



STRUKTURA 2008, RPKD

Hotel Hubertus, Valtice, 16. 6. - 20. 6., 2008

Lectures - Monday, June 16

L1

SYNCHROTRON – PHYSICAL PRINCIPLES AND PROBLEMS

Z. Pokorná and B. Růžička

*Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Science, Královopolská 147,
61264 Brno, Czech Republic ruzicka@isibrno.cz, zuza@isibrno.cz*

This lecture will give an explanation of the basic principles of electron acceleration by means of synchrotron machines.

Synchrotrons are advanced large circular devices that allow charged particles to acquire very high energies of 10^9 to 10^{12} electronvolts. The acceleration is achieved by repeated propelling effects of electrical field and the particle trajectory is guided by magnets. In electron synchrotrons, synchrotron radiation is produced as a by-product of the electrons' trajectory being curved. This radiation is highly intensive and it can span from infra-red spectral region to hard x-ray. It can also be delivered with arbitrary polarization or in the form of a train of ultra-short intensive pulses. This makes synchrotrons an essential tool for cutting-edge experiments in all scientific branches from material science and nanotechnologies to bio-technologies and medicine.

Syllabus

Introduction. Basic principles. A brief history of accelerators. Basic types of accelerators: linear accelerator, cyclotron, synchrocyclotron, betatron, synchrotron.

Basic building blocks. Bending magnets (dipoles), focusing magnets (quadrupoles), sextupoles and correctors.

Vacuum chamber and absorbers. RF cavities. Beam diagnostics.

Functional units of the synchrotron. Electron gun. Linac. Transfer lines. Booster synchrotron. Storage ring. Insertion devices, front ends, beamlines, experimental stations.

Special problems of synchrotrons. Timing and Control Systems. Closed orbit correction. Beam instability thresholds. Radiation safety, special demands on civil engineering.

1. A. Hofmann, *The Physics of Synchrotron Radiation*. New York: Cambridge University Press. 2004.
2. H. Wiedemann, *Synchrotron Radiation*. Berlin: Springer. 2003.
3. *Synchrotron Radiation Sources*, edited by H. Winnick (Singapore: World Scientific), 1995.

The authors would like to thank, on behalf of the Academy of Science of the Czech Republic and the CESLAB Project, to the experts at the ALBA synchrotron facility in Barcelona, Spain, for their kind cooperation and help in many issues. The authors are also thankful to anybody who kindly shared their invaluable experience in the field of synchrotron machine physics.

L2

PROJECT OF THE CENTRAL EUROPEAN SYNCHROTRON LABORATORY (CESLAB)

Petr Mikulík

Department of Condensed Matter Physics, Masaryk University, Brno, Czech Republic

This presentation will discuss the conceptual design of the new synchrotron radiation facility to be built in the Czech Republic – Central European Synchrotron Laboratory (CESLAB). The proposals for the experimental beamlines with their research fields, applications and the user base will be overviewed shortly in order to make step forward further presentation of the beamline coordinators and involved scientists and to promote further discussion among participating researchers.

Construction of this synchrotron facility has been proposed by the Academy of Sciences of the Czech Republic

(ASCR) as one of the projects to be realized from the Structural Funds of the European Union. The CESLAB will be a modern third-generation electron synchrotron facility with energy of 3 GeV serving the Central Europe from year 2015. Due to the favourable geographical location of Brno, the facility will serve not only to the needs of the Czech science, research and industry, but also to the Central European partners from Slovakia, Austria, Hungary, and others.

The new synchrotron to be built in the Czech Republic in Brno will be the 3rd generation source taking the best from the current state of the art of synchrotron physics and



technology. The main facility will be based on the latest 3 GeV European synchrotron ALBA, currently under construction in Barcelona. The knowledge transfer, help and direct collaboration on the project planning and later on synchrotron construction has been agreed with the experienced team in ALBA with a support by the respective Czech and Spanish ministries. This considerably boosted preparation of the Conceptual Design Study of the accelerator complex.

From a technical point of view, the storage ring of diameter 270 m will consist of 24 straight sections for insertion devices for up to 33 beamlines. The top-up filling mode will ensure constant output flux. More details about the facility will be presented by the Z. Pokorná and B. Růžička in their contribution.

Czech scientists have a long tradition in research with synchrotron radiation and they have a lot of experience at running synchrotron experiments. The Czech Republic was the first from the central European countries joining the ESRF, the brightest European synchrotron. There is a successful Czech Materials Science beamline at synchrotron ELETTRA in Trieste – it will be presented at this workshop as well. In conjunction with the upgrade programme of the ESRF to continue its functionality as the most brilliant synchrotron source in Europe, only proposals of well-prepared and pretested applications will be accepted there. In general, in the Europe as everywhere in the world, the demand for beamtime is larger than the available measuring time. A new synchrotron will help to reduce this pressure. The current trend in the world is to provide fast access for urgent or cutting-edge applications, which is needed mainly for industrial applications. Further, the new source will enhance interest in physics and high technology, and it will serve the other new laboratories created in the Czech Republic from the Structural Funds. It will also allow young researcher easier come-back from their current positions at European synchrotrons. In summary, new synchrotron facility in the favourite location of Brno close to five central European countries will take care of all of these needs.

Beamlines are the heart of results at the synchrotron facility. They provide necessary equipment for the methods applied to different fields of research, such as biology and medicine, material science, chemistry, microtechnology and nanotechnology, environmental sciences, or archeology. Let us briefly overview the beamlines currently proposed for CESLAB. *Macromolecular crystallography* is a method for structure determination of molecules from diffraction patterns. Intense X-ray radiation of 1 Å wavelength is necessary for precise determination of complicated structures of large molecules such as proteins or viruses. Synchrotron set-ups are optimized for fast measurement of many standard samples as well as for using anomalous diffraction for ab initio structure determination of complicated molecular complexes, to determine atom positions precisely, or for time-resolved studies. *Transmission microscopy methods* with soft X-rays in the water window range are used for imaging of biological samples or low-contrast materials by the phase imaging. Within hard X-rays the methods of microtomography and phase contrast are widely used for visualization of the inner structure

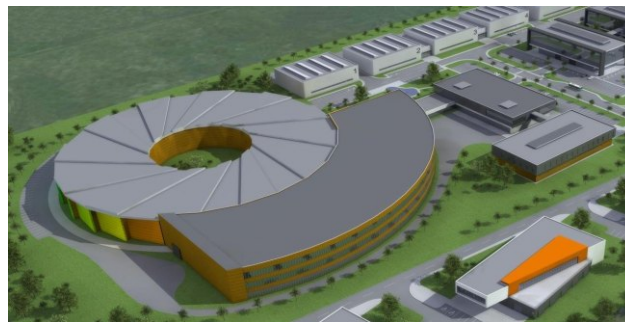


Figure 1. Architectural rendering of the proposed synchrotron.

of devices or materials with bulk characteristics. *Powder diffraction* is used for structure determination of powder materials (organic as well as anorganic), or microcrystallites and their structural changes in different environments. *X-ray diffraction methods* at small as well as large angles are widely used mainly because of the high intensity necessary for study of low-dimensional objects and nanostructures, for energy tuning and for beam size conditioning. *LEEM and PEEM* investigate both crystalline and electronic structure of surfaces as well as of processes connected with their dynamic phenomena by photoemission spectromicroscopy and spin polarized microscopy with slow electrons. *Spectroscopy* can be used in a whole range of methods, such as absorption or magnetic spectroscopy, synchrotron Mössbauer spectroscopy, or photoemission. At synchrotrons, it can probe samples continuously from hard X-rays through VUV down to IR radiation. *Infrared methods* for microscopy, ellipsometry and spectroscopy conducted at synchrotrons differ from those at laboratory mainly because of the high intensity and the full range of the IR spectrum. The methods allow to study conductive as well as semi-conductive materials, organics, biological tissues or piezo- and ferroelectrics. *Chemical reactions in gas phase* allow to understand reaction mechanisms and to study clusters, enzymes, etc., in (bio)organics and in analytical chemistry. The method utilizes photons from the VUV spectrum and sequent mass spectroscopy. Finally, a universal *Optics beamline* has been proposed in order to test new devices and instruments or for metrology of optical components. Further, this beamline can be used for a wide range of atypical or new experiments, and also for education of students or new users.

Considering the CESLAB project preparation, the first version of its Conceptual Design Study has been released in Spring 2008. Furthermore, a special issue of Materials Structure (vol. 15, no. 1a) has been issued in April 2008. Basic information about the project are presented there, accompanied by abstracts from the conference “Synchrotron Facilities for the Development of Science and Technology in Central and Eastern Europe” which took place in Brno in November 2007.

At this workshop, presentations of the synchrotron complex, machine physics, as well as of proposed beamlines and their science and applications will be presented.

More and current information about CESLAB is available at the addresses www.synchrotron.cz and www.ceslab.eu.

WIGGLERY, UNDULÁTORY A DALŠÍ ZDROJE SYNCHROTRONOVÉHO ZÁŘENÍ

Jaromír Hrdý

Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8
hrdy@fzu.cz

Synchrotronové záření (SZ) je elektromagnetické záření, které vyzařuje nabitá relativistická částice (prakticky pouze elektron nebo vzácně i pozitron), pohybující se na zakřivené dráze. Na rozdíl od nerelativistického elektronu, který září prakticky do všech směrů, relativistický elektron září do úzkého kužele ve směru pohybu. Vrcholový úhel tohoto kužele závisí na energii elektronů a je zpravidla v desítkách až stovkách úhlových vteřin. Pozorovatel tedy zaregistruje relativistický elektron pohybující se po kruhové dráze pouze tehdy, když tento kužel protne místo, kde se nachází detektor záření, který zaregistruje ostrý puls. I když je pojem synchrotronové záření znám i z astronomie, v pozemských podmínkách prakticky vždy označuje záření elektronů při jejich pohybu v urychlovačích.

Zakřivení dráhy elektronů v urychlovačích lze realizovat různým způsobem a podle toho existují různé druhy zdrojů SZ. Pro jejich porovnání se používá veličina **spektrální briliance (spectral brilliance)**, která se rovná počtu vyzařovaných fotonů za sekundu, vztažených na 1 mm^2 plochy zdroje záření (což je plocha průřezu elektronového svazku v urychlovači), na divergenci do prostoro-
vého úhlu 1 mrad^2 a na 10% šířky ($\Delta E/E = 0.1$ vlnového oboru. Čím užší a paralelnější je svazek záření a čím více jsou fotony koncentrovány do co nejužšího vlnového oboru, tím je vyšší spektrální briliance. Ta je v nepřímém poměru k **emitanci (emittance)**, což je v podstatě součin rozměru zdroje záření a divergence záření.

V kruhových urychlovačích elektronů se jejich dráha zakřivuje v **ohybových magnetech (bending magnets – BM)** a ty se pak stávají zdrojem záření. Z BM se záření vyvádí evakuovanou trubicí do experimentální stanice (**beamline**). Výše zmíněný ostrý puls obsahuje vždy značné množství harmonických složek. Jelikož elektrony vyzařují fotony, jejich energie klesá a je jim v urychlovači opět dodávána. Vzhledem k této fluktuaci energie elektronů se harmonické natolik rozmyjí, že se spektrum jeví jako spojité, a to od radiových vln až (při dostatečně vysoké energii elektronů) do tvrdé rentgenové oblasti. Toto spektrum se obvykle charakterizuje tzv. **kritickou energií fotonů E_c** . To je taková energie fotonů, pro kterou platí, že celková vyzařovaná energie pro fotony s energií větší než E_c se rovná celkové vyzařované energii pro fotony s nižší energií. E_c roste s energií elektronů a magnetickým polem magnetů. Platí dostatečně přesně vztah

$$E_c [\text{KeV}] = 0.665 B[\text{T}] E^2 [\text{GeV}] .$$

Například pro magnetické pole $B = 1 \text{ T}$ a energii elektronů $E = 6 \text{ GeV}$ (což je situace v European Synchrotron Radiation Facility - ESRF v Grenoblu) je $E_c = 24 \text{ KeV}$.

Zkušenost ukazuje, že z hlediska intenzity jsou ještě použitelné fotony o energii 4–5 krát vyšší, v krajním případě i 10 krát vyšší.

Pro záření o kritické energii platí, že vrcholový úhel výše zmíněného kužele je $1/\gamma$, kde $\gamma = E/m_0c^2$, neboli také $\theta = E [\text{MeV}]/0.5$. Pro fotony o nižší energii je vrcholový úhel větší a naopak pro fotony o vyšší energii je vrcholový úhel menší. Pro ilustraci uvedme, že pro ESRF je $1/\gamma = 8.3 \cdot 10^{-5}$, což je asi 17 úhlových vteřin. Uvážíme-li, že vzdálenost experimentálního místa od zdroje záření je v ESRF např. 40 m, pak z toho vychází vertikální rozměr svazku v místě experimentu 3–4 mm. Horizontální rozměr svazku pak závisí na tom, z jak velké části oblouku orbity v BM záření odebíráme a jaká je konfigurace štěrbin. Prakticky bývá horizontální rozměr svazku až 10–15 cm. Je třeba ještě uvést, že v horizontální rovině orbitu je SZ lineárně polarizované. Nad a pod rovinou orbitu narůstá polarizační složka fázově posunutá tak, že záření je elipticky polarizované, přičemž smysly rotace nad a pod rovinou orbitu jsou opačné.

Elektrony na orbitě urychlovače nejsou rozděleny rovnoměrně, ale tvoří shluky (**bunches**). Každý shluk vytváří puls SZ, jehož délka závisí na délce shluku. Frekvence pulsů pak závisí na počtu shluků na orbitě. Ten je možné regulovat od jednoho (**single bunch mode**) až do desítek (**multi bunch mode**). V ESRF se například délka pulsů pohybuje okolo 100 ps a frekvence v MHz. Konečně důležitá je i okolnost daná malými rozměry zdroje (průřezu elektronového svazku) a velkou vzdáleností experimentálního místa od zdroje, která vede k částečné koherenci záření.

Velikost magnetického pole v klasickém BM je kolem 1 T. U zdrojů SZ s menší energií elektronů E (2–3 GeV) se v poslední době ke zvýšení energií fotonů a i jejich intenzity využívá zvýšení magnetického pole použitím supravodivých magnetů. Pro takové BM se vžil název **superbend**. U superbendu se energie vyzařovaného spektra posouvá k vyšším hodnotám a současně se zvyšuje i intenzita záření.

Pro zdroje synchrotronového záření současné (**třetí generace**) je charakteristické široké použití tzv. **wiglerů (wigglers)** nebo **undulátorů (undulators)**. To jsou zařízení, která se vkládají do přímých sekcí akumulárního prstence mezi ohybové magnety a jejich úkolem je horizontálně, nebo v některých případech i vertikálně, zvlnit dráhu elektronů. Vžil se pro ně název **insertion device**, zkráceně **ID**. V češtině se objevil i název **zvlňovač**. Jedná se o periodické uspořádání magnetů na dráze elektronů tak, že magnetické pole B je vertikální (případně horizontální) a periodicky mění smysl. Dráha elektronů při průchodu zvlňovačem se pak horizontálně (nebo i vertikálně) zvlní. Je-li magnetické pole dostatečně silné, i



zvlnění je výrazné a zařízení se v podstatě chová jako soustava ohybových magnetů. Z toho plynou stejné spektrální vlastnosti emitovaného záření jako u BM s tím, že se intenzity od jednotlivých prvků zvlňovače sčítají, čímž se zvyšuje intenzita, briliance a výkon vyzařovaného záření. Výkon ve svazku záření může dosahovat až několika kW! Toto zařízení je nazýváno vigler. Vigler navíc může být i supravodivý, dokonce s magnetickým polem až 10 T, což radikálně ovlivní spektrum a vyzařovaný výkon.

Zcela jiná situace je, když je magnetické pole slabé. Pozorovatel již nedetekuje ostré úzké pulsy ale jen periodicky modulovaný signál, ve zcela ideálním případě harmonicky modulovaný signál. Takové zařízení se nazývá undulátor. V ideálním případě undulátor vyzařuje monochromatickou vlnu, jejíž vlnová délka je proti periodě undulátoru podstatně zkrácená vlivem relativistického a Dopplerova jevu. Vlnová délka této vlny závisí na periodě undulátoru, energii elektronů, magnetickém poli a má i směrovou závislost. Undulátor je zpravidla realizován jako soustava permanentních magnetů, takže jeho perioda je velice malá, až kolem 15 mm. Příspěvky záření od jednotlivých prvků undulátoru interagují koherentně, takže se sčítají amplitudy. Vlivem interference se snižuje i divergence záření. Výsledkem je, že se undulátor proti vigleru vyznačuje podstatně vyšší briliancí, i když celkový vyzařovaný výkon je podstatně menší. Vysoká je ale hustota výkonu ve svazku, která dosahuje hodnot až stovek W/mm^2 . Vlnová délka undulátoru klesá s rostoucí energií elektronů a s klesajícím magnetickým polem. Ukazuje se, že pro technicky realizovatelnou periodu undulátoru musí být energie elektronů aspoň 6 GeV, aby vlnová délka záření vyzařovaného undulátorem byla kolem 0.1 nm. Toto je důvod existence ESRF (6 GeV), APS (7 GeV) a Spring8 (8 GeV) jakožto specializovaných zdrojů tvrdého rentgenového SZ. Tyto zdroje, díky existenci undulátorů, poskytují rentgenové záření s vysokou spektrální briliancí. Vlnová délka undulátorů závisí na magnetickém poli. Jelikož magnetické pole permanentních magnetů je konstantní, dá se magnetické pole v místě trajektorie elektronů v omezené míře měnit pouze vzdáleností horní a dolní řady magnetů. Takto se v omezené míře dá vlnová délka undulátoru ladit.

Ve skutečnosti je trajektorie elektronů v undulátoru taková, že záření obsahuje i vyšší harmonické, které je též možné k experimentům použít. Do osy undulátoru jsou vyzařované pouze liché harmonické, které však mají horší brilianci než harmonická základní. Záření první harmonické je kvazimonochromatické, $\Delta\lambda/\lambda = 1/N$, kde N je počet pólů undulátoru. Se vzrůstajícím polem sice vlnová délka první harmonické roste, ale přibývá harmonických do kterých se přelévá energie. Při dostatečně velkých hodnotách pole se tak undulátor změní ve vigler.

V poslední době se začínají instalovat supravodivé undulátory (**superconducting undulators**). Není to kvůli vysokému magnetickému poli, jak by se na první pohled zdálo. U těchto undulátorů je možno dosáhnout nízké periody a zejména ladit magnetické pole v širokém rozmezí. Proto poskytují proti klasickým undulátorům širší spektrum vlnových délek.

Undulátory poskytují lineárně polarizované záření s poměrně vysokým stupněm koherence. Spojením dvou undulátorů, z nichž jeden zvlňuje v horizontální rovině a druhý ve vertikální rovině, a které jsou od sebe posunuty o vhodnou vzdálenost, lze vytvořit kruhově polarizované záření s libovolným smyslem rotace.

Ukazuje se, že emitance u kruhových urychlovačů má své meze, ke kterým se emitance současných zdrojů SZ značně přibližuje. Proto další, **čtvrtá generace** zdrojů SZ je již založena na využití lineárních urychlovačů, které umožňují snížit emitanci a zkrátit délku pulsů. Probíhá-li krátký elektronový shluk dostatečně dlouhým undulátorem, pak elektromagnetická vlna generovaná v každém místě undulátoru postupuje společně s elektronovým svazkem a interaguje s ním. V důsledku této interakce se podélná hustota shluku elektronů moduluje s periodou emitovaného záření a záření z jednotlivých částí shluku se pak skládá koherentně. Vzniká tak **laser na volných elektronech**, neboli **free electron laser – FEL**. Ten se vyznačuje vysokou briliancí, podstatně vyšší než u klasického undulátoru, koherencí a krátkostí pulsů, dosahujících desítek fs. K urychlení elektronů na hodnoty řádu GeV je zapotřebí velmi dlouhého lineárního urychlovače. Proto se v poslední době přistupuje k řešení, kdy se elektrony po proběhnutí undulátoru vrací zpět do lineárního urychlovače. Není pak třeba urychlovat elektrony z nulové energie a urychlovač pak může být podstatně kratší. Takové zařízení se nazývá **energy recovery linac – ERL**. Ten, ve spojení s undulátory, může generovat femtosekundové pulsy o vysoké brilianci. ERL kombinovaný s FEL představuje blízkou budoucnost zdrojů SZ čtvrté generace poskytujících vysoce brilantní koherentní svazky rtg. záření ve formě femtosekundových pulsů. Na obrázku je znázorněn historický vývoj střední briliance synchrotronového záření a porovnání jednotlivých zdrojů.

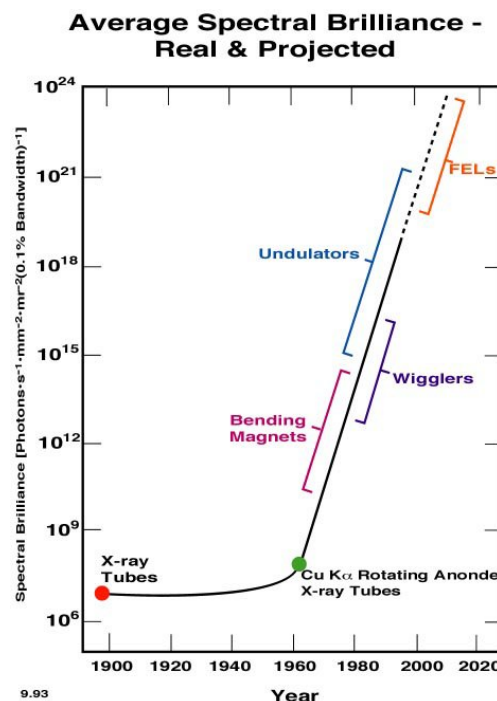


Figure 1.

SYNCHROTRON OPTICS

P. Oberta

*Institute of Physics, ASCR v.v.i., Na Slovance 2, 182 21, Praha 8
oberta@fzu.cz*

Synchrotron radiation is a powerful tool for modern science. To use it most effectively, scientists had to learn how to manipulate with synchrotron radiation. They were forced to develop methods and optical devices which would re-direct, stop or focus synchrotron radiation. Within the next paragraphs I will talk about various optical devices used for synchrotron radiation.

Synchrotron radiation has some unique features, like high flux, brilliance, coherence and polarization. Those properties have to be preserved and respected by synchrotron optics. This requires an enormous demand on the quality of each optical component. There are three basic working principles of synchrotron optics: reflective optics, refractive optics and diffraction optics.

Diffraction based optics are for example monochromator, Fresnel zone plate (FZP) and multilayer optics (ML).

A monochromator, Fig.1, selects from an incident spectrum of radiation a certain narrow band of wavelengths. This selection is based on the Bragg law:

$$2d \sin \theta = n \lambda, \quad (1)$$

where d is the crystallographic plane spacing, θ is the Bragg angle and λ is the wavelength. The most used materials for monochromators are Si, Ge, ML and diamonds.

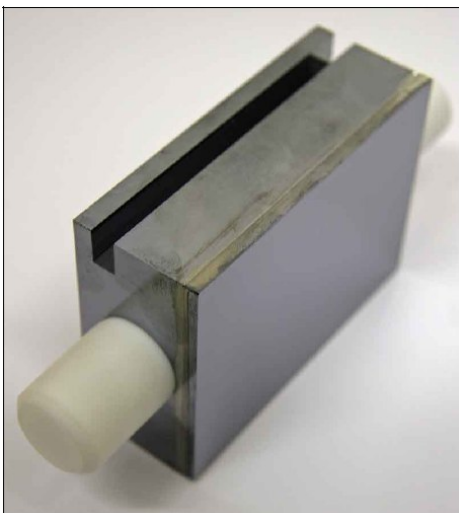


Figure 1. An internally water cooled Si monochromator.

The material is chosen with respect to the needed properties of the monochromator. For example a ML monochromator has a higher flux than a Si monochromator, but a lower resolution. The shape of a monochromator can be either flat or curved and it can be either cooled or uncooled. The type of cooling depends on the incident radiation density, which is connected with the radiation source. If we

have a beamline with an insertion device, the radiation density is rather large and the monochromator has to be cooled. Cooling can be direct or indirect and the cooling medium can be water or we can use cryogenic cooling.

The second diffraction based optical devices are Fresnel zone plates (FZPs). A Fresnel zone plate is a circular diffraction grating based on the Fresnel diffraction, Fig.2.

We can divide them into amplitude ZPs and phase ZPs, their difference is in the diffraction efficiency. A 40% diffraction efficiency is reached by the phase ZPs and only a 10% efficiency is reached in the case of the amplitude ZPs. Their focusing properties have already been discussed in the 19th century, but just in 1952 Baez constructed one for the X-ray region. In the case of the amplitude zones, the focusing results from different absorption between two neighboring zones. On the other hand phase zone focusing results from phase change upon transmission through a zone.

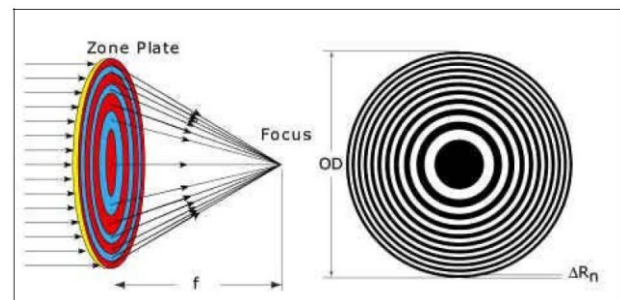


Figure 2. Fresnel zone plates.

Multilayer optics (ML) is also diffraction based (Fig.3). ML are created by putting two different materials periodically on each other. Mostly there are used several tens or hundreds of layers, with a thickness of 2 – 10 nm. The general rule to optimize ML performance is to choose one material with a high refractive index and a low absorption and the other material with a low refractive index and a high absorption. Because of the refraction at the surface vacuum-ML the Bragg equation has to be corrected:

$$n \lambda = 2 \sqrt{n^2 \cos^2 \theta} d, \quad (2)$$

where λ is the wavelength, d is A-B layer height and θ is the incident angle. The advantages of MLs are: high reflectivity – flux, coherent preservation and the adaptability to curved surfaces. Their disadvantages are: complex theoretical description, need of perfect substrate, considerable cost and non-trivial alignment.

The second working principle is refraction. Compound refractive lenses (CRL) are based on refraction. Refractive

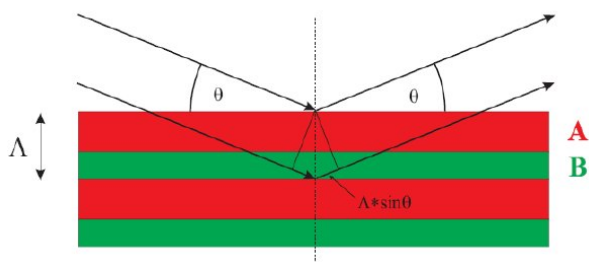


Figure 3. Multilayer structure.

lenses made of glass are widely used in the visible region, in 1996 Snigirev *et al* [1], introduced CRL for the X-ray region. Because of their weak refraction and strong absorption, they can be used only for synchrotron radiation. For their production, low Z materials are used like Li, Be, B, C and Al. Their profile is parabolic, Fig.4, and they can be used in energies under 1 MeV.

The last group is reflection based optical devices, widely used and well known from the visible region. X-ray mirrors work at the principle of total reflection, which occurs under the critical angle. For hard X-rays the critical angle is very small, 0.1–10 mrad, therefore the used material should have a high electron density, like Au and Pt. X-ray mirrors can be used as focusing elements and for removing short wavelengths. The mostly spread configuration is the Kirkpatrick – Baez system (KB).

The next reflection based devices are capillaries. They rely on total external reflection from their internal surface of the tube, this way they also avoid absorption. Their advantages is to create a very small focal point, because the beam size is defined by the exit hole diameter.

The last reflection based device is a waveguide. Its a thin film resonator in which a low absorbing material is enclosed between two metal layers with a small refractive index.

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, *Nature*, **384** (1996) 6604. 49-51.

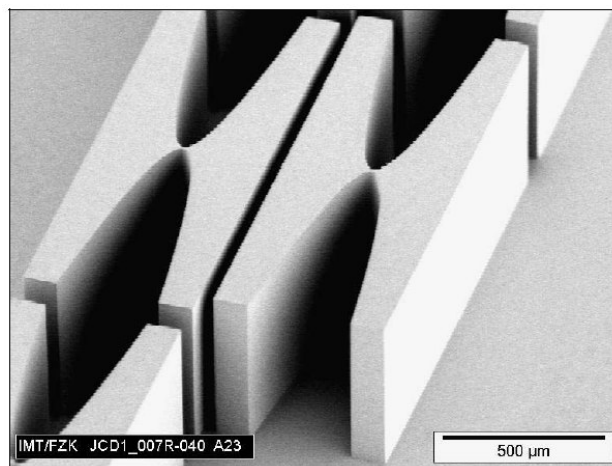


Figure 4. Compound refractive lens mate at Forschungszentrum Karlsruhe.

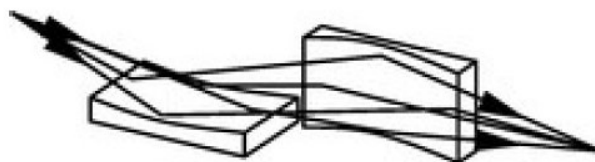


Figure 5. Kirkpatrick-Baez system.