

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
FIZIKALNA MERILNA TEHNIKA

Gregor Bensa

RAZVOJ HITRIH ZASLONK ZA
LASERSKE ŽARKE

Zaključna naloga

Mentor: doc. dr. Rok Žitko
Somentor: dr. Peter Jeglič

Ljubljana, september 2013

Podpisani Gregor Bensa izjavljam:

- da sem zaključno nalogo z naslovom "Razvoj hitrih zaslonk za laserske žarke" izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Roka Žitka in somentorstvom dr. Petra Jegliča in
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh.

Ljubljana, september 2013

Podpis:

Zahvala

Zahvaljujem se vsem, ki so mi pomagali in spodbujali pri pisanju diplomske naloge.

Posebna zahvala gre mojemu somentorju dr. Petru Jegliču, ki mi je z napotki, svetovanjem, podporo in strokovno pomočjo veliko pomagal.

Zahvalil bi se tudi Odseku za fiziko trdne snovi na Institutu Jožef Stefan za eksperimentalni prostor ter zaposlenim za pomoč.

Zahvaliti si želim tudi slovenskemu podjetju Balder za obe tekočerkristalni celici.

Zahvaljujem se družini, ki mi je vsa leta študija stala ob strani, me podpirala in spodbujala v negotovih časih. Tudi prijateljem gre zahvala za sproščujoče vzdušje ob študiju, brez katerega bi ta bil veliko težji.

Hvala.

Izvleček

Hitre zaslonke so pomembna komponenta pri različnih eksperimentih z laserji. Uporabljajo se za hitro prekinjanje laserskih žarkov, kjer je potrebno imeti dobro časovno kontrolo nad svetlobnim izvorom. Z običajnimi zaslonkami je možno doseči čase odpiranja in zapiranja žarka okoli milisekunde, kar je dovolj za večino eksperimentov, vendar pri nekaterih potrebujemo še hitrejše zaslonke (npr. hladni atomi). V tej zaključni nalogi sta predstavljena dva pristopa prekinjanja žarkov in sicer z dvema vrstama zaslonk. Prva je mehanska zaslonka na osnovi aktuatorja iz rabljenih trdih diskov, druga pa zaslonka na osnovi celic iz tekočih kristalov. Sestavili in testirali smo oba tipa zaslonk ter pri tem razvili ustrezno krmilno elektroniko. Dosegli smo čase vklopa in izklopa laserskih žarkov v območju desetinke milisekunde. Oba tipa zaslonk sta tudi cenovno veliko ugodnejša od komercialnih rešitev s podobnimi karakteristikami.

Ključne besede: zaslonka, hitra zaslonka, laserji, hladni atomi, optični eksperimenti, prekinitve laserskega žarka

Stvarni vrstilec PACS (2010): 37.10.De, 42.79.Ag, 42.79.Kr

Abstract

Fast shutters are a basic element in a variety of laser-based experiments. They are used for fast switching of laser beams, wherever it is necessary to have control of the light source timing. With conventional shutters, it is possible to achieve millisecond switching times, which is fast enough for most experiments. In some cases, though, the switching times need to be faster (e.g. cold atoms experiments). In this thesis, two types of laser beam switching are presented: the first uses a liquid crystal cell and the second an actuator from a hard disk drive. We constructed and tested both types of shutters together with their electronic driving circuits. We achieved switching times in the range of tenth of a millisecond. Both types of shutters have a much lower price than the commercially available solutions with similar characteristics.

Keywords: shutter, fast shutter, lasers, cold atoms, optical experiments, fast switching of laser beams

Classification Scheme PACS (2010): 37.10.De, 42.79.Ag, 42.79.Kr

Kazalo

1	Uvod	1
2	Eksperimentalna postavitve	2
2.1	Komponente	2
2.2	Postavitve	3
2.3	Nastavitve merjenja	4
3	Zaslonka na osnovi tekočih kristalov	6
3.1	Tekoči kristal v električnem polju	6
3.2	Tekočokristalna celica kot zaslonka	7
3.3	Postopek meritve	8
3.4	Rezultati	9
3.4.1	Meritve	9
3.4.2	Obravnava	13
4	Zaslonka na osnovi trdega diska	14
4.1	Zgradba trdega diska	14
4.2	Zgradba hitre zaslonke	15
4.2.1	Mehanski model ročice aktuatorja	16
4.2.2	Izboljšanje zgradbe	18
4.3	Zgradba vezja	18
4.4	Postopek meritve	19
4.5	Rezultati	20
4.5.1	Meritve	20
4.5.2	Obravnava	23
4.5.3	Primerjava obeh tipov zaslonk	24
5	Zaključek	25

Slike

2.1	Postavitev s tekočim kristalom	3
2.2	Postavitev s trdim diskom	3
2.3	Postopek merjenja	5
3.1	Sila na dipolno molekulo	6
3.2	Zaslonka na podlagi tekočega kristala	8
3.3	Merjenje zapiranja	9
3.4	Merjenje odpiranja	10
3.5	Časi obeh zaslonk	11
3.6	Časi polarizirane zaslonke ob začetnem signalu	12
3.7	Prepustnost zaslonk	12
4.1	Zgradba trdega diska	14
4.2	Zgradba hitre zaslonke	15
4.3	Tuljavica v magnetnem polju	16
4.4	Geometrija ročice aktuatorja	16
4.5	Shema vezja	19
4.6	Merjenje zapiranja	20
4.7	Časi prve zaslonke	21
4.8	Časi druge zaslonke	22
4.9	Časi tretje zaslonke	22

Tabele

2.1	Komponente	2
2.2	Nastavitve osciloskopa	4
3.1	Časi obeh zaslonk	10
3.2	Prepustnost	11
4.1	Prva zaslonka	20
4.2	Druga zaslonka	21
4.3	Tretja zaslonka	21
4.4	Primerjava zaslonk	24

Poglavje 1

Uvod

V današnjem času si skorajda ne moremo zamisliti eksperimenta, ki se ne bi poslužil laserjev. Laser je ena izmed glavnih komponent pri eksperimentih s trdno snovjo, mehko snovjo, v biologiji, meteorologiji, nanotehnologiji, itd. Pri nekaterih izmed teh eksperimentov je potrebna zaslonka, ki laserski žarek prekine oziroma odpre. Komercialne zaslonke so večinoma mehanske, le-te pa so za določene eksperimente prepočasne. Pri eksperimentih s hladnimi atomi potrebujemo čase odpiranja in zapiranja laserskih žarkov v območju desetinke milisekunde. Pomembno je tudi, da so zaslonke primerne za več tipov laserjev (močne izhodne moči, širok spekter valovnih dolžin, itd.). Na tržišču sicer obstajajo zelo hitre zaslonke (npr. akustooptični modulatorji, elektrooptični modulatorji), vendar so take zaslonke zelo drage, kar je privedlo do tega, da so različne raziskovalne skupine začele razvijati lastne hitre zaslonke.

Moja naloga je bila razviti in testirati uporabnost dveh tipov zaslonk: zaslonko na osnovi tekočega kristala ter zaslonko na osnovi trdega diska. Prototip zaslonke na osnovi trdega diska smo sestavili na podlagi podobne zaslonke, ki so jo razvili na Univerzi v Melbournu [1], medtem ko smo tekočerkristalno zaslonko dobili od slovenskega podjetja Balder [2], ki izdeluje varilne čelade in tekočerkristalne modulatorje svetlobe.

V obeh primerih smo dobili čase zapiranja laserskega žarka v območju nekaj desetink milisekunde, vendar so pri tekočerkristalnih zaslonkah časi odpiranja (čas, ki je potreben, da zaslonka prepusti žarek) zelo dolgi. Pri zaslonkah na osnovi trdega diska so bile hitrosti zapiranja in odpiranja približno enake, odvisne le od zgradbe zaslonke. Poleg hitrosti zapiranja in odpiranja smo merili tudi zakasnitvene čase (čas med signalom, ki proži zaslonko, in dejanskim začetkom prekrivanja laserskega žarka).

Poglavje 2

Eksperimentalna postavitve

2.1 Komponente

V Tabeli 2.1 so zbrane vse komponente in naprave, ki smo jih pri teh poskusih uporabili.

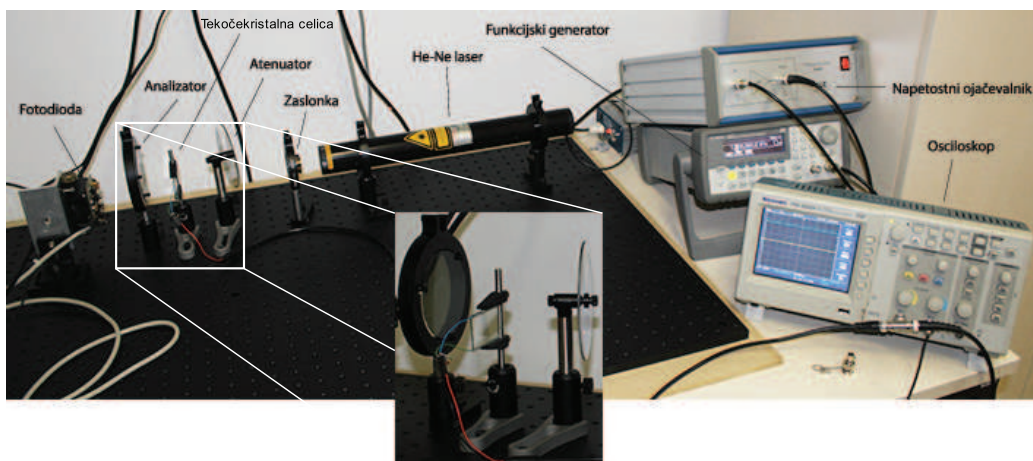
Komponenta	Znamka	Model	Karakteristike
Osciloskop	Tektronix	TDS 2022B	frekvenca: 200 MHz
Funkcijski generator	Agilent	33220A	poljubno oblikovanje valovnih funkcij
Napetostni ojačevalec	FLC Electronics	A400	ojačenje: 20x
Napajalnik	HQ Power	PS3003	0-30 V, 0-3 A
He-Ne laser			moč: 5 mW, polarizacija: linearna, val. dolžina: 632,8 nm, premer žarka: 1 mm
Optični elementi	THORLabs		miza, nastavki, nosilci, zaslonka, atenuator
Fotodioda	domače izdelave		
Analizator			linearno polariziran
Polarizirana in nepolarizirana tekočerkristalna celica	BALDER		prepustnost polarizirane celice: 1:3000, vrste celic: vijačno nematske
Elektronske komponente	Farnell		upori, diode, kondenzatorji, H-bridge enota
Trdi diski	Seagate, Maxtor		Seagate: 20 GB, 8 GB Maxtor: 40 GB

Tabela 2.1: Komponente, ki smo jih pri poskusih uporabljali.

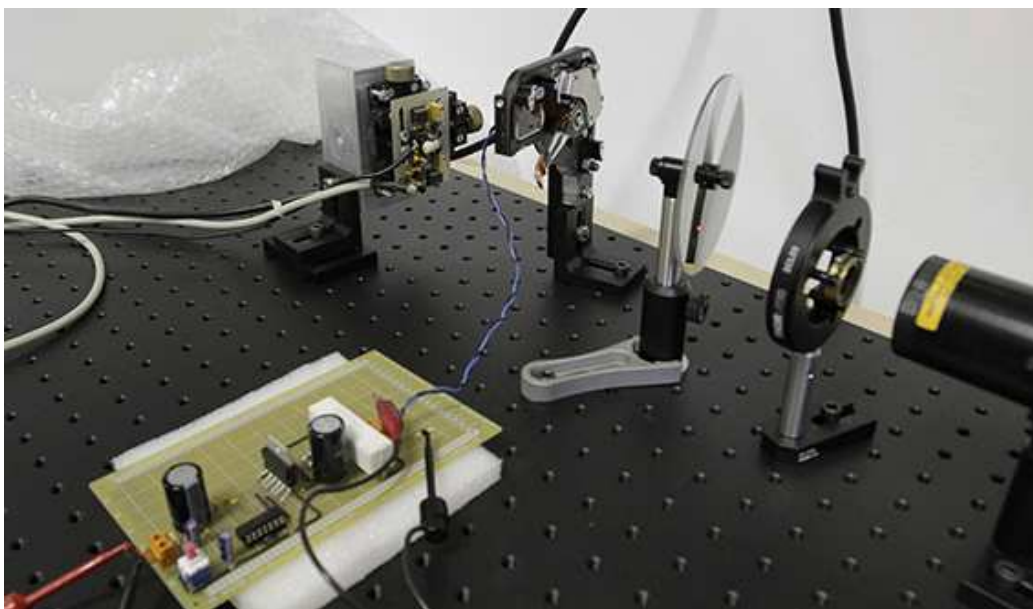
Večino komponent smo si sposodili v laboratorijih Odseka za fiziko trdne snovi na Inštitutu Jožef Stefan, izjema so tekočerkristalni celici ter komponente za izgradnjo vezja.

2.2 Postavitev

Vse optične komponente so postavljene v ravni črti, medtem ko so merilne naprave postavljene ob strani (Slika 2.1). Na tak način je menjava komponent in spreminjanje njihovih nastavitvev najbolj enostavno.



Slika 2.1: Vse optične enote so na optični mizi, nepolarizirana celica iz tekočih kristalov je postavljena med atenuatorjem in analizatorjem, medtem ko so osciloskop, napetostni ojačevalnik in funkcijski generator postavljeni ob robu optične mize.



Slika 2.2: Hitra mehanska zaslonka je postavljena med fotodiodo in atenuatorjem, poleg je krmilno vezje in napajalnik.

2.3 Nastavitve merjenja

Nastavitve osciloskopa so naslednje:

"Trigger" meni		"Measure" meni	
Type	Edge	CH1	Pk-Pk
Source	CH1 (prožimo na signal) ali CH2 (prožimo na fotodiodo)	CH2	Rise Time
Slope	Falling (pri meritvah padca signala) ali Rising (pri meritvah naraščanja signala)	CH2	Fall Time
Mode	Normal	CH1	None
Coupling	DC	CH1	None

Tabela 2.2: Nastavitve osciloskopa, "trigger" menija in "measure" menija.

Preden prožimo zaslonko je potrebno vklopiti gumb "SINGLE SEQ", ki poskrbi za to, da osciloskop ujame in ustavi signal, ko se le-ta prikaže.

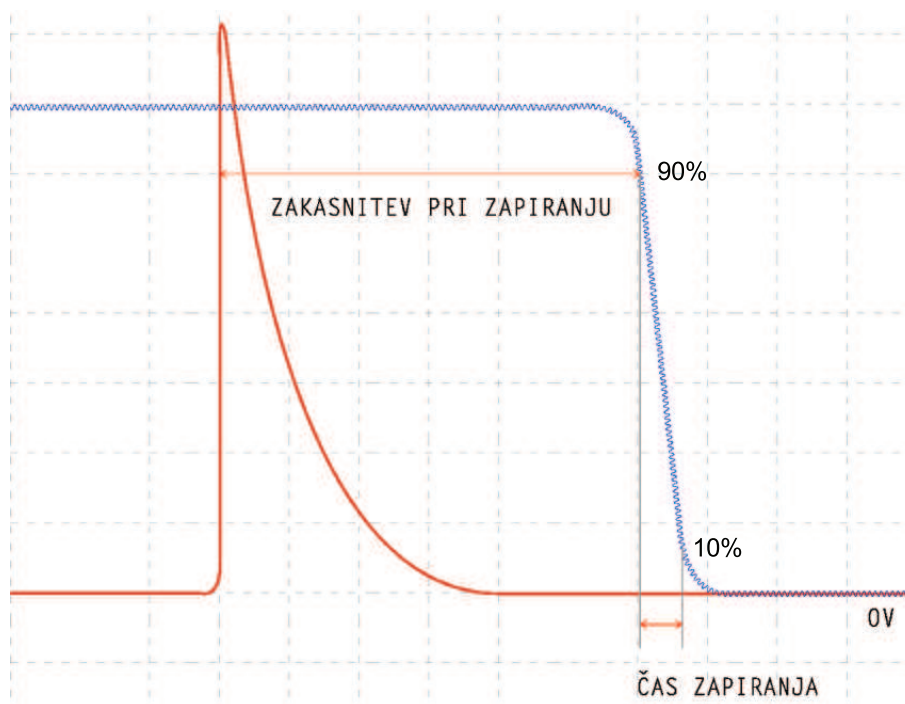
Funkcijski generator smo uporabili samo pri zaslonki na osnovi tekočerkristalne celice. Z njim bi lahko načeloma prožili tudi krmilno vezje zaslonke iz delov trdega diska, a bi za to potrebovali dodaten modul v vezju (glej razdelek 4.3).

Napetost na funkcijskem generatorju je odvisna od impedance priključenih naprav (npr. kablov). Ko pošljemo signal preko koaksialnega kabla direktno na osciloskop, moramo biti pazljivi, saj funkcijski generator ne ve s kakšno impedanco mora signal množiti. Dejanska napetost na izhodu se zato ne ujema s tisto prikazano na funkcijskem generatorju.

Meritve so se izvajale po naslednjem protokolu:

- Najprej smo merili čas zapiranja, kjer smo začetek definirali, ko je bila napetost na fotodiodi enaka 90% celotnega signala in konec, ko je dosegla 10% celotnega signala. Pri uporabljenih nastavitvah je 90% celotnega signala ustrezalo 612 mV, 10% pa 68 mV.
- Nato smo odčitali časovno zakasnitev med proženjem in 10% pokritostjo žarka, torej ko je bilo na fotodiodi 90% celotnega signala.
- Po istem postopku smo merili čas odpiranja, torej naraščanje napetosti na fotodiodi od 10% do 90% in zopet zakasnitev med proženjem in 10% celotnega signala na fotodiodi.

Na Sliki 2.3 lahko vidite shemo poteka signala na fotodiodi (modro) in signala iz krmilnega vezja (rdeče), ter kje smo merili čase zapiranja in zakasnitve pri zapiranju. Za čase odpiranja in zakasnitve pri odpiranju je shema podobna.



Slika 2.3: Postopek merjenja časov zapiranja in odpiranja ter zakasnitev.

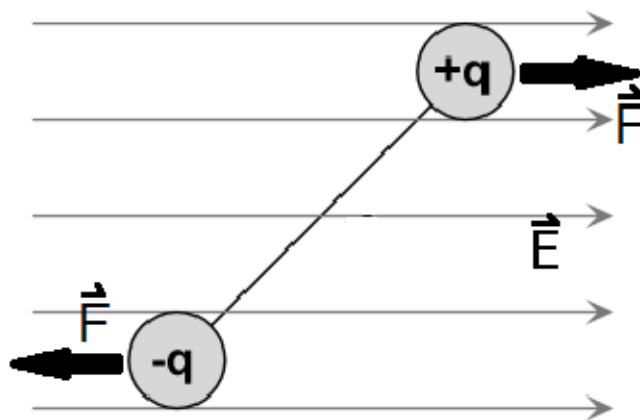
Merili smo tudi premer laserskega žarka, saj je to pri zaslonki na osnovi trdega diska zelo pomemben podatek. Uporabili smo mehansko zaslonko, kateri lahko poljubno spremenimo širino odprtine. Zaslonko smo počasi zapirali, dokler ni ta prepuščala le 90% svetlobe in nato izmerili širino odprtine. Ta širina je enaka premeru laserskega žarka in znaša 1 mm.

Poglavje 3

Zaslonka na osnovi tekočih kristalov

3.1 Tekoči kristal v električnem polju

Vez med atomi v molekuli včasih povzroči, da je ena stran bolj pozitivna, druga pa bolj negativna. Temu pravimo permanentni električni dipol. Če električno polje ni prisotno, v tekočem kristalu obstaja nek orientacijski red, četudi dipolni momenti niso poravnani. Ko pa dodamo električno polje, dipolna molekula čuti silo, ki jo zasuka tako, da se molekula poravna z električnim poljem ali pa je pravokotna na njega (odvisno, kje v molekuli se nahajata pozitivni in negativni naboj). Z večanjem električnega polja so sile seveda večje in poravnanost je boljša [3].



Slika 3.1: Na dipolarno molekulo, ki je v električnem polju, deluje navor.

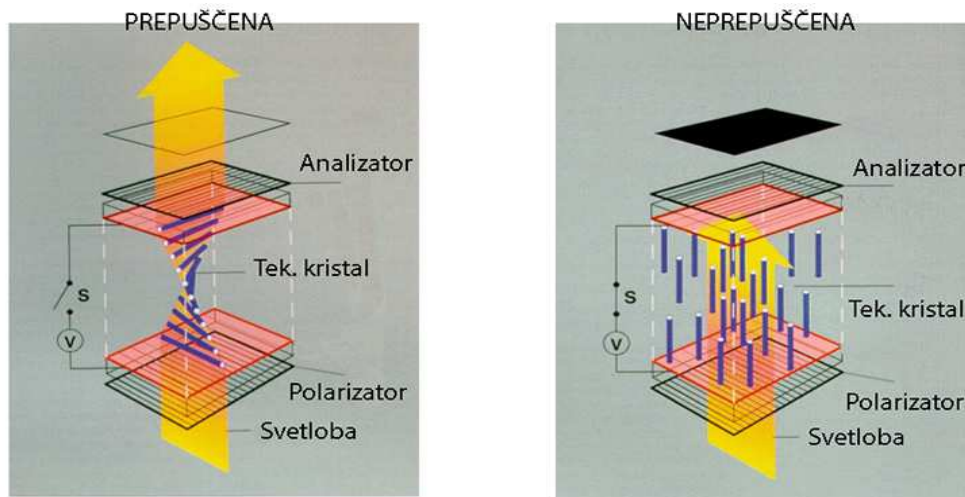
3.2 Tekočekristalna celica kot zaslonka

Svetloba je elektromagnetno valovanje, sestavljena je iz električnega in magnetnega polja, ki valuje v izbrani smeri. Če si predstavljamo, da se električno polje veča in manjša v smeri osi x , magnetno polje pa v smeri osi y (pravokotno na električno polje), se elektromagnetni val širi v smeri osi z . Taki svetlobi rečemo linearno polarizirana svetloba.

Za izgradnjo zaslonke smo uporabili vijačni nematik. Tekoči kristal je med dvema steklenima ploščama, ki sta na določeni medsebojni razdalji (nematske molekule se na tej razdalji v odsotnosti zunanjih sil zasukajo za 90 stopinj okrog vijačne osi). V vsaki ravnini, pravokotni na vijačno os, so molekule enako usmerjene, vendar se njihova usmerjenost spreminja od ravnine do ravnine. Zelo pomemben je tudi vpliv površin (stekel). Ravna površina vsiljuje molekulam tekočega kristala tik ob njej določeno smer. Ta pojav imenujemo sidranje. Sidranje na steklenih stenah celice je vzporedno. Preferenčna smer molekul ob spodnji strani je v smeri x (navpično), ob zgornji pa v smeri y (vodoravno). Vijačna os je v smeri z (smer potovanja svetlobe) [4].

Če linearno polarizirano svetlobo pošljemo skozi tako celico iz tekočih kristalov, le-ta pa je v električnem polju, kot prikazuje Slika 3.2 (desno), se polarizacija žarka ne bo spremenila. Če želimo, da celica svetlobe ne prepusti, moramo na izhodu dodati še analizador, ki ima smer polarizacije pravokotno na smer polarizacije žarka. V primeru, ko v tekoči kristal vstopa nepolarizirana svetloba, na vhod dodamo še polarizator. Tako nastane zaslonka na osnovi tekočih kristalov [5]. Oglejmo si, kaj se zgodi, če pošljemo nepolarizirano svetlobo skozi tako zaslonko (Slika 3.2):

- Ko gre nepolarizirana svetloba skozi polarizator, jo ta linearno polarizira, recimo navpično.
- Navpično polarizirana svetloba se v tekočem kristalu, ko le-ta ni pod napetostjo, obrne za 90° .
- Ta vodoravno polarizirana svetloba pade na analizador, ki je prav tako vodoravno polariziran.
- V tem primeru gre svetloba skozi zaslonko.
- Ko je tekoči kristal pod napetostjo, se navpično polarizirana svetloba ne obrne.
- Ko navpično polarizirana svetloba pride do vodoravno polariziranega analizatorja, ne more iti skozi analizador.



Slika 3.2: Zgradba zaslonke na osnovi tekočih kristalov, kjer je shematsko prikazano, kdaj je svetloba prepuščena (levo) in kdaj ni (desno). Levo se lahko vidi vijačnico, ki nastopa v vijačnem nematiku.

3.3 Postopek meritve

Postavitev eksperimenta je prikazana na Sliki 2.1 v razdelku 2.2. Testirali smo dve tekočokristalni celici. Prva je že imela tako polarizator kot tudi analizator vgrajen (polarizirana celica), druga pa je bila brez obeh (nepolarizirana celica), tako da smo v tem primeru uporabili svoj analizator. He-Ne laser, ki smo ga pri tem uporabljali, je že linearno polariziran.

Neposredno iz funkcijskega generatorja smo dobili prešibek signal za doseganje visokih hitrosti, zato smo uporabili napetostni ojačevalnik, ki je signal ojačal za faktor 20x. Za protokol merjenja časov zapiranja ter zakasnitve pri zapiranju glej razdelek 2.3. Upošteval sem tudi ozadje, ki je posledica svetlobe iz prostora in drugih virov motenj (termičnih, električnih, itd.).

Začetne nastavitve:

- Ozadje 120 mV.
- Izmenični pravokotni signal.
- Frekvenca 100 Hz.
- Napetost od 20 do 50 V s korakom po 5 V.

Nastavitve za polarizirano tekočokristalno celico:

- Atenuacija približno 49%.
- Laser je bil zarotiran 40° od navpične lege.
- Maksimalen signal na fotodiodi je bil 678 mV.

Za nepolarizirano tekočerkristalno celico:

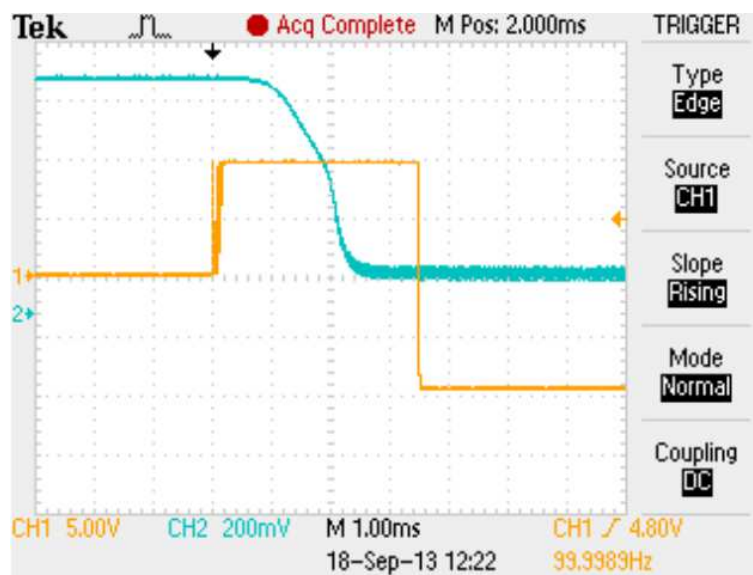
- Atenuacija približno 45%.
- Laser zarotiran 65° od navpične lege.
- Analizator zasukan za 30° od navpične lege.
- Maksimalen signal na fotodiodi je bil 675 mV.

3.4 Rezultati

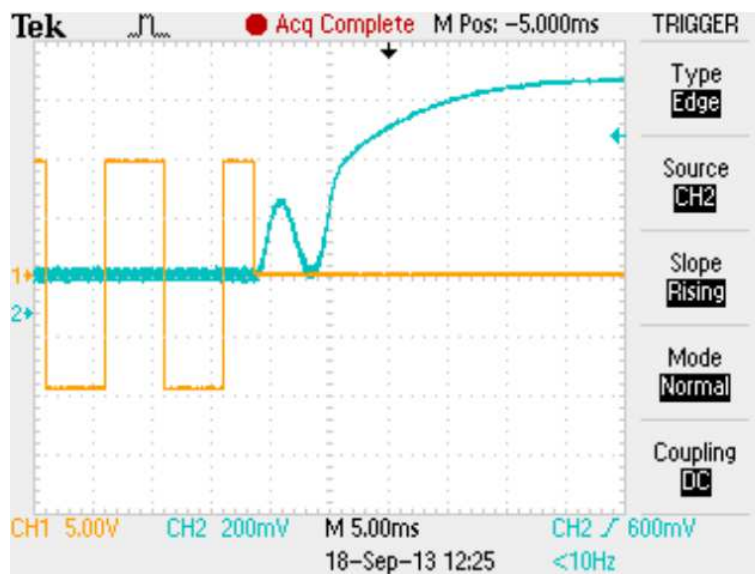
3.4.1 Meritve

Merili smo čase zapiranja in zakasnitve zaslonke ter prepustnost laserskega žarka. Časi odpiranja in zakasnitve pri odpiranju zaslonke so znašali okoli 10 ms in 5 ms. Prepustnost v odprtem stanju za polarizirano zaslonko je bila 83%, za nepolarizirano pa 80%. Do zakasnitve pri zapiranju pride, ker molekule tekočih kristalov potrebujejo nekaj časa, preden se vse obrnejo v smeri električnega polja. Večje kot je električno polje, večji je navor, ki na te molekule deluje, in zakasnitve so temu primerno krajše. Zakasnitve pri odpiranju pa so neodvisne od električnega polja in ko tega ni, potrebujejo molekule tekočega kristala določen čas, da se povrnejo v začetno stanje. Pri polarizirani zaslonki smo merili tudi čase, ko je bil na celici iz tekočih kristalov že majhen pravokoten signal. Poskusili smo namreč zviševati napetost, ko so bile dipolarne tekočerkristalne molekule že malce poravnane v smeri električnega polja. Tako smo izmerili nekoliko krajše čase zapiranja in zakasnitve. Meritve so bile opravljene le enkrat. Ocenjene sistematične napake so prikazane na grafih.

Na Sliki 3.3 in Sliki 3.4, so prikazane dejanske meritve iz osciloskopa pri zapiranju in odpiranju polarizirane tekočerkristalne zaslonke.



Slika 3.3: Prikazana meritev za čas zapiranja in zakasnitev pri zapiranju polarizirane zaslonke.



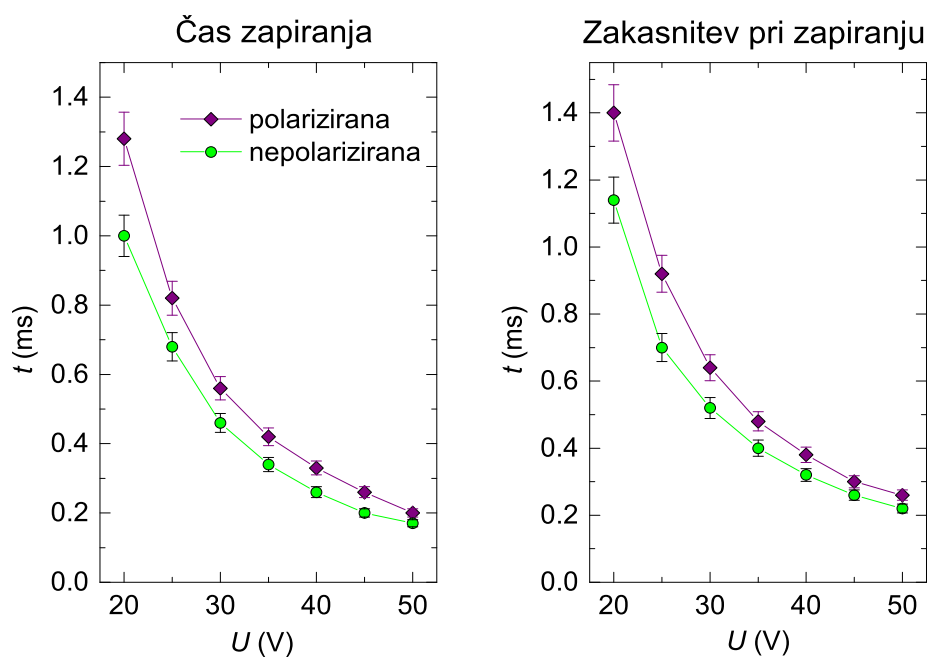
Slika 3.4: Prikazana meritev za čas odpiranja in zakasnitev pri odpiranju polarizirane zaslonke.

Napetost (V)	Polarizirana				Nepolarizirana	
	Čas zapiranja (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (ms)	Čas zapiranja (zač. sig) (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (zač. sig) (ms)	Čas zapiranja (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (ms)
20	1.28	1.40	1.36	1.44	1.00	1.14
25	0.82	0.92	0.80	0.78	0.68	0.70
30	0.56	0.64	0.54	0.56	0.46	0.52
35	0.42	0.48	0.40	0.50	0.34	0.40
40	0.33	0.38	0.31	0.30	0.26	0.32
45	0.26	0.30	0.24	0.24	0.20	0.26
50	0.20	0.26	0.21	0.18	0.17	0.22

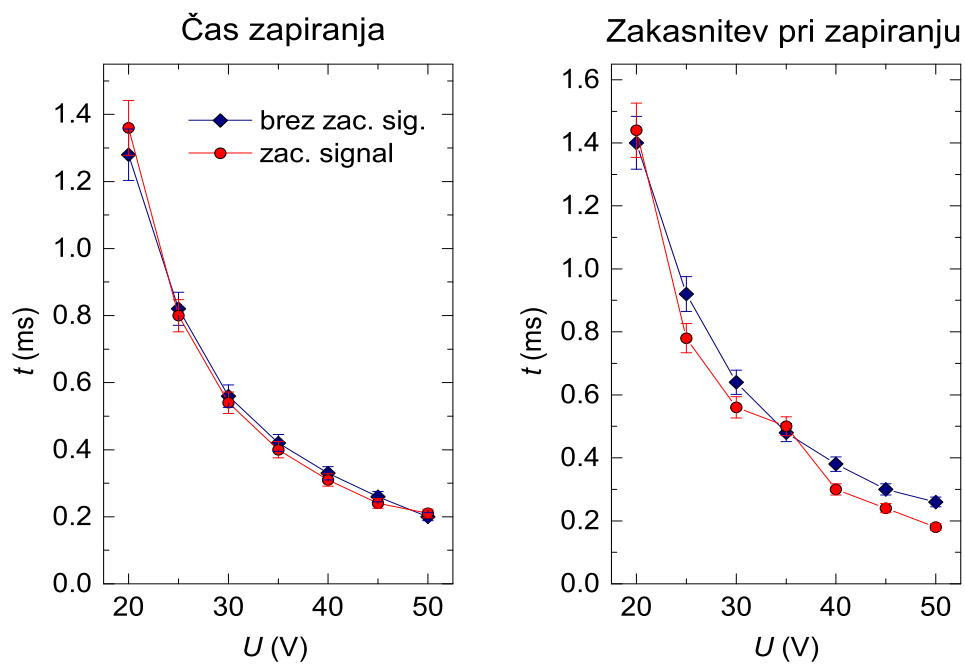
Tabela 3.1: Časi polarizirane in nepolarizirane zaslonke na osnovi tekočega kristala.

	Polarizirana	Nepolarizirana
Napetost (V)	Prepustnost (%)	
20	1.47	0.14
25	1.22	0.14
30	1.15	0.07
35	1.09	0.00
40	0.93	0.00
45	0.85	0.00
50	0.84	0.00

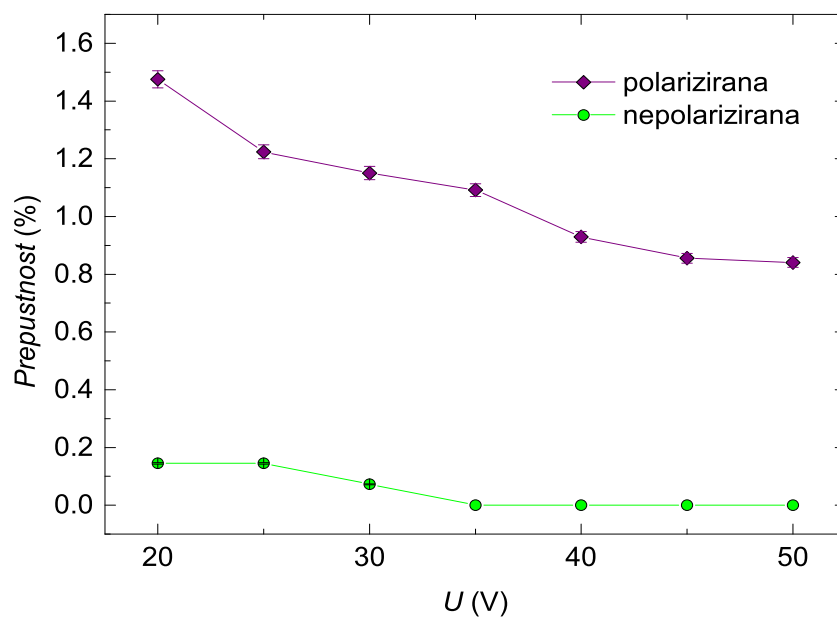
Tabela 3.2: Prepustnost nepolarizirane in polarizirane zaslonke v zaprtem stanju.



Slika 3.5: Časi zapiranja (levo) in časi zakasnitve pri zapiranju (desno) v odvisnosti od napetosti pri polarizirani (celici z polarizatorjem in analizatorjem) in nepolarizirani zaslonki (celici z dodanim analizatorjem).



Slika 3.6: Časi zapiranja (levo) in časi zakasnitve pri zapiranju (desno) v odvisnosti od napetosti pri polarizirani zaslonki ob začetnem signalu ter brez začetnega signala.



Slika 3.7: Prepustnost obeh zaslonk v zaprtem stanju.

3.4.2 Obravnava

Ko povečujemo napetost na tekočerkristalni celici, se čas zapiranja laserskega žarka krajša, kar je pričakovano, saj v večjem električnem polju na molekule tekočega kristala deluje večji navor. Do 35 V časi hitro padajo, potem se počasi ustalijo. Lahko predvidevamo, da nad 50 V ne bi dosegli bistveno krajših časov zapiranja.

Kot lahko vidimo, sta čas prekinitve in čas zakasnitve v primeru nepolarizirane zaslonke opazno krajša kot pri polarizirani zaslonki. Tudi ko že imamo nek začetni signal na zaslonki, so časi primerljivi. Problem je seveda pri času odpiranja zaslonke. Ko električnega polja ni več, molekule tekočega kristala potrebujejo nekaj časa, da pridejo nazaj v osnovno stanje. Na to nimamo vpliva, zaradi česar so zaslonke na osnovi tekočega kristala praktično neuporabne za hitra odpiranja

Največja razlika med polarizirano in nepolarizirano verzijo tekočerkristalne celice je v prepustnosti. Tudi pri tej karakteristiki je zaslonka narejena iz tekočerkristalne celice brez vgrajenega analizatorja veliko boljša od zaslonke, ki ima vgrajen polarizator in analizator. Razlog mogoče tiči v tem, da sta analizator ter polarizator v polarizirani zaslonki slabo postavljena ali pa, da je polarizacija slaba. V primeru nepolarizirane zaslonke je analizator samostojen in ga lahko nastavljamo neodvisno od tekočerkristalne celice.

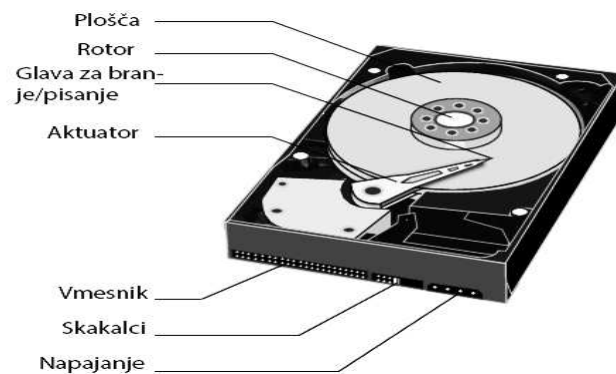
Poglavje 4

Zaslonka na osnovi trdega diska

4.1 Zgradba trdega diska

Trdi disk je zgrajen iz vrteče se aluminijaste ali steklene plošče prevlečene s tanko plastjo magnetnega materiala. Digitalno informacijo kodiramo na to plast, s tem ko spreminjamo smer poravnave magnetizacije v majhnih delih te plasti. Branje informacije pa je le odčitavanje smeri poravnave. Za čim hitrejši dostop do informacij je pomembna čim večja kotna hitrost plošče (tipično 7200 vrtljajev na minuto), pa tudi čim večja hitrost ročice aktuatorja. Najpomembnejša pa je točna pozicija ročice nad ploščo, da zapišemo oz. beremo pravo informacijo. Pri normalnem obratovanju je ta pozicija natančna na 100 nm [6].

Aktuator je tisti del, ki upravlja ročico. Ročica ima na eni strani magnetno glavico, s katero bere informacije, na drugi strani pa ima tuljavico. Ta je postavljena bodisi med dva permanentna magneta, bodisi je en permanentni magnet postavljen pod tuljavico. Profil magneta in tuljavice je tak, da ko pošljemo tokovni sunek skozi tuljavico, se bo ročica premaknila v eno ali drugo stran glede na smer toka. Večji kot je sunek, hitrejša bo, kar tudi potrebujemo za čim hitrejšo zapiranje oziroma odpiranje žarka. Za sestavo zaslonke na osnovi trdega diska potrebujemo le aktuator in žični del, ki prenese tok na tuljavico, ne da bi po nepotrebnem dodajali nove žice.



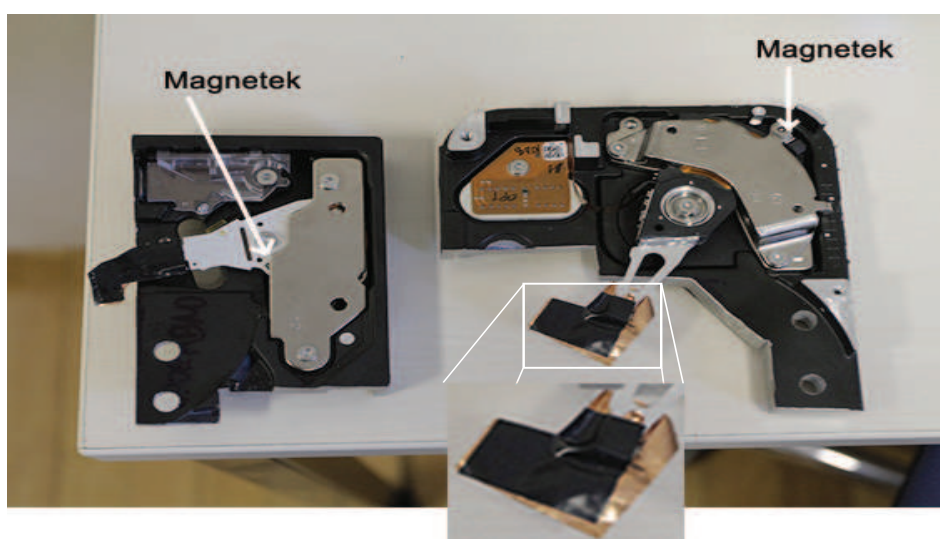
Slika 4.1: Zgradba in komponente trdega diska.

4.2 Zgradba hitre zaslonke

Ker je ročica aktuatorja zelo hitra, jo lahko uporabimo kot hitro zaslonko. Pri tem smo naredili naslednje korake:

- Odstranili smo vgrajeno vezje ter vseh izhodov.
- Odstranili smo ploščo in magnetne glavnice na koncu ročice aktuatorja.
- Odrezali smo trdi disk tako, da je ostal le del z žicami in aktuatorjem ter del za pritrditev na nastavke.
- Zvrtali smo dve luknji za pritrditev na nastavke, ki so vpeti na optično mizo.
- Prispajkali smo dva pina na žički, ki upravljata tuljavico.
- Na ročico aktuatorja smo zalepili tanko bakreno folijo, ki služi kot neprepustna ovira za laserske žarke.

Pri snovanju prototipa zaslonke na osnovi ročice aktuatorja iz trdega diska je potrebno vzeti v obzir več stvari, kot je na primer absorpcija vibracij. Ko se namreč ročica premakne iz ene lege v drugo, fizično trči ob steno in s tem prenese vibracije na trdi disk, na optično mizo in, kar je najhuje, na ročico, ki se potem lahko odbije in žarek za mikrosekundo prepusti. Nekaj pristopov za zmanjšanje odboja in vibracij je v razdelku 4.3. Druga stvar je položaj žarka glede na ročico. Najprimernejši položaj žarka bi bil v sredinski legi ročice, saj bi bilo tam zapiranje in odpiranje žarka kar se da enako hitro. Zaradi velikosti diska in pomanjkanja nastavkov je žarek v praksi od sredine odmaknjen proti eni izmed skrajnih leg ročice aktuatorja (odvisno od diska). Pri teh diskih ročico aktuatorja vleče na eno stran tudi magnetek, kar pripomore k višjim hitrostim v tisto smer. Pri trdih diskih služi magnetek temu, da ročico drži v skrajni legi, ko ni uporabljena. Položaj tega magnetka kaže Slika 4.2. Vidi se tudi ovira iz tanke bakrene folije, na kateri je prilepljen črni lepilni trak, da se čim manj svetlobe odbija v okolico.



Slika 4.2: Zgradba dveh zaslonk na podlagi diskov Maxtor 40 GB (levo) in Seagate 8 GB (desno).

4.2.1 Mehanski model ročice aktuatorja

Tukaj je opisan preprost mehanski model ročice aktuatorja.

Ko po električnem vodniku, ki je v magnetnem polju, teče električni tok, se pojavi sila na vodnik, ki je pravokotna na smer električnega toka in magnetnega polja. Tej sili pravimo Lorentzova sila, ki jo opisuje enačba

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B}.$$

Kvadratno tuljavo s stranico a in N ovoji, po kateri teče tok I , postavimo v magnetno polje permanentnega magneta, kot kaže Slika 4.3. Na desni strani tuljave kaže magnetno polje navzdol, na levi pa navzgor.

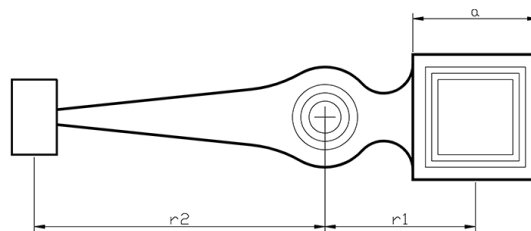


Slika 4.3: Tuljavica nad permanentnim magnetom, v ohišju.

Ker je tuljavica pravokotna na magnetno polje, lahko zgornjo enačbo poenostavimo v $F = INLB$, kjer je $L = 2a$. Po Newtonovem zakonu za vrtenje sledi:

$$M = Fr_1 = J\alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{2INaBr_1}{J},$$

kjer je r_1 razdalja med tuljavo in osjo vrtenja ročice aktuatorja, J vztrajnostni moment ročice in α kotni pospešek.



Slika 4.4: Razdalja od osi tuljavnice do osi vrtenja r_1 , razdalja od osi vrtenja do "zaslonke" r_2 ter dolžina stranice tuljavnice a .

Vztrajnostni moment ročice lahko izračunamo, če imamo podano maso ročice in če poznamo težišče ter geometrijo ročice. Obravnavajmo ročico, kot da je sestavljena iz valja, kvadratne plošče oddaljene od osi in ozke enakokrake trikotne ploščice. Formule vztrajnostnih momentov so:

$$J_{votel\ valj} = \frac{1}{2}m_v(R^2 + r^2),$$

kjer je r notranji polmer, R pa zunanji polmer.

$$J_{kvadratna\ plošča} = \frac{1}{6}m_k d^2 + m_k r_1^2,$$

kjer je d dolžina stranice, r_1 pa razdalja od osi vrtenja do osi tuljavice.

$$J_{ozek\ enakokrak\ trikotnik} = \frac{1}{6}m_t h^2,$$

kjer je h višina trikotnika.

Vztrajnostni moment ročice aktuatorja je vsota vseh vztrajnostnih momentov sestavnih delov. Izmerjeni podatki so naslednji:

$m_v = 10,5$ g, $r = 4,2$ mm, $R = 10,5$ mm, $m_k = 3,1$ g, $d = 25$ mm, $r_1 = 20$ mm, $m_t = 0,6$ g, $h = 41$ mm. Skupni vztrajnostni moment ročice je

$$J_{skupni} = J_{votel\ valj} + J_{kvadratna\ plošča} + J_{trikotna\ plošča} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^2.$$

Predpostavimo, da je sila konstantna, torej je kotni pospešek konstanten. Iz $\varphi = \frac{1}{2}\alpha t^2$ dobimo čas t , ki ga potrebuje ročica za zasuk do ene izmed obeh skrajnih leg. Kot φ izmerimo.

Tako lahko preko $\omega = \alpha t$ in $v = \omega r_2$ (kjer je r_2 razdalja med "zaslonko" in osjo vrtenja), dobimo približno hitrost ročice aktuatorja.

Za napetost vzamemo $U = 30$ V, upor tuljavice je $R = 10 \Omega$, iz obeh vrednosti dobimo po Ohmovem zakonu tok $I = 3$ A. Število ovojev je $N = 238$, s Hallovo sondo smo izmerili gostoto magnetnega polja $B = 0,47$ T, dolžina stranice tuljavice je $a = 17$ mm. Kot, ki ga ročica opravi je $\varphi = 30^\circ$, razdalja od osi vrtenja do zaslonke je $r_2 = 46$ mm.

$$\alpha \approx 95000 \text{ s}^{-2},$$

$$t = \sqrt{\frac{2\varphi}{\alpha}} = 3,3 \text{ ms},$$

tako dobimo

$$v = \omega r_2 = \alpha t r_2 \approx 14 \text{ m/s}.$$

4.2.2 Izboljšanje zgradbe

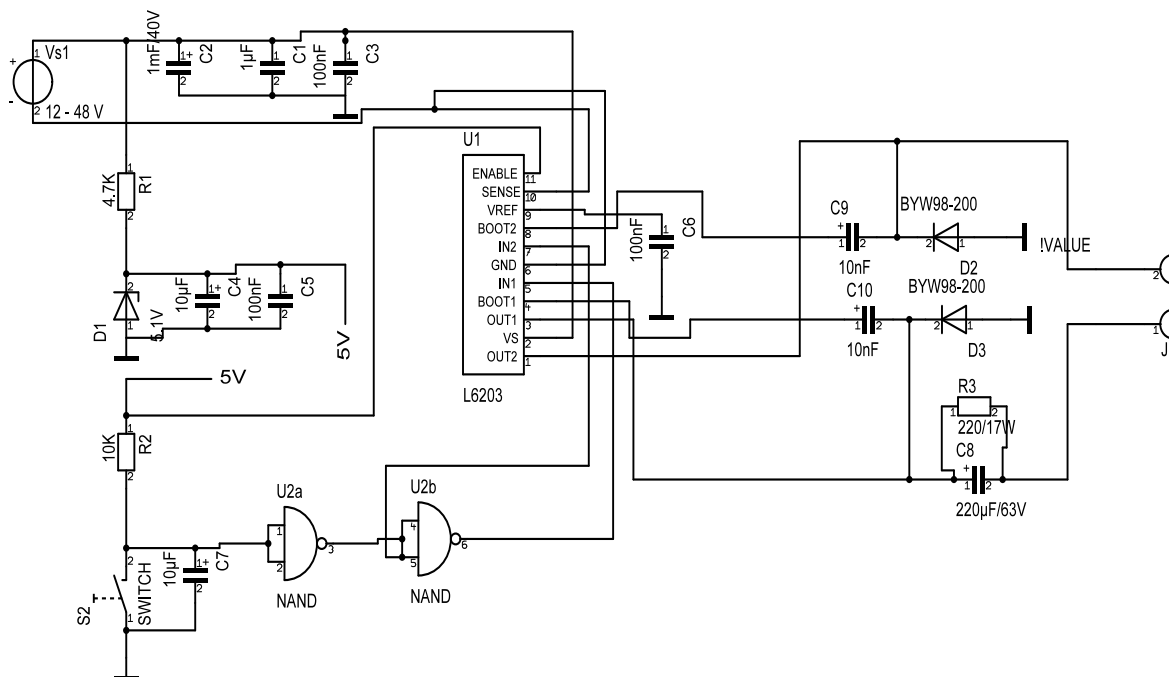
Pri izdelavi zaslonke je možnih veliko izboljšav, ki pripomorejo k višji hitrosti. Pomembna je čim nižja masa ročice in ovire, saj se tako zmanjša vztrajnostni moment in hitrost poveča. Pri nekaterih diskih smo zato odstranili nepotrebne dodatke na ročicah. Posebno pozornost smo posvetili tudi pritrditvi zaslonke na nosilec in na optično mizo, saj bi vsakršna vibracija lahko vplivala na hitrost.

Kar se tiče velikosti, je 3,5 inčni disk velik in lahko ovira druge elemente na optični mizi. Manjši disk bi prispeval k večji okretnosti in morda višji hitrosti. Iz literature je znan primer zelo hitrih zaslonk na osnovi diskov iz iPodov [7].

4.3 Zgradba vezja

Če želimo, da je ročica aktuatorja čim hitrejša, potrebujemo tudi čim večji tokovni sunek skozi tuljavico. Najbolj enostavno lahko to naredimo z vezjem [10], ki uporablja RC člen za hitro izpraznitev naboja na kondenzatorju. Tako dobimo velik tokovni sunek, ki ga požene skozi tuljavico. Da ročica ostane v eni izmed skrajnih leg, pa potrebujemo nek majhen tok skozi tuljavico. Ker je potrebno, da gre tokovni sunek v obe smeri, uporabimo tako imenovani H-bridge čip [8], ki spremeni smer toka glede na stanje kontrolnega vhoda. To stanje lahko spreminjamo z ročnim stikalom ali s TTL logiko (transistor-transistor logic), ki uporablja tranzistorje za logična vrata ter ojačanje. V obeh primerih gre za dve stanji, ko dobi čip informacijo 1 ali 0. V primeru ročnega stikala ne moremo kontrolirati hitrosti, zato tudi ne moremo ublažiti odboja ročice in morebitnih vibracij, ki ob tem nastanejo. V primeru TTL logike je to možno narediti s primerno sekvenco, ki ročico pravočasno ustavi (hitra sprememba smeri toka), preden ta trči ob skrajni rob.

Na Sliki 4.5 je prikazana shema krmilnega vezja. Na skrajni levi strani priključimo napajanje med 12 in 48 V, na skrajni desni pa imamo kontakta, ki se priključita na zaslonko. V sredini je čip, ki upravlja smer toka, RC člen pa je viden desno spodaj.



Slika 4.5: Električna shema vezja, ki smo ga uporabljali za zaslone na osnovi trdega diska, izrisana s programom Target 3001! [9].

4.4 Postopek meritve

Postavitev je prikazana v razdelku 2.2 na Sliki 2.2. Podobna je kot pri tekočerkristalnih zaslonkah, le da smo tekoči kristal in analizator zamenjali z zaslonko na podlagi trdega diska ter dodali vezje in napajalnik. V tem primeru orientacija laserja ni bistvena, saj polarizacija ni pomembna. Ker pa je fotodioda še vedno zabita, je potrebno uporabiti atenuator.

Nastavitve so večinoma enake tistim pri tekočerkristalnih zaslonkah, le žarek je atenuiran za 51%, maksimum je pri 680 mV in ozadje je veliko 124 mV. Tukaj nismo uporabili napetostnega ojačevalca, ampak napajalnik.

Osciloskop je nastavljen podobno kot pri zaslonki na osnovi tekočih kristalov. Merili smo napetosti od 12 V do 30 V. To je napetost, potrebna za napajanje krmilnega vezja.

Pri obeh zaslonkah znamke Seagate je žarek na zgornji poziciji, torej mora za zapiranje aktuatorska ročica premagati še silo magnetka, ki ročico drži na spodnjo stran. Pri zaslonki znamke Maxtor, pa je žarek na spodnji strani, v tem primeru magnetek pomaga pri zapiranju.

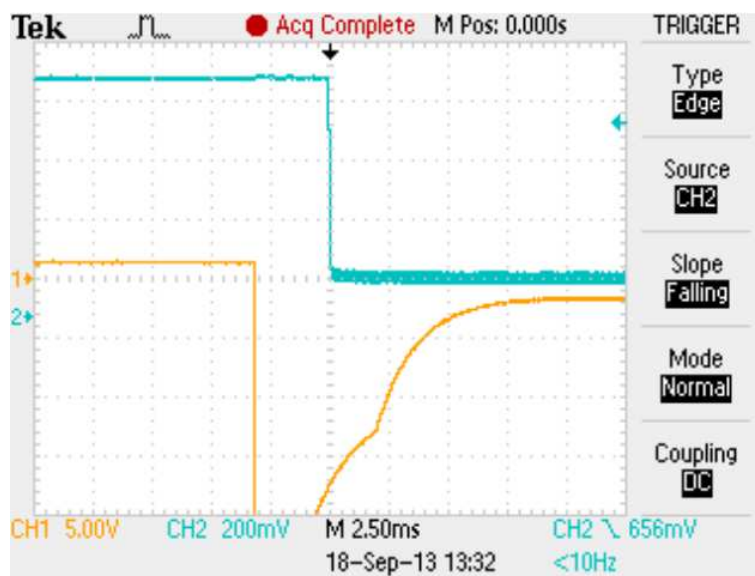
Vsako zaslonko smo merili trikrat, da smo dobili povprečje ter napake.

Za protokol merjenja časov padca in dviga ter zakasnitve glej razdelek 2.3.

4.5 Rezultati

4.5.1 Meritve

Testirali smo tri zaslone, dve skoraj enaki, eno drugačno. Na Sliki 4.6 je prikazana dejanska meritev zapiranja zaslone, meritev odpiranja zaslone je podobna, le predznak signala je nasproten. Spodaj so tabele in grafi z rezultati. Naveden je povprečen čas treh meritev, napake so prikazane na grafih.



Slika 4.6: Prikazana meritev za čas zapiranja in zakasnitve pri zapiranju pri zaslonki na podlagi trdega diska Seagate 40 GB.

Napetost (V)	Tok (mA)	Čas zapiranja (ms)	Čas odpiranja (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (ms)	Zakasnitev pri odpiranju (ms)
12	50	0.217	0.210	7.13	4.08
18	70	0.153	0.153	5.33	3.22
25	120	0.123	0.123	4.27	2.67
30	140	0.112	0.102	3.77	2.40

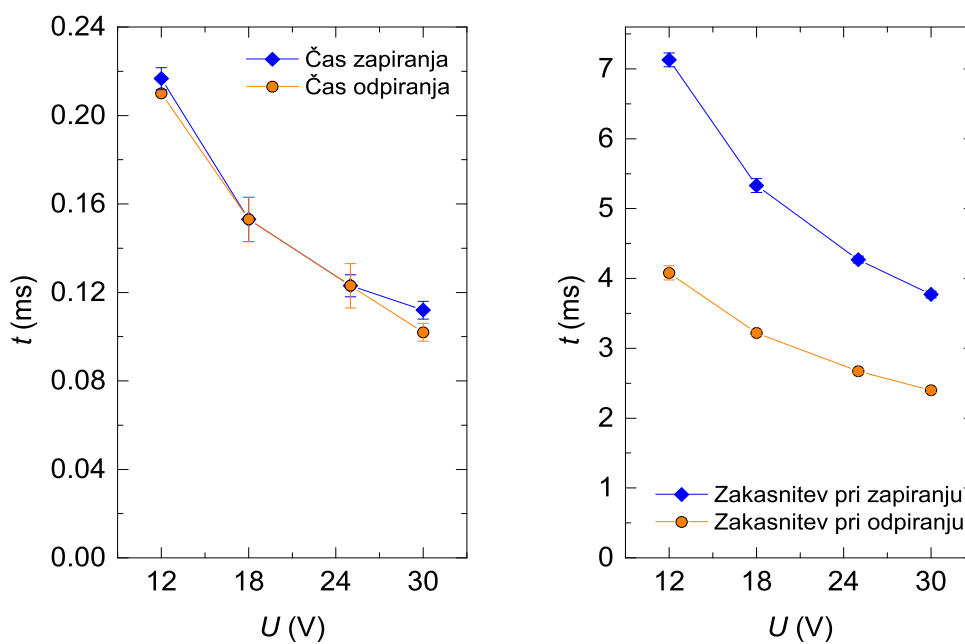
Tabela 4.1: Prva zaslonka na podlagi trdega diska znamke Seagate 20 GB.

Napetost (V)	Tok (mA)	Čas zapiranja (ms)	Čas odpiranja (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (ms)	Zakasnitev pri odpiranju (ms)
12	50	0.233	0.217	8.60	4.67
18	70	0.163	0.163	6.15	3.67
25	120	0.120	0.127	4.90	3.07
30	140	0.105	0.111	4.40	2.78

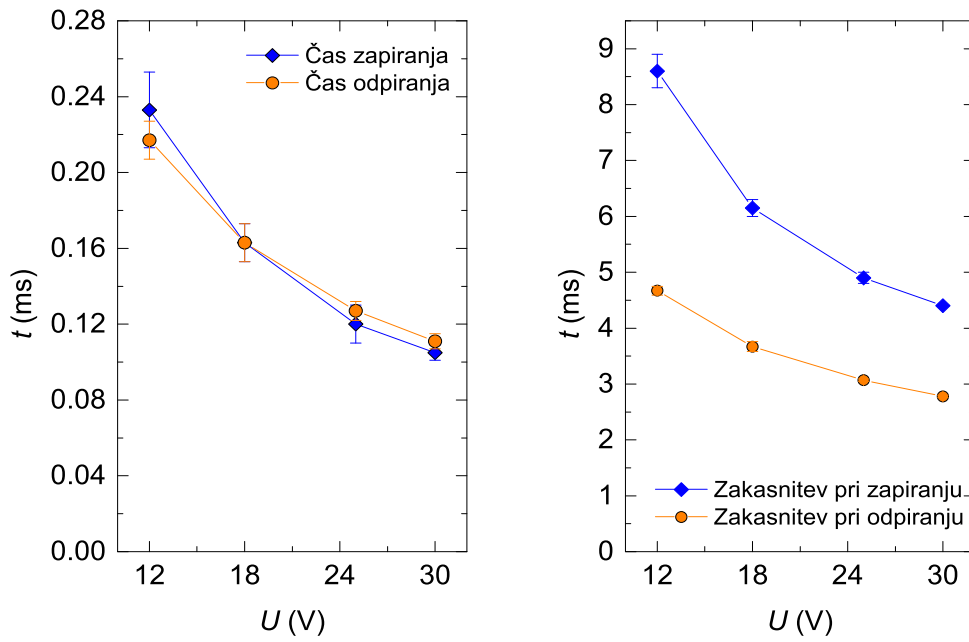
Tabela 4.2: Druga zaslonka znamke Seagate 8 GB.

Napetost (V)	Tok (mA)	Čas zapiranja (ms)	Čas odpiranja (ms)	Zakasnitev pri zapiranju (ms)	Zakasnitev pri odpiranju (ms)
12	40	0.123	0.440	8.47	13.07
18	60	0.100	0.293	6.57	9.52
25	100	0.080	0.230	5.75	7.77
30	120	0.076	0.203	5.32	7.10

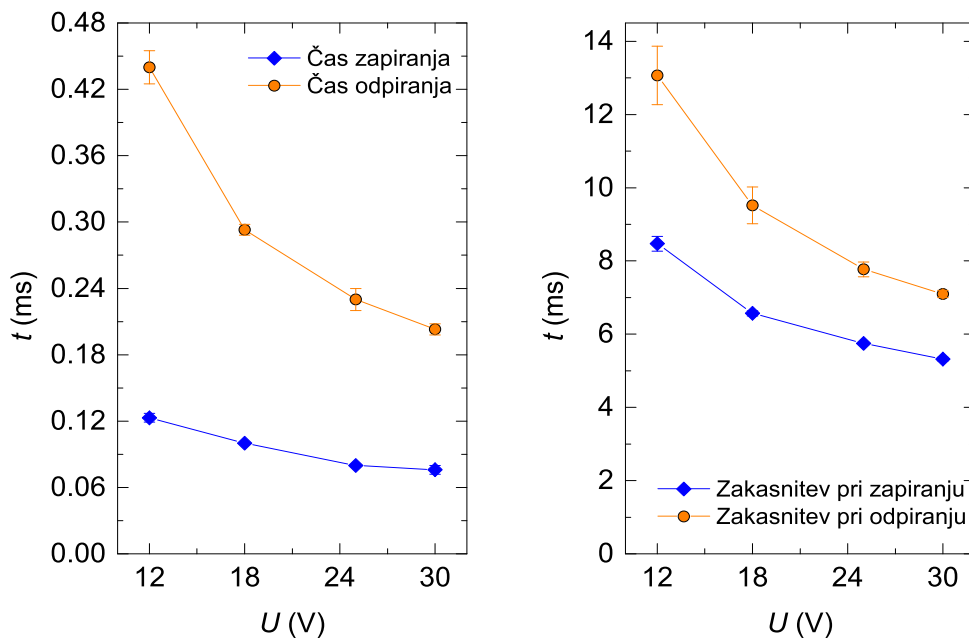
Tabela 4.3: Zaslonka znamke Maxtor 40 GB.



Slika 4.7: Časi zapiranja in odpiranja ter zakasnitev v odvisnosti od napetosti pri prvi zaslonki.



Slika 4.8: Časi zapiranja in odpiranja ter zakasnitev v odvisnosti od napetosti pri drugi zaslonki.



Slika 4.9: Časi zapiranja in odpiranja ter zakasnitev v odvisnosti od napetosti pri tretji zaslonki.

4.5.2 Obravnava

Z višanjem napetosti na krmilnem vezju se tudi časi zapiranja in odpiranja zaslonke krajšajo. Iz grafov je razvidno, da napetosti višje od 30 V ne bi bistveno skrajšale časov. Vidimo lahko, da je med 12 V in 18 V največja razlika v časih zapiranja in odpiranja ter pri zakasnitvah. To nam pove, da je za najmanjšo napetost, ki jo dovajamo krmilnemu vezju, dobro izbrati 18 V.

Pri prvi in drugi zaslonki na osnovi trdega diska so časi zapiranja in odpiranja približno enaki, saj sta tudi trda diska skoraj enaka. Pri tretji zaslonki so časi zapiranja krajši in časi odpiranja daljši, zakasnitve pri zapiranju in odpiranju pa so daljše. Pomemben podatek je tudi, da so časi zakasnitev za en red manjši od časov zapiranja in odpiranja. Zakasnitve pri zapiranju so celo krajše od zakasnitev pri odpiranju, kar je ravno obratno od ostalih dveh zaslonk. Razlog tiči predvsem v zgradbi zaslonke in poziciji laserskega žarka. V eni izmed obeh skrajnih leg je namreč magnetek, ki zadržuje ročico aktuatorja. Ker ima magnetek velik doseg, se to pozna tudi na hitrosti ročice aktuatorja. Pri prvih dveh zaslonkah poteka laserski žarek bližje skrajni legi, kjer ni magnetka, pri tretji pa je zaradi omejene geometrije bližje legi ročice, ki čuti magnetek.

V okviru te zaključne naloge krmilno vezje nismo nadgradili s TTL logiko, kar bi sicer zmanjšalo vibracije in morebitni odboj ročice od skrajne lege, a bi se pri tem časi odpiranja in zapiranja lahko podaljšali.

Če je torej pri najhitrejši zaslonki bil čas zapiranja $76 \mu\text{s}$, je hitrost take zaslonke 13 mm/ms , kar je več kot je uspelo raziskovalni skupini iz Melbourn [10], ki je dosegla 10 mm/ms .

4.5.3 Primerjava obeh tipov zaslonk

V Tabeli 4.4 lahko vidimo primerjavo med zaslonko na osnovi trdega diska Seagate 20 GB in zaslonko na osnovi nepolarizirane tekočerkristalne celice. Zaslonki primerjamo pri najvišjih napetostih na krmilnem vezju oziroma na tekočerkristalni celici (30 V in 50 V).

	Zaslonka na osnovi trdega diska	Zaslonka na osnovi tekočih kristalov
Čas zapiranja (ms)	0.112	0.170
Čas odpiranja (ms)	0.102	10
Zakasnitev pri zapiranju (ms)	3.77	0.52
Zakasnitev pri odpiranju (ms)	2.40	5

Tabela 4.4: Primerjava obeh tipov zaslonk.

Kot lahko vidimo, se je izkazalo, da je zaslonka na osnovi tekočih kristalov boljša v krajšem času zakasnitve pri zapiranju. Ta čas pa lahko dovolj dobro kontroliramo tudi pri zaslonkah na osnovi trdega diska. Prednost tekočerkristalne zaslonke je tudi v tem, da čas zapiranja in odpiranja ni odvisen od premera laserskega žarka. Za žarek s premerom 1,6 mm bi tekočerkristalna zaslonka že bila hitrejša. V vseh ostalih karakteristikah je zaslonka na osnovi trdega diska boljša.

Poglavje 5

Zaključek

Ugotovili smo, da sta obe vrsti zaslonk lahko zelo hitri, vendar pa ima zaslonka na osnovi trdega diska več prednosti.

Poleg tega, da je hitrejša, lahko pri taki zaslonki uporabljamo laserje visokih moči ter različnih valovnih dolžin, medtem ko je pri tekočerkristalni celici potrebno paziti na to, kakšno svetlobo izberemo. Pri zaslonki na osnovi tekočih kristalov je problem tudi s časom odpiranja, saj nanj ne moremo vplivati.

Glede na to, da so komercialne zaslonke zelo drage, je zaslonka na osnovi trdega diska idealna rešitev. Z njo lahko dosežemo čase zapiranja in odpiranja, ki so primerljivi z najkvalitetnejšimi hitrimi zaslonkami, je pa veliko cenejša. Z razvojem dobrega krmilnega vezja, ter izboljšanim dizajnom same zaslonke, bi se dalo doseči še višje hitrosti.

Glavni rezultat te zaključne naloge je, da je možno relativno enostavno zgraditi hitre in poceni zaslonke, ki so primerne tudi za zahtevne eksperimente, kot so hladni atomi. Na Institutu Jožef Stefan se namreč postavlja laboratorij za Bose-Einsteinovo kondenzacijo cezijeveh atomov [11]. Pri tem se bo uporabilo večje število zaslonk, ki smo jih razvili v okviru te zaključne naloge.

Literatura

- [1] R. E. Scholten, L. P. Maguire, S. Szilagyi, *High performance laser shutter using a hard disk drive voice-coil actuator*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3077–3078 (2004).
- [2] <http://www.balder.si>
- [3] P. J. Collings, *Liquid Crystals: Nature's Delicate Phase of Matter*, Adam Hilger, Bristol, 1990.
- [4] M. Ambrožič, *Prikazovalniki s tekočimi kristali*, Vakumist **14/4**, 11-14 (1994).
- [5] Boulder Nonlinear Systems, *Optical shutters*, 2012.
- [6] T. Hara and Y. Sasaki, *Dual-stage actuator for hdd achieving high-accuracy positioning and wide-bandwidth servo control*, Toshiba Rev. **66**, 60-63 (1996).
- [7] P. Lebel, D. Mitchell. *Ultrafast mechanical shutters for laser cooling applications: The iShutter system*, Applied Science 479, University of British Columbia, 2008.
- [8] STMicroelectronics, *L6203 data sheet*, 2003.
- [9] <http://www.ibfriedrich.com>
- [10] R. E. Scholten, *Enhanced laser shutter using a hard disk drive rotatory voice-coil actuator*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 026101 (2007).
- [11] <http://ultracool.ijs.si>