

ŠOLSKI CENTER VELENJE  
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA  
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

## **VRSTIČNI TUNELSKI MIKROSKOP**

Tematsko področje: Elektrotehnika, elektronika in robotika

Avtor:  
Matic Knap, 3. letnik

Mentor:  
Zvone Cencen, dipl. inž. elektrotehnike

Velenje, 2010

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje.

Mentor: Zvone Cencen, dipl. inž. elektrotehnike

Datum predavitve:

## **KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

ŠD ŠCV-ERŠ, 2009/2010

KG STM/ mikroskop/ nano/ atom/ tunelski/ tok

AV KNAP, Matic

SA CENCEN, Zvone

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

ZA Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

LI 2010

IN VRSTIČNI TUNELSKI MIKROSKOP

TD RAZISKOVALNA NALOGA

OP VII, 25, 21

IJ sl

JI sl/en

AI Nanotehnologija je znanost, ki se ukvarja s snovjo na ravni molekul in atomov. Dandanes je ena najpomembnejših znanosti in se vse bolj uporablja na vseh področjih medicine, industrije, elektronike ipd. Omogoča nam, da se "igramo" z atomi, jih premikamo, sestavljamo različne strukture, opazujemo površino materiala na atom natančno.

Raziskava je zajemala izdelavo modela vrstičnega tunelskega mikroskopa, ki nam omogoča analizo površin z merjenjem tunelskega toka, izdelanega s ceneno elektroniko, ter enostavno konstrukcijo. Izbrani inštrumentacijski ojačevalniki ter način merjenja tunelskega toka, so se pokazali kot neučinkoviti, saj je ojačanje šuma preveliko in je meritev toka praktično nemogoča. Konstrukcija je izdelana iz jekla, katere glavni elementi so piezoelektrični aktuatorji, postavljeni v XYZ koordinatah, ki premikajo konico za branje površine. Konica je cenena tanka nitka iz volframa, ki določa ločljivost gledanja površine.

Princip mikroskopiranja konstantne višine konice, se je izkazal za bolj učinkovitega od konstantnega toka, saj je napaka pretvorbe A/D pretvornika večja od napake digitalnega osciloskopa. Pravilnosti principa mikroskopiranja nismo uspeli potrditi, saj je potrjevanje ali ovračanje brez uspešne meritve toka nesmiselno.

Mikroskopiranje na ravni atomov nam ni uspelo, saj smo naredili kar nekaj napak in pomanjkljivosti pri razvoju elektronike, katerih nismo uspeli odpraviti. Izkazalo se je, da bi moral biti večji poudarek na meritvi toka in ustrezno izbranih inštrumentacijskih ojačevalnikih. Kljub temu smo uspeli dokazati, da je sistem mogoč in da je večino elementov za nanotehnologijo moč dobiti v prosti prodaji.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

CX stm / nano / microscope / tunneling / piezo

AU KNAP, Matic

AA CENCEN, Zvone

PP 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

PB Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

PY 2010

TI SCANNING TUNNELING MICROSCOPE

DT secondary school research work

NO VII, 25, 21

LA sl

AL sl/en

AB Nanotechnology is a study of controlling the matter on an atomic and molecular scale. It is one of the most important sciences nowadays and it is used more and more in all the fields of medicine, industry, electronics, etc. It enables us to play with atoms, move them, put together different structures and observe the material surface on atomic scale.

The research covers the construction of the scanning tunneling microscope model which enables us the surface analysis. We measured the tunneling current with cheap electronics and simple construction. The selected instrumentation amplifiers and the principle of measuring the tunneling current were proved to be ineffective. The noise amplification is too high and the measurement of current is practically impossible.

The construction is made of steel. The main parts are piezoelectric actuators, positioned in XYZ coordinates. They move the surface reading tip. The thickness of the tip provides the surface resolution and is made of a thin wolfram's floss. The principle of microscoping with the constant tip height proves to be more efficient than the constant current principle because the error of A/D conversion is higher than the error of the digital oscilloscope.

The regularities of the microscoping principle could not be confirmed. The confirmation is pointless without the successfully measured tunneling current. Microscoping on an atomic scale failed due to some mistakes we had made and due to the drawbacks at the electronics development. We ran out of time to troubleshoot them. It turned out that we should have developed a more precise current measurement with properly selected instrumentation amplifiers. However, we succeeded in proving that the system is possible and that most of the parts for nanotechnology can be bought in ordinary stores.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA .....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION .....	IV
KAZALO VSEBINE .....	V
KAZALO SLIK .....	V

1. UVOD .....	1
2. VRSTIČNI TUNELSKI MIKROSKOP- STM .....	2
2.1 Princip delovanja .....	2
2.1.1 Tunelski pojav .....	2
2.2 Uporaba STM .....	3
2.3 Priprava konice STM .....	4
3. RAZVOJ PRINCIPA .....	5
3.1.1 Program .....	13
4. REZULTATI IN IZSLEDKI .....	14
4.1 Inštrumentacijski ojačevalniki <i>INA2126</i> so primerni za ojačanje tunelskega toka .....	14
4.2 Princip merjenja toka z osciloskopom in konstantne višine .....	15
5. RAZPRAVA .....	16
6. ZAKLJUČEK .....	16
7. ZAHVALA .....	16
8. PRILOGE .....	17
8.1 Tehniška dokumentacija konstrukcije .....	17
8.2 Shema vezja .....	22
8.3 Tiskanino vezje .....	23
8.4 Program .....	24
8.5 Slike Vrstičnega tunelskega mikroskopa .....	25
9. VIRI IN LITERATURA .....	27

## KAZALO SLIK

Slika 1: Kvantna korala .....	3
Slika 2: Konica .....	4
Slika 3: Konstrukcija z piezoelektričnimi aktuatorji .....	5
Slika 4: Shema STMa. ....	6
Slika 5: Mizica .....	6
Slika 6: Glava mikroskopa .....	7
Slika 7: Shema elektronskega vezja .....	8
Slika 8: Operacijski ojačevalnik .....	9
Slika 9: INA2126 .....	10
Slika 10: ATmega 32 .....	11
Slika 11: Pulzno širinska modulacija .....	12
Slika 12: Integrator z ojačanjem. ....	12
Slika 13: Blok shema programa .....	13



## 1. UVOD

Vzrok nastanka raziskovalne naloge je lastna želja po raziskovanju in odkrivanju nepoznanega. Zahtevne tehnologije materialov ter precizne izdelave izdelkov narekujejo potrebo po vpogledu v gibanje in obnašanje osnovnih delcev struktur materialov. Velikost teh je izredno majhna, manjša od valovne dolžine svetlobe, kar nam onemogoča mikroskopiranje z navadnim mikroskopom, ki deluje na principu optičnega fokusa. Princip mikroskopiranja, ki deluje na principu merjenja tunelskega toka med dvema delcema z različnimi električnimi potenciali, se imenuje vrstično tunelsko mikroskopiranje. Merjenje toka poteka po zaporednih lokacijah v vrsticah in stolpcih. Vrednosti meritve toka ter točna lokacija meritve nam podajajo reliefne točke površine materiala, s katerimi lahko določimo njegovo kemijsko strukturo. Mikroskopiranje ne zahteva posebnih pogojev in je omogočeno v večini plinov in tekočin.

Predmet raziskave je razvoj in izdelava idejne zasnove vrstično tunelskega mikroskopa. Za pomikanje po vrsticah so nameščeni piezoelektrični aktuatorji, krmiljeni z mikroprocesorjem. Tunelski tok je odvisen od velikosti napetosti med vzorcem in tipalom ter razdaljo med njima. Naloga mikroskopa je, da se pomika po vrsticah in ustrezno ojačuje tunelski tok za merjenje z osciloskopom.

Cilj raziskovalne naloge je razvoj principa vrstičnega tunelskega mikroskopiranja. Izdelava sklopov je cenena in preprosta, vendar je pravilna. Meritev toka poteka preko ojačane napetosti merilnega upora z inštrumentacijskimi ojačevalniki. Mikroprocesor samodejno pomika tipalo po stolpcih.

V uvodu smo predstavili sledeče hipoteze:

- Inštrumentacijski ojačevalniki so primerni za ojačanje tunelskega toka.
- Princip konstantne višine in merjenja toka z osciloskopom je primernejši kot princip konstantnega toka.
- Princip mikroskopiranja je pravilen.

## 2. VRSTIČNI TUNELSKI MIKROSKOP- STM

H. Rohrer in G. Binnig sta prva sestavila vrstični tunelski mikroskop. Z njim lahko raziskujemo površine na atomski skali (velikosti atoma), prav tako pa lahko z vrhunskimi instrumenti premikamo (manipuliramo) atome po površini. Vzorci morajo biti iz prevodnega oziroma polprevodnega materiala. Za dobro resolucijo tunelskega mikroskopiranja je sprejemljiva natančnost  $0,1 \text{ nm}$  za lokacijsko resolucijo in  $0,01 \text{ nm}$  za globinsko resolucijo. S tema resolucijama posnamemo posamezne atome materiala. Mikroskopiranje ne poteka nujno v ultra visokem vakumu ampak tudi v zraku, vodi in ostalih kapljevinah in plinih. Poteka v temperaturnem razponu blizu absolutne ničle ( $0^\circ\text{K}$ ) do nekaj sto stopinj celzija. Današnji najbolj precizni mikroskopi večinoma delujejo pod visokimi vakumi, saj so tako veliko bolj natančni. Vse več se pojavlja amaterskih izdelovalcev vrstičnih tunelskih mikroskopov, kar prinaša občutne izboljšave tudi na profesionalni ravni [1].

### 2.1 Princip delovanja

Glavna komponenta tunelskega mikroskopa je t.i. glava, v kateri so piezo cevke, ki služijo za natančno premikanje konice. Konica je tako ostra, da lahko trdimo, da je na njenem koncu en sam atom. Konico približamo vzorcu, med njima pa vzpostavimo napetost (od  $mV$  do nekaj  $V$ ). Velikost tunelskega toka je odvisna od razdalje med vzorcem in konico. Tok je odvisen od  $\sim e^{-d}$ , kjer je  $d$  širina vrzeli, tako da že majhna sprememba (nekaj  $pm$ ) pomeni merljivo spremembo. Kjer je največ elektronov, imamo velik tunelski tok, nasprotno imamo manjši tunelski tok, kjer je gostota manjša.

#### 2.1.1 Tunelski pojav

V Newtonovi mehaniki kinetična energija telesa ne more biti negativna. V kvantni mehaniki pa te možnosti ne moremo vnaprej izključiti. Pri potencialnem skoku dopustimo, da je energija pred skokom manjša kot po skoku ( $W < V$ ). Območje, desno od skoka, kjer je kinetična energija  $W_k = W - V$  negativna, je v Newtonovi mehaniki za delce popolnoma prepovedano. V kvantni mehaniki pa ni tako. A tudi v kvantni mehaniki ne moremo dobiti negativne kinetične energije. Vendar moramo upoštevati, da preživi delec na prepovedanem območju samo zelo kratek čas. V tem času polne energije ne moremo tako natančno izmeriti, da bi zanj dobili negativno vrednost. Konico vrstičnega tunelskega mikroskopa približamo kovinski površini na razdaljo nekaj nanometrov in tako ustvarimo potencialno plast s končno širino  $d$ . Elektroni se zaradi svoje dvojne narave lahko premikajo skozi oviro. V ravnovesju teče enak tok s konice na površino in obratno. Pravimo, da sta konica in površina v tunelskem stiku. Napetost med njima povzroči, da steče tunelski tok  $I$ , ki je pri dani napetosti  $U$  eksponentno odvisen od razdalje  $d$  [2].

$$I(d) \propto U \cdot e^{-C \cdot d} \quad (1)$$

Tunelski pojav v resnici zajema zahtevne enačbe ter transformacije, katerih v raziskovalno nalogo nismo vključili, saj presegajo srednješolsko znanje.

## 2.2 Uporaba STM

Vrstični tunelski mikroskop se uporablja za:

### - Slikanje z atomsko resolucijo

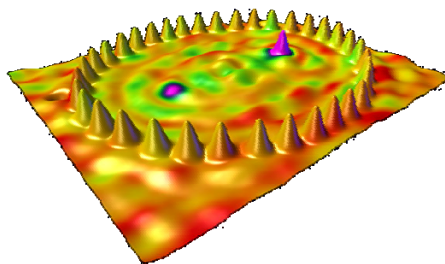
Z namensko sestavljenimi instrumenti lahko vidimo celo notranjo strukturo enostavnih molekul in kemične vezi [3].

### - Tunelska spektroskopija

Tunelska spektroskopija je merjenje električne karakteristike tunelskega stika, merimo tunelski tok v odvisnosti od napetosti med vzorcem in konico. S takšno meritvijo določimo gostoto elektronskih stanj [3].

### - Izdelava in študij nanostruktur

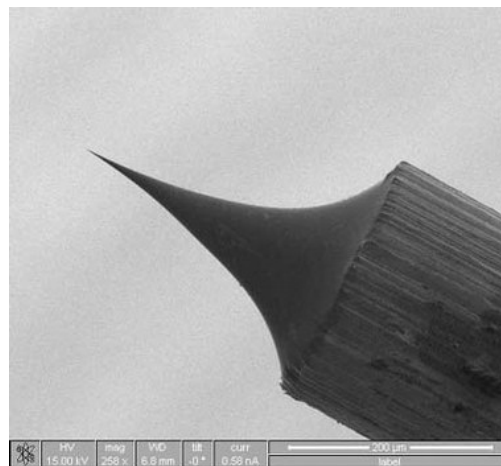
Najbolj imenitno načrtno izdelane nanostrukture so bržkone še vedno kvantne korale (*slika 1*). Gostota stanj površinskih elektronov v notranjosti korale je takšna kot pri delcih ujetih v dvodimenzionalnem potencialu. Kvantne korale so kot igrišče za preverjanje osnovnih zakonov kvantne mehanike [3].



*Slika 1: Kvantna korala [4].*

## 2.3 Priprava konice STM

Ostrina, mehanska ter kemična stabilnost konice, STMa je ključnega pomena za mikroskopiranje. Največkrat uporabljamo elektrolizno jedkane volframove konice, ki so zelo trde in imajo majhen krivinski radij ob vrhu. Čisto polikristalno žico iz volframa premera od 0,2 do 0,5 mm potopimo za nekaj milimetrov pod gladino raztopine natrijevega ali kalijevega hidroksida (KOH ali NaOH). Zlata žička, potopljena v elektrolit služi kot katoda, volframova žica kot anoda, med njima pa teče enosmerni tok velikosti reda nekaj deset  $mA$ . Volfram se raztaplja, najbolj na mestu tik ob gladini. Po nekaj minutah postane žica na tem mestu tako tanka, da sila teže odtrga spodnji del žice. Pomembno je, da tok jedkanja prekinemo čimprej po pretrganju, saj s tem zagotovimo, da se ostri zgornji del žice, ki je še vedno v stiku z elektrolitom, ne jedka naprej. Ta trenutek lahko natančno določimo, saj ob pretrganju tok jedkanja skokovito pade. Za hitro prekinitev toka uporabljamo elektronsko vezje, ki mora imeti odzivni čas krajši od mikrosekunde. Po elektroliznem jedkanju volframove konice ostane na njeni površini tanka oksidna plast, ki je nezaželena, saj povzroča nestabilne tunelske pogoje. Oksida se lahko znebimo z jedkanjem v vodikovem floroidu, ki raztaplja okside, ali pa in-situ z ionskim ali elektronskim jedkanjem ter žarjenjem konice [3].



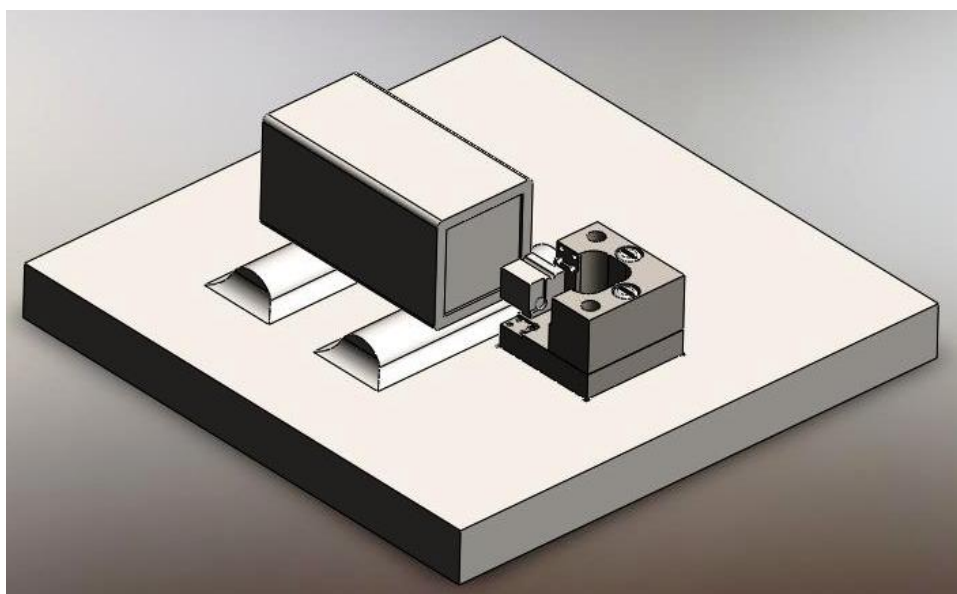
*Slika 2: Konica.*

### 3. RAZVOJ PRINCIPA

Razvoja principa vrstičnega tunelskega mikroskopa smo se lotili postopoma. Najprej smo se lotili konstruiranja mehanskega dela. Mehanski del mora izvajati premike v območju nanometrov v  $x, y, z$  smereh. Premikanje krmilimo z elektronskim vezjem, medtem ko za premikanje skrbijo piezoelektrični aktuatorji, ki se deformirajo ob priključitvi napetosti. Razvoj ni zajemal priprave konice.

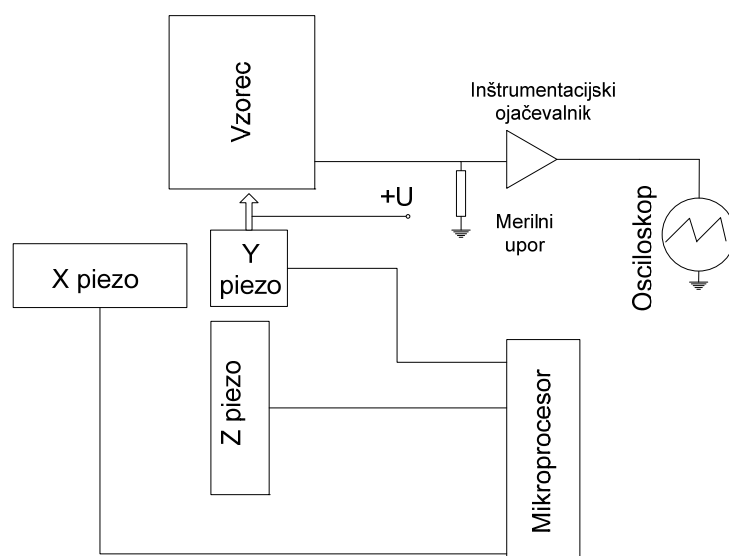
#### 3.1 Mehanika in konstrukcija

Mehanske komponente vrstično tunelskega mikroskopa morajo opravljati tri glavne funkcije. Približati morajo konico do vzorca na razdaljo, na kateri lahko teče tunelski tok, in jo ohraniti na tej razdalji. Skrbeti morajo za premikanje konice v ravnini z natančnostjo nekaj nanometrov. Odporne morajo biti na vse mehanske vibracije in motnje, ki se lahko pojavijo. Konstrukcija mora biti čimbolj toga, da na celoten sistem delujejo enake motnje. Razdelili smo jo v tri sklope in opisali njihove funkcije.



*Slika 3: Konstrukcija s piezoelektričnimi aktuatorji.*

Konica se premika po  $x, y$  koordinatah po vzorcu, razlike v višini pa povzročajo razliko v toku, ki teče skozi konico in vzorec. Spremembe v toku lahko izmerimo z višino konice s tem, da zagotavljamo konstanten tok, ali pa zagotavljamo konstantno višino in merimo tok. Ta dva modela se imenujeta STM mikroskopiranje s konstantnim tokom in konstantno višino. V primeru konstantnega toka povratna vezava regulira višino z napetostjo na piezoelektričnem aktuatorju. To pomeni, da bo na sliki prikazana odvisnost napetosti aktuatorjev, ki pomeni določene višine. Prednost konstantne višine je v tem, da je hitrejša, saj je odziv piezoelektričnih aktuatorjev na spremembo napetosti počasnejši.

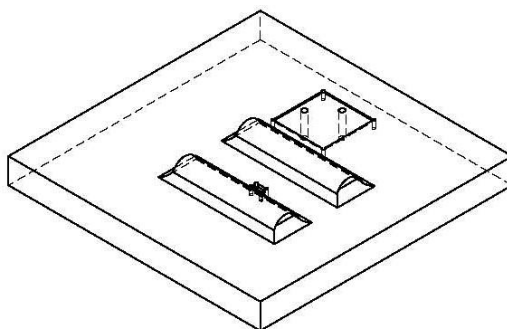


Slika 4: Shema STMa.

S potenciometri nastavljamo velikost ojačanja tunelskega toka. Tok merimo s padcem napetosti na upor, ki je zaporedno vezan z vzorcem in konico. Ojačano napetost merimo z osciloskopom. Ko je merjeni signal v območju osciloskopa sklenemo stikalo za začetek meritve. Mikroprocesor sedaj prične premikati piezoelektrični aktuator x do konca vrstice, nato se vrne na začetek vrstice in prične skenirati naslednjo vrstico. Koliko vrstic in stolpcev skeniramo, določimo v programu, pri tem smo omejeni z najmanjšim napetostnim korakom oz. natančnostjo PWM izhoda.

### - Mizica mikroskopa

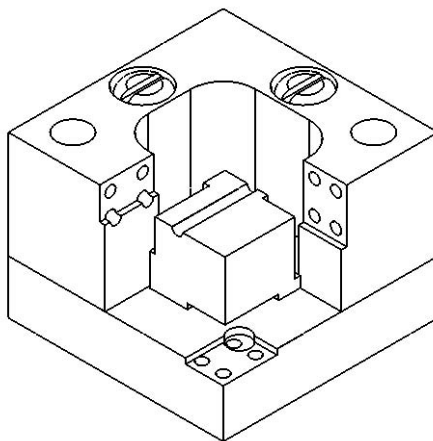
je največji del mikroskopa, na katerem so vsi ostali deli z izjemo elektronike. Njeni najpomembnejši deli so: valja, na katerih je držalo vzorca, utor za piezoelektrični aktuator, ki premika držalo vzorca, in utor ter izvrtine za privijačenje glave mikroskopa. Valji, na katerih je držalo vzorca, morajo imeti manjši koeficient trenja z držalom, medtem ko ploščica, ki služi za premikanje piezo elementa, večjega. Le tako bomo zagotovili funkcijo premikanja z piezoelektričnim aktuatorjem, ki pomika držalo vzorca. Položaj izvrtine je točno na polovici prečnega prereza držala za vzorec, ker se drugače pojavi asimetrija in prične držalo vzorca premikati izven želene smeri proti konici.



Slika 5: Mizica.

### - Glava mikroskopa

Glava mikroskopa je zaradi lažje izdelave izdelana iz dveh delov, ki sta zakovičena. Glava ima narejene tri utor v ravninah  $x, y, z$  za pričvrstitev piezoelektričnih aktuatorjev. Ravnine morajo biti oddaljene v soodvisnosti dolžine piezoelektričnega aktuatorja ter držala konice. Držalo konice mora biti ravno tako izdelano soodvisno z oddaljenostjo in orientacijo ravnin utorov. Na vrhu mora imeti utor, na katerega pritrdimo konico. Konico najlažje in najenostavnejše pritrdimo z navadnim lepilnim trakom. Celotna glava je pritrjena na mizico z dvema vijakoma  $M2$  dolžine  $20\text{mm}$ .



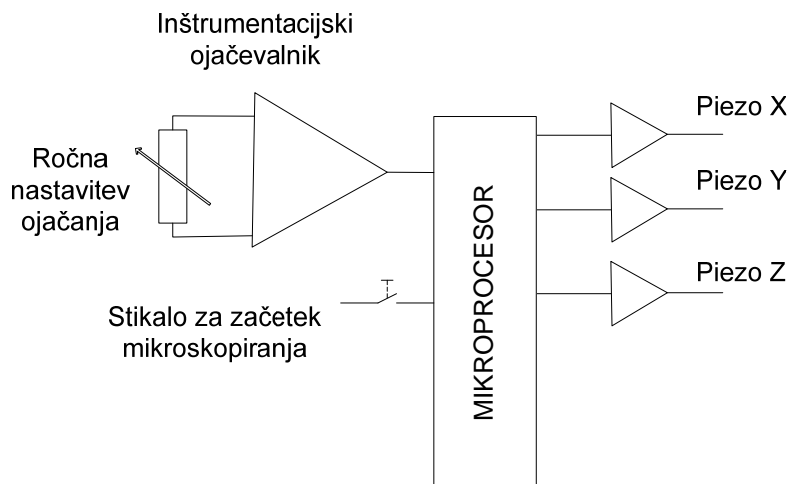
*Slika 6: Glava mikroskopa.*

### - Piezoelektrični aktuatorji

Za premikanje skrbijo piezoelektrični aktuatorji, ki so vgrajeni v konstrukcijo. Mehanska obremenitev pri piezoelektrikih spremeni električno polarizacijo in obratno, zunanje električno polje, v katerem je kristal, povzroči deformacijo kristala. Vzrok za to je sklopitev med mehansko in električno energijo kristala. Navedimo nekaj primerov piezoelektričnih kristalov: barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ), natrijev kalijev tartrat, triglicinsulfat in kremen ( $\text{SiO}_2$ ). Piezoelektrični efekt dobimo pri kristalih, ki nimajo centra simetrije in imajo tako imenovano polarno os. Piezoelektrične materiale uporabljamo za merjenje sprememb tlaka in sil, kot mikrofone in generatorje ultrazvoka [4]. Pri STMu so postavljeni v smereh  $x, y$  in  $z$  ter tako omogočajo »branje« površine vzorca. Raztezek je premo sorazmeren z napetostjo in obratno, kar zelo poenostavi regulacijo in premikanje aktuatorjev ter s tem celoten sistem.

### 3.2 Elektronsko vezje

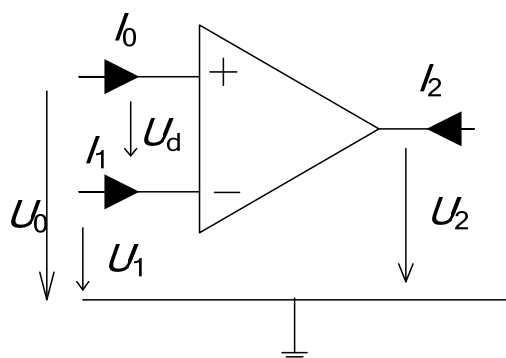
Elektronika vrstičnega tunelskega mikroskopa krmili mikroskopiranje ter omogoča meritev tunelskega toka.



Slika 7: Shema elektronskega vezja.

#### - Inštrumentacijski ojačevalnik

Tunelski tok merimo posredno preko padca napetosti na merilnem uporu. Padec napetosti je zaradi majhnega toka skozi upor zelo majhen in ga je potrebno ojačati. To storimo z inštrumentacijskim ojačevalnikom. Inštrumentacijski ojačevalnik je tip diferenčnega ojačevalnika, ki ima dodane napetostne sledilnike z visokoimpedančnimi vhodi. Glavne karakteristične prednosti so, da ima veliko odprtozančno ojačanje, velik faktor dušenja in veliko vhodno impedanco. Inštrumentacijski ojačevalniki so uporabljeni, kjer potrebujemo veliko zanesljivost in stabilnost vezja. Glede na to da so inštrumentacijski ojačevalniki ponavadi prikazani enako kot navadni operacijski ojačevalniki, temu ni tako, saj so zgrajeni iz treh ali več operacijskih ojačevalnikov. Inštrumentacijske ojačevalnika lahko naredimo sami ali pa kupimo takšne, ki so že v integriranem vezju. Operacijski ojačevalnik (OPA) je elektronski element, ki nam v elektronskih vezjih omogoča analogne operacije. Povratna vezava določa, katero linearno operacijo bo sistem z operacijskim ojačevalnikom izvrševal in kakšno bo njegovo ojačanje. Fazne spremembe med vhodno in izhodno napetostjo ali tokom so bistvene za delovanje sistema. OPA ima dva vhoda, sofazni vhod + in protifazni vhod - in običajno le en izhod – simbol operacijskega ojačevalnika je prikazan na *sliki 8* [5].



Slika 8: Operacijski ojačevalnik [5].

Ojačanje pri operacijskem ojačevalniku, ki ima dva vhoda, ni več enoumno določeno, definiramo ga lahko kot ojačanje spremembe električne veličine prek enega, drugega ali obeh vhodov, na več načinov:

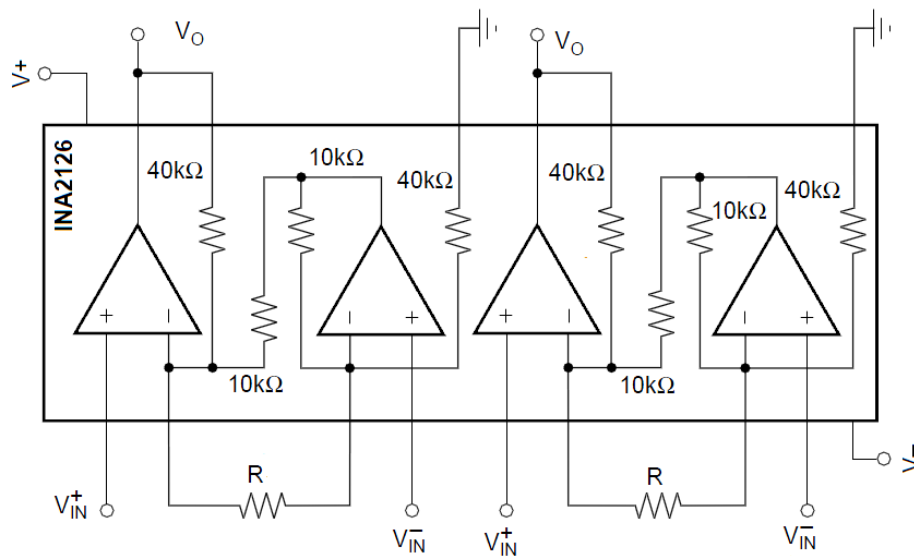
- diferenčno ojačanje je razlika vhodnih signalov

$$A_d = \frac{U_2}{U_0 - U_1} \quad (2)$$

Tako dobimo še dva osnovna načina ojačanja. Invertirajoče kadar je  $U_0=0$ , sta vhodna napetost  $U_1$  in izhodna  $U_2$  v protifazi. Neinvertirajoče kadar je  $U_1=0$ , sta vhodna napetost  $U_0$  in izhodna  $U_2$  v fazi. Običajno imajo operacijski ojačevalniki ojačanja med  $10^3$  in  $10^6$ . Vendar pri teoretičnih analizah uporabljamo idealni OPA, katerega odprtozančno ojačanje je neskončno, tokova  $I_0$  in  $I_1$  pa sta enaka 0. Idealni ojačevalnik nikoli ne preide v nasičenje in je neuporaben brez povratne vezave, katera določi velikost ojačanja ter njegovo funkcijo. Dejanski operacijski ojačevalnik zelo odstopa od idealnega. Vhodne in izhodne vrednosti imajo končne vrednosti, izhodna napetost ima zgornjo in spodnjo mejo ojačanja, nad katero odpovejo vse funkcije OPA [18].

Inštrumentacijski ojačevalnik *INA2126* je precizni ojačevalnik za točna, nizko šumna diferencialna ojačanja. Vsebuje dva integrirana inštrumentacijska ojačevalnika zgrajena iz dveh operacijskih ojačevalnikov, kar omogoča zelo majhne meritve toka. Zaradi delovne napetosti med 1,35V in 18V so idealni za meritve. Ojačanje je lahko med 5 in 10000 z enim notranjim uporom. Lasersko izdelano vezje proizvaja zelo malo offset napetosti in odličen rejekcijski faktor, ki pove kakšno je dušenje šuma pri ojačevalniku. Ojačanje inštrumentacijskega ojačevalnika poda proizvajalec

$$A = 5 + \frac{80k\Omega}{R} \quad (3)$$



Slika 9: INA2126 [6].

Vezje vsebuje štiri zaporedno vezane inštrumentacijske ojačevalnike, torej je ojačanje

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad (4)$$

$$A = \left(5 + \frac{80k\Omega}{R_1}\right) \cdot \left(5 + \frac{80k\Omega}{R_2}\right) \cdot \left(5 + \frac{80k\Omega}{R_3}\right) \cdot \left(5 + \frac{80k\Omega}{R_4}\right)$$

Uporabili smo štiri potenciometre, s katerimi lahko spreminjamo upornost. Najmanjše ojačanje je, ko so vse upornosti največje. Ker imajo potenciometri največje upornosti  $100k\Omega$ , je najmanjše ojačanje

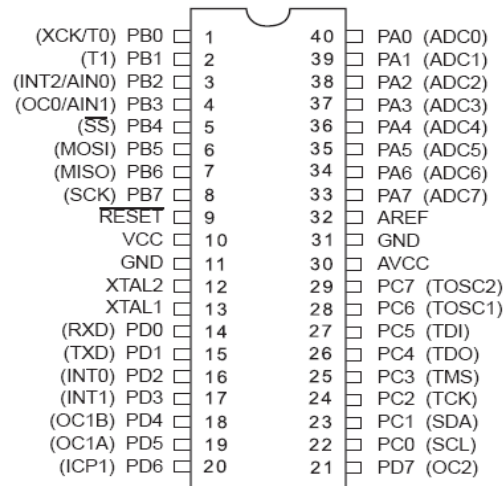
$$A_{\min} = \left(5 + \frac{80k\Omega}{100k\Omega}\right)^4 = 1131$$

medtem ko je največje možno ojačanje, kadar imamo najmanjše upornosti. Najmanjša upornost potenciometra je  $0,4\Omega$ .

$$A_{\max} = \left(5 + \frac{80k\Omega}{0,4\Omega}\right)^4 = 1,6 \cdot 10^{21}$$

## - Mikroprocesor

Mikroprocesor je produkt proizvajalca Atmel in spada v družino ATMEGA32. Zgrajen je iz polprevodnikov in je visoko zmogljiv 8-bitni AVR mikroprocesor z nizko porabo. Ima 32KB vgrajenega pomnilnika ter 1024 bajtov programiljivega EEPROMa, osem kanalni,deset-bitni A/D pretvornik, 4 PWM izhode, USART, SPI vmesnike, notranji oscilator in še dodatne fukcije, ki jih nismo izpostavili [15].



Slika 10: ATmega 32 [7].

Funkcije posameznih vhodno-izhodnih pinov so:

*VCC*: Napajalna napetost (Procesor deluje pri napetosti 4,5 - 5,5 V);

*GND*: Masa;

Porti A (PA0 – PA7) služijo kot analogni vhodi. Služijo tudi kot 8-bitni dvosmerni digitalni porti, če A/D pretvornik ni vključen;

Porti B (PB0 – PB7), Porti C (PC0-PC7) in Porti D (PD0-PD7) so 8-bitni dvosmerni digitalni porti;

*XTAL1*: Vhod za clock-pulz in vhod za oscilatorski ojačevalec;

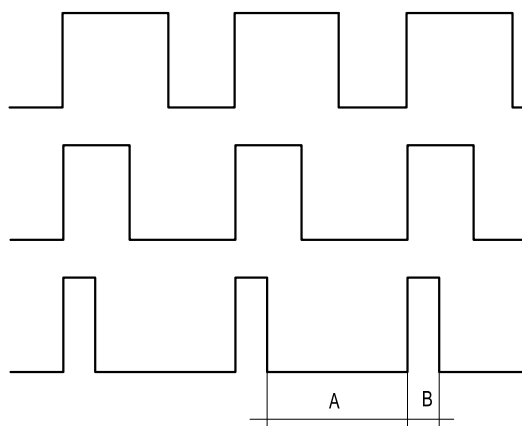
*XTAL2*: Izhod za oscilatorski ojačevalec;

*AVCC* : Vhod, za napajanje porta A in A/D pretvornika;

*AREF*: Vklop, izklop A/D pretvornika. Kadar je v logični enki (5V) je A/D pretvornik vklopljen.

## - Integrator

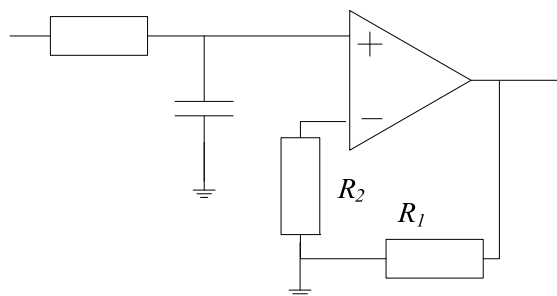
Mikroprocesor ne vsebuje integriranih D/A pretvornikov, ki jih potrebujemo za krmiljenje piezoelektričnih elementov in zaradi tega uporabimo izhod, ki daje impulze z možnostjo spreminjanja njihove širine. Takšni izhodi se imenujejo PWM (Pulse Width Modulation). Pulzno širinska modulacija je močna tehnika za krmiljenje analognih vezij z digitalnimi signali [9]. Deluje na podobnem principu kot navadno stacionarno stikalo, ki ga vklopimo in izklopimo, le da je ta izvedena z modernimi elektronskimi stikali. Frekvenca je konstantna, spreminja se širina pulza, kar omogoča enostavno procentualno določitev moči z razmerjem med površino delovnega in ničelnega pulza, na *Sliki 11* med *B* in *A* [8].



*Slika 11: Pulzno širinska modulacija.*

Mikroprocesorjev PWM ima najhitrejšo možno frekvenco generiranja signalov okoli  $20\text{kHz}$ . Dobljeni signal povprečimo z integratorjem in dobimo zvezen napetostni signal, s katerim v našem primeru krmilimo piezoelektrične elemente.

Integrator ali povprečevalnik opravlja matematično operacijo integriranja, kjer iščemo ploščino pod krivuljo grafa opazovane funkcije. Ko ima krivulja pozitivne vrednosti, ploščina s časom narašča, pri negativnih vrednostih, pa pada. Kjer ima krivulja vrednost nič, ostane ploščina nespremenjena. Po določenem časovnem intervalu je integral te funkcije proporcionalen ploščini v tem intervalu. Zaradi možnosti opravljanja večjih premikov piezoelektričnih aktuatorjev dodamo povratno ojačevalno vezavo. Ojačanje je odvisno od operacijskega ojačevalnika in je  $A=1+(R_1/R_2)$ .



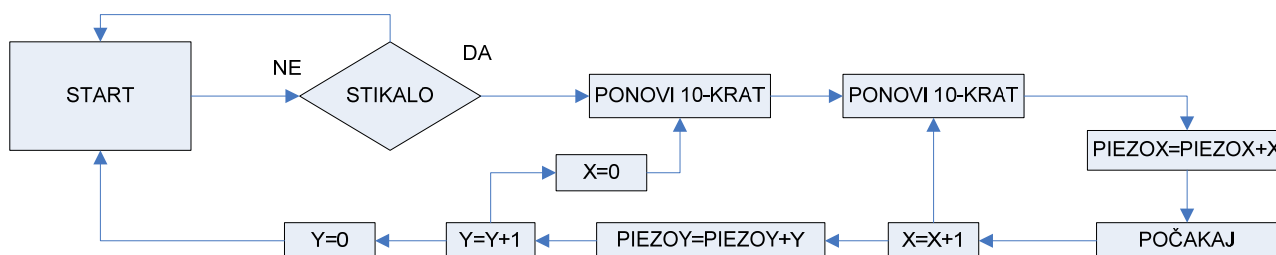
*Slika 12: Integrator z ojačanjem.*

Precizni zunanji kristalni oscilator daje takt mikroprocesorju (kako hitro deluje). Posredno določa tudi največjo možno hitrost oz. frekvenco vzorčenja podatkov na vseh mikroprocesorja. Kristalni oscilator temelji na mehanski resonančni vibraciji kristala iz piezoelektričnega materiala in proizvaja zelo natančno frekvenco.

Večina komponent za natančno ter normalno delovanje potrebuje konstantno napajalno napetost, ki se časovno ne spreminja. Stabilizator je elektronski element, ki vzdržuje stalno vrednost kake električne veličine. Lahko so izvedeni kot stabilizatorji konstantnih izhodnih napetosti ali pa kot stabilizatorji z možnostjo nastavitve izhodne napetosti. Izvedeni so lahko kot stabilizatorji pozitivnih ali negativnih izhodnih napetosti. Stabilizator napetosti je nujno potreben, saj nihanja napetosti lahko povzročijo okvaro elektronskih elementov, kot je mikroprocesor, povzročajo motnje pri meritvi, ipd.

### 3.1.1 Program

Mikroprocesor mora ob sklenitvi stikala za začetek mikroskopiranja pričeti skenirati površino. Pomikati se mora po stolpcih, med vsakim stolpcem počakati nekaj časa in se na koncu stolpca vrniti v začetno točko. Čeprav imamo možnost uporabe še dveh piezoelektričnih aktuatorjev, to ni bilo potrebno.



Slika 13: Blok shema programa.

V kolikor stikalo ni sklenjeno, se program vrti v prazni zanki. V trenutku, ko sklenemo stikalo, skoči v zanko, in nato še v eno zanko. V drugi zanki se pomika po stolpcih, tako da povečuje aktivnost PWMa in za vsakim povečanjem počaka nekaj časa, da lahko z osciloskopom izmerimo vrednost tunelskega toka. Ko preberemo 10 stolpcev, se pomakne na začetek vrstice (prvi stolpec) in prične ponovno povečevati aktivnost PWM za piezoelektrični aktuator v smeri x. Po koncu desetih prebranih vrstic se vrne na začetek in čaka na ponovni ukaz za branje površine vzorca.

## 4. REZULTATI IN IZSLEDKI

Hipoteze smo potrjevali z eksperimentalnim merjenjem in sklepanjem potrjenim z izračuni. Hipoteze, princip mikroskopiranja je pravilen, nismo potrdili, ker je nesmiselno potrjevati princip mikroskopiranja za mikroskop, saj z njim nismo izvedli meritev tunelskega toka med vzorcem in konico.

### 4.1 Inštrumentacijski ojačevalniki INA2126 so primerni za ojačanje tunelskega toka

Tunelski tok merimo s padcem napetosti na  $10k\Omega$  upor. Ko smo vzpostavili napetost  $12V$  na konici in vzorcu, ter z osciloskopom merili padec napetosti na upor, smo dobili za najmanjše možno ojačanje inštrumentacijskih ojačevalnikov nasičen signal  $5V$  (napajanje ojačevalnikov). Tunelski tok za napetost  $12V$  v oddaljenosti konice in vzorca  $10nm$  se giblje približno od  $0,1nA$  do  $10nA$  [13]. Padec napetosti na upor je torej

$$U = R \cdot I_T = 10000\Omega \cdot 5 \cdot 10^{-9} A = 0,00005V$$

Offset napetost inštrumentacijskega ojačevalnika INA2126 je okoli  $0,0001V$ , torej z ojačevalniki pri takšni vhodni napetosti ne bomo ojačevali kaj drugega kot offset napetost. Konfiguracijo merilnega upora smo zaradi tega spremenili na višjo vrednost in sicer  $100k\Omega$ . Padec napetosti na upor je sedaj  $0,0005V$ , kar je večje od offset napetosti. Izhodna napetost je nihala med  $0$  in  $2V$ . Razlog za tolikšno nihanje je lahko sofazno ojačanje ( $A_s$ ) signala. Sofazno ojačanje ojačevalnika je odvisno od diferenčnega ojačanja ( $A$ ) in rejekcijskega faktorja. Rejekcijski faktor za INA2126 je  $80-94dB$ . Naš sestavljen inštrumentacijski ojačevalnik omogoča najmanjšo ojačanje  $1131$ . Sofazno ojačanje ojačevalnika je torej

$$\log A_s = \log A - \frac{CMRR}{20}$$

$$A_s = 10^{\left(\log A - \frac{CMRR}{20}\right)}$$

$$A_s = 0,9$$

Sofazno ojačanje je slabljeno in tako ne vpliva na meritev in ne povzroča nihanja izhodnega signala. Ugotovili smo, da je problem stabilnost ojačevalnika. Ojačevalnik je premalo stabilen in sam sebi povzroča šum, katerega z velikim ojačanjem prenesemo na izhod. Pri merjenju smo opazili tudi, da je za nihanje napetosti vzrok v nekvalitetni stabilizaciji napetosti. Merjenje izhoda stabilizatorja je pokazalo, da napetost niha. Nihanje je okoli  $2mV$ , ki dodaja šum na merjenje diferenčnega ojačanja merilnega upora. Napetost na konici in vzorcu torej ni dovolj stabilna in njena ojačitev nihanja se opazi pri merjenju signala na izhodu inštrumentacijskih ojačevalnikov. Inštrumentacijski ojačevalniki INA2126 imajo premalo stabilnosti in zaradi tega niso primerni za meritev tunelskega toka. Hipotezo smo ovrgli.

## 4.2 Princip merjenja toka z osciloskopom in konstantne višine

Princip, kjer merimo tunelski tok in ohranjamo konstantno višino konice, je tehnološko manj zahteven kot princip merjenja toka, kjer ohranjamo konstanten tok. Pri meritvi konstantnega toka potrebujemo povratno vezavo o informaciji toka in nato še dodaten piezoelektrični aktuator za nastavljanje višine. Tehnološka zahtevnost v primeru natančnejše meritve ne pomeni prepreke. V kolikor je meritev s principom konstantne višine natančnejša, bomo hipotezo potrdili; če je natančnejša meritev s principom konstantnega toka, bomo hipotezo ovrgli.

Povratna vezava potrebuje A/D pretvorbo in zaradi tega je njena natančnost odvisna od kvalitete A/D pretvorbe. Natančnost specifičnega števca določimo tako, da največjo razliko signala, ki nam jo števec omogoča, delimo s števnim dosegom A/D pretvornika. Uporabljeni mikroprocesor ima vgrajen 10-bitni A/D pretvornik z največjo možno razliko signala  $5V$ . Natančnost merjenega signala je torej

$$n = \frac{5V}{2^{10}} = 4,88 \cdot 10^{-3} V \quad (5)$$

Natančnost digitalnega osciloskopa (Tektronix TDS220), s katerim smo merili padec napetosti na upor, je  $2mV$ . Osciloskop ima večjo natančnost kot A/D pretvornik. V tem primeru je bolje uporabiti mikroskopiranje s principom meritve toka konstantne višine. Hipotezo smo potrdili.

## 5. RAZPRAVA

Inštrumentacijski ojačevalniki so premalo stabilni za opravljanje meritev tako majhnih tokov. Primernejši bi bil OPA627, ki je stabilnejši z manjšo offset napetostjo. Merilni upor v našem primeru bi moral biti večji vsaj nekaj  $M\Omega$ , da bi bil padec napetosti na njem večji. Meritev toka bi bila tako točnejša, z manj napakami. Izboljšali bi jo z bolj stabilizirano napetostjo. Premalo pozornosti smo posvetili predvsem meritvi toka in dejavnikom, ki vplivajo nanjo. Mislimo, da je to tudi eden od razlogov, zakaj vezje ne deluje. Princip mikroskopiranja je pravilen, vendar je problematična izvedba, saj bi vezje lahko naredili veliko bolj enostavno. Namesto mikroprocesorja, ki avtomatsko opravlja meritev s tem da preko PWM izhoda krmili piezoelektrične elemente, bi uporabili navadne potenciometre. S potenciometri bi krmilili napetost na piezoelektričnih aktuatorjih in s tem povečevali njihov raztezek. Avtomatska meritev je uporabna le, če bi podatke o meritvi kontinuirano pošiljali računalniku in bi potrebovali hitre meritve in izrisovanja površine. V primeru mikroskopiranja z osciloskopom je mikroprocesor povsem odveč. Konstrukcija je izdelana precizno, a vendar ni poskrbljeno za dušenje vibracij. Zaradi toge izdelave vibracije vplivajo tako na konico kot na vzorec in sta v sofaznem nihanju. Izboljšali bi jo, če bi konica »visela« oz. bila usmerjena v središče zemlje, saj tako zmanjšamo moment na koncu konice in preprečimo vpliv teže.

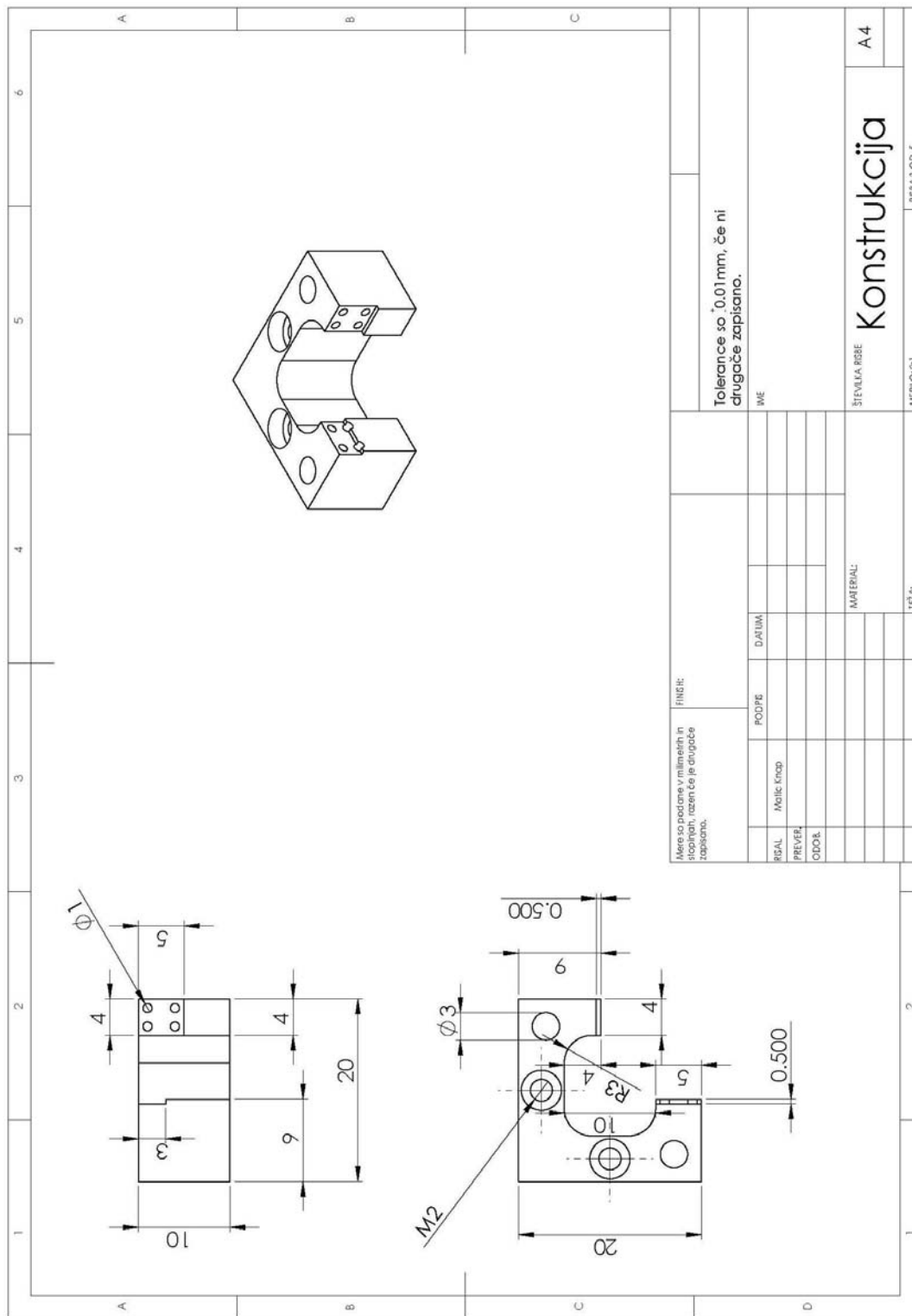
## 6. ZAKLJUČEK

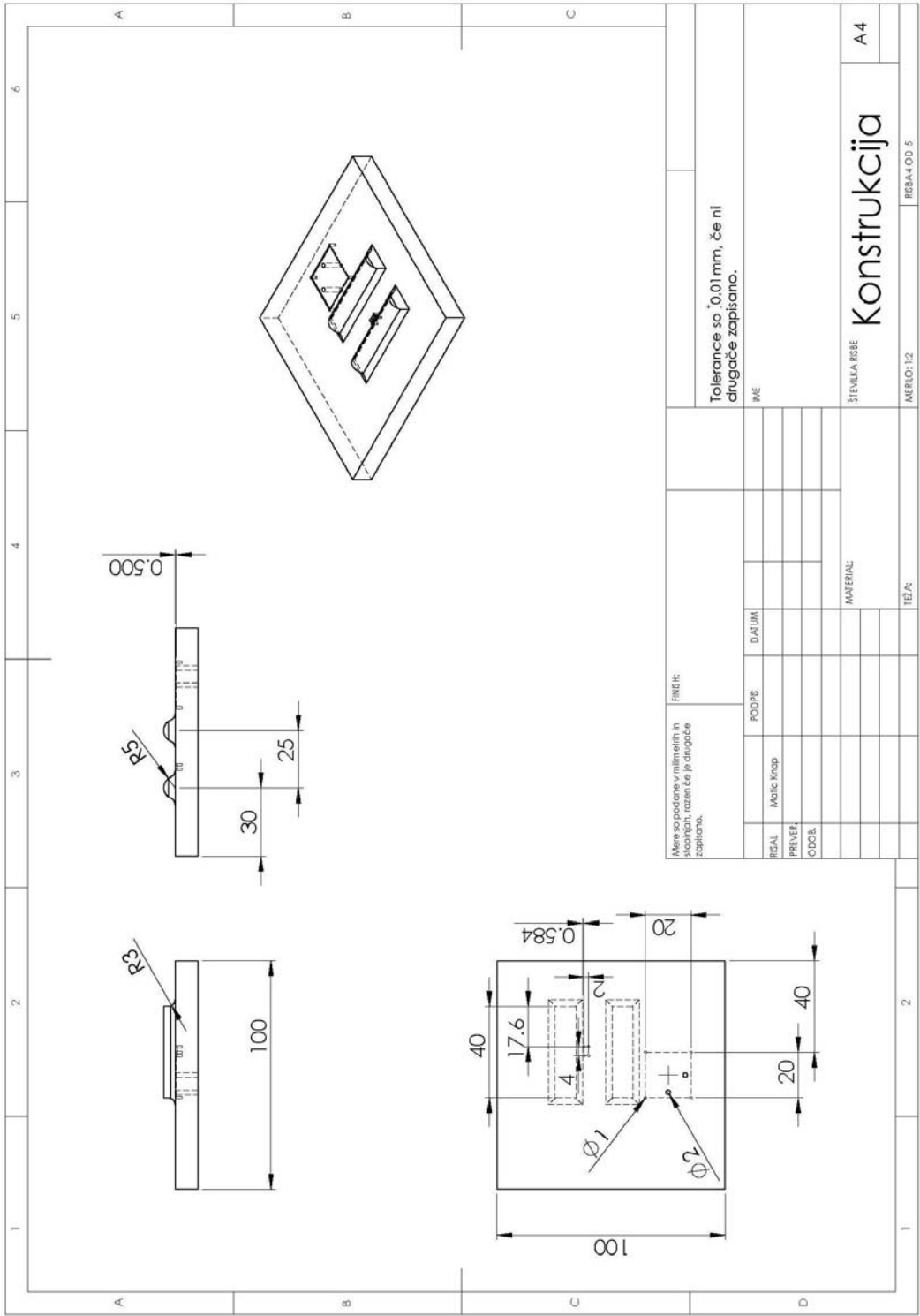
V raziskovalni nalogi nam je uspelo prikazati enega od možnih principov vrstičnega tunelskega mikroskopiranja, vendar bi bilo potrebno narediti še vrsto izboljšav do realne slike z ločljivostjo nekaj atomov. Operacijski ojačevalniki niso idealni in je zelo pomembno, katere izberemo in kako jih vežemo glede na aplikacijo, ki jo hočemo z njimi izvajati. Elementi, potrebni za izdelavo nanotehnoloških orodij, so na voljo v prosti prodaji in tako dostopni tudi navadnim ljudem. Cilj raziskovalne naloge smo dosegli, čeprav smo morali ovreči skoraj vse hipoteze in nam ni uspelo mikroskopirati. Skozi raziskavo smo se naučili veliko stvari, ki nam bodo pomagale v nadaljnjem delu.

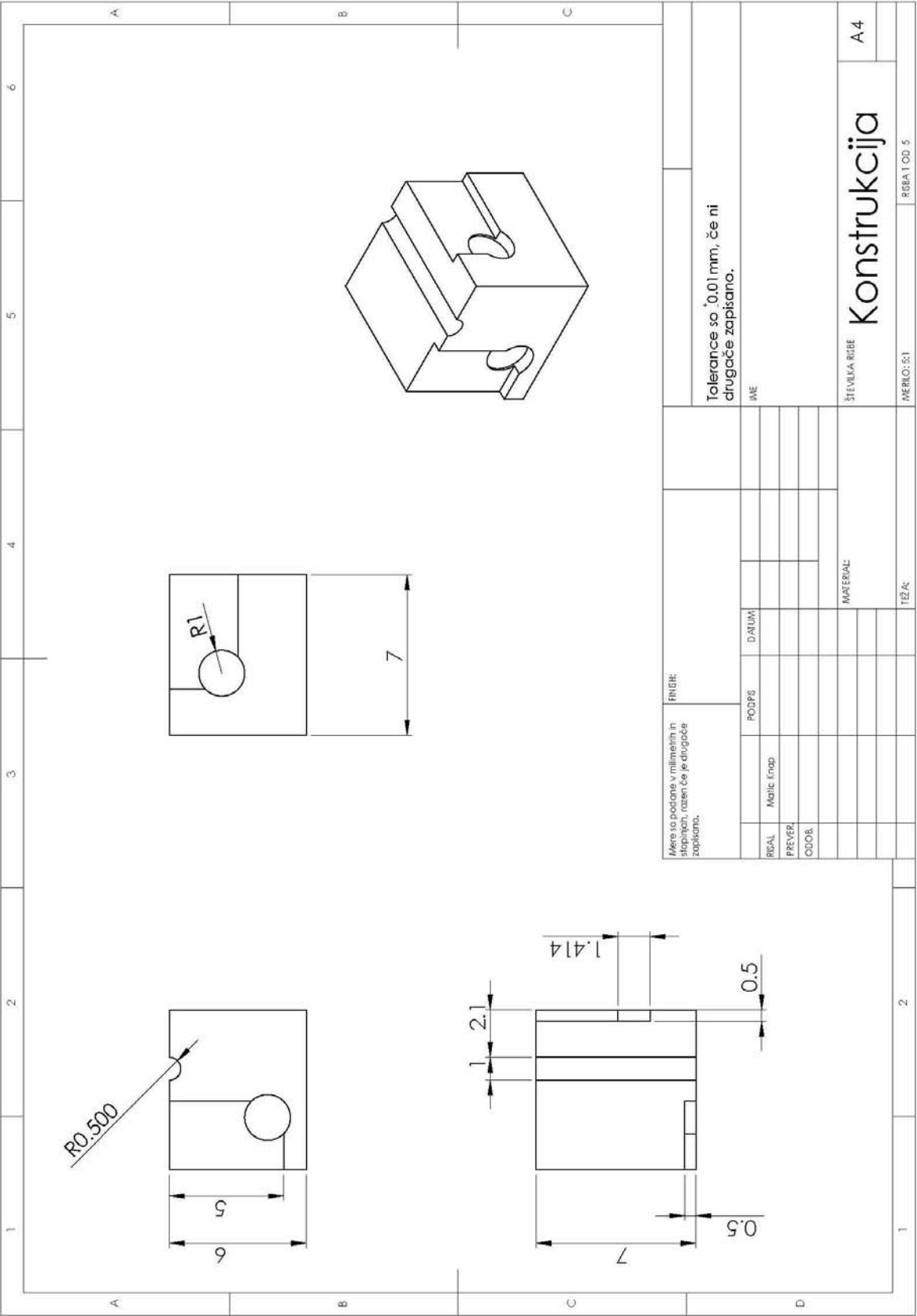
## 7. ZAHVALA

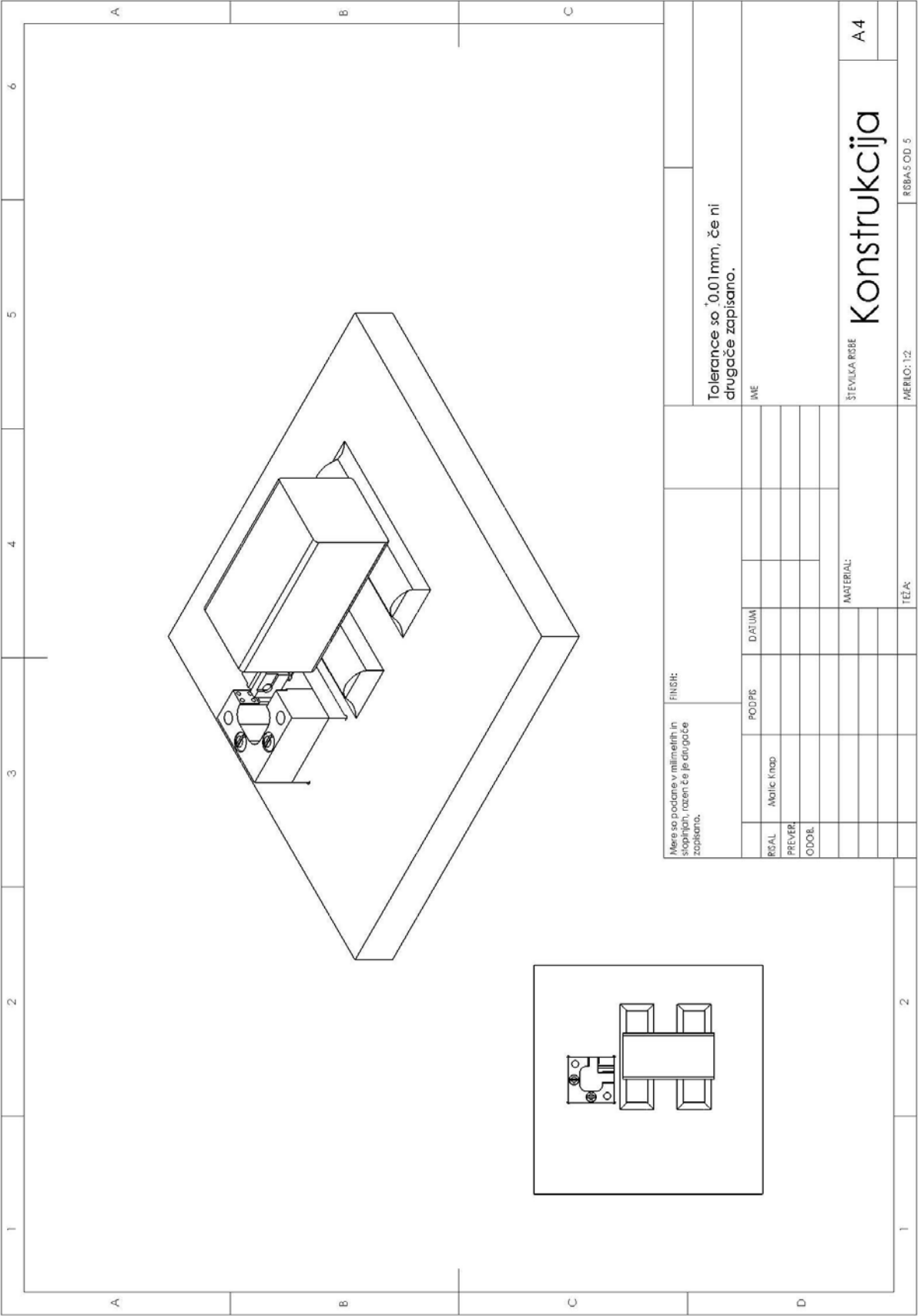
Zahvaljujem se mentorju g. Zvonetu Cencenu, ki me je vseskozi spodbujal in usmerjal, g. ravnatelju Simonu Konečniku ter gibanju Mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline, ki so priskrbeli piezoelektrične aktuatorje. Zahvalil bi se Orodjarstvu Mohorič, posebej Bogdanu Mohoriču, ki je v veliki meri s svojim znanjem in izkušnjami pripomogel tehnološki pripravi in izdelavi konstrukcije, sošolcu Primožu Šibancu za izdelavo tiskanega vezja in vsem, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi raziskovalne naloge.



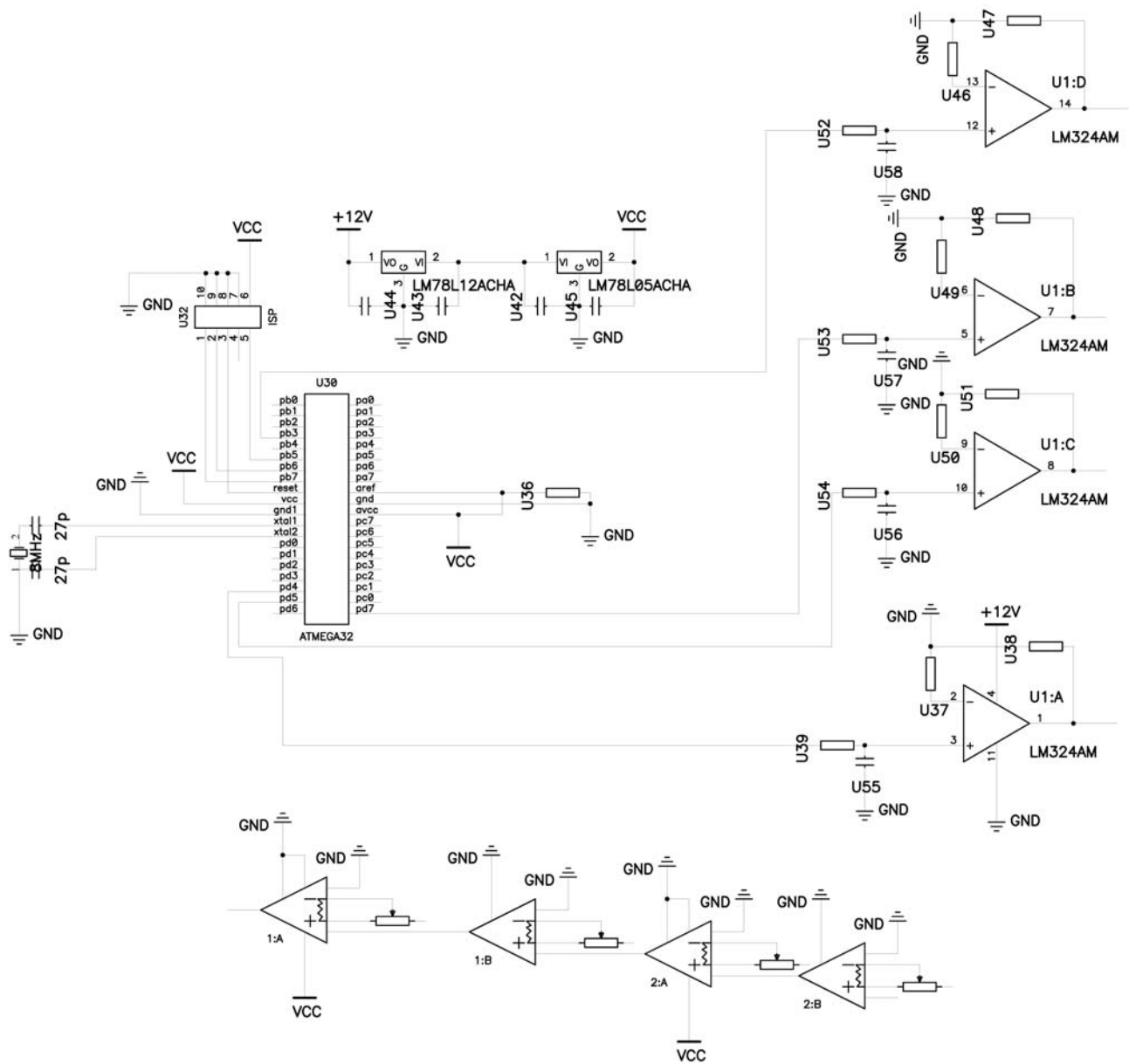




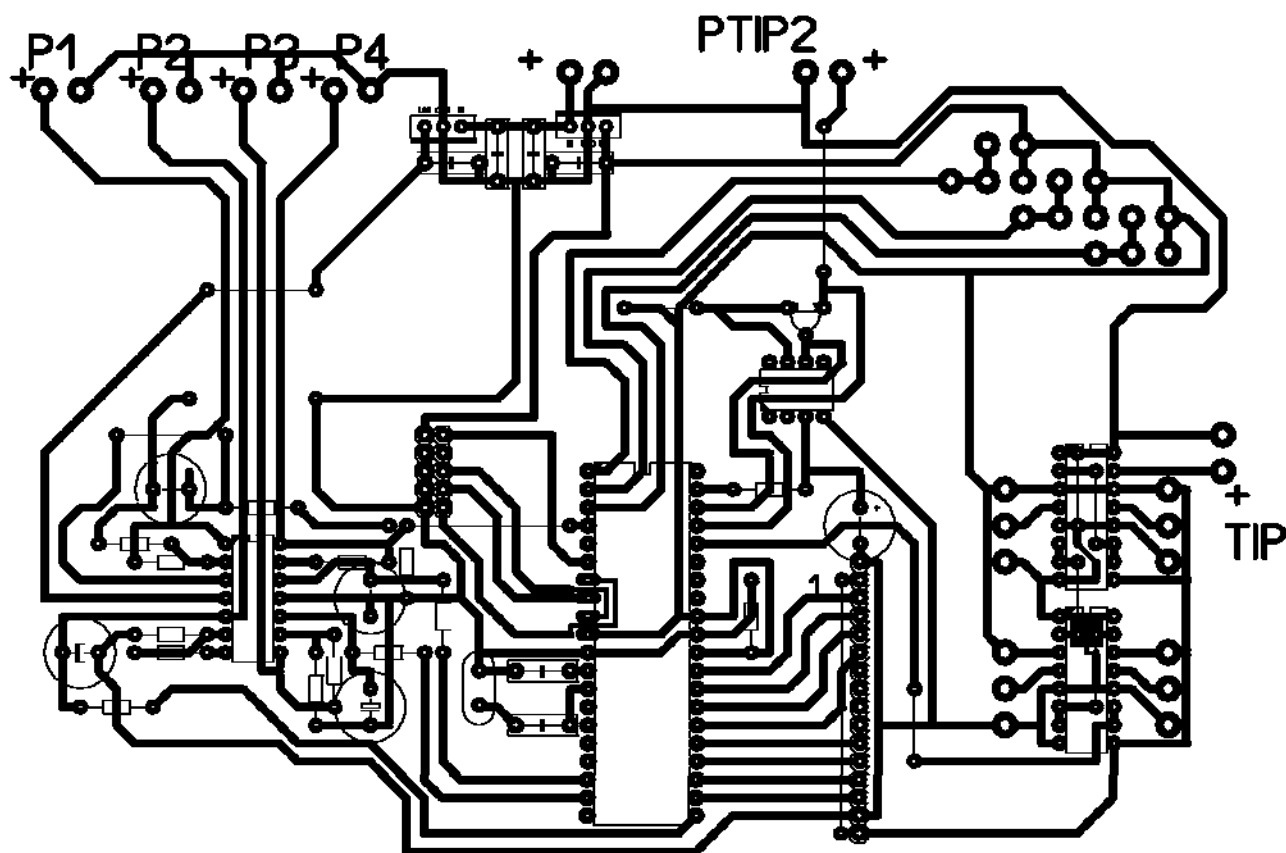




## 8.2 Shema vezja



### 8.3 Tiskanino vezje



## 8.4 Program

```
Ddra = &B11111111
Ddrb = &B00001000
Ddrc = &B11111111
Ddrd = &B10110000
Stikalostartmerjenje Alias Pinb.0
Dim Veckratnik As Byte
Dim Veckratnik1 As Byte
Dim Piezox As Byte
Dim Piezoy As Byte
Config Lcdpin = Pin , Db4 = Portc.3 , Db5 = Portc.2 , Db6 = Portc.1 , Db7 = Portc.0 , E = Portc.4 ,
Rs = Portc.6
Config Lcd = 16 * 2
Config Adc = Single , Prescaler = Auto
Start Adc
Config Timer0 = Pwm , Pwm = 8 , Compare A Pwm = Clear Down , Compare B Pwm = Clear
Down , Prescale = 8
Config Timer2 = Pwm , Pwm = 8 , Compare A Pwm = Clear Down , Compare B Pwm = Clear
Down , Prescale = 8
Enable Interrupts
Cls
Waitms 100
Do
    If Stikalostartmerjenje = 1 Then

        For A = 1 To 10

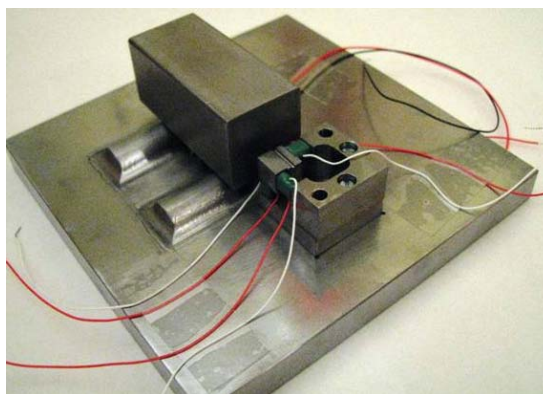
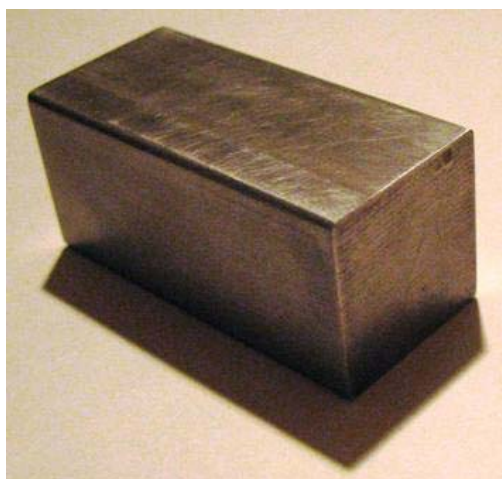
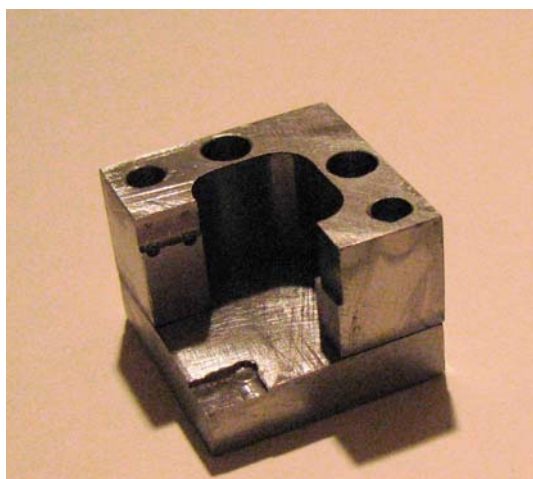
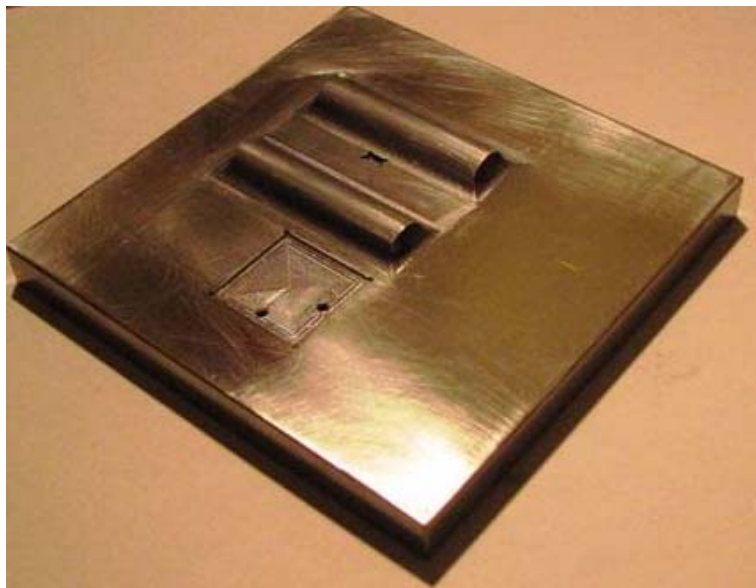
            For I = 1 To 10

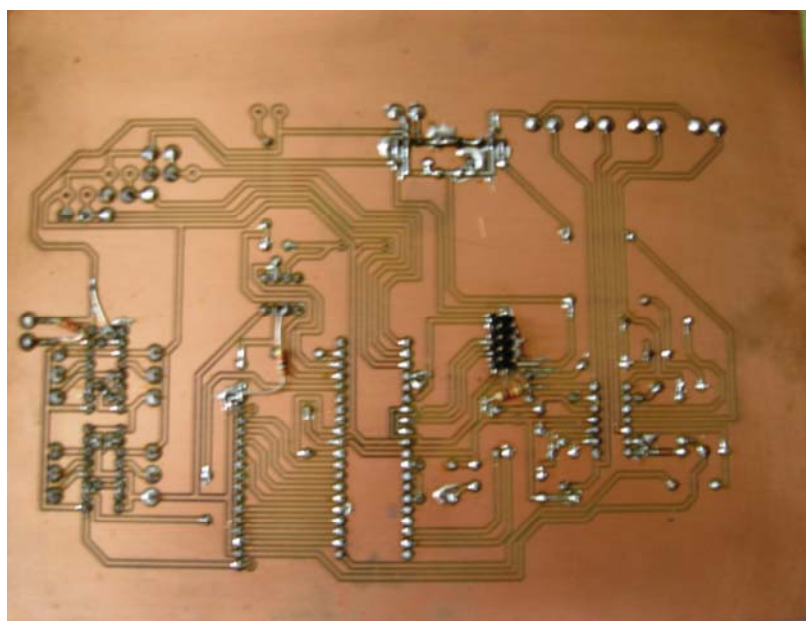
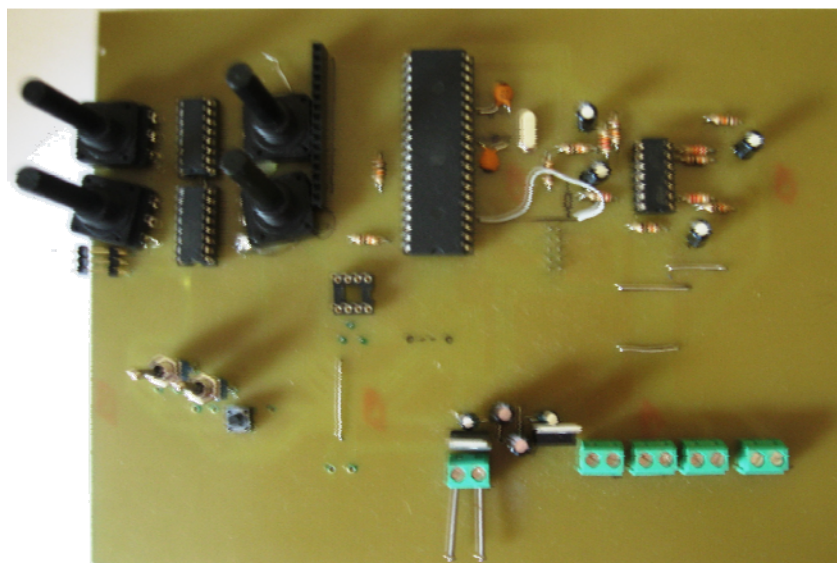
                Piezox = Veckratnik * 100
                Gosub Pwm
                Wait 2
                Veckratnik = Veckratnik + 1
            Next I
            Piezoy = Veckratnik1 * 100
            Veckratnik1 = Veckratnik1 + 1
            Gosub Pwm
        Next A
    End If
Loop
Pwm:

Pwm1a = Piezox
Pwm1b = Piezoy

Return
```

## 8.5 Slike Vrstičnega tunelskega mikroskopa





## 9. VIRI IN LITERATURA

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_tunneling\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope), 15. dec
- [2] Fizika 3. del posebna teorija relativnosti kvantna fizika atomi J strand
- [3] Bonnell Dawn A. Scanning tunneling microscopy and spectroscopy: theory, techniques, and applications New York, 1993
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>, 11. jan
- [5] Šuhel, P. Industrijska elektronika; operacijski ojačevalniki v sistemih, 1. preurejena izd. – Mengeš: D design, 1995
- [6] <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina126.pdf>, 13. jan
- [7] [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf), 5. dec
- [8] Lorencon, R. Elektronski elementi in vezja, 2. dopolnjena izd. – Nova gorica: Maya d.o.o