolva Bell-állapotot állítottam elő $F=0.914$ állapotűséggel. [H5]

A tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk:

- [H1] **Cs. T. Holló**, G. Erdei, and T. Sarkadi (2020, September). Increasing the correlation level of polarization entangled photon pairs generated by type-II SPDC in BBO, in *Laser Science* (Optica Publishing Group, Washington, DC, 2020), pp. JTh4A-36.
- [H2] **Cs. T. Holló**, T. Sarkadi, M. Galambos, D. Bíró, A. Barócsi, P. Koppa, and G. Erdei, Compact, single-mode fiber-coupled, correlated photon pair source based on type-I beta-barium borate crystal, *Opt. Eng.* 61, 025101 (2022).
- [H3] **Cs. T. Holló**, T. Sarkadi, M. Galambos, B. Bodrog, A. Barócsi, P. Koppa, and G. Erdei, Compact, portable, fiber-coupled correlated photon pair source with enhanced performance, in *Quantum 2.0 Conference and Exhibition* (Optica Publishing Group, Washington, DC, 2022), p. QTu2A.18.

- [H4] **Cs. T. Holló**, T. Sarkadi, M. Galambos, A. Barócsi, P. Koppa, V. Hanyecz, and G. Erdei, Conversion of transverse momentum correlation of photon pairs into polarization entanglement by using wavefront-splitting interference, *Physical Review A* 106, 063710 (2022).
- [H5] **Cs. T. Holló**, T. Sarkadi, A. Barócsi, P. Koppa, and G. Erdei, Phase-tunable inverse Hong-Ou-Mandel interference: principles and demonstration in a photon pair source, *Physical Review A* 111.1, 013531 (2025)

Egyéb saját publikációk:

- [H6] **Cs. T. Holló**, K. Miháلتz, M. Kurucz, A. Csorba, K. Kránitz, I. Kovács, Z. Zs. Nagy, G. Erdei, Objective quantification and spatial mapping of cataract with a Shack-Hartmann wavefront sensor, *Scientific Reports* 10 (1), 1-10, 2020.