

# Kvantové tečky a jejich využití

Truhlář Michal

Masarykova Univerzita  
Brno 2005

**Obsah:**

1. Co je to nanotechnologie	- 2 -
1. 1. Historické pozadí	- 2 -
1. 2. Definice nanotechnologií	- 2 -
1. 2. 1. První kritérium	- 2 -
1. 2. 2. Druhé kritérium	- 2 -
1. 2. 3. Třetí kritérium	- 2 -
2. Kvantové tečky	- 3 -
2. 1. Tvorba kvantových teček	- 3 -
2. 2. Co je kvantová tečka	- 3 -
2. 3. Vlastnosti kvantových teček	- 3 -
3. Aplikace a možné využití kvantových teček	- 4 -
3. 1. Optické aplikace	- 4 -
3. 1. 1. Jednofotonová, světlo emitující dioda a LASER	- 4 -
3. 1. 2. Jednofotonové detektory	- 4 -
3. 2. Využití v telekomunikacích	- 5 -
3. 3. Kvantový počítač	- 5 -
4. Závěr	- 6 -
5. Přílohy	- 7 -
6. Literatura	- 9 -

## 1. Co je to nanotechnologie

### 1. 1. Historické pozadí

V roce 1959 přednesl americký fyzik Richard Feynman na výročním zasedání American Physical Society v California Institute of Technology (Caltech) přednášku s názvem „There’s Always Room at the Bottom“ (*Tam dole je stále místo*), ve které předpověděl možnost vytváření materiálů a mechanismů na úrovni atomů a molekul. Položil v ní základy nového oboru fyziky, *nanotechnologie*.

Během přednášky Feynman nastínil na tehdejší dobu poněkud odvážné vize o tom, jaké možnosti nabízí mikrosvět atomů. Vývoj v dalších letech ukázal, že se Feynman nemýlil. V osmdesátých letech byly takové přístroje vynalezeny. Tyto přístroje, jako např. rastrovací *tunelový mikroskop (STM)*, *mikroskop využívající atomových sil (AFM)*, *optický rastrovací sondový mikroskop blízkého pole (NSOM)*, umožňují zkoumání nanostruktur. Další vývoj v nanotechnologiích podporovala zejména rychle se vyvíjející mikroelektronika založená na polovodičových strukturách, ale i jiné obory.

### 1. 2. Definice nanotechnologií

Termínem nanotechnologie lze dnes označit takový postup, který splňuje tři základní kritéria.

#### 1. 2. 1. První kritérium

Nanotechnologie je výzkumná činnost nebo technologický vývoj provozovaný na atomární, molekulární nebo makromolekulární úrovni v rozsahu přibližně 1 až 100 nanometrů.

V některých případech rozumíme nanotechnologiemi i činnost, která za určitých okolností manipuluje i s útvary o velikosti až několika mikrometrů.

#### 1. 2. 2. Druhé kritérium

Při těchto činnostech se musí vytvářet nebo používat struktury, zařízení nebo systémy, které mají nové vlastnosti a funkce vyplývající mimo jiné právě z jejich malé velikosti. Tedy musíme přijmout skutečnost, že na nanoúrovni se částice a vytvářené struktury chovají jinak než v makrosvětě. Je to dáno mimo jiné tím, že hlavními faktory, které ovlivňují chování nanočástic, jsou atomární síly, vlastnosti chemických vazeb a především kvantové jevy.

#### 1. 2. 3. Třetí kritérium

Za nanotechnologický postup je možné označit pouze takovou metodiku, která umožňuje z nanočástic vytvářet funkční systémy a celky. Tyto celky také musíme být schopni objektivními postupy jejich funkčnost nastavovat, kontrolovat a regulovat, tzn., musíme být schopni s nimi manipulovat.

Toto kritérium je jednoznačně tím hlediskem, které rozhoduje definitivně o tom, zdali můžeme v konkrétním případě hovořit o nanotechnologickém postupu, nebo nikoli.

## 2. Kvantové tečky

### 2. 1. Tvorba kvantových teček

V 90. letech dvacátého století se podařilo vyvinout metodu na tvorbu kvantových teček na povrchu substrátu. Základ této metody spočívá ve vhodném poměru rozdílných mřížkových konstant jednotlivých materiálů. Vrstvy se nejdřív nanášejí se značným mechanickým napětím. Toto napětí je způsobeno deformací krystalové mřížky v místech, kde se dva materiály spojují (obr. 1. a obr. 2.). Toto napětí je materiál schopný absorbovat jen v několika málo monovrstvách. Po dosažení kritické tloušťky se nanášené atomy začnou samovolně shromažďovat ve shlucích na povrchu vzorku, čímž se minimalizuje mechanické napětí<sup>1</sup> (obr. 3.). Tato metoda růstu kvantových teček je také známa jako *Stranskiho-Krastanovův růst*. Směr mechanického napětí je schématicky znázorněn na obr. 5.

Jednotlivé kvantové tečky mohou být také vyráběny metodou, která se nazývá *elektron beam lithography*. Tato metoda spočívá ve vyleptání šablony na polovodičový vzorek a následným vyražením do vzorku. Ve velkém množství mohou být kvantové tečky vyráběny *koloidní syntézou*. Všechny tři výše uvedené metody mají své výhody i nevýhody

### 2. 2. Co je kvantová tečka

Jak již bylo řečeno v předchozím odstavci, kvantovými tečkami nazveme shluky atomů na povrchu vzorku. Jsou to objekty o průměru kolem 30 nm a výšce 8 nm. Tyto útvary mají tendenci vytvářet na povrchu pravidelné uspořádání (obr. 6. a obr. 7.), a samy taky tvoří pravidelné krystalické fasety (obr. 8. a-f).

Kvantová tečka je tedy ohraničená vodivá oblast velmi malých rozměrů s velkým zakázaným pásmem energií (*GAP*).

### 2. 3. Vlastnosti kvantových teček

Kvantové tečky mají také diskrétní rozdělení energetických hladin, obdobně jako třeba atom, proto jsou někdy nazývány *umělými atomy (artificial atoms)*. Energetické hladiny můžou být kontrolovány změnami ve tvaru a velikosti kvantových teček. Tato energie je ale ve srovnání s vodivostním pásmem okolního vzorku (polovodiče) nižší, a tak jsou kvantové tečky schopny lépe vázat elektrony. Fungují tedy jako past na elektrony. Elektrony, které jsou obsaženy v tečce, vykazují kvantové vlastnosti. Množství elektronů, které je schopna tečka pojmout, je omezen, hovoříme tedy o *kapacitě kvantových teček*. Tato kapacita také přímo souvisí s rozměry tečky.

Důležitou vlastností je také optická schopnost teček se zabarvovat. Tato schopnost je opět vázána na velikost kvantové tečky. Velké tečky se zabarvují do červené části spektra a naopak malé se zabarvují do modré části spektra. Tato schopnost je opět spojena s rozložením energetických vrstev v tečce a její schopnosti pohlcovat nejenom elektrony, ale i fotony. Velikost opět omezuje množství energie, kterou je schopna tečka absorbovat, a z toho plyne i zmiňované zabarvení.

<sup>1</sup> Napětí může být také minimalizováno vynecháním některých atomů v různých vrstvách nanášeného materiálu (viz. spodní díl obr. 4.).

### 3. Aplikace a možné využití kvantových teček

#### 3. 1. Optické aplikace

##### 3. 1. 1. Jednofotonová, světlo emitující dioda a LASER

Princip jednofotonové, světlo emitující diody spočívá v tom, že na substrátu odstíníme kvantové tečky neprůhlednou vrstvou. Ponecháme jen jednu neodstíněnou tečku. Když se dostane do neobsazené energetické hladiny nový elektron z vodivostního pásu, nebo když se podaří této kvantové tečce dodat energii, může tento elektron excitovat. Pokud následně relaxuje zpět na původní hladinu, uvolní při tomto přechodu foton. Energie fotonu se pak rovná rozdílu hladin, mezi kterými elektron excitoval (Schéma tohoto emitoru je na obr. 9.). Tento mechanismus je obdobný jako mechanismus u rekombinace ionizovaných plynů.

Experimenty s jednofotonovou diodou probíhají již od roku 2001. Během těchto prvních měření se podařilo proměřit emisní spektra v závislosti na procházejícím proudu. Za teploty 5 K a proudu menším než 20 nA, byla naměřena emise monochromatického záření s energií 1,3942 eV. Tato energie odpovídala monochromatickému světlu o vlnové délce 889 nm.

Další měření ukázalo, že kvantové tečky pracují dobře při velkém rozsahu teplot, a tak může být upravovaná vlnová délka emitovaného světla. Je tedy možné vyrobit diodu, která je upravená na vyzařování modrého, zeleného, či bílého světla.

Tyto polovodičové kvantové tečky poskytují i dostatek emitovaného světla pro tvorbu takových optických zařízení jako jsou nastavitelné polovodičové lasery či optické zesilovače.

##### 3. 1. 2. Jednofotonové detektory

Detektory, založené na kvantových tečkách, se začaly objevovat od roku 1999. Detektory jsou vyráběné převážně z InAs teček umístěných na vzorku z GaAs. Tyto detektory jsou citlivé na světlo dopadající pod jakýmkoliv úhlem, protože snímají ve všech třech rozměrech. Jsou tedy založené na principu tranzistoru, v jehož struktuře je vodivostní pás velice těsně oddělen od vrstvy kvantových teček. Pokud je tato vzdálenost v řádu několika nanometrů, potom je odpor takto vytvořeného tranzistoru velice citlivý ke změnám obsazení energetických hladin elektrony v jednotlivých kvantových tečkách (znázorněn na obr. 10.). Toto umožňuje detekovat záření, skládající se z jednotlivých fotonů. Energie takto zachycených fotonů ovlivňuje velikost, tvar a umístění kvantových teček. Tyto změny jsou měřitelné, a lze je převést na údaje ukazující vlastnosti procházejícího proudu.

Detektory založené na principu kvantových teček mají oproti klasickým detektorům několik výhod. Ať jsou to problémy spojené s hlučností, či schopnost pracovat na nižším provozním napětí (menším než 5 V). Registrace dopadu jednotlivých fotonů umožňuje navíc měření velmi slabých optických signálů, neboť odpadá nutný přídavný šum vzniklý v důsledku zesilování signálu. Tedy je možné poměrně dost zlepšit různé druhy zobrazovacích technik pro rentgenové záření, záření radioizotopů, a dalších druhů záření. Z toho vyplývají i následné možnosti využití v oblasti aplikací v lékařské diagnostice a v analytické chemii, či v mnoha jiných oblastech. Další výhodou je i větší robustnost, což je dělá odolnější proti mechanickému poškození.

### 3. 2. Další využití

Dostupnost polovodičového laseru založeného na kvantových tečkách umožňuje tento jev dobře využít i v telekomunikacích. Tyto lasery jsou nezbytné pro optické vláknové komunikace, optické paměti (tím se rozumí velkokapacitní počítačové paměti i CD přehrávače a vypalovače), laserové tiskárny, laserová ukazovátka, v medicíně pro diagnostiku a invazní i neinvazní terapie všeho druhu, dále pro nejrozmanitější vojenské a bezpečnostní využití – "inteligentní" zbraňové systémy, dálkoměry a zaměřovače i infračervené zabezpečovací systémy. Je to dáno zvláště tím, že lasery, které mají základ postaven na kvantových tečkách, dávají do budoucna možnost vyrábět ultrarychlé, plnooptické uzly a logická hradla, které mohou operovat rychleji než 15 terabitů za sekundu. Další rozvoj všech uvedených aplikací, zároveň se zlepšováním laserových parametrů, lze očekávat v následujících letech. Je to především možnost realizace laserů v ultrafialové oblasti (další zvýšení hustoty optického záznamu informace) anebo ve vzdálenější oblasti infračervené. Bohužel v nejbližších letech se komerčního využití v telekomunikacích nedočkáme. To je způsobeno především nedořešením technických problémů spojených s kompatibilitou s existujícími technologiemi.

### 3. 3. Kvantový počítač

Jedná se o teoretickou konstrukci, která se objevila na počátku 80. let a jejíž praktická realizace naráží na problémy tak obtížné, že v nejbližší době není jeho konstrukce ještě myslitelná. Ale již v roce 1994 se podařilo Peteru Shorovi vymyslet kvantový algoritmus pro faktorizaci prvočísel, který má polynomiální časovou složitost. Od roku 1999 také probíhají intenzivní pokusy v mnoha laboratořích po celém světě. Za zmínění stojí např. QUIC (Quantum Information Center), dále LANL (Los Alamos National Laboratory), MIT (Massachusetts Institute of Technology) a CALTECH (California Technology). Dále pak v létě roku 2000 se vědcům IBM, ve spolupráci s týmem kalifornské Stanfordovy univerzity, podařilo sestavit kvantový počítač složený z pěti částic (qbitů, viz dále).

Základem kvantového počítače by měla být schopnost manipulovat se spinem elektronů. Tedy využití jednoho ze základních parametrů elektronu. V roce 2001, Albert Chány, profesor na univerzitě v Pardubích, společně se svými kolegy, propojili dvě kvantové tečky takovým způsobem, že mohou kontrolovat, kolik elektronů se nachází v jednotlivých tečkách a jaký mají tyto elektrony spin. Což je, jak je popsáno v předchozím odstavci, nejdůležitější informace pro konstrukci kvantového počítače. V nedávné době byla také skupinou na univerzitě ve Virginii objevena technologie elastického spojení dvou kvantových teček. Toto spojení umožňuje umístit elektron do kvantových teček tak, aby bylo možné přepínáním upravovat umístění tohoto elektronu. Což umožňuje definovat dva logické výroky, 1 a 0 (obr. 11.), na kterých jsou založeny dnešní počítače. Tedy definovat pojem bitu. Oproti klasickému bitu, který může nabývat pouze 1 a 0, může kvantový bit (dále jen qubit) nabývat libovolné superpozice dvou základních ortogonálních stavů. Celý systém se tak v jednom okamžiku může nacházet ve  $2^n$  stavech. Soubor qubitů je pak nazýván kvantový registr. Ale i přes to, není možné aby qubit přenášel víc jak jeden bit informací.

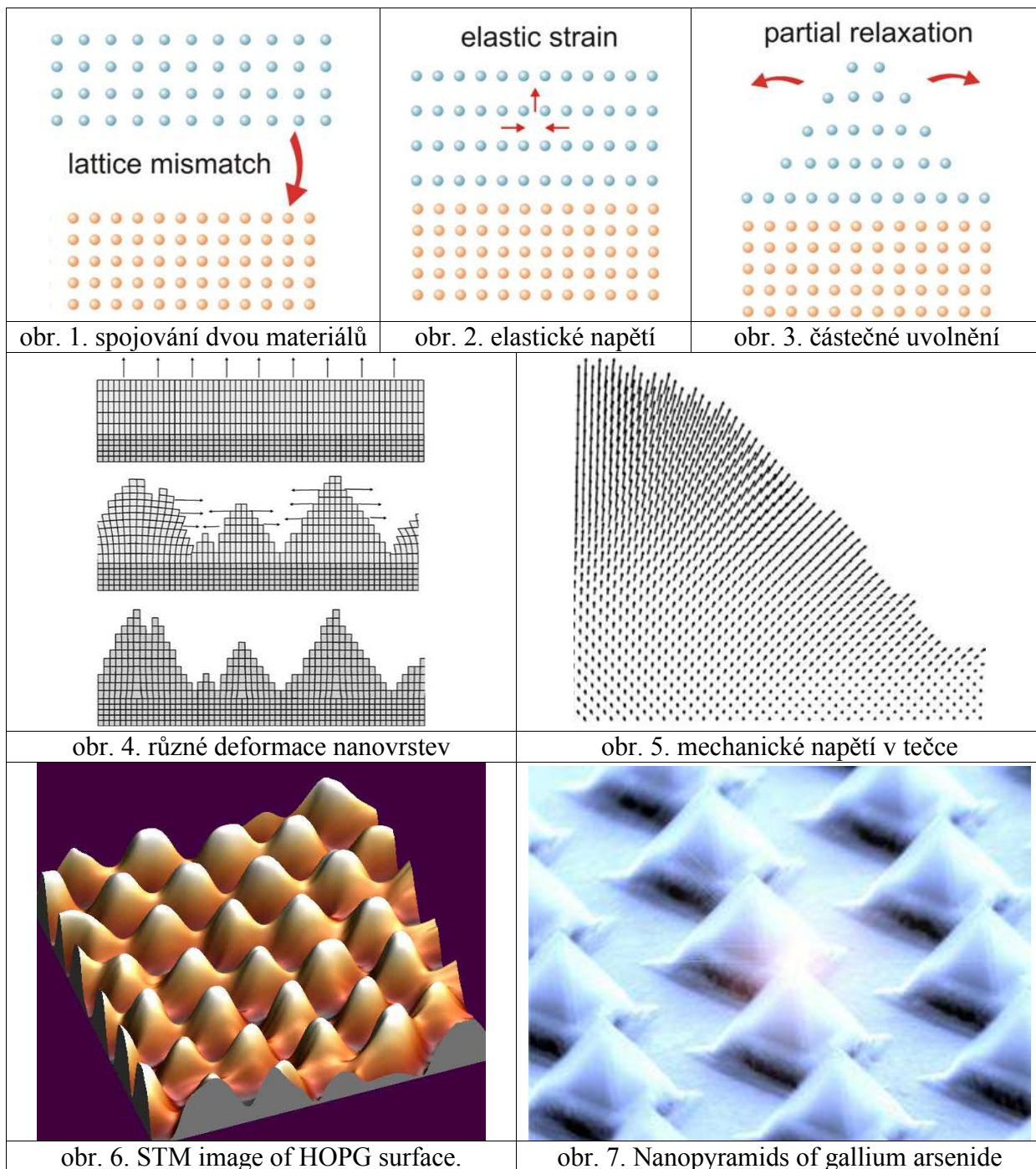
Kvantové počítače se díky superpozici stavů řadí do kategorie tzv. *nedeterministických strojů*. Nedeterministický stroj pracuje v principu vratně. Zatímco klasické počítání je obecně operace podléhající druhému zákonu termodynamiky a tudíž nevratná. Není úplně jasné, co všechno za důsledky může z této vlastnosti kvantových počítačů nakonec vyplynout.

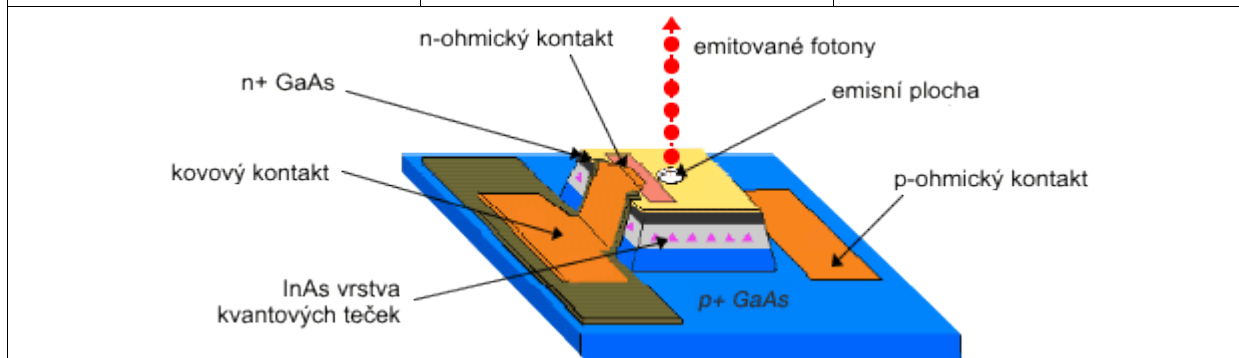
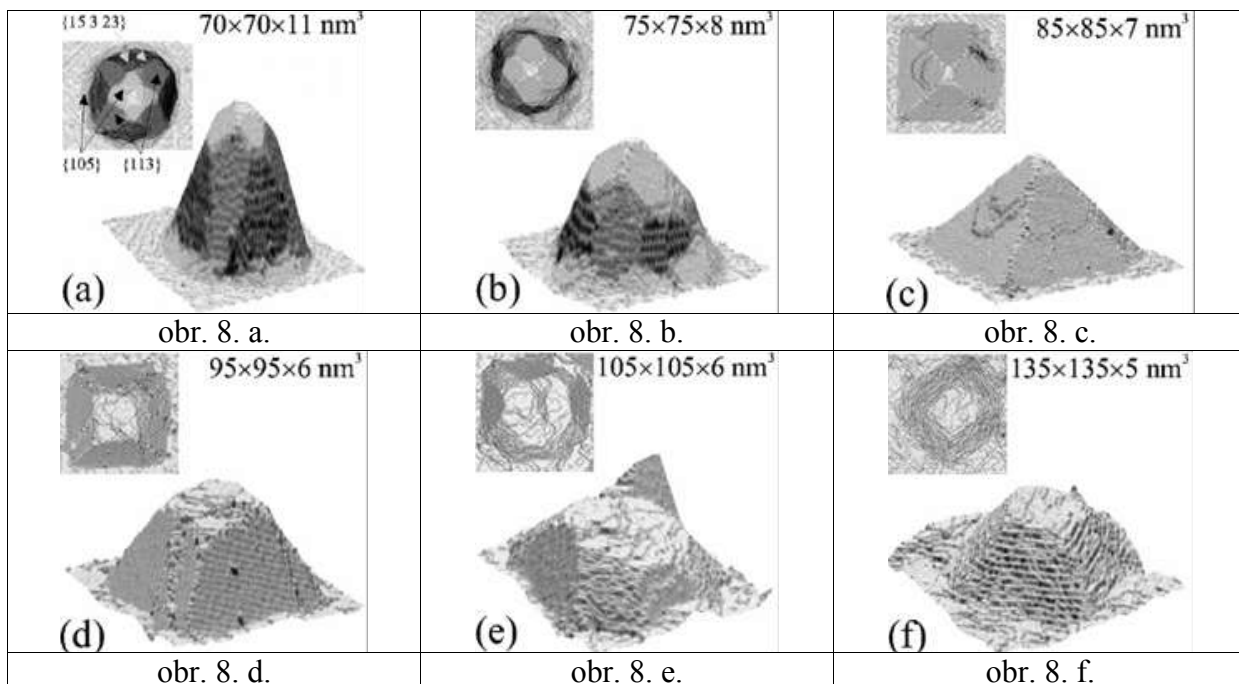
#### 4. Závěr

Největší rozmach nanotechnologií lze s největší pravděpodobností ještě očekávat. Současnou úroveň poznatků, postupů a technologií v oblasti nanotechnologií lze přirovnat k situaci v elektronice, výpočetní technice a telekomunikacích koncem čtyřicátých a na začátku padesátých let minulého století, krátce po vynálezu tranzistoru. Teprve začínáme rozumět podstatě zákonitostí, kterými se řídí fyzikální, chemické, biologické a jiné procesy v nanorozměrech.

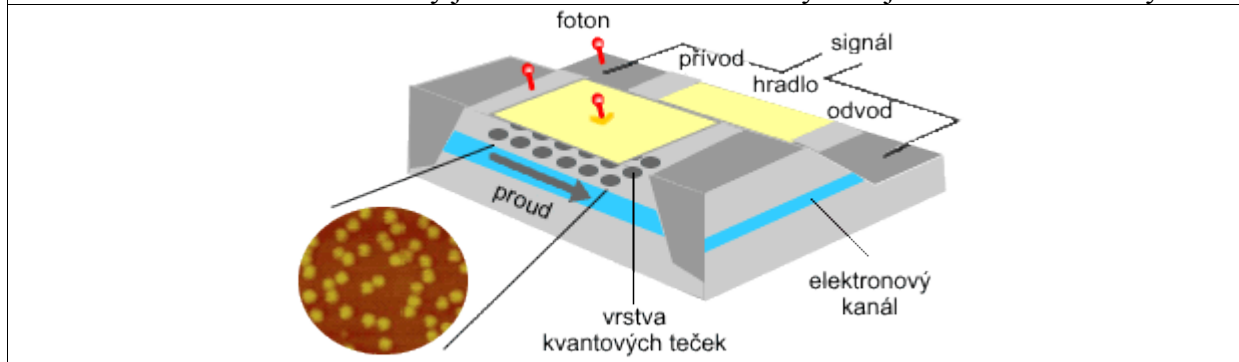
Stejně tak si musíme počkat na komerční využití kvantových teček. Cesta ke kvantovým počítačům bude také zřejmě ještě dlouhá. Není však vyloučen nějaký náhlý zvrat. Pokud se toho dosáhne, budou současné superpočítače proti počítačům budoucnosti dětskou hračkou. Uvidíme, zda se dočkáme např. kvantového notebooku nebo jen počítačů kategorii sálových počítačů.

## 5. Přílohy

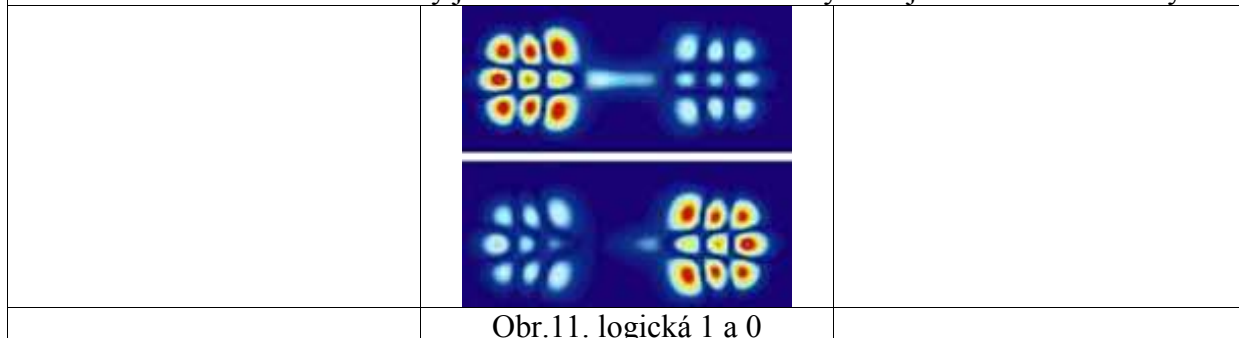




obr. 9. Znázornění struktury jednofotonového emitru využívajícího kvantové tečky.



Obr. 10. Znázornění struktury jednofotonového detektoru využívajícího kvantové tečky.



Obr.11. logická 1 a 0

## 6. Literatura

Arizona State University, Department of Physics and Astronomy

Budil Ivo, Klusot Petr: Návštěva v nanosvětě, (<http://www.rozhlas.cz/veda/portal/>)

Hulicius, E., Velický, B.: Heterostruktury, které slouží všem, Vesmír 80, 32, 2001/1

Kulhánek Petr: Kvantové počítače, (<http://www.aldebaran.cz/>)

Quantum computer, (<http://en.wikipedia.org/>)

Quantum dot, (<http://en.wikipedia.org/>)

Stanul, J., Holý, V., Bauer, G.: Structural properties of self-organized semiconductor nanostructures, Reviews of Modern Physics, volume 76, July 2004

The Cambridge Nanoscience Centre, (<http://www.nanoscience.cam.ac.uk/>)

Toshiba Research Europe Limited, (<http://www.toshiba-europe.com/research/crl/index.html>)

Žáček Martin: Kvantové tečky a jednofotonové součástky, (<http://www.aldebaran.cz/>)