

Izrada i upotreba digitalnog optičkog spektrometra u nastavi fizike u srednjoj školi

Danijel Ptičar, Vesna Marić

Srednja škola Ban Josip Jelačić, Zaprešić

Sažetak

U radu je najprije opisana konstrukcija spektrometra, navedeni su problemi s kojima smo se susretali tijekom konstrukcije te su navedene komponente i programski alati koji su pri tome korišteni. U drugom dijelu rada opisan je nastavni sat tijekom kojeg je korišten spektrometar, način na koji su mjerene valne duljine, kako su prikazani rezultati i s kojom svrhom, navedene su prednosti ovakvog nastavnog sata te izneseni prijedlozi za poboljšanje kvalitete nastave fizike.

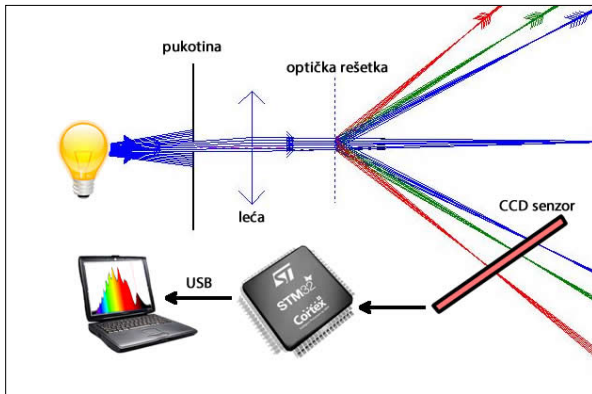
Ključne riječi: spektrometar, mikroupravljač, arduino, processing

Uvod

Optički spektrometar uređaj je koji prikazuje valne duljine od kojih je sastavljen neki izvor svjetlosti te je vrlo bitan instrument u kemiji, fizici, astronomiji i ostalim znanostima[1]. Prve verzije spektrometara koristile su leće i prizmu te se, gledajući kroz okular, određivalo koje valne duljine sadrži izvor[2]. Iako se i danas još uvijek koristi isti način za određivanje spektra, uslijed razvoja digitalne tehnologije, umjesto ljudskog oka za očitavanje spektra, koriste se elektronički elementi. Upotreba digitalnih spektrometara omogućava puno detaljniju, precizniju i bržu analizu spektra svjetlosti. U nastavi fizike u srednjoj školi upotreba nedigitalnih spektrometara nije vremenski izvediva te je digitalni spektrometar, koji spektar može prikazati preko računala i projektor, praktičnije rješenje. Nažalost, cijene digitalnih spektrometara još uvijek su prilično visoke (više od 1000\$) pa jako mali broj škola ima mogućnost kupovine takvog uređaja. Iz tog razloga odlučili smo, s puno manje financijskih izdataka, sami konstruirati digitalni spektrometar uz pomoć mikroupravljača i ostalih besplatnih alata. Rezultat koji smo dobili bio je i više od očekivanog, i u smislu funkcioniranja samog uređaja, i u smislu ishoda i ciljeva koje smo postigli s učenicima iz područja optike.

Osnovni princip funkcioniranja spektrometra

Princip rada spektrometra isti je kao i prije 200 godina, s razlikom da smo umjesto prizme koristili optičku rešetku[2] te umjesto ljudskog oka linearni CCD senzor. Svjetlost prvo prolazi kroz usku pukotinu (oko $50\mu\text{m}$), nakon toga kroz sabirnu leću koja služi da zrake svjetlosti budu paralelne, onda kroz optičku rešetku koja ima 1000 linija po mm te nakon toga dolazi na linearni CCD senzor. Mikroupravljač očitava CCD senzor te preko USB-a šalje podatke u računalo gdje se podaci obrađuju i prikazuju na ekranu računala (Slika 1).



Slika 1 : shema/princip rada spektrometra



Slika 2 : izrađeni spektrometar

Pukotina, leće i optička rešetka

Pukotina na spektrometru služi tome da odredi koliko će svjetla ući u spektrometar, s tim da se manjom pukotinom dobiva i veća rezolucija[2]. Pukotina u našem spektrometru napravljena je uz pomoć dva žileta (Slika 3) te je razmak koji iznosi oko $50\mu\text{m}$ podešavan ispod mikroskopa. Visina pukotine iznosila je oko 3mm.



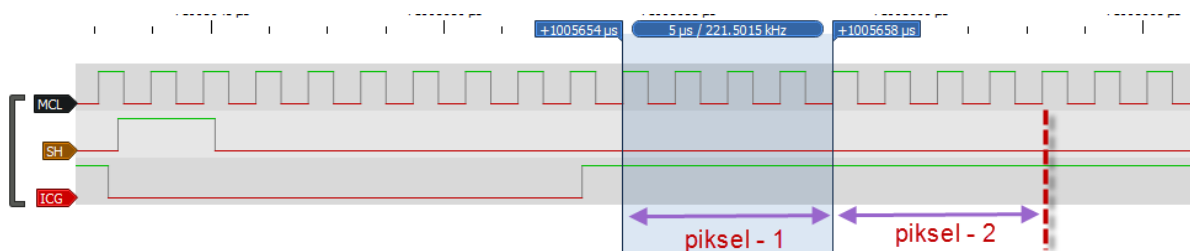
Slika 3 : pukotina

Leća ili leće koje se nalaze odmah iza pukotine služe da svjetlost, koja je prošla kroz pukotinu, bude paralelna s pukotinom. Leće, s kojima smo odmah imali dobre rezultate, bile su leće iz jeftinih crvenih laserskih pokazivača. Loša je strana leće iz laserskih pokazivača što su uglavnom plastične te blokiraju valne duljine ispod 400nm, a u slučaju staklene leće, moguće je promatrati valne duljine od 350nm. Optička rešetka standardni je element koji se koristi u digitalnim spektrometrima i ima istu ulogu kao prizma u starijim spektrometrima, s razlikom da optička rešetka izlazne boje (valne duljine) može raširiti pod većim kutom. Znači,

ulazna se svjetlost prolaskom kroz optičku rešetku razbija na osnovne valne duljine. Isto tako najčešće se koriste dvije vrste optičkih rešetki - transmisijske i reflektivne. Reflektivne optičke rešetke najbolje su rešetke jer reflektiraju svjetlost (mali gubici), ali im je cijena izrazito visoka. Transmisijske optičke rešetke manje su efikasne jer apsorbiraju dio svjetlosti, no daleko su povoljnije nego reflektivne. Rešetka je koju smo mi koristili transmisijska, ima 1000 linija po mm i naručena je preko interneta (oko 1\$).

Linearni CCD element

Linearni CCD (*Charge Coupled Device*) elektronički je element koji sliku pretvara u električni signal i u digitalnom spektrometru zamjenjuje ljudsko oko. Za spektrometar smo isprobali dva tipa CCD-a: NEC μ PD3747 (7400 piksela) i Toshiba TCD 1304AP (3648 piksela) te smo u finalnu verziju ugradili TCD 1304AP zato što radi na 3.3V (kao i mikroupravljač koji smo koristili) te zahtijeva jednostavniju komunikaciju, za razliku od NEC-a koji zahtijeva 5 i 12 volti, a signali su za komunikaciju kompleksniji. Za upravljanje CCD čipom potrebna su 3 signala : SH (*shift gate*), MCL (*master clock*) i ICG (*integration clear gate*). Svaka 4 *clocka* na izlaznom pinu (OS) pojavit će se napon koji predstavlja intenzitet svjetlosti na pikselu (Slika 4). Kao problem kod linearnih CCD čipova pokazalo se što je potrebna brza komunikacija između njih i mikroupravljača. Minimalna je brzina na kojoj je moguće dohvatiti podatke iz CCD-a 0.2 MHz, odnosno potrebno je da mikroupravljač ima AD konverter brzine 5 μ s. Na primjeru na slici (Slika 4). vidi se primjer komunikacije između CCD čipa i mikroupravljača. U dijelu označenim s piksel-1 mikroupravljač mora pomoću AD konvertera očitati naponski nivo na izlaznom pinu (OS pin) CCD čipa.

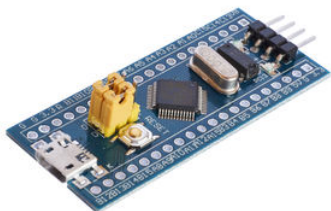


Slika 4 : primjer signala za upravljanje CCD čipom

Razmak između dva impulsa na SH pinu vrijeme je integracije ili ekspozicije. Što je vrijeme integracije veće, CCD čip može detektirati manje svjetlosti. ICG signalom se CCD čipu govori kada da počne slati vrijednosti piksela iz početka.

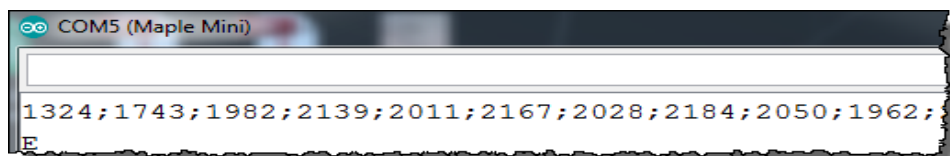
Mikroupravljač

Kako je u prijašnjem poglavlju navedeno, brzina kojom AD konverter mora pročitati naponski nivo s CCD čipa maksimalno je $5\mu\text{s}$, drugo, CCD čip ima 3648 piksela i ako uzmemo npr. 8 bitnu točnost, potrebno nam je barem 3648 bajtova RAM memorije. Iz ta dva navedena razloga (brzina i memorija) većina Arduino mikroupravljača temeljenim na ATmega procesorima nije zadovoljavajuća. Mikroupravljač koji nije skup (3\$), a dostupan je i zadovoljava gore navedene zahtjeve je STM32F103C8 (Blue Pill, Slika 5)



Slika 5 : STM32F103C8 (Blue Pill)

STM32F103C8 je 32 bitni ARM Cortex mikroupravljač na 72 MHz, koji ima 20KB RAM memorije, 128KB flash memorije, 12 bitni AD konverter maksimalne brzine $1\mu\text{s}$ (1 MHz), integrirani USB i radi na 3.3V [3]. Razvojno je sučelje u kojemu je programiran mikroupravljač Arduino s instaliranim `stm32duino`¹ hardverskom bibliotekom. Komunikacija između mikroupravljača i osobnog računala odvija se preko USB-a, s tim da je USB na mikroupravljaču postavljen kao serijski port. Mikroupravljač, nakon što očita CCD čip, šalje 3648 očitanih vrijednosti piksela preko USB serijskog porta u ASCII formatu (Slika 6). Za grafički prikaz podataka koristili smo program napisan u besplatnom Processing² alatu.



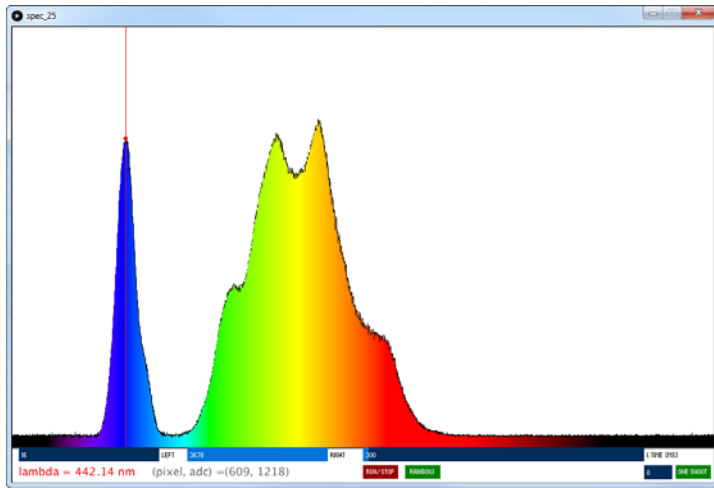
Slika 6 : primjer podataka CCD-a koje šalje mikroupravljač u osobno računalo

Processing - aplikacija za prikaz podataka

Kao što smo gore naveli, budući da mikroupravljač praktički šalje „sirove“ podatke koje je očitao s CCD čipa, podatke je moguće prikazati čak i u MS Excelu. No, kako je smisao cijelog ovog projekta bio da se u nekom razumnom vremenu dobije spektar izvora, koristili smo Processing alat u kojemu smo izradili PC aplikaciju za pregled spektra. (Slika 7).

¹ <http://www.stm32duino.com/>

² <https://processing.org/>

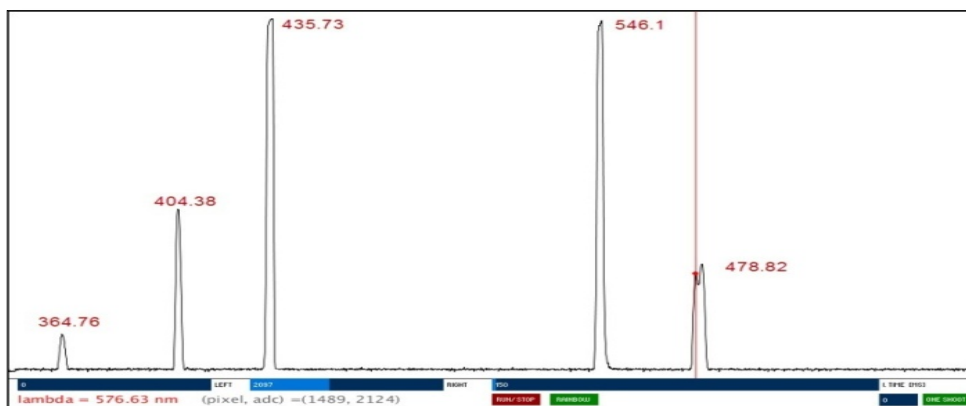


Slika 7 : aplikacija za prikaz spektra (spektar toplo bijele LED žarulje)

Aplikacija osim prikaza spektra omogućava brzu promjenu vremena integracije, određivanje valne duljine (na slici crvena vertikalna crta na 442.14 nm) te povećanje.

Kalibracija

Za kalibraciju spektrometra potreban je izvor ili izvori koji će dati barem 3 različite valne duljine poznatih vrijednosti. Živina žarulja daje spektralne linije na nekoliko valnih duljina te smo nju odabrali kao kalibracijski izvor. Za kalibraciju je potrebno u Processing aplikaciju upisati 3 para brojeva: valnu duljinu i piksel na kojemu se pojavljuje 3 odabrane valne duljine. Na slici (Slika 8) vidi se standardni spektar živine žarulje koji smo koristili za kalibraciju.



Slika 8 : spektar živine žarulje

Upotreba spektrometra u nastavi

U nastavnom satu sudjelovali su učenici trećeg razreda gimnazije. Nakon obrađene nastavne cjeline *Fizikalna optika* učenici su mjerili valne duljine određenih boja.

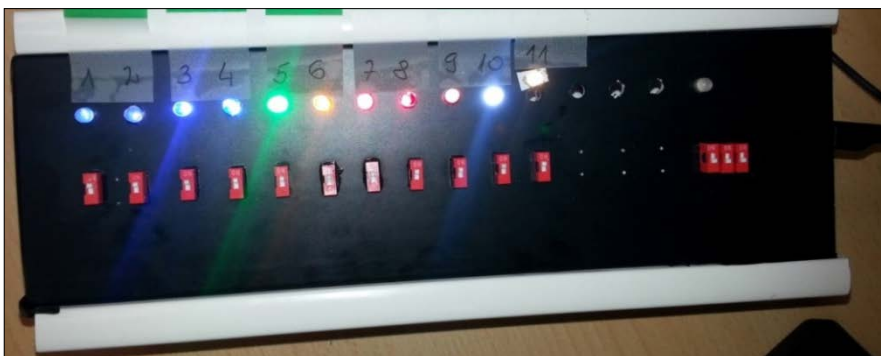
U prvom dijelu sata učenici su podijeljeni u četiri grupe, svaka grupa dobila je materijale i upute potrebne za rad.



Slika 9 : učenici

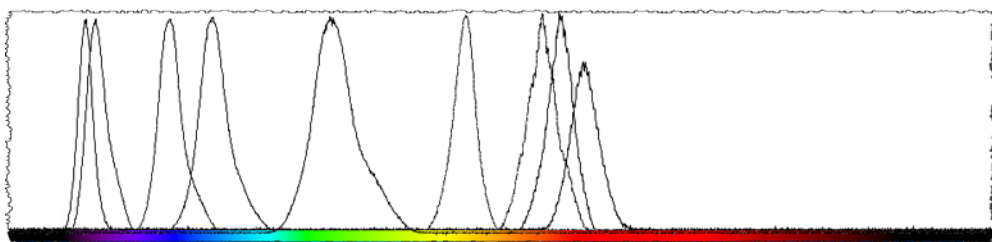
Na prvom papiru učenici su dobili tablicu u kojoj je definiran broj žaruljice, boja i valna duljina.

Žaruljica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Boja											
Valna duljina											



Slika 10 : kutija s različitim izvorima svjetlosti

Učenicima je pojedinačno upaljena svaka žaruljica s panela (Slika 10) po rednom broju, a oni su unutar grupe trebali procijeniti kojom bojom svijetli određena žaruljica i upisati boju u tablicu.



Slika 11 : spektri svih žaruljica ugrađenih u gornju kutiju

Nakon procjene boje napravljena je spektralna analiza svake pojedine žaruljice, tj. uz pomoć spektrometra i računalnog programa izmjerena je valna duljina. Učenici su tada uočili da ono što procjenjujemo, npr. kao što crveno u fizikalnom smislu predstavlja poprilično različite „boje“, uočili su da četiri crvene žarulje daju potpuno drugačije valne duljine i na taj su način spoznali važnost spektralne analize u suvremenoj znanosti.

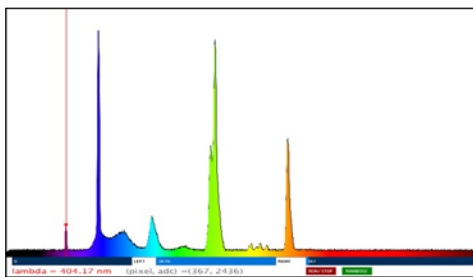
Učenici su u sklopu svojih radnih materijala imali i tablicu valnih duljina[4] i boja tako da su mogli procjenjivati unutar kojih se valnih duljina kreće određena boja i posebno im je bila zanimljiva spoznaja da se boje koje su prepoznavali kao plavo nakon spektralne analize nalaze unutar valnih duljina ljubičastog spektra.

Boja	Valna duljina [nm]
 Ljubičasta	390 - 455
 Plava	455 - 492
 Zelena	492 - 577
 Žuta	577 - 597
 Narančasta	597 - 622
 Crvena	622 - 780

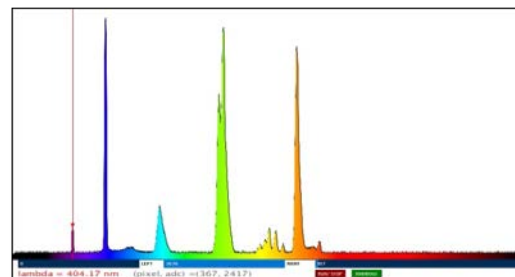
Tablica 1: ovisnost boja o valnoj duljini [4]

U drugom dijelu sata učenicima su pokazana različita rasvjetna tijela, žarulje koje se koriste u kućanstvima (Slika 12, Slika 13).

Učenici su procjenjivali boje, uočavali različitosti, a nakon diskusije snimljen je spektar tri različite žarulje.



Slika 12 : hladno bijela fluo žarulja

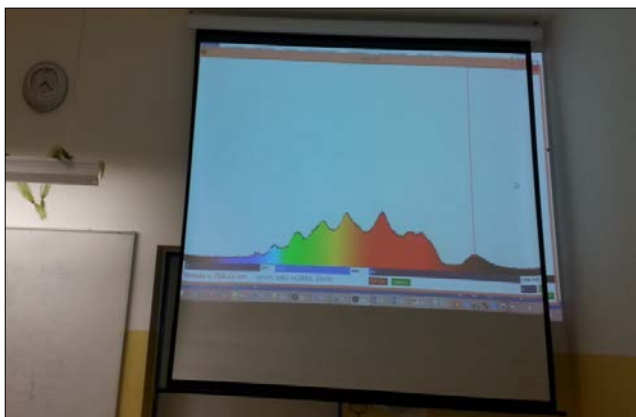


Slika 13 : toplo bijela fluo žarulja

Jedna od žarulja bila je živina žarulja te je nakon njenog snimljenog spektra učenicima dana uputa da uz pomoć dominantnih valnih duljina, koje je emitirala, odrede koji se kemijski elementi nalaze u žarulji. Učenici su dobili tablicu elemenata[5] pridruženih karakterističnim valnim duljinama i tako su zaključili da se u navedenoj žarulji nalazi živa i ksenon.

Analizom svjetlosti žarulje sa žarnom niti od volframa ustanovljeno je da uz vidljivi dio spektra uočavamo i infracrveni dio koji osjećamo kao toplinu dok žarulja svijetli (Slika 14).

S obzirom da smo imali jedan mjerni instrument, učenicima su rezultati prikazani uz pomoć projektoru (Slika 14).



Slika 14 : prikaz spektra učenici su vidjeli na projektoru (volframova žarulja)

U završnom dijelu sata učenici su raspravili o važnosti određivanja valnih duljina pojedinih izvora svjetlosti kako bi se definirao kemijski sastav i upućeni su da za domaću zadaću prouče praktičnu primjenu spektralne analize.

Zaključak:

Nakon provedenog nastavnog sata učenicima je dana mogućnost da uz pomoć jednostavnog upitnika procijene sat kojem su prisustvovali. Učenici su naglašavali da su, osim što je sat bio zanimljiv, osvijestili povezanost valnih duljina i boja te su produbili svoja znanja iz područja valne optike, a stvorio se i interes za daljnje proučavanje svojstava svjetlosti. Ono što bismo željeli naglasiti nedostatak je većeg broja ovakvih instrumenata. Ukoliko financijska situacija dopusti, namjera nam je napraviti više instrumenata kako bismo omogućili učenicima rad u grupi i samostalno mjerenje što bi dodatno potaknulo njihov interes te produbilo spoznaju povezivanja prirodnih znanosti sa suvremenim informatičkim dostignućima.

Popis literature

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_spectrometer
2. V. Paar , *Fizika 3*, udžbenik za treći razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb 2009
3. <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103c8.html>
4. <http://e-kemija.blogspot.hr/>
5. *Typical Spectra of Oriel Spectral Calibration Lamps* - MIT [http://web.mit.edu/8.13/8.13d/manuals/Hydrogenic/oriel-typical-spectra-of-calibration-lamps.pdf]