

Jacek SOSNOWSKI

EFEKTY RADIACYJNE W AKCELERATORACH JĄDROWYCH

STRESZCZENIE *W artykule przedyskutowano zagadnienia napromieniowania jonowego występującego w akceleratorach, w których używane są elektromagnesy nadprzewodzące. Omówiono konstrukcję tych urządzeń i znaczenie podstawowych badań fizycznych prowadzonych przy wykorzystaniu napromieniowania w wielkich ośrodkach badawczych, na przykładzie ZIBJ w Dubnej w Rosji. Zanalizowano wpływ kreującego nanodefekty napromieniowania ciężkimi jonami na działanie elementów nadprzewodnikowych, wykonanych z niskowymiarowych materiałów: wielowarstwowych nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz kwazijednowymiarowych, niskotemperaturowych nadprzewodników o strukturze typu A15. Przedyskutowano te zagadnienia również dla modelu kriokabla.*

Słowa kluczowe: *napromieniowanie jonowe, nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, akceleratory jądrowe, model kriokabla*

1. WSTĘP

Postęp elektrotechnologiczny, którego jesteśmy świadkami, skutkuje konstruowaniem nowych urządzeń o podwyższonych parametrach. Przykładem są urządzenia nadprzewodnikowe, w szczególności akceleratory z uzwojeniami nadprzewodnikowymi. Wykorzystuje się w nich napromieniowanie wiązkami jonowymi odpowiednich obiektów – tarcz, co umożliwia śledzić procesy jądrowe oraz prowadzić badania fizyko-techniczne. Jednak wówczas pojawiają się swobodne jony i szybkie neutrony penetrujące ekrany elektromagnetyczne. Kreują one nanodefekty, które wywołują często dodatkowe efekty, oddziałując na uzwojenia nadprzewodnikowe oraz doprowadzenia prądowe do elektromagnesów nadprzewodnikowych. Analogicznie nanodefekty wpływają na pracę prądowych urządzeń nadprzewodnikowych, takich jak kriokable. Analizie tych zagadnień poświęcony jest niniejszy artykuł.

prof. dr hab. Jacek SOSNOWSKI
e-mail: sosnowski.jacek@wp.pl

Instytut Elektrotechniki
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

Rozpatrzono w nim zjawiska występujące podczas napromieniowania jonami nadprzewodników, na przykładzie urządzeń jądrowych pracujących w ZIBJ w Dubnej w Rosji, wykorzystujących zjawisko nadprzewodnictwa. Problematykę pojawiających się wówczas nanodefektów zbadano także w odniesieniu do skonstruowanego w Instytucie Elektrotechniki (IEI) modelu kriokabla.

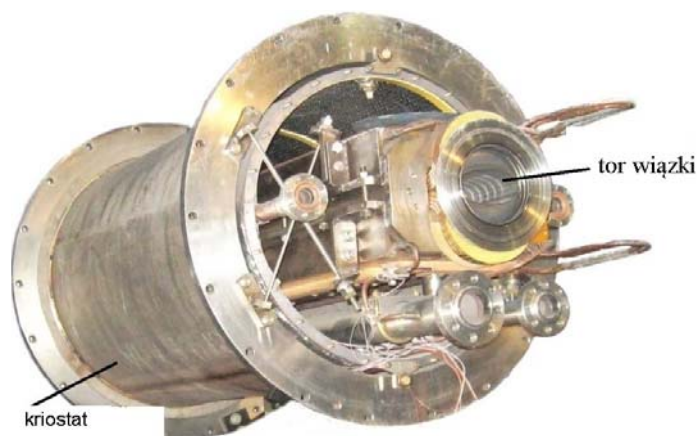
2. AKCELERATORY JĄDROWE

Celem konstruowania akceleratorów jądrowych jest badanie procesów zachodzących wewnątrz atomów. Realizowane jest to w szeregu urządzeń jądrowych, z których, ze względu na koszty przedsięwzięcia, największe budowane są przez międzynarodowe organizacje, takie jak CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), znajdujący się w Genewie, przy granicy szwajcarsko-francuskiej. Z kolei w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych (ZIBJ) w Dubnej w Rosji zbudowany został nadprzewodnikowy akcelerator cząstek elementarnych Nuklotron, przeznaczony do prowadzenia reakcji zderzeń atomów i badania w ten sposób ich rozpadu. Akceleratory z elektromagnesami o uzwojeniach nadprzewodnikowych budowane są także w Niemczech; we Francji realizowany jest międzynarodowy projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor); Stany Zjednoczone rozpoczęły w Batawii budowę nadprzewodnikowego akceleratora, jednak ze względów na przekroczenie limitów finansowych projekt ten został przerwany. Największym obecnie akceleratorem nadprzewodnikowym jest LHC (Large Hadron Collider) o obwodzie 27 km, zbudowany w CERN-ie. Akcelerator Nuklotron-NICA budowany w ZIBJ w Dubnej docelowo będzie miał długość ponad 1 km. Poprzednikiem tego akceleratora był Synchrofazotron o masie 40 tysięcy ton. Był to wówczas największy zbudowany elektromagnes, wpisany nawet do Księgi Rekordów Guinnessa. Na rysunku 1 przedstawiono porównanie gabarytów tych dwóch rodzajów urządzeń: fragment Synchrofazotyonu oraz elektromagnes nadprzewodnikowy, stanowiący element Nuklotronu.



Rys. 1. Porównanie rozmiarów nadprzewodnikowego akceleratora Nuklotronu i żelaznego Synchrofazotyonu zbudowanego w ZIBJ w Dubnej w Rosji [źródło: Internet]

Sam Nuklotron ma obwód 251,5 m i masę do schłodzenia 80 ton. Skonstruowany został ze 160 elektromagnesów nadprzewodnikowych, 96 dipolowych, o kształcie pokazanym na rysunku 2, o zmagazynowanej energii 19,8 kJ oraz 64 kwadrupolowych o energii 6,9 kJ, tworzących razem dwa półpierścienie. Zadaniem dipolowych elektromagnesów jest prowadzenie wiązki jonów po torze wzdłuż akceleratora, natomiast kwadrupolowe elektromagnesy zapewniają odpowiedni kształt wiązki, ściskając ją. Obecnie konstrukcja Nuklotronu jest rozbudowywana w ramach projektu Nuklotron-NICA, który należy do jednego z sześciu priorytetowych projektów realizowanych w Rosji i finansowanych z budżetu centralnego. Nad Nuklotronem, w ścianach Synchronofazotronu, który ze względu na olbrzymią masę i zagrożenie stabilności całej konstrukcji w przypadku jego usunięcia, pozostanie na swoim miejscu, będzie umieszczony drugi akcelerator, tzw. Booster. Przeciwbieżna wiązka jonów zostanie przyspieszona w akceleratorze NICA o znacznie większych rozmiarach, rzędu 800 m. Podobna konstrukcja akceleratora nadprzewodnikowego budowana jest także w Darmstadt w Niemczech, przy współudziale specjalistów z Rosji. Największym obecnie przemysłowym modelem akceleratora-reaktora z uzwojeniem nadprzewodnikowym jest projekt ITER, budowany w Cadarache we Francji, gdzie strumień jonów prowadzić będzie do reakcji syntezy termojądrowej, a moc generowana wyniesie 500 MW. Pierwsza wersja tego projektu ma być gotowa już w 2016 roku, a pomyślne uzyskanie energii w procesie syntezy lekkich jąder byłoby milowym krokiem nad konstrukcją następnej generacji reaktorów jądrowych i opanowaniem procesu kontrolowanej reakcji syntezy termojądrowej, co umożliwiłoby na pokonanie światowego kryzysu energetycznego.

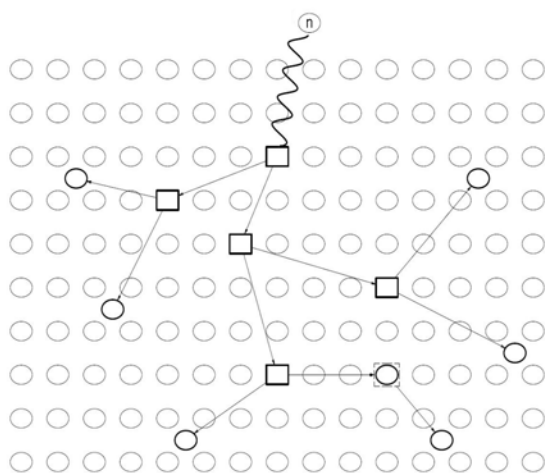


Rys. 2. Widok elektromagnesu nadprzewodnikowego stanowiącego fragment Nuklotronu [1-4]

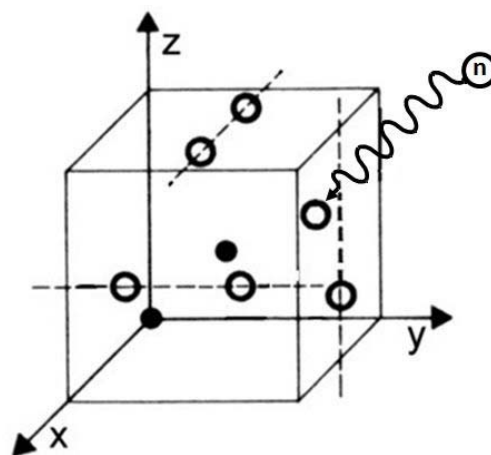
3. ZAGADNIENIA NAPROMIENIOWANIA W AKCELERATORACH JĄDROWYCH

Podstawową funkcję akceleratorów jądrowych, którą jest badanie procesów zachodzących w jądrach atomowych, realizuje się poprzez napromieniowanie odpowiednich tarcz wiązkami jonowymi lub przez bezpośrednie zderzanie przeciwbieżnych wiązek wybranych jonów atomów rozpędzonych do wielkich prędkości, porównywalnych z prędkością światła. Stąd też nazwa Wielki Zderzacz Hadronów (LHC), największe tego typu urządzenie skonstruowane w CERN-ie w Genewie, o obwodzie 27 km, umieszczone 100 m pod ziemią, w tunelu wykutym w granitowej skale.

Przy zastosowaniu metody zderzeń jonów prowadzi się w nim analizę zachodzących wówczas reakcji, do czego wykorzystuje się detektory ATLAS, CMS, LHCb i ALICE. Najsłynniejszym eksperymentem wykonanym w ostatnich latach przy użyciu akceleratorów nadprzewodnikowych było wykrycie cząstki Higgosa, szukanej bezskutecznie od wielu lat. Bozon Higgosa to brakująca cząstka elementarna, niezbędna dla weryfikacji słuszności tzw. modelu standardowego, której istnienie postulowane było jeszcze w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku przez P. Higgosa, laureata nagrody Nobla z 2013 r.; stąd jej nazwa. W lipcu 2012 r. na bazie eksperymentów przeprowadzonych w detektorach CMS i ATLAS stwierdzono odkrycie nowej cząstki o własnościach zbliżonych do przewidywanego bozonu Higgosa, natomiast ostatecznie w roku 2013 na podstawie zebranych danych pomiarowych stwierdzono występowanie bezspinnowego bozonu Higgosa o masie $126 \text{ GeV}/c^2 \pm 0,4 \text{ GeV}/c^2$. Prace te były rozwinięciem idei P.W. Andersona, który zasłużył się również w zakresie nadprzewodnictwa, zjawiska także bardzo istotnego z punktu widzenia akceleratorów jądrowych. Z kolei aplikacyjnym aspektem badań w akceleratorach takich jak Nuklotron jest analiza wpływu napromieniowania na organizmy ludzkie, w ramach programu walki z rakiem, co realizowane ma być w tzw. projekcie Gantry, produkcja membran półprzewodzących, utwardzanie stali, zagadnienia sterylizacji i inne.



Rys. 3. Wpływ napromieniowania ciężkimi jonami i szybkimi neutronami na strukturę krystalograficzną nadprzewodnika (kwadraty oznaczają wakansje, kółka – położenia atomów)



Rys. 4. Wpływ napromieniowania neutronowego (n) na strukturę krystalograficzną nadprzewodnika typu A15 (czarne kropki oznaczają atomy nieprzechodnych metali, natomiast kółka – atomy niobu Nb)

Współczesne akceleratory jądrowe wykonywane są z wykorzystaniem uzwojeń nadprzewodnikowych, które poddawane są napromieniowaniu neutronowemu oraz ciężkich jonów. Napromieniowanie uszkadza strukturę nadprzewodnika, wprowadzając defekty strukturalne typu wakansji, pokazanych przykładowo na rysunku 3. Mają one istotny wpływ na własności nadprzewodników, szczególnie niskowymiarowych, jak wielowarstwowe nadprzewodniki wysokotemperaturowe oraz kwazi-jednowymiarowe nadprzewodniki o strukturze A15, również stosowane do produkcji przewodów nadprzewodnikowych. Wpływ napromieniowania na liniowe łańcuchy metali przejść-

ciowych w tej strukturze przedstawia rysunek 4. Napromieniowanie ciężkimi jonami i szybkimi neutronami prowadzi do powstania defektów typu kolumnowego, zakotwiczących nici wirowe. Opracowany został przez Autora model tego efektu, oparty na analizie zmian energii układu wskutek przesunięcia położenia wiru względem centrum zakotwiczenia, w procesie pełzania strumienia magnetycznego. Uwzględniony został w tym modelu zarówno kształt defektu, jak też efekt siły Lorentza zrywającej wiry magnetyczne typu *pancake*, które występują w warstwowych nadprzewodnikach wysokotemperaturowych oraz zmiany energii elastyczności regularnej sieci wirów magnetycznych, spowodowanych zakotwiczeniem. W formalizmie matematycznym efekty te prowadzą do powstania bariery potencjału ΔU , jaką musi przekroczyć wir magnetyczny w procesie pełzania strumienia magnetycznego w nadprzewodniku. Opracowany model zakłada indywidualne oddziaływanie wiru z defektem strukturalnym w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych, co ma właśnie miejsce w warstwowych wysokotemperaturowych materiałach nadprzewodnikowych, w których występują wiry magnetyczne tzw. „naleśnikowatego”, płaskiego kształtu (ang. *pancake vortex*). Przypadek opisu oddziaływań zakotwiczenia w niskotemperaturowych nadprzewodnikach wymaga uwzględnienia wielokrotnego zakotwiczenia wirów na szeregu centrów, co będzie analizowane w rozszerzonym modelu oddziaływań. W celu analizy wpływu efektów radiacyjnych na charakterystyki prądowe wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych, w niniejszej pracy rozpatrzony został model oddziaływań wirów magnetycznych typu *pancake* z płaskimi defektami o rozmiarach przewyższających wielkość rdzenia wiru. Dodatkowym założeniem jest rozpatrzenie sytuacji, przy której wysokotemperaturowa taśma nadprzewodnikowa znajduje się w stanie początkowym optymalnego zdefektowania, co oznacza, że dodatkowe napromieniowanie prowadzące do powstania nowych defektów będzie miało destrukcyjny wpływ na jej parametry.

Wówczas wzór na barierę potencjału ΔU przybiera następującą postać:

$$\Delta U = \frac{\mu_0 H_c^2}{2} l \xi^2 \left[-\arcsin\left(\frac{j}{j_c}\right) + \frac{\pi}{2} - \frac{j}{j_c} \sqrt{1 - \left(\frac{j}{j_c}\right)^2} \right] \quad (1)$$

gdzie j jest gęstością prądu transportu, zredukowaną do gęstości prądu krytycznego j_c , H_c termodynamicznym polem krytycznym, l grubością warstwy nadprzewodnikowej w strukturze wielowarstwowej, ξ długością koherencji, μ_0 przenikalnością magnetyczną.

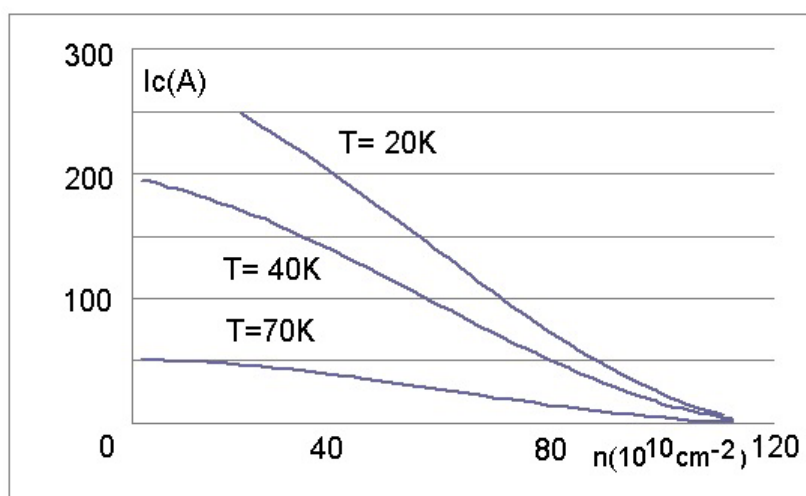
Ponieważ efekt zakotwiczenia zachodzi w całej sieci dwuwymiarowych wirów, występujących w wysokotemperaturowej taśmie nadprzewodnikowej, niniejsza procedura pozwala na wyznaczenie wartości prądu krytycznego spełniającego kryterium napięciowe jednorodnej taśmy nadprzewodnikowej, w funkcji koncentracji dawki napromieniowania jonowego oraz temperatury, co pokazuje rysunek 5.

Powyższe rezultaty wskazują na istotne znaczenie procesu napromieniowania jonowego i neutronowego na charakterystyki pracy urządzeń z nadprzewodników wysokotemperaturowych, takich jak doprowadzenia prądowe, a także uzwojenia nadprzewodnikowe stosowane w akceleratorach jądrowych.

Efekty oddziaływań wirów z nanorozmiarowymi defektami odgrywać będą również istotną rolę dla pracy wysokotemperaturowych, nadprzewodnikowych urządzeń prądowych, takich jak kriokable i wysokotemperaturowe uzwojenia nadprzewodnikowe, w których nanodefekty pojawiają się samoistnie w procesie technologicznym wytwarzania wysokotemperaturowych taśm nadprzewodnikowych oraz wskutek me-

chanicznej deformacji podczas produkcji kriokabla i jego dalszej pracy. Na rysunku 6 pokazany jest model trójfazowego, wysokonapięciowego kriokabla nadprzewodnikowego, skonstruowanego w Zakładzie Wielkich Mocy Instytutu Elektrotechniki. Widoczne są tutaj także przepusty prądowe, które zostały przebadane i wytrzymują napięcie przemienne 18 kV przy pierwszym przebiciu, natomiast ponownie następuje przy napięciu 13 kV i zachodzi po powierzchni izolatora. Z kolei w przypadku udaru o długości narastania $1,2 \mu\text{s}$ i następnie spadku $50 \mu\text{s}$, przepusty są odporne na napięcie 27 kV.

Rysunek 7 pokazuje z kolei model wysokotemperaturowej cewki nadprzewodnikowej i element pomiarowy ogranicznika nadprzewodnikowego.



Rys. 5. Teoretycznie wyznaczony wpływ napromieniowania jonowego na prąd krytyczny taśmy z nadprzewodnika wysokotemperaturowego w funkcji temperatury



Rys. 6. Model wysokotemperaturowego kriokabla nadprzewodnikowego z wysokonapięciowymi doprowadzeniami prądowymi



Rys. 7. Model nawiniętej wysokotemperaturowej cewki nadprzewodnikowej i element pomiarowy ogranicznika nadprzewodnikowego

4. WNIOSKI

Przedyskutowano efekty napromieniowania ciężkimi jonami i szybkimi neutronami w nowoczesnych akceleratorach jądrowych z elementami nadprzewodnikowymi. Zanalizowano mechanizm zakotwiczenia wirów magnetycznych na wywołanych napromieniowaniem jonami nanodefektach. Rozpatrzono znaczenie oddziaływania wirów magnetycznych z nanodefektami dla pracy kriokabli nadprzewodnikowych.

LITERATURA

1. Agapov N.N. i in.: Kriogennyje technologii w swierchprowodiaszczim uskoritiele relativistkich jader – Nuklotronie, Fizika Elementarnych Czastic i Atomnogo Jadra, tom 30, z. 3, s. 760-804, 1999.
2. Baldin A.M. i in.: Cryogenic System of the Nuclotron – a New Superconducting Synchrotron, Advances in Cryogenic Engineering, v. 39, pp. 501-508, New York, 1994.
3. Khodzhbagiyani H.G., Drobin V.M., Fischer E., Kovalenko A.D., Pantsyrny V.I., Potanina L.V., Shikov A.K., Vladimirova N.M.: Design and study of new cables for superconducting accelerator magnets: Synchrotron SIS 100 at GSI and NICA collider at JINR, J. Phys. Conf. Ser. 234, 2, 22017, 2010.
4. Sosnowski J.: Kriokable nadprzewodnikowe, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, s. 1-101, 2012.

Rękopis dostarczono dnia 14.04.2014 r.

IRRADIATION EFFECTS IN NUCLEAR ACCELERATORS

Jacek SOSNOWSKI

ABSTRACT *Questions of irradiation that appears in the nuclear accelerators with superconducting elements are discussed in the paper. The construction of these devices (in which the superconducting electromagnets and current leads are used) is described. An importance of the basic research performed in great research centers basing on example of JINR in Dubna, Russia, are reviewed. It has been considered an influence of the heavy ions irradiation, creating nano-defects, on operation of superconducting wires made from low-dimensional materials: multilayered HTc superconductors and quasi-one dimensional superconductors of A15 type crystal structure. The problems of nano-defects have been also discussed for the case of superconducting cryocable.*

Keywords: *irradiation effects, HTc superconductors, nuclear accelerators, model of cryocable*

