



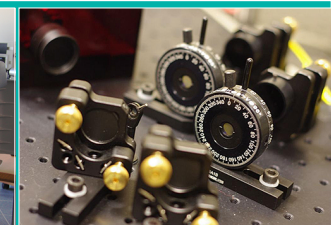
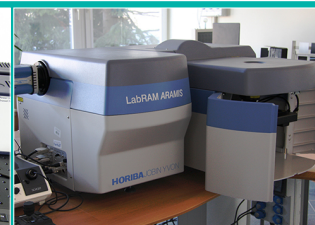
DLF

**DYDAKTYCZNE
LABORATORIUM
FIZYCZNE**

Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
UNIwersytet Gdański

Ćwiczenie 40

Łamanie nierówności Bella (CHSH) dla polaryzacyjnie splątanych par fotonów

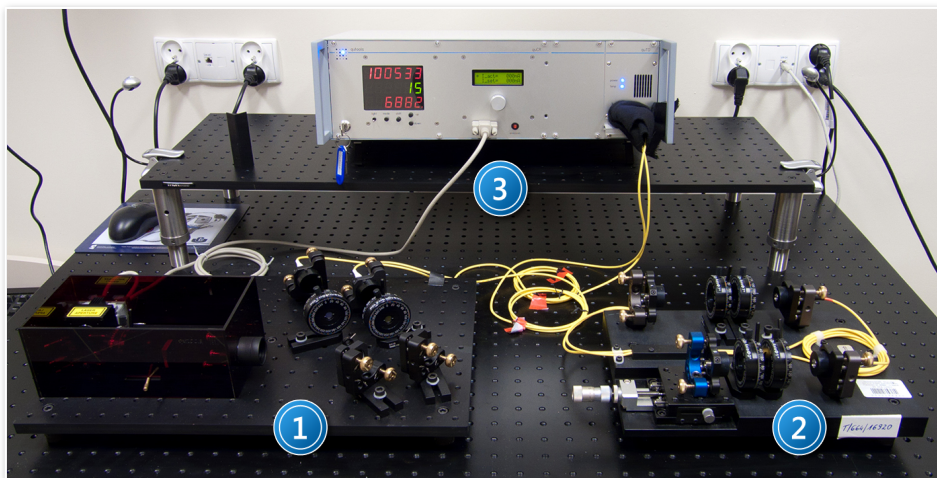


I. Zagadnienia do opracowania.

1. Opis układów złożonych w teorii klasycznej i kwantowej.
2. Założenia i wyprowadzenie nierówności CHSH.
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. Konsekwencje fizyczne złamania nierówności CHSH.
7. Zjawisko dwójtomności naturalnej.
8. Działanie płytki opóźniającej.
9. Polaryzatory światła. Polaryzator Glana-Thompsona.
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*.

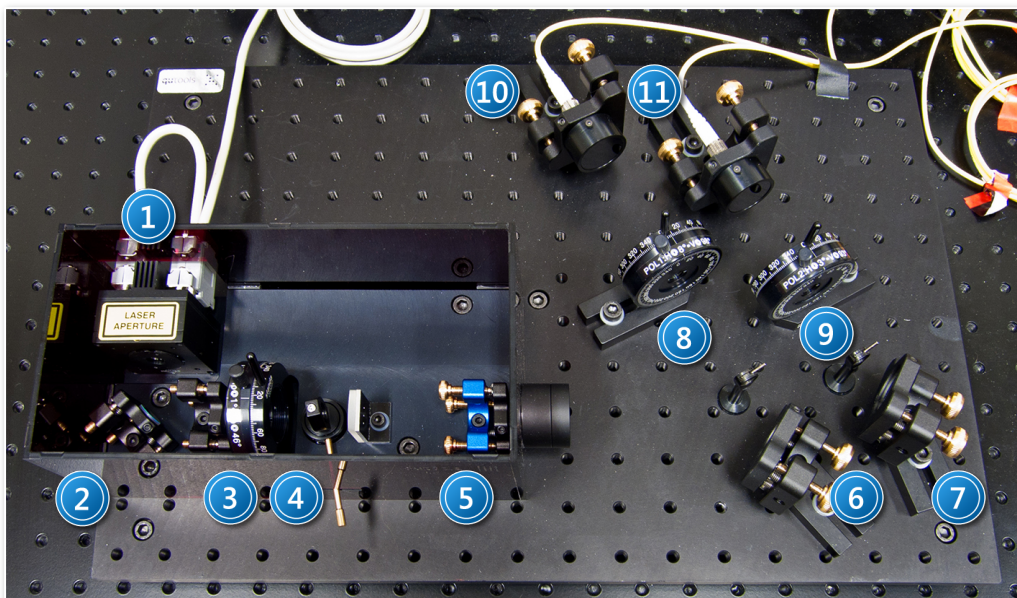


Zdjęcie 1. Kompletny stanowiąc do badania własności polaryzacyjnie splątanych par fotonów: 1 – układ do demonstracji jakości splątania; 2 – układ do badania interferencji dwufotonowej; 3 – urządzenie wielofunkcyjne: zasilacz – kontroler – detektor pojedynczych fotonów.

2. Przetestować procedury związane z przygotowaniem stanowiska doświadczalnego do pomiarów i zapewnieniem właściwej geometrii ustawień elementów optycznych układu opisane szczegółowo w *Dodatku B*.
3. Po odtworzeniu wszystkich czynności wstępnych opisanych w *Dodatku B* dokonać wyboru stanu Bella (równanie (1)). Wybrać stan z $\Phi = 0$.

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

Dla takiego stanu $|\Phi^+\rangle$ liczba zliczeń koincydencji musi być maksymalna dla obu kombinacji ustawień polaryzatorów (HH oraz VV) przy odpowiednim ustawieniu kryształu wstępnej kompensacji 4 na Zdjęciu 2.



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.

4. Udowodnić doświadczalnie łamanie nierówności Bella w stanach splątanych.

Tabela 1. Tabela pomocnicza do testu nierówności Bella.

Ustawienia	Pol 1	Pol 2	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	\bar{C}	$\Delta\bar{C}$
$C(\alpha, \beta)$	0°	22,5°							
$C(\alpha, \beta_{\perp})$	0°	112,5°							
$C(\alpha_{\perp}, \beta)$	90°	22,5°							
$C(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})$	90°	112,5°							
$C(\alpha', \beta)$	45°	22,5°							
$C(\alpha', \beta_{\perp})$	45°	112,5°							
$C(\alpha'_{\perp}, \beta)$	135°	22,5°							
$C(\alpha'_{\perp}, \beta_{\perp})$	135°	112,5°							
$C(\alpha, \beta')$	0°	67,5°							
$C(\alpha, \beta'_{\perp})$	0°	157,5°							
$C(\alpha_{\perp}, \beta')$	90°	67,5°							
$C(\alpha_{\perp}, \beta'_{\perp})$	90°	157,5°							
$C(\alpha', \beta')$	45°	67,5°							
$C(\alpha', \beta'_{\perp})$	45°	157,5°							
$C(\alpha'_{\perp}, \beta')$	135°	67,5°							
$C(\alpha'_{\perp}, \beta'_{\perp})$	135°	157,5°							
								Suma	
								$\sum \bar{C}$	$\sum \Delta\bar{C}$

W tym celu dokonywać odczytów liczby zliczeń koincydencji (z wyświetlacza detektora pojedynczych fotonów) kolejno dla ustawień polaryzatorów podanych w Tabeli 1.

W celu zmniejszenia wpływu fluktuacji wskazań detektora, dla każdego ustawienia polaryzatorów pięciokrotnie odczytać i zanotować liczbę zliczeń.



Wskazówka

Dokonując obrotów polaryzatorów uwzględnić ich osadzenie w oprawach: dla polaryzatora Pol 1 (8 na Zdjęciu 2) pozycja H wypada dla 8°; dla polaryzatora Pol 2 (9 na Zdjęciu 2) pozycja H wypada dla 3°.

Zmieniając 16 – krotnie pozycje polaryzatorów wypełnić całą Tabelę 1.

5. Uśrednioną wartość \bar{C} z pięciu odczytów wyliczoną na podstawie równania (2), kładąc $n = 5$,

$$\bar{C}(\alpha, \beta) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_j(\alpha, \beta), \quad (2)$$

gdzie C_j jest wynikiem pojedynczego odczytu, a także średni błąd kwadratowy $\Delta\bar{C}(\alpha, \beta)$, obliczony ze wzoru w równaniu (3),

$$\Delta\bar{C}(\alpha, \beta) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [C_j(\alpha, \beta) - \bar{C}(\alpha, \beta)]^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

wpisać w odpowiednie rubryki do Tabeli 1.

6. Obliczyć sumę $\Sigma\bar{C}$ (dla wszystkich ustawień polaryzatorów) średnich wartości liczby zliczeń oraz sumę średnich błędów kwadratowych $\Sigma\Delta\bar{C}$ i wpisać je do Tabeli 1.
 7. Obliczyć parametr Bella korzystając ze wzoru w równaniu (4)

$$S(\alpha, \alpha', \beta, \beta') = E(\alpha, \beta) + E(\alpha', \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta'), \quad (4)$$

gdzie korelacje $E(\alpha, \beta)$ są wyrażone poprzez liczby koincydencji jak w równaniu (5)

$$E(\alpha, \beta) = \frac{\bar{C}(\alpha, \beta) - \bar{C}(\alpha, \beta_{\perp}) - \bar{C}(\alpha_{\perp}, \beta) + \bar{C}(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})}{\bar{C}(\alpha, \beta) + \bar{C}(\alpha, \beta_{\perp}) + \bar{C}(\alpha_{\perp}, \beta) + \bar{C}(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})}. \quad (5)$$

8. Oszacować błąd otrzymanej doświadczalnej wartości parametru Bella S wykorzystując przybliżony wzór z równania (6)

$$\Delta S \cong \frac{\Sigma\Delta\bar{C}}{\Sigma\bar{C}}. \quad (6)$$

9. Porównać otrzymaną wartość parametru Bella z wartością podaną w certyfikacie zestawu quED I umieszczonym w *Dodatku C*.

III. Zestaw przyrządów.

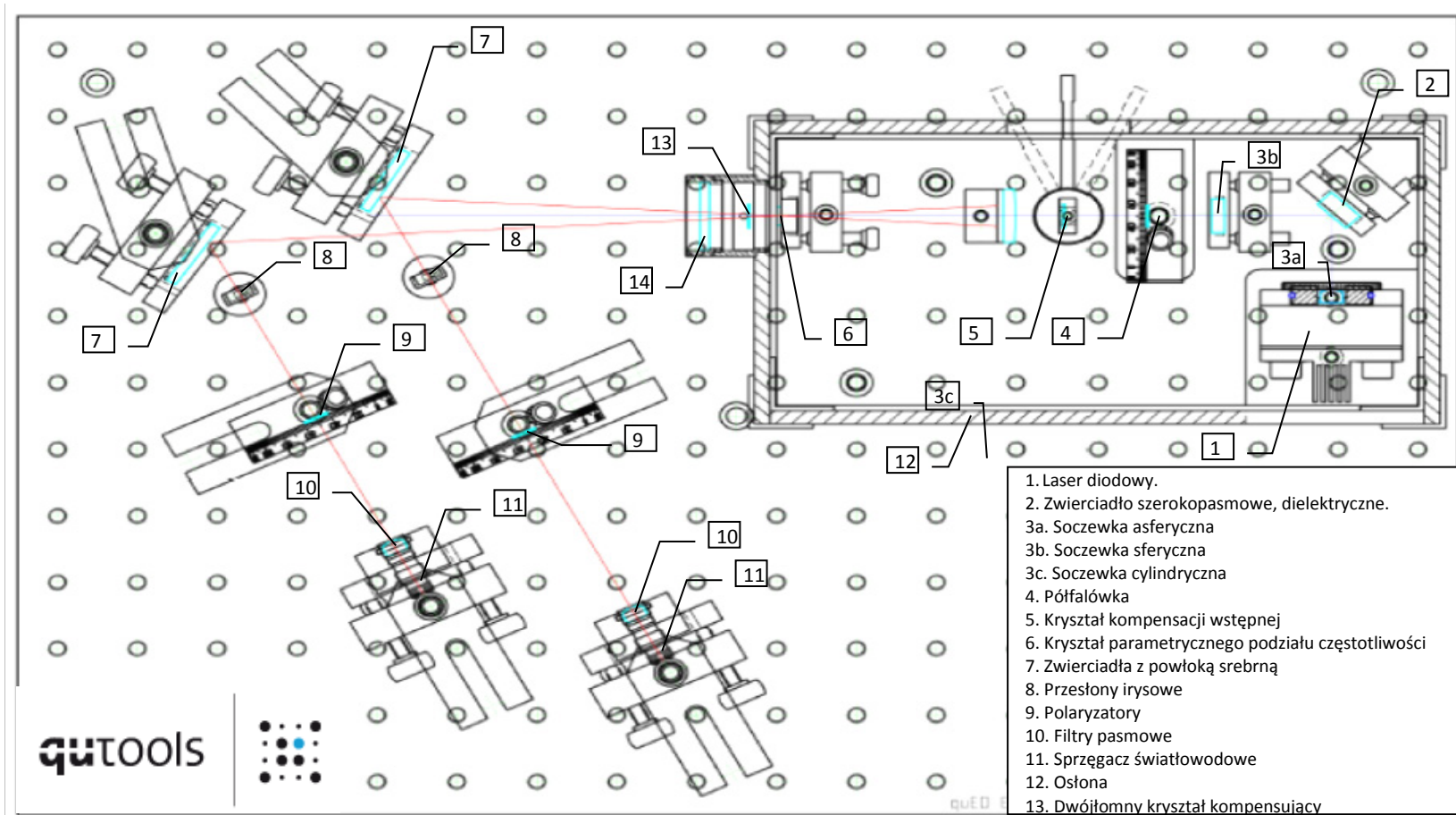
1. Laser półprzewodnikowy ($\lambda = 401,5$ nm; 10 mW).
2. 3 zwierciadła.
3. Soczewki.
4. Półfalówka.
5. 2 polaryzatory.
6. Kryształ dwójłomny YVO₄.
7. Kryształ nieliniowy BBO (β - BaB₂O₄).
8. Optyczne sprzęgacze światłowodowe.
9. Jednomodowe światłowody.
10. Filtry pasmowe.
11. Detektor pojedynczych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

IV. Literatura.

1. W. A. Shurcliff, S.S. Ballard – „Światło spolaryzowane”, PWN, Poznań 1968.
2. M. Le Bellac – „Wstęp do informatyki kwantowej”, PWN, Warszawa 2011.
3. W. Demtröder – „Spektroskopia laserowa”, PWN, Warszawa 1993.
4. B. Ziętek – „Optoelektronika”, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2005.
5. B. Ziętek – „Lasery”, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2009.
6. A. Zeilinger – „Świat Nauki”, Lipiec 2000.
7. M. Alicka, R. Alicki – „Pracownia Informatyki Kwantowej / Quantum Information Laboratory”, skrypt Uniwersytetu Gdańskiego, 2011.
8. M. Nielsen, I. Chuang – “Quantum Computation and Quantum Communication”, Cambridge, London 2000.
9. L. Mandel, E. Wolf – “Optical Coherence and Quantum Optics”, Cambridge 1995.
10. D. Greenberger, A. Zeilinger – “Physics World”, **8**, Nr 9, 33 (1995).
11. W. A. Shurcliff, S.S. Ballard – “Polarized Light”, Princeton 1964.
12. M. Born, E. Wolf – “Principles of Optics”, Cambridge University Press, Cambridge 1999.
13. O. Svelto – “Principles of Lasers”, Plenum, New York 1998.
14. W.S.C. Chang – “Principles of Lasers and Optics”, Cambridge University Press, 2005.
15. J.A. Buck – “Fundamentals of Optical Fibres”, NJ: Wiley – Interscience, Hoboken, 2004.
16. A. Peres – “Quantum Theory: Concepts and Methods”, Kluwer Academic Publishers, 1993.
17. W. Demtröder – “Atoms, Molecules and Photons: an Introduction to Atomic -, Molecular – and Quantum – Physics”, Springer, Berlin 2006.
18. D. Dehlinger, M.W. Mitchell – “Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory”, Am. J. Phys. **70**, 989 – 901 (2002).
19. S. Nakamura, G. Fasol – “The blue laser diode”, Springer, Heidelberg 1997.
20. H. Paul – “Introduction Quantum Optics from Light Quanta to Teleportation”, Cambridge University Press, Cambridge 2004.
21. M. Le Bellac – “A Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation”, Cambridge University Press, Cambridge 2006.

Dodatek A

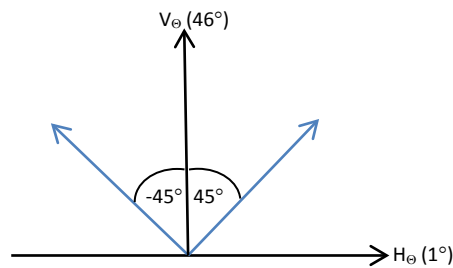
Rysunek 3. Schemat układu doświadczalnego do badania polaryzacyjnie splątanych par fotonów



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.

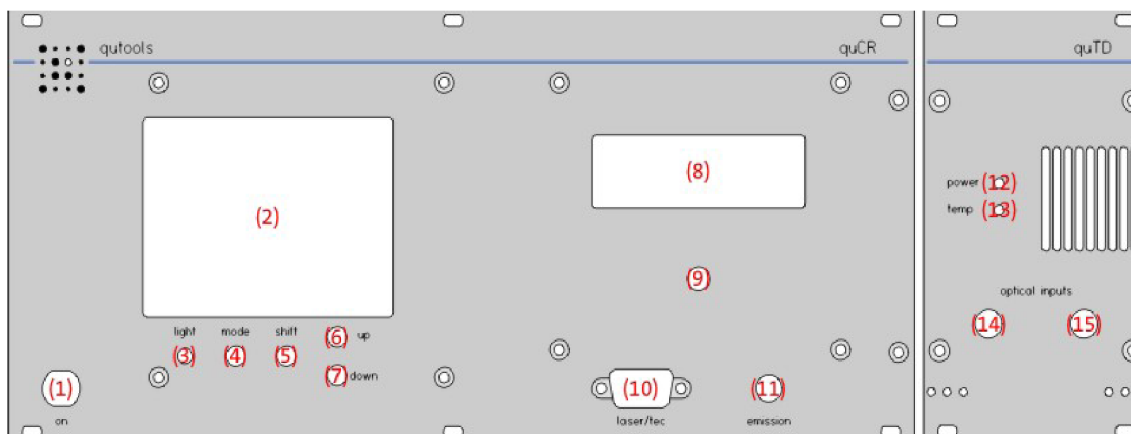


*Rysunek 4. Kierunek wiązki pompującej zapewniający równą ilość fotonów o polaryzacji H i V (kąt $23,5^\circ$ ustawiony na półfalówce 3 na *Zdjęciu 2*).*

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 – pokrętko zmiany parametrów lasera; 5 – wyświetlacz ustawionych parametrów lasera; 6 – wskaźniki stanu pracy modułu APD.



Rysunek 6. Schemat frontowego panela 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. Dokonywać odczytów liczby zliczeń koincydencji (środkowe, zielone wskazania na wyświetlaczu 2 detektora) dla kombinacji ustawień polaryzatorów podanej w punkcie II.4. instrukcji.



Wskazówka

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

* APD – z ang. Avalanche Photodiode, 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 Gdansk
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