

SINHROTRONSKA SVETLOBA

Miran Mozetič in **Matjaž Štuhec***, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko Teslova 30, 61111 Ljubljana, * Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Synchrotron radiation

ABSTRACT

Basic principles of the synchrotron are presented and some characteristics of the synchrotron radiation are described. Some results of recent experiments performed at different laboratories are briefly mentioned.

POVZETEK

V prispevku opiševa princip delovanja sinhrotrona in nekaj lastnosti sinhrotronske svetlobe. Na kratko omeniva nekaj rezultatov novejših raziskav, ki so jih opravili na sinhrotronih po svetu.

1 Uvod

Verjetno je malo kapitalsko tako zahtevnih projektov, ki jih države velikodušno financirajo, kot je postavitve izvirov sinhrotronske svetlobe. Le ti namreč rastejo po svetu kot gobe po dežju. Sinhrotrone, ki veljajo več sto milijonov dolarjev, postavljajo ne samo v razvitih državah, ampak tudi v državah tretjega sveta, npr. Indiji in Braziliji. Najbolj osuplo je morebiti dejstvo, da pri tem ne gre za vojaške projekte (kot je bil npr. projekt Vojna zvezd), ampak za pretežno znanstvene raziskave. Prepričati parlament neke države, da investira toliko denarja v izgradnjo tako dragih laboratorijev, je na prvi pogled nemogoče. Vendar pa ...

Znanstvenikom je očitno uspelo prepričati politike, da je vredno vlagati denar v tovrstne raziskave. Konec osemdesetih let tega stoletja so namreč odkrili, da ponuja sinhrotronska svetloba neslutene možnosti raziskav na področju medicine, biologije, kemije in drugih ved. Prof. Bradner npr. napoveduje odkritje zdravila za nekatere vrste raka že za konec tega desetletja /1/. Dr. Thompsonu je s sinhrotronsko svetlobo uspelo odkriti spremembe med pasivnim in aktivnim stanjem nekaterih virusov /2/. S tem se ponuja možnost za tolmačenje delovanja virusa HIV in s tem odkritje zdravila proti drugi kugi 20. stoletja, AIDS-u. Raziskave s sinhrotronsko svetlobo omogočajo tudi natančno določitev kemisorbiranih stanj molekul na površinah, sprotno opazovanje katalitičnih procesov in s tem ponujajo rešitev za mnoge pereče ekološke probleme naše civilizacije.

2 Sinhrotron

Zgodovina sinhrotronskega sevanja sega v 50. leta, ko so skonstruirali prvi sinhrotron za pospeševanje delcev, sevanje pa je v začetku predstavljalo le neželene izgube za fizike visokih energij. Sinhrotron je velik vakuumski sistem v obliki pravilnega mnogokotnika. Vakuumski sistem sestavljajo cevi, po katerih se gibljejo skupki elektronov, ki jih vbrizgajo v cev v določenih časovnih zaporedjih. Elektroni imajo energijo reda velikosti 1 GeV. Pri tej energiji se hitrost elek-

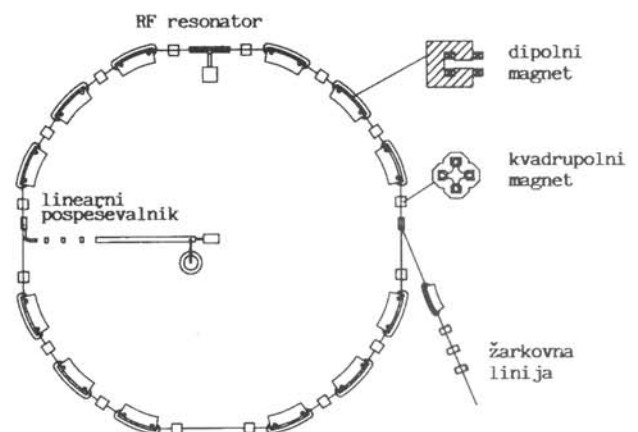
tronov le malo razlikuje od hitrosti svetlobe v vakuumu. Tolikšne energije elektronov seveda ne moremo zlahka doseči, zato je sestavni del vsakega sinhrotrona linearni pospeševalnik, ki pospeši elektrone do visokih energij, preden jih vbrizgajo v mnogokotnik.

Če naj bi se elektroni gibali po začrtani poti skozi razmeroma ozko vakuumsko cev, ki sestavlja mnogokotnik, jim moramo v vsakem oglišču spremeniti smer gibanja. To bi lahko storili z močnim magnetnim ali električnim poljem. Iz popolnoma praktičnih razlogov raje uporabimo magnetno polje, saj so pri električnem polju velike težave s preboji. Gostoti magnetnega polja 0,1 T ustreza namreč jakost električnega polja 300000 V/m. Homogeno magnetno polje gostote B odkloni elektrone s hitrostjo blizu svetlobni, c , v krožnico z radijem R po enačbi:

$$R = \frac{E}{ecB} \quad (1)$$

Velikost sinhrotrona torej raste z energijo elektronov. Za doseganje večjih energij pa ne moremo poljubno večati gostote magnetnega polja B . Z navadnimi magneti dosežemo namreč danes do 1,5 T, s superprevodnimi pa kvečjemu 5 T.

Z dipolnim magnetom torej uspešno kontroliramo smer gibanja gruče elektronov v vakuumskem sistemu. Vendar pa se vsak skupek delcev prej ko slej razširi, zato ga je treba občasno spet zgostiti. Pri tem si pomagamo z elektronsko optiko. Skupek elektronov fokusiramo v magnetnem polju kvadrupolov. Za bolj fine korekcije elektronske orbite uporabljamo še sekstapolne magnetne.



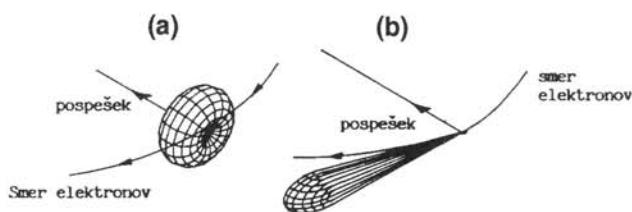
Slika 1. Sinhrotron

Pomemben del sinhrotrona je tudi resonančna votlina, v kateri pospešimo skupke elektronov z RF električnim poljem, da nadomestimo izgube kinetične energije zaradi sevanja. Elektron namreč pri spremembi smeri gibanja seva kvante elektromagnetnega valovanja - fotone. Iz fizike je znano, da vsak pospešeni nabiti delec seva svetlobo. Izguba energije zaradi t.i. sinhrotronskega sevanja je sorazmerna s četrto potenco energije krožečega elektrona. Pri nizkih energijah sinhrotronsko sevanje ni omembe vredno. Bistveno prispevajo šele elektroni z energijami nekaj 10 MeV. Celotna izsevana moč pa je razen od energije elektronov odvisna še od števila oziroma toka elektronov v obroču. Velja zveza:

$$P = \frac{e \gamma^4}{3 \epsilon_0 R} I, \quad (2)$$

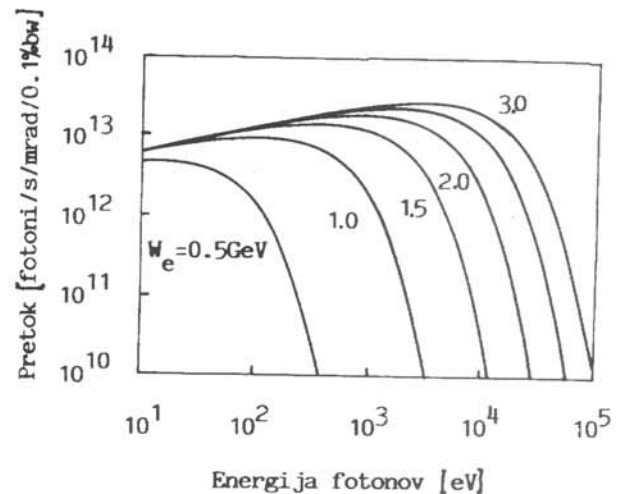
kjer je γ energija elektrona deljena z njegovo mirovno energijo ($m_0 c^2$), R pa krivinski radij elektronske orbite. Pri toku 200 mA dobimo za elektrone z energijo 1.5 GeV na krožnici z radijem 3 m izsevano moč 26 kW. To pa je v primerjavi s klasičnimi izviri žarkov X izredno velika vrednost. Prva prednost sinhrotronskega sevanja je torej izredno velika intenziteta izsevane svetlobe, ki kar za nekaj redov velikosti prekaša vse dosedanje izvire.

Elektroni, ki vstopijo v območje magnetnega dipola, se pospešijo pravokotno na smer gibanja. Pospešeni elektron seva svetlobo, kot je napovedal že Herz, s prostorsko porazdelitvijo prikazano na sliki 2a. To velja v inercialnem opazovalnem sistemu, ki se giblje skupaj z elektronom. Vendar pa uporabnik sinhrotrona opazuje elektrone iz inercialnega sistema, ki ima proti elektronu skorajda svetlobno hitrost. Fizika hitrih delcev nas pouči, da seva elektron za opazovalca v laboratoriju predvsem v smeri njegovega gibanja. Velikost prostorskega kota, v katerega pospešeni elektron seva, je odvisna od energije elektronov in je $2/\gamma$. Na primer: elektroni z energijo 1 GeV sevajo v ozkem stožcu s kotom reda tisočinke radiana (glej sliko 2b). Velika prednost sinhrotrona pred klasičnimi izviri žarkov X je prav odlična kolimiranost svetlobnega curka.



Slika 2. Kotna porazdelitev sinhrotronskega sevanja

Spekter sevanja iz dipolnega magneta je zvezen in sega od energij reda 1 eV, kar ustreza valovnim dolžinam vidne svetlobe, preko UV področja, pa vse do nekaj 10 keV, kar je že v področju rentgenske svetlobe. Tudi po širokem spektralnem območju je sinhrotron edinstven izvir svetlobe. Na sliki 3 je značilen spekter v log-log skali (glej sliko 3).



Slika 3. Spekter sevanja iz dipolnega magneta

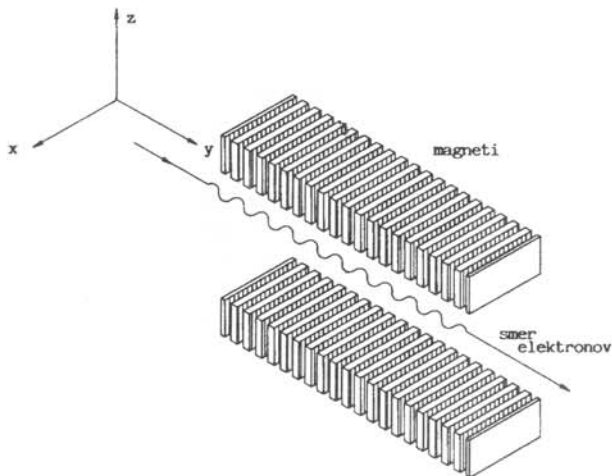
Energijo, pri kateri začne intenziteta padati, določa t.i. kritična frekvenca,

$$\omega_c = \frac{3c\gamma^3}{2R}. \quad (3)$$

Spekter dobimo namreč s Fourierjevo analizo časovnega poteka sevanja. Časovni potek pa je hitro zaporedje (reda MHz) kratkih pulzov, ko ozek svetlobni curek posveti na opazovano točko pri vsakem obhodu elektronov. Kritična frekvenca je tedaj povezana s širino časovnega intervala enega svetlobnega pulza. Odvisna je od energije elektronov γ .

Pri dolgem dipolnem magnetu, ki skrbi za pravilno smer elektronov v sinhrotronu, elektroni spontano sevajo svetlobo na vsej svoji poti skozi magnet. Če se na njej ukrivijo za, recimo, 15° , je lastnost ozke kotne divergence curka, ki je reda $1/\gamma$, izkoriščena le v navpični smeri, v vodoravni smeri pa je očitno enaka 15° . Ker so navadno vzorci majhnih dimenzij, raziskovalec dejansko ne razpolaga s celotno izsevano svetlobo, ampak le s tistim delom, ki ga uspe zbrati z optičnim sistemom zaslonk in ukrivljenih zrcal. Zaradi tega dipolni magneti pravzaprav niso najbolj optimalen izvir sinhrotronske svetlobe. Za doseganje velikih gostot izsevane svetlobnega toka v majhen prostorski kot uporabljamo dodatne naprave, ki jih namestimo na ravne dele mnogokotnika. Naprave se imenujejo undulatorji in viglerji, sestavljeni pa so iz množice kratkih magnetov s spreminjajočo se polariteto, kot je prikazano na sliki 4.

Pri prehodu elektronov skozi polje posameznega majhnega magneta se smer gibanja elektronov le malo spremeni. Zato je celotni prostorski kot izsevane svetlobe majhen. Temu primerno je majhen tudi izsevani energijski tok. Zato pa imamo v undulatorju ali viglerju več 10 posameznih magnetov in se energijski tok na posameznih zavojih seštevata. Razlika med viglerji in undulatorji je le v amplitudi vijuganja, ki ga vsilijo elektronom. Za undulatorje je značilno, da



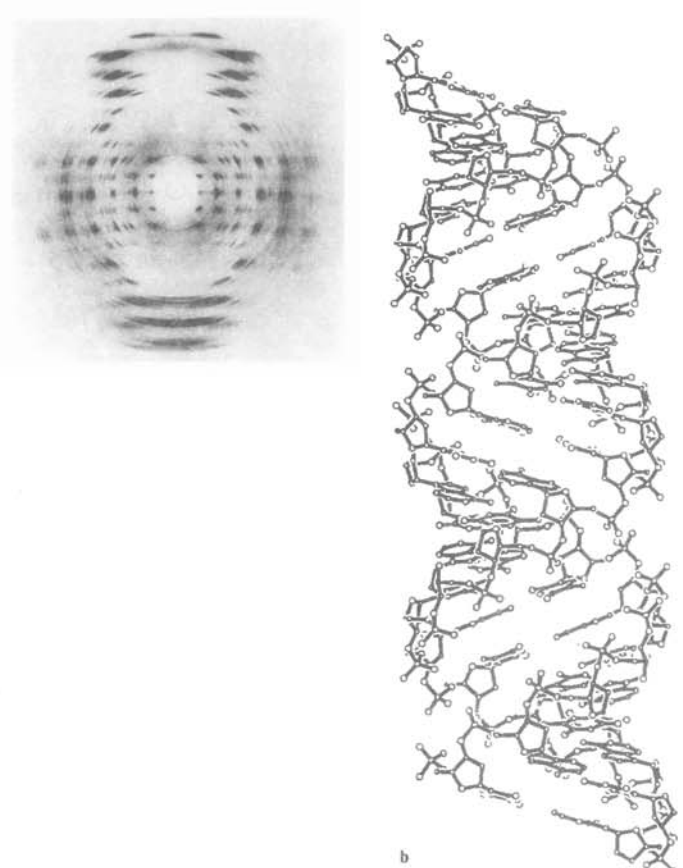
Slika 4. Vigler oziroma undulator

maksimalni odmik od nemotene poti elektronov ni večji od kotne divergence izsevane svetlobe. S tem pridobimo dodatno kvaliteto, to je, da se svetloba, izsevana na zaporednih zavojih, koherentno sešteje. Razen zveznega dela spektra kot vigler, ima undulator še ostre črte enobarvne koherentne svetlobe. (V tej smeri tudi tečejo intenzivne raziskave za izdelavo rentgenskega laserja visoke moči). Z undulatorji ali viglerji tako res dobimo velike gostote izsevanega energijskega toka v zelo majhnem prostorskem kotu.

3 Nekatere aplikacije sinhrotronske svetlobe

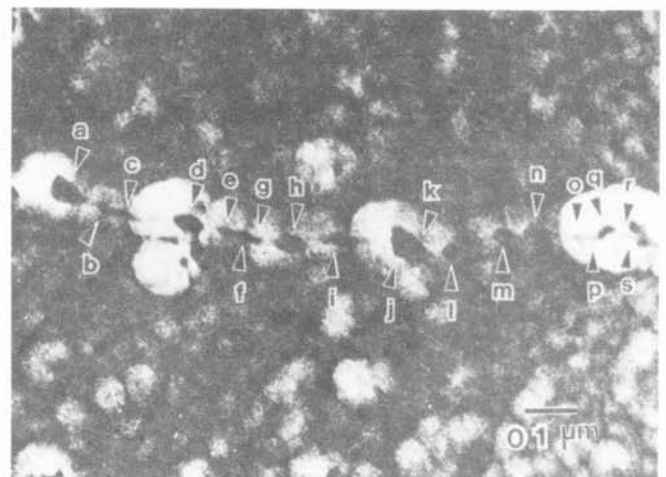
Nazadnje si še oglejmo, kje vse lahko izkoristimo to veliko intenziteto sinhrotronske svetlobe v širokem energijskem področju. Najpreprostejši eksperiment, ki si ga lahko zamislimo, je kar meritev absorpcijskega koeficienta preiskovane snovi v odvisnosti od energije vpadne svetlobe. Eksperiment zahteva le dva števca, ki merita intenziteto vpadnega in prepuščenega toka, in seveda monokromator, ki izreže iz belega spektra poljuben energijski pas. Absorpcijski robovi dajo informacijo o elementih, ki sestavljajo preiskovano snov. Pri tekočih ali trdnih vzorcih dobimo s t.i. metodo podaljšane fine strukture absorpcijskih robov (EXAFS) tudi informacijo o lokalni okolici izbranega atoma (npr. oddaljenost, vrsto in število sosedov). Zaradi velike intenzitete sinhrotronskega sevanja je posamezna meritev hitra (traja lahko le nekaj sekund), kar omogoča časovno spremljanje kemijskih procesov. Kolimiranost curka lahko izrabimo za absorpcijsko spektrometrijo majhnih vzorcev (velikosti milimetra). Primer takih meritev so raziskave snovi pod visokimi pritiski v stiskalnici z diamantnimi okni, s čemer simulirajo dogajanje v zemeljski sredici.

Naslednje široko področje raziskav s sinhrotronsko svetlobo so vse mogoče difrakcijske metode /3/, ki so povezane z razvozlanjem zapletene strukture makromolekul v molekularni biologiji (glej sliko 5).



Slika 5. Difrakcijska slika in rekonstrukcija molekule DNA.

Povsem novo in zanimivo področje je rentgenska mikroskopija. Nove tehnologije tankih plasti so namreč omogočile izdelavo Fresnelovih leč za rentgensko svetlobo in s tem rentgenskega mikroskopa. Za mikrobiologe se tako odpira možnost preiskovanja tako rekoč živih vzorcev v epruveti, brez predhodnih priprav, ki jih zahteva elektronski mikroskop. Slika kromosoma /4/, posneta z rentgenskim mikroskopom na sinhrotronu Photon Factory na Japonskem, je prikazana na sliki 6.



Slika 6. Slika človeškega kromosoma.

Zapletenejši detektorski sistem zahteva elektronska spektrometrija. Ozek fokusiran snop sinhrotronske svetlobe premikamo po vzorcu in detektiramo izbite fotoelektrone. Iz energijske in prostorske porazdelitve izbitih elektronov sklepamo o strukturi preiskovane snovi, vrsti in razporeditvi atomov. Glede na vpadni kot curka lahko vzbujamo le površinske, ali pa tudi globlje plasti. Tako lahko preiskujemo plast za plastjo materiala. Na sliki 7 je posnetek 2 nm debelih trakov bora na silicijevi podlagi. Posnetek odlikuje skoraj 100

-odstotni kontrast, ki je dosegljiv le še z Augerjevim mikroskopom, vendar pa hitrejša sinhrotronska meritve omogoča dinamične raziskave procesa difuzije.

4 Sklep

Ugotovili smo, da ponuja sinhrotronsko sevanje skoraj neomejene možnosti raziskav na raznih področjih znanosti in visokih tehnologij. Zdaj je tudi jasno, od kod toliko zanimanje za gradnjo dragih pospeševalnikov povsod po svetu. Očitno je, da bo moral imeti dostop do takšnih naprav, kdor bo hotel držati korak z razvojem novih tehnologij.

5 Literatura

- /1/ F. Branden, Application of synchrotrone radiation in biology, 2nd School of the use of synchrotrone radiation, Trst (1993).
- /2/ A. Thompson, privatna diskusija, 2nd School of the use of synchrotrone radiation, Trst (1993).
- /3/ R.J. Greenall and W. Fuller, v Topics in Current Chemistry, str.32 Y. Kagoshima, Synchrotron radiation news, 6, Julij 1993.
- /4/ Y. Kagoshima, Synchrotron radiation news, 6, 27 Julij 1993
- /5/ B.P. Tonner, Synchrotron radiation news, 4, 19 Marec 1991

Slika 7. Posnetek borovih trakov na siliciju.

IZOBRAŽEVANJA V LETU 1994

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

organizira že več kot dve desetletji različne strokovno izobraževalne tečaje s področja vakuumistike. Za leto 1994 razpisujemo naslednje:

1. Vzdrževanje vakuumskih naprav

(19.-21. april, 15.-17. november)

Na tečaju bo predvsem obravnavana tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega vakuuma, to je: delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih vrst črpalk, ventilov in drugih standardnih elementov, meritve vakuuma, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila ter tehnike čiščenja in spajanja. Tečaj bo trajal 20 ur, od tega več kot tretjina praktičnih prikazov in vaj. Cena tečaja je 24.000 SIT. Vsak tečajnik prejme tudi brošuro "Vzdrževanje vakuumskih naprav" in potrdilo o opravljenem tečaju.

2. Osnove vakuumske tehnike

(22.-24. marec, 18.-20. oktober)

Tečaj podrobneje obravnava ista področja kot prvi, poleg tega pa še: pomen in razvoj vakuumske tehnike, fizikalne osnove, črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge vakuumske tehnologije, čiste postopke, analize površin ter doziranje plinov, čiščenje in preiskave plinov - skupno 22 ur z vajami in ogledom Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko. Cena tečaja je 20.000 SIT. Udeleženci prejmejo zbornik predavanj "Osnove vakuumske tehnike" in potrdilo o opravljenem tečaju.

3. Vakuumaska tehnika za predavatelje

srednjih šol (3.-5. marec, avgust, september, november)

Vsebina tečaja v obliki delavnice je podobna kot pri "Osnovah vakuumske tehnike". Poudarek je na prikazu fizikalnih pojavov v vakuumu in na predstavitvi pomembnosti vakuumskih postopkov v sodobnih tehnologijah. Več je vaj, ki so izbrane tako, da jih je možno z nekaj osnovne opreme izvajati tudi v šolskih laboratorijih za dijake. V delavnico je vključena tudi izdelava seminarske naloge po pravilniku Ministrstva za šolstvo in šport, ki udeležbo na tej delavnici točkuje z 1 točko pri dopolnilnem izobraževanju.

Vsi tečaji se bodo pričeli ob 8,00 uri v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana. Prosimo interesente, da se informativno prijavijo čimprej, za dokončno potrdilo udeležbe pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje štiri dni pred pričetkom tečaja, na naslov:

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana (št. ŽR: 50100-678-52240).

Prijave sprejema organizacijski odbor (Koller, Spruk, Mozetič, Nemanič), ki daje tudi vse dodatne informacije; (tel. 061 263 461).

I.O. DVTS