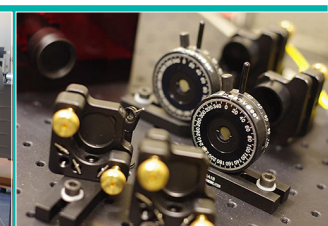
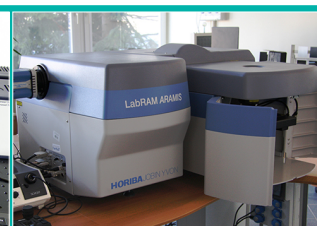


Ćwiczenie 39

Wyznaczanie wskaźnika jakości polaryzacyjnego splątania par fotonów

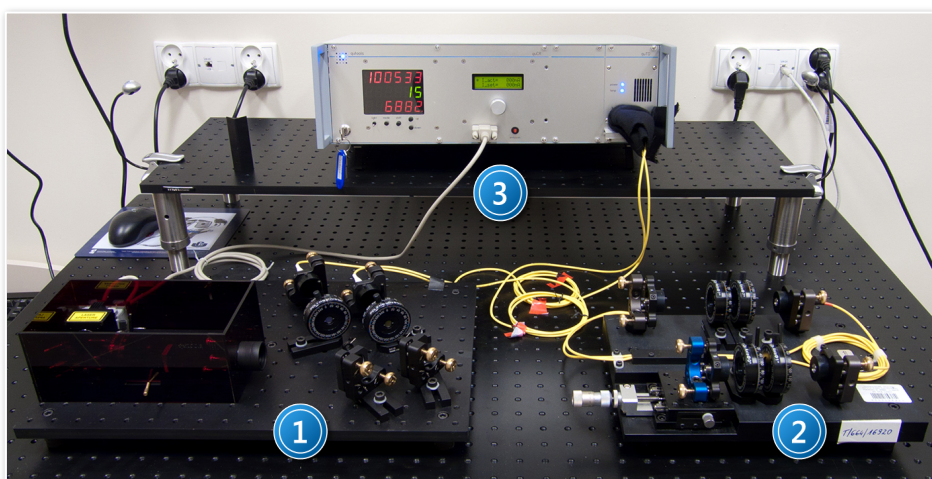


I. Zagadnienia do opracowania.

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. Parametryczny podział częstotliwości.
10. 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*.

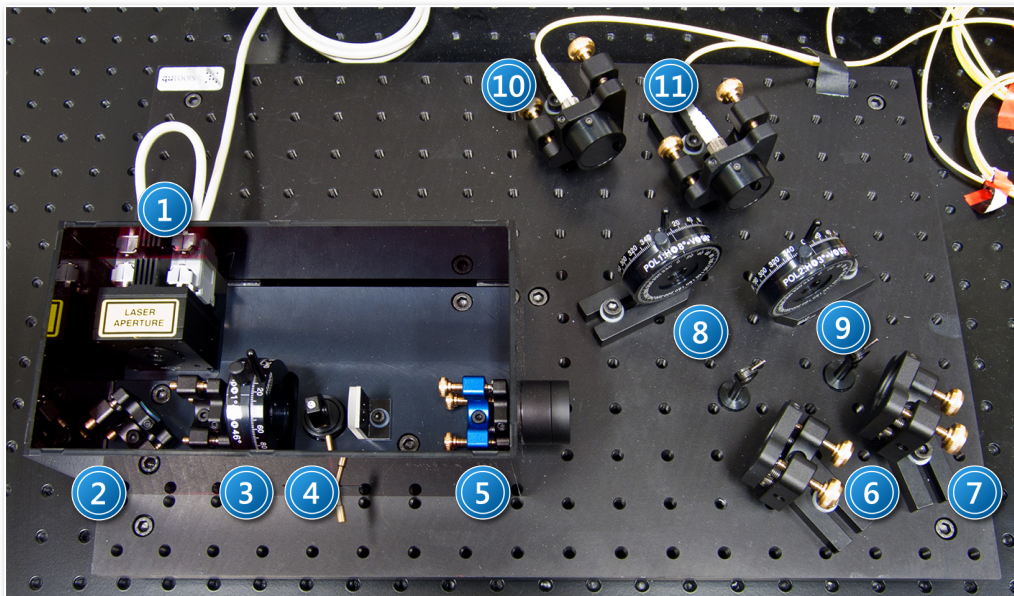


Zdjęcie 1. Kompletne stanowisko do badania własności polaryzacyjnie splątanych par fotonów:
1 – układ do demonstracji jakości splątania; 2 – układ do badania interferencji dwufotonowej;
3 - urządzenie wielofunkcyjne: zasilacz – kontroler – detektor pojedynczych fotonów.

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. Wykonać pomiary liczby koincydencji dla każdej kombinacji ustawień polaryzatorów tj.: HH, HV, VH, VV dla pierwszej bazy prostopadło – horyzontalnej według opisu w Tabeli 1.

Dokonywać odczytów liczby zliczeń koincydencji (z wyświetlacza detektora pojedynczych fotonów) kolejno dla ustawień polaryzatorów podanych w Tabeli 1 (przy kombinacji HV przestawić jeden z polaryzatorów na V).

Tabela 1. Tabela pomocnicza do obliczania wskaźnika splątania.

Ustawienia polaryzatorów	Liczba zliczeń koincydencji \bar{C}				
	θ_1	H	V	45°	-45°
θ_2					
H					
V					
45°					
-45°					

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

5. Uśrednione wartości z pięciokrotnych odczytów liczby zliczeń koincydencji dla ustawień polaryzatorów w bazie prostopadło – horyzontalnej wpisać w odpowiednie pola w Tabeli 1.
6. Obliczyć wskaźnik jakości splątania V w bazie prostopadło – horyzontalnej korzystając ze wzoru w równaniu (2).

$$V = \frac{\bar{C}_{H,H} + \bar{C}_{V,V} - \bar{C}_{H,V} - \bar{C}_{VH}}{\bar{C}_{H,H} + \bar{C}_{V,V} + \bar{C}_{H,V} + \bar{C}_{VH}} \quad (2)$$

7. Wykonać pomiary dla drugiej bazy z Tabeli 1 tj. dla bazy diagonalnej polaryzacji dokonując odpowiednich ustawień polaryzatorów.
 Ponownie notować liczby zliczeń z pięciu odczytów dla danego ustawienia polaryzatorów.
8. Wpisać do Tabeli 1 uśrednione wartości liczb zliczeń dla bazy diagonalnej.
9. Obliczyć wskaźnik jakości splątania w bazie diagonalnej korzystając ze wzoru w równaniu (3)

$$V = \frac{\bar{C}_{45,45} + \bar{C}_{-45,-45} - \bar{C}_{45,-45} - \bar{C}_{-45,45}}{\bar{C}_{45,45} + \bar{C}_{-45,-45} + \bar{C}_{45,-45} + \bar{C}_{-45,45}} \quad (3)$$

10. Porównać otrzymane wartości wskaźników jakości splątania dla obu baz polaryzacji z danymi z metryczki zestawu quED I umieszczonej 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.

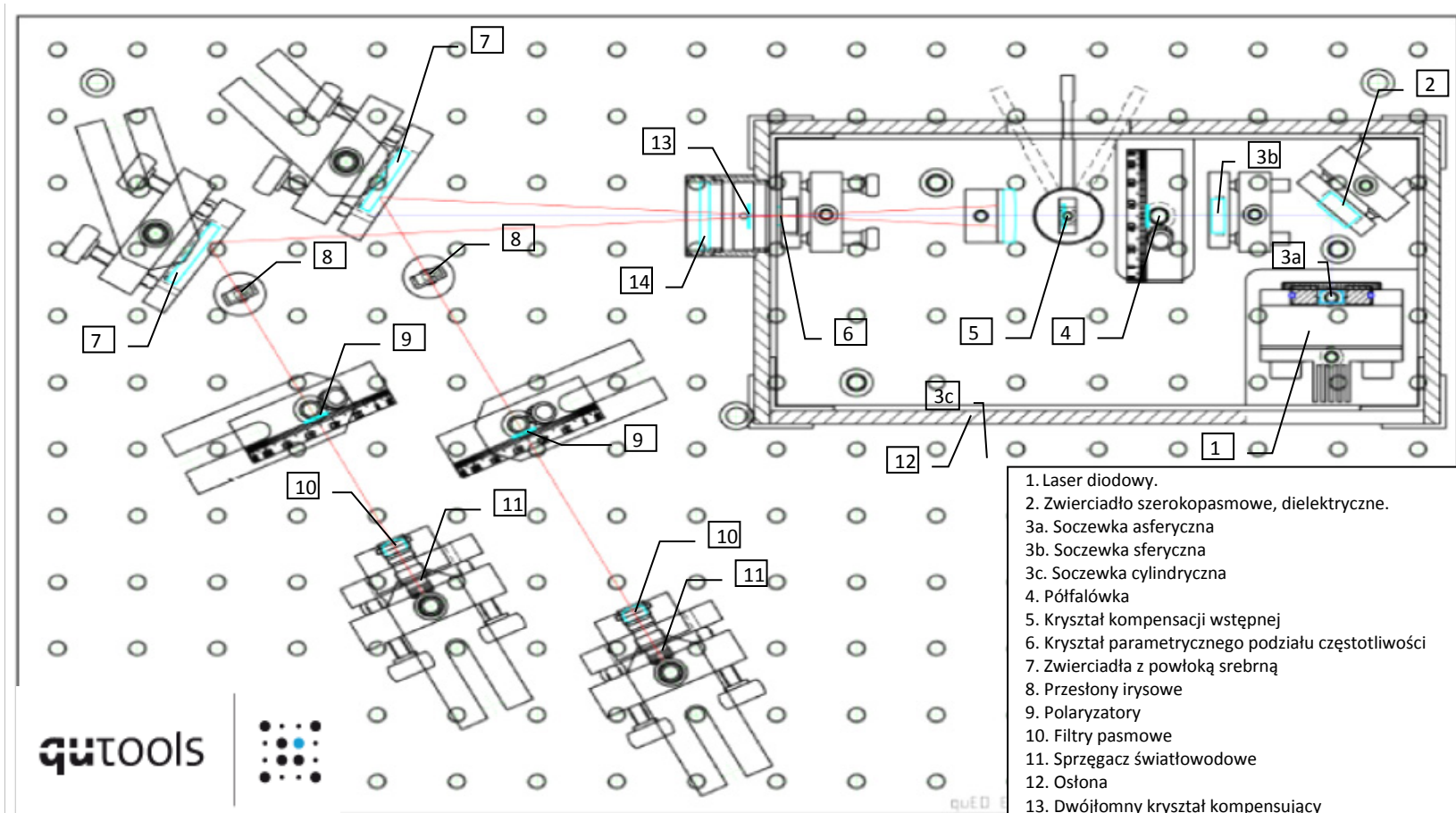
IV. Literatura.

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. 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. G. Johnson – “*A Shortcut Through Time: the Path to the Quantum Computer*”, Knopf, N.Y. 2003.
14. W. A. Shurcliff, S.S. Ballard – “*Polarized Light*”, Princeton 1964.
15. M. Born, E. Wolf – “*Principles of Optics*”, Cambridge University Press, Cambridge 1999.
16. O. Svelto – “*Principles of Lasers*”, Plenum, New York 1998.
17. W.S.C. Chang – “*Principles of Lasers and Optics*”, Cambridge University Press, 2005.
18. J.A. Buck – “*Fundamentals of Optical Fibres*”, NJ: Wiley – Interscience, Hoboken, 2004.
19. A. Peres – “*Quantum Theory: Concepts and Methods*”, Kluwer Academic Publishers, 1993.
20. W. Demtröder – “*Atoms, Molecules and Photons: an Introduction to Atomic -, Molecular – and Quantum – Physics*”, Springer, Berlin 2006.
21. D. Dehlinger, M.W. Mitchell – “*Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory*”, Am. J. Phys. **70**, 989 – 901 (2002).
22. S. Nakamura, G. Fasol – “*The blue laser diode*”, Springer, Heidelberg 1997.
23. H. Paul – “*Introduction Quantum Optics from Light Quanta to Teleportation*”, Cambridge University Press, Cambridge 2004.
24. M. Le Bellac – „*A Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation*”, Cambridge University Press, Cambridge 2006.

Dodatek A

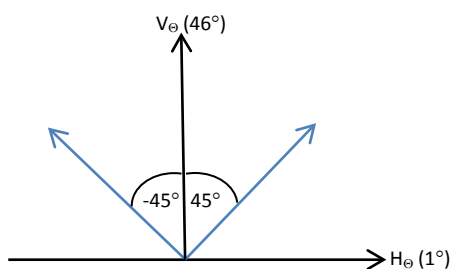
Rysunek 3. Schemat układu doświadczalnego do badania polaryzacyjnie splątanych par fotonów



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.

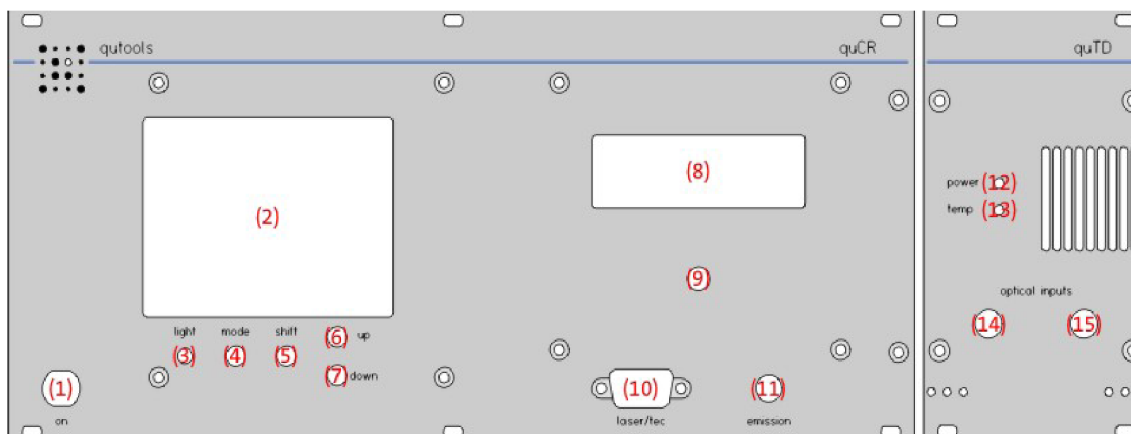


*Rysunek 4. Kierunek wiązki pompującej zapewniający równą ilość fotonów o polaryzacji H i V (kąt $23,5^\circ$ ustawiony na półfalówce 3 na *Zdjęciu 2*).*

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



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 μW after pump-beam protective enclosure) peak wavelength: 401.5 nm operating temperature: 25 °C
-------------------------	---

... 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