

**Kvantumoptikai módszerek alkalmazása
a mérés technikában**

PhD téziszfüzet

Oszetzky Dániel

Témavezető: Czitrovszky Aladár

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Budapest

2007

A kutatások előzménye

A kvantumoptikai kutatások egyik fontos területe az összefonódott állapotok vizsgálata és alkalmazása a mérés technika különböző területein. Míg az összefonódott állapotok elméleti irodalma igen kiterjedt, kísérleti megvalósításukra sokat kellett várni. Mint számos más tudományterületnek az optikában, ennek is igazi lökést a lézerek megjelenése adott. Az összefonódott állapotok előállításának egyik legelterjedtebb módja az összefonódott fotonpárok generálása. Az összefonódott fotonpárok vizsgálata, előnyös tulajdonságainak kiaknázása nagy tudományos érdeklődésre tett szert és a kísérleti kvantumoptika egyik fő irányvonalává vált az utóbbi évtizedekben.

A lézerek által megvalósíthatóvá vált nemlineáris optikai folyamatok vizsgálata vezetett az ún. squeeze (összenyomott) fény előállításához. A kezdeti próbálkozások (optikai felharmonikus keltés, négyhullámkeverés, parametrikus erősítés, rezonancia fluoreszcencia) után a legelterjedtebb módszer squeeze fény generálására a parametrikus fényezés, vagy más néven parametrikus frekvencia átalakítás (Parametric Down Conversion) lett.

A parametrikus frekvencia átalakítás nem-lineáris folyamata során úgynevezett kétmódusú squeeze fény keletkezik, amely szigorúan korrelált, „összefonódott” fotonpárokból áll. A keletkező fotonokat összefonódottnak nevezik, mert páronként egyszerre születnek, és tökéletes korreláltság tapasztalható fizikai paramétereik között, úgymint energia, polarizáció, irányultság, stb. Ezek azok a klasszikus fénytől eltérő tulajdonságok, amelyeket széleskörűen ki lehet használni a kvantumoptikai mérés technikában. Amíg egy klasszikus foton regisztrálása (pl. foton számlálóval) során az eltűnik, mint foton megszűnik létezni (fotoelektron vagy hőenergia lesz belőle), addig az összefonódott fotonpár egyikének regisztrálása során annak párja egyrészt tovább él, másrészt ismertté válik időbeli és térbeli tartózkodása. Bizonyos esetekben azt is mondhatjuk, hogy az ilyen összefonódott páros fotonok érzékelik párjuk állapotának változását. A parametrikus fényezés nagy előnye más folyamatokhoz képest, hogy itt a fotonok mindig párokban keletkeznek, azaz egyikük detektálása bizonyossá teszi „párja” létezését.

Az összefonódott fotonpárok használata jelentősen hozzájárult több tudományterület – optikai információátvitel, kvantum kriptográfia, teleportáció - utóbbi időben végbement óriási fejlődéséhez. Ugyanakkor a fotonpárok alkalmazása az optikai mérés technikában is perspektivikus, hiszen lehetőséget ad olyan mérések megvalósítására, melyek más módon csak sokkal nehezebben, vagy egyáltalán nem végezhetőek el.

Célkitűzések

Munkám célja, hogy az összefonódott fotonpárok vizsgálatával és felhasználásával olyan új, a gyakorlatban is alkalmazható eljárásokat dolgozzam ki, melyek hasznosíthatóak a kvantumoptikai mérés technikában. Ennek keretében céлом volt egy olyan, ultraibolya lézer által gerjesztett, korrelált fotonpárokat generáló berendezés megépítése, mellyel a fotonpárok előnyös tulajdonságait kihasználva megvalósítható fotodetektorok kvantumhatásfokának mérésére hitelesített etalon nélkül.

Céлом volt egy olyan, fotonok szintjén vezérelt fényforrás létrehozása, amellyel előre programozott módon lehet generálni megadott számú és tulajdonságú fotont. Ez a berendezés, amellyel már akár 1 db (vagy előre megadott számú) fotont tudunk programozott módon generálni, etalonként szolgál az ultra kis teljesítményű mérés technikai alkalmazásoknál. A kidolgozott metodikának jelentősége van a kvantumoptikai információátvitel területén is.

Céлом volt továbbá, hogy a korrelált fotonpárok vizsgálatánál szerzett kísérleti tapasztalatokat olyan új jelenségek vizsgálatánál hasznosítsam, mint. a felületi plazmongerjesztés és rekombináció; összehasonlítani a felületi plazmonokat gerjesztő fény és a plazmonokból származó fény statisztikai tulajdonságait és meghatározni azok paramétereit.

Kísérleti módszerek

Munkám során a korrelált fotonpárokat egy nem-lineáris folyamat, a parametrikus frekvencia átalakítás segítségével állítottam elő. A jelenség létrejöttéhez UV lézerrel világítottam meg KDP kristályt. A jelenség elképzelhető úgy, hogy a pumpáló nyaláb egy fotonja a nemlineáris kölcsönhatás következtében spontán felbomlik két, kisebb frekvenciájú fotonra. A folyamat következménye, hogy így szigorúan korrelált fotonpárok keletkeznek. A folyamat létrejöttéhez a kristály megfelelő orientációjával a fázisillesztést biztosítani kell.

A fotonpárok detektálásához, ill. a detektorok kvantumhatásfokának méréséhez fotonszámlálós üzemmódban működő hűtött lavina fotodiódákat, ill. fotoelektronsokszorozót használtam. A fotonpárok koincidenciájának kimutatásához egy ún. „start-stop” jelfeldolgozó elektronikai egységet használtam. A fotonpárok egyidejűségét kihasználva és a start-stop elektronikai egységet felhasználva tettem javaslatot törésmutató újfajta mérésére.

A kvantumhatásfok mérések alapja, hogy a fotonok mindig párosával és egyszerre érkeznek a detektorok felületére, ha azok mégsem szólalnak meg, akkor az csak a detektorok hibája lehet. Az előre programozható fotonszámú fényforrás tervezésénél azt használtam ki, hogy ha az egyik foton detektáljuk, párjáról pontos információval rendelkezünk. Megfelelő késleltetést és gyors opto-elektronikai egységeket használva elérhetjük, hogy ezt a fotonot vezérelni tudjuk.

A korrelált fotonpárok vizsgálatához kifejlesztett berendezéseket, ill. adatfeldolgozó elektronikai egységeket használtam a felületi plazmonok rekombinációjából származó fény statisztikai tulajdonságainak meghatározásához is.

Új tudományos eredmények

1. Egy általam létrehozott berendezéssel összefonódott fotonpárokat generáltam, amelyeknek lemértem a koincidencia tulajdonságait. A koincidencia görbék alapján meghatározott összefonódott fotonpárok száma a generált fényben közel 3 nagyságrenddel meghaladja a zajból származó fotonok számát. Meghatároztam a generált összefonódott fotonok térbeli eloszlását és ~ 30 ps-os felbontással megmértem azok fotonstatisztikai tulajdonságait. Javaslatot tettem folyadékok törésmutatójának mérésére korrelált fotonpárok használatával. [1,6,7]

2. Korrelált fotonpárok felhasználásával kidolgoztam egy új mérési módszert fotodetektorok kvantumhatásfokának fényetalon nélküli meghatározására két-detektoros eljárással. Az új eljárással megmértem több lavina fotodióda és fotonszámoló modul kvantumhatásfokát. [1]

3. Kidolgoztam egy új mérési eljárást fotoelektronsokszorozók kvantumhatásfokának meghatározására egy-detektoros módszerrel. Megmértem az egy- és két-fotonos jelamplitúdó eloszlást, amely alapján egy detektorral szelektíven mérhetők az egy- vagy két-fotonos beütések illetve azok eloszlása. A kidolgozott eljárással meghatároztam a vizsgált fotoelektronsokszorozók kvantumhatásfokát. [1]

4. Javasoltam és megvalósítottam egy előre programozható fotonszámú fényforrást, amellyel adott időintervallumban előre megadott n számú ($n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$) foton lehet generálni. Létrehoztam a berendezéshez szükséges opto-elektronikai egységeket, amelyekkel vezérelni lehet a berendezést. Demonstráltam ennek a fényforrásnak a működését különböző, előre beállított fotonszámok esetén. Rámutattam, hogy a létrehozott berendezés jól alkalmazható érzékeny fotodetektorok, képátalakítók, képerősítők kalibrálásánál, valamint fotonstatisztikai jelenségek vizsgálatánál. [2,3]

5. Kimutattam, hogy a koherens lézerténnyel gerjesztett felületi plazmonok rekombinációja során kibocsátott fény statisztikai tulajdonságai, alacsony intenzitások esetén (5 mW He-Ne lézer), megegyeznek a plazmonokat gerjesztő fény statisztikai tulajdonságaival. A statisztikai jellemzőket a fotonszámeloszlás és a korrelációs függvény paramétereivel határoztam meg. [4,5]

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények:

- [1] D. Oszetzky, *Application of correlated photon pairs in optical metrology*, Quantum Electronics APH B **20**, 185 (2004).
- [2] D. Oszetzky, A. Czitrovsky, A. V. Sergienko, *Designing a special light source with a pre-determined number of photons*, SPIE **5161**, 352 (2003).
- [3] D. Oszetzky, A. Nagy, A. Czitrovsky, *Controllable photon source*, SPIE **6372**, 39 (2006).
- [4] N. Kroó, A. Nagy, A. Czitrovsky, D. Oszetzky, H. Walther, *Surface plasmons and photon statistics*, Journal of Modern Optics **53**, 2309 (2006).
- [5] N. Kroó, S. Varró, Gy. Farkas, D. Oszetzky, Nagy, A. Czitrovsky, *Quantum Metal Optics*, Journal of Modern Optics **54**, 2679 (2007).
- [6] D. Oszetzky, A. Czitrovsky, A. Nagy, *Photon statistic measurement of down-converted light*, SPIE **6028**, 449 (2005).
- [7] D. Oszetzky, P.Gál, A. Czitrovsky, *New method for estimation of the refractive index of aerosols using entangled photon pairs*, Journal of Aerosol Science **33**, 281-282 (2004).