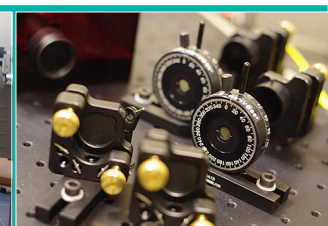


Ćwiczenie 41

Interferencja dwóch skorelowanych fotonów

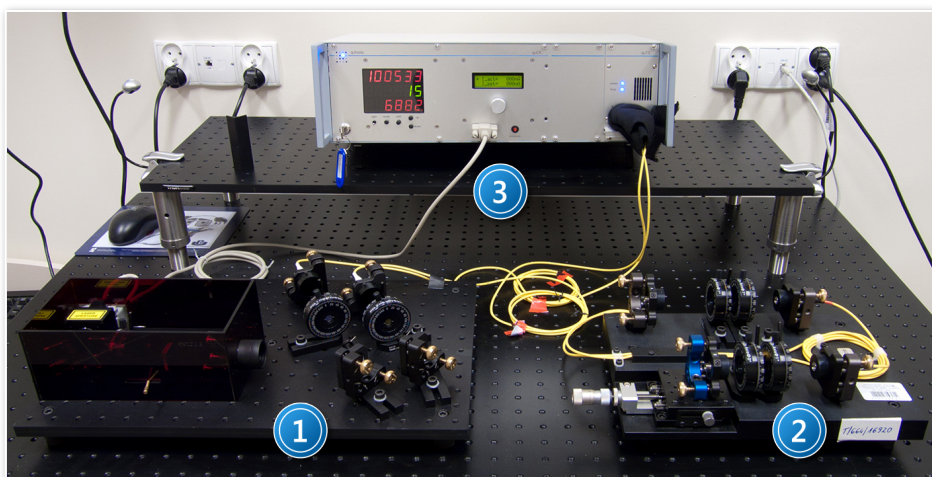


I. Zagadnienia do opracowania.

1. Opis układów złożonych w teorii klasycznej i kwantowej.
2. Stany produktowe i splątane dla dwóch układów kwantowych.
3. Opis stanów polaryzacji fotonów.
4. Interferencja w układzie dwufotonowym - efekt Hong – Ou – Mandela.
5. Zjawisko dwójłomności naturalnej.
6. Działanie płytki opóźniającej.
7. Polaryzatory światła. Polaryzator Glana-Thompsona.
8. Parametryczny podział częstotliwości.
9. Budowa i zasada działania laserów półprzewodnikowych.

II. Zadania doświadczalne.

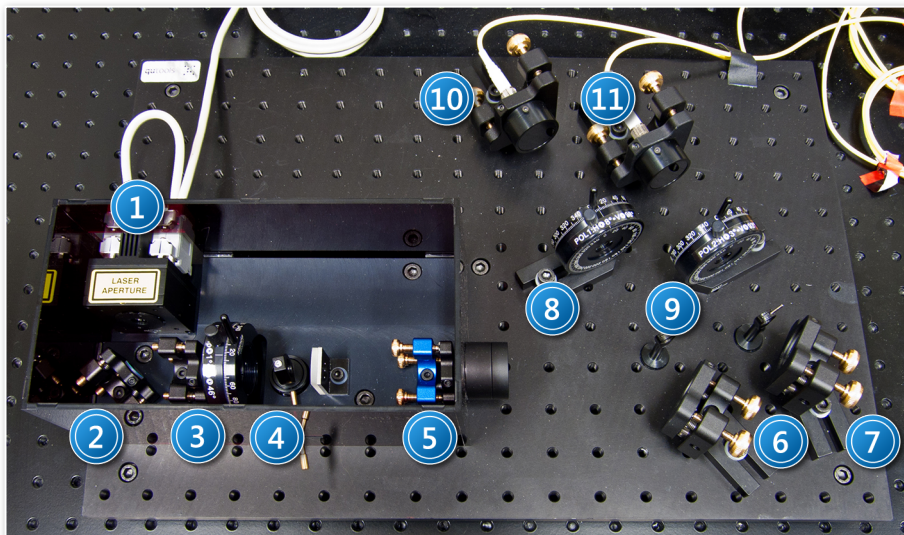
1. Zapoznać się z układem pomiarowym przedstawionym na *Zdjęciach 1 - 4* oraz na schematach na *Rysunkach 5 – 8* w *Dodatkach A – C*.



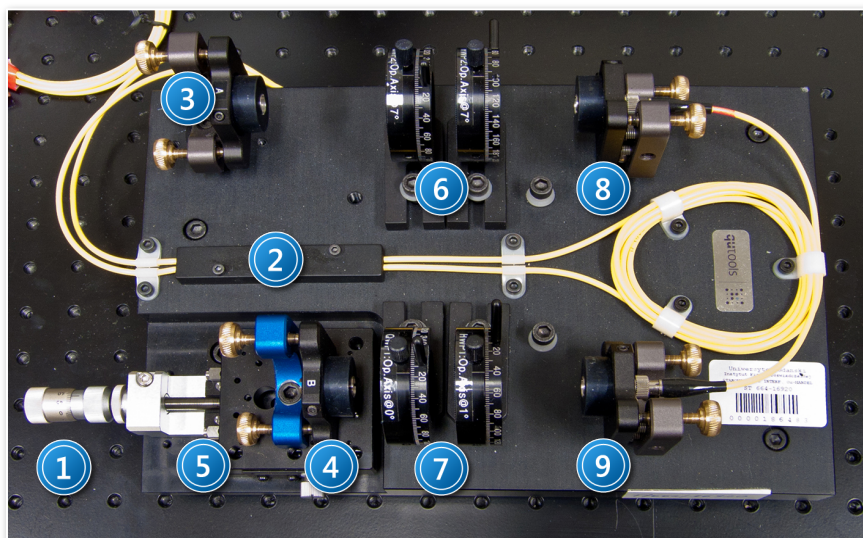
*Zdjęcie 1. Kompletny stanowiący do badania własności polaryzacyjnie splątanych par fotonów:
1 – układ do demonstracji jakości splątania; 2 – układ do badania interferencji dwufotonowej;
3 – urządzenie wielofunkcyjne: zasilacz – kontroler – detektor pojedynczych fotonów.*

2. Zarejestrować efekt interferencji skorelowanych przestrzennie fotonów źródła (1 na *Zdjęciu 1*) przy pomocy kompletnego stanowiska na *Zdjęciu 1*.
3. Przed przystąpieniem do pomiarów dokonać sprawdzenia połączeń całego stanowiska. Upewnić się że:
 - kryształ BBO dostarcza fotony o jednym rodzaju polaryzacji (np. fotony V przy ustawieniu półfalówki źródła (3 na *Zdjęciu 2*) w położeniu horyzontalnym (na H);
 - prąd zasilania lasera wynosi 41 mA;
 - wyjścia światłowodowe układu qu2PI są podłączone do wejść (14) i (15), *Rysunek 8*, detektora pojedynczych fotonów;
 - końcówki obu światłowodów źródła quED są podłączone do sprzęgaczy 3 i 4, *Zdjęcie 3* czyli do obu ramion układu qu2PI a światłowod źródła quED oznaczony czarną taśmą jest połączony z wejściowym sprzęgaczem światłowodowym 4 na *Zdjęciu 3* w ramieniu B układu qu2PI;

- w sprzęgaczach światłowodowych 8 i 9 na *Zdjęciu 3* znajdują się filtry interferencyjne;
- przesuwny stolik 5, *Zdjęcie 3*, znajduje się, mniej więcej, na środku zakresu jego przesuwu (około 12 mm od prawego krańca).



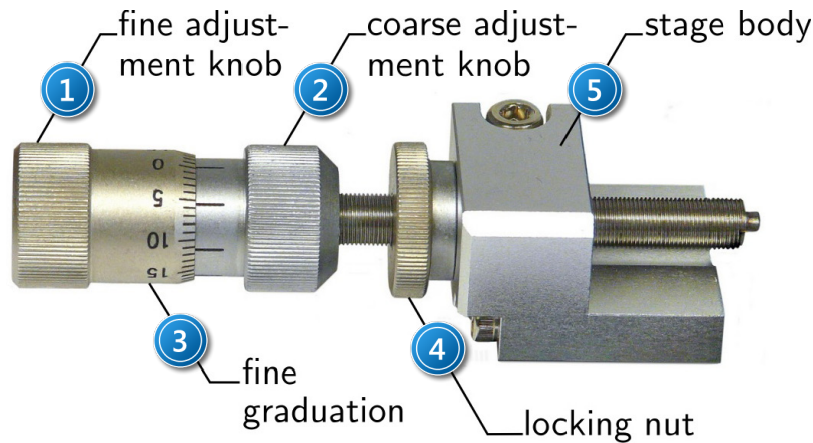
Zdjęcie 2. Widok układu quED I do demonstracji jakości splątania par fotonów: 1 – laser; 2, 6, 7 – zwierciadła; 3 – półfalówka; 4 – kryształ wstępnej kompensacji (YVO₄); 5 – kryształ BBO; 8, 9 – polaryzatory światła; 10, 11 – światłowody ze sprzęgaczami.



Zdjęcie 3. Widok układu qu2PI do demonstracji interferencji dwufotonowej: 1 – śruba mikrometryczna; 2 – dzielnik wiązki (50:50); 3, 4 – wejściowe sprzęgacze światłowodowe; 5 – przesuwny stolik; 6, 7 – podwójne układy: ćwierćfalówka QWP i półfalówka HWP; 8, 9 – wyjściowe sprzęgacze światłowodowe.

4. Po sprawdzeniu wszystkich wymaganych ustawień z punktu II.3. rozpocząć poszukiwanie dołka interferencyjnego Hong – Ou – Mandela zmieniając długość drogi optycznej w ramieniu B układu qu2PI. Umożliwia to liniowy przesuw stolika 5 na *Zdjęciu 3* ze sprzęgaczem światłowodowym.

5. Zwolnić blokadę 4, *Zdjęcie 4*, aby umożliwić obrót śruby i przesuw stolika.



Zdjęcie 4. Widok śruby mikrometrycznej z opisem jej elementów (qtools – Operations Manual for qu2PI): 1 – pokrętło precyzyjnej regulacji (50 μm na obrót); 2 – pokrętło zgrubnej regulacji (500 μm na obrót); 3 – precyzyjna skala (co 1 μm); 4 – pierścień blokujący obrót pokrętła 2; 5 – korpus przesuwu.

6. Rozpocząć obserwację liczby zliczeń koincydencji na wyświetlaczu detektora pojedynczych fotonów przekręcając jednocześnie śrubę zgrubnego przesuwu stolika 2, *Zdjęcie 4*, co około 10° i przesuwając stolik w kierunku prawej krawędzi.
- Po każdym obrocie o 10° odczekać około 1 sekundę na stabilizację wskazań detektora.
- Kontynuować cierpliwie przesuw stolika śledząc nadal wskazania wyświetlacza detektora.
- Po zauważeniu spadku liczby koincydencji pierścieniem 4, *Zdjęcie 4*, należy zablokować obrót śruby regulacji zgrubnej i kontynuować skanowanie odległości i poszukiwanie minimum interferencji przy pomocy pokrętła 1, *Zdjęcie 4* precyzyjnej regulacji.
7. Po zaobserwowaniu minimum interferencyjnego ustalić zakres odległości stolika, na którym minimum interferencyjne jest „dobrze widoczne”.
8. Wykonać kilkakrotnie pomiary liczby zliczeń koincydencji zmieniając długość drogi optycznej co 5 μm i notując liczby zliczeń koincydencji.
- Każdorazowo cofać nastaw śruby precyzyjnej regulacji do położenia, od którego zaczyna się spadek liczby zliczeń, po czym kontynuować odczyt i zapisywanie odległości i liczby zliczeń dokonując przesuwu śruby w tym samym kierunku co poprzednio.
- Nigdy nie rejestrować dołka interferencyjnego cofając po prostu stolik – ze względów mechanicznych wprowadzi to błąd w określeniu położenia minimum interferencji o około $\pm 2 \mu\text{m}$.
9. Przedstawić graficznie uzyskane wyniki na wykresie liczby zliczeń w zależności od zmiany długości drogi optycznej (przesunięcia stolika) w ramieniu B w obszarze minimum interferencji.
10. Z dopasowania krzywych odczytać położenie minimum Hong – Ou – Mandela.
11. Oszacować szerokość połówkową zarejestrowanego minimum interferencyjnego.
12. Przyjmując, że szerokość połówkowa minimum interferencyjnego odpowiada długości paczki falowej fotonu, porównać ją z długością fali światła źródła ($810 \pm 10 \text{ nm}$).

III. Zestaw przyrządów.

Układ źródła quED I:

1. Laser półprzewodnikowy ($\lambda = 401.5$ nm, 10 mW).
2. 3 zwierciadła.
3. Soczewki.
4. Półfalówka.
5. 2 polaryzatory.
6. Kryształ dwójłomny YVO_4 .
7. Kryształ nieliniowy BBO ($\beta - \text{BaB}_2\text{O}_4$).
8. Optyczne sprzęgacze światłowodowe.
9. Jednomodowe światłowody.
10. Filtry pasmowe.

Układ do badania interferencji qu2PI:

1. 4 sprzęgacze światłowodowe.
2. Dzielnik wiązki (50:50).
3. 2 ćwierćfalówki, 2 półfalówki.
4. 2 filtry interferencyjne (803 ± 2 nm, FWHM = 10 ± 2 nm).
5. 2 światłowody.
6. Stolik przesuwu liniowego ze śrubą mikrometryczną.
7. Detektor pojedynczych fotonów.

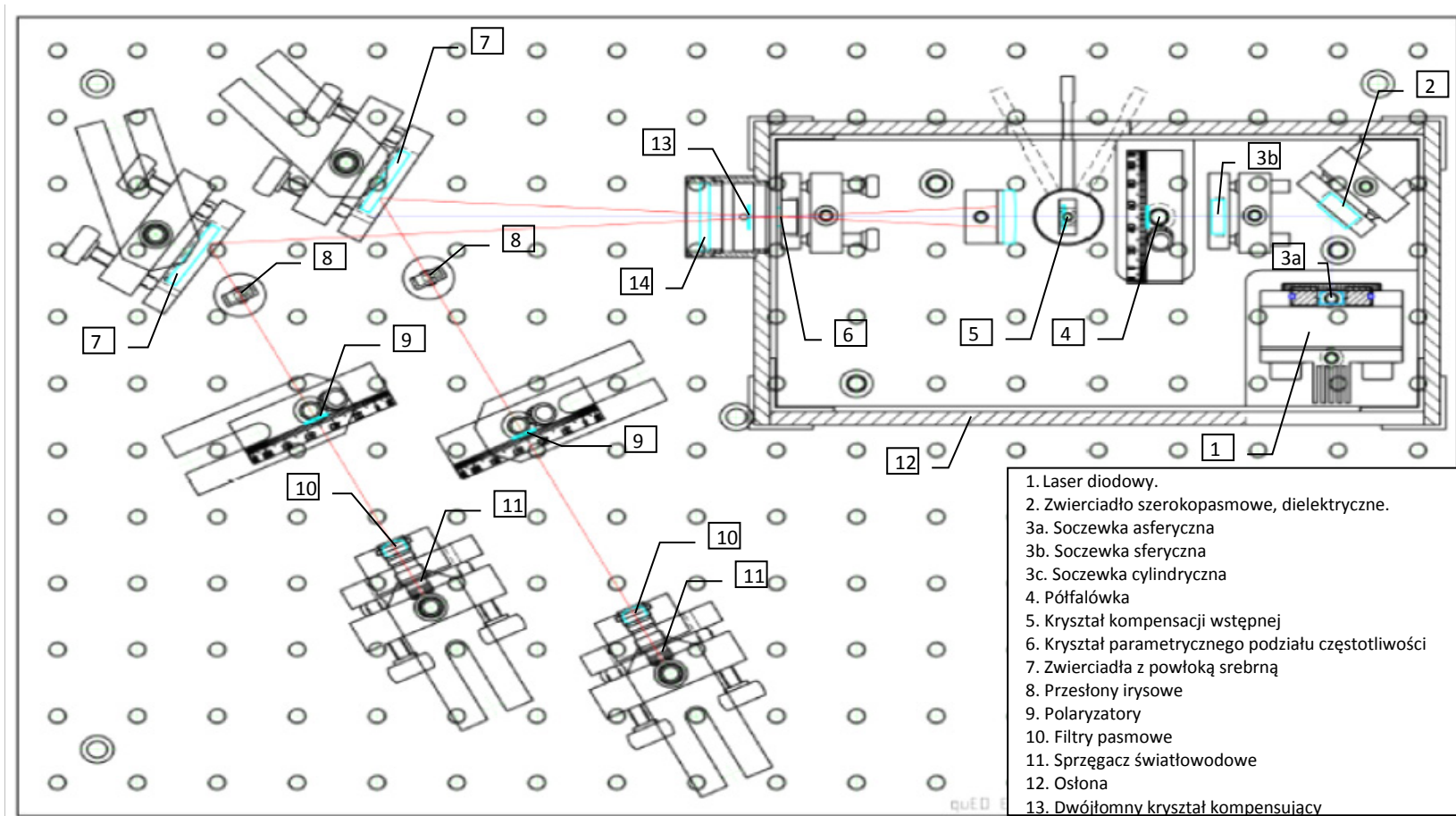
IV. Literatura.

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. Kujawski, P. Szczepański – „*Lasery. Podstawy fizyczne*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
7. D. Greenberger, A. Zeilinger – „*Postępy Fizyki*”, T.47, Zeszyt 4,339, 1996.
8. A. Zeilinger – „*Świat Nauki*”, Lipiec 2000.
9. M. Alicka, R. Alicki – „*Pracownia Informatyki Kwantowej / Quantum Information Laboratory*”, skrypt Uniwersytetu Gdańskiego, 2011.
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.

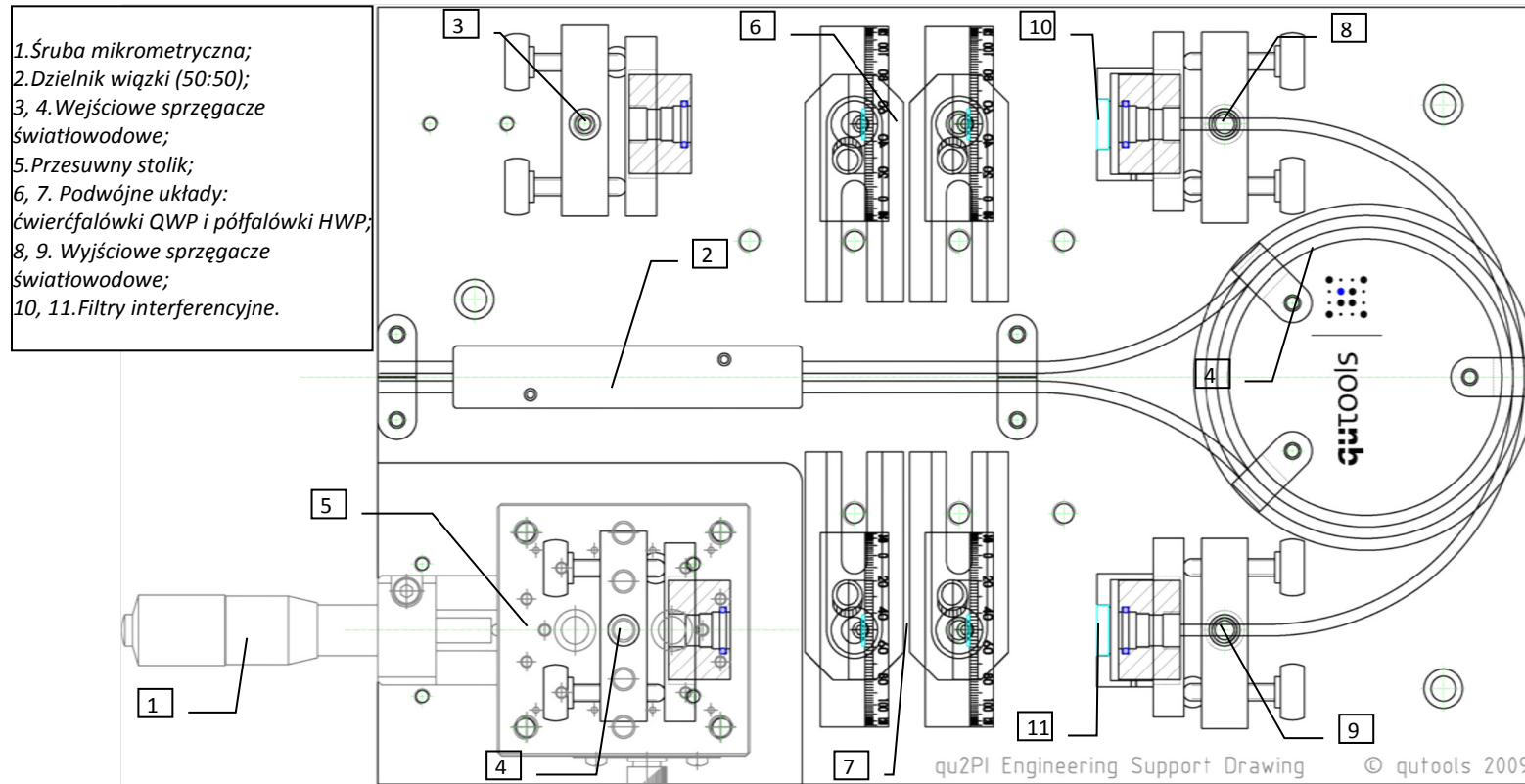
Dodatek A

Rysunek 5. Schemat układu doświadczalnego do badania polaryzacyjnie splątanych par fotonów



Dodatek B

Rysunek 6. Schemat układu qu2PI do badania interferencji dwufotonowej.



Dodatek C

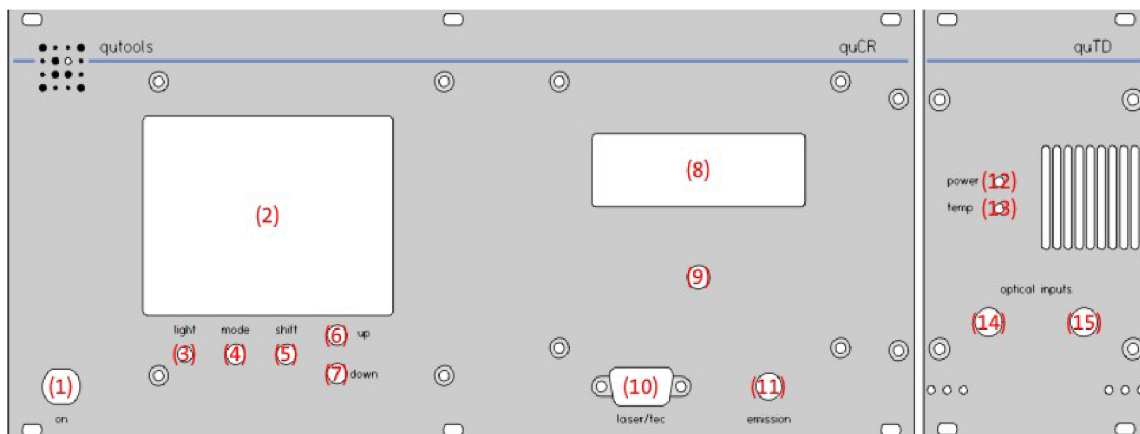
Opis obsługi detektora pojedynczych fotonów

1. Włączyć detektor pojedynczych fotonów (przekręcając kluczyk 1 na Zdjęciu 7 i na schemacie na Rysunku 8).



Zdjęcie 7. Jednostka pomiarowa : kontroler –wielofunkcyjny zasilacz - detektor 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.

2. Odczekać aż zgaśnie niebieska dioda (13 na Rysunku 8) w panelu temperatury detektora. Jest to równoznaczne z ustaleniem się temperatury chłodzenia lasera na żądanej wartości – 30 °C.



Rysunek 8. Schemat frontowego panela jednostki pomiarowej.

3. Sprawdzić na wyświetlaczu 5 na *Zdjęciu 7* (8 na *Rysunku 8*) 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 7* (9 na *Rysunku 8*).
4. Ustawić wartość natężenia prądu zasilającego laser pompujący I set (operating current) na 41 mA (pokrętkiem 3 na *Rysunku 8*).
5. Wartość czasu integracji na detektorze ustawić pokrętkiem 7 na *Rysunku 8* na 5 sekund (w celu zmniejszenia fluktuacji wskazań).
6. Liczba zliczeń koincydencji jest wyświetlana jako środkowe zielone wskazania na wyświetlaczu 2, *Zdjęcie 7* 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.