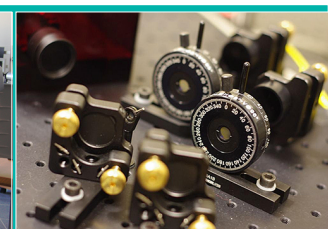


Ćwiczenie 42

Identyfikacja stanu splątanego polaryzacji dwóch fotonów i wyznaczenie wskaźnika jakości splątania

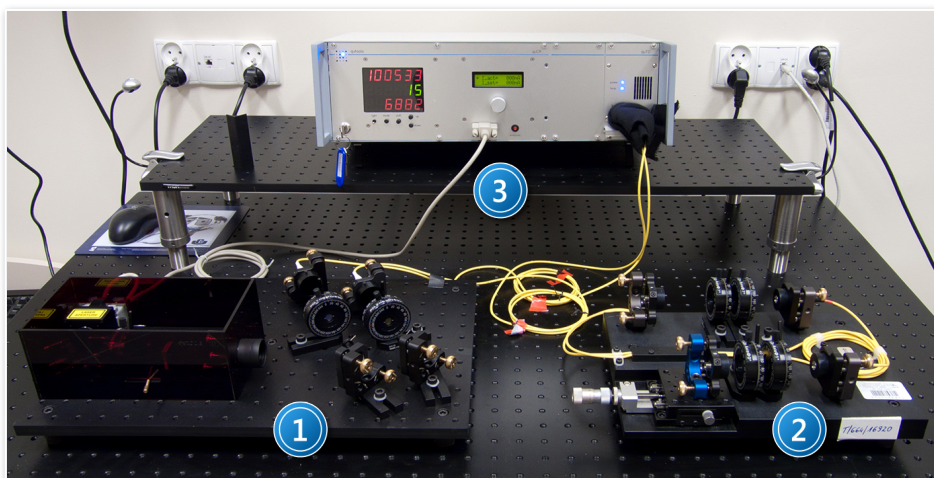


I. Zagadnienia do opracowania.

1. Opis układów złożonych w teorii klasycznej i kwantowej.
2. Wyprowadzenie nierówności Bella.
3. Stany produktowe i splątane dla dwóch układów kwantowych.
4. Opis stanów polaryzacji fotonów.
5. Stany Bella dla polaryzacji pary fotonów; łamanie nierówności Bella w tych stanach.
6. Zjawisko dwójłomności naturalnej.
7. Działanie płytki opóźniającej.
8. Polaryzatory światła. Polaryzator Glana-Thompsona.
9. Prawo Malusa.
10. Parametryczny podział częstotliwości.
11. Budowa i zasada działania laserów półprzewodnikowych.

II. Zadania doświadczalne.

1. Zapoznać się z układem pomiarowym przedstawionym na *Zdjęciach 1 i 2* oraz na schemacie na *Rysunku 3 w Dodatku A*.



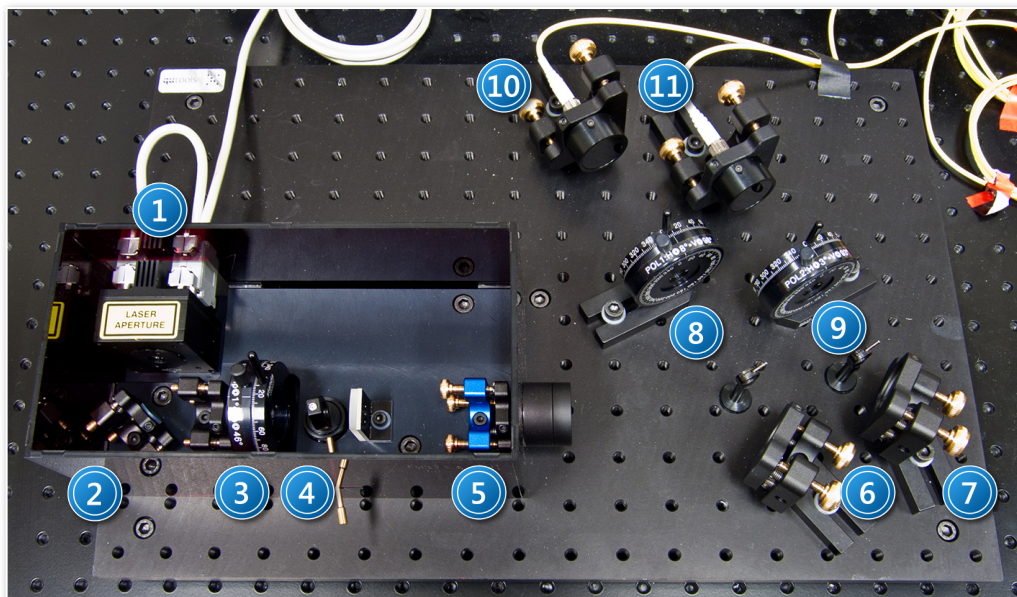
*Zdjęcie 1. Kompletny stanowiący do badania własności polaryzacyjnie splątanych par fotonów:
1 – układ do demonstracji jakości splątania; 2 – układ do badania interferencji dwufotonowej;
3 – urządzenie wielofunkcyjne: zasilacz – kontroler – detektory pojedynczych fotonów.*

2. Przetestować procedury związane z przygotowaniem stanowiska doświadczalnego do pomiarów i zapewnieniem właściwej geometrii ustawień elementów optycznych układu opisane szczegółowo w *Dodatku B*.
3. Jeden z polaryzatorów np. 9 (prawy) na *Zdjęciu 2* pozostawić w położeniu H odpowiadającym horyzontalnej polaryzacji ($\alpha = 0^\circ$).
Zmieniać kierunek polaryzacji drugiego polaryzatora obracając go co 10° , odczytując każdorazowo i notując liczby zliczeń koincydencji na wyświetlaczu detektora.

W okolicach maksimum i minimum zagęszczać odczyty liczby zliczeń koincydencji zmniejszając krok pomiarowy do np. 5°.

Powyższe pomiary wykonać dla pełnego kąta β obrotu polaryzatora od 0° do 360°.

- Zmienić pozycję wybranego polaryzatora z punktu II.3. dokonując jego obrotu z położenia H do położenia H + 45° ($\alpha = 45^\circ$).



Zdjęcie 2. Widok układu *quED I* do demonstracji jakości splątania par fotonów: 1 – laser; 2, 6, 7 – zwierciadła; 3 – półfalówka; 4 – kryształ wstępnej kompensacji (YVO₄); 5 – kryształ BBO; 8, 9 – polaryzatory światła; 10, 11 – światłowody ze sprzęgaczami.

- Powtórzyć pomiary opisane w punkcie II.3.
- Wyniki uzyskane dla obu przebiegów pomiarowych przedstawić graficznie na wspólnym wykresie zależności liczby zliczeń koincydencji C od kąta β obrotu polaryzatora (od 0° do 360°).
- Dopasować krzywą daną równaniem

$$f_\alpha(\beta) = \frac{A_\alpha}{2} \left[1 - V_\alpha \sin^2 \left(\frac{\beta - \beta_\alpha}{P_\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

do obu przebiegów liczby zliczeń koincydencji (dla $\alpha = 0^\circ$ oraz $\alpha = 45^\circ$).

- Porównać parametry dopasowania z równania (1) ze ścisłymi rezultatami, które można otrzymać dla stanu

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_1 |H\rangle_2 + e^{i\theta} |V\rangle_1 |V\rangle_2) \quad (2)$$

z równań (3) i (4) dla podanych kątów ustawień polaryzatorów

$$C(\alpha = 0^\circ, \beta) \sim \frac{1}{2} [1 - \sin^2 \beta], \quad (3)$$

$$C(\alpha = 45^\circ, \beta) \sim \frac{1 + \cos \theta}{4} \left[1 - \left(\frac{2 \cos \theta}{1 + \cos \theta} \right) \sin^2(\beta - 45^\circ) \right]. \quad (4)$$

9. Przyjąć, że określony z dopasowania parametr V_0 (dla $\alpha = 0^\circ$) określa jakość splątania. Porównać otrzymaną wartość wskaźnika jakości splątania z jego wartością z metryczki zestawu quED umieszczonej w Dodatku C.
10. Przyjąć, że

$$V_{45^\circ} = V_0 \left(\frac{2 \cos \theta}{1 + \cos \theta} \right) \quad (5)$$

i obliczyć wartość $\cos \theta$.

11. Ocenić jakościowo, który ze stanów Bella ($\theta = 0^\circ$ czy $\theta = 180^\circ$) jest bliski stanowi wytwarzanemu w bloku pompującym źródła światła.

III. Zestaw przyrządów.

1. Laser półprzewodnikowy ($\lambda = 401,5 \text{ nm}$; 10 mW).
2. 3 zwierciadła.
3. Soczewki.
4. Półfalówka.
5. 2 polaryzatory.
6. Kryształ dwójłomny YVO₄.
7. Kryształ nieliniowy BBO (β - BaB₂O₄).
8. Optyczne sprzęgacze światłowodowe.
9. Jednomodowe światłowody.
10. Filtry pasmowe.
11. Detektor pojedynczych fotonów.

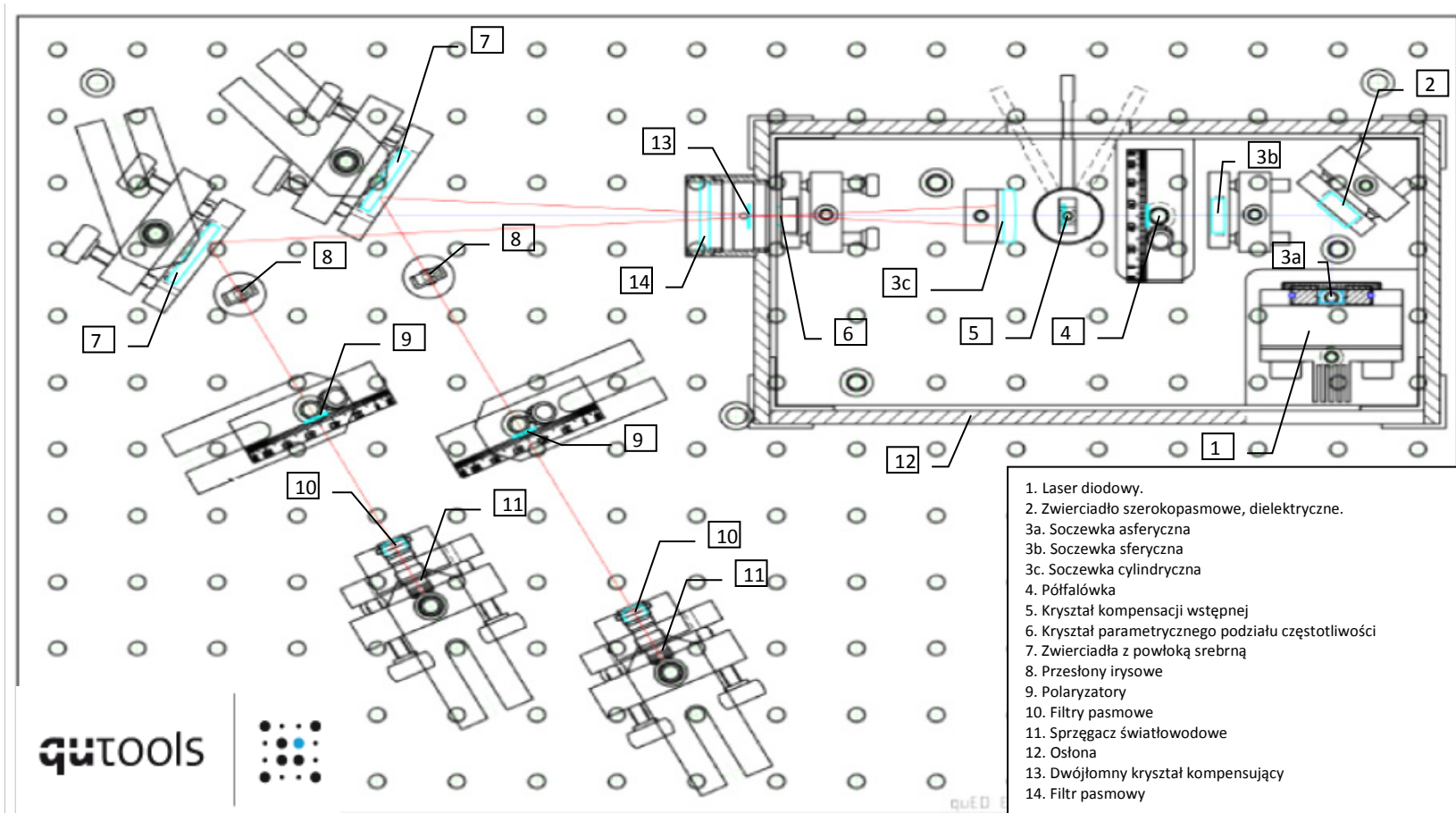
IV. Literatura.

1. M. Alicka, R. Alicki – „Pracownia Informatyki Kwantowej / Quantum Information Laboratory”, skrypt Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2011.
2. W. A. Shurcliff, S.S. Ballard – „Światło spolaryzowane”, PWN, Poznań 1968.
3. M. Le Bellac – „Wstęp do informatyki kwantowej”, PWN, Warszawa 2011.
4. W. Demtröder – „Spektroskopia laserowa”, PWN, Warszawa 1993.
5. B. Ziętek – „Optoelektronika”, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2005.
6. B. Ziętek – „Lasery”, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2009.
7. A. Kujawski, P. Szczepański – „Lasery. Podstawy fizyczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
8. D. Greenberger, A. Zeilinger – „POSTĘPY FIZYKI”, T.47, Zeszyt 4,339, 1996.
9. A. Zeilinger – „ŚWIAT NAUKI”, Lipiec 2000.
10. M. Nielsen, I. Chuang – “Quantum Computation and Quantum Communication”, Cambridge, London 2000.
11. L. Mandel, E. Wolf – “Optical Coherence and Quantum Optics”, Cambridge 1995.
12. D. Greenberger, A. Zeilinger – “Physics World”, 8, Nr 9, 33 (1995).
13. W. A. Shurcliff, S.S. Ballard – “Polarized Light”, Princeton 1964.

14. M. Born, E. Wolf – *“Principles of Optics”*, Cambridge University Press, Cambridge 1999.
15. O. Svelto – *“Principles of Lasers”*, Plenum, New York 1998.
16. W.S.C. Chang – *“Principles of Lasers and Optics”*, Cambridge University Press, 2005.
17. J.A. Buck – *“Fundamentals of Optical Fibres”*, NJ: Wiley – Interscience, Hoboken, 2004.
18. A. Peres – *“Quantum Theory: Concepts and Methods”*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
19. W. Demtröder – *“Atoms, Molecules and Photons: an Introduction to Atomic - , Molecular – and Quantum – Physics”*, Springer, Berlin 2006.
20. D. Dehlinger, M.W. Mitchell – *“Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory”*, Am. J. Phys. **70**, 989 – 901 (2002).
21. S. Nakamura, G. Fasol – *“The blue laser diode”*, Springer, Heidelberg 1997.
22. H. Paul – *“Introduction Quantum Optics from Light Quanta to Teleportation”*, Cambridge University Press, Cambridge 2004.
23. M. Le Bellac – *“A Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation”*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.

Dodatek A

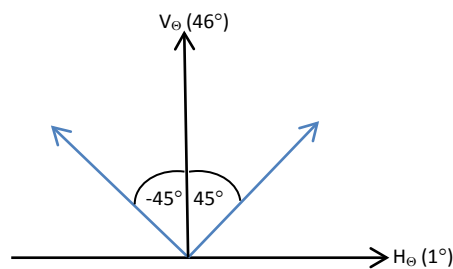
Rysunek 3. Schemat układu doświadczalnego do badania polaryzacyjnie splątanych par fotonów



Dodatek B

Przygotowanie układu doświadczalnego do pomiarów.

1. Geometria elementów optycznych układu zapewniająca równe ilości fotonów o polaryzacji H (poziomej) jak i V (prostopadłej) rejestrowanych przez detektor w obu kanałach zliczających pojedyncze fotony (jak na *Rysunku 4*) wymaga ustawienia tarczy obrotu półfalówki (3 na *Zdjęciu 2*) na wartość $23,5^\circ$. Sprawdzić czy tak jest.

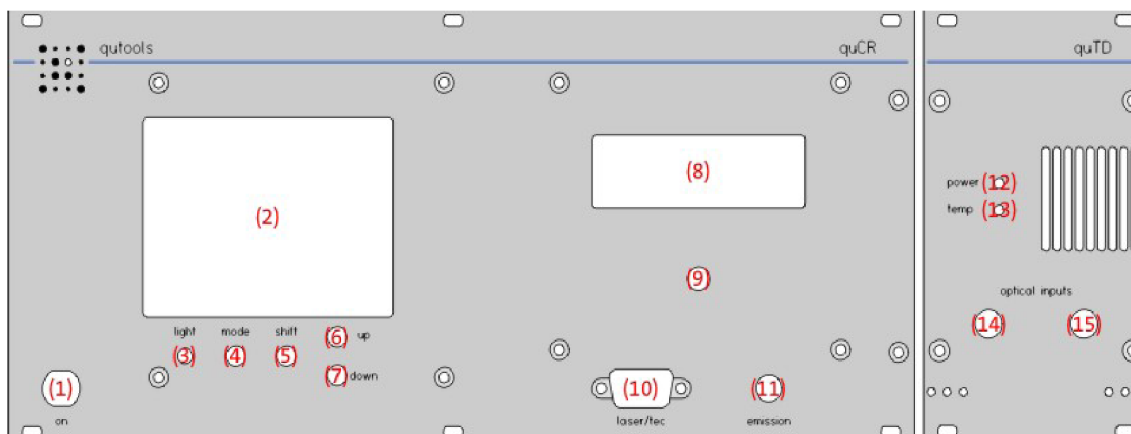


*Rysunek 4. Kierunek wiązki pompującej zapewniający równą ilość fotonów o polaryzacji H i V (kąt $23,5^\circ$ ustawiony na półfalówce 3 na *Zdjęciu 2*).*

2. Włączyć detektor pojedynczych fotonów (przekręcając kluczyk 1 na *Zdjęciu 5* i na schemacie na *Rysunku 6*).



Zdjęcie 5. Jednostka pomiarowa – kontroler, wielofunkcyjny zasilacz, detektory pojedynczych fotonów: 1 – główny włącznik modułu; 2 – wyświetlacz zliczeń; 3 – przyciski funkcji licznika; 4 – pokrętło zmiany parametrów lasera; 5 – wyświetlacz ustawionych parametrów lasera; 6 – wskaźniki stanu pracy modułu APD.



Rysunek 6. Schemat frontowego panelu jednostki pomiarowej.

3. Odczekać aż zgaśnie niebieska dioda (13 na Rysunku 6) w panelu temperatury detektora. Jest to równoznaczne z ustaleniem się temperatury chłodzenia lasera na żądanej wartości – 30 °C.
4. Sprawdzić na wyświetlaczu 5 na Zdjęciu 5 (8 na Rysunku 6) czy temperatura T set wynosi około 22 °C (taka wartość została wprowadzona do oprogramowania). Jeśli tak nie jest, podregulować wysokość temperatury pokrętkiem 4 na Zdjęciu 5 (9 na Rysunku 6).
5. Ustawić wartość natężenia prądu zasilającego laser pompujący I set (operating current) na 38 mA (pokrętkiem 3 na Rysunku 6).
6. Osie polaryzacji obu polaryzatorów 8 i 9 na Zdjęciu 2 ustawić w pozycji H (poziomej).
7. Wartość czasu integracji na detektorze ustawić pokrętkiem 7 na Rysunku 6 na 5 sekund (w celu zmniejszenia fluktuacji wskazań).
8. Dalsze czynności wykonywać według opisu z punktów II.3. instrukcji i dalszych, dokonując odczytów liczby zliczeń koincydencji (środkowe, zielone wskazania na wyświetlaczu 2 detektora).



Wskazówka

Zielone cyfry na wyświetlaczu detektora wskazują liczbę koincydencji, górne i dolne (czerwone) – liczbę pojedynczych fotonów w ustawionym czasie integracji w każdym kanale APD*.

* APD – z ang. Avalanche Photo Diode, dioda powielania lawinowego pracująca w modzie licznika Geigera rejestrująca liczbę pojedynczych fotonów w danym kanale pomiarowym.

Dodatek C

Certyfikat zestawu quED I do demonstracji własności polaryzacyjnie splątanych par fotonów

quTOOLS



<http://www.qutools.com> (info@qutools.com)

quTools GmbH
Königinstr. 11a RGB
80539 München
Germany
Phone: +49(89)321649590
Fax: +49(89)321649599

Inspection Data Sheet

Built For: Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Gdański
Ul. Wita Stwosza 57
80-952 Gdańsk
Poland

Order No.: 14/4A/A120/2010

Model: quED I

Description: Entanglement Demonstrator - Source of Polarization Entangled Photon Pairs

Detected characteristics:

Dark-count rates	$\approx 2400 \text{ s}^{-1}$ and $\approx 2600 \text{ s}^{-1}$
Single-count rates*	$\approx 45000 \text{ s}^{-1}$ and $\approx 38000 \text{ s}^{-1}$
Coincidence-count rate*	$\approx 4000 \text{ s}^{-1}$
Entanglement[◊]	horizontal/vertical base: $\approx 98 \%$ diagonal base: $\approx 95 \%$
Bell (CHSH) inequality[†]	horizontal/vertical base: 2.75 ± 0.01

* laser diode at op. current, irises fully opened, polarizers removed from the setup

◊ measured as the visibility of correlation curves in two complementary bases (not corrected for accidental coincidence detections)

◊ integration time of 5 s per angular setting of polarizers (not corrected for accidental coincidence detections)

Basic Specifications:

Pump Laser Diode	threshold current (I_{act}): 28 mA operating current (I_{act}): 38 mA optical power: 10 mW ($< 0.2 \mu\text{W}$ after pump-beam protective enclosure) peak wavelength: 401.5 nm operating temperature: 25 °C
-------------------------	---

continues on the next page...

... continued from the previous page

Conversion Crystals	material: beta-barium borate (BBO, β -BaB ₂ O ₄) phase matching: type I at $\theta = 29.3^\circ$ ($\phi = 0.0^\circ$) dimensions: twice $7 \times 7 \times 0.7$ mm ³
Compensation Crystals	material: undoped yttrium orthovanadate (YVO ₄)
Longpass Filters	material: Schott RG715 transmission @ op. wavelength: ≈ 91 %
Polarizers	contrast: $> 1000 : 1$ transmission @ op. wavelength: > 80 %
Source Dimensions	$30 \times 45 \times 10$ cm ³

Approved by: Pavel Trojek

Date: 13.04.2010