



UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

KAKO DELUJE KATODNA TELEVIZIJA!

(Seminarska naloga pri predmetu FIZIKA 2)



Avtor: Jernej Moderč
Študij: FGG, Geodezija UNI, 1. letnik
Šolsko leto: 2004/2005

Mentor: prof. Zvonko Jagličič

Ljubljana, 4.5.2005

Televizija – čudežna škatla

Televizija je dandanes gotovo eden izmed najvplivnejših medijev. Ta majhna škatla, v kateri je skrite nekaj znanosti in tehnike je svet pravzaprav spremenila v majhno vas, kjer vsi o vsakem in o vsem vse vedo.

Čeprav v zadnjem času LCD televizija izpodriva navadno (CRT) televizijo, je slednja še vedno najbolj razširjena po svetu, zato je prav, da poznamo vsaj njene osnove delovanja.

Ste že opazili, da je ekran vklopljenega televizorja naelektren?



Ste se že kdaj vprašali, zakaj je temu tako?

Ali celo: kaj je v tej črni škatli, ki je tako zbližala svet?

Na to in še kaj bom poskušal odgovoriti v tej seminarski nalogi.

O naših možganih

Preden se lotimo preučevanja delovanja CRT televizije pa najprej nekaj o dveh izrednih sposobnostih naših možganov, zaradi katerih lahko televizija deluje tako kot deluje:

1. Naj bo slika...

Če nempremično sliko ločimo na majhne barvne pike, so možgani sposobni te pike ponovno združiti v sliko in ji dati nek pomen, kar ni povsem samoumevno. Da pa se to v možganih res dogaja, je razvidno iz naslednje slike:



Pri tej sliki so pike, ki jo sestavljajo, tako velike, da so možgani zmedeni in ne razločijo motiva. Šele če se od slike dovolj oddaljimo, lahko razločimo dojenčkov obraz, saj tako pike postanejo dovolj majhne, da jih možgani lahko združijo ter sliki določijo pomen (enak učinek bi dosegli, če bi pripravili oči).

Vsi slikovni mediji (televizije, računalniki, revije, časopisi,...) izkoriščajo to sposobnost možganov, da lahko iz dovolj majhnih pik sestavijo sliko in ji določijo pomen.

2. Naj bo gibanje...

Če gibljiv posnetek ločimo na zaporedje malenkostno različnih mirujočih slik in te slike eno za drugo prikažemo v hitrem nizu, so možgani sposobni te slike zopet združiti v en sam gibljiv posnetek.

Če v 1 sekundi zaporedoma prikažemo vsaj 15 mirujočih slik, jih možgani lahko povežejo in določijo gibanje. Če pa je v 1 sekundi teh slik manj, jih možgani še vedno zaznajo le kot niz mirujočih slik in ne kot gibajoč prizor. Zato je pri televiziji sprejet standard o 25 slikah na sekundo.

Pri vsakem posnetku torej možgani vzporedno izvajajo oba procesa:

1. posamezne pike združujejo v mirujoče slike
2. te slike pa povezujejo v gibajoč prizor

Brez teh dveh zmožnosti naših možganov, televizija (vsaj taka, kot jo poznamo) ne bi bila možna.

Kaj je katodna cev (CRT) in kako deluje?

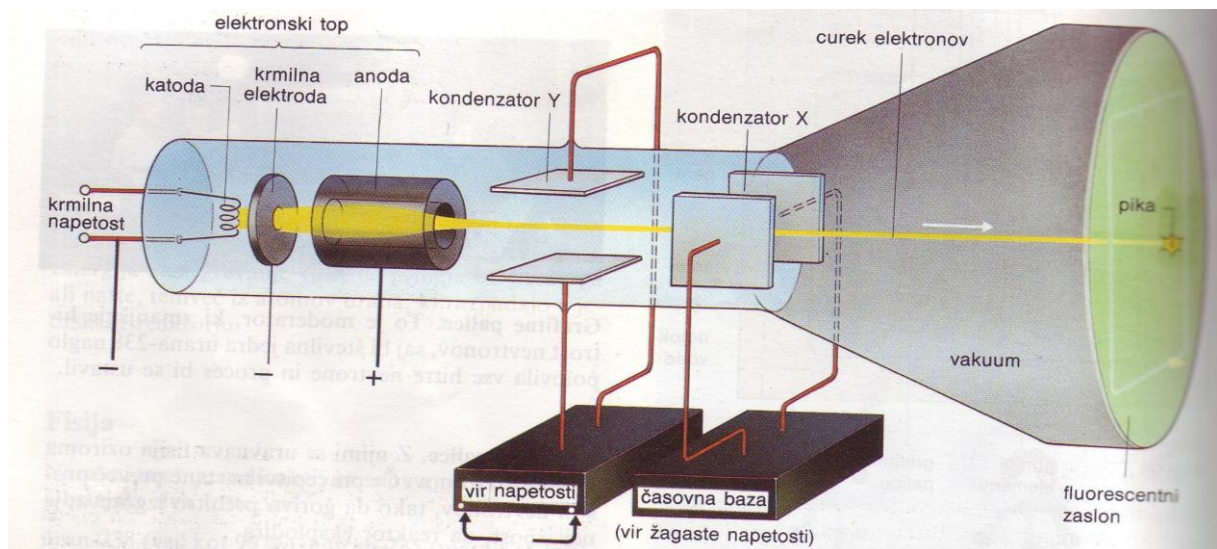
Katodna cev (ang. cathode ray tube oz. krajše: **CRT**) je bistveni sestavni del vsake klasične televizije. S pomočjo te naprave namreč lahko na enostaven način prikazujemo slike. Zato televizije s katodno cevjo imenujemo tudi katodne televizije.



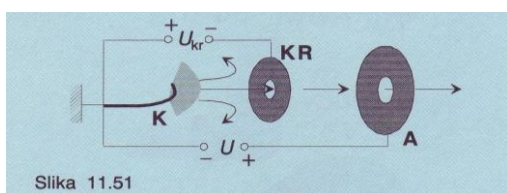
Katodna cev je steklena vakuumska cev, ki se spredaj končuje z velikim pravokotnim (ravnim ali rahlo izbočenim) zaslonom oz. ekranom, zadaj pa se podaljšuje v ozek vrat.

V vratu je izvor curka elektronov (t.i. elektronski top). Ker je v cevi vakuum (zračni tlak okrog 10^{-9} bar), potujejo elektroni skozi notranjost cevi neovirano do ekrana (trki z zračnimi molekulami so redki).

Notranja stena ekrana je prevlečena s posebno fluorescenčno plastjo, ki vsebuje cinkov sulfid ter različne dodatke. Elektroni s precejšnjo kinetično energijo udarjajo ob fluorescenčni zaslon. Del njihove kinetične energije se v fluorescenčni plasti spremeni v svetlobno energijo; nastane svetlobni pulz, ki je slika curka elektronov na zaslonu. Navadno steklo pod udarci pospešenih elektronov oddaja zelenkasto svetlobo, cinkov sulfid z različnimi dodatki pa belo.



Slika 1: Shema katodne cevi s kondenzatorji



Slika 11.51

Elektronski top v vratu katodne cevi je sistem elektrod za pridobivanje curka pospešenih elektronov. Med drugim vsebuje tudi negativno naelektreno kovinsko elektrodo – **katodo** (K), ki je izvor prostih elektronov.

Slika 2: Shema elektronskega topa

V katodni cevi ima funkcijo katode žarilna nitka, ki je podobna kot pri navadni žarnici. Tako kot vsaka kovina, tudi žarilna nitka vsebuje oblak prostih elektronov. Ti se bolj ali manj prosto gibljejo po žarilni nitki, vendar je ne morejo zlahka zapustiti. To jim preprečujejo pozitivni kovinski ioni, ki jih zadržujejo z električnimi silami. Žičko lahko zapustijo le prosti elektroni iz površinskega sloja, če imajo dovolj veliko kinetično energijo.

Termična emisija elektronov iz katode

Gibanje prostih elektronov v kovini je podobno termičnemu gibanju plinskih molekul. Kinetična energija posamičnih elektronov v kovini se zaradi pogostih trkov stalno in statistično neurejeno spreminja. Zgodi se, da v kakem trenutku nekateri prosti elektroni prejmejo dovolj kinetične energije in se gibljejo v pravi smeri, da lahko zapustijo kovino. Pravimo, da **kovina izhlapeva elektrone**, podobno kot kapljevina izhlapeva molekule.

Z izhlapevanjem elektronov se kovina naelektri pozitivno in zato električno pritegne že izhlapele elektrone. Ti se termično gibljejo v nekakšnem oblaku, ki se zadržuje v neposredni bližini kovine. Nekateri elektroni iz tega oblaka se slučajno vračajo v kovino (se torej "kondenzirajo"), zato se sčasoma vzpostavi ravnovesno stanje, ko se število izhlapelih elektronov v povprečju izenači s številom kondenziranih elektronov v enakem času. Takšno izhlapevanje elektronov se imenuje **termična emisija elektronov**.

Število elektronov v oblaku ob kovini močno naraste, če povečamo temperaturo kovine. Višja, ko je temperatura kovine (torej večja kinetična energija prostih elektronov v njej), večje je število izhlapelih elektronov.

Žarilno nitko (katodo) v katodni cevi z močnim električnim tokom segrejemo na nekaj tisoč stopinj Celzija, da pospešimo izhlapevanje elektronov iz nje. Pri dani temperaturi žarilne nitke je termična emisija elektronov odvisna tudi velikosti "sevalne" ploskve, od njene čistoče ter seveda od vrste kovine, iz katere je žarilna nitka. Močno sevajo predvsem alkalijske in zemljoalkalijske kovine (npr. cezij). Ker pa te ne prenesejo visokih temperatur, se v katodni cevi navadno uporablja volframska nitka, prevlečena s slojem alkalijskih oksidov.

Pospeševanje curka elektronov

Elektrone, ki izhlapijo iz žarilne nitke, pospešimo in usmerimo, da se gibljejo v curku (*slika 1*).

Vročo žarilno nitko priključimo na negativni pol vira pospeševalne napetosti (torej kot **katodo**), pozitivni pol pa na ploščico – **anodo** (A), ki je nasproti katode. Segreta katoda izhlapeva elektrone, vendar se zaradi tega ne elektri pozitivno, saj priključeni vir napetosti sproti nadomešča izgubljene elektrone. Pozitivna anoda privlači iz katode izhlapele elektrone, tako da se ti ne zadržujejo v oblaku ob katodi. Sproščeni elektroni se v električnem polju med katodo in anodo pospešujejo v smeri anode. Energija vsakega elektrona se do anode poveča za $e_0 \cdot U$, kjer je U napetost med anodo in katodo (**pospeševalna napetost**). Ker je začetna kinetična energija izhlapelih elektronov majhna v primerjavi s prirastkom energije zaradi pospeševanja, udari vsak

elektron ob anodo z enako kinetično energijo $e_0 \cdot U$. V sredini ploščate anode je luknjica, skozi katero se pospešeni elektroni zaradi vztrajnosti gibljejo naprej (na drugi strani anode ni električnega polja, ker ga izniči nasprotno enako električno polje, katerega izvor je katoda). Vsak elektron v curku ima približno enako hitrost v , ki jo izračunamo iz enačbe:

$$(m_e \cdot v^2) / 2 = e_0 \cdot U, \text{ torej } v = ((2 \cdot e_0 \cdot U) / m_e)^{1/2}$$

$$(m_e = \text{masa elektrona} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, e_0 = \text{osnovni naboj} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As})$$

Iz enačbe je razvidno, da se elektroni v curku gibljejo s tem večjo hitrostjo ali s tem večjo kinetično energijo, čim večja je pospeševalna napetost U (napetost med katodo in anodo); z njo torej lahko reguliramo energijo pospešenih elektronov, ki izhajajo iz elektronskega topa, kar se odraža v svetlosti signala, ko se elektron zaleti v zaslon katodne cevi.

Naloga:

V CRT (katodni cevi) je razdalja med žarilno nitko in anodo 5 cm. Anodna oz. pospeševalna napetost je 20 kV. V kolikšnem času priletijo elektroni iz žičke do anode? S kolikšno hitrostjo elektroni priletijo v ekran?

(Odgovor: $t = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, $v = 8,4 \cdot 10^7 \text{ m / s}$; v katodni cevi so torej velike hitrosti (le štirikrat manjše od svetlobne))



Tok curka povemo s povprečnim številom elektronov, ki v nekem času stečejo skozi prečni prezek curka. Tega spreminjamo s pomočjo dodatne elektrode - **krmilne elektrode** (KR), ki je v prostoru med anodo in katodo (slika 2). Priključena je na negativni pol vira **krmilne napetosti** U_{kr} , tako da je bolj negativna od katode in zato bolj ali manj odbija elektrone, ki prihajajo od katode.

Toda vpliv pozitivne anode je močnejši od vpliva negativne krmilne elektrode (krmilna napetost je navadno nekaj V, pospeševalna pa celo več tisoč V), zato anoda potegne curek elektronov skozi luknjico v krmilni elektrodi, pri čemer je tok curka odvisen od krmilne napetosti U_{kr} . **Čim večja je krmilna napetost, tem manj elektronov je v curku.** S spreminjanjem krmilne napetosti reguliramo število elektronov v curku, kar se prav tako odraža v svetlosti signala na zaslonu.

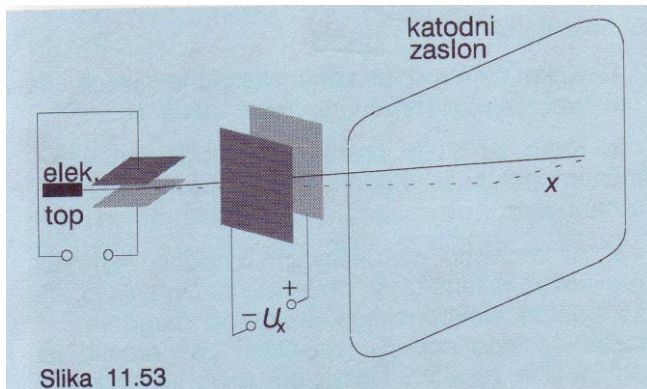
Poleg katode, anode in krmilne elektrode vsebuje elektronski top še dodatne elektrode (**elektronske leče**), ki omogočajo fokusiranje elektronskega curka. S spremembo napetosti na teh elektrodah spremenimo potek električnih silnic v prostoru med katodo in anodo tako, da se curek elektronov, s katerim obstreljujemo zaslon, manj razprši.

Zato da se elektroni ne bi kopicili na zaslonu, je ta povezan z anodo prek prevodne obloge na notranji steni katodne cevi.

Usmerjanje curka elektronov

V zoženem delu katodne cevi je poleg elektronskega topa za pospeševanje elektronov tudi sistem za usmerjanje (odklanjanje) elektronskega curka. To sta lahko dva kondenzatorja (*slika 3*), pri televizijah pa elektronski curek navadno usmerjajo tuljave (*slika 6*). Če tega sistema ne bi bilo, bi elektroni stalno zadevali sredino zaslona.

- z električnim poljem (2x kondenzator)



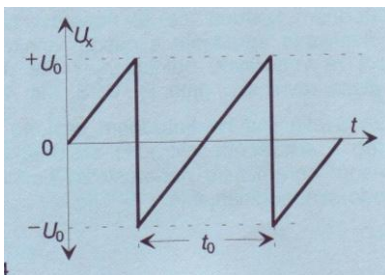
Slika 3: Odklanjanje elektronskega curka z električnim poljem (par kondenzatorjev)

Elektronski curek iz elektronskega topa potuje skozi **kondenzator**, torej skozi električno polje med dvema navpičnima ploščama, ki sta priključeni na napetost U_x (*slika 3*). Pri tem se odkloni v vodoravni smeri (npr. v levo, če je leva plošča pozitivna). Ko elektronski curek izstopi iz električnega polja, se giblje naprej premočrtno in zadene fluorescenčni zaslon v točki, ki je za x levo od osrednje točke zaslona (kjer bi zadel pri $U_x = 0$). Ta odmik je premo sorazmeren z napetostjo U_x na navpičnih odklonskih ploščah; večja napetost povzroči večje električno polje med ploščama, kar pomeni večji odklon elektrona in obratno.

Kakor se s časom spreminja odklonska napetost U_x se spreminja tudi vodoravni odmik x . Ker imajo elektroni izredno majhno maso, zlahka sledijo tudi hitrim spremembam odklonske napetosti.

(Pri usmerjanju elektronov lahko vpliv sile teže zaradi izredno majhne mase elektronov zanemarimo.)

Odklon curka elektronov v vodoravni (x) smeri narekuje odklonska napetost U_x na navpičnih ploščah kondenzatorja (*slika 4*). Spreminja se tako, da elektronski curek v eni sekundi petindvajstkrat nariše eno pod drugo 625 linij, ki tako prekrijejo cel zaslon.

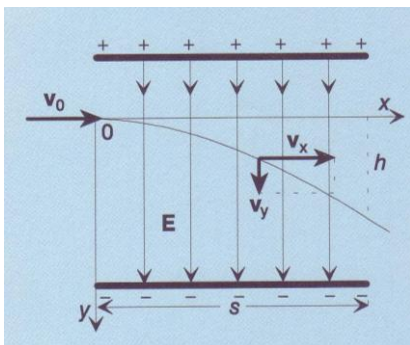


Slika 4: Graf žagaste odklonske napetosti U_x

Žagasta odklonska napetost U_x se s časom spreminja, kot kaže *slika 4*. Napetost enakomerno narašča do največje vrednosti U_0 (amplituda žagaste napetosti), nakar hipoma spremeni predznak (se spremeni v $-U_0$) in se spet enakomerno povečuje skozi nič do $+U_0$ itn. Za vsako sliko je potrebno 625-krat zamakniti curek za eno linijo nižje, v eni sekundi pa se zamenja 25 slik, kar pomeni, da je frekvenca žagaste napetosti zelo velika, in sicer $625 \cdot 25 = 15\,625$ Hz. Če je televizor prižgan, lahko to frekvenco slišimo kot stalen visok piskajoč zvok (slišno območje zdravega človeka je med 20 Hz in 20kHz).

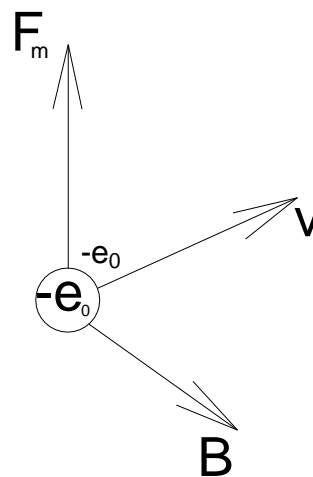
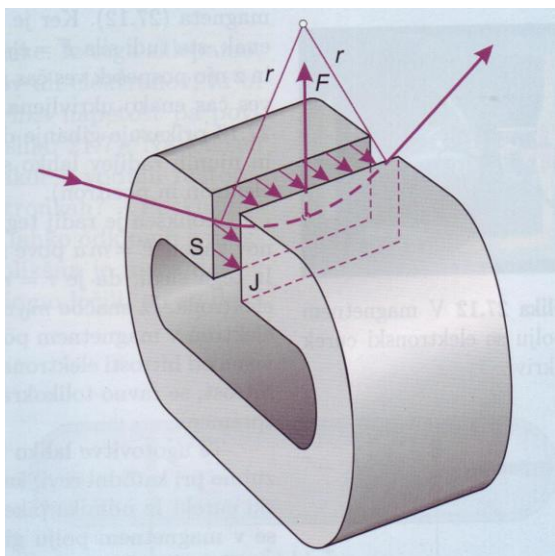
Poleg navpičnih plošč za vodoravno odklanjanje elektronskega curka sta v vratu katodne cevi nameščeni še vodoravni plošči (*sliki 3 in 5*). Ti odklanjata elektronski curek v navpični smeri. Navpični odklon curka (y) je premo sorazmeren z napetostjo U_y med vodoravnima ploščama kondenzatorja.

S spreminjanjem napetosti U_x na navpičnih in U_y na vodoravnih ploščah dosežemo, da elektronski curek osvetli vsako točko zaslona.



Slika 5: Parabolična tirnica (kot pri vodoravnem metu) curka protonov zaradi odklanjanja v homogenem električnem polju (elektroni v katodni cevi pa se odklonijo ravno v drugo smer, k pozitivni plošči kondenzatorja)

- z magnetnim poljem (2x tuljava)



Slika 6: Krivljenje elektronskega curka z magnetnim poljem (par tuljav)

Če bi približali magnet televizijski cevi, bi se slika spačila. (Ne delajmo tega, ker lahko poškodujemo televizor!)

Curek elektronov iz elektronskega topa torej lahko ukrivimo tudi z magnetnim poljem, ki nastane znotraj **tuljave**, skozi katero teče električni tok. Tak način je pri CRT televiziji bolj uveljavljen. Spet sta potrebni dve tuljavi, ena za odklanjanje elektronskega curka v vodoravni smeri, druga pa v navpični.

Namesto da bi spreminjali napetost na kondenzatorjih, spreminjamo tokova v tuljavah (in posledično jakost magnetnega polja v njih) in s tem uravnavamo odklon curka elektronov. Curek elektronov se v magnetnem polju obnaša kot električni tok, čeprav ne teče po žici ampak po praznem prostoru. Ker pa curek elektronov ne more skozi tuljavo, je treba magnetno polje po kovinskem jedru speljati iz nje.

**Uklonske tuljave pri CRT TV
(zvitki bakrene žice)**

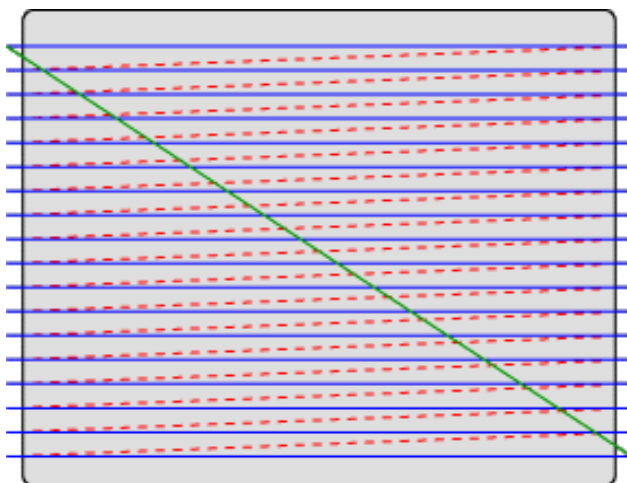


Risanje s curkom elektronov

Že pred leti so televizijska združenja za lažjo izmenjavo programov po svetu sprejela osnovne standarde (ki so seveda ustrezali v začetku omenjenim zmožnostim možganov), in sicer:

625 linij na enem zaslonu (da lahko možgani iz njih sestavijo sliko)

25 slik na sekundo (da jih možgani lahko združijo v gibanje)



Slika 7: Pot elektronskega curka po zaslonu

Svetla lisa na zaslonu (curek elektronov, ki zadeva ob ekran) pod vplivom žagaste napetosti na navpičnih ploščah (slika 4) enakomerno potuje v vodoravni smeri od skrajnega levega konca zaslona do skrajnega desnega, na desnem koncu hipoma preskoči celotni zaslon in se vrne v skrajni levi konec ter spet potuje čez zaslon itd.

Slika 7 prikazuje pot elektronskega curka po zaslonu. **Modre črte** so črte, po katerih iz leve proti desni potuje elektronski curek in riše. Po **rdečih črtah** se curek vrača na levo stran in se postopno spušča, tako da z vodoravnimi črtami prekrije cel zaslon. Ko curek pride v kot zaslona, se po **zeleni črti** spet vrne na začetek, itn. Med potovanjem po rdeči in zeleni črti je elektronski curek izklopljen, da sled ni vidna na zaslonu.

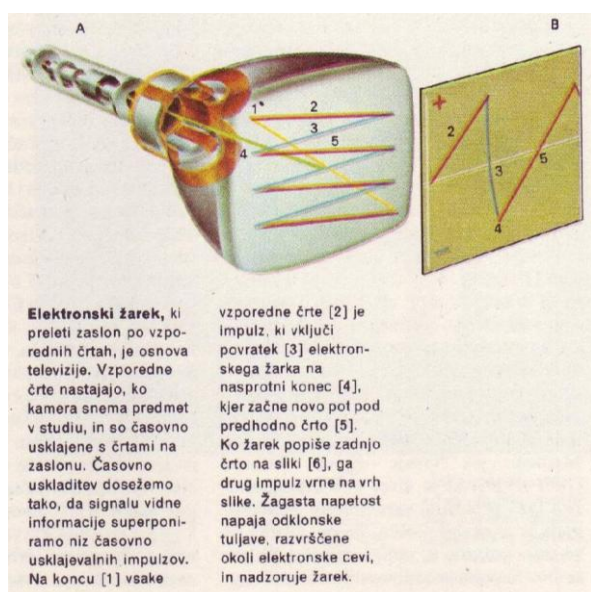
Ko elektronski curek potuje po zaslonu od leve proti desni, se mu **intenzivnost** (torej tok curka) **spreminja**, kot narekuje vhodni signal s televizijske postaje ali videokasete. Na ta način nastanejo vzdolž posamezne vodoravne črte različno svetli oziroma temni deli. Ker pa se te črte stikajo (zaslon je razdeljen na 625 vzporednih črt), lahko možgani enako svetle dele posameznih črt združijo v večje lise enakih odtenkov, na osnovi katerih lahko prepoznajo sliko (ji določijo pomen). Novejši standardi določajo 60 »barvanj zaslona z elektronskim curkom« v eni sekundi, vendar za posamezno sliko elektronski curek preleti le npr. vsako sodo črto. Ko se naslednjič spušča po zaslonu (ko riše naslednjo sliko), pa preleti vsako liho črto, torej zapolni vrzeli, ki jih je ustvaril pred tem (slika 9). Tako ne pride do opaznih časovnih zamikov med zgornjim in spodnjim delom iste slike. Slednji je namreč izrisan nekoliko kasneje. Možgani pa lahko kljub »razredčeni« sliki še vedno razločijo njen pomen. Celoten zaslon je namreč po dvakratnem prehodu žarka še vedno porisan 30-krat v sekundi.

Ta tehnika barvanja zaslona pa se ne uporablja pri računalniških monitorjih, saj bi bilo dolgotrajno gledanje za oči precej naporno. Tu elektronski curek prepotuje vsako črto zaslona 60-krat v sekundi, kar opazno zmanjša migljanje zaslona.

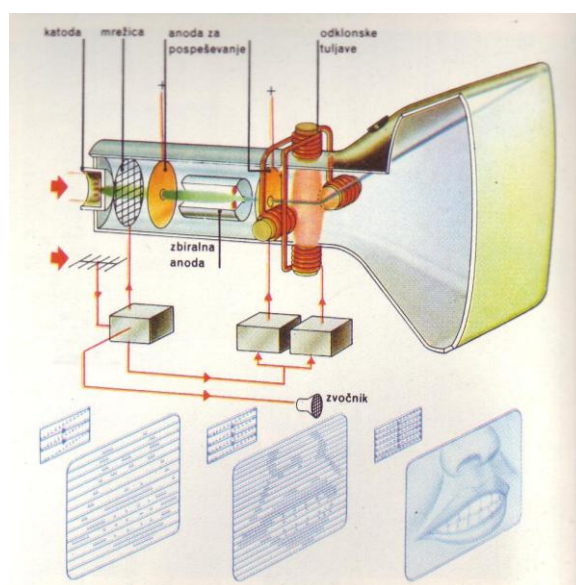
Ko paket (pulz) pospešenih elektronov zadene fluorescenčni zaslon, zadeto mesto zasveti. Posamični elektroni niso pomembni, zaznaven je le svetlobni signal, ki ga sproži paket elektronov. Ko elektronski curek potuje prek ekrana, potuje tudi svetlobna lisa, ki jo curek povzroča. Pri tem vleče za sabo rep, da je videti kot kak komet. Zadeta točka ekrana namreč še nekaj časa sveti, četudi se curek že premakne, vendar s pojemajočo svetlobo. Opazimo, da oddana svetloba pojema s časom; po nekaj desetinkah sekunde povsem ugasne.

Stalno svetlo liso dobimo, če na isto mesto zaslona udarja paket za paketom, to je curek elektronov. Lisa je tem svetlejša, čim večji je tok curka elektronov. S krmilno napetostjo na elektronskem topu spreminjamo tok curka elektronov in s tem svetlost lise na zaslonu.

Paziti moramo, da elektronski curek ne zadeva iste točke ekrana dlje časa, ker se emulzija v tisti točki lahko "prežge" in ne more več fluorescirati. Zato pri starejših televizorjih nastane na sredini zaslona črna pika (mesto, kjer je emulzija prežgana), saj je tam gostota energije (energija na enoto površine) največja. V sredini namreč snop elektronov pada pravokotno na zaslon, na robovih pa ne. Zato je tudi slika najbolj ostra na sredini zaslona. Prav tako pa k poškodovani emulziji na sredini zaslona pripomore tudi ugašanje televizije, pri čemer se nekoliko prej izklopijo usmerniki curka elektronov (pri televizijah so to navadno tuljave, pri osciloskopih pa kondenzatorji), zato se slika ob izklopu TV skrči v belo svetlečo piko na sredini zaslona. Tako se v majhno točko na sredini zaslona eden za drugim zaletavajo elektroni z veliko kinetično energijo, kar sčasoma poškoduje emulzijo.



Slika 8



Slika 9

Slika 8: Pot elektronskega curka po zaslonu

Slika 9: Z večanjem števila linij, ki prekrivajo zaslon, se večja kakovost prikaza slike

Kot zanimivost...

Še ena izmed uporab katodne cevi z žagasto napetostjo:

Katodna cev z žagasto napetostjo za vodoravno odklanjanje se v medicini uporablja za merjenje srčnega utripa (npr. med operacijo). Napetost U_y za navpično odklanjanje elektronskega curka pa določa mikrofoni, ki "poslušajo" bitje srca. Ob vsakem udarcu srca nastane v mikrofoni električni sunek, ki hipoma poveča napetost na vodoravnih ploščah, tako da svetla lisa na zaslonu poskoči navzgor in takoj nato navzdol. Če je utrip srca šibkejši, lisa manj poskoči. Povprečni razmik sosednjih sunkov na zaslonu je merilo srčnega utripa.

Barvna slika

Notranja stran zaslona pri katodnih televizijah je prekrita s plastjo fluorescentne snovi, ki zažari, ko se vanjo zaleti elektron. V **črno-beli** televiziji ta snov (cinkov sulfid z dodatki) ob trku z elektroni zažari belo. Navadno steklo brez emulzije bi namreč pod udarci pospešenih elektronov oddajalo zelenkasto svetlobo in bi tako imeli »črno-zeleno televizijo«.

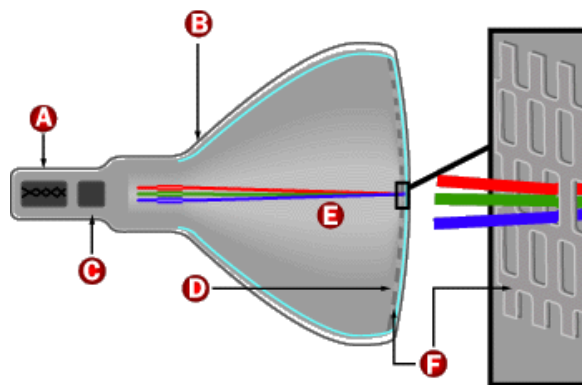
Pri **barvni** televiziji pa so fluorescentne snovi tri; ena ob trku z elektronom seva **rdeče**, druga **zeleno** in tretja **modro** (RGB barvna lestvica). Razporejene so v pike oziroma trakove, ki jih lahko vidimo, če z lupo od blizu pogledamo prižgan barvni zaslon. S kombiniranjem teh barv lahko na zaslonu prikažemo katerikoli odtenek.

Da pa je možno kombinirati barve med seboj, je potrebno istočasno obstreljevati različne emulzije, zato so v **barvnih televizijah trije elektronski topovi**, vsak za svojo barvo.

Maska (plošča po kateri je natančno razporejenih veliko majhnih luknjic) skrbi za to, da elektronski curek v pravem času zadane pravo emulzijo v ustrezni točki zaslona (slike 10, 11 in 12). Maska se nahaja takoj za zaslonom, neposredno ob emulziji, njene odprtine pa so natančno poravnane s trakovi oziroma pikami treh različnih emulzij.

Če hočemo prikazati rdečo barvo, moramo elektronski curek usmeriti v tisto emulzijo, ki zasveti rdeče; če so hkrati obstreljene vse tri emulzije, se na zaslonu pokaže bela barva; če pa v določenem delu zaslona vsi trije curki elektronov ugasnejo, nobena emulzija ne zasveti in je zato tisti del ekrana črne barve.

Obstaja več kemičnih spojin – različnih emulzij (fluorescentnih snovi), ki se med seboj ločijo po času sevanja in po barvi, ki jo sevajo ob trku z elektronom.



Slika 10:

A – katoda

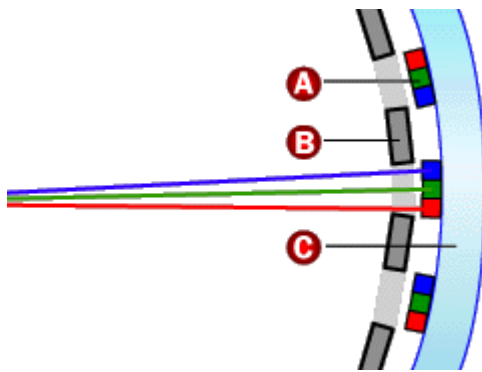
B – prevodna obloga na notranji strani katodne cevi, po kateri se elektroni vračajo na anodo

C – anoda

D – zaslon s fluorescentno plastjo

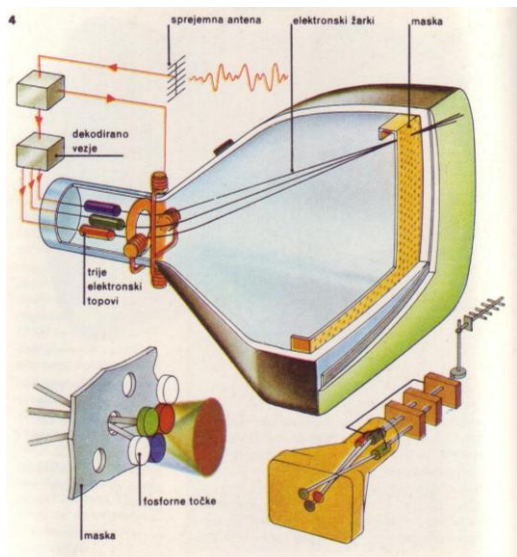
E – trije elektronski curki

F - maska



Slika 11:

- A – tri (R,G,B) emulzije v eni točki
- B – **maska**
- C – steklo zaslona



Slika 12:

Shema delovanja barvne televizije

- signal, ki ga sprejme antena (oziroma iz videokasete) se pretvori v informacijo o tem, kam odklanjati curek elektronov
- odklonske tuljave, ki ustvarjajo magnetno polje
- trije elektronski topovi (le pri barvni televiziji)
- odklonjeni žarek se po izhodu iz magnetnega polja giblje premo
- v detajlu je vidna vloga **maske** pri točnem zadevanju emulzijskih pik z elektronskim curkom

Viri:

- Kladnik, Rudolf: Fizika za srednješolce – Svet elektronov in atomov, DZS, Ljubljana, 1995
- Fizika za srednješolce – Pot k maturi iz fizike, DZS, Ljubljana 1996
- Kuščer, Ivan,...: Fizika za srednje šole – 3. del, DZS, Ljubljana 2002
- Krušič, Marjan: Velika ilustrirana enciklopedija – stroji, MK, Ljubljana, 1982
- <http://electronics.howstuffworks.com/tv-roundup.htm>