

**Wiktor SIELANKO, Andrzej CZOPIK,
Marek JĘDRZEJCZYK, Aleksander KULABKO,
Sławomir KRAWCZYK, Mirosław KOZŁOWSKI**
Przemysłowy Instytut Elektroniki, Warszawa

ODCHYLANIE WIĄZKI ELEKTRONÓW DUŻEJ MOCY W URZĄDZENIACH EB-PVD

Słowa kluczowe

Wiązka elektronów (WE), układ odchylenia, EB-PVD.

Streszczenie

Nanoszenie warstw metodą EB-PVD (Electron Beam Physical Vapour Deposition) jest bardzo atrakcyjne, jeśli idzie o efekty techniczne i produkcyjne, a jej stosowanie w świecie rozszerza się. Wiele światowych firm, które zajmowały się spawaniem elektronowym, oferuje urządzenia i wyrzutnie dla tej technologii [1–5]. Przedmiotem pracy było opracowanie rozwiązań umożliwiających odchylenie pod dużymi kątami wysokoenergetycznej WE, wykorzystywanej między innymi w urządzeniach próżniowych do kontrolowanego i precyzyjnego nakładania cienkich warstw metalicznych na przygotowanych podłożach metodą EB-PVD.

Wprowadzenie

Układ odchylenia wiązki elektronów pod dużymi kątami wykorzystywany jako narzędzie w procesach technologicznych spełnia ważną rolę, umożliwiając precyzyjne i kontrolowane sterowanie WE, a co za tym idzie automatyzację tych procesów. W przypadku urządzeń EB-PVD zastosowanie działa elektronowego

dużej mocy wraz z komputerowym systemem sterowania pozwala na łatwiejsze przeniesienie procesu nakładania warstw z fazy eksperymentalnej i doświadczalnej na produkcyjną.

Istotą pracy było opracowanie i zbudowanie układu odchylenia WE w urządzeniu do EB-PVD o mocy 60 kW zainstalowanym w Instytucie Technologii Eksploatacji. W urządzeniu tym działo elektronowe umieszczone jest pod kątem 90° w stosunku do systemu tygli, z których odparowywany jest materiał na przygotowane podłoża. Działo elektronowe wyposażone jest m.in. w zespół zasilaczy wysokonapięciowych oraz układ ogniskowania wiązki w jej osi. Zadaniem układu odchylenia jest precyzyjne odchylenie WE w taki sposób, aby trafiła ona, z jak najmniejszymi zniekształceniami w wybrany tygiel wypełniony odpowiednim materiałem.

Zaprojektowany i zbudowany w Przemysłowym Instytucie Elektroniki układ odchylenia WE spełnia szereg wymagań, z których najważniejsze to:

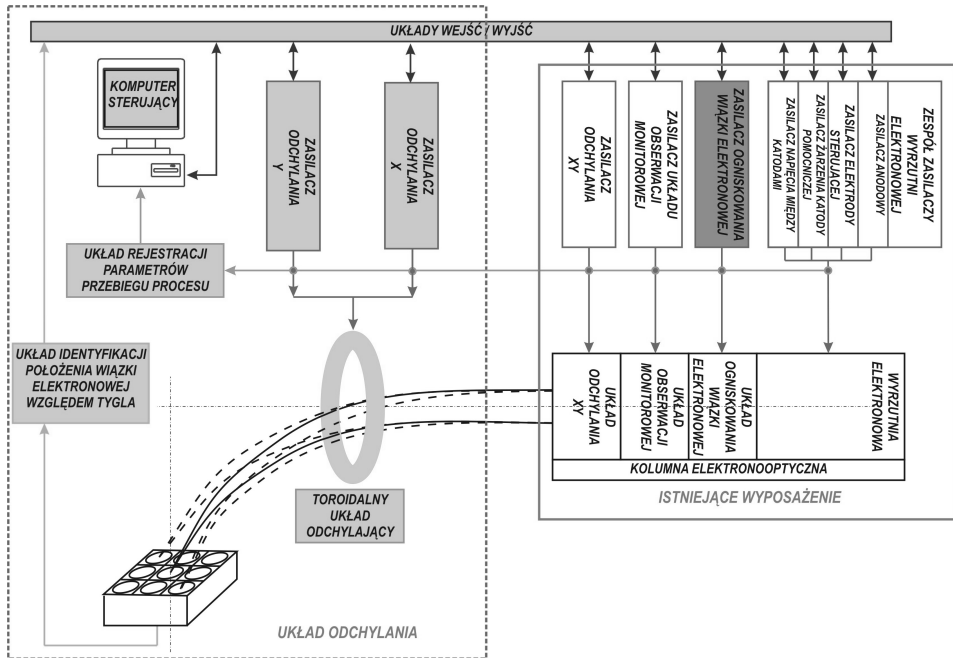
- możliwość kształtowania rozkładu czasowo-przestrzennego gęstości mocy WE,
- wysoka stabilność parametrów pracy,
- możliwość szybkiego przemieszczania WE,
- możliwość korekcji kształtu figur kreślonych przez WE po jej odchyleniu w polu magnetycznym,
- możliwość pozycjonowania względem tygla.

1. Układ odchylenia

Układ odchylenia wchodzi w skład systemu sterowania wiązką elektronów dział elektronowych dużej mocy. Na rys. 1 pokazano schematycznie budowę urządzenia przeznaczonego do procesu EB-PVD z zaznaczonym na nim układem odchylenia wiązki elektronów.

Urządzenie wyposażone jest w zestaw tygli złożony z matrycy w układzie 3 na 3, z których prowadzony będzie proces naporowywania. W celu uzyskania pozycjonowania wiązką elektronową w każdy tygiel konieczne jest zakrzywienie toru lotu elektronów poprzez zastosowanie dodatkowego układu odchylenia w osiach X (równoległa do osi wiązki) i Y (prostopadła do osi wiązki) wraz z zasilaczami. Na podstawie wstępnych analiz oszacowano kąt zakrzywienia toru lotu elektronów, który musi zawierać się w przedziale 32° do 63° w osi X i $\pm 20^\circ$ w osi Y. W takim przedziale kątów wiązka elektronów jest w stanie przeskanować obszar matrycy tygli o żądanym rozmiarze 150x150 mm.

W zależności od położenia wiązki elektronów na poszczególnych tyglach zmienia się jej ogniskowanie. Do jej zogniskowania wykorzystywany jest układ ogniskowania wraz z zasilaczem, będący elementem istniejącego wyposażenia generatora WE. Praca układu ogniskowania jest ściśle powiązana z opracowanym sterowaniem układu odchylenia.



Rys. 1. Schemat układu odchylenia WE na potrzeby procesu EB-PVD

Dodatkowo w celu identyfikacji położenia wiązki elektronów względem tygla urządzenie zostało wyposażone w układ realizujący to zadanie. Całością pracy urządzenia steruje komputer klasy PC w wykonaniu przemysłowym.

2. Sterowanie WE

Sterowanie WE wykorzystuje procedury stworzone specjalnie dla tego procesu pozwalające na **odchylenie WE** w założonym zakresie kątów, **pozycjonowanie WE** na każdym istniejącym tygla, z którego parowany będzie materiał oraz **nadawanie ruchów roboczych WE**, pozwalających na równomierne odparowanie materiału z całej powierzchni tygla.

System sterowania układem odchylenia zapewnia jego pracę zgodnie z programem technologicznym, a także w cyklu sterowania ręcznego, detekcję sytuacji awaryjnych, komunikację z operatorem urządzenia oraz rejestrację podstawowych parametrów pracy.

3. Odchylenie WE

Układ odchylenia WE ma za zadanie odchylenie wiązki elektronów w osi X i Y w taki sposób, aby precyzyjnie trafić w zadany punkt na płaszczyźnie pada-

nia. Punkty te są w rzeczywistości środkami tygli, z których prowadzony będzie proces naparowywania. W celu umożliwienia właściwego pozycjonowania WE względem tygli, wiązka elektronowa odchylana jest polem magnetycznym poprzez dodatkowy układ odchylania w osi X i Y wraz z zasilaczem. Dodatkowo WE oscyluje na całej powierzchni tygla wzdłuż zadanej krzywej, dzięki czemu parowanie materiału z tygla jest bardziej efektywne.

Układ odchylania WE składa się ze specjalnego rdzenia toroidalnego wykonanego ze spieku ferrytowego 3F3 (Mn-Zn) o średnicy zewnętrznej 140 mm i wewnętrznej 107 mm oraz szerokości 25 mm, na którym nawinięte są dwie pary uzwojeń z drutu miedzianego o średnicy 1,1 mm i liczbie 180 zwojów.

Wykorzystanie drutu o stosunkowo dużej średnicy miało na celu uzyskanie małej indukcyjności cewek, ponieważ dodatkową ich funkcją jest realizowanie szybkozmiennych przebiegów pozwalających na dodatkowe odchylanie WE na powierzchni pojedynczego tygla. Częstotliwość tych zmian na poziomie kilkuset Hz pozwala na równomierne topienie całej powierzchni materiału umieszczonego w pojedynczym tyglu.

Układ zasilany jest prądem w zakresie 0÷20 A za pomocą specjalnie skonstruowanego do tego celu zasilacza.

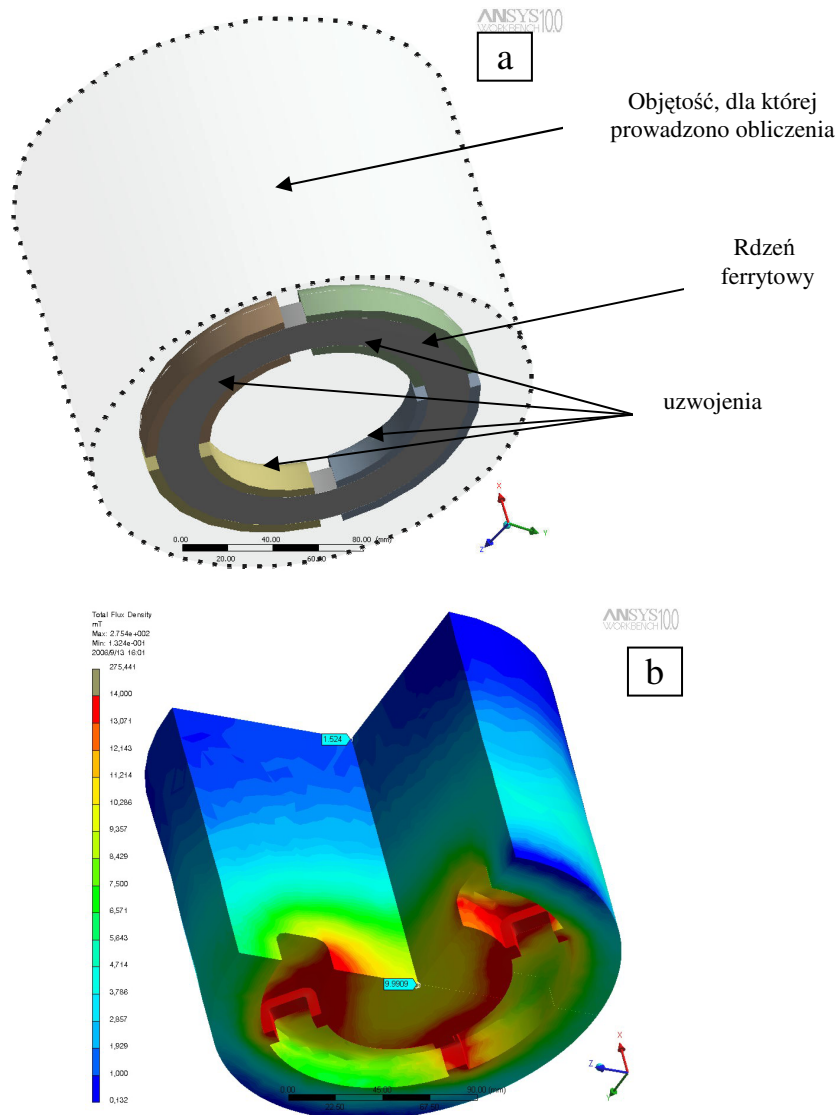
Wykonanie układu poprzedzone było symulacją, z wykorzystaniem programu ANSYS WORKBENCH 10.0, gęstości strumienia magnetycznego (indukcja), jaki wytwarzany jest w cewce magnetycznej wykorzystywanej do odchylania wiązki elektronów. Symulacje miały odpowiedzieć na pytanie, jak kształtować się będzie gęstość strumienia wewnątrz cewki, jaka będzie jego wartość wewnątrz cewki oraz jaki jest wpływ symetrii uzwojeń (czyli jakości ich wykonania na rdzeniu), a także wpływ kierunku płynącego w uzwojeniach prądu (sposób połączenia uzwojeń) na jednorodność i symetrię pola magnetycznego wewnątrz cewki.

Wstępne próby odchylania WE wykazały, iż odchylenie wiązki w położenie środkowego tygla wymaga przepływu prądu przez każde z uzwojeń cewki na poziomie 5A. W symulacjach przyjęto właśnie taką wartość prądu jako jeden z parametrów obliczeniowych. Do każdego z uzwojeń przykładano prąd 5 A (opcjonalnie do jednej lub dwóch par cewek), zmieniano także polaryzację prądu (-5 A lub +5 A). Liczbę zwojów w każdej cewce określono na 180, co odpowiada rzeczywistej wartości.

Na rys. 2a pokazano przekrój przez toroidalny rdzeń wraz z nawiniętymi uzwojeniami oraz przestrzeń, w której liczona będzie gęstość strumienia magnetycznego. Wyniki symulacji pokazuje rys. 2b.

Rozkład gęstości strumienia magnetycznego jest równomierny i symetryczny zarówno w płaszczyźnie układu odchylającego, jak i w płaszczyznach odchylania i prostopadłej do niej, co powinno zapewnić precyzyjne sterowanie wiązką elektronów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że 150 mm od środka układu odchylającego gęstość strumienia magnetycznego na osi układu wynosi oko-

to 50% wielkości panującej w środku. Oznacza to, że wiązka elektronów będzie odchylana znacznie wcześniej niż dojdzie do układu odchylającego, a w płaszczyźnie układu nie będzie przechodzić przez jego środek. Konsekwencją tego było odpowiednie zaprojektowanie układu odchylającego w ten sposób, aby odchylana w nim wiązka nie uderzała w jego obudowę.



Rys. 2. Rysunek cewki (przekrój) z zaznaczonym rdzeniem, czterema uzwojeniami oraz objętością (szary cylinder zewnętrzny), dla której liczone gęstość strumienia magnetycznego (a), oraz natężenie gęstości strumienia magnetycznego (b) na przekroju badanej cewki

W wyniku tych obliczeń okazało się także, że bardzo ważne jest zachowanie symetrii nawijanych uzwojeń, które bezpośrednio wpływają na symetrię pola magnetycznego i mają bezpośredni wpływ na pozycjonowanie WE.

4. Pozycjonowanie WE

Statyczne odchylenie WE przez specjalnie zaprojektowany i zbudowany układ odchylenia opiera się na sterowaniu WE polem magnetycznym wytwarzanym przez dwie pary cewek nawiniętych na toroidalny rdzeń ferrytowy o średnicy 140 mm. Umożliwiają one odchylenie WE w dwóch prostopadłych płaszczyznach. Położenia WE odchylonej do środków poszczególnych tygli przez układ odchylający (wartości prąd–napięcie) są stałe dla danego cyklu pracy. Istnieje natomiast konieczność każdorazowego powtórzenia procedury identyfikacji tygli w przypadkach:

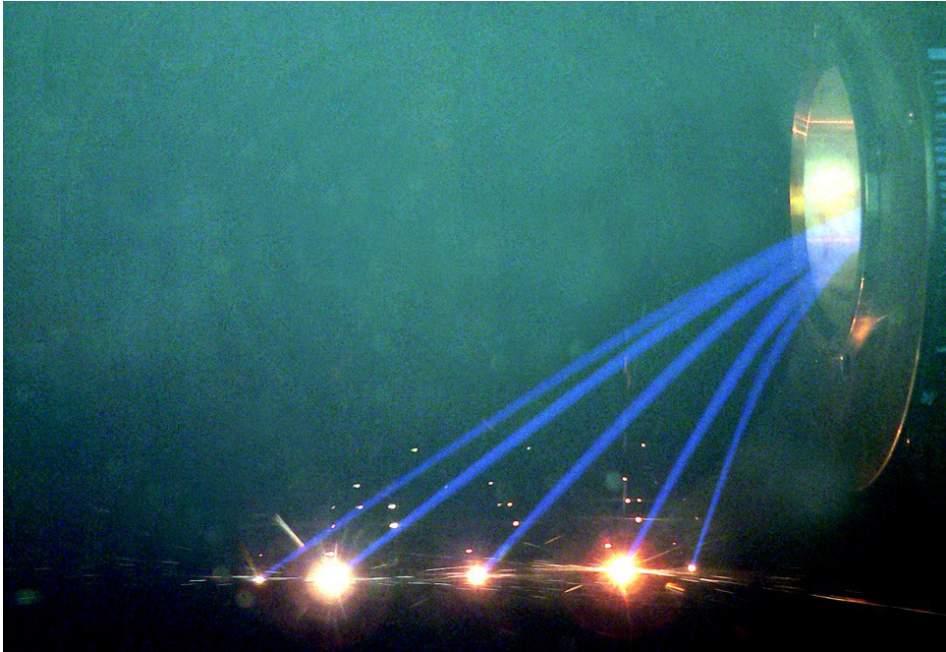
- zmiany wielkości tygli lub sposobu ich rozmieszczenia w komorze roboczej,
- justowania układu generacji WE (np. po wymianie katody).

Identyfikacja położenia wiązki elektronów realizowana jest w dwóch trybach:

- ręcznym – polega on na ustawieniu położenia wiązki elektronów na tyglu, poprzez ręczne ustawienie odpowiedniego prądu cewek odchylających, potencjometrami zasilacza stabilizowanego, a także na ustawieniu prądu ogniskowania wiązki elektronów na tyglu. Wartości te zostają zapisane w pamięci komputera. Procedurę tę należy powtórzyć dla każdego tygla;
- automatycznym – w trybie tym za pomocą specjalistycznego oprzyrządowania składającego się z dwóch płyt miedzianych o wymiarach 150 mm x 150 mm odizolowanych od siebie. W górnej płycie znajdują się otwory (położenie otworów pokrywa się z położeniem środków tygli) o średnicy ok. 3 mm, w centrum których są umieszczone w dolnej płycie pręty wykonane z wolframu. Wierzchołki prętów znajdują się na poziomie powierzchni górnej płyty. Dolna płyta przez rezystor podłączona jest do układu pomiarowego. Pomiar polega na skanowaniu punkt po punkcie wiązką elektronów górnej płyty i pomiarze spadku napięcia na rezystorze. W przypadku trafienia wiązką w pręt wolframowy, rejestrowany sygnał będzie wielokrotnie większy niż poziom tła. W ten sposób możliwe jest dokładne wyznaczenie pozycji wszystkich tygli i zapisanie ich automatycznie w pamięci komputera.

W trakcie prowadzenia procesu naporowywania, podczas przemieszczania WE z jednego tygla na drugi układ sterowania będzie na bardzo krótki czas zmniejszał jej moc tak, aby nie uszkodzić miedzianego tygla chłodzonego wodą, w którym umieszczony jest odparowywany materiał.

Na rys. 3 pokazano odchylenie WE w trakcie jej pozycjonowania w płaszczyźnie równoległej do kierunku padania wiązki.



Rys. 3. Odchylenie WE w komorze próżniowej w płaszczyźnie równoległej do kierunku padania wiązki

5. Nadawanie ruchów roboczych WE

Wiązka elektronów padając na tygiel wypełniony materiałem podgrzewa i topi powierzchnię część materiału umożliwiając w ten sposób jego odparowanie. Jednakże WE ma bardzo małą średnicę w stosunku do powierzchni tygla, dlatego też w celu bardziej równomiernego nagrzewania materiału na powierzchni tygla wykonuje na jego powierzchni ruchy wzdłuż okręgów, których średnica zmienia się w krótkim odstępie czasu zgodnie z przyjętą procedurą technologiczną. Ponieważ po odchyleniu wiązki na tyglu kształt okręgu jest zdeformowany, oprogramowanie komputerowe stosuje procedury, mające na celu taką modyfikację jego kształtu, aby na powierzchni tygla zachowywał on cały czas kształt niezdeformowanego okręgu. Istnieje także możliwość wprowadzenia do pamięci komputera krzywych zaprojektowanych przez operatora.

Uwagi końcowe

Układ odchylenia WE jest wyposażony w chłodzenie wodne, które zapewnia stałą temperaturę rdzenia ferrytowej cewki i gwarantuje w ten sposób stałe i powtarzalne parametry pracy.

Układ odchylenia sterowany jest komputerem który zapewnia powtarzalne parametry pracy podczas każdego procesu umożliwiając jednocześnie rejestrację najważniejszych parametrów.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Reinhold E., Richter J., Waydbrink H., Zschieschang E.: Reflection Enhancement of Aluminum Strips by EB-PVD in Highly Productive Industrial Lines, International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films 2000, San Diego, USA, April 10-14, 2000, Von Ardenne Anlagentechnik GmbH.
2. General Brochure of ALD Vacuum Technologies GmbH.
3. Reinhold E., Hummel H., Richter J., Seyfert U.: Large Area Dielectric Coating of Silicon Dioxide on Steel by Reactive EB-PVD, Presentation on the 45th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters 2002 Lake Buena Vista, Florida, USA, April 14–17, 2002, Von Ardenne Anlagentechnik GmbH.
4. www.patpn-icebt.kiev.ua/offers/equip.htm
5. www.ferrotec.com.sg

Recenzent:
Bogusław MAJOR

Magnetic deflection of the high energy electron beam in EB-PVD devices

Key words

Electron beam (EB), deflection system, EB-PVD.

Summary

Depositing the layers by the EB-PVD method is very attractive as far as technical and production effects are concerned, and its usage is spreading. Many worldwide companies that specialize in electron beam welding offer devices and electron guns for this technology. The objective was to develop solutions that enable the deflection of high energy electron beams, in order to control and precisely deposit thin metallic layers on the prepared surfaces using EB-PVD method.