

Optika CD přehrávače

Zdeněk Bochníček, Přírodovědecká fakulta MU v Brně

V roce 1977, právě 100 let po vynálezu fonografu T. A. Edisona, byl firmami Sony a Philips uveden na trh nový revoluční systém reprodukce zvuku – přehrávač kompaktních disků, zkráceně CD přehrávač. Byl to skutečný přelom spotřební audiotekniky, který odsoudil k postupnému zániku přímého následovníka Edisonova fonografu – gramofon. Skončila tak stoletá historie mechanického záznamu zvuku.

CD přehrávač přinesl do domácnosti běžného spotřebitele dvě převratné novinky – optické, bezkontaktní snímání a digitální způsob záznamu. První zaručila prakticky neomezený počet přehrávání bez zhoršení kvality a druhá do té doby nebývalou dokonalost reprodukce. Úplně novinky to však nebyly. V profesionální audiotekničce se po několik desetiletí používal optický záznam pro ozvučení filmu a od šedesátých let se objevuje i digitální záznam zvuku s použitím videomagnetofonů.

V tomto článku si všimneme principu uložení dat na kompaktním disku a optiky čtecí hlavičky. K výkladu budeme potřebovat základní znalosti o difrakci světla. Pro oživení si je připomeneme v prvních dvou odstavcích.

Difrakce světla

K difrakci světla dochází, šíří-li se světlo v nehomogenním prostředí. Nejlépe ji můžeme pozorovat tehdy, když vložíme do cesty světelné vlny překážku částečně omezující její vlnoplochu, například clonku s otvorem nebo nepropustný předmět. Na stínítku umístěném za překážkou pak můžeme sledovat difrakční obrazec – rozložení intenzity ve svazku v rovině stínítka, který, právě díky difrakci, neodpovídá geometrickému stínu předmětu. Světelný svazek modifikovaný difrakcí nese informaci o překážce, kterou můžeme částečně rekonstruovat analýzou difrakčního obrazce. Jen částečně proto, že na stínítku detekujeme pouze rozložení intenzity ve svazku, informace o fázi je nenávratně ztracena.

V případě nepropustné překážky vzniká nehomogenní rozložení intenzity ve svazku (difrakční obrazec) modulací amplitudy. Tam, kde překážka nepropouští světlo, je amplituda prošlé vlny těsně za překážkou nulová, zatímco v jiných místech si ponechává svoji původní hodnotu. Můžeme však vložit do cesty svazku objekt měnící fázi světelné vlny, například malý kousek tenké průhledné destičky s indexem lomu větším než jedna. Tento objekt se nazývá fázová destička. Světlo procházející destičkou se zpomalí a tedy opozdí oproti světlu jdoucímu mimo ni. Vzniklý fázový rozdíl v části světelného svazku způsobí nehomogenní rozložení intenzity ve svazku – difrakci. Z difrakčního obrazce opět můžeme rekonstruovat tvar fázové destičky.

Pokusy s difrakcí na nepropustné překážce i fázové destičce můžeme provést i v jiném uspořádání. Pokud umístíme clonku s otvorem nebo fázovou destičku na zrcadlo, bude světelný svazek navíc odražen a my můžeme pozorovat difrakci v odraženém světle.

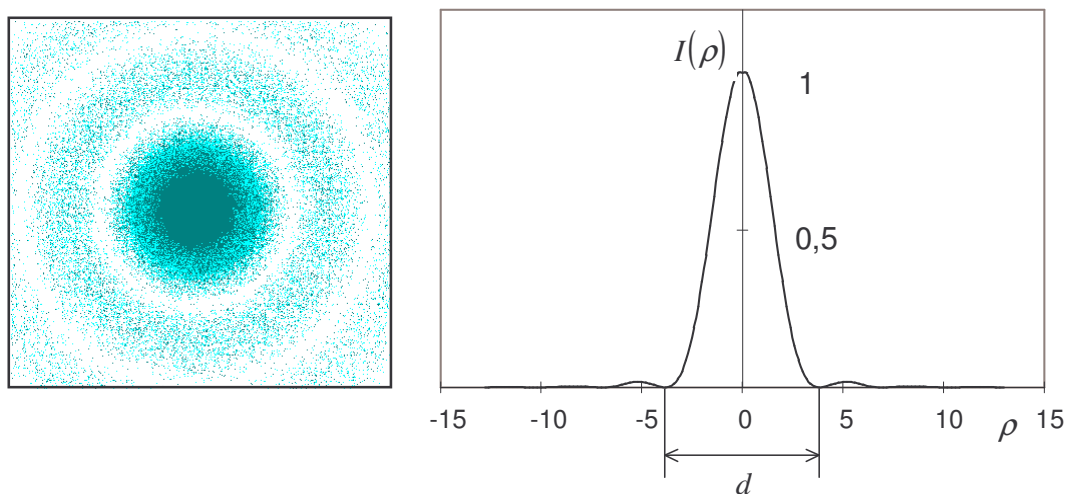
Zobrazení rovinné vlny spojnou optickou soustavou

Jak víme, zobrazení rovinné vlny do bodu v ohnisku je obecně neřešitelný problém. I kdybychom dokázali odstranit všechny zobrazovací vady související s disperzí světla a s tím, že kulová plocha spojně čočky zobrazuje pouze v paraxiálním přiblížení, stále zůstává jedna principiálně neodstranitelná vada zobrazení – difrakce na obrubě čočky. Při

dopadu rovinné monochromatické vlny na spojnu čočku s ohniskovou délkou f a průměrem D bude intenzita světla v ohniskové rovině určena Fraunhoferovou difrakcí

$$I(\rho) = \left[\frac{J_1 \left(\frac{\pi \cdot D \cdot \rho}{\lambda \cdot f} \right)}{\frac{\pi \cdot D \cdot \rho}{\lambda \cdot f}} \right]^2, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka světla. Difrakční obrazec je rotačně symetrický a funkce $I(\rho)$ popisuje radiální závislost intenzity (viz obr. 1). Symbol $J_1(x)$ označuje Besselovu funkci 1. řádu.



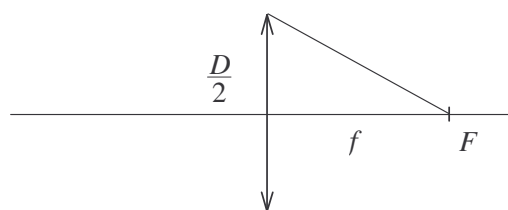
Obr. 1: Difrakční obrazec (vlevo) a radiální rozložení intenzity na stínítku (vpravo) při Fraunhoferově difrakci na kruhovém otvoru. Airyho disk.

Centrální maximum je obklopeno soustřednými kroužky, jejichž intenzita s rostoucím poloměrem rychle klesá. Hlavní maximum soustřeďuje přibližně 84 % intenzity světla dopadající na čočku a nazývá se Airyho disk. Můžeme tedy přibližně považovat Airyho disk za zobrazení rovinné monochromatické vlny spojnu čočkou. Jeho průměr d je dán vzdáleností prvních minim. Besselovy funkce nelze zapsat analyticky a bývají tabelovány. Pro naše účely je podstatné, že $J_1(x) = 0$ pro $x = 1,22 \cdot \pi$; $2,23 \cdot \pi$; $3,24\pi$;... První nulový bod tak určuje velikost Airyho disku. Z rovnice (1) snadno získáme výraz pro jeho průměr:

$$d = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{2 \cdot f}{D} = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{1}{N_A}. \quad (2)$$

Výraz
$$N_A = \frac{D}{2 \cdot f} \quad (3)$$

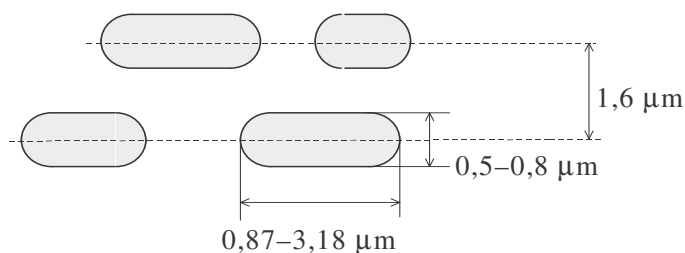
se nazývá číselná apertura a její význam je zřejmý z obr. 2.



Obr. 2: K pojmu číselná apertura.

Uložení záznamu na CD

Kompaktní disk je plastový kotouč průměru 150 mm, který je pro světlo neprůhledný. Ze spodní strany je stříbrně lesklý a rozkládá světlo do barev duhy. Z toho můžeme usoudit, že světlo se odráží na struktuře s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou. Skutečně. Kdybychom si prohlédli CD pod mikroskopem, uviděli bychom řadu oválných důlků přibližně shodné šířky, ale různých délek. Tvar a rozměry důlků jsou na obr. 3. Zatímco rozptyl šířek je dán tolerancemi výrobní technologie, délka důlku souvisí s daty uloženými na disk. Hloubka důlků je $0,1 \mu\text{m}$.



Obr. 3: Tvar a velikosti důlků.

Důlky jsou seřazeny do spirály odvíjející se od středu CD a tvoří tak záznamovou drážku, která je při čtení osvětlována laserovým svazkem. Díky reliéfu je podél drážky různá odrazivost, jejíž modulační je nositelem informace uložené na CD.

Možná nás překvapí, že celý reliéf je homogenně pokoven tenkou hliníkovou vrstvou. Očekávali bychom spíše, že dna důlků budou černá, aby byla odrazivost povrchu v různých místech různá. Modulační odrazivosti je však dosaženo jiným způsobem – destruktivní interferencí odraženého světla.

Modulace odrazivosti destruktivní interferencí

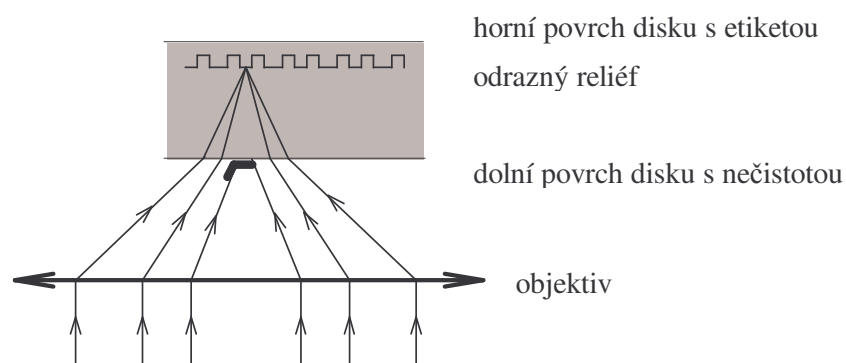
CD přehrávač využívá infračerveného laseru s vlnovou délkou $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$. Objektiv čtecí hlavičky má číselnou aperturu rovnu $N_A = 0,45$. Dosazením do vztahu (2) dostaneme pro poloměr Airyho disku $d = 2,1 \mu\text{m}$. Pokud tedy světelná stopa právě dopadá na důlek, přibližně polovina svazku se odráží na dně důlku a druhá polovina na okolním rozhraní; takto jsou rozměry důlků určeny vlnovou délkou použitého světla. Hloubka důlku je volena tak, že obě části odraženého svazku spolu destruktivně interferují. Výsledkem je snížení intenzity odraženého světla – modulační světelného svazku. Aby nastala destruktivní interference je třeba zajistit, aby dráhový rozdíl Δ mezi oběma interferujícími svazky byl roven polovině vlnové délky, tedy

$$\Delta = \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot h \cdot n \Rightarrow h = \frac{\lambda}{4 \cdot n}, \quad (4)$$

kde n – index lomu materiálu disku, $n \cong 1,5$. Po dosažení získáme optimální hodnotu hloubky důlku $h \cong 0,13 \lambda n$.

Vidíme, že skutečný důlek má menší hloubku ($0,1 \mu\text{m}$). Důvod je fyzikální a zmíníme se o něm později. Přesto, že hloubka důlku nevyhovuje přesně podmínce destruktivní interference, dojde k snížení intenzity odraženého světla v místě důlku asi o 60 %.

Odrážná vrstva je umístěna těsně pod horním povrchem CD opatřeném etiketou. Laserový svazek ji ozařuje zespodu, prakticky přes celou tloušťku disku. Důvod je prostý. I když je svazek zaostřen do stopy velikosti jednotky μm^2 , je plocha, kterou vytíná na povrchu disku řádu jednotky mm^2 , tedy 10^6 krát větší (viz obr. 4). Proto malé poškození či znečištění povrchu disku neovlivní významně celkovou intenzitu odraženého světla a disk je překvapivě odolný proti poškrábání nebo ušpinění. Tento efekt je známý i z jiných příkladů: hrubá nečistota na čočce objektivu fotoaparátu se na film nezobrazí, jen sníží intenzitu úměrně vlastní velikosti a zvýší rozptyl svazku (sníží kontrast snímku).



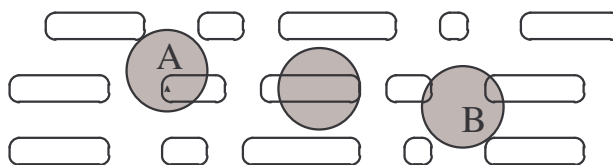
Obr. 4: Čtení záznamu přes celou tloušťku CD.

Sledování drážky

Nahrazení gramofonové jehly laserovým svazkem přineslo nový vážný problém. Zatímco jehla, vlečena v drážce, sama pasivně sleduje záznamovou stopu, u CD chybí přímé mechanické vedení svazku. Přitom jsou nároky na přesnost umístění světelné stopy na drážce velmi vysoké – zlomky mikrometru. Je zřejmé, že nelze dosáhnout požadované přesnosti prostou synchronizací rychlosti otáčení disku a radiálního posuvu čtecí hlavičky. Není možné se submikrometrovou přesností sjednotit osu rotace disku se středem záznamové spirály, zajistit upevnění disku v přehrávači a eliminovat teplotní roztažnost. Proto bylo nutné vyvinout systém aktivního sledování drážky tzv. autotracking.

Třísvazková metoda

Nejjednodušší způsob, jak tento problém vyřešit, je použít tři světelných svazků ke sledování drážky namísto jednoho (viz obr. 5). Dva pomocné svazky A a B jsou umístěné po stranách hlavního čtecího svazku a mírně vysunuté od podélné osy drážky. Systém porovnává střední hodnotu intenzit I_A a I_B odraženého světla v obou pomocných svazcích. Tato intenzita je tím nižší, čím více svazek zasahuje do drážky. Pokud například $I_A < I_B$, pak je hlavička vysunuta dolů (dle uspořádání na obr. 5) a je třeba provést příslušnou korekci její polohy.



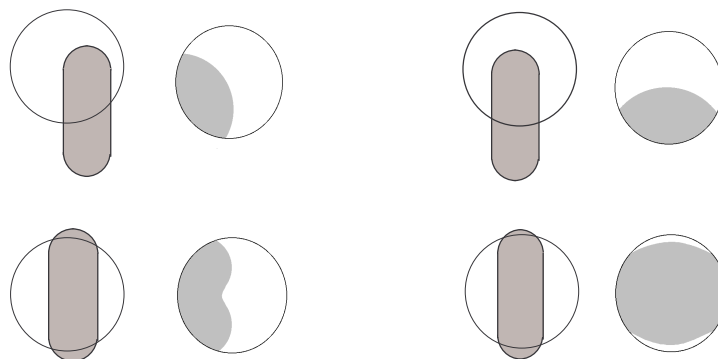
Obr. 5: Třísvazková metoda.

Tři svazky jsou získány z jediného laserového zdroje důmyslným způsobem. Před dopadem na disk světlo prochází difrakční mřížkou s dostatečnou hustotou vrypů tak, aby vznikla úzká difrakční maxima. Hlavní maximum a dvě pobočná maxima prvního řádu jsou pak použita pro třísvazkovou metodu.

Jednosvazková metoda

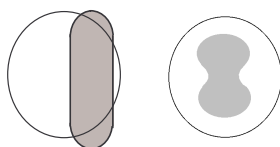
Používá se i jiný fyzikálně zajímavější systém, který nevyžaduje pomocné svazky. Vzájemnou polohu světelné stopy a drážky přehrávač identifikuje analýzou odraženého svazku.

Fyzikálním základem jednosvazkové metody je difrakce světla. Důlek v reliéfu CD pracuje jako fázová destička na odraz. Skutečně. Vlna odražená ze dna důlku je fázově opožděna vzhledem k vlně odražené na okolním povrchu. Odražený (a difraktovaný) svazek tedy nese informaci o vzájemné poloze světelné stopy a důlku, která je potřebná pro korekce polohy hlavičky při sledování drážky. Na obr. 6 vidíme difrakční obrazce pro různé polohy důlku vůči světelné stopě. Symetrie difrakčního obrazce vypovídá o správném nastavení světelné stopy na drážce. Prochází-li důlek středem světelné stopy, je difrakční obrazec symetrický vzhledem ke svislé ose.



Obr. 6: Rozložení intenzity v odraženém svazku (pravý obrázek) pro různé vzájemné polohy světelné stopy a důlku (levý obrázek). Hloubka důlku je větší než čtvrtina vlnové délky světla.

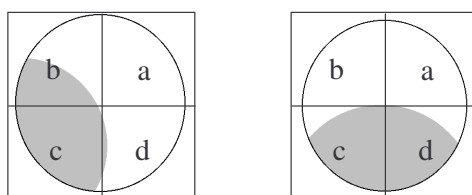
Pro difrakci je podstatná nejen vzájemná poloha světelné stopy a důlku, ale i poměr vlnové délky světla a hloubky důlku. Obr. 6 platí pro $\frac{\lambda}{4 \cdot n} = 1,3 \cdot h$, což je právě splněno u CD přehrávače. Zcela odlišný bude výsledek difrakce, pokud by hloubka důlku byla rovna přesně čtvrtině vlnové délky (uvnitř CD). Příklad je uveden na obr. 7. Vidíme, že rozložení intenzity postrádá požadovanou asymetrii. Proto je skutečná hloubka důlku menší než by odpovídalo minimu destruktivní interference (viz dříve).



Obr. 7: Rozložení intenzity v odraženém svazku pro různé vzájemné polohy světelné stopy a důlku. Hloubka důlku je rovna čtvrtině vlnové délky světla.

Abychom byli s to analyzovat difrakční obrazec, musíme použít plošný detektor. Ve skutečnosti nemusíme snímat difrakční obrazec nijak podrobně, stačí jen rozlišit symetrii difrakce vzhledem k ose rovnoběžné se směrem pohybu důlku. K tomu plně postačí čtyřdílný detektor jako na obr. 8. Detektor měří intenzitu dopadajícího světla nezávisle ze čtyř míst I_a , I_b , I_c a I_d a z těchto hodnot počítá veličinu:

$$I_1 = (I_a + I_d) - (I_b + I_c).$$



Obr. 8: Čtyřdílný plošný detektor

Je-li $I_1 = 0$, má difrakční obrazec požadovanou symetrii, což znamená, že čtecí hlavička je ve správné poloze nad záznamovou drážkou. Není-li rovnost splněna, je nutná korekce polohy hlavičky, přitom znaménko veličiny I_1 udává směr potřebné korekce.

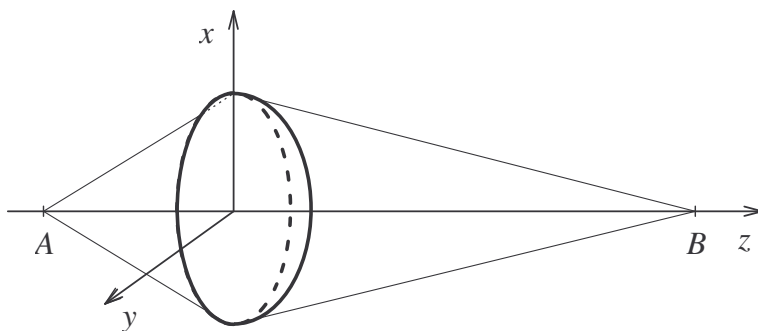
Automatické ostření

Systém autotracking zajistí požadovanou polohu hlavičky v rovině disku. Pro správné zaostření stopy je však nutné dodržet i určitou vzdálenost hlavičky od odrazného reliéfu. Povolenu toleranci této vzdálenosti popisuje hloubka ostrosti H objektivu (spojné čočky), která je dána vztahem

$$H = \pm \frac{2 \cdot f^2 \cdot \lambda}{D^2} = \pm \frac{\lambda}{2 \cdot N_A^2}. \quad (5)$$

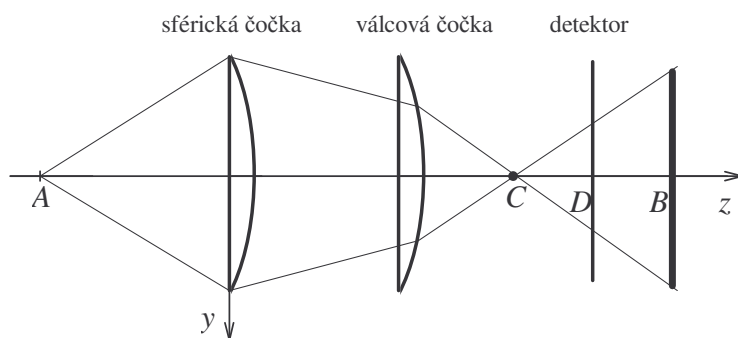
Dosadíme-li dříve uvedené hodnoty, dostaneme $H = \pm 1,9 \mu\text{m}$.

S touto přesností je tedy nutné dostavovat hlavičku ve vertikálním směru. Při otáčení CD přitom může dojít k oscilacím jeho povrchu i o 0,5 mm, nejčastěji proto, že disk je prohnutý.

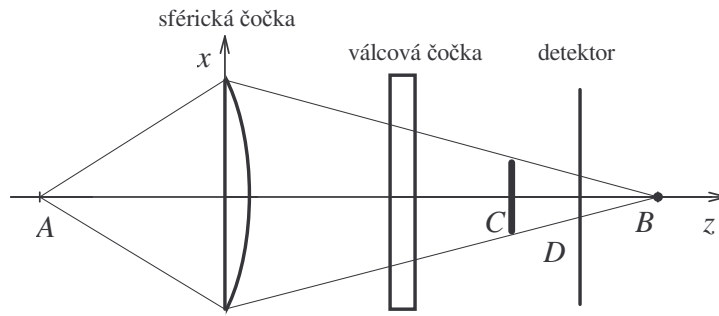


Obr. 9: Definice soustavy souřadnic

Bylo vyvinuto několik systémů automatického ostření. Zde si vyložíme princip využívající válcové čočky. Uvažujme spojnou soustavu, která zobrazí bod A na optické ose do bodu B. Pro přehlednost výkladu zavedeme soustavu souřadnic tak, že optická osa má směr z , svislá osa je x a osa y je vodorovná (obr. 9). Nyní vložíme mezi spojku a obraz B válcovou čočku tak, že osa válce je rovnoběžná se souřadnicovou osou x . Po díváme-li na tuto zobrazovací soustavu ve směru osy x , válcová čočka vypadá jako běžná sférická spojná čočka. Její přítomnost zvětší optickou mohutnost celé soustavy a bod A se nyní zobrazí do roviny procházející bodem C (obr. 10). Avšak při pohledu podél osy y je válcová čočka pouze planoparalelní destičkou která směr chodu paprsků nezmění a zachová se tedy původní poloha obrazu (bod B na obr. 11). Jak tedy vypadá průřez světelného svazku v prostoru? Obruba sférické čočky vymezuje kruhový průřez svazku, takže bez přítomnosti válcové čočky by všechny paprsky vyplnily kužel s vrcholem v bodě B. Válcová čočka kužel v bodě C zúží, takže obrazem bodu A je zde úsečka rovnoběžná s osou x . Naopak v rovině procházející bodem B je kužel zúžen díky sférické čočce, obrazem je úsečka rovnoběžná s osou y . Mezi body C a B průřez svazku spojitě přechází z úsečky C na úsečku B. V určitém místě musí být průřez svazku přibližně kruhový. Toto místo označíme D a tam umístíme plošný detektor.



Obr. 10: Zobrazení bodu sférickou a válcovou čočkou. Průmět do roviny yz .

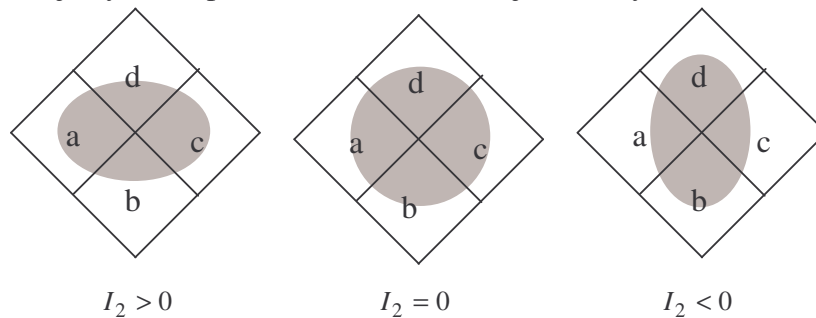


Obr. 11: Zobrazení bodu sférickou a válcovou čočkou. Průmět do roviny xz .

Pokud posuneme bod A např. doleva, posunou se stejným směrem i obrazy v B a C. Detektor v bodě D se nehýbe a tedy v jeho rovině se průřez svazku mění z původně kruhového na eliptický s hlavní osou rovnoběžnou s y . Posuneme-li bod doprava, svazek se v bodě D protáhne podél osy x . Plošný detektor v bodě D musí být schopen sledovat deformace průřezu svazku. Lze pro to použít stejný čtyřdílný čtvercový detektor, který byl popsán v minulém odstavci. Umístíme-li jej tak, že souřadné osy x a y jsou rovnoběžné s úhlopříčkami čtverce, pak deformaci průřezu svazku vystihuje veličina

$$I_2 = (I_a + I_c) - (I_b + I_d).$$

Je-li $I_2 = 0$, má svazek kruhový průřez a předmět je ve správné poloze; je-li $I_2 \neq 0$, bod A je vysunut, přičemž znaménko určuje směr vysunutí.



Obr. 12: Asymetrie stopy na čtyřdílném detektoru určuje zaostření na odrazném reliéfu CD. Prostřední obrázek odpovídá správnému zaostření, krajní obrázky signalizují rozostření jedním či druhým směrem.

U CD přehrávače je předmětem světelná stopa na drážce. Změnou vzdálenosti čtecí hlavičky od disku se mění poloha předmětu (bodu A) což vede k popsané deformaci průřezu svazku v místě detektoru (obr. 12). Takto systém získá informaci o vzdálenosti hlavičky od disku a může provést potřebné korekce.

Optika čtecí hlavičky

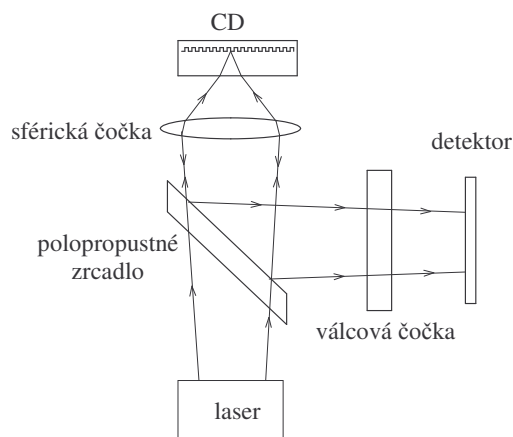
Principiální schéma čtecí hlavičky je na obr. 13. Světlo z infračerveného laseru prochází polopropustným zrcadlem a spojnou čočkou je zaostřeno na odrazný reliéf uvnitř CD. Po odrazu je svazek zrcadlem odkloněn, láme se válcovou čočkou a dopadá na čtyřdílný detektor. Čtyři hodnoty intenzit z detektorů I_a až I_d jsou zpracovány následujícím způsobem:

$I_0 = I_a + I_b + I_c + I_d$ Celková intenzita dopadající na detektor, modulovaný signál nesoucí informaci o čtených datech.

$I_1 = (I_a + I_d) - (I_b + I_c)$ Korekce pro autotracking.

$I_2 = (I_a + I_c) - (I_b + I_d)$ Korekce pro automatické ostření.

Při čtení se disk otáčí frekvencí 200–500 ot./min. Vzhledem k nedokonalosti disku může se stejnou frekvencí oscilovat i záznamová drážka s amplitudou až $70 \mu\text{m}$ ve vodorovném a $0,5 \text{ mm}$ ve svislém směru. Hlavička musí být schopna tyto oscilace sledovat tak, že se světelná stopa neodchýlí o více než desetiny μm vodorovně a $1 \mu\text{m}$ svisle.

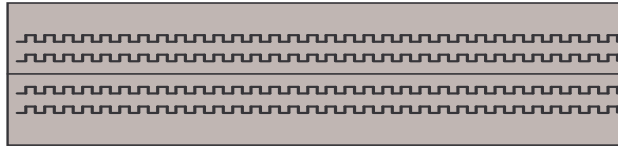


Obr. 13: Schéma optiky čtecí hlavičky.

DVD – Digital Versatile Disc

Kapacita standardního disku se pohybuje v blízkosti hranice fyzikálních možností. Je omezena velikostí Airyho stopy a dosahuje asi 600 MB. Je tedy velkým překvapením, že se podařilo v poslední době vyvinout velkokapacitní tzv. DVD disk, který disponuje kapacitou až 17 GB – 30krát vyšší než klasický disk.

Jakým způsobem bylo tohoto zvýšení dosaženo? Chceme-li zvýšit hustotu zápisu, musíme snížit velikost Airyho disku. Z rovnice (2) je zřejmé, že je třeba snížit vlnovou délku nebo zvětšit číselnou aperturu. U DVD disku bylo provedeno obojí. Použitím červeného laseru s vlnovou délkou $\lambda = 635 \text{ nm}$ a novou konstrukcí objektivu s číselnou aperturou $N_A = 0,6$ se průměr Airyho disku zmenšil z původních $2,1 \mu\text{m}$ na $1,3 \mu\text{m}$. Tak mohla být vzdálenost sousedních stop snížena více než dvakrát (na $0,74 \mu\text{m}$) a maximální délka důlků zkrácena třikrát (na $1,14 \mu\text{m}$), což umožňuje zvýšit plošnou hustotu záznamu asi sedminásobně. DVD disk může být navíc oboustranný a ve své maximální variantě obsahuje čtyři záznamové vrstvy (viz obr. 14). Čtení zajišťují dvě hlavičky, každá čte z jedné strany disku dvojici pod sebou ležících vrstev. Horní vrstva je polopropustná a objektiv podle potřeby přeostrňuje na dolní či horní vrstvu. Kapacita dvojice vrstev čtených z jedné strany je 8,8 GB. Celý čtyřvrstvý disk má tedy kapacitu 17 GB.



Obr. 14: Řez čtyřvrstvým DVD diskem.

Literatura

1. Nakadzima, Ch., Ogava, Ch.: Cifrovýje gramplastinky, Radio i svjaz, Moskva 1988.
2. Salava, T.: Přehrávače číslicových zvukových desek systému CD, NTL Praha, 1991.