┏-

У статті розглянуто розраху-

нок та конструкцію накладного вихорострумового датчика для

вимірювання електропровідності металевих зразків. Виявлено зміну електропровідності сплаву Д16 піс-

ля опромінення сильнострумовим релятивістським електронним пуч-

ком. Досліджено зміни в розподілі валентних електронів сплаву Д16.

провідність.

сплава Д16.

ропроводимость.

D16 is investigated.

D-

Ключові слова: вихорострумовий датчик, валентні електрони, електро-

В статье рассмотрен расчет

и конструкция накладного вихре-

токового датчика для измерения электропроводимости металличес-

ких образцов. Определено измене-

ние электропроводимости сплава

Д16 после облучения сильноточным релятивистским электронным пуч-

ком. Исследовано изменение в рас-

пределении валентных электронов

датчик, валентные электроны, элект-

able eddy current detector for electro-

conductivity measurement of metal samples is considered in article. Change

of electroconductivity of alloy D16 after

an irradiation by hightcurrent relativis-

tic electron beam is defined. Change in

valency electrons distribution in alloy

valency electrons, electroconductivity.

-

Keywords: eddy current detector,

D-

Ключевые слова: вихретоковый

Calculation and a design of attach-

-

УДК 537.8:621.715:539.376

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕННИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СПЛАВА Д16

С. Е. Донец Младший научный сотрудник*

В.В.Литвиненко Доктор технических наук, старший научный сотрудник, ученый секретар*

> Ю.Б.Полторацкий Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

> **А. Г. Пономарев** Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ННЦ**

> **В.Т.Уваров** Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ННЦ**

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины ул. Гуданова, 13, г. Харьков, 61002 Контактный тел.: (057) 700-41-11

> **Харьковский физико-технический институт НАН Украины ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108 Контактный тел.: (057) 335-66-49

1. Введение

Взаимодействие сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) с металлическими мишенями представляет достаточно сложную последовательность процессов на уровне электронной и ионной подсистем, инициируемых радиационными и ионизационными потерями энергии частиц. Результатом такого взаимодействия является изменение эксплуатационных свойств облучаемых объектов - пластичности, коррозионной и эрозионной стойкости, микротвердости и др. На микроуровне одним из проявлений последствий воздействия СРЭП является измельчение зеренной структуры вплоть до наномасштабных размеров [1], перераспределение элементов на границах зерен [2] и др. В этой связи сильноточные электронные пучки рассматриваются как перспективный инструмент модификации свойств твердых тел и создания новых радиационных нанотехнологий.

Использование СРЭП для получения компонентов новых электротехнических материалов, например, нано-

порошков, пористых металлов и др. предполагает необходимость контроля электрической проводимости, поскольку известно [3], что стимулируемая излучением эволюция дислокационной структуры приводит к изменению проводимости сплавов. В случае же воздействия на сплавы СРЭП мы можем ожидать проявления более сложных механизмов, приводящих к изменению свойств облучаемого объекта ввиду комплексности воздействия (радиационное, температурное, ударно-волновое, электромагнитное).

2. Постановка задачи и методы исследования

Ввиду комплексности требований к материалам с модифицированными свойствами при их последующей эксплуатации, достаточно высокой стоимости энергии СРЭП, что важно для прогнозирования рентабельности будущего технологического процесса, уже на стадии разработки научных основ новых технологий представляет-

14

ся важной задача разработки неразрушающих методов оценки свойств сплавов после облучения в том числе определения их электрофизических свойств. Превращения в сплаве Д16 под действием СРЭП (энергия электронов ~350 кэВ, ток пучка ~2 кА, длительность импульса ~5 мкс) изучались авторами в работах [1, 2], поэтому представляется уместным дополнить эти исследования изучением модифицирующего воздействия на электрофизические характеристики - электрическую проводимость и распределение спектра валентных электронов. Для измерения электрической проводимости целесообразно применить вихретоковый метод. Для чего необходимо рассчитать и изготовить накладной вихретоковый датчик. Наличие такого датчика позволит сопоставить результаты измерения проводимости с ранее известными фактами измельчения зёренной структуры сплава и перераспределением легирующих примесей, а также с измеренными спектрами распределения валентных электронов. В основу расчета измерительной схемы для оценки электрической проводимости положены известные значения глубины модифицирующего воздействия, составляющие порядка 400 мкм.

3. Расчет и конструкция накладного вихретокового датчика

В качестве вихретокового датчика был выбран накладной абсолютный трансформаторный преобразователь, для которого, в отличие от параметрического, выходной сигнал значительно меньше зависит от температуры преобразователя. Схематически такой преобразователь с исследуемым объектом представлен на рис. 1.



Рис. 1. Расчетная модель вихретокового преобразователя

В проводящей среде токи смещения малы по сравнению с другими составляющими полного тока. В неподвижной, относительно электромагнитного тока среде токи переноса отсутствуют. Тогда плотность полного тока определяется:

 $\vec{J}_{\text{полн}} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{E} + \vec{J}_{\text{стор}},$

где $\vec{J}_{\text{стор}}$ — плотность сторонних токов; \vec{E} — вектор напряженности электрического поля; σ — проводимость среды.

Поскольку сторонний ток изменяется по закону синуса (такой ток создает монохроматическое электромагнитное поле), то выражение для векторного потенциала \dot{A} определяется [4]:

$$(j\omega\sigma - \omega^{2}\epsilon_{0}\epsilon_{\text{oth}})\cdot\dot{\vec{A}} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_{0}\mu_{\text{oth}}}\nabla \times \dot{\vec{A}}\right) = \dot{\vec{J}}_{\text{ctop}}$$

где j — мнимая единица; ω — круговая частота; $\epsilon_0\epsilon_{_{OTH}}$ — диэлектрическая проницаемость среды; $\mu_0\mu_{_{OTH}}$ — магнитная проницаемость среды.

Т. к. задача обладает осевой симметрией, существуют только ψ -составляющие векторов плотности тока и векторного потенциала.

На рис. 2 представлена схема, примененная для объединения конечноэлементной модели и внешней цепи (диод и вольтметр приняты идеальными).



Рис. 2. Расчетная схема преобразователя

Для изображенной схемы справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1} \cdot \underline{z}_{1} + \dot{U}_{_{BX}} = \dot{\epsilon}; \\ -\dot{U}_{_{BbIX}} + \dot{I}_{2} \cdot \underline{z}_{_{H}} = 0 \end{cases}$$

Поскольку катушка намотана тонким проводом, то распределением плотности тока по сечению витка пренебрегаем, и принимаем однородным. Ток витка определяется следующим образом (S_в — площадь поперечного сечения витка, \dot{J} — плотность тока в катушке, \dot{E} — комплексная амплитуда напряженности электрического поля):

$$\dot{I}_{B} = \int_{S_{B}} \dot{J} \cdot dS = \int_{S_{B}} \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{E} \cdot dS$$

Считая, что длина витка l_B, получим:

$$\dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \dot{\mathbf{A}} + \frac{\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{B}}}{\mathbf{l}_{\mathrm{B}}},$$

тогда

 $\dot{I}_{B} = -j \cdot \omega \cdot \int_{S_{B}} \dot{A} \cdot dS + \sigma \cdot S_{B} \frac{\dot{U}_{B}}{l_{B}},$

откуда

$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{B}} = \frac{\mathbf{l}_{\mathrm{B}}}{\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{S}_{\mathrm{B}}} \left[\dot{\mathbf{I}}_{\mathrm{B}} + \mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \int_{\mathbf{S}_{\mathrm{B}}} \dot{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{dS} \right].$$

Для катушки, имеющей N витков:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\kappa} = \mathbf{R}_{\kappa} \cdot \mathbf{I}_{\kappa} + \mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \sum_{i=1}^{N} \int_{S_{Bi}} \dot{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{dS}$$

где R_к – сопротивление катушки постоянному току.

С учетом последнего выражения

$$\begin{cases} \dot{I}_1 \cdot \underline{z}_j + R_{\kappa 1} \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \int\limits_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS = \dot{\epsilon} \ ; \\ -R_{\kappa 2} \cdot \dot{I}_2 - j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \int\limits_{S_{Bi}} \dot{A} \cdot dS + \dot{I}_2 \cdot \underline{z}_{\text{H}} = 0 \ . \end{cases}$$

Таким образом, окончательная система уравнений имеет вид:

$$\begin{split} &\left\{ \begin{aligned} (j\omega\sigma - \omega^{2}\epsilon_{0}\epsilon_{_{OTH}})\cdot\dot{A} + \nabla\times\left(\frac{1}{\mu_{0}\mu_{_{OTH}}}\nabla\times\dot{A}\right) = \dot{J}_{_{CTOP}}; \\ &\left\{ \begin{aligned} &\dot{i}_{1} = \frac{\dot{\epsilon} - j\cdot\omega\cdot\sum_{i=1}^{N_{1}}\int \dot{A}\cdot dS}{\underline{Z}_{I} + R_{_{KI}}}; \\ &\dot{I}_{2} = \frac{j\cdot\omega\cdot\sum_{i=1}^{N_{2}}\int \dot{A}\cdot dS}{\underline{Z}_{_{H}} - R_{_{K2}}}, \\ &\dot{I}_{2} = \frac{\dot{j}\cdot\omega\cdot\sum_{i=1}^{N_{2}}\int \dot{A}\cdot dS}{\underline{Z}_{_{H}} - R_{_{K2}}}, \end{aligned} \right. \end{split}$$
 где $\dot{J}_{_{CTOP}} = \begin{cases} \frac{\dot{I}_{1}}{S_{_{B1}}}\cdot\vec{1}_{\psi}, \text{ в первичной катушке}; \\ &\dot{I}_{2} = \frac{\dot{I}_{2}}{S_{_{B2}}}\cdot\vec{1}_{\psi}, \text{ во вторичной катушке}; \end{cases}$

0, во всех других проводниках.

Поскольку датчик должен работать на высоких частотах, то важным является уменьшение его паразитной емкости. Этого можно добиться выбором наиболее оп-



Рис. 3. Внешний вид сборки измерительной и возбуждаюшей катушек



Рис. 4. Внешний вид вихретокового датчика

наноором наполжения тимального расположения катушек и применением материалов с наименьшей диэлектрической проницаемостью. Для каркаса катушки была выбрана пропарафиненная бумага, катушка после намотки заливалась парафином. Внешний вид катушки изображен на рис. 3.

Для локализации магнитного поля и уменьшения диаметра зоны контроля катушки помешены в экран из меди. К выводам катушек припаяны кабели. Вся конструкция в сборе представлена на рис. 4.

Структурная схема измерительного стенда представлена на рис. 5.

Генератор тока на основе высокочастотного генератора Г4-153 позволяет в плавных пределах изменять частоту вынуждающего тока от 40 кГц до 10 МГц.



Рис. 5. Структурная схема измерительного стенда: 1 — генератор синусоидального тока; 2 — вихретоковый датчик; 3 — выпрямитель; 4 — регистрирующий прибор

Частота вынуждающего тока выбирается такой, чтобы глубина проникновения электромагнитного поля в образец была меньше толщины переплавленного слоя.

Измерение проводимости образцов осуществляется по ГОСТ 27333-87.

4. Результаты измерения проводимости сплава Д16

В исходном состоянии для трех образцов сплава Д16 проводимость находилась в диапазоне (18,2...18,8) МСм/м.

Известно, что после облучения концентрация легирующих примесей в приповерхностном слое сплава увеличивается, по сравнению с исходными образцами [2]. Кроме этого в зоне воздействия СРЭП возникают эффекты, связанные с термическим воздействием и др. Измерение проводимости облученных образцов дало значения (15,9...16,6) МСм/м.

5. Измерение спектра валентных электронов сплава Д16

При облучении металлов основным является эффект уменьшения подвижности за счет введения новых центров рассеяния — радиационных дефектов и самих внедрившихся частиц. Так как с изменением температуры распределение электронов по энергиям в металле практически не изменяется, то сечение рассеяния электронов на этих дефектах от температуры не зависит и их вклад в увеличение сопротивления можно считать постоянным.

Исследования спектра валентных электронов поверхности образцов сплава Д16 проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектросокопии на спектрометре XPS-800 Kratos. Давление в камере прибора составляло 5.10-8 Торр. Фотоэлектроны возбуждались MgK_a-излучением с энергией фотонов h_v = 1253,6 эВ. Параметры активирующего рентгеновского излучения: U = 15 кВ, J = 20 мА. Кинетическая энергия электронов анализировалась полусферическим электростатическим анализатором. Разрешение спектрометра ~1 эВ, точность определения энергии связи -0,3 эВ. Спектры обрабатывались на компьютере: проводилось сглаживание, вычитание постоянного фона и фона неупругих потерь по методу (Shirley), удаление уширяющего действия рентгеновской линии (итерационная развертка) и разложение сложной линии на составляющие ее компоненты.

Толщина анализируемого слоя ~5 нм. Перед установкой в вакуум поверхность образца протиралась изопропиловым спиртом. Для уменьшения слоя углеводородных загрязнений образцы подвергались ионной бомбардировке в вакууме (Ar⁺, E = 2,5 кэВ, скорость распыления 100 Å/мин).

Как видно из рис. 6, вследствие облучения поверхности, существенно изменяется спектр валентных электронов. Измерение электропроводимости вихретоковым методом показало ее уменьшение на ~10 %. Это можно объяснить как уменьшением зеренной структуры так и уменьшением энергии связи валентных электронов.





6. Выводы

Облучение сплава Д16 сильноточным релятивистским пучком электронов с энергией частиц Е ~ 350 кэВ, током пучка I ~ 2 кА, длительностью импульса τ ~ 5 мкс приводит к уменьшению его электропроводимости на ~10 %, что сопровождается смещением спектра энергии связи валентных электронов в сторону меньших энергий,

Накладання освітлення і постійного електричного поля при формуванні інтеркалатних наноструктур неорганічний напівпровідник/родамін Ж приводить до: колосального росту діелектричної проникності; появи ефекту «від'ємної ємності»; акумулювання світлової енергії.

-0 0-

Ключові слова: інтеркаляція, імпедансна спектроскопія, родамін Ж.

Наложение освещения и постоянного электрического поля при формировании интеркалатных наноструктур неорганический полупроводник/ родамин Ж приводит к: колоссальному росту диэлектрической проницаемости; появления эффекта «отрицательной емкости»; аккумулирования световой энергии.

Ключевые слова: интеркаляция, импедансная спектроскопия, родамин Ж.

Applied illumination and constant electric field at the formation of intercalative nanostructures «inorganic semiconductor/rhodamine G» leads to enormous growth of permitivity, onset of effect «negative capacity» and accumulation of light.

Keywords: Intercalation, impedance spectroscopy, Rhodamine G.

измельчением зеренной структуры, сегрегацией легирующих примесей на границах зерен.

Литература

- Брюховецкий В. В. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина [Текст] / В. В. Брюховецкий, В. В. Литвиненко, В. Ф. Клепиков и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 4. – С. 33–38.
- Арсенюк В. В. Стимулирование неоднородностей в сильноточных пучках электронов и их влияние на процессы массопереноса в облучаемых мишенях [Текст] / В. В. Арсенюк, Н. И. Базалеев, С. Е. Донец и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРПРМ. 2007. № 6(91). С. 116–119.
- Данилов С. Е. Влияние стоков разного типа на радиационную повреждаемость аустенитных FeNi сплавов при электронном и нейтронном облучении [Текст] / С. Е. Данилов, В. Л. Арбузов, Б. Н. Гощицкий и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРПРМ. 2007. № 2(90). С. 43–47.
- Сильвестер П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков [Текст] : пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М.: Мир, 1986. – 229 с.

УДК 539.2; 669.24

ІНТЕРКАЛАТНІ НАНОСТРУКТУРИ КОНФІГУРАЦІЇ НЕОРГАНІЧНИЙ НАПІВПРОВІДНИК/РОДАМІН Ж

I. I. Григорчак

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою Кафедра інженерного матеріалознавства та прикладної фізики завідувач лабораторії

Лабораторія молекулярної фізики та нано-енергетики* Контактний тел.: (032) 258-22-67 Email: Ivangr@rambler.ru

Ф. О. Іващишин

Молодший науковий співробітник* Кафедра інженерного матеріалознавства та прикладної фізики **Email:** Fivash@i.ua

> Т. М. Біщанюк Студентка* Email: mouse.tania@gmail.com

*Національний університет «Львівська політехніка» вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна 79013