

Polski ultrafioletowy laser na swobodnych elektronach POLFEL

Zarys koncepcji

Przedmiot:

- Źródło światła koherentnego – laser na swobodnych elektronach (Free Electron Laser), zasilany wiązką z nadprzewodzącego liniowego akceleratora elektronów.

Cel:

- Unikalne urządzenie badawcze dla polskiej nauki i przemysłu (w ramach ESFRI „IRUVX FELs Network”)
- Baza badawcza i szkoleniowa dla badań materiałowych, środowiskowych, medycznych i biologicznych
- Poligon szkoleniowy dla technologii akceleratorowych, laserowych, detekcyjnych

Możliwości:

- Badanie elektronowych właściwości molekuł i skondensowanej materii
- Trójwymiarowe zdjęcia struktur atomowych
- Rejestracja procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych w wymiarach atomowych i w femtosekundowej skali czasu.

Zastosowania:

- Badania podstawowe: testy chromodynamiki kwantowej <500MeV
- Badania półprzewodników i struktur kwantowych:
 - fonony, plazmony, energie wiązania atomów domieszek, poziomy energetyczne w studniach, kropkach i drutach kwantowych, dynamika relaksacji
 - rozwój technologii fal milimetrovych (THz) i technologii MEMS: anteny hybrydowe, miksery, filtry
 - metoda pompowania i analizy (pump/probe):
 - dynamika nośników w supersieciach, oddziaływań wewnątrzpasmoste, lasery kaskadowe
 - absorpcja w studniach kwantowych i supersieciach, szerokości linii emisyjnych, dyspersja
 - własności optyczne w zakresie podczerwieni i zakresie THz takich struktur kwantowych jak oscylatory Blocha i kwantowe lasery kaskadowe.
 - koherentne efekty rezonansowe, oscylacje Rabiiego.
- Mikroskopia i spektroskopia przykrawędziowa
- Pomiar zanieczyszczeń w środowisku (metale ciężkie) metodą spektroskopii fototermicznej (PTDB)
- Badania procesów atmosferycznych w czasie rzeczywistym przy pomocy stojonego lidara
- Spektroskopia molekuł biologicznych
- Diagnostyka medyczna: precyzyjne obrazowanie narządów wewnętrznych, identyfikacja molekuł
- Terapia medyczna: „nanoplatformy” deponowane w określonych tkankach i aktywowane promieniowaniem FEL
- Selektywne, bezpośrednie niszczenie chorych komórek dzięki dostrojeniu długości fali

Parametry:

- **Ciągła** wiązka elektronowa o energii **600 MeV**
- Długość fali: podstawowa - **27 nm**, trzecia harmoniczna - **9 nm**
- Maksymalna moc wiązki światła w impulsie: **0.22 GW**
- Długość urządzenia: do **400 m**
- Koszt: **100 M€** (FEL + jedna stacja badawcza) do **200 M€** (FEL + 6 stacji badawczych)

Technologia:

- Wykorzystanie podzespołów budowanych dla urządzenia XFEL w DESY

Lokalizacja:

- Instytut Problemów Jądrowych / Centrum Atomistyki Świerk:
 - istniejąca infrastruktura (ogrodzony i chroniony duży teren, media, komunikacja)
 - doświadczenie w budowie akceleratorów, własna baza produkcyjna
 - udział w projektach TESLA/FLASH/XFEL, współpraca z ośrodkami posiadającymi/budującymi FEL

POLSKI ULTRAFIOLETOWY LASER NA SWOBODNYCH ELEKTRONACH POLFEL.....	1
ZARYS KONCEPCJI.....	1
<u>1 MOŻLIWOŚCI BADAWCZE LASERÓW NA SWOBODNYCH ELEKTRONACH.....</u>	<u>4</u>
<u>1.1 Badania podstawowe w zakresie nauk fizycznych.....</u>	<u>4</u>
<u>1.2 Badania materiałowe.....</u>	<u>5</u>
1.2.1 Badania półprzewodników i struktur kwantowych.....	5
1.2.2 Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie terahercowym.....	5
1.2.3 Spektroskopia fototermiczna (PTBD).....	5
1.2.4 Mikroskopia i spektroskopia przykrawędziowa	6
<u>1.3 Badania biologiczne i środowiskowe.....</u>	<u>6</u>
1.3.1 Spektroskopia molekuł biologicznych.....	6
1.3.2 Badania atmosfery.....	6
<u>1.4 Zastosowania w naukach medycznych.....</u>	<u>6</u>
<u>2 ZAŁOŻENIA KONCEPCYJNE.....</u>	<u>7</u>
<u>3 ZAŁOŻENIA TECHNICZE.....</u>	<u>8</u>
<u>3.1 Emisja fotonów.....</u>	<u>8</u>
<u>3.2 Źródło elektronów.....</u>	<u>9</u>
<u>3.3 Akcelerator.....</u>	<u>10</u>
<u>3.4 Parametry pracy akceleratora z trzema sekcjami.....</u>	<u>11</u>
<u>3.5 Linie eksperymentalne.....</u>	<u>13</u>
<u>4 REALIZACJA PROJEKTU.....</u>	<u>13</u>
<u>4.1 Współpraca z DESY.....</u>	<u>13</u>
<u>4.2 Ryzyko projektowe.....</u>	<u>14</u>
<u>4.3 Zakres prac projektowych.....</u>	<u>14</u>
<u>4.4 Lokalizacja na terenie Instytutu Problemów Jądrowych w Świerku.....</u>	<u>15</u>
<u>4.5 Oszacowanie kosztów.....</u>	<u>15</u>
<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	<u>16</u>

1 Możliwości badawcze laserów na swobodnych elektronach

Lasery na swobodnych elektronach (FEL – Free Electron Laser) są urządzeniami generującymi koherentną wiązkę promieniowania o długości fali regulowanej od fal milimetrowych do promieniowania rentgenowskiego. Skonstruowanie takich urządzeń otwiera zupełnie nowy obszar badań, którego zakres trudno obecnie nawet sobie wyobrazić. Intensywność i jakość promieniowania wytwarzanego przez takie urządzenia przewyższa tysiące razy obecne źródła promieniowania. W niektórych przypadkach umożliwia uzyskanie promieniowania w zakresie obecnie praktycznie niedostępnym, jak zakres terahercowy. W fizyce, chemii, biologii, materiałoznawstwie, badaniach środowiska i medycynie lasery na swobodnych elektronach pozwolą na nowe spojrzenie do wnętrza żywych komórek, molekuł i materiałów, umożliwią badanie ich struktur oraz zachodzących tam reakcji. Będzie to możliwe poprzez np.:

- badanie elektronowych właściwości molekuł i skondensowanej materii
- trójwymiarowe zdjęcia struktur atomowych
- rejestrację procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych w wymiarach atomowych i w femtosekundowej skali czasu, np. badania stanów wzbudzonych, przebiegu reakcji chemicznych i procesów biologicznych.

Poniższy opis z konieczności nie stanowi kompletnego przeglądu możliwości oferowanych przez lasery na swobodnych elektronach, opracowanie takiego opisu jest obecnie po prostu niemożliwe. Jego celem jest raczej wskazanie na niektóre zastosowania takich urządzeń i próba usystematyzowania informacji dostępnych z różnych źródeł ze szczególnym uwzględnieniem kierunków badań rozwijanych w Polsce.

Warto podkreślić, że podjęcie prac nad budową lasera na swobodnych elektronach umożliwiłoby nie tylko udostępnienie polskim naukowcom nowoczesnego urządzenia, które może być wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki i techniki ale także pozwoliłoby na włączenie się w programy europejskie, takie jak np. program "Integrating Activity on Synchrotron and Free Electron Laser Science" (IA-SFS). Schematyczna mapa ilustrująca rozmieszczenie instytucji zaangażowanych w tą inicjatywę pokazana jest poniżej. Instytucje te finansowane są z budżetu UE w ramach programu Large Scale Facility (LSF).



Wśród tych urządzeń wyróżniają się lasery na swobodnych elektronach. Zostały one wyróżnione przez komitet ESFRI przez wpisanie na listę projektów priorytetowych „IRUVX FELs Network – from infrared to soft X-rays”. Jest to rozproszone centrum badawcze obejmujące: FLASH@DESY, Hamburg; FERMI@Elettra, Trieste; 4GLS, Daresbury; BESSY, Berlin; MaxLab, Lund. Rozważane dołączenie urządzeń planowanych w Holandii, Francji i Szwajcarii.

Wydaje się, że najwyższa pora na to, aby Polska zaistniała na mapie wielkich instalacji badawczych Europy. Warto zaznaczyć, że budowa POLFEL nie stanowi konkurencji dla projektu synchrotronu krakowskiego. Te dwa źródła emitują promieniowanie o zupełnie innych charakterystykach i stanowią urządzenia komplementarne.

1.1 Badania podstawowe w zakresie nauk fizycznych.

Badania rozpraszania Comptonowskiego na protonach i neutronach pozwoli na określenie elektrycznej i magnetycznej polaryzowalności nukleonów. Polaryzowalności te są fundamentalnymi wielkościami dostarczającymi informacji o wewnętrznej strukturze nukleonów. Stosując efektywną teorię pola opartą na

chromodynamice kwantowej (QCD) udało się obliczyć te polaryzowalności. Porównanie wyników obliczeń z pomiarami stanowił będzie test Chiral Perturbation Theory (CPT), a więc stanowił potwierdzenie chromodynamiki w zakresie niskich energii (poniżej 500 MeV).

1.2 Badania materiałowe.

1.2.1 Badania półprzewodników i struktur kwantowych

Lasery na swobodnych elektronach umożliwiają wytwarzanie promieniowania o długości rzędu kilku do kilkuset mikrometrów co odpowiada energiom na poziomie kilku do kilkuset meV. Jest to zakres wielu charakterystycznych wzbudzeń w półprzewodnikach i półprzewodnikowych strukturach kwantowych takich jak: fonony, plazmony, energie wiązania atomów domieszek czy poziomy energetyczne w studniach, kropkach czy drutach kwantowych. FEL może zatem być użyty w badaniach takich struktur, np. w badaniach dynamiki relaksacji. Wysoka gęstość energii powinna również pozwolić na obserwację i analizę procesów nieliniowych.

Rozwój techniki fal milimetrowych wymaga opracowania dedykowanych urządzeń nadawczo-odbiorczych; anten hybrydowych, mikserów, filtrów itd. Urządzenia te zbudowane będą według koncepcji MEMS, dodatkową korzyścią z uruchomienia programu FEL byłby więc rozwój technik wytwarzania w skali mikro i nano.

Nowoczesną i bardzo obiecującą techniką spektroskopową jest metoda pompowania i analizy (pump/probe), w której jeden impuls energii służy do wzbudzenia a drugi, opóźniony w stosunku do pierwszego, do analizy efektów wywołanych przez wzbudzenie. Użycie jako jednego ze źródeł lasera na swobodnych elektronach umożliwi precyzyjny dobór energii impulsu wzbudzającego lub analizującego. Kilka możliwych zastosowań tej techniki to:

- Badania dynamiki nośników w supersieciach. Spodziewane jest wyjaśnienie oddziaływań wewnątrzpasmowych np. w celu budowy wydajnych laserów kaskadowych.
- Zagadnienia absorpcji w studniach kwantowych i supersieciach. Problem szerokości linii emisyjnych i dyspersji.
- Własności optyczne w zakresie podczerwieni i zakresie THz takich struktur kwantowych jak oscylatory Blocha i kwantowe lasery kaskadowe.
- Koherentne efekty rezonansowe. Intensywne impulsy laserowe mogą prowadzić do takich zjawisk jak oscylacje Rabięgo.
- Wzbudzenie koherentne. Ultrakrótkie impulsy w podczerwieni mogą wpływać na dynamikę elektronów.

1.2.2 Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie terahercowym

Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie teraherców (THz) obejmuje zakres leżący pomiędzy promieniowaniem mikrofalowym a podczerwonym. Zakres ten jest obecnie bardzo słabo poznany, co wynika głównie z trudności w generacji i detekcji takiego promieniowania. Promieniowanie terahercowe oferuje ogromne możliwości pomiarowe, wynikające głównie z faktu, że w odróżnieniu od spektroskopii optycznej w zakresie tym możliwy jest bezpośredni pomiar zależności czasowych dla pola elektrycznego. Oznacza to, że spektroskopia terahercowa pozwala na bezpośrednią analizę amplitudy i fazy promieniowania, a więc składowej rzeczywistej i urojonej, bez konieczności posilkowania się wzorami Kramersa-Kroniga. Zakres terahercowy jest typowy dla częstotliwości drgań cząsteczek cieczy i wielu molekuł, promieniowanie to może zatem służyć do identyfikacji związków chemicznych. Z tego względu zakres ten jest przedmiotem dużego zainteresowania służb specjalnych, terahercowa bramka na lotnisku mogłaby teoretycznie pozwolić na identyfikację nawet śladowych ilości substancji chemicznych wnoszonych przez człowieka na pokład samolotu.

1.2.3 Spektroskopia fototermiczna (PTBD)

Podstawowym zagadnieniem ekologii jest problem precyzyjnych pomiarów zanieczyszczeń w środowisku naturalnym. Typowym przykładem są np. zanieczyszczenia związane z obecnością metali ciężkich, takich jak ołów, kadm czy też izotopy radioaktywne, które mogą pochodzić bądź to ze źródeł naturalnych lub zostać uwolnione w wyniku awarii reaktora jądrowego. Spektroskopia w podczerwieni stanowi cenne narzędzie w badaniach środowiska pozwalając na określenie związków powstających na powierzchni minerałów w wyniku oddziaływania z metalami. Poważnymi ograniczeniami tych badań jest to, że większość minerałów jest nieprzezroczysta w zakresie widzialnym, co powoduje konieczność wykonywania pomiarów w geometrii

odbiciowej, o znacznie gorszej relacji sygnał/szum niż pomiary transmisyjne. Po drugie, niebezpieczna koncentracja metali ciężkich lub izotopów radioaktywnych jest niewielka, co w połączeniu z niską czułością metody ogranicza jej stosowanie do badań modelowych. Spektroskopia fototermiczna umożliwia detekcję bardzo małych koncentracji domieszek, na poziomie 10^{-6} – 10^{-8} . Połączenie metody PTBD z laserem na swobodnych elektronach jako źródłem wzbudzenia stanowi potężne narzędzie badawcze w naukach o środowisku. Szeroki zakres długości fali wzbudzenia i jej impulsowy charakter stanowią optymalną kombinację dla badania absorpcji zanieczyszczeń w środowisku naturalnym.

1.2.4 Mikroskopia i spektroskopia przykrawędziowa

Mikroskopia przykrawędziowa umożliwia charakteryzację struktur z rozdzielczością lepszą niż wynika to z długości fali użytego promieniowania. Technika ta wykorzystuje obecnie lasery podczerwone (np. na CO_2). W połączeniu ze strojonym laserem na swobodnych elektronach umożliwi analizę częstotliwości drgań molekularnych w próbkach biologicznych z submikronową rozdzielczością.

1.3 Badania biologiczne i środowiskowe.

1.3.1 Spektroskopia molekuł biologicznych

Promieniowanie wytwarzane przez lasery na swobodnych elektronach może stanowić również potężne narzędzie badawcze dla nauk przyrodniczych. Intensywne, koherentne i strojone w zakresie od podczerwieni do mikrofali o ultrawysokiej częstotliwości (zakres THz) źródło promieniowania pozwoli na badanie i modyfikację molekuł. Możliwe stanie się badanie rezonansowych wzbudzeń molekuł w proteinach, enzymach, jądrach komórkowych i membranach komórkowych.

Spodziewane korzyści wynikające z zastosowania laserów na swobodnych elektronach wynikają z możliwości połączenia pomiarów spektroskopowych dostarczających informację o charakterystycznych częstościach drgań molekuł z możliwością modyfikowania molekuł przy pomocy tego samego promieniowania. Impulsowy charakter promieniowania pozwala na rejestrowanie zmian w układzie molekuł w trakcie ich modyfikacji, co można określić obrazowo jako możliwość nakręcenia „filmów” przedstawiających przebieg procesów biologicznych, takich jak śmierć komórki, wychwyty fotonu przez chlorofil i wiele innych.

1.3.2 Badania atmosfery

Spodziewane jest, że wykorzystanie lasera na swobodnych elektronach do budowy strojonego w szerokim zakresie częstotliwości lidara umożliwi detekcję i mapowanie w czasie rzeczywistym procesów zachodzących w atmosferze.

1.4 Zastosowania w naukach medycznych

Medycyna i badania biomedyczne wydają się być wiodącymi dziedzinami zastosowań laserów na swobodnych elektronach. Po pierwsze, promieniowanie w dalekiej podczerwieni charakteryzuje się niską absorpcją w organizmie człowieka. Pozwala to na obrazowanie narządów wewnętrznych przy bardzo niskim ryzyku napromieniowania. Stosując wyższe częstotliwości w zakresie terahercowym możliwa staje się identyfikacja związków chemicznych i molekuł organicznych, co w połączeniu z wysoką przenikalnością tego promieniowania przez tkankę żywą otwiera niesamowite wprost możliwości diagnostyczne. Pozwala również na stosowanie nowoczesnych metod terapii o minimalnym stopniu inwazyjności jak aktywacja specyficznych związków chemicznych, tzw. nanoplatform, wprowadzonych do określonych tkanek, np. do guzów nowotworowych. Koncepcja ta zakłada, że dedykowane nanoplatformy byłyby wprowadzane do organizmu człowieka a następnie ulegały deponowaniu w określonych, chorych tkankach. Promieniowanie generowane przez laser na swobodnych elektronach dostrajane byłoby do aktywatorów wbudowanych w nanoplatformę (najprawdopodobniej rolę aktywatorów pełniłyby pierwiastki o dużych masach atomowych jak ind, jod, gadolin, złoto czy platyna). Promieniowanie X generowane przez laser wzbudzałoby powłokę K atomów aktywatorów co prowadziłoby do wyzwolania niskoenergetycznych elektronów i wtórnego promieniowania rentgenowskiego niszczącego tkankę nowotworową. Metoda mogłaby również posłużyć do wysokorozdzielczego obrazowania tkanek.

Unikalne własności promieniowania wytwarzanego przez lasery na swobodnych elektronach pozwalają również na całkiem nowe zastosowania w medycynie, możliwe jest np. takie dostrojenie długości fali

promieniowania tak, aby uzyskać selektywne, bezpośrednie niszczenie chorych komórek przy minimalnym uszkodzeniu otaczającej, zdrowej tkanki. Prowadzone są np. prace nad zastosowaniem lasera na swobodnych elektronach do chirurgii otolaryngologicznej. Nawet nieznaczne uszkodzenia strun głosowych mogą prowadzić do nieodwracalnej utraty głosu, chirurgia laserowa oparta na FEL minimalizuje to ryzyko a nawet umożliwi usunięcie uszkodzeń (np. blizn) powstałych w wyniku operacji.

2 Założenia koncepcyjne

Budowa unikatowego w skali Kraju urządzenia badawczego, dla szeroko pojętych podstawowych badań naukowych, którego konstrukcja oparta jest na dynamicznie rozwijającej się w świecie technologii otwiera nowe możliwości nie tylko dla potencjalnych eksperymentatorów, ale również pozwala na czynne włączenie się wielu pracowników nauk technicznych we współpracę międzynarodową rozwijającą samą technologię. Interdyscyplinarny charakter badań, rozwój nowej technologii oraz możliwość edukacji studentów i młodych pracowników naukowych świadczą o ważności funkcji jaką tego typu urządzenie może pełnić przez wiele lat począwszy już od momentu rozpoczęcia studiów nad jego koncepcją ogólną i wstępnym technicznym projektem. Taką rolę w Polsce może i powinno odegrać **źródło koherentnego światła** tzw. laser na swobodnych elektronach (*ang. Free Electron Laser*), zasilany wiązką z nadprzewodzącego liniowego akceleratora elektronów. Urządzeniami FEL zainteresowane są środowiska naukowe w wielu krajach europejskich, w Stanach Zjednoczonych, Chinach, Korei i Japonii. Tabela 1 zawiera listę urządzeń FEL eksploatowanych już obecnie, będących w fazie konstrukcji oraz tych w fazie zaawansowanego projektowania [1]. Ponad połowa wymienionych urządzeń (TTF-I, TTF-II, XFEL, Soft X-ray FEL, 4GLS, MIT Bates, LUX, ERL-Cornell, Arc-En-Ciel) oparta jest na technologii nadprzewodzącej. Do tej grupy należy dodać jeszcze dwa urządzenia: FEL w laboratoriach TJNAF w USA i JAERI w Japonii, pracujące w bardzo nowatorskim technicznie modzie odzyskiwania energii z wiązki elektronowej już po procesie generacji fotonów (ER, *ang. Energy Recovery Linacs*), które zbudowano między innymi w celu doświadczalnego potwierdzenia stabilnej pracy akceleratorów w tym modzie.

Tabela 1.

Projekt	Typ	Lokalizacja	Kraj	Energia wiązki [GeV]	λ fotonu [nm]	Status
LEUTL	SASE	APS	USA	0.22	660-130	Since 2001
TTF-I	SASE	DESY	D	0.3	125-85	Since 2002
DUV-FEL	HGHG	BNL/NSLS	USA	0.145	400-100	Since 2002
SCSS	SASE	Spring8	J	0.230	40	In 2005
FLASH	SASE	DESY	D	1	6 (2)	Since 2006
X-FEL	SASE	DESY	D	17	0.1	In 2012
LCLS	SASE	SLAC	USA	15	0.15	In 2008
Soft X-ray FEL	HGHG	BESSY	D	2.3	64-1.2	Proposal
SPARC	SASE	ENEA/INFN	I	0.15	VUV	Proposal
SPARX	SASE	ENEA/INFN	I	2.5	1.5	Proposal
VXFEL	SASE	ELETTRA	I	1.0		Proposal
FERMI	SASE	ELETTRA	I	3.0	1.2	Proposal
4GLS	SASE/HGHG	Daresbury	GB	0.6	VUV-XUV	Proposal/ERL
	HGHG	MIT-Bates	USA	3.0	VUV-XUV	Proposal
LUX		LBL	USA	3.0		Proposal/ERL
		Cornell	USA	5-7		Proposal/ERL
Arc-en-ciel		Orsay	F	0.7		Proposal

MAX-IV		MAX-Lab	S	3.0		Proposal
--------	--	---------	---	-----	--	----------

Urządzenia FEL z akceleratorami nadprzewodzącymi mają szereg przewag nad tymi z akceleratorami pracującymi w temperaturze pokojowej, które ze względu na duże straty termiczne mogą pracować wyłącznie w modzie bardzo krótkich impulsów. Wymienimy tu tylko trzy przewagi:

- Dowolna struktura czasowa wiązki elektronowej (i fotonowej), bardzo istotna w niektórych eksperymentach.
- Wyższa średnia świetlność (*ang.* brilliance) umożliwiająca zbudowanie większej ilości stanowisk badawczych.
- Możliwość pracy w modach ciągłym lub prawie-ciągłym (długie impulsy z repetycją 1 Hz), co w dalszej perspektywie pozwoli na odzyskiwanie energii z wiązki elektronów i obniżenie kosztów eksploatacji.

Urządzenie FEL z akceleratorem nadprzewodzącym jest bardziej złożone technicznie, ale umożliwia szersze spektrum eksperymentów, łatwiejszą modernizację w przyszłości i jest tańsze w eksploatacji. Założymy, że w proponowanym FEL akcelerator będzie nadprzewodzący.

Zanim przystąpimy do opisu schematu urządzenia podamy jeszcze jedno założenie odnośnie kosztów i możliwości rozłożenia ich w czasie. Dominującą część inwestycji pochłonie koszt nadprzewodzącego akceleratora i jego infrastruktury (tunelu, kriogeniki, systemu wysokiej częstotliwości itp.). By rozłożyć koszty w czasie proponujemy schemat modułowy. W pierwszej wersji urządzenie mogłoby pracować z krótkim akceleratorem np. tylko z dwoma lub trzema sekcjami przyspieszającymi a co za tym idzie z niższą energią wiązki. Schemat modułowy ma tę przewagę, że w miarę możliwości finansowych można instalować dalsze sekcje przyspieszające i podnosić energię wiązki by generować fotony o wyższej energii (krótszej długości fali) zwiększając w ten sposób atrakcyjność urządzenia dla szerszego grona eksperymentatorów.

Wieloletnie doświadczenia wynikające z budowy akceleratorów HERA i TTF w DESY pokazują, że takie stopniowe i rozłożone w czasie podnoszenie zaawansowania technicznego pomoże wykształcić w Kraju ekspertów nie tylko utrzymujących urządzenie w dobrej kondycji technicznej, ale również będących w stanie dokonywania jego modyfikacji w miarę rosnących wymagań eksperymentatorów.

Schemat FEL, który zostanie przedstawiony poniżej nie powinien być traktowany jako jedynie możliwe lub końcowe rozwiązanie a raczej jako wstępna propozycja i „zaproszenie” do rozpoczęcia wspólnych studiów projektowych z udziałem potencjalnych użytkowników, konstruktorów oraz instytucji współpracujących.

3 Założenia techniczne

3.1 Emisja fotonów

Długość fali emitowanej λ_{ph} w undulatorze (w czasie emisji spontanicznej):

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_u}{2\gamma_e^2} \cdot (1 + K^2)$$

zależy od energii elektronów (reprezentowanej we wzorze przez współczynnik Lorentz'a) γ_e i wielkości charakteryzujących undulator: długości jego okresu λ_u i magnetycznego parametru K gdzie:

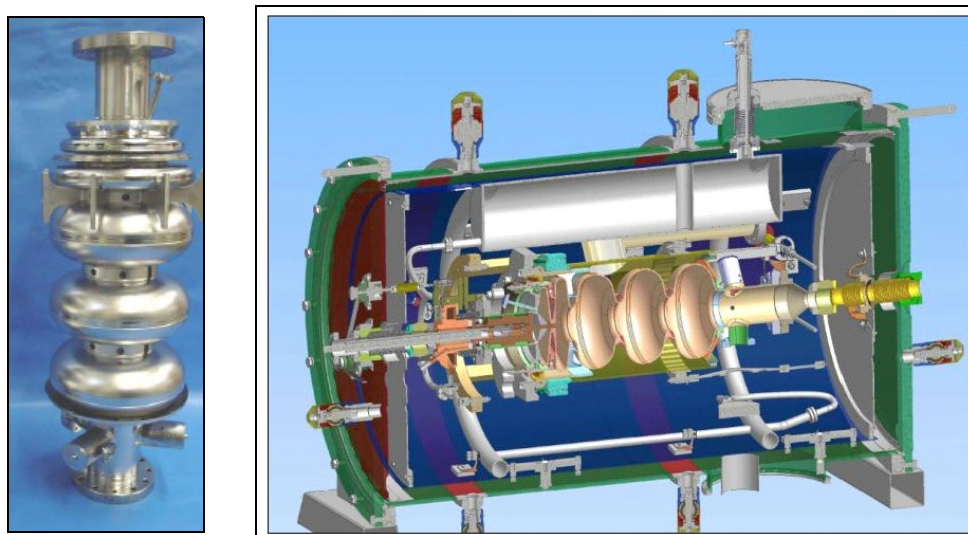
$$K = \frac{eB \cdot \lambda_u}{2\pi \cdot m_0 c}$$

a B jest średnim natężeniem pola indukcji magnetycznej w undulatorze.

Proces emisji może być spontaniczny tzw. SASE (*ang.* self-amplified spontaneous emission, opisany podanym wzorem) lub stymulowany przy pomocy lasera (*ang.* seeding lub self-seeding). Procesy stymulacji, polegające na wstępnej modulacji gęstości ładunku w zęstkach elektronowym (*ang.* bunch) mogą być kilkakrotnie powtarzane na drodze wiązki elektronów w celu uzyskania możliwie krótkiej fali dla eksperymentów.

3.2 Źródło elektronów

Procesy FEL wymagają by zęstkę wiązki elektronowej miały niską emitancję znormalizowaną ($\epsilon_n < 2 \mu\text{rad}$) i ładunek rzędu 0.2-1 nC. Wymagania te stawia się w pierwszej kolejności w stosunku do źródła elektronów gdyż emitancja w procesie akceleracji może ulec tylko zwiększeniu. Dalszym wymaganiem jest praca źródła w modzie ciągłym, będącym preferowanym modem pracy nadprzewodzącego akceleratora, pozwalającym na dowolną strukturę czasową wiązki. Obecnie dostępne działa nie spełniają tych warunków. Rozwiązaniem, nad którym pracują od kilku lat eksperci z BNL, Uniwersytetu w Pekinie, FZ-Rossendorf i od niedawna w TJNAF i DESY (z udziałem Zakładu V IPJ), jest nadprzewodzące działko elektronowe (*ang.* SRF-gun) emitujące elektrony z katody alkalicznej lub nadprzewodzącej w procesie fotoemisji. Prace są mocno zaawansowane. Pierwsze próby generacji wiązki i jej przyspieszenia odbyły się w 2002 roku w Rossendorfie i w 2003 w Pekinie. Mimo, że do tej pory nie osiągnięto parametrów wiązek pozwalających na użycie tego typu źródeł w laserze na swobodnych elektronach [2] należy się spodziewać, że w ciągu kilku lat parametry te zostaną osiągnięte przynajmniej przez jedną z pięciu grup pracujących nad zbudowaniem nadprzewodzącego działka elektronowego. Najbardziej zaawansowany projekt działka (Rossendorf) pokazany jest na Rys. 1 a jego parametry pracy w projektowanym obecnie laserze Soft X-ray FEL w Instytucie BESSY podane są w Tabeli 2.



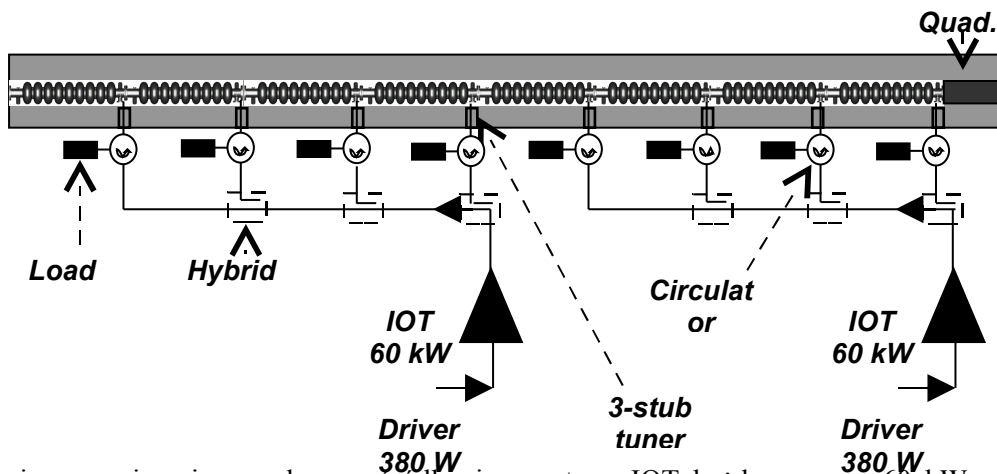
Rysunek 1. Nadprzewodząca niobowa struktura przyspieszająca działka z FZ Rossendorf (zdjęcie po lewej stronie) i przekrój poprzeczny kriostatu, w którym będzie zainstalowana (ilustracja graficzna po prawej stronie).

Tabela 2. Parametry docelowe działka z Instytutu w Rossendorfie dla FEL w Instytucie BESSY w Berlinie.

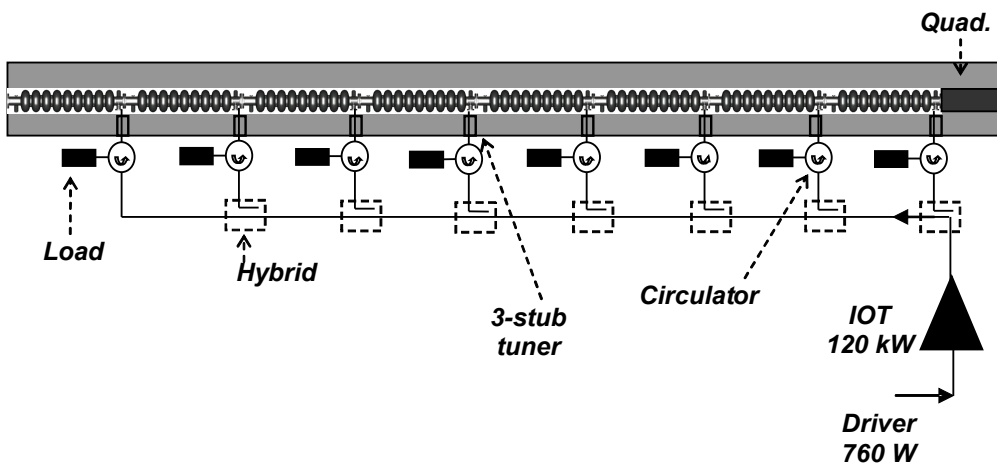
Energia elektronów na wyjściu z działka	5 MeV
Ładunek zęstka	2.5 nC
Częstotliwość zęstków	25 kHz
Emitancja	1.5 μrad

3.3 Akcelerator

Proponowany akcelerator składa się z sekcji przyspieszających. Sekcja zbudowana jest z kriomodułów, podobnego technicznie do projektowanych już obecnie 120 kriomodułów największego europejskiego projektu European XFEL [3] i ze jednego lub dwóch źródeł mikrofalowych typu IOT (Inductive Output Tube), które mogą pracować zarówno w modzie ciągłym jak i impulsowym. Sekcja, z dwoma źródłami (Rys. 2a) lub z jednym źródłem (Rys. 2b), są identyczne z sekcjami zaproponowanymi w europejskim projekcie EUROFEL [4]. Kriomoduł zawiera osiem 9-cio celowych niobowych struktur przyspieszających typu TTF. Nadprzewodzące struktury TTF zaprojektowane zostały w 1992 roku na potrzeby liniowego zderzacza (*ang.* collider) TESLA. Blisko dziesięć lat, szesnaście struktur pracowało w akceleratorze TTF-I dostarczając wiązkę do lasera VUV, generującego koherentne promieniowanie w procesie SASE. Po ukończeniu obecnej rozbudowy do fazy TTF-II będzie ich łącznie pięćdziesiąt sześć.



Rys. 2a. Sekcja przyspieszająca z dwoma źródłami wcz. typu IOT każde o mocy 60 kW, wzmacniaczami wejściowymi i systemem dystrybucji mocy do ośmiu struktur przyspieszających.



Rys. 2b. Sekcja przyspieszająca z jednym źródłem wcz. typu IOT o mocy 120 kW, wzmacniaczem wejściowym i systemem dystrybucji mocy dla ośmiu struktur przyspieszających.

Testy pokazują, że gdy użyty niob nie zawiera zanieczyszczeń i procesy preparacji jego powierzchni są wykonane właściwie, struktury osiągają pola przyspieszające do ~ 40 MV/m przy dobroci rzędu 10^{10} . Praktycznie wszystkie proponowane projekty FEL z akceleratorami nadprzewodzącymi oparte są na strukturach TESLA. Przykładowo: akcelerator European XFEL w DESY będzie miał ich 928, Soft X-ray FEL w BESSY 144 a ERL w Uniwersytecie Cornell 320. Oparcie prestiżowych projektów na tych strukturach jest najlepszym potwierdzeniem opanowania trudnej technologii ich produkcji.

W ramach projektu EUROFEL przeprowadzone zostaną w latach 2006/2007 studia przez producenta wzmacniaczy IOT, które określą techniczne zmiany niezbędne do podwyższenia mocy wyjściowej tych wzmacniaczy z 32 kW osiąganych obecnie do 60 kW a następnie do 120 kW. Motywacją do przeprowadzenia studiów jest obniżenie kosztów akceleratorów, co powinno mieć miejsce przy zastąpieniu kilku źródeł małej mocy pojedynczym źródłem wyższej mocy.

3.4 Parametry pracy akceleratora z trzema sekcjami

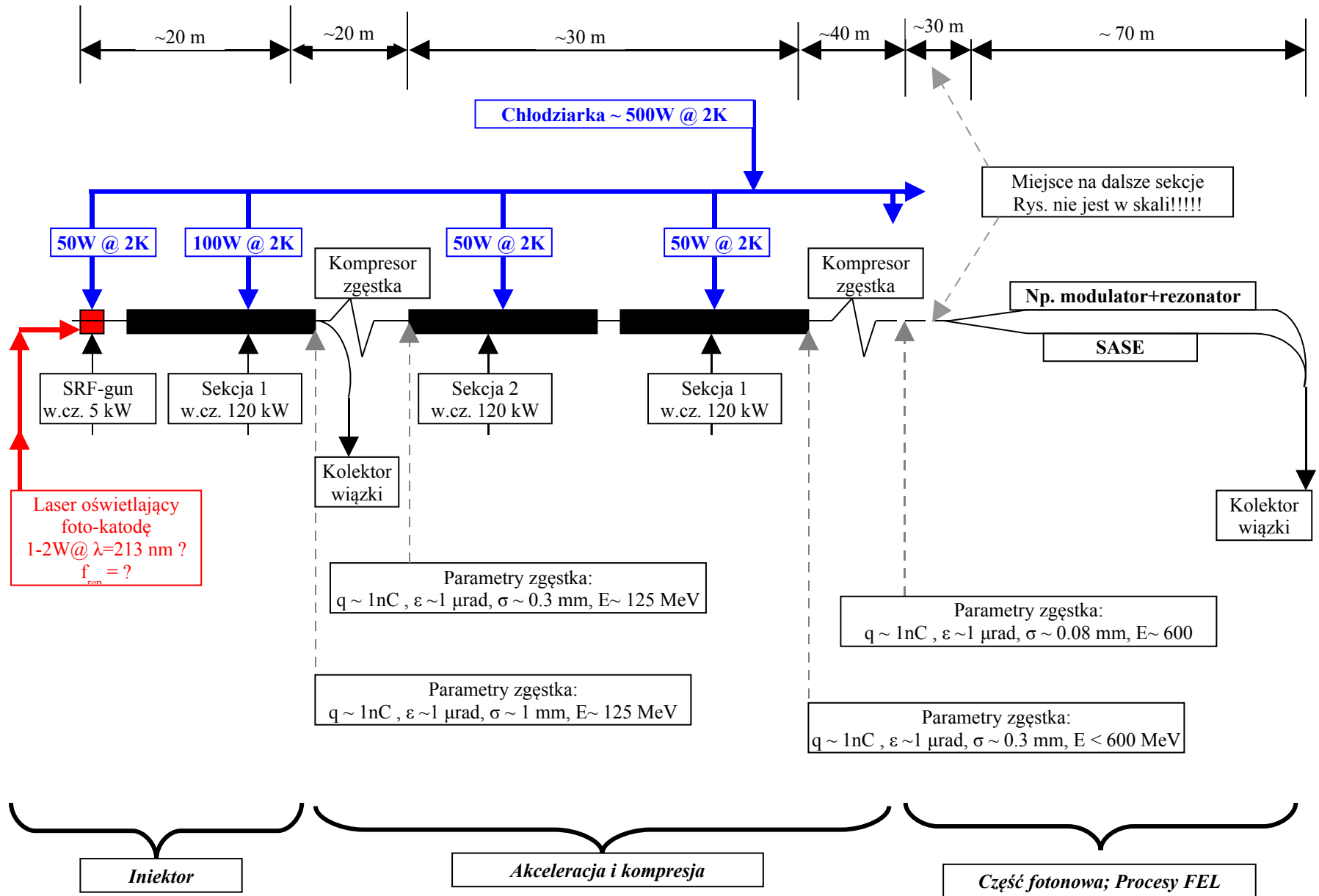
Schemat urządzenia pokazany jest na Rysunku 3. Tabela 3 zawiera przykładowe parametry pracy akceleratora składającego się z trzech sekcji w funkcji natężenia pola przyspieszającego (końcowej energii wiązki), przy założeniu, że dynamiczne straty kriogeniczne jednej sekcji w temperaturze 2 K nie przekraczają 50 W. Założenie to ma na celu ograniczenie mocy chłodziarki kriogenicznej (a co za tym idzie kosztów) do około 500 W dla obciążenia w temperaturze ok. 1.9-2 K.

Tabela 3. Przykładowe parametry pracy dla akceleratora z trzema sekcjami przyspieszającymi.

Energia wiązki =125MeV+Linak	[MeV]	275	325	375	425	475	525	575
Przyrost energii/Kriomoduł	[MeV]	75	100	125	150	175	200	225
Natężenie pola przyspieszającego	[MV/m]	9	12	15	18	21	24	27
Dobroć własna Qo	[10 ¹⁰]	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Dynamiczne straty w 2 K / strukturę	[W]	4.3	7.7	12	17.2	23.5	30.6	38.8
Całkowite straty w 2 K / strukturę	[W]	5.6	8.7	12.7	17.8	23.9	31.0	39.1
Procentowa długość impulsu	[%]	100	72	49	35	26	19	15
Wiązka								
Maksymalny prąd wiązki	[mA]	1.24	0.93	0.74	0.62	0.53	0.46	0.41
Separacja zgęstków z q 1nC	[μs]	0.81	1.08	1.35	1.62	1.89	2.16	2.42
Maksym. ilość zgęstków /s	[10 ⁶]	1.236	0.668	0.364	0.215	0.136	0.090	0.062
Sprężenie i mikrofonowanie								
Optymalna dobroć zewnętrzna	[10 ⁶]	6.7	11	14	20	27	36	46
Dopuszczalne mikrofonowanie		<34 Hz	<34 Hz	<33 Hz	<23 Hz	<17 Hz	<13 Hz	<10 Hz
3 dB szerokość rezonansu	[Hz]	193	123	93	65	48	36	28
Maksymalna moc wiązki w impulsie	[kW]	350	310	290	270	260	250	245
Moc wiązki w kolektorze końcowym	[kW]	347	222	140	94	66	48	37

Uwaga, zgęstki w zaproponowanym urządzeniu mają ładunek 1 nC.

Urządzenie składa się z trzech części: iniektora, akceleratora wraz z dwoma kompresorami zgęstka i z części fotonowej. Całkowita długość jest ok. 210 m, włączając miejsce na dwa dalsze kriomoduły. W pierwszej fazie maksymalna energia wiązki jest ok. 600 MeV, co w procesie SASE z użyciem undulatorów podobnych do tych w TTF-II w DESY powinno pozwolić na wygenerowanie koherentnego promieniowania o długości fali 20 nm. Dalsze procesy typu HHG (High Harmonic Generation) mogą być zastosowane dla skrócenia fali do kilku nm, bez konieczności podnoszenia energii wiązki przez zainstalowanie dodatkowych sekcji.



Rys.3 Proponowany schemat urządzenia FEL

Iniektor, dział SRF wraz z pierwszą sekcją, generuje i przyspiesza wiązkę do 125 MeV. Ilość zgęstków w ciągu jednej sekundy zależy od maksymalnej częstotliwości impulsów lasera oświetlającego fotokatodę. Maksymalna ilość zgęstków, wynikająca z dopuszczalnej długości impulsu w.cz (strat kriogenicznych) i zainstalowanej mocy w.cz podana jest w Tabeli 3.

Kompresory skracają długości zgęstka z $\sigma \sim 1$ mm do $\sigma < 0.08$ mm podnosząc wartość szczytową prądu, co jest niezbędne do procesu spontanicznej emisji. Nie jest wykluczone, że przy tych energiach można zrobić tzw. seeding, czyli wykorzystać klasyczny laser do modulacji ładunku zgęstka, co pozwoli na skrócenie impulsów fotonów do kilkudziesięciu fs. Natężenie pól magnetycznych w dipolach drugiego kompresora powinno być dobierane w zależności od energii końcowej wiązki, tak by uzyskać jak najlepszy stopień kompresji. Cały ten proces powinien być dokładnie przeanalizowany przy pomocy dostępnych programów numerycznych.

W sekcjach przyspieszających 2 i 3 energia wiązki może wzrosnąć o 450 MeV lub nawet więcej przy dalszym skróceniu czasu impulsu i zmniejszeniu prądu wiązki. Praktycznym ograniczeniem są mechaniczne wibracje struktur tzw. mikrofonowanie, które powoduje niestabilność fazy i amplitudy pól przyspieszających. Prowadzi to do niestabilności energii wiązki elektronowej i generowanych fotonów.

Część fotonowa zawiera undulatory, stanowiska pomiarowe i diagnostykę wiązki fotonowej. Elementy te są potrzebne w każdej linii pomiarowej. Ich rodzaj zależy od procesu emisji koherentnego promieniowania.

Na końcu akceleratora umieszczone są kolektory absorbujące energię zmagazynowaną w wiązce. Ich konstrukcja musi zapewnić całkowitą absorpcję elektronów o energiach od 125 MeV do 600MeV. Średnia absorbowana moc wiązki, w zależności od ilości i ładunku zgęstków, może być rzędu 350 kW.

Systemy próżniowy i kriogeniczny, diagnostyka pracy urządzenia, zabezpieczenia techniczne, system zasilania prądem trójfazowym itd. oraz tunel, sterownia, hala doświadczalna wymagają oddzielnego opisu.

3.5 Linie eksperymentalne

POLFEL ma obsługiwać trzy grupy zadań: udoskonalanie lasera, badania naukowe i badania przemysłowe. Praca w modzie ciągłym umożliwia zasilanie kilku linii eksperymentalnych z wystarczającą intensywnością. Planowana jest budowa 6 linii o różnym przeznaczeniu:

- Udoskonalanie lasera – 1 linia, finansowana z budżetu POLFEL
- Badania naukowe – 2 linie, finansowane z grantów badawczych
- Badania przemysłowe – 3 linie, udostępniane na zasadach komercyjnych.

Przewiduje się, że każda z linii obsłuży ~25 użytkowników rocznie dostarczając co najmniej 100 ośmiogodzinnych cykli eksperymentalnych w ciągu roku.

4 Realizacja projektu

4.1 Współpraca z DESY

POLFEL mógłby powstać przy wykorzystaniu podzespołów XFEL, co miałyby szereg zalet:

- Najnowocześniejsza, a jednocześnie sprawdzona technologia
- Uniknięcie kosztownej i długotrwałej fazy R+D
- Zakup elementów w cenie „produkcji seryjnej” a nie jednostkowej
- „Odzyskanie” polskich specjalistów pracujących dla XFEL
- Wykorzystanie know-how całego międzynarodowego konsorcjum XFEL

Współpraca taka byłaby obustronnie korzystna. Ze strony DESY, POLFEL stanowiłby znakomite zaplecze szkoleniowe i treningowe dla XFEL. Z kolei Polska, zamierzając wnieść istotny wkład w XFEL (na poziomie >50% wkładów Francji, Hiszpanii czy Wielkiej Brytanii) mogłaby wynegocjować bardzo preferencyjne warunki na dostawę podzespołów dla POLFELa. W szczególności, polski wkład w XFEL mógłby być odwzajemniony przez stronę niemiecką wkładem „in kind” w postaci dostarczonych podzespołów.

4.2 Ryzyko projektowe

Przedstawiony schemat urządzenia jest jedynie wstępnym zarysem koncepcji. Niewątpliwie, końcowy projekt urządzenia zależeć będzie w dużej mierze od potencjalnych eksperymentatorów i funduszy. Również strona techniczna wymaga dalszej analizy i oszacowania ryzyka. Wykorzystanie wyników prac dla XFELa w zasadzie ogranicza to ryzyko do nadprzewodzącego działu elektronowego. W chwili obecnej dla FEL pracującego w modzie ciągłym mogłoby być ono zastąpione klasyczną wyrzutnią Pierce'a, jakkolwiek tego typu źródła zwykle generują zgęstki o mniejszym ładunku i z gorszą emitancją.

Źródła mikrofalowe IOT, których wersja z większą mocą wyjściową też wymaga R&D, mogą być zastąpione istniejącymi wzmacniaczami (np. 4x32 kW dla każdej sekcji) tak, że można założyć iż ryzyko w przypadku wzmacniaczy jest małe.

Pewnym ryzykiem jest starzenie się kadry ekspertów w kraju spowodowane trudną sytuacją finansową nauki polskiej w ostatnich latach i „drenażem mózgów” na potrzeby projektów w Europie i USA. Konieczne jest zaangażowanie młodszego pokolenia. Należy również pamiętać o tym, że polscy naukowcy pracujący poza granicami i zagraniczni eksperci mogą być zaproszeni do udziału w projektowaniu i uruchamianiu FEL.

4.3 Zakres prac projektowych

Tabela 4 przedstawia bardzo schematycznie i wstępnie zakres prac projektowych i musi być uzupełniana systematycznie w czasie projektowania. Pokazuje jednak już teraz stopień złożoności przedsięwzięcia.

Tabela 4. Wstępny zakres prac projektowych

Koncepcja całego FEL: Zakres energii elektronów, fotonów, ilość fotonów/s i sposób ich generacji, wersja podstawowa urządzenia i jego rozbudowy..... Ustalenie struktury organizacyjnej: kto odpowiada za co itd.....
Działo elektronowe: Foto-katody, laser do foto-emisji wybór i instalacja, moc mikrofalowa, diagnostyka, dynamika wiązki, stabilizacja amplitudy i fazy...
Sekcje przyspieszające: Instalacja kriogeniki, moc mikrofalowa, próżnia, strojenie, test.....
Optyka wiązki: Obliczenie całej optyki wiązki, projektowanie magnesów w tym dipoli, kwadrupoli, steeringu, zasilaczy, kompresorów zgęstków, kolektory wiązki
System kriogeniczny: Wybór, instalacja, bezpieczeństwo....
Systemy kontroli elektronicznej: fazy, amplitudy, synchronizacji itp.....
System próżniowy: Koncepcja, wybór elementów, pomp, zaworów.....
System wysokiej częstotliwości: IOTs, wzmacniacze wejściowe, zasilanie mocą, synchronizacja, dystrybucja mocy, kontrola, zabezpieczenia.....
System diagnostyki wiązki: Monitorowanie w całym linaku: ładunku, trajektorii, fazy, energii itd....
System zabezpieczeń (Interlock) dla ludzi i urządzenia: Od wysokich napięć, gazów, eksplozji, pożaru, promieniowania, kolektory wiązki ich aktywacja.
Teren, tunel, budynek i hala eksperymentalna: Konstrukcja, zabezpieczenia.....

<p>Obliczenia procesów FEL: Jakie procesy, jaka jakość wiązki elektronów, typy undulatorów, oczekiwane moc i jakość wiązki fotonowej w funkcji długości fali, synchronizacja, diagnostyka fotonów itd.....</p>
<p>System Elektryczny: Oszacowanie poboru mocy, jej rozdziału, zabezpieczenia itd.....</p>
<p>Centralna Kontrola pracy urządzenia i Technika komputerowa: Sterownia, zbieranie i digitalizacja danych itd.....</p>

4.4 Lokalizacja na terenie Instytutu Problemów Jądrowych w Świerku

Ośrodek Jądrowy w Świerku dysponuje ogrodzonym i uzbrojonym terenem o powierzchni 44 ha:

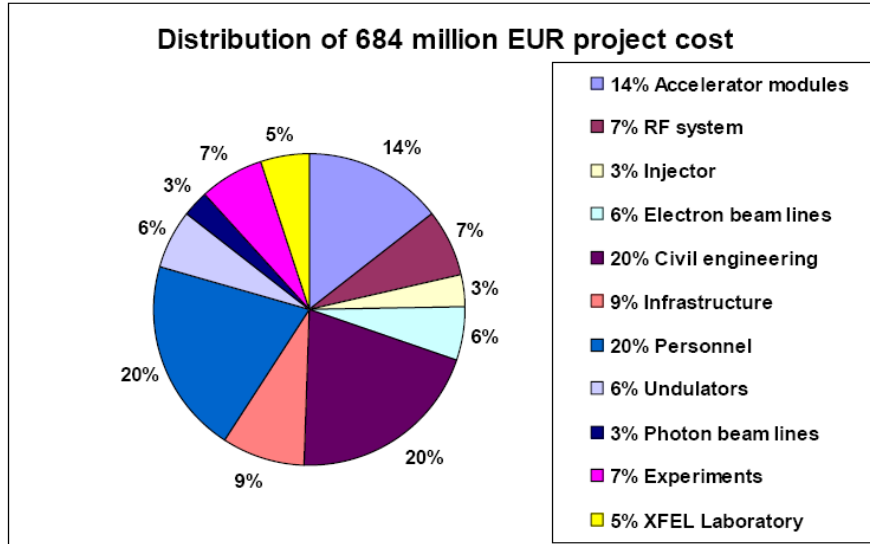
- Trzy niezależne linie energetyczne
- Własne wysokowydajne ujęcie wody
- Niewielka odległość od centrum Warszawy
- Wolne tereny wokół ośrodka możliwe do wykorzystania na Park Technologiczny
- Własne zaplecze transportowe, remontowe, produkcyjne i laboratoryjne

IPJ posiada także bogatą ekspertyzę w dziedzinie projektowania i budowy akceleratorów:

- Produkcja akceleratorów przemysłowych Liliput
- Produkcja akceleratorów medycznych Coline (certyfikat CE)
- Aktywny udział w R+D dla akceleratorów CLIC w CERN oraz TESLA, FLASH i XFEL w DESY
- Kontrakt na struktury przyspieszające dla ośrodka terapii hadronowej TOP we Frascati

4.5 Oszacowanie kosztów

Opracowanie Komisji Europejskiej pt. „Towards new research infrastructures for Europe: The ESFRI *List of Opportunities*” podaje koszt jednego laboratorium z FEL na 150-200 M€. Należy się spodziewać podobnej (z przeskalowaną sumą globalną) struktury kosztów jak w projekcie XFEL (Rys. 4). Oprócz samego urządzenia FEL istotną część kosztów stanowią stacje badawcze. Koszt jednej stacji powinien być podobny do kosztu typowej stacji synchrotronowej i wynosić ok. 20 M€. W pierwszej fazie (do roku 2013) można wybudować FEL z jedną stacją co wyniosłoby **100 M€**. W następnym okresie finansowania (2014-2020) można wybudować kolejne 5 stacji, co podniesie łączny koszt do **200 M€**. Budowę można by przyspieszyć w przypadku uzyskania wkładu finansowego lub rzeczowego z innych państw zainteresowanych eksploatacją urządzenia.



Rysunek 4. Struktura kosztów projektu XFEL z roku 2002
(całe urządzenie ma ~3 km długości w tym 2.1 km przypada na akcelerator)

Bibliografia

- [1] Technical Design Report of Soft X-FEL, BESSY GmbH, Berlin Marzec 2004.
- [2] J. Sekutowicz, "Superconducting RF Photoinjectors; an Overview", Proceedings of ICFA Workshop on Physics and Applications of High Brightness Beams, Erice, Sicily, October 9-14, 2005.
- [3] TESLA-XFEL, TDR- Supplement, TESLA-FEL-Report 2002-99, DESY, October 2002.
Aktualizacja informacji na stronie Internetowej :
xfel.desy.de/xfelhomepage/factsfigures/index_eng.html
- [4] Szkice trzech Raportów grupy DS5 projektu EUROFEL nie są dołączone do tego dokumentu ze względu na nieukończoną edycję. Ewentualne pytania można kierować na adres jacek.sekutowicz@desy.de

Informacje dostępne w Internecie:

- ESFRI IRUVX FELs Network - www.iruvx.eu
- Projekt VUV FEL / FLASH – flash.desy.de
- Konsorcjum XFEL-Polska – www.xfel.pl
- The World Wide Web Virtual Library: FEL research and applications - sbfel3.ucsb.edu/www/vl_fel.html