

Prof. dr hab. Adrian Kozanecki  
Instytut Fizyki PAN  
Al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa

### **Recenzja wniosku dr. Ryszarda Sobierajskiego o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego**

Dr Ryszard Sobierajski ukończył studia na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej w 2000 roku. Jego praca magisterska „Badanie proggu zniszczeń powierzchni metali oświetlonych ultrakrótkimi impulsami ultrafioletu próżniowego” została wykonana pod kierunkiem prof. dra hab. Rajmunda Bacewicza. Wyróżnioną pracę doktorską „Oddziaływanie femtosekundowych impulsów promieniowania lasera na swobodnych elektronach z powierzchniami ciał stałych” wykonał również pod kierunkiem prof. R. Bacewicza na Wydziale FTiMS Politechniki Warszawskiej w 2005 roku. W roku 2005 podjął pracę w Instytucie Fizyki PAN, w którym aktualnie pracuje na etacie asystenta. W latach 2007 – 2010 odbył staż doktorski w FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Utrecht, Holandia w grupie Advanced Applications of XUV Optics (AXO) Nanolayer Surfaces and Interfaces.

Dr Sobierajski już od roku 1998 (praca w latach 1998 – 2002 na stanowisku zaproszonego naukowca w HASYLAB, Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg, Niemcy), a więc jeszcze od czasu studiów, niezmiennie zajmuje się badaniem zniszczeń powierzchni materiałów oświetlonych ultrakrótkimi impulsami z zakresu XUV i promieniowania rentgenowskiego. W zasadzie całość jego dorobku naukowego wiąże się z pracą poza Polską (Niemcy, Holandia). Prace wykonane tam legły u podstaw proponowanego dorobku habilitacyjnego.

Dr Ryszard Sobierajski przedstawił jako osiągnięcie w rozumieniu art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) jednotematyczny cykl publikacji złożony z 5 prac zatytułowany:

#### ***„Mechanizmy zmian strukturalnych w wybranych ciałach stałych pod wpływem impulsów krótkofalowych laserów na swobodnych elektronach”***

Zaproponowany tytuł jest dość ogólny. Takie sformułowanie tytułu zapewne odzwierciedla intencje dra Sobierajskiego, by przedstawić możliwości wykorzystania impulsów lasera na swobodnych elektronach do badania dowolnych ciał stałych, ale korzystniejsze dla prezentacji dorobku byłoby wskazanie elementów optyki laserowej.

Na osiągnięcie habilitacyjne składa się z 5 prac z okresu 2010-16, po jednej z 2010 (H1 - 39 cytowań), 2011 (H2 - 17 cyt.), 2012 (H3 - 6 cyt.), 2013 (H4 - 7 cyt.) i 2016 r. (H5 - 2 cyt.). Cztery prace H1-H3 i H5 zostały opublikowane w Optics Express (open-access, i.f.=3.7 - 3.3, zależnie od daty), oraz jedna (H4) w Journal of Instrumentation w 2013 r. (i.f.=1.6). W 3 pracach dr Sobierajski jest pierwszym autorem, w dwóch drugim. Prace te cytowane są łącznie 71 razy. Wszystkie prace są wieloautorские, co wynika z organizacji pracy z takim narzędziem badawczym, jakim jest FEL.

Prace R. Sobierajskiego koncentrują się na analizie uszkodzeń powierzchni materiałów w wyniku oświetlenia pojedynczymi impulsami lasera XFEL. Czynnikiem łączącym prace jest rozwijana przez niego diagnostyka i metodologia pomiarów pojedynczych impulsów (praca **H4**). Dr Sobierajski zbadał doświadczalnie dwa skrajne przypadki związane z przemianami fazowymi w ciałach stałych indukowanymi impulsami promieniowania i wytrzymałością radiacyjną optyki:

1) zwierciadlane powłoki wielowarstwowe (Mo/Si [**H1**] oraz MoN/SiN [**H2**]), dla których gęstość energii zaabsorbowanej z pojedynczego impulsu była najwyższa, a procesy prowadzące do zmian strukturalnych zachodziły w czasie piko- i nanosekund, przestrzennie w obszarach rzędu nanometrów. Praca **H3** jest poświęcona modelowaniu teoretycznemu uszkodzeń generowanych pojedynczymi impulsami w całej gamie materiałów, a zwłaszcza w strukturach wielowarstwowych, które potencjalnie można wykorzystać do konstrukcji zwierciadeł lasera FEL.

2) Naświetlania próbki krystalicznego krzemu serią impulsów. W tym przypadku wysokie gęstości energii osiągane były drogą akumulacji, a procesy istotne dla uszkodzeń radiacyjnych zachodziły w skali czasowej mikrosekund i na odległościach rzędu mikrometrów [**H5**].

Głównym celem prezentowanych badań było scharakteryzowanie i zrozumienie podstawowych procesów zmian strukturalnych zachodzących w ciałach stałych pod wpływem silnych wiązek promieniowania oraz wykorzystanie tej wiedzy do projektowania elementów optycznych dla nowych generacji źródeł promieniowania z zakresu skrajnego nadfioletu i rentgenowskiego.

#### **Omówienie poszczególnych prac dorobku habilitacyjnego:**

1. W pracy **H1** dr Sobierajski badał typowy element optyczny używany w litografii XUV - zwierciadlaną powłokę wielowarstwową Mo/Si, nałożoną na polerowany podkład krzemowy. Struktura składała się z 50 dwuwarstw Mo i Si, o grubości pary 7.96 nm i stosunku grubości warstwy Mo do grubości dwuwarstwy równej 40%. Przeprowadzona została szczegółowa analiza zmian morfologicznych i strukturalnych powierzchni w próbce poddanej naświetlaniu. Określono wartość progu zniszczeń na  $45 \pm 7$  mJ/cm<sup>2</sup>. Morfologia powierzchni była badana za pomocą AFM i pokazano, że w wyniku oddziaływania formują się kratery, których głębokość i kształt ścian zależy od fluencji impulsu. Wyniki badań sugerują, że wiodącym mechanizmem zniszczeń wielowarstwowych powłok zwierciadlanych Mo/Si naświetlonych femtosekundowymi impulsami promieniowania XUV, było formowanie się krzemianów molibdenu. W eksperymentach wygrzewania długoczasowego struktur Mo/Si uformowanie się krzemianów wymaga, zależnie od temperatury, do kilkunastu godzin. Skala czasowa procesu dyfuzji w eksperymencie z użyciem silnych impulsów to co najwyżej mikrosekundy. R. Sobierajski oszacował, że długość dyfuzji w tej skali czasowej to  $\sim 5 \times 10^{-5}$  nm, znacząco mniej niż rozmiar atomu. Stąd konkluzja, że dyfuzję atomów i związane z nią tworzenie krzemianów można zaniedbać dla temperatur poniżej temperatury topnienia krzemu i w bardzo krótkiej skali czasu. R. Sobierajski sugeruje, że powierzchnia wielowarstwy Mo/Si ulega stopieniu w czasie krótszym niż 10 ps po wzbudzeniu impulsem XUV o natężeniu wyższym niż próg zniszczeń i opracował model pozwalający na oszacowanie, ile energii jest potrzebne, by wytworzyć krzemiany w danej liczbie dwuwarstw. Wyniki pomiarów i analizy teoretycznej pokazały, że standardowe zwierciadlane powłoki wielowarstwowe Mo/Si mogą być używane w źródłach femtosekundowych impulsów XUV dla fluencji sięgających  $45 \pm 7$  mJ/cm<sup>2</sup>, o ile częstotliwość powtarzania impulsów jest wystarczająco mała, by pozwolić na dyssypację ciepła pomiędzy kolejnymi impulsami.

2. Praca **H2**. Badane były wielowarstwy MoN/SiN złożone z 40 par warstw i o grubości pary 8.18 nm, zaś grubość warstwy MoN stanowiła 40% okresu. Próbkę została naświetlona pojedynczymi impulsami ze źródła FLASH o długości czasowej około 10 fs. Autor zaobserwował powstawanie kraterów na powierzchni zwierciadła, których kształt zależał od fluencji. Nie zaobserwowano żadnych zniszczeń i krystalizacji innych faz poniżej temperatury topnienia warstwy MoN. Wyjaśniono, że podobnie jak w przypadku struktury Mo/Si atomy nie miały wystarczającej ruchliwości w fazie stałej i nie mogły się przemieścić na znaczącą odległość w krótkim okresie czasu, w którym naświetlona próbka miała podwyższoną temperaturę. Sytuacja zmienia się diametralnie powyżej temperatury topnienia MoN, kiedy atomy w fazie ciekłej stawały się dużo bardziej ruchliwe. Obrazy STEM pokazały, że na granicach stopionego obszaru formowały się krystality Mo<sub>2</sub>N, a w jego wnętrzu pojawiały się bąbelki gazowego azotu. Dr Sobierajski porównał procesy zniszczeń w wielowarstwach MoN/SiN i wielowarstwach Mo/Si. Próg zniszczeń struktury MoN/SiN ( $48 \pm 7 \text{ mJ/cm}^2$ ) był prawie taki sam jak dla Mo/Si ( $45 \pm 7 \text{ mJ/cm}^2$ ), natomiast współczynnik odbicia powłoki wielowarstwowej Mo/Si był równy  $42 \pm 1\%$ , zaś MoN/SiN -  $7 \pm 1\%$ . Słabsze odbijanie promieniowania było związane ze zwiększoną absorpcją, co prowadziło do silniejszego wzrostu temperatury. Tak więc wyniki doświadczeń i analizy teoretycznej pokazały, że zwierciadlane powłoki wielowarstwowe MoN/SiN w porównaniu do powłok Mo/Si mają wyższą wytrzymałość na zniszczenia radiacyjne w przypadku dość powolnych procesów i przy małym natężeniu impulsu, ale zbliżone progi zniszczeń w przypadku bardzo szybkiego ogrzewania, jak np. naświetlań pojedynczymi impulsami FEL.

3. Modelowanie progów zniszczeń zwierciadlanych powłok wielowarstwowych zastosowanych w silnych źródłach promieniowania krótkofalowego [**H3**].

Dr R. Sobierajski opracował model pozwalający na oszacowanie progów zniszczeń wielowarstwowych powłok zwierciadlanych pod wpływem ultrakrótkich impulsów promieniowania XUV. Model ten opiera się na wynikach doświadczeń oraz teoretycznych modelach zastosowanych w pracach [**H1**, **H2**]. Model bierze pod uwagę zarówno optyczne parametry wielowarstw, jak i wymianę energii w układzie wzbudzonych elektronów. Autor założył, że w wyniku wymiany energii między wzbudzonymi elektronami, populacja całego gazu elektronowego ulega „termalizacji do wysokiej temperatury w skali czasowej rzędu 100 fs” (nie rozumiem tego określenia, bo termalizacja dotyczy raczej stanu końcowego układu niż stanu nierównowagowego). Dalszy transport energii został opisany poprzez dyfuzję ciepła w gazie elektronowym, szybkość ze względu na silne gradienty temperatury. W przypadku naświetlań z użyciem pojedynczych impulsów założono, że próbka ulegała schłodzeniu do temperatury pokojowej w czasie rzędu mikrosekundy. W cieple stałym to zbyt krótki okres czasu, by atomy mogły przemieścić się na znaczną odległość i w efekcie zaburzyć strukturę warstwową. Jednak w stopionym materiale współczynniki dyfuzji atomowej są w pobliżu temperatury topnienia o rzędy wielkości wyższe, np. w przypadku krzemu o czynnik  $10^{13}$  ( $10^{10} \text{ nm}^2/\text{s}$  dla cieczy, w stosunku do  $10^{-3} \text{ nm}^2/\text{s}$  w cieple stałym). A więc w cieczech dyfuzja atomowa mogła zachodzić w skali nanosekund, zanim materiał uległ zestaleniu, co skutkowało przemieszaniem materiałów i zanikiem struktury warstwowej. W efekcie następował spadek reflektancji, który autor uznawał za równoważny zniszczeniu powłoki wielowarstwowej. Autor przyjął w swoim modelu, że próg zniszczeń odpowiadał fluencji promieniowania, dla której średnia temperatura szczytowej dwuwarstwy osiągała temperaturę topnienia jednego z jej materiałów składowych. R. Sobierajski przetestował 4 grupy powłok wielowarstwowych: zoptymalizowanych dla różnych zakresów energii fotonów. Ogólne kryteria wyboru były określone jako: (1) duża różnica w stałych optycznych między kolejnymi materiałami dwuwarstwy, (2) niskie współczynniki absorpcji promieniowania, (3) niska mieszalność między materiałami, (4) jednorodny i ciągły wzrost warstw w trakcie ich nakładania, (5) łatwość użycia. W pobliżu krawędzi absorpcji boru (188

eV) najbardziej obiecującą strukturą z wysokim progiem zniszczeń była  $\text{Mo}_2\text{B}_5/\text{B}_4\text{C}$ . W pobliżu krawędzi węgla (284 eV),  $\text{CoO/C}$  oraz  $\text{LaN/C}$  były dobrą alternatywą dla  $\text{Co/C}$  lub  $\text{V/C}$ . W przypadku krawędzi absorpcji skandiu (i wanadu) zaproponowano użycie  $\text{V/Sc}$  zamiast szeroko stosowanego  $\text{Cr/Sc}$ . Jako alternatywę dla obecnie używanych systemów wielowarstwowych o ograniczonym zastosowaniu w zakresie tzw. „okna wodnego”, zaproponowano nowe kombinacje materiałów z  $\text{LiO}_2$  jako warstwy dystansowe.

4. W pracy **H5** dr Sobierajski badał wpływ akumulacji ciepła na procesy uszkodzeń krzemu naświetlonego seriami femtosekundowych impulsów promieniowania. Próbkę zostały naświetlone seriami 400 impulsów femtosekundowymi (~100 fs) z częstotliwością powtórzeń równą 1 MHz i długością fali 13.5 nm. Badania eksperymentalne uzupełnione zostały o symulacje numeryczne transportu i akumulacji energii za pomocą prostego jednowymiarowego modelu dyfuzji ciepła. Zaobserwowano trzy typy zmian morfologicznych i strukturalnych indukowanych naświetlaniem seriami 400 femtosekundowych impulsów promieniowania XUV z częstotliwością powtarzania 1 MHz. Modyfikacje te zależały w sposób progowy od średniej fluencji padającej serii impulsów. Powyżej najniższego progu równego  $38 \text{ mJ/cm}^2$ , na powierzchni próbki pojawiły się nanokropki krzemu, powstałe w wyniku relokacji lokalnie stopionego materiału na powierzchni próbki (górne kilka nanometrów). Kolejne progi zostały przypisane tworzeniu i aglomeracji defektów, w tym dyslokacji. W trakcie chłodzenia defekty ulegają zamrożeniu i lokalizacji. Autor sugerował, że powyżej progu równego  $42 \text{ mJ/cm}^2$  próbka prawdopodobnie osiągała stan ciekły pod koniec trwania serii impulsów, co skutkowało zmniejszeniem koncentracji defektów.

5. Praca **H4** – rozwój diagnostyki impulsów i metodologii pomiarów. Właściwości niezwykle intensywnych wiązek promieniowania FEL stwarzają wyjątkowe wymagania w zakresie jej wytrzymałości radiacyjnej dla elementów optyki samego lasera i w stacjach doświadczalnych. Przeprowadzenie zaplanowanych badań wymagało udoskonalenia istniejących układów doświadczalnych oraz opracowania i przetestowania metod pomiarowych do badań zmian strukturalnych w materiałach. Dr Sobierajski ma zasadniczy wkład w zaprojektowanie złożonego układu do diagnostyki impulsów, składającego się z szeregu detektorów promieniowania XUV dla wiązki odbitej, rozproszonej i przechodzącej, spektrometrów, mikroskopów do monitorowania stanu próbki i jej pozycji względem wiązki promieniowania FEL, układu typu pompa-sonda do pomiarów mikroskopowych z rozdzielczością czasową. Zaletą układu jest jego modułowa konstrukcja, dzięki czemu można wybrać zestaw detektorów najlepiej pasujący do wymagań konkretnego eksperymentu.

#### **Podsumowanie osiągnięć:**

W pracach stanowiących osiągnięcie habilitacyjne dr Sobierajski zbadał podstawowe procesy prowadzące do zmian strukturalnych, zachodzące w ciałach stałych pod wpływem silnych, pojedynczych, femtosekundowych impulsów promieniowania z zakresu XUV i rentgenowskiego i opracował opis teoretyczny zmian strukturalnych zachodzących w zwierciadlanych powłokach wielowarstwowych. W modelu uwzględniono nie tylko miejscowe zmiany porządku atomowego (np. topnienie) spowodowane naświetlaniem, ale również przemieszczenie się atomów na odległości rzędu kilku - kilkunastu nanometrów i indukowane tym modyfikacje składu chemicznego warstw, co z kolei wpływało na modyfikacje stałych optycznych materiału. Przewidywania modelu dobrze opisują wyniki doświadczalne dla dwóch układów wielowarstwowych –  $\text{Mo/Si}$  oraz  $\text{MoN/SiN}$ . Następnie zbadał procesy prowadzące do zmian strukturalnych w litej próbce krzemowej pod wpływem naświetlania seriami impulsów femtosekundowych promieniowania XUV z wysoką częstotliwością powtórzeń (1 MHz).

---

Wyniki doświadczalne wyjaśnił na bazie modelu dyfuzji ciepła uwzględniającego proces przemiany fazowej (topnienia), transportu energii i procesów akumulacyjnych. Analiza procesów zachodzących w trakcie naświetlań pozwoliła na rozgraniczenie procesu depozycji energii od jej transferu np. drogą dyfuzji ciepła oraz wynikających z tego zmian strukturalnych – np. przejść fazowych, czy dyfuzji atomów.

Przedstawione rezultaty badań, obok walorów poznawczych, mają także znaczną wartość aplikacyjną. Szczególnie wartościowe są wyniki symulacji, wskazujące jakie klasy materiałów i struktur należy dobierać dla określonych zakresów energii fotonów z lasera FEL i jakimi kryteriami należy się kierować. Wyniki badań są istotne przy określeniu geometrycznych ograniczeń oraz strukturalnych i materiałowych wymagań dla elementów optycznych i detektorów promieniowania dla nowych źródeł krótkofalowego promieniowania ze źródeł FEL. Określone zostały maksymalne dopuszczalne natężenia promieniowania (rzędu kilkunastu do kilkuset  $\text{mJ/cm}^2$ ) oraz wskazane zostały kombinacje materiałów o wysokiej wytrzymałości radiacyjnej i dużym współczynniku odbicia (np.  $\text{Mo}_2\text{B}_5/\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{CoO/C}$ ,  $\text{V/Sc}$ ), pozwalające na transmisję impulsów o najwyższej fluencji.

Prace dr Sobierajskiego wpisują się w jeden z głównych nurtów badań oddziaływania impulsów femtosekundowych z powierzchnią materiałów oraz przemian fazowych zachodzących w ultrakrótkich czasach. Nie ulega wątpliwości, że dr Sobierajski bardzo dobrze opanował metodologię pomiarów oddziaływania pojedynczych impulsów, a także ciągu impulsów femtosekundowych oraz metody teoretycznej analizy wyników i potrafi z danych eksperymentalnych wyciągnąć cenne informacje dotyczące mechanizmów uszkodzeń powierzchni materiałów. Autor najwyżej ocenia swój wkład w pracę H5 (80%), dotyczącą uszkodzeń powierzchni krzemu impulsami lasera o dość umiarkowanej mocy. Pewne zastrzeżenie budzi fakt, że w tej publikacji autor nie odniósł się do prac z przełomu lat 1970/80 na temat oddziaływania impulsów laserowych z powierzchnią krzemu i wygrzewania laserowego warstw implantowanych, gdzie bardzo podobne efekty generacji i ewolucji defektów, w tym topnienie i rekrytalizacja epitaksjalna z fazy ciekłej po stopieniu impulsem, lub serią impulsów, były obserwowane.

Dr Sobierajski ma w dorobku znaczące współprace z ośrodkami międzynarodowymi. Przez okres 4 lat pracował w HASYLABie, zaczynając jeszcze jako student PW, w latach 2007-10 jako post-doc pracował w FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen w Utrechcie w Holandii. Od 2005 r. pracuje w IF PAN. Na dorobek habilitacyjny składają się prace wykonane już po powrocie z Utrechtu. W sposób ciągły współpracuje z European XFEL w Hamburgu.

#### **Działalność organizacyjna i dydaktyczna**

Dr Sobierajski aktywnie uczestniczył w organizacji szeregu międzynarodowych i krajowych warsztatów naukowych, ma także pewien wkład w działalność popularyzatorską oraz dydaktyczną (semestralny wykład na Politechnice Warszawskiej). Dorobek dydaktyczny jest niewielki, ale akceptowalny, zważywszy brak takiego wymogu dla instytucji PAN i długoterminowe staże zagraniczne. Dr Sobierajski skutecznie zdobywał finansowanie projektów NCN (dwa) i uczestniczył w przygotowaniu i realizacji wielu projektów międzynarodowych badań z użyciem lasera FEL. Bez wątplenia jest w tym zakresie beneficjentem sposobu finansowania utrzymania w ruchu tak kosztownego urządzenia, jakim jest FEL.

Na dorobek naukowy dra Sobierajskiego składa się łącznie 67 prac opublikowanych w czasopiśmie z bazy JCR (22 po doktoracie), 12 raportów przygotowanych dla laboratoriów

---

synchrotronowych i ponad 80 prezentacji konferencyjnych. Habilitant wygłosił 19 wykładów zaproszonych na krajowych konferencjach i warsztatach specjalistycznych nt. promieniowania synchrotronowego i laserów na swobodnych elektronach.

Bibliometryczne wskaźniki według bazy „Web of Science”: aktualnie całkowita liczba publikacji wynosi 67, liczba cytowań według bazy Web of Science (WoS) – 1410, (bez autocytowań – 1200), indeks Hirscha – 20. Indeksy można uznać za doskonałe na tym etapie rozwoju naukowego.

Współautorzy cyklu publikacji przedstawionych jako osiągnięcie habilitacyjne złożyli oświadczenia dotyczące ich wkładu w daną pracę. Z oświadczeń wynika wiodący wkład dra Sobierajskiego w badania eksperymentalne i analizę teoretyczną wyników otrzymanych dzięki udoskonaleniu metodologii pomiarów i diagnostyki pojedynczych impulsów.

Podsumowując, uważam, że całkowity dorobek naukowy i organizacyjny dra Sobierajskiego jest bardzo dobry i bardzo istotny dla środowiska naukowego i inżynierskiego pracującego z laserem FEL, jednakże wybór dość skromnego cyklu publikacji kontrastuje z tym dorobkiem i wprawdzie spełnia wymogi dla uznania go za wystarczający dla dorobku habilitacyjnego, to całość tak wybranego osiągnięcia pozostawia spory niedosyt, zważywszy to, do jak wyjątkowego narzędzia badawczego habilitant miał dostęp. W szczególności uważam, że dr Sobierajski mógł dołączyć do proponowanego cyklu prac również inne publikacje ze swojego bogatego dorobku. Dziwi brak prac eksperymentalnych z lat 2013-15, w których habilitant określił swój udział na przynajmniej 30%, np. praca w Applied Physics Letters z 2015 r, w której dr Sobierajski szacuje swój udział na 40% i która bardzo dobrze pasuje do tematu osiągnięcia.

**Wniosek końcowy:** stwierdzam, że osiągnięcie naukowe przedstawione przez dr Ryszarda Sobierajskiego stanowi wartościowy wkład w rozumienie procesów zniszczeń w elementach optyki lasera FEL pod wpływem silnych impulsów femtosekundowych oraz w rozwój diagnostyki pojedynczych impulsów. Wysoko oceniam jego wkład w metodologię przewidywania odporności materiałów i struktur wielowarstwowych na radiację metodami obliczeniowymi. Uważam, że osiągnięcie naukowe, całkowity dorobek naukowy po doktoracie oraz dorobek organizacyjny i dydaktyczny dr Ryszarda Sobierajskiego wypełniają warunki ustawowe wymagane do nadania stopnia doktora habilitowanego.

Warszawa, 09.02. 2018 r.

prof. dr hab. Adrian Kozanecki

