

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка
Фізико-математичний факультет

ФІЗИКО- МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА

Збірник наукових праць

ВИПУСК 2 (2)

Суми – 2011

Друкується згідно з рішенням вченої ради фізико-математичного факультету
Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка

Редакційна колегія:

Ф.М. Лиман	доктор фізико-математичних наук, професор
С.П. Ращупкін	доктор фізико-математичних наук, професор
В.Ю. Сторіжко	доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАНУ
В.С. Іваній	кандидат технічних наук, професор
М.В. Каленик	кандидат педагогічних наук, доцент
Т.Д. Лукашова	кандидат фізико-математичних наук, доцент
С.В. Петренко	кандидат фізико-математичних наук, доцент
А.О. Розуменко	кандидат педагогічних наук, доцент
О.В. Семеніхіна	кандидат педагогічних наук, доцент
О.Д. Стадник	кандидат фізико-математичних наук, доцент
Р.І. Холодов	кандидат фізико-математичних наук, доцент
О.С. Чашечникова	кандидат педагогічних наук, доцент

**Ф45 Фізико-математична освіта: Зб. наукових праць. – Суми : Вид-во
СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2011. – № 2 (2). – 106 с.**

До збірника увійшли матеріали викладачів та студентів фізико-математичного факультету Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка, які доповідалися на II міжвузівській науково-практичній конференції «Наукова діяльність як шлях формування професійних компетентностей майбутнього фахівця» у грудні 2011 року.

Випуск приурочено до 10-ої річниці кафедри експериментальної та теоретичної фізики Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка

Матеріали подаються в авторській редакції

ЗМІСТ

КАФЕДРИ ЕІТФ – 10 РОКІВ	5
ФІЗИК – ФАХІВЕЦЬ МАЙБУТНЬОГО.....	8
НАУКОВІ ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ФІЗИЧНОЇ ОСВІТИ	13
<i>Астапович Д.О.</i>	<i>13</i>
ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ BETASOOL ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ	
ЕМІТАНСА ПУЧКА АНТИПРОТОНІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОННОГО	
ОХОЛОДЖЕННЯ В НАКОПИЧУВАЛЬНОМУ КІЛЬЦІ HESR	13
<i>Білик В.М., Грицай Ф.Ю., Стадник О.Д., Гинку О.К.</i>	<i>18</i>
ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ПОЛУМ'Я	18
<i>Булат В.</i>	<i>23</i>
АТОМНО-ЕМІСІЙНИЙ СПЕКТРОМЕТР З ГЕЛІКОНОВИМ ДЖЕРЕЛОМ	
ІНДУКТИВНО-ЗВ'ЯЗАНОЇ ПЛАЗМИ НИЗЬКОГО ТИСКУ	23
<i>Завражна О.М., Лобас О.М.</i>	<i>35</i>
ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ	
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ.....	35
<i>Квашко К.В.</i>	<i>41</i>
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ	
МАТЕРІАЛІВ.....	41
<i>Кравченко В.О., Лобода В.Б.....</i>	<i>45</i>
ВПЛИВ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПЛІВКОВИХ	
СПЛАВІВ CoNi	45
<i>Мороз І.О., Іваній В.С., Холодов Р.І.</i>	<i>52</i>
КІНЕМАТИКА ПРОЦЕСІВ РОЗПАДУ ТА ЗЛИТТЯ ЧАСТИНОК У НАВЧАЛЬНОМУ	
КУРСІ СТВ.....	52
<i>Пасько О.М.</i>	<i>59</i>
ПОЛІМЕРНІ НАНОКОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	59
<i>Сакунов А.</i>	<i>64</i>
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ПУЧКА У ЯДЕРНОМУ	
СКАНУЮЧОМУ МІКРОЗОНДІ.....	64
<i>Салтикова А.І., Ісаєв М.В.....</i>	<i>71</i>
МЕТОД ВТОРИННО-ІОННОЇ МАС-СПЕКТРОМЕТРІЇ.....	71
<i>Салтикова А.І., Хурсенко С.М.</i>	<i>75</i>
ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОСТІ ПРИРОДНИХ СОЛЕЙ.....	75
<i>Сидоренко С.І.</i>	<i>79</i>
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК	79
ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ СТУДЕНТІВ-ФІЗИКІВ, «НПК-2011».....	87
<i>Астапович Д.</i>	<i>87</i>
ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ BETASOOL ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ	
ЕМІТАНСА ПУЧКА АНТИПРОТОНІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОННОГО	
ОХОЛОДЖЕННЯ В НАКОПИЧУВАЛЬНОМУ КІЛЬЦІ HESR	87
<i>Дігтярьов О.</i>	<i>89</i>
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ	
ЕЛЕМЕНТІВ	89

<i>Дяченко М.</i>	90
ЕЛЕКТРИЧНА СПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ЗАМАГНІЧЕНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ПЛАЗМИ З ВРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕМПЕРАТУРИ	90
<i>Ісаєв М.</i>	92
ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ТОНКИХ ПЛІВОК МЕТОДОМ ВІМС	92
<i>Квашико К.</i>	92
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	92
<i>Кулик Т.</i>	93
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВІМС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ТОНКИХ ПЛІВОК.....	93
<i>Малій С.</i>	94
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТОНКИХ ДВОШАРОВИХ ПЛІВКАХ НА ОСНОВІ FE, CO ТА CU	94
<i>Мідловець К.</i>	95
ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОЛІТТЯ	95
<i>Пасько О.</i>	96
НАНОКОМПОЗИЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ	96
<i>Сакунов А.</i>	97
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КАНАЛЮВАННЯ ПРОТОНІВ МЕВ-ЕНЕРГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ.	97
<i>Сидоренко С.</i>	97
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК	97
<i>Синяговська Ю.</i>	98
СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ	98
<i>Терещенко Д.</i>	99
СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ	99
<i>Хандога С.</i>	99
ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ СПЛАВУ CO-NI МЕТОДОМ ВІМС	99
<i>Хачатрян А.</i>	101
РЕНТГЕНІВСЬКІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ СКЛАДУ РЕЧОВИН	101
<i>Чубенко А.</i>	102
РОЗРАХУНОК ПРОВІДНОСТІ ГЕТЕРОГЕННОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОРМУЛ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ПРОВІДНОСТІ	102
<i>Шкурдода Ю., Коломієць В.</i>	103
МАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ ПЛІВОК Co/Ag/Fe/П та Co/Cu/Fe/П	103
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	105

КАФЕДРИ ЕІТФ – 10 РОКІВ

У зв'язку з перебудовою системи освіти в Україні та необхідністю забезпечення пріоритетних підприємств та організацій Сумської області (ІПФ НАН України, Відкрите акціонерне товариство «Сумське Відкрите акціонерне товариство імені М.Фрунзе», Відкрите акціонерне товариство «ВНДІкомпресормаш», науково-виробниче об'єднання «SELMI», об'єднання «Свема» та інші, які добре відомі далеко за межами України) фахівцями, які мають фундаментальні знання теоретичних основ сучасної фізики, вміння та навички проведення досліджень у відповідній галузі, виникла проблема підготовки спеціалістів-фізиків, які б задовольнили потреби ринку праці в цій галузі. Для вирішення цієї проблеми, відповідно до угоди про співробітництво між Інститутом прикладної фізики НАН України та Сумським державним педагогічним університетом імені А.С. Макаренка, у 2001 році була створена спільна кафедра експериментальної та теоретичної фізики і відкрита нова спеціальність для підготовки фахівців за напрямом 0701 «Фізика».

Більшість викладачів цієї кафедри є провідними науковцями Інституту прикладної фізики НАН України, які забезпечують теоретичну підготовку спеціальних дисциплін освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр», «спеціаліст», «магістр». Очолює кафедру академік НАНУ, директор Інституту прикладної фізики НАН України, професор Сторіжко В.Ю. Як показала практика, симбіоз фахівців кафедри фізики СумДПУ імені А.С. Макаренка з великим методичним досвідом та теоретиків й експериментаторів ІПФ НАН України склав потужну викладацьку базу для підготовки висококваліфікованих спеціалістів-фізиків.

Інститут прикладної фізики НАН України, який є основним замовником на підготовку таких спеціалістів, створено Постановою Президії НАН України від 21.11.1991р. №299, на базі Сумського відділення Інституту металофізики НАН України з метою розширення фундаментальних і прикладних досліджень у галузі ядерних технологій. Ініціатором створення Інституту виступив нинішній директор ІПФ НАН України академік НАН України В.Ю.Сторіжко з групою однодумців – вчених Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут". Ідея створення першого на Сумщині академічного інституту з самого початку активно підтримувалась Президентом НАН України академіком НАН України Б.Є. Патonom та першим віце-президентом НАН України академіком НАН України В.Г. Бар'яхтаром. Плідні наукові стосунки між ІПФ НАН України та ННЦ ХФТІ НАН України поглибилися завдяки створенню нового відділення в НАН України – ядерної фізики та енергетики. Спільні наукові проекти з виконання державної тематики в цій галузі сприяють розвитку співпраці науковців.

Інститут прикладної фізики НАН України спеціалізується на проведенні експериментальних та теоретичних досліджень процесів взаємодії іонів,

електронів низьких енергій з речовиною, розробкою електростатичних прискорювачів та ядерно-фізичних методів з субмікронною роздільною здатністю для досліджень складу і структури матеріалу, у тому числі біофізичних об'єктів та біоматеріалів, розробкою фізичних методів визначення малих компонентів руд і вивчення в них мікросистем рідкісних елементів, дослідженням і розробкою наукових і навчальних приладів. Наукові пошуки проводять 115 науковців, у тому числі 1 академік НАН України, 2 член-кореспонденти НАН України, 12 докторів наук та 35 кандидатів наук.

Упровадження нової спеціальності «Фізика» зусиллями науковців ІПФ НАНУ та фахівців кафедри фізики Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка суттєво підвищило рівень підготовки спеціалістів природничо-наукового напрямку для підприємств й організацій області, оскільки до викладання було залучено більше 10 докторів фізико-математичних наук, професорів, а також задіяне наукове та лабораторне обладнання підприємств, які беруть участь у їх підготовці. Таким потужним науковим матеріалом може похвалитися далеко не кожний класичний університет.

Сьогодні кафедра експериментальної та теоретичної фізики забезпечує підготовку студентів денної форми навчання за такими дисциплінами:

- вибрані питання ФТТ;
- вибрані питання фізики атомного ядра й елементарних частинок;
- випадкові процеси і поля;
- додаткові розділи квантової механіки;
- електродинаміка;
- електродинаміка суцільних середовищ;
- електронна мікроскопія;
- електрорадіотехніка;
- іонна електронна оптика;
- іонна імплантація;
- квантова механіка;
- класична механіка;
- комп'ютерне моделювання фізичних процесів;
- методи математичної фізики;
- методи наукових досліджень;
- основи векторного і тензорного аналізу;
- комп'ютерні та інформаційні технології та основи інженерної графіки;
- основи сучасної електроніки;
- проходження іонізуючого випромінювання через речовину та дозиметрія;
- рентгенографія матеріалів;
- теоретична механіка;
- теоретична фізика;
- термодинаміка і статистична фізика;

- фізика плазми;
- фізика прискорювачів заряджених частинок;
- фізика розрядів та іонних джерел;
- фізика твердого тіла;
- фізичні основи вакуумної техніки;
- фізичні основи маспектрометрії;
- ядерно-фізичні методи досліджень;
- ядерна електроніка.

Нині кафедра експериментальної та теоретичної фізики укомплектована висококваліфікованими спеціалістами. На кафедрі працюють 16 викладачів, усі вони мають вчені ступені та звання. У різний час і на сьогодні викладачами кафедри були і є вчені, відомі далеко за межами України: доктор фізико-математичних наук, член кор. НАНУ Мірошніченко В.І., доктор фізико-математичних наук, проф. Рошупкін С.П., доктор фізико-математичних наук, проф. Чепурних Г.К., доктор фізико-математичних наук, проф. Харченко Д.О., доктор фізико-математичних наук, проф. Острик В.І. та ін.

За роки існування кафедри кваліфікацію бакалавра, спеціаліста та магістра одержали 45 випускників. Із них уже 5 захистили дисертацію на здобуття вченого звання кандидата фізико-математичних наук, 10 є аспірантами, які, використовуючи знання, одержані на фізико-математичному факультеті, успішно ведуть наукову роботу, деякі випускники продовжують навчання в аспірантурах університетів Німеччини та Франції.

Провідні науковці кафедри не лише здійснюють рецензування монографій, посібників та авторефератів дисертаційних досліджень, залучаються до експертизи кандидатських дисертацій, навчальних програм та підручників, але й самі є авторами багатьох навчальних посібників, яким надано гриф МОНМС України. Викладачі беруть активну участь у наукових форумах, Міжнародних, Всеукраїнських та регіональних наукових і науково-практичних конференціях, симпозіумах, регулярно підвищують свою кваліфікацію шляхом стажування у провідних вищих навчальних закладах України.

Кафедра є учасником міжнародного освітнього українсько-німецького проекту з переоснащення шкіл і вищих навчальних закладів України сучасним фізичним обладнанням.

Кафедра має велике майбутнє, оскільки науковий напрям, реалізований у практичних розробках, відкриває перспективи використання творчого потенціалу молоді Сумщини в галузі прикладних проблем енергетики, матеріалознавства, приладобудування, а також приладів навчального призначення.

Завідувач кафедри Академік НАНУ,
директор ІІФ НАНУ

проф. В.Ю. Сторіжко

Заступник завідувача кафедри ЕІТФ

в.о. професора І.О. Мороз

ФІЗИК – ФАХІВЕЦЬ МАЙБУТНЬОГО

В останні роки зберігається тенденція зацікавленості молоді в отриманні вищої освіти і, як наслідок, конкурси до вищих навчальних закладів (на жаль, не на природничо-наукові й інженерні факультети) ставлять перед суспільством нові вимоги, що пов'язані не лише з загальним рівнем шкільної підготовки майбутніх спеціалістів, а й «свідомим» вибором учнями спеціальностей. Це в значній мірі визначить майбутнє країни: перехід до нової економіки – економіки знань та інноваційних технологій, чи технологічна відсталість та сировинний додаток. Як показує досвід технологічно розвинених країн, технічний процес визначається фундаментальною підготовкою всього населення з фізики, математики, хімії та інших природничих дисциплін. Наприклад, електроніка за життя одного покоління перейшла від схем на електронних лампах до напівпровідників й інтегральних схем, а наразі переходить до практичного застосування наноелектроніки. Причому цей процес пов'язаний не лише з розвитком технологій, але, перш за все, з розвитком нових ідей та нових фізичних принципів (від класичної фізики до квантової електродинаміки).

Потрібно зазначити, що професійне вивчення природничих наук з наступним їх використанням, викладанням чи інженерією у нас ніколи не було масовим, хоча в роки Радянського Союзу підготовці спеціалістів цих напрямів надавалося важливе значення (цього потребувало, передусім, вирішення задач військово-промислового комплексу). Однак у масовому масштабі ці спеціалісти не підтримувалися матеріально з боку держави, хоча в суспільстві існувала думка про престижність, наприклад, фізичної науки й інженерії, а в громадськості широко обговорювалися досягнення і відкриття, пов'язані з космосом, ядерною енергетикою, електронікою. Проте більшість громадян є далекою від науки не володіє необхідною підготовкою для її розуміння і цих можливостей найчастіше боїться. Масово фізико фобія особливо проявилася після Чорнобильської трагедії.

Усе це не могло не викликати відторгнення у молоді потягу до природничих наук взагалі й до фізики зокрема. Конкурси на гуманітарні спеціальності набагато перевищують конкурси (а точніше недобори) на природничо-наукові факультети. Втрата зацікавленості до природничо-наукових дисциплін, через відсутність соціального замовлення, відбувається вже на початковому етапі освітнього процесу – у школах. Різко знизився рівень викладання фізики й математики. І якщо думати про майбутнє, то в першу чергу, необхідно вирішувати цю шкільну проблему – відновлювати рівень викладання цих дисциплін хоча б до рівня 70-80-х років минулого століття. Адже ще 30-40 років тому наша система освіти, починаючи зі шкільної і закінчуючи підготовкою наукових кадрів, була однією з найкращих у світі й детально вивчалася у розвинених країнах.

Нелегкий та неоднозначний досвід соціально-економічних перетворень останніх років в Україні свідчить про те, що національне відродження і стабільність не можуть бути досягнутими без серйозного реформування системи освіти. Необхідно відновити в країні соціальне замовлення на підготовку спеціалістів з точних наук. Разом з тим, негативні наслідки широкомасштабного і не завжди продуманого експериментування можуть бути цілком серйозними навіть в більш стабільних умовах. Вихід із створеної дилеми неможливий без творчого використання багатого та цінного досвіду освіти попередніх років. Зрозуміло, що мова йде не про копіювання, а про творче використання в сучасних умовах досвіду, який вищі навчальні заклади та школи здобули за багато десятиріч років, у якому головним було не лише набуття молоддю знань, а й розвиток їхнього інтелекту. Саме це сприяло тому, що до вищих навчальних закладів вступало багато випускників уже зі сформованими мотиваціями й навичками до серйозної інтелектуальної діяльності.

Із точки зору проблеми, що розглядується, соціально-економічна й політична ситуації у нашому суспільстві повинні розглядатися як доволі неоднозначні. З одного боку, демократизація усіх сторін нашого життя докорінно покращила стан справ у системі середньої та вищої освіти. Позитивні зміни, зокрема, у бурхливому зростанні числа інноваційних загальноосвітніх навчальних закладів, для яких характерна більша свобода у виборі навчальних дисциплін, методах і формах викладання. Зауважимо, що, на жаль, у більшості випадків такого вибору фізика, як предмет, набула «другорядного» значення. З другого боку, очевидний поки що незадовільний матеріальний стан шкільних учителів, викладачів ВНЗ, моральне старіння науково-технічної та лабораторної баз навчальних закладів або ж їх повна відсутність. Ці та інші негативні тенденції в сучасних умовах значно підірвали престиж природничо-наукових дисциплін і особливо престиж такої класичної дисципліни як фізика.

Одним зі шляхів протидії зазначеним негативним тенденціям повинен стати пошук нових форм і методів профорієнтації школярів, які передбачають не епізодичну «сезонну», а систематичну співпрацю із загальноосвітньою школою, спрямовану на пошук талановитої молоді та її залучення до сучасної науки з наступним її викладанням. Необхідно створити систему безперервної освіти й усунути разючий нинішній розрив між середньою та вищою освітою з усіма соціальними, психологічними й валеологічними проблемами різкого переходу від однієї ланки освітньої системи до іншої.

Очевидно, що створення в сучасних умовах системи безперервної освіти можливе лише на основі поетапного розширення співпраці між загальноосвітніми навчальними закладами та університетами. Центральне місце у такій співпраці повинно займати залучення старшокласників до сучасної науки, що включає як вивчення базових курсів фізичного й методологічного спрямування, так і залучення учнів старших класів до серйозної і, разом із тим, посиленої для їхнього віку і знань науково-дослідницької діяльності на сучасному обладнанні.

Для практичного виконання цієї задачі необхідні серйозні творчі дослідження методичного характеру, а також поетапне продумане експериментування з наступним аналізом й творчим узагальненням результатів.

У цьому напрямку на фізико-математичному факультеті Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка в останні роки виконана певна робота й набутий перший позитивний досвід. З ініціативи директора Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми), Голови Сумського філіалу Північно-Східного наукового центру академіка НАН України Сторіжка В.Ю. у Сумському педуніверситеті в 2001 році була створена нова кафедра – кафедра експериментальної і теоретичної фізики, і відкрита класична університетська спеціальність «Фізика».

Поряд із традиційною підготовкою викладачів фізики, математики, інформатики впровадження нової спеціальності суттєво підвищило рівень підготовки спеціалістів природничо-наукового напрямку для підприємств і організацій області, оскільки до викладання було залучено більше 10 докторів фізико-математичних наук, професорів, а також задіяне наукове та лабораторне обладнання підприємств, які беруть участь у підготовці. Таким потужним науковим матеріалом може похвалитися далеко не кожен класичний університет. Перший випуск молодих спеціалістів-фізиків був здійснений у 2006 році. Випускники кафедри працюють в системі Інститутів НАНУ та науково-виробничих підприємств України. Більше 40% випускників продовжують навчання в аспірантурі (в тому числі й в наукових центрах західної Європи), значна частина уже захистила кандидатські дисертації.

У цей період Міністерством освіти і науки України за активною участю кафедри фізики й експериментальної і теоретичної фізики Сумського педуніверситету була розроблена й запроваджена загальнодержавна **«Комплексна програма забезпечення загальноосвітніх, професійно-технічних і вищих навчальних закладів сучасними технічними засобами навчання з природничо-математичних і технічних дисциплін»**, результатом якої стало придбання Сумським педуніверситетом найновішого лабораторного обладнання з фізики. Використання цієї сучасної комп'ютерної та мікропроцесорної техніки дає можливість організувати нові види навчальної роботи з природничо-наукових дисциплін і проводити демонстраційні дослідження й лабораторні роботи на якісно новому рівні. У найближчий час на базі цього обладнання буде заснований Центр інноваційних технологій викладання фізики в школі, яке буде здійснюватися у наступних напрямках:

- навчальний фізичний кабінет у школі (демонстрації, фронтальні лабораторні роботи, практикум);
- вплив ВНЗ на систему шкільної освіти;
- особливості підготовки викладачів фізики до інноваційної діяльності;
- методологічні питання постановки фізичного експерименту й практикуму в школі;

- методика аудіо-, відео- й комп'ютерного навчання у школі;
- організація широкого доступу вчителів фізики області, молоді, що навчається (школярів і студентів) до ознайомлення з інноваціями у викладанні фізики;
- проведення курсів підвищення кваліфікації учителів фізики й викладачів фізики ВНЗ за новими інформаційними технологіями викладання фізики;
- проведення семінарів і конференцій з обміну досвідом в області інформаційних технологій;
- організацію роботи «Школи юних фізиків» у системі Малої академії наук та ін.

Ми впевнені в тому, що запропонована нами програма спільної роботи з учителями й учнями області знайде розуміння в усіх, хто пов'язує своє майбутнє з фізикою та іншими природничо-науковими дисциплінами. Це дасть можливість суттєво змінити методику викладання фізики й перейти на сучасні технології викладання, а головне – значно підвищити інтерес у молоді до вивчення фізики й суміжних з нею дисциплін і тим самим повернути минулі традиції нашої освіти й повагу в суспільстві до природничо-наукових дисциплін.

Важливою є також і задача нинішнього дня. Безперечно, нас турбує питання: «Хто і з яким рівнем підготовки розпочне вивчення фізики на фізико-математичному факультеті педуніверситету вже у 2012 році?». Ми запрошуємо всіх випускників шкіл, які небайдужі до фізики, математики, інформатики, до співпраці. **Ми гарантуємо не лише підготовку до вступу на спеціальності фізико-математичного факультету, а головне – за короткий період підготувати до успішного навчання на факультеті та дати можливість отримати престижну освіту й у найближчій перспективі стати кандидатами і докторами наук.**

З метою більш детального ознайомлення з матеріально-технічною і навчально-методичною базою Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка й Інституту прикладної фізики НАН України проводяться Дні відкритих дверей. Майбутні абітурієнти та їхні батьки мають змогу не лише познайомитися з умовами вступу, навчання й побуту студентів, а й поставити провідним вченим питання, які їх найбільш цікавлять.

Фізик зі світовим ім'ям, наш земляк – академік А.Ф. Іоффе писав: «Фізика – це моя професія. Храм сучасної фізики побудований настільки послідовно, що зрозуміти його структуру, побачити логічні зв'язки між різними складовими може кожний, хто здатний витратити на це час».

Від себе додамо, що найвищі поверхи цього Храму науки ще не збудовані, ще проглядаються лише обриси цієї споруди, і тим, хто зараз сидить за шкільною партою, доведеться їх добудовувати.

Усіх школярів, хто відчуває у собі сили й внутрішній потяг до дисциплін фізико-математичного циклу, закликаємо не марнувати свого таланту й прислухатися до порад нашого великого земляка – академіка Іоффе: не жалкуйте

часу на вивчення фізико-математичних наук. Перший крок на цьому шляху – це вступ до Сумського державного педагогічного університету імені А.С. Макаренка на фізико-математичний факультет.

Завідувач кафедри фізики

проф. В.С. Іваній

Заступник завідувача кафедри ЕіТФ

в.о. професора І.О. Мороз

НАУКОВІ ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ФІЗИЧНОЇ ОСВІТИ

Д.О. Астапович

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ ВЕТАСОOL ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕМІТТАНСА ПУЧКА АНТИПРОТОНІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ В НАКОПИЧУВАЛЬНОМУ КІЛЬЦІ HESR

Сучасний рівень наукового пізнання світу багато в чому визначається досягненнями фізики елементарних частинок (ФЕЧ). При цьому рішення супутніх технічних завдань неминуче супроводжується розвитком наукоємних технологій, що мають прикладне значення в різних галузях промисловості. Основним інструментом досліджень в ФЕЧ є найскладніші прискорювально-накопичувальні комплекси, призначені для проведення експериментів з частинками високих енергій.

Одним з подібних проектів є міжнародний проект з дослідження антипротонів і іонів - Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR, GSI, Німеччина).

Найбільш складною ланкою FAIR є антипротонне накопичувальне кільце High Energy Storage Ring (HESR) разом з експериментальною установкою PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt). Програма досліджень для PANDA включає кілька основних цілей, що стосуються вивчення структури адронів, проведення спектроскопії низки рідкісних розпадів і прецизійної рентгенівської спектроскопії гіперядер, дослідження питання про порушення СР-інваріантності.

HESR має ряд переваг у порівнянні з іншими прискорювально-накопичувальними установками, у тому числі - висока інтегральна світність за рахунок використання внутрішньої мішені.

З іншого боку, вихід на запланований режим роботи в подібному накопичувальному кільці прямо залежить від виконання жорстких вимог до параметрів пучка. Звідси при тривалій еволюції частинок $\sim 10^9$ оборотів слід враховувати внесок нелінійних ефектів вищих порядків, оскільки навіть малі нелінійні обурення можуть привести до небажаних наслідків таких, як:

- 1) зростання еміттанса та зниження світності, пов'язаних із взаємодією частинок в пучку та на мішені;
- 2) зменшення динамічної апертури і втрат частинок внаслідок перетину структурних резонансів.

Таким чином, дослідження нелінійної динаміки заряджених частинок являє собою актуальну проблему при спорудженні HESR.

За вісімдесятирічну історію створення циклічних прискорювачів від першого циклотрона 1931 року до сучасних прискорювально-накопичувальних комплексів була розвинена велика теорія прискорювачів і в міру ускладнення завдань створена відповідна база для дослідження нелінійної динаміки пучків заряджених частинок. Розвиток методу комп'ютерного моделювання почався порівняно недавно. Створення програмного пакету BETACOOOL, як основної програми для розрахунку різних характеристик пучка заряджених частинок (наприклад, емітанса), пов'язане з іменами І.М. Мешкова, А.О. Сідоріна, А.В. Смирнова, Г.В. Трубникова, Р. Півіна, В. Пархомчука.

Торкаючись методів дослідження динаміки пучка заряджених частинок, в першу чергу слід відзначити методи математичного і комп'ютерного моделювання і чисельного експерименту.

Основна мета програми BETACOOOL - моделювання довготривалих процесів (порівняно з періодом обертання іонів), що ведуть до зміни функції розподілу іонів в шестимірному фазовому просторі. Рух іонів у накопичувачі передбачається стійким і розглядається в лінійному наближенні. Ця програма призначена для моделювання динаміки іонних пучків в накопичувальних кільцях при наявності ефектів охолодження і нагріву пучка.

У програмі реалізовані три алгоритми для моделювання зміни функції розподілу іонів:

- 1) моделювання динаміки середньоквадратичних (RMS) параметрів функції розподілу;
- 2) моделювання зміни функції розподілу з використанням методу Монте-Карло (алгоритм «модельний пучок»);
- 3) багаточастинковий траєкторний аналіз (алгоритм «трекінг») на основі техніки молекулярної динаміки.

Фізична модель, використовувана в алгоритмі моделювання RMS-параметрів, заснована на наступних припущеннях:

- 1) іонний пучок має гаусівський розподіл по всіх ступенях свободи, і вид розподілу не змінюється в процесі еволюції;
- 2) максимум всіх функцій розподілу збігається з рівноважною орбітою [8].

Еволюція параметрів іонного пучка при його русі всередині накопичувача описана за такою системою з чотирьох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{N} = N \sum_j \frac{1}{\tau_{life,j}} \\ \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i \sum_j \frac{1}{\tau_{i,j}} \end{cases}$$

де N є число частинок, ε_i – середнім значенням фазового об'єму пучка (індекс i відповідає ступеню свободи). Для поперечних ступенів свободи ε_i відповідає емітансу пучка:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \varepsilon_v \sum_j \frac{1}{\tau_{v,j}}$$

$$\frac{d\varepsilon_h}{dt} = \varepsilon_h \sum_j \frac{1}{\tau_{h,j}}$$

де ε_h , ε_v – середньоквадратичні значення горизонтального і вертикального емітансів пучка відповідно.

Для поздовжніх ступенів свободи, він задається наступним виразом:

$$\varepsilon_{ion} = \begin{cases} \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2, & \text{при границі} \\ \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \frac{1}{\Omega_s^2} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta p}{p} \right) \right]^2, & \text{згрупований} \end{cases}$$

Характерні часи є функціями трьох емітансів і числа частинок і мають позитивний знак для процесів нагріву і негативний – для процесів охолодження. Негативний знак характерного часу життя означає втрату частинок, позитивний знак можливий у разі збільшення числа частинок при інжекції. Результат моделювання представляється у вигляді залежностей емітансів і числа частинок від часу [4]:

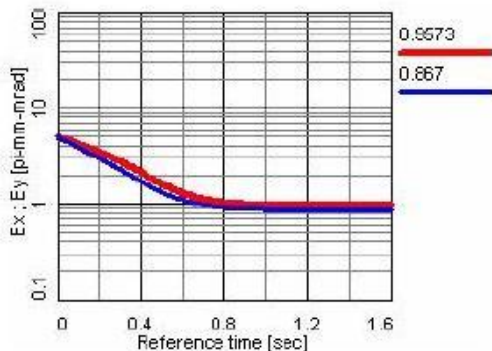


Рис.1. Горизонтальний та вертикальний емітанси

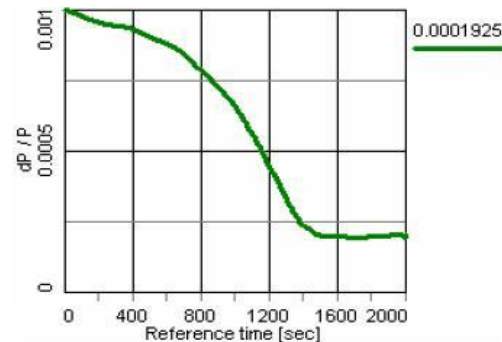


Рис.2. Розкид імпульсу

Структура ВЕТАСОOL виконана у вигляді об'єкта орієнтованої програми, яка дозволяє виконати розрахунок процесу, пов'язаного з охолодженням або нагріванням, а також виміряти характерні часи зміни числа частинок. У загальному випадку можна виділити наступні процеси:

Загальні ефекти нагрівання:

- 1) Взаємодії пучка іонів з атомами мішені,

- 2) Внутрішнє розсіювання іонного пучка,
- 3) Іонне мультиміліметрове на атомах залишкового газу,
- 4) Високий порядок налаштування резонансів іонних бетатрон-пучків через просторові зміни зсуву частоти.

Джерела втрат частинок:

- 1) Ядерне розсіювання на мішені і залишковому газі атомів,
- 2) Одноразове розсіювання на великі кути на мішені й атомах залишкового газу.

Електронне захоплення (рекомбінації) при електронному охолодження:

- 1) Процеси охолодження:
- 2) Стохастичне охолодження (поперечне і поздовжнє),
- 3) Електронне охолодження [5].

Структура ефектів дозволяє застосовувати їх у всіх основних алгоритмах. Для цього кожен ефект може бути використаний в програмі трьома способами: у вигляді матриці переходу; для розрахунку зміни імпульсу модельних частинок і для розрахунку характерних часів зміни середньоквадратичних параметрів функції розподілу.

Дослідження динаміки іонного пучка для довільної форми функції розподілу виконується з використанням алгоритму модельного пучка. У цьому алгоритмі іонний пучок представляється масивом модельних частинок. Процеси охолодження і нагріву, що беруть участь у моделюванні, ведуть до зміни компонентів імпульсу і числа частинок, які розраховуються відповідно до кроку моделювання за часом. Результат моделювання може бути представлений як у вигляді зміни профілю пучка, так і у вигляді залежності емітансів і числа частинок від часу. Реальна оптична структура необхідна тільки для розрахунку внутріпучкового розсіювання (ВВР). Зміна імпульсу частинки через ВВР розраховується на основі однієї з аналітичних моделей, як і у випадку використання алгоритму динаміки RMS-параметрів.

Для моделювання ВВР через кулонівську взаємодію між іонами використовується алгоритм траєкторного аналізу «трекінг». Одна з цілей розвитку цього алгоритму - моделювання процесу утворення кристалічних станів іонних пучків. У кристалічному стані іонного пучка ВВР не може бути описане в рамках стандартних аналітичних моделей, які ґрунтуються на припущенні гаусівської форми функції розподілу. Підвищити швидкість розрахунку ВВР для алгоритму «трекінг» дозволяє використання техніки молекулярної динаміки, що припускає періодичний розподіл іонів в поздовжньому напрямку. Відповідно, цей алгоритм може бути використаний тільки для розпущеного пучка.

Структура основних об'єктів програми BETACool, зокрема моделі накопичувального кільця й іонного пучка, розроблена таким чином, що можливе використання всіх трьох алгоритмів для одних і тих самих вхідних параметрів.

Програма BETACool складається з двох незалежних частин: фізичної – коду, написаного в стандарті мови C++, й інтерфейсної частини, що працює

тільки під управлінням операційної програми Windows. Взаємодія між двома частинами проходить за допомогою файлів трьох типів: вхідних, вихідних і файлів для управління процесом моделювання. Всі вхідні та вихідні файли мають текстовий формат і можуть редагуватися без інтерфейсу.

Інтерфейсна частина складається з виконуваного файлу Bolide.exe, *. dfm, файлів, що містять інформацію про зовнішній вигляд BETACOOOL, і вхідних файлів для обробки результатів моделювання. Інтерфейс також підтримує роботу з файловою структурою на свій диск. Фізична частина програми складається з виконуваного файлу Betacool.exe, відкомпільованого для операційних систем Windows або UNIX, і файлів вхідних параметрів [8].

Адекватність математичної моделі досліджуваного фізичного об'єкта, пучка заряджених частинок, що рухається в електромагнітних полях накопичувача (прискорювача), підтверджується як накопиченими теоретичними знаннями, так і досвідом реалізації подібних складних технічних пристроїв. Комп'ютерне моделювання та обчислювальний експеримент є невід'ємною частиною конструювання сучасної прискорювальної техніки, істотно знижуючи тимчасові витрати.

Практична цінність пов'язана з використанням результатів роботи при проектуванні прискорювально-накопичувального кільця HESR в проєкті FAIR, в основу конструкції якого покладена розроблена теорія «резонансних» магнітооптичних структур.

Література

1. Alekseev N. et al. Project of TWAC Electron Cooler // Physica Scripta. 2003. V.T104. P. 160-163.
2. Lavrentev A., Meshkov I. The computation of electron cooling process in a storage ring. JINR Preprint E9-96-347. Dubna, 1996.
3. Lehrach A., Boine-Frankenheim O., Hinterberger F., Maier R., and Prasuhn D. Beam performance and luminosity limitations in the High-Energy Storage Ring (HESR)
4. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Trubnikov G., Pivin R. BETACOOOL Physics Guide for simulation of long term beam dynamics in ion storage rings (since 1995).- Dubna, 2007.
5. Meshkov I. et al. Computer simulation of ECOOL and IBS process in ACR and DSR using BETA-COOL program. Preprint RIKEN-AF-AC-21. 2000.
6. Meshkov I. et al. Electron cooling application for luminosity preservation in an experiment with internal targets at COSY. Institut fur Kernphysik. 2003.
7. Syresin E. et al. S-LSR low ion energy mode. Preprint NIRS HIMAC-086. 2004.
8. Мешков И. Н., Пивин Р. В., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Трубников Г. В. Численное моделирование динамики частиц в накопителях с использованием программы BETACOOOL// Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т.3, №7(136), С.84-88.

В.М. Білик, Ф.Ю. Грицай, О.Д. Стадник, О.К. Гинку
Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ПОЛУМ'Я

В даній роботі досліджено вплив зовнішнього електричного поля на характеристики полум'я, розглянуто полум'я в поперечному та повздовжньому полях. Факел притягується до позитивно зарядженого електроду. Дано описання деяких фізико-хімічних процесів при горінні.

Вступ

Горіння різного роду палива сьогодні відіграє визначальну роль в енергетиці. Так 70% всієї енергії, яка виробляється сьогодні в світі, отримується внаслідок спалення органічних речовин [1].

Повне згоряння органічних речовин, призводить до виділення CO_2 та H_2O .

При неповному спалюванні в навколишнє середовище викидаються радикали C_2 , CN , OH та отримується значно менше енергії, що призводить до зменшення ККД установок.

З метою підвищення ККД генераторів піролізного газу та повного згорання його в них виконане наступне дослідження:

- процеси горіння органічних речовин,
- вплив на полум'я електричного та магнітного полів.

Процеси горіння відносно легко досліджувати на полум'ї пальника, як експериментально так і теоретично.

1. Горіння – фізико-хімічний процес окислення.

Експериментальними дослідженнями встановлено [2], що при спалюванні органічних речовин складної хімічної структури одержуються досить прості за хімічним складом і структурою хімічні сполуки. З другого боку в будь-якому полум'ї виникають електрично заряджені частинки, які є продуктом розпаду пального і дії окислювача. Процесу розпаду та окислення піддаються як тверді рідкі так і газоподібні речовини.

Якщо речовина знаходиться в твердому стані то окислення може відбуватись на поверхні її в зоні дотику з окиснювачем. Очевидно швидкість хімічних процесів залежатиме від повної поверхні твердого тіла та швидкості доступу окислювача.

При горінні речовини в рідкому стані швидкість хімічних процесів залежатиме від інтенсивності перемішування окислювача та горючої рідини з подальшим утворенням, в наслідок дії високої температури, газокрапельного стану.

Горіння речовини в газовому стані відбувається в залежності від того знаходиться пальне в газоподібному стані чи утворює газокрапельний.

Окислення речовини в газоподібному стані може відбуватись за короткий проміжок часу по всьому об'єму. Це вибух.

Горіння речовини в газокрапельному стані аналогічно горінню твердого пористого тіла. Газокрапельний стан характеризується тим, що краплини пального відокремлені одна від одної газовою компонентою пального. Окислення відбувається по всій їх поверхні.

Для характеристики газокрапельного стану можна ввести повну поверхню краплин одного кубічного метра. Якщо на газокрапельне середовище не діють зовнішні сили, то форму краплин можна вважати сферичною.

Під дією, наприклад, електричного поля постійної полярності, краплини стають еліпсоїдними і їх поверхня при однаковій масі збільшується порівняно з сферою. Таким чином можна чекати збільшення швидкості хімічних процесів в електричному полі, що автоматично призводить до підвищення температури полум'я. Крім цього краплини стають електричними диполями і рухатимуться в полі.

Виходячи з цього можна чекати, що зовнішнє електричне поле стимулюватиме інтенсивність горіння. Також поле дозволить керувати напрямком факелу полум'я.

Відомо [3], що полум'я, не дивлячись на його відносно низьку температуру, є плазмою. В низькотемпературній плазмі крім іонів та електронів присутні нейтральні атоми та молекули [4].

Однак при спалюванні органічного палива в горючій суміші знаходяться фрагменти органічних молекул і краплини палива. В такому випадку рівняння стану ідеального газу матиме вигляд:

$$P = (n_e + n_i + b_1 + b_2)kT \quad (1)$$

тут n_e – концентрація вільних електронів, n_i – концентрація іонів, b_1 – фрагментів молекул палива, b_2 – краплин палива, T – температура плазми, k – постійна Больцмана. Дане рівняння описує теплову рівновагу між системами частинок, мале значення взаємодії частинок плазми порівняно з їх тепловою енергією і відсутністю виродження, дозволяє застосовувати для класичної нейтральної плазми розподіл Больцмана.

Проаналізуємо можливість описання рівнянням (1) полум'я свічки та впливу на нього електричного поля постійної полярності.

Відмітимо, що на поверхні об'єму полум'я свічки тиск P дорівнює атмосферному. Будемо вважати, що поверхня свічки охоплює об'єм зони свічення.

Внаслідок хімічних реакцій окислення які відбуваються на границі свічення густина електронів відрізняється від густини іонів [5], як наслідок, кулонівська потенціальна енергія плазми збільшується.

Електростатичний потенціал визначається рівнянням Пуассона

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\varepsilon} (n_i z - n_e) e = -\frac{4\pi}{\varepsilon} q \quad (2)$$

тут $n_i z$ – заряд іонів, ϵ – діелектрична постійна плазми, e – заряд електрона. При температурі 2000 °С, яка є максимальною у полум'ї пальника на органічному паливі, іони однозарядні. Для них $z=1$.

В такому випадку рівняння (2) перепишеться у вигляді

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\epsilon}(n_i - n_e)e \quad (3)$$

На перший погляд здається що права частина рівняння (3) повинна дорівнювати нулю. Але, вільні електрони при тепловій рівновазі, маючи велику швидкість з'єднуються з найближчими молекулами чи іншими частинками перетворюючи їх в від'ємні іони. Таким чином внутрішня границя зони хімічних реакцій заряджається негативно [5].

Для електронейтральності полум'я зону хімічних реакцій має оточувати оболонка додатних іонів. Встановлено, що при певних умовах утворюються від'ємно заряджені газові іони: H^- , O^- , O_2^- , OH^- , NO_2^- , NO_3^- , CO^- , CO_2^- [5].

Кількість негативно заряджених іонів невелика. Звідси слідує, що завжди в полум'ї позитивно заряджених іонів більше за негативних. Компенсують нехватку від'ємного заряду вільні електрони.

2. Експериментальні дослідження впливу електричного поля на полум'я

Підносячи запалений сірник до свічки ми іонізуємо атоми і молекули. Так в повітрі утворюються додатні іони O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ . Крім цього відбувається плавлення речовини свічки, яка явищем капілярності змочує гніт. В зоні гніту з найвищою температурою починаються хімічні реакції окислення пального. Додатні іони O^+ , O_2^+ вступають в хімічну реакцію з від'ємними H^- , OH^- , CO^- , CO_2^- . Через деякий час встановлюється динамічна рівновага між подачею пального і об'ємом полум'я пальника.

Експериментальні вимірювання розподілу температури в зоні свічення та навколо неї зображено на рис. 1. Порівняння отриманих результатів з вимірюванням інших авторів показує, що характер розподілу співпадає, але спостерігається відмінність в абсолютних значеннях. Нами отримані менші абсолютні значення.

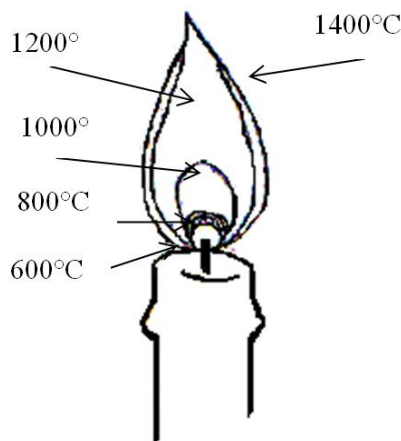


Рис. 1. Розподіл температур в полум'ї пальника.

Дослідження впливу електричного поля на полум'я показало збільшення висоти факелу (рис 2 (б)). Напруженість прикладеного поля становила $8 \cdot 10^5$ V/m. Позитивний заряд зверху.

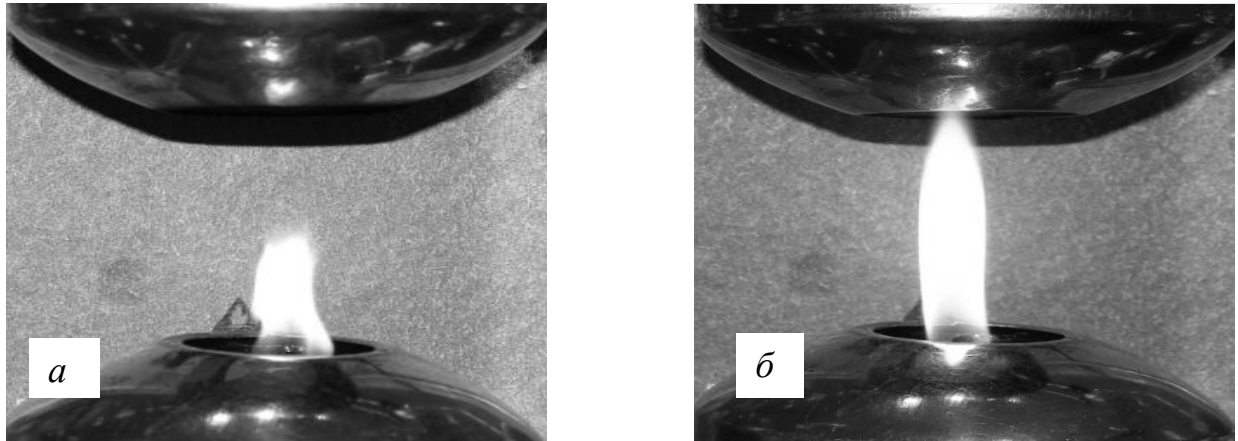


Рис. 2. Вплив поздовжнього електричного поля на геометрію полум'я:

а) без поля

б) з полем

При прикладанні поперечного електричного поля факел також орієнтувався вздовж поля, притягуючись до позитивного електроду (рис. 3).

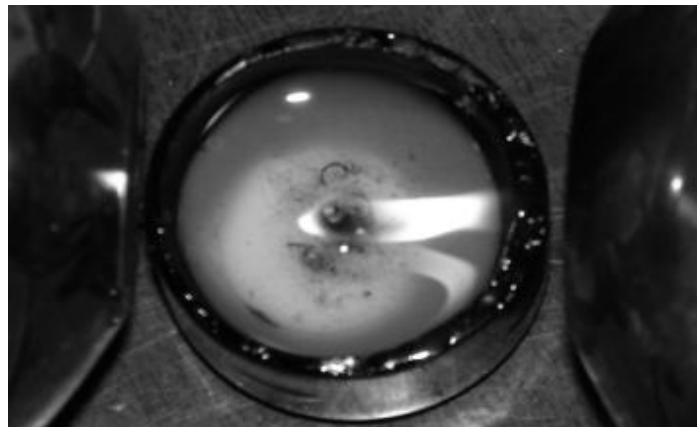


Рис. 3. Вплив поперечного електричного поля на геометрію полум'я

Отримано залежність іонного струму від напруги (рис. 4.), яка подається на електроди при їх поздовжньому та поперечному розташуванні по відношенню до пальника.

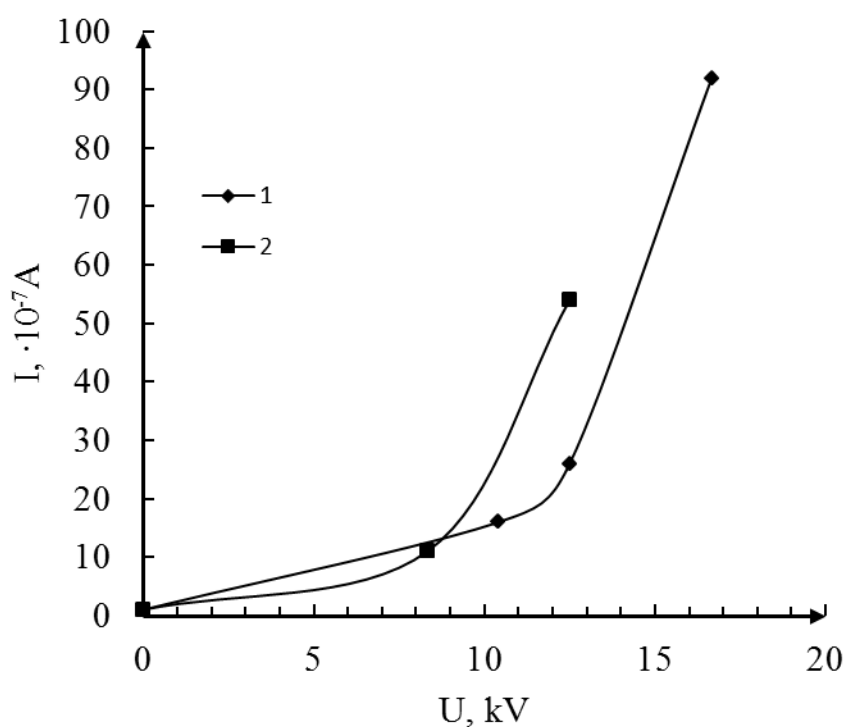


Рис. 4. Залежність іонного струму в полум'ї від напруги яка подається на електроди:
1 – повздовжнє електричне поле, 2 – поперечне електричне поле.

Висновок

Досліджено вплив електричного поля на геометрію та фізичні властивості полум'я. Встановлено можливість керування процесом горіння електричним полем.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій газових генераторів та вибору режиму їх роботи, створення допоміжних пристроїв, які будуть вмонтовуватись в існуючі генератори для збільшення їх ККД.

Література

1. <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/499/77>
2. Frank E. //Petrol. Econ. 1984. V. 51. № 3. P. 104.
3. Хитрин Л. Н., Физика горения и взрыва, М., 1957
4. Льюис Б., Эльбе Г., Горение, пламя и взрывы в газах, пер. с англ., 2 изд., М., 1968
5. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация пламени в электрическом поле. – М.; Металлургия, 1968. –208-311с.

В. Булат*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка*

АТОМНО-ЕМІСІЙНИЙ СПЕКТРОМЕТР З ГЕЛІКОНОВИМ ДЖЕРЕЛОМ ІНДУКТИВНО-ЗВ'ЯЗАНОЇ ПЛАЗМИ НИЗЬКОГО ТИСКУ

Вступ

Успіхи в розвитку і впровадженні нових технологій залежать від удосконалювання наявних і розробки нових методів елементного і структурного аналізу, що відрізняються підвищеними аналітичними характеристиками. Розробки проводяться в напрямках створення пучків фотонів і нейтронів з використанням високо енергетичних (до 1 GeV) первинних пучків електронів і іонів. Такі установки коштують кілька мільярдів доларів. Більше доступні методи елементного аналізу пов'язані з розробкою атомно-емісійних спектрометрів з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-АЕС).

Проводиться багато досліджень і розробок по створенню різних джерел збудження емісійних спектрів і джерел іонів, заснованих на різних типах плазми низького тиску. Це так звані перенастроювані джерела, що дозволяють одержувати інформацію як про елементний склад речовин, так і про молекулярну їхню сполуку, що досягається перебудовою режиму роботи джерела. До таких джерел треба, насамперед, віднести й ІЗП НТ, що може служити джерелом з керованою фрагментацією складних молекул з подальшою ідентифікацією осколків емісійним, абсорбційним, або мас-спектральним методами.

Основи методу

Методи аналізу, засновані на вимірі якого-небудь випромінювання обумовленою речовиною носять назви емісійних. Ця група методів заснована на вимірюванні довжини хвилі випромінювання і його інтенсивності.

Метод атомно-емісійної спектроскопії заснований на термічному збудженні вільних атомів або одноатомних іонів і реєстрації оптичного спектру випускання збуджених атомів.

Для отримання спектрів випускання елементів, що містяться у зразку, аналізований розчин вводять у полум'я. Випромінювання полум'я надходить у монохроматор, де воно розкладається на окремі спектральні лінії. При спрощеному застосуванні методу світлофільтром виділяється певна лінія. Інтенсивність обраних ліній, які є характеристичними для визначається елемента, реєструється за допомогою фотоелемента або фотопомножувача, сполученого з вимірювальним приладом. Якісний аналіз проводиться по положенню ліній в спектрі, а інтенсивність спектральної лінії характеризує кількість речовини.

Інтенсивність випромінювання прямо пропорційна числу збуджених частинок N^* . Оскільки збудження атомів має термічну природу, збуджені і

незбуджені атоми перебувають поміж собою в термодинамічній рівновазі, положення якого описується законом розподілу Больцмана (1.1):

$$\frac{N^*}{N_0} = \frac{g^*}{g_0} e^{-E/kT} \quad (1.1)$$

Таким чином, при постійній температурі число збуджених частинок прямо пропорційно числу незбуджених частинок, тобто фактично загальній кількості даних атомів N в атомізатор (оскільки в реальних умовах атомно-емісійного аналізу частка збуджених частинок дуже мала: $N^* \ll N_0$). Остання, у свою чергу, за даних умов атомізації, визначених конструкцією і режимом роботи приладу і рядом інших факторів), пропорційно концентрації визначуваного елемента в пробі C . Тому між інтенсивністю випускання і концентрацією визначається елемента існує прямо пропорційна залежність:

$$I = aC \quad (1.2)$$

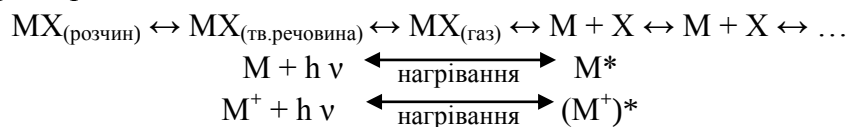
Таким чином, інтенсивність емісійної спектральної лінії може бути використана в якості аналітичного сигналу для визначення концентрації елемента. Коефіцієнт a в рівнянні (1.2) є суто емпіричною величиною, яка залежить від умов процесу. Тому в АЕС вирішальне значення має правильний вибір умов атомізації та вимірювання аналітичного сигналу, включаючи градування за зразками порівняння. Метод широко застосовується в аналітичних цілях в медичних, біологічних, геологічних, сільськогосподарських лабораторіях.

Атомізатори

Найсучасніший джерело атомізації, що володіє найкращими аналітичними можливостями та метрологічними характеристиками є **індуктивно-зв'язана плазма (ІЗП)**.

Атомізатор з індуктивно-зв'язаною плазмою представляє собою пальник з арговою плазмою, яка ініціюється іскровим зарядом і стабілізується високочастотною індукційною котушкою. Температура арговою плазми змінюється по висоті пальника і становить 6000-10000°C. При таких високих температурах збуджується більшість елементів. Чутливість методу складає 10^{-8} - 10^{-2} мас.% залежно від елемента. Відтворюваність характеристик аргового пальника висока, що дозволяє в широкому концентраційному діапазоні проводити кількісний аналіз з відтворюваністю $Sr - 0,01-0,05$. Основний фактор, що стримує застосування АЕС ІСП – дороговизна обладнання та витратних матеріалів, зокрема аргону високої чистоти, споживання якого при проведенні аналізу становить 10-30 л/хв.

Процеси в плазмі. Аналізована речовина MX потрапляє в плазму і там зазнає ряд перетворень:



M^* – збуджений стан елемента M .

На першій стадії відбувається випаровування використовованого розчинника і утворюються молекулярні форми раніше розчинених речовин в кристалічному стані. Потім відбувається процес розпаду молекул аналізованих речовин. При достатньо низьких температурах відбувається розпад молекул на атоми, при більш високих температурах може відбуватися процес іонізації утворилися атомів, а при дуже високих температурах можуть утворюватися голі ядра і електронний газ.

На стадії атомізації атомарні частинки за рахунок зіткнення один з одним, або за рахунок поглинання квантів випромінювання збуджуються.

Збудження – це перехід деяких електронів атома на більш високий енергетичний рівень.

У збудженому стані атоми живуть недовго (10^{-5} – 10^{-8} сек.), потім вони повертаються в початковий стан, випускаючи при цьому квант енергії. Цей квант енергії, що випускається збудженими атомом – і є аналітичний сигнал в АЕС.

Інтенсивність лінії в спектрі випускання може бути розрахована за рівнянням:

$$I_v^{вип.} = h \nu_{12} A_{12} N_1 \quad (1.3)$$

де h – постійна Планка,

ν_{12} – частота переходу між станами атома 1 і 2, яка пов'язана з довжиною хвилі співвідношенням: $\nu \lambda = c$ (c – швидкість світла),

A_{12} – коефіцієнт Ейнштейна, що визначає ймовірність даного переходу,

N_1 – число атомів, що знаходяться в стані 1.

У плазмі, крім зазначених основних процесів, протікають і деякі небажані процеси, що призводять до виникнення перешкод, що заважають визначенню. Найбільш типові перешкоди класифікуються наступним чином:

- перешкоди при утворенні атомної пари
- спектральні перешкоди
- іонізаційні перешкоди.

Загальні технічні характеристики ІЗП-АЕС низького тиску

В Сумському інституті прикладної фізики вперше було розроблено та проведено випробування атомно-емісійного спектрометру низького тиску з використанням постійних магнітів для підвищення ефективності іонізації атомів досліджуваного зразка і, як наслідок, підвищення інтенсивності оптичних ліній. Застосування індуктивно-зв'язаної плазми низького тиску (ІЗП НТ) у зовнішньому полі дозволяє отримати низку переваг у порівнянні з ІЗП атмосферного тиску, а саме: низький рівень витрат робочого газу і введеної у плазму ВЧ-потужності, низькі витрати проби, відсутність контакту плазми з навколишнім середовищем аналітичної лабораторії.

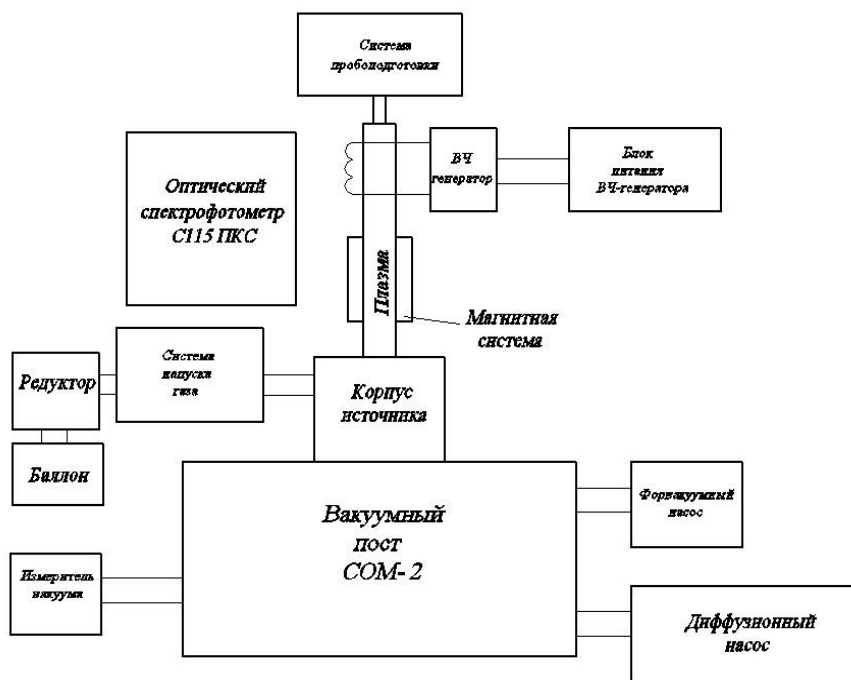


Рис. 1. Блок-схема макету ІЗП-АЕС низького тиску



Рис.2. Фотографія макету ІЗП-АЕС низького тиску

Розроблений атомно-емісійний спектрометр працює в режимах низького тиску (20 мТорр–200 мТорр), має високу щільність аргонної плазми ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$), іонну температуру на рівні 10000 К при ВЧ-потужності ($\sim 300 \text{ Вт}$). Виміри густини плазми проводилися за допомогою НВЧ-інтерферометру. Слід відмітити, що в розробленому атомно-емісійному спектрометрі витрати робочого газу (аргону або гелію) не перевищують $10 \text{ см}^3/\text{год}$.

Геліконове ВЧ-джерело плазми ІЗП-АЕС низького тиску

Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення інтенсивності оптичних ліній ІЗП-АЕС низького тиску за рахунок підвищення щільності плазми,

є передача ВЧ-енергії генератора електронам плазми в геліконовому діапазоні частот. Інтерес до геліконових розрядів викликаний їх незвичайно високим ступенем іонізації: щільність плазми досягає величини на порядок вище щільності плазми інших джерел при тому ж тиску й рівні ВЧ-потужності.

Геліконові хвилі можуть поглинатися в плазмі за рахунок зіткнень електронів з іонами і нейтральними частинками або параметричних нестабільностей. Радіальні компоненти хвильового вектора гелікона й електростатичних коливань визначаються відомими виразами:

$$k^2 = k_r^2 + k_{||}^2 = \frac{\omega_{pe}^4 \omega^2}{\omega_{ce}^2 k_{||}^2 c^4}, (\omega_{pe}^2 \gg \omega_{ce}^2 \gg \omega^2),$$

$$k_r^2 = k_{||}^2 \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{1 + \omega_{ce}^2 / \omega_{pe}^2} \left(1 - \omega_{LH}^2 / \omega^2 \right) \right),$$

де $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e}$ – ленгмюрівська частота електронів,

$\omega_{LH}^2 = \omega_{ce} \omega_{ci} / (1 + \omega_{ce}^2 / \omega_{pe}^2)$, – частота нижньогібридного резонансу,

k_r – радіальна і $k_{||}$ – поздовжна складові хвильового вектора.

Гелікон може поширюватися ($k_r^2 > 0$) у щільній плазмі при $\omega_{pe}^2 > (\omega_{ce} / \omega) k_{||}^2 c^2$.

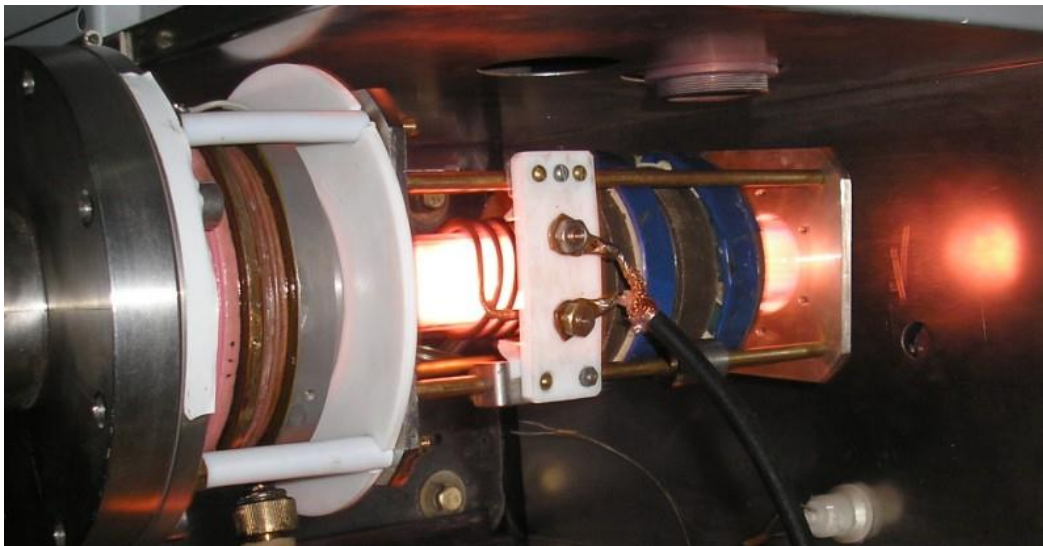


Рис.3. Фотографія геліконового ВЧ-джерела

У ІФ НАН України проводяться комплексні дослідження, спрямовані на вирішення задачі підвищення щільності плазми.

Зокрема:

а) теоретичні розрахунки ефективності введення ВЧ-потужності в плазму геліконового джерела іонів;

б) створення плазмових генераторів з високою щільністю плазми;
в) вимір щільності плазми за допомогою інтерферометричного методу та зонду Ленгмюра.

Основні характеристики джерела плазми:

- | | |
|---|-----------------------------|
| • щільність плазми | 10^{13} см^{-3} ; |
| • залишковий тиск газу в джерелі | 10^{-6} Torr ; |
| • робочий тиск газу в джерелі | 20–200 мТорр; |
| • робоча частота ВЧ-генератора | 27 МГц; |
| • рівень ВЧ-потужності підведеної до ВЧ-джерела | 40 – 200 Вт. |

Спосіб введення проби

Однією з переваг емісійної спектроскопії перед іншими методами є можливість проведення експресного одночасного елементного аналізу. В останнє десятиліття даний метод аналізу інтенсивно розвивався як у напрямку застосування джерел спектрів на основі індуктивно-зв'язаної плазми атмосферного тиску[22], так і індуктивно-зв'язаної плазми низького тиску [12-18].

Основні переваги ІЗП-АЕС НТ перед іншими методами елементного аналізу речовини:

- можливість (регулюючи параметри плазми) аналізувати різні речовини (тверді, рідкі, газоподібні);
- завдяки безелектродному розряду в інертному газі можна застосовувати спектрально чисті гази і тверді зразки;
- економічність.

Основними проблемами які виникають при роботі ІЗП-АЕС НТ, є введення проби та визначення коефіцієнтів відносної чутливості для проведення кількісного елементного аналізу речовини. Такі ж проблеми виникають при введенні проби в плазму атмосферного тиску.

У даній роботі запропонований і випробуваний альтернативний спосіб введення проби – за допомогою травлення зразка в плазмі геліконового розряду (рис. 4.1).

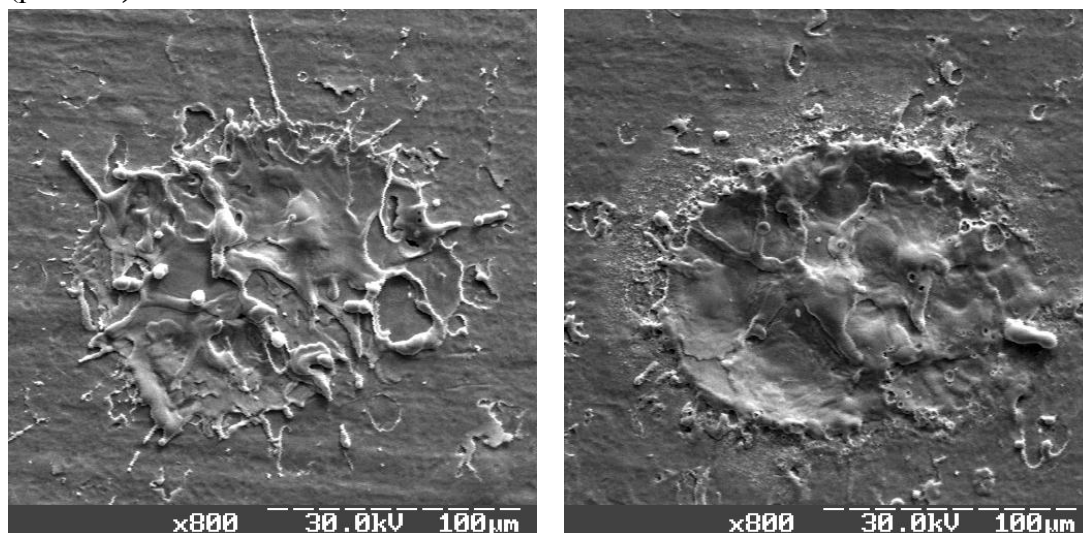


Рис. 4. Фотографія зразка до (а) і після(б) травлення в плазмі геліконового розряду

Слід зазначити, що для точного кількісного елементного аналізу речовини (на рівні декількох ppm) для калібрування необхідно використовувати додаткові способи введення проби, або рідкої проби, або проби після лазерного випаровування.

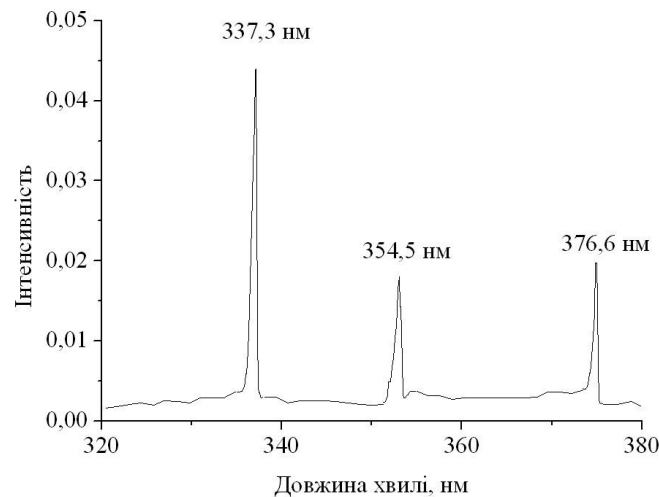


Рис.5. Оптичний спектр аргонної плазми

Методика і результати експерименту

Спочатку реєструвався спектр чистого аргону (транспортуючого газу) в оптичному діапазоні 250 – 400 нм. Оптичний спектр представлений на рис. 5. Тиск у джерелі аргонної плазми підтримувався на рівні 30 мТорр.

Потім у плазму подавалися модельні проби чистого цирконію Zr(<99%) і сплаву міді з цирконієм CuZr (зміст Cu – 98%, Zr – 2%). Записували спектр в оптичному діапазоні 190 – 800 нм. Усі спектри були записані при спостереженні випромінювання поперек плазмового стовпа в каспі магнітного поля. Як видно з рис. 6 – в каспі магнітного поля інтенсивність світіння найбільш висока.

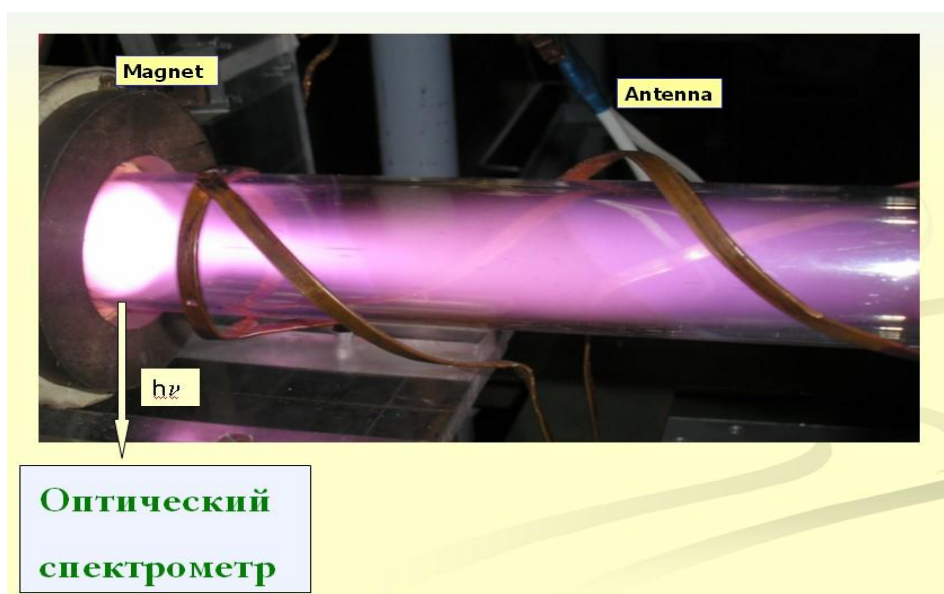


Рис.6. Фотографія геліконового розряду в економному режимі (Рвч~20Вт)

Результати експериментів представлені на рис. 7 і 8. Довжини хвиль оптичних ліній спектра й обмірювані інтенсивності представлені в таблицях 1 і 2, відповідно.

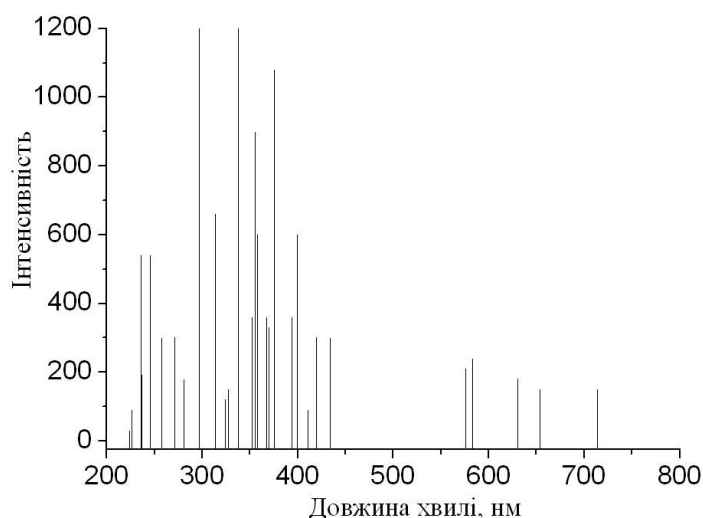


Рис 7. Оптичний спектр сплаву міді з цирконієм

Таблиця 1.

Довжини хвиль оптичних ліній спектра й обмірювані інтенсивності для сплава міді з цирконієм

<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>	<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>
223.6	30	357.6	600
226.6	90	367.0	360
235.7	540	370.0	330
236.6	192	375.0	1080
245.8	540	393.6	360
257.2	300	399.6	600
271.1	300	411.0	90
281.2	180	414.9	300
296.7	1200	434.2	300
313.8	660	576.0	210
324.4	120	582.8	240
327.4	150	630.7	180
337.3	1200	653.4	150

<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>	<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>
351.9	360	714.2	150
355.6	900		

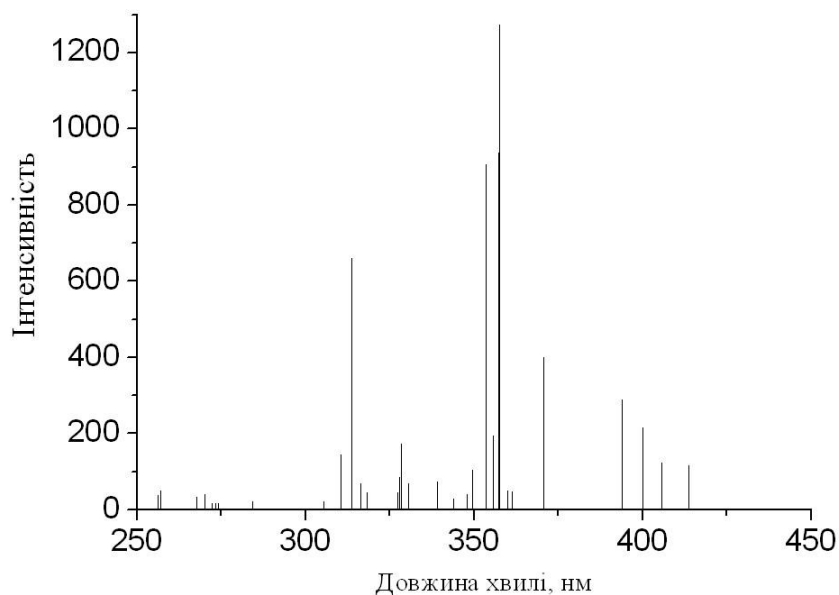


Рис 8. Оптичний спектр цирконію в аргонівій плазмі

Таблиця 2.

Довжини хвиль оптичних ліній спектра й обмірювані інтенсивності для чистого цирконія

<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>	<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>
256.3	38	339.1	74
257.1	51	343.8	30
267.8	34	348.1	42
270.0	41	349.6	105
272.2	16	353.5	906
273.4	16	355.6	196
274.2	16	357.2	937
284.4	22	357.6	1272
305.4	22	360.1	50

<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>	<i>Довжина хвилі, нм</i>	<i>Інтенсивність</i>
310.6	145	361.3	47
313.8	660	370.7	400
316.5	70	394.0	288
318.2	45	400.0	216
327.3	45	405.6	125
327.9	85	413.8	116
328.4	173	483.6	53
330.6	68		

Важливою перевагою АЕС у порівнянні з іншими оптичними спектральними, а також багатьма хімічними та фізико-хімічними методами аналізу є можливості безконтактного, експресного, одночасно кількісного визначення великої кількості елементів у широкому інтервалі концентрації з прийнятною точністю при використанні малої маси проби.

Процес атомно-емісійного спектрального аналізу складається з наступних основних ланок:

- пробопідготовка;
- збудження випромінювання атомів і іонів елементів проби;
- розкладання збудженого випромінювання в спектр;
- реєстрація спектра;
- ідентифікація спектральних ліній – з метою встановлення елементного складу проби (якісний аналіз);
- вимір інтенсивності аналітичних ліній елементів проби, що підлягають кількісному визначенню;
- знаходження кількісного змісту елементів за допомогою встановлених попередньо градуйованих залежностей.

Інтенсивність спектральної лінії аналізованого елемента, крім концентрації, залежить від великої кількості різних факторів. З цієї причини розрахувати теоретично зв'язок між інтенсивністю лінії та концентрацією відповідного елемента неможливо. От чому для проведення аналізу необхідні стандартні зразки, близькі по складу до аналізованої проби. Попередньо ці стандартні зразки експонуються (пропалюються) на приладі. За результатами цих прожигів для кожного аналізованого елемента будується градуйований графік, тобто залежність інтенсивності спектральної лінії елемента від його концентрації. Згодом, при проведенні аналізу проб по цих градуйованих графіках і проводиться перерахування виміряних інтенсивностей у концентрації. Стандартні зразки – це зразки з відомим елементним складом. Вони необхідні для

градування оптичного емісійного спектрометра. Стандартні зразки, як правило, випускаються комплектами; до кожного комплекту обов'язково повинен бути прикладений паспорт, у якому наведені концентрації всіх елементів і похибок, з якими ці концентрації визначені.

Висновок

Розроблений атомно-емісійний спектрометр працює в режимах низького тиску (20 мТорр – 200 мТорр), має високу щільність аргонної плазми ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$), іонну температуру на рівні 10000 К при ВЧ-потужності ($\sim 300 \text{ Вт}$). Виміри густини плазми проводилися за допомогою НВЧ-інтерферометру. Слід відмітити, що в розробленому атомно-емісійному спектрометрі витрати робочого газу (аргону або гелію) не перевищують $10 \text{ см}^3/\text{годину}$.

Виготовлено та випробувано геліконове ВЧ-джерело плазми з компактною магнітною системою з постійними магнітами для застосування в ІЗП-АЕС низького тиску. Застосування магнітної системи з постійними магнітами дозволило підвищити економічність джерела плазми ІЗП-АЕС, зокрема знизити ВЧ-потужність та знизити витрати робочого газу в декілька разів для забезпечення тих же аналітичних характеристик приладу.

Проведені дослідження впливу неоднорідності магнітного поля на характеристики геліконового плазмового джерела на основі самоузгодженої дворідної моделі. Для аналізу ефективності введення ВЧ-потужності у ВЧ-джерело плазми використовувався чисельний код, що дозволяє обчислювати розподіл електричних і магнітних ВЧ-полів, а також розподіл потужності, що поглинається у плазмі ВЧ-джерела за рахунок процесів зіткнення. Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок про те, що при наявності зовнішнього неоднорідного магнітного поля істотно змінюються механізми поглинання ВЧ-потужності в плазмі ВЧ-джерела. При введенні магнітного поля максимум енерговнеску переміщується в центр розрядної камери, що сприяє більш ефективній іонізації і підвищенню густини плазми в області реєстрації спектру.

При виконання НДР була проведена модернізація діагностичної установки для вивчення фізичних процесів та діагностики плазмових ВЧ-джерел. Була змінена система збору та обробки даних, вакуумна система і високочастотна система, проведена модернізація НВЧ-інтерферометра.

Запропонований і випробуваний альтернативний спосіб введення проби – за допомогою травлення зразка в плазмі геліконового розряду

Експеримент показав, що аналітичний сигнал з розробленого ІЗП-АЕС НТ з магнітним полем запропонованої конфігурації, створеного системою постійних магнітів, достатній для аналізу та ідентифікації оптичного спектра. До переваг розробленого приладу слід віднести те, що мала інтенсивність атомних оптичних ліній збудження по відношенню до іонних, дозволяє більш просто і точно ідентифікувати оптичні спектри.

Проведені виміри оптичного спектру цирконію та сплаву мідь-цирконій. Порівняння експериментальних даних для чистого цирконію з табличними

даними для високоінтенсивних іонних емісійних ліній дає підставу стверджувати, що в розробленому ІЗП-АЕС НТ з магнітним полем запропонованої конфігурації, створеного системою постійних магнітів, іонна емісія превалює над атомною. Даний факт можна пояснити високим ступенем іонізації проби в плазмі геліконового розряду.

Був проведений елементний аналіз цих зразків методом ХРВ (характеристичного рентгенівського випромінювання). Результати експериментів підтвердили, що в першому випадку був досліджений чистий цирконій Zr(<99%), у другому - сплав міді з цирконієм CuZr (зміст Cu - 98%, Zr -2%).

Література

1. L.W. Swanson, Nucl. Instr. And Meth. 218(1983) 347.
2. S. Kalbitzer, Nucl. Instr. And Meth B158 (1999) 53.
3. A. van Steenberg, IEEE Trans. Nucl. Sci. (1965) 745.
4. C.D.Child, Phys.Rev. 32(1911) 492.
5. I.Langmuir and K.T.Compton, Rev.Mod. Phys. 3(1931).
6. R.W Boswell. and R K Porteous, Appl. Phys. Lett. 50(1987) 1130.
7. F. F. Chen, I.D. Sudit and M Light, Plasma Sources Sci. Technol. 5 (1996) 173.
8. K. P. Shamrai and V. B. Taranov, Plasma Phys. Control. Fusion 36 (1994) 1717.
9. A. I. Akhiezer, V. S. Mikhaleiko, K. N. Stepanov Phys. Lett. A 245(1998) 117.
10. V.L. Ginzburg, A.A. Ruchadze. Waves in Magnetoactive Plasma Nauka, M. 1975 (in Russian), Handbuch der Physik 49/4, 395, 1972 (English Edition).

О.М. Завражна, О.М. Лобас

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

zavragna@gmail.com, lobas2006@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Слово «модель» походить від латинського слова «modulus», означає «міра», «зразок». Його первинне значення було пов'язане з будівельним мистецтвом, і майже у всіх європейських мовах воно вживалося для позначення образу або прообразу, або речі, подібною в якомусь відношенні з іншою річчю.

Моделювання у наукових дослідженнях стало застосовуватися ще в глибоку давнину і поступово захоплювало все нові області наукових знань: технічне конструювання, будівництво і архітектуру, астрономію, фізику, хімію, біологію і, нарешті, громадські науки. Великі успіхи й визнання практично у всіх галузях сучасної науки принесло методу моделювання ХХ століття. Проте методологія моделювання довгий час розвивалася окремими науками незалежно один від одного. Була відсутня єдина система понять, єдина термінологія. Лише поступово стала усвідомлюватись роль моделювання як універсального методу наукового пізнання.

Таким чином, моделювання виступає невід'ємною частиною будь-якої цілеспрямованої діяльності, одним з основних способів пізнання.

Принцип моделювання у навчанні електрорадіотехніки означає, по-перше, вивчення змісту курсу електротехніки з модельної точки зору, по-друге, широке використання моделей як зовнішніх орієнтирів для розвитку науково-теоретичного стилю мислення.

Важливим моментом при формуванні понять з електротехніки є використання динамічної наочності, яка реалізується через використання програмних засобів, що спрощують усвідомлення змісту нового поняття, сприяють розвитку образного мислення та формуванню просторових уявлень.

При розробці сучасного радіотехнічного устаткування зважаючи на складність і об'ємності виконуваних робіт неможливо обійтися без комп'ютерних методів розробки. Існуючі на сьогоднішній день пакети програм САПР електронної апаратури можна умовно розділити на два класи по можливостям застосування і вимогам, що пред'являються до користувача і ПК. Прикладами перших є професійні пакети розробників апаратури типу ACCEL, EDA і ORCAD, других - навчальні пакети Electronics Workbench і Micro-Cap, засновані на моделях, що створюються на мові SPice.

Ми використовуємо в своїй роботі Electronics Workbench, тому що ця програма має ряд переваг:

- може застосовуватися як заміна дорогого устаткування;

- може робити велику кількість аналізів радіоелектронних пристроїв, що займають досить багато часу при стандартних методах розробки;
- містить у собі велику кількість моделей радіоелектронних пристроїв найбільш відомих виробників, таких як Motorola;
- є простою у використанні і не вимагає глибоких знань у комп'ютерній техніці;
- її можна освоїти буквально за кілька годин роботи;
- може працювати з великою кількістю комп'ютерної периферії, а також імітувати її роботу;
- на даний момент не має собі аналогів по простоті інтерфейсу і кількості виконуваних функцій.

Як приклад, розглянемо лабораторну роботу «Дослідження однофазних трансформаторів».

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методикою побудови схем і моделювання роботи пристроїв у комп'ютерній лабораторії електротехніки та електроніки.
2. Дослідження роботи однофазного трансформатора.

Порядок виконання роботи.

1. Моделювання схеми дослідження холостого ходу трансформатора.

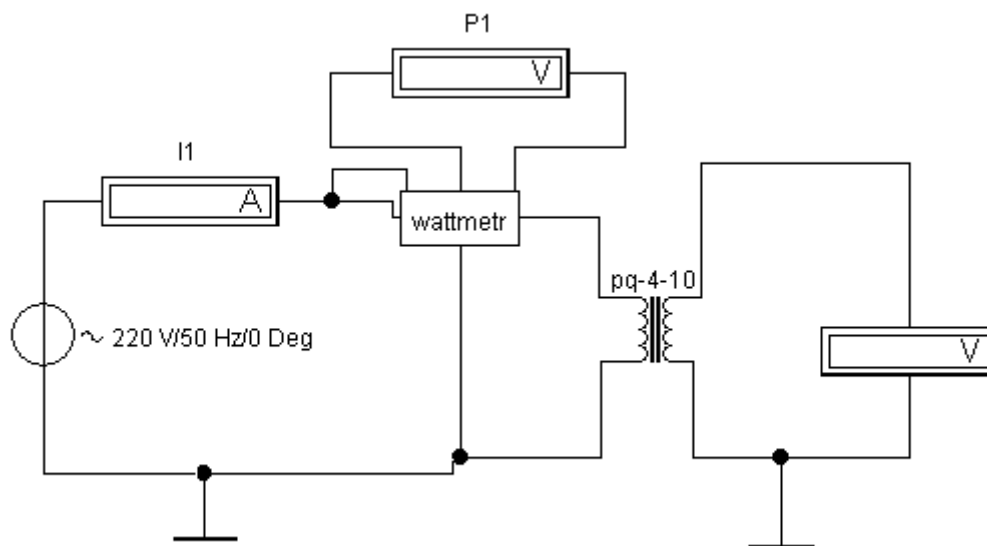
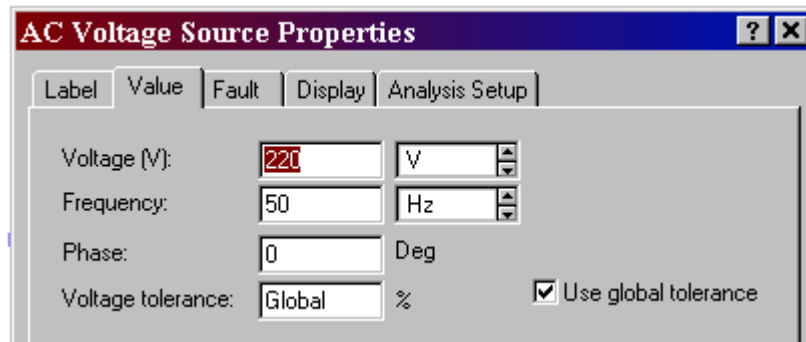


Рис.1.

Методика проведення дослідження холостого ходу трансформатора.

Для вимірювання параметрів холостого ходу трансформатора необхідно встановити номінальну напругу живлення $U_{1н} = 220\text{В}$ в діалоговому вікні джерела живлення, яке відкриваємо за допомогою правої кнопки миші.



Натиснувши в правому верхньому куті клавішу , отримуємо показання приладів і записуємо у відповідну таблицю.

Вимірювання				Розрахунок			
$U_{1н}, В$	$I_{1х}, А$	$P_x, Вт$	$U_{2х}, В$	K	$Z_x, Ом$	$R_x, Ом$	$X_x, Ом$

Розрахунок параметрів проводиться за відомими формулами

$$\frac{U_{1н}}{U_{2х}} = k; \quad Z_x = \frac{U_{1н}}{I_{1х}}; \quad R_x = \frac{P_x}{I_{1х}^2}; \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}.$$

2. Моделювання схеми дослідження короткого замикання трансформатора.

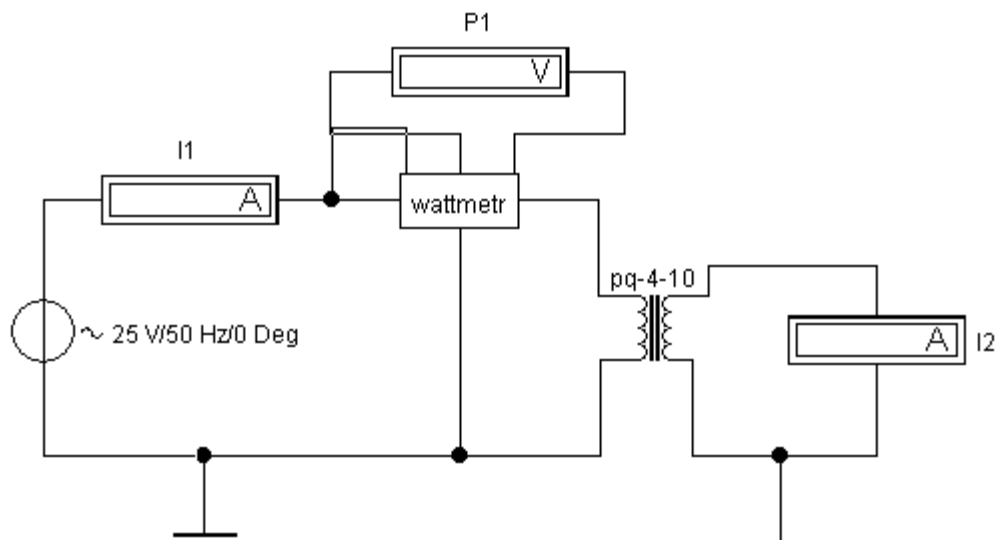
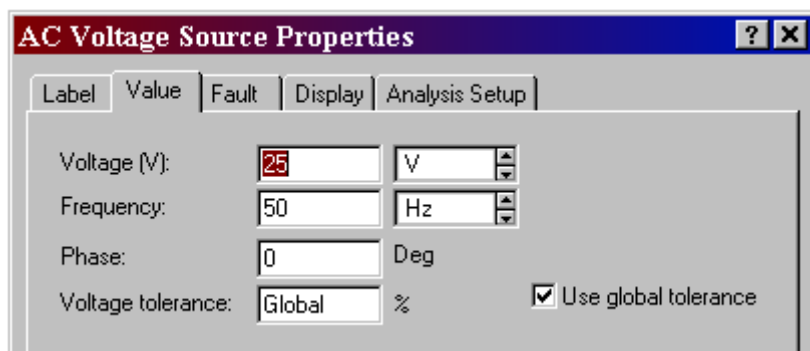


Рис.2

Методика проведення дослідження короткого замикання трансформатора.

Для вимірювання параметрів короткого замикання трансформатора необхідно встановити напругу живлення, при якій струм в первинній та вторинній обмотках трансформатора був би номінальним, приблизно $U_{1к}=25В$ за допомогою

діалогового вікна джерела живлення, яке відкриваємо за допомогою правої кнопки миші.



Натиснувши в правому верхньому куті клавішу , отримуємо показання приладів і записуємо у відповідну таблицю.

Вимірювання				Розрахунок			
$U_{1K}, \text{В}$	$I_{1H}, \text{А}$	$P_K, \text{Вт}$	$I_{2H}, \text{А}$	K	$Z_K, \text{Ом}$	$R_K, \text{Ом}$	$X_K, \text{Ом}$

Розрахунок параметрів проводиться за відомими формулами

$$\frac{I_{2H}}{I_{1H}} = K; \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}}; \quad R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

3. Моделювання схеми досліду навантаження трансформатора.

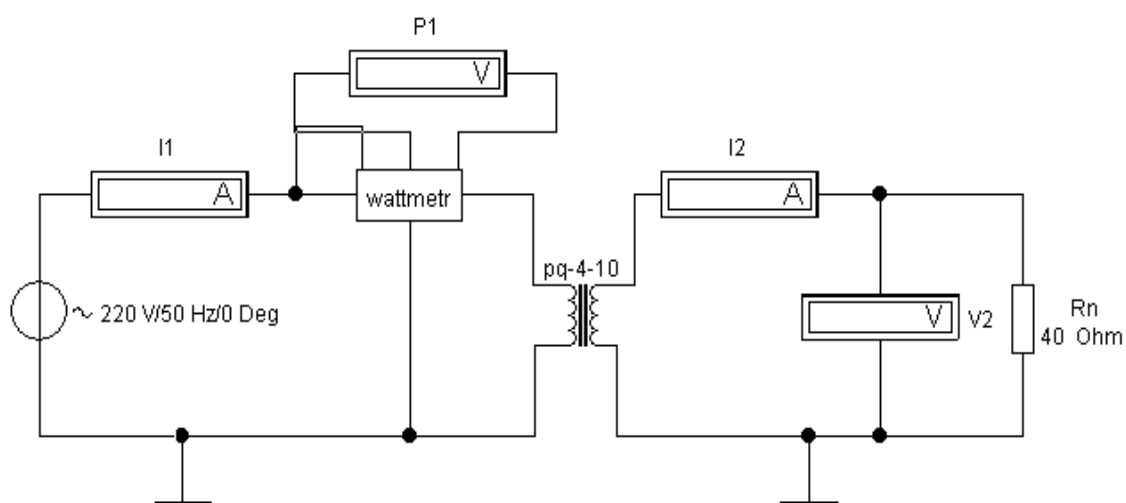
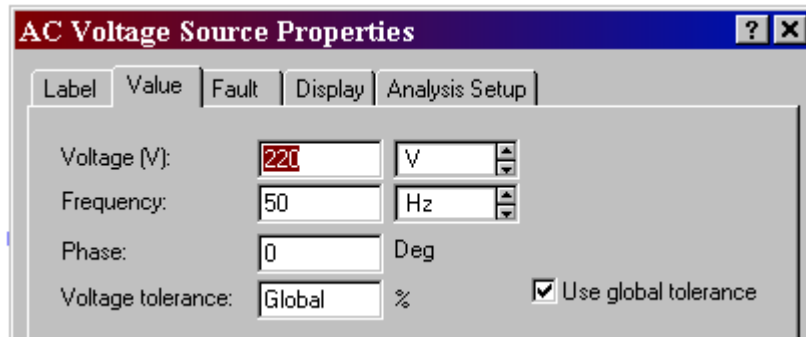


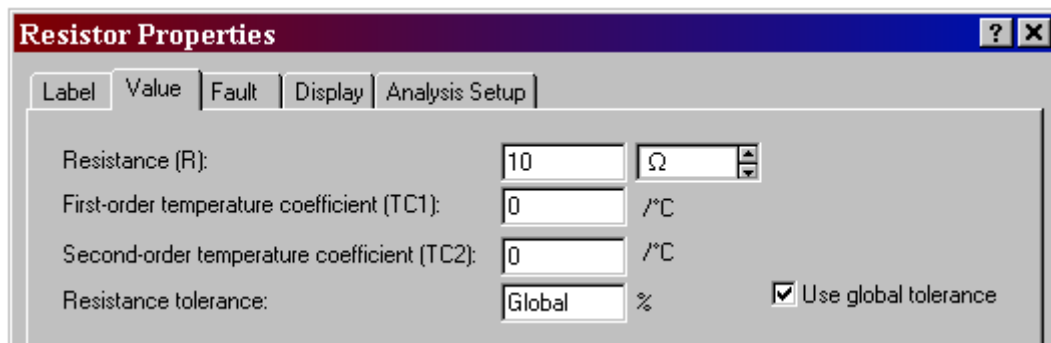
Рис.3

Методика проведення досвіду навантаження трансформатора.

Для вимірювання параметрів при навантаженні трансформатора необхідно встановити номінальну напругу живлення $U_{1н} = 220В$ в діалоговому вікні джерела живлення, яке відкриваємо за допомогою правої кнопки миші.



Далі, змінюємо опір навантаження R_n за допомогою діалогового вікна резисторів, так, щоб струм навантаження не перевищував $2I_{2н}$.



Натиснувши в правому верхньому куті клавішу , отримуємо показання приладів і записуємо у відповідну таблицю. Таким чином проводиться не менше п'яти вимірювань.

№ п/п	Вимірювання					Розрахунок	
	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$P_2, Вт$	$\eta, \%$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

Розрахунок потужності на навантаженні P_2 і коефіцієнта корисної дії трансформатора проводимо по отриманих вимірюваннях

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2; \quad \eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100.$$

1. Побудова зовнішньої характеристики трансформатора $U_2=f(I_2)$ і коефіцієнта корисної дії η (%) = $f(I_2)$.

Підсумовуючи викладене, зазначимо, що вивчення спеціалізованого програмного забезпечення є одним з аспектів фахової підготовки майбутніх вчителів фізики до викладацької та науково-дослідницької роботи. Комплексне застосування традиційних та інформаційних технологій навчання сприяє активізації пізнавальної діяльності студентів, формуванню їх інформаційно-комунікаційної компетентності.

Література

1. Евсюков А.А. Электротехника: Учеб. Пособие для студентов физ. спец. пед. ин.-тов. – М.: Просвещение, 1979. –248с.
2. Цапенко Н.В. Методика преподавания электротехнических дисциплин: Учебное пособие / В.Н. Цапенко, О.В. Филимонова. – Самара, СамГТУ, 2009. –140 с.
3. Electronics Workbench [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://ewb.narod.ru/index.htm>

Анотація. Завражна О.М., Лобас О.М. Використання комп'ютерного моделювання при вивченні електротехніки. У роботі розглянуто використання інформаційних технологій при викладанні курсу електротехніки.

Аннотация. Завражная Е.Н., Лобас Е.Н. Использование компьютерного моделирования при изучении электротехники. В работе рассмотрено использование информационных технологий при изучении курса электротехники.

К.В. Квашко

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ

В еру високих темпів розвитку технології необхідна об'єктивна інформація, що дає уявлення про найбільш перспективні напрями створення нових матеріалів. Роботи із створення високорентабельного виробництва в різних галузях (машинобудування, літакобудування, виробництво металів і пластиків) вимагають комплексної постановки унікальних організаційних задач. Для вирішення цих задач необхідне залучення цілого ряду наукових дисциплін, що включають фізичні науки і технологічні розробки. Тому дослідження електричних властивостей діелектриків, зокрема полімерних, має велике значення для різних галузей радіоелектроніки та електротехніки. Фізичні методи модифікації структури і властивостей полімерних діелектриків розширюють границі їх використання.

Мета роботи полягає в дослідженні електричних властивостей полімерного композиційного матеріалу на основі фторопласту, наповненого залізом, а саме знаходження залежності вольт-амперної характеристики від масової частки заліза і дослідження вольт-амперної характеристики при різних температурах.

Завдання до роботи:

- ознайомитися зі структурою композитів, їх видами та електричними властивостями;
- виготовити зразки із різним вмістом армуючого компоненту(заліза);
- ознайомитися і навчитися працювати зі схемою для зняття ВАХ;
- дослідити ВАХ виготовленого полімерного композиту при різних температурах;
- опрацювати отримані результати.

Методи дослідження. У даній роботі був використаний метод вимірювання електричних властивостей композиційних матеріалів і метод кристалізації з розплаву для виготовлення досліджуваних зразків, методи розрахунку похибок вимірювань, а також методи аналітичного вивчення стану досліджуваної проблеми на основі відомих наукових джерел.

Теоретичне значення у дослідженні електричних властивостей полімеру, зокрема вольт-амперної характеристики, полягає в тому, що полівініліденфторид є мало дослідженим матеріалом, особливістю структури якого є можливість існування у трьох кристалічних α , β і γ – модифікаціях і раніше такі досліді практично не проводились.

Практичне значення даної роботи полягає у тому, що полівініліденфторид використовують в якості електроізоляційних матеріалів, електретів а також в

хімічній промисловості, тому дослідження електричних властивостей дасть багато корисної інформації, щодо використання досліджуваного об'єкта в цих галузях.

Методика експерименту

Об'єктом дослідження було обрано полімер – полівініліденфторид $[CF_2 - CH_2]_n$, який має ще іншу назву – фторопласт-2 і фторопласт-2М (модифікований ПВДФ), густина аморфного ПВДФ дорівнює $1,55 \text{ г/см}^3$, а густина кристалічного коливається в залежності від форми кристалу від $1,731$ до $1,784 \text{ г/см}^3$ [19].

Невисока в'язкість розплаву ПВДФ дозволяє переробляти цей полімер звичайним для термопластів способом. Об'єктами дослідження були композиції, виготовлені на основі кристалічної речовини Ф2 з додаванням дрібнодисперсного заліза з такими його масовими частками: 1%Fe, 5%Fe, 10%Fe, 40%Fe, 70%Fe. Досліджувані композитні речовини були виготовлені шляхом механічного змішування.



Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваних зразків

ПВДФ характеризується високим значенням діелектричної проникності, електричної міцності при збільшенні тангенса кута діелектричних втрат і хорошим об'ємним відносним електричним опором. Електричні властивості залежать від зміни температури і частоти. Лінійні розміри виготовлених зразків: діаметр – $1,965 \pm 0,01 \text{ см}$, висота – $0,135 \pm 0,02 \text{ см}$ [4].

Дослідження електричних властивостей вибраних зразків, а зокрема зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ) і температурної вольт-амперної характеристики проводиться за допомогою схеми зібраної наступним чином:

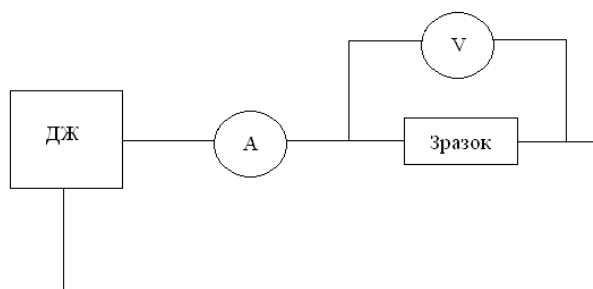


Рис.2. Блок-схема для зняття ВАХ: ДЖ - джерело живлення ВС-24М; А – мікроамперметр; V – вольтметр; Зразок – електроди між якими знаходиться досліджуваний зразок

Експеримент

Були отримані такі результати при знятті вольт-амперної характеристики виготовлених зразків при кімнатній температурі:

Таблиця 1

Параметри зняті при експерименті

U	I	I	I	I	I
В	мкА	мкА	мкА	мкА	мА
	Вміст Fe 1%	Вміст Fe 5%	Вміст Fe 10%	Вміст Fe 40%	Вміст Fe 70%
0	0	0	0	0	0
4,08	4	4	4	20	35
8,25	9	9	9	45	150
12,42	11	11	11	78	290
16,42	17	17	18	109	900
20,5	20	20	20	139	1300
24,2	23	22	24	170	1700
28,1	29	29	29	215	50000
32,3	31	31	31	250	600000
34,4	33	33	34	270	--

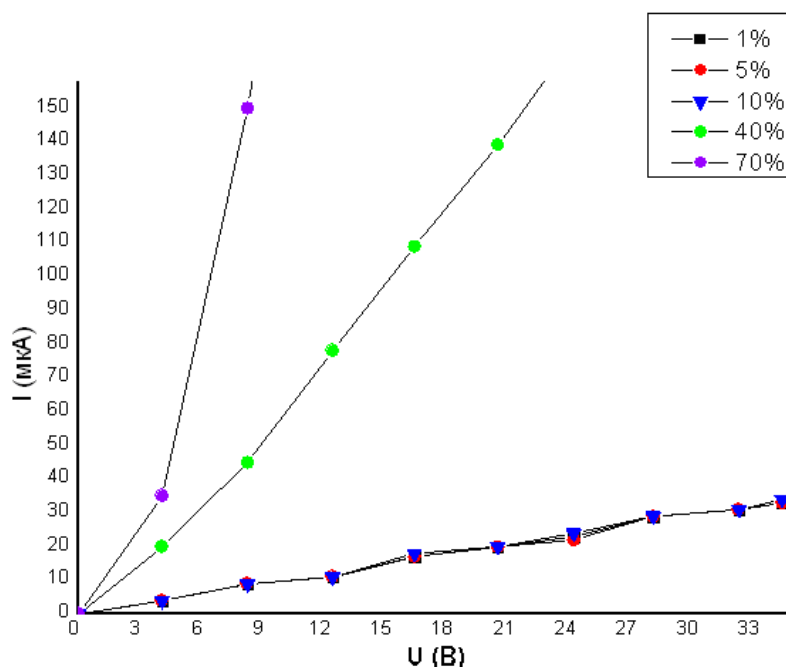


Рис.3. Залежність сили струму від прикладеної напруги для зразків з різним вмістом заліза

Як бачимо з рис.3. залежність сили струму від напруги для зразків з масовими частками заліза 1%,5%,10% лежать, майже, на одній прямій, це пояснюється тим, що масова частка армуючого компоненту мала і мало відрізняється для даних зразків, але вже при збільшенні вмісту заліза до 40%, ВАХ відрізняється і сила струму більша при тій самій напрузі, а вже при вмісті 70% сила струму зростає дуже швидко, це пояснюється тим, що за такої масової частки заліза при збільшенні прикладеної напруги між електродами, швидкість генерації вільних носіїв заряду у полімерному зразку різко зростає і вони починають рухатися по каналах, що утворюються між границями дотику частинок заліза в результаті теплового руху макромолекул фторопласту, завдяки цьому провідність полімеру збільшується, опір становиться меншим і сила струму зростає швидше ніж для зразків із меншим вмістом заліза [4].

Висновки

Залежність сили струму від прикладеної напруги має нелінійний характер, причому сила струму зростає зі збільшенням масової частки заліза в полімерному композиті.

Досліджувані зразки мають опір, який скачками змінюється при збільшенні температури, що зумовлено порушенням металічних контактів між частинками наповнювача.

Встановлено, що для зразків полівініліденфториду, який містив 40% і 70% заліза величина електричного опору спадає при збільшенні температури до 150⁰С, що, можливо, пов'язане з релаксацією напруг у композиційному матеріалі та виникненням значного усадження зразків.

Література

1. Баронин Г.С., Кербер М.Л., Физико-химические основы переработки полимеров в изделия для машин и оборудования. – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 115с.
2. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В., Курс физики полимеров. – Л.: Химия, 1976. – С. 252-254.
3. Берлин А., Современные полимерные композиционные материалы (ПМК). – Соросовский Образовательный Журнал. – 1995. – № 1. – С. 57-65.
4. Блайт Є.Р., Блур Д., Электрические свойства полимеров. Пер. с англ – Д.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
5. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник. Пер. с англ. – М Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – С.207-210, ил (Серия «Карманный справочник»).
6. Вонсонский С.В., Магнетизм.– М.: Наука, 1971. – 1032 с.
7. Добавки к полимерам. Справочник, Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер, Перевод с англ. 6-го изд. (Plastic Additives Handbook), под. ред. В.Б. Узденского, А.О. Григорова, 2010. – 144 с.

УДК 539.216

В.О. Кравченко, В.Б. Лобода*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка*

ВПЛИВ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПЛІВКОВИХ СПЛАВІВ CoNi

1. Вступ

Вивчення фізичних властивостей тонких металевих плівок зумовлене як можливістю одержання результатів, що сприяли б розв'язанню ряду фундаментальних проблем фізики твердого тіла, так і перспективами їх практичного застосування. В останні роки значна увага приділяється вивченню тонких магнітних плівок, що викликане низкою їх унікальних властивостей, зокрема, відкриттям явища гігантського магнітоопору в багатошарових плівкових структурах і його застосуванням для розробки пристроїв мікроелектроніки.

Поряд зі створенням плівок чистих металів перспективним напрямком є одержання магнітних плівок та багатошарових систем на основі бінарних сплавів феромагнітних металів. Використання сплавів дозволяє зміною їх складу одержати матеріали з покращеними властивостями. Разом з тим проблема розробки технології одержання плівкових сплавів заданого складу, структури та із необхідними властивостями на сьогодні розв'язана лише частково. Тому проведення комплексних досліджень електрофізичних властивостей бінарних сплавів на основі феромагнітних металів і впливу на них температурної обробки та елементного складу є актуальною задачею як з фундаментальної, так і з практичної точки зору.

Дана робота присвячена дослідженню процесів, що відбуваються в процесі термообробки в плівкових сплавах CoNi в діапазоні концентрацій Co 10-90 мас.% та їх впливу на електропровідність.

2. Методика одержання та дослідження зразків

Для одержання плівкових зразків CoNi використовувався метод випаровування сплавів наперед заданого складу. Вихідним матеріалом для плівкових сплавів CoNi виступали підготовлені масивні наважки відповідного складу, виготовлені плавленням вихідних матеріалів (чисті метали) в керамічному тиглі в умовах високого вакууму з витримкою протягом 1 год при близькій до плавлення температурі для гомогенізації. Концентрація компонент змінювалася за рахунок зміни масових співвідношень металів (відносна похибка визначення маси не гірша за 5%).

Для конденсації тонких плівок сплавів використовувалася стандартна вакуумна установка ВУП-5М виробництва Сумського ВАТ "Selmi" (тиск залишкової атмосфери у процесі отримання зразків 10^{-3} - 10^{-4} Па).

Плівки отримували методом електронно-променевого випаровування за допомогою електронної гармати діодного типу. Осадження плівок здійснювалося на підкладки з полірованого оптичного скла. Попередньо на підкладки були нанесені мідні контактні площадки з підшаром хрому для покращення адгезії до скла. Конструкція підкладкотримача дозволяла отримувати за один технологічний цикл напilenня чотири плівкові зразки однакового складу з різною товщиною. Геометричні розміри зразків задавалися виготовленими з високою точністю з ніхромової фольги спеціальними масками з отворами потрібної форми і розмірів.

Товщина плівок вимірювалася за допомогою мікроінтерферометра МПІ-4 з лазерним джерелом світла. Інтерференційна картина фіксувалася за допомогою цифрової фотокамери з передачею даних до комп'ютера. Товщина визначалася за скляними пластинками-"свідками", на яких за геометричними умовами осадження конденсувалася плівка найбільшої товщини. Товщину плівки, осадженої в певній точці, у випадку випаровувача з малою площею поверхні можна розрахувати за співвідношенням [1]:

$$d = d_0 \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right]^{-2}$$

де d_0 – товщина плівки-"свідка" в точці, що знаходиться над випарником;

l – відстань від середини "свідка" до точки;

h – відстань від площини випарника до площини підкладки.

Похибка вимірювання складала 5-10% для товщин 50-200 нм і 10-15% для товщин менше 50 нм.

Опір зразків у процесі конденсації та при термостабілізаційному відпалюванні визначався за допомогою цифрового вольтметра В7-23 з похибкою 0,01-0,1 Ом.

Після одержання плівки витримувалися при температурі підкладки 30 хв. Подальша термостабілізація зразків здійснювалася під час відпалювання за схемою "нагрівання – витримка при максимальній температурі – охолодження" протягом 3 циклів в інтервалі температур 300-700 К у вакуумній установці ВУП-5М. Температура в процесі відпалювання контролювалася диференціальною хромель-алюмелевою термопарою (похибка вимірювання температури не перевищувала 5 К).

Питомий опір плівки розраховувався за відомими геометричними розмірами зразків (довжиною a , шириною b та товщиною d) та опором R на основі співвідношення: $\rho = R \frac{ad}{b}$. Похибка розрахунку питомого опору в першу чергу визначалася похибкою визначення товщини.

3. Експериментальні результати та їх обговорення

Результати електронно-мікроскопічних досліджень кристалічної структури плівкових зразків з товщинами ($d=50-60$ нм) представлені на рис. 1. Невідпалені плівки (рис.1 а) всіх досліджених концентрацій компонент мають приблизно

однакову структуру – дрібні кристаліти без чіткої огранки розмірами 5-10 нм. В процесі термостабілізації спостерігається збільшення розмірів кристалітів за рахунок рекристалізаційних процесів (рис 1 б-г). Для частини кристалітів спостерігається чітка огранка, де наявні дефекти пакування (швидше за все, ростового походження). Для оцінки розмірів кристалітів у площині плівки нами проводилася статистична обробка даних мікроснімків з побудовою гістограм. Визначені на їх основі середні розміри зерен мають величину 40-60 нм.

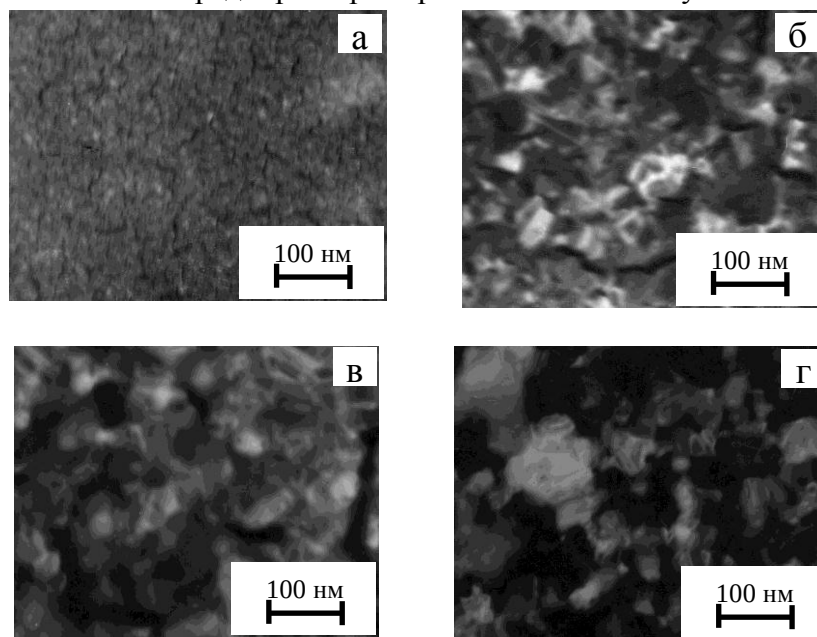


Рис. 1. Мікроструктура плівкових сплавів CoNi товщиною $d=60$ нм:
а – типова структура невідпаленої плівки ($c_{Co}=70$ мас.%); б-г – структура плівок після термостабілізації (б – $c_{Co}=10$ мас.%; в – $c_{Co}=50$ мас.%; г – $c_{Co}=90$ мас.%)

На залежностях електричного опору від температури (рис.2 б-д), одержаних у процесі нагрівання при першому циклі термообробки можна умовно виділити три ділянки. Перша з них характеризується незначною зміною (частіше за все збільшенням) опору та близьким до нуля значенням ТКО. Для плівок з малими товщинами ($d<25-30$ нм) ця ділянка не спостерігається (рис. 2 а). На другій ділянці для всіх зразків, незалежно від їх складу та товщини, відбувалося суттєве зменшення питомого опору. Як показано у роботі [1], подібний хід кривої $\rho(T)$ пов'язаний з перебудовою нерівноважної структури зразків під впливом температури. При досить великій товщині плівок (понад 50 нм) у першому циклі відпалювання спостерігається також третя ділянка, на якій проявляється типова металічна залежність $R(T)$. При переході до плівок з концентрацією понад 60-70 мас.% Co дана ділянка стає менш чітко вираженою, незначне зменшення опору спостерігається аж до максимальної температури (рис. 2 г). Зважаючи на дані електронно-мікроскопічних досліджень (рис. 1), такий хід залежності питомого опору можна пов'язати з заліковуванням дефектів кристалічної будови та проходженням рекристалізаційних процесів. Збільшення розмірів кристалітів

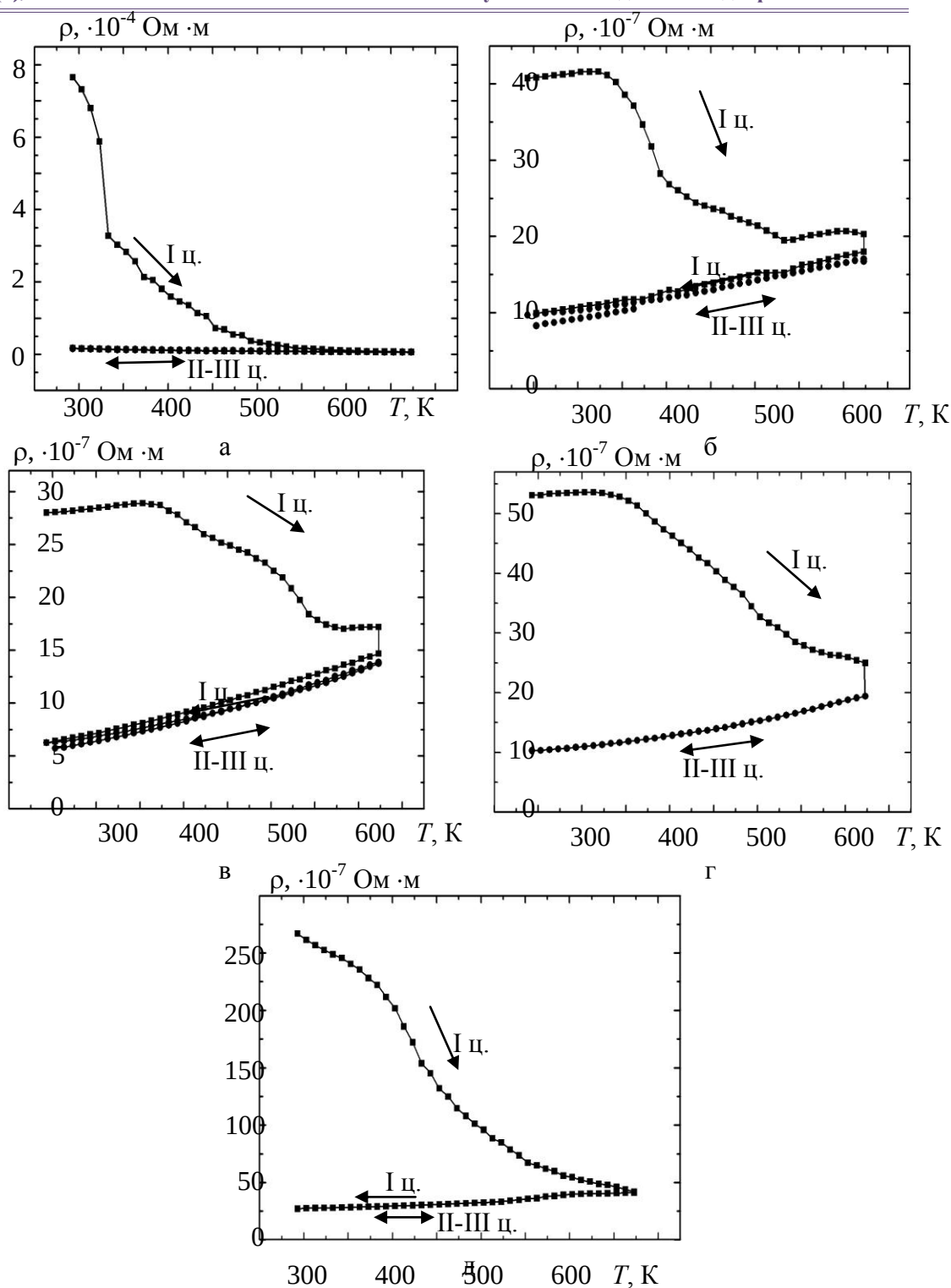


Рис. 2. Зміна питомого опору плівкових сплавів CoNi в процесі термостабілізації:
а – $\text{Co}_{20}\text{Ni}_{80}$, $d=18$ нм; б – $\text{Co}_{20}\text{Ni}_{80}$, $d=80$ нм; в – $\text{Co}_{40}\text{Ni}_{60}$, $d=54$ нм; г – $\text{Co}_{90}\text{Ni}_{10}$, $d=70$ нм;
д – $\text{Co}_{90}\text{Ni}_{10}$, $d=44$ нм

та вдосконалення структури зменшує вплив розсіювання електронів провідності на дефектах, що проявляється у зменшенні електричного опору.

Зменшення електричного опору на другій ділянці (рис. 2 б-г) для досить товстих плівок складало 3-5 разів, тоді як у випадку малих товщин питомий опір зменшувався у 10-50 разів, а в окремих випадках (для ультратонких зразків з $d < 20$ нм) мало місце його зменшення на 2-3 порядки. Відносно невелике зменшення опору у випадку товстих плівок ($d > 50$ нм), швидше за все, пов'язане з тим, що вже в процесі конденсації товстої плівки відбувається часткове автозаліковування дефектів. Для плівок товщиною понад 50 нм температура, при якій починалося зменшення опору, складала 380-400 К, для більш тонких плівок вона зменшується (зокрема, при товщинах $d \leq 25$ нм зменшення опору починалося відразу після початку відпалювання, перша ділянка відсутня). Таку її зміну можна пояснити більшою дефектністю структури тонких плівок порівняно з більш товстими, внаслідок чого процеси заліковування можуть починатися при нижчих температурах та мати меншу енергію активації E_m .

Експериментальні криві зміни питомого опору в процесі першого та другого циклів термостабілізації були використані нами для розрахунку спектру дефектів у тонких плівках сплаву CoNi за методикою, описаною в [1, 2]. Типові залежності функції розподілу дефектів $F_0(E)$ для плівок приблизно однакової товщини ($d = 60$ нм) та різним вмістом Co приведені на рис. 3 та 4. Для плівкових сплавів CoNi можна відзначити наявність структурних дефектів трьох типів з енергіями активації $E_{m1} = 0,55-0,64$ еВ, $E_{m2} = 0,73-0,75$ еВ та $E_{m3} = 0,80-0,84$ еВ. Для плівок з вмістом Co понад 80 мас.% (рис.3 б) спостерігається поява ще одного максимуму, який відповідає енергії активації 0,95-1,0 еВ. Одержані результати узгоджуються з даними для плівок чистих металів Co та Ni [2, 3] та плівкових сплавів NiCu [4].

При збільшенні товщини плівок значного зміщення максимумів не спостерігалось, однак спектр дефектів зазнає змін (рис. 4). Зразки з малою товщиною мають набагато більш дефектну структуру (рис. 4 а), причому найбільший внесок дефектів з малою енергією активації заліковування.

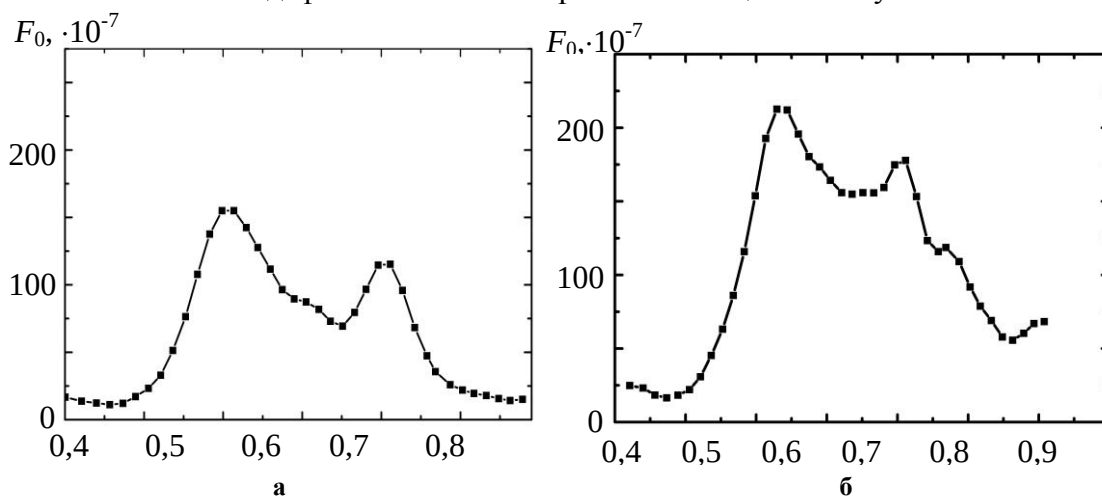


Рис. 3. Типові залежності функції розподілу дефектів $F_0(E)$ для плівок CoNi з товщиною $d = 60$ нм: а – $c_{Co} = 20$ мас.%, б – $c_{Co} = 90$ мас.%.

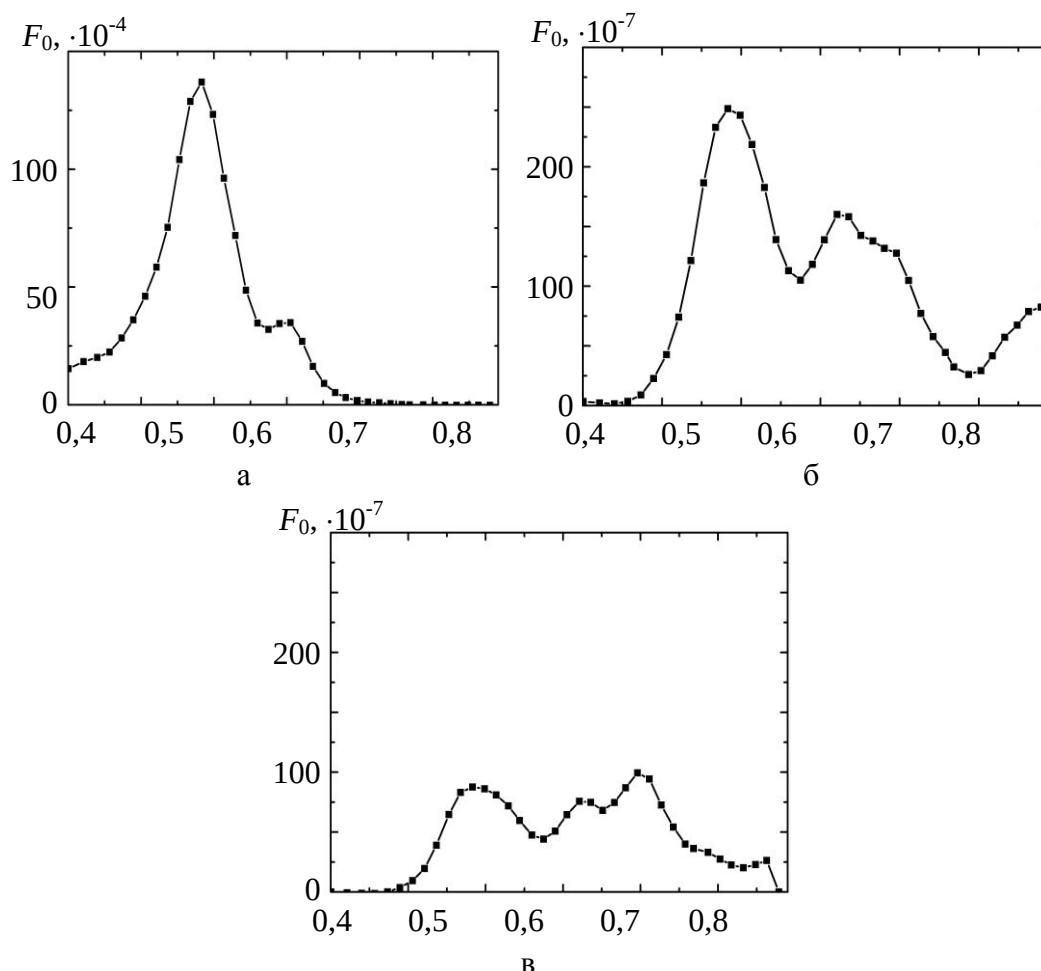


Рис. 4. Залежності функції розподілу дефектів $F_0(E)$ для плівок CoNi з вмістом Co $c_{Co}=80$ мас.%. Товщина плівок: а – $d=20$ нм, б – $d=60$ нм, в – $d=110$ нм

При збільшенні товщини плівки співвідношення внесків дефектів з різними енергіями стає співвимірним (рис. 4 б, в) при одночасному зменшенні загального числа дефектів. Цей результат пояснює причину відсутності для тонких плівок першої ділянки на залежності $\rho(T)$ для першого циклу та стрімке падіння опору на початку відпалювання. Поява декількох ділянок з різною швидкістю зменшення опору (рис. 2 б-г) під час першого циклу нагрівання відповідає збільшенню доли дефектів з більшою енергією активації заліковування. У [3] обґрунтовується думка про те, що одним з можливих типів дефектів у плівках є комбінація "вакансія - домішковий атом газу із залишкової атмосфери". Швидше за все, максимум з енергією E_{m1} відповідає саме цьому типу дефектів, причому їх внесок в загальний опір для дуже тонких плівок є визначальним через відносно великий внесок атомів приповерхневих шарів у загальне число атомів у плівці і, можливо, малі швидкості конденсації.

У більш товстих плівках приповерхневий шар, збагачений домішковими атомами газу залишкової атмосфери, менше впливає на опір плівок, а внесок інших типів дефектів, які локалізуються в об'ємі самої плівки, збільшується.

Третя ділянка, яка спостерігається при першому циклі нагріванні і на якій відбувається збільшення опору з температурою, очевидно, пов'язана з закінченням процесів рекристалізації і переходом вже у першому циклі термообробки до звичайного для металів характеру зміни опору з температурою.

У процесі охолодження першого циклу та у подальших циклах термостабілізації не відбувається суттєвих змін питомого опору, а хід залежності відтворюється з високою точністю (рис. 2 а-д).

4. Висновки

1. Проведено дослідження кристалічної структури невідпалених плівок сплаву CoNi та її зміни в процесі термообробки. Показано, що відпалювання плівок приводить до збільшення розмірів кристалітів від 5-10 нм до 40-60 нм.

2. Вивчено зміни питомого опору плівкових сплавів CoNi в ході термостабілізаційного відпалювання та встановлено їх взаємозв'язок зі змінами кристалічної структури.

3. На основі методики Венда розраховані спектри дефектів кристалічної структури невідпалених плівкових сплавів CoNi. Встановлено наявність кількох типів дефектів з енергіями активації заліковування $E_{m1}=0,55-0,64$ еВ, $E_{m2}=0,73-0,75$ еВ та $E_{m3}=0,80-0,84$ еВ та $E_{m4}=1$ еВ.

Література

1. Технология тонких пленок: справочник: в 2 т. / [под ред. Л. Майссела, Р. Гленга]. – М.: Сов. Радио, 1977. – Т. 2. – 1977. – 768 с.
2. Электрофизические свойства одно- и многослойных пленок металлов. Удельное сопротивление и тензочувствительность однослойных пленок / Л.В.Однорец, Ю.М.Овчаренко, Н.Н. Опанасюк [и др.] // Вісник Сумського державного університету. – 1996. – №1(5). – С. 9-17.
3. Черноус А.М. Розмірні ефекти в електрофізичних властивостях нанокристалічних плівкових систем в умовах взаємної дифузії та фазоутворення: дис. ... доктора фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Черноус Анатолий Миколайович. – Суми, 2005. – 334 с.
4. Хурсенко С.М. Структура, електро- та магніторезистивні властивості тонких плівок мідно-нікелевих сплавів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 01.04.07 / С.М. Хурсенко. – Суми, 2008. – 19 с.

І.О. Мороз, В.С. Іваній, Р.І. Холодов

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка,
teorfiz09@rambler.ru*

КІНЕМАТИКА ПРОЦЕСІВ РОЗПАДУ ТА ЗЛИТТЯ ЧАСТИНОК У НАВЧАЛЬНОМУ КУРСІ СТВ

При вивченні взаємодії елементарних частинок, ядерних реакцій і дослідженні радіаційного впливу на властивості речовини, типовими є задачі описання розсіяння, розпаду та з'єднання (злиття) частинок. Ґрунтуючись лише на законах збереження, можна знайти їх загальні закономірності.

1. Розпад частинок

Для того, щоб проілюструвати закони збереження енергії та імпульсу розглянемо процес розпаду однієї частинки на декілька частин. Сам механізм розпаду може бути не заданим, але опираючись на ці два закони збереження, легко можна одержати всі найбільш важливі властивості процесу.

Розглянемо частинку масою M . Система відліку, яка пов'язана із цією частинкою, одночасно являється і системою центру мас.

У цій системі її імпульс дорівнює нулю ($\vec{P} = 0$). Енергія частинки складається лише із енергії спокою $E_0 = mc^2$. Нехай частинка розпадається на N частинок із масами $m_1, m_2, \dots, m_N$. Запишемо закон збереження енергії і релятивістської маси для такого процесу:

$$E_0 = \sum_{a=1}^N \varepsilon_a, \quad (1)$$

$$M = \sum_{a=1}^N \frac{m_a}{\sqrt{1 - v_a^2/c^2}}, \quad (2)$$

де v_a і ε_a – швидкість і енергія a -ої частинки, що утворилася в результаті розпаду.

Із формули (2) явно витікає, що в релятивістській механіці не виконується закон збереження мас:

$$M \neq \sum_{a=1}^N m_a.$$

У знаменнику (2) корінь менший за одиницю, оскільки швидкості масивних частинок завжди менші швидкості світла. Отже, розпад частинки є можливим, якщо маса частинки, що розпадається, більше суми мас тих частинок, що утворюються:

$$M \geq \sum_{a=1}^N m_a,$$

при цьому величина

$$\Delta m = M - \sum_{a=1}^N m_a, \quad (3)$$

яка дорівнює різниці між масою зв'язаної системи частинок і сумою їх мас у вільному стані, називається *дефектом маси*. Це та частина маси початкової частинки, яка, в перерахуванні на енергію,

$$\Delta mc^2 = Mc^2 - \sum_{a=1}^N m_a c^2 \quad (4)$$

йде на *енергію зв'язку* частинок m_a у частинці M . Цю величину також називають *енергія розпаду*, тому що після розпаду енергія зв'язку Δmc^2 переходить у кінетичну енергію частинок, що утворюються. Якщо $\Delta m = 0$, тобто маса початкової частинки у точності дорівнює сумі мас частинок, що утворюються, то початкове тіло розпадається на нерухомі частинки. Це, так званий, *поріг реакції*. Частинка з масою, яка менша M , розпадатися на задані частинки не може.

Розглянемо найбільш простий випадок – це розпад на дві частинки. Отже, будемо вважати що в системі відліку, де частинка M була нерухома, у певний момент часу вона розпадається на дві з масами m_1 і m_2 . Знайдемо енергії цих частинок: $\varepsilon_1 - ?$, $\varepsilon_2 - ?$ Закон збереження енергії має простий вигляд

$$Mc^2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (5)$$

У вибраній системі відліку, за законом збереження імпульсу, дві частинки, що утворилися, розлітатимуться в протилежних напрямках, тобто із однаковими за модулем і протилежними за знаком імпульсами: $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$.

Із рівності квадратів імпульсів частинок та з використанням релятивістського співвідношення між енергією та імпульсом:

$$\varepsilon^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4,$$

нескладно одержати наступну рівність:

$$\varepsilon_1^2 - m_1^2 c^4 = \varepsilon_2^2 - m_2^2 c^4,$$

яку перепишемо у вигляді

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = (m_1^2 - m_2^2)c^4.$$

У лівій частині цього виразу, суму енергій, згідно з (5), замінюємо на Mc^2 , у результаті можемо записати

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{(m_1^2 - m_2^2)c^2}{M}.$$

Цей вираз, разом із законом збереження енергії (5), утворює систему рівнянь для невідомих ε_1 , ε_2 :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{(m_1^2 - m_2^2)c^2}{M} \\ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = Mc^2 \end{cases}$$

Сума і різниця цих рівнянь дає подвоєні значення шуканих енергій:

$$\varepsilon_1 = \frac{(m_1^2 - m_2^2 + M^2)c^2}{2M}, \quad \varepsilon_2 = \frac{(m_2^2 - m_1^2 + M^2)c^2}{2M}. \quad (6)$$

Корисно виконати це ж завдання, але уже в чотиривимірній коваріантній формі. При викладі законів фізики у 4-вимірному вигляді не можна розглядати окремо імпульс і енергію частинок, оскільки вони об'єднуються у єдиний 4-імпульс.

Запишемо контраваріантні 4-імпульси (індекс вгорі) вихідної частинки та продуктів її розпаду:

$$P^i = (E/c, \vec{P}), \quad p_1^i = (\varepsilon_1/c, \vec{p}_1), \quad p_2^i = (\varepsilon_2/c, \vec{p}_2).$$

З урахуванням вибору системи відліку, у якій початкова частинка нерухома, її 4-імпульс дорівнює:

$$P^i = (Mc, 0).$$

Для 4-вимірних імпульсів виконується закон збереження, який стверджує: *сумарний 4-вимірний імпульс замкнутої системи не змінюється.*

$$\sum_a (p^i)_a = \text{const}. \quad (7)$$

Нульова компонента цього закону відповідає закону збереження енергії, а просторові компоненти відповідають закону збереження імпульсу. У випадку, який ми розглядаємо, закон збереження 4-імпульсу в контраваріантній формі має вигляд

$$P^i = p_1^i + p_2^i. \quad (8)$$

Звідси виразимо 4-імпульс 2-ої частинки

$$p_2^i = P^i - p_1^i. \quad (9)$$

У коваріантній формі матимемо такий же вираз, але з нижніми індексами

$$p_{2i} = P_i - p_{1i}. \quad (10)$$

Перемножимо вирази (9) і (10) та розкриємо дужки. Врахуємо також, що $A_i B^i = A^i B_i$:

$$p_{2i} p_2^i = (P_i - p_{1i})(P^i - p_1^i) = P_i P^i - 2p_{1i} P^i + p_{1i} p_1^i. \quad (11)$$

Використовуючи співвідношення $p_i p^i = m^2 c^2$ для квадратів 4-імпульсів даних частинок

$$p_{2i} p_2^i = m_2^2 c^2, \quad P_i P^i = M^2 c^2, \quad p_{1i} p_1^i = m_1^2 c^2,$$

а також вираз для скалярного добутку двох 4-векторів $A_i B^i = A_0 B_0 - \vec{A} \vec{B}$, який застосуємо до імпульсів p_{1i} і P^i : $p_{1i} P^i = p_{10} P_0 - \vec{p}_1 \vec{P}$,

вираз (11) перепишемо у вигляді

$$m_2^2 c^2 = M^2 c^2 + m_1^2 c^2 - 2(p_{10} P_0 - \vec{p}_1 \vec{P}).$$

У цьому виразі скалярний добуток $\vec{p}_1 \vec{P} = 0$, оскільки $\vec{P} = 0$, а $p_{10} P_0$ дорівнює:

$$p_{10}P_0 = \frac{\varepsilon_1}{c} \cdot \frac{E}{c} = \varepsilon_1 M.$$

У результаті маємо: $m_2^2 c^2 = M^2 c^2 + m_1^2 c^2 - 2\varepsilon_1 M$,

звідки слідує шуканий вираз для енергії ε_1 (6).

Аналогічно знаходимо вираз ε_2 . Для цього потрібно із закону збереження 4-імпульсу (8) виразити 4-імпульс p_1^i , а потім розписати скалярний добуток контраваріантних на коваріантні компоненти цього імпульсу $p_1^i p_{1i}$.

2. Злиття частинок

Розглянемо ще один приклад, який ілюструє закони збереження релятивістського імпульсу і енергії, це процес злиття двох частинок із масами m_1 і m_2 в одну - з масою M , тобто процес зворотний, до розглянутого раніше процесу розпаду частинки.

Нехай до зіткнення одна із частинок (для визначеності частинка з масою m_2) покоїться. Система відліку, в якій одна з частинок покоїться, називається *лабораторна система «Л»*. При цьому частинка, що покоїться, називається *мішенню*, а частинка, яка налітає на мішень, – *частинка-бомбардир*.

Визначимо швидкість, з якою частинка, що утворилася, рухатиметься відносно системи «Л». Для цього скористаємося співвідношенням між її імпульсом, швидкістю та енергією:

$$\vec{V} = \frac{\vec{P}c^2}{E}. \quad (1)$$

Запишемо закони збереження енергії та імпульсу для даного процесу

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = E, \quad \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{P}. \quad (2)$$

Для нерухомої частинки енергія та імпульс дорівнюють

$$\varepsilon_2 = m_2 c^2, \quad \vec{p}_2 = 0. \quad (3)$$

Закони збереження приймають вигляд:

$$E = \varepsilon_1 + m_2 c^2, \quad \vec{P} = \vec{p}_1.$$

Підставляємо ці співвідношення в (1) і знаходимо шуканий вираз для швидкості

$$\vec{V} = \frac{\vec{p}_1 c^2}{\varepsilon_1 + m_2 c^2}. \quad (4)$$

Відзначимо, що система відліку, в якій частинка, що утворилася, нерухома, є системою центра інерції (система центра «Ц»), оскільки у цій системі повний імпульс дорівнює нулю. Звідси витікає, що швидкість (4) – є швидкість руху системи центра «Ц» відносно лабораторної системи «Л». У цьому можна переконатися безпосередньо, використовуючи закони перетворення енергії та імпульсу при переході від однієї системи відліку до іншої.

Позначимо штрихованими символами фізичні величини, визначені в системі «Ц», і не штрихованими – в системі «Л». Спрямуємо осі x, x' вздовж вектора швидкості, тоді

$$V_x = V = \frac{p_{1x}c^2}{\varepsilon_1 + m_2c^2}.$$

x - компоненти імпульсів початкових частинок у системі «Ц», згідно зі зворотним перетворенням Лоренца, дорівнюють:

$$p_{1x}' = \gamma(p_{1x} - \frac{V}{c^2}\varepsilon_1), \quad p_{2x}' = \gamma(p_{2x} - \frac{V}{c^2}\varepsilon_2).$$

Підставляючи в ці вирази швидкість V , а також враховуючи (3), маємо

$$p_{1x}' = \gamma(p_{1x} - \frac{p_{1x}}{\varepsilon_1 + m_2c^2}\varepsilon_1) = \gamma p_{1x} \frac{m_2c^2}{\varepsilon_1 + m_2c^2} = \gamma m_2 V,$$

$$p_{2x}' = -\gamma \frac{V}{c^2}\varepsilon_2 = -\gamma m_2 V.$$

У результаті маємо: $p_{1x}' = -p_{2x}'$, або $p_{1x}' + p_{2x}' = 0$, що і є визначенням системи центру інерції.

Нарешті, визначимо масу M частинки, що утворилася. Для цього скористаємося співвідношенням між енергією та імпульсом частинки:

$$E = \sqrt{M^2c^4 + P^2c^2},$$

Звідки

$$M^2c^4 = E^2 - P^2c^2.$$

Підставляючи сюди вирази (2) і (3), знаходимо:

$$M^2c^4 = (\varepsilon_1 + m_2c^2)^2 - p_1^2c^2 = \varepsilon_1^2 + 2\varepsilon_1m_2c^2 + m_2^2c^4 - (\varepsilon_1^2 - m_1^2c^4) =$$

$$= m_1^2c^4 + m_2^2c^4 + 2\varepsilon_1m_2c^2.$$

Або остаточно

$$M = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + \frac{2\varepsilon_1m_2}{c^2}}. \quad (5)$$

Експериментально закони збереження релятивістської енергії та релятивістської маси, а також явище – дефект маси були підтверджені при вивченні руху частинок у прискорювачах елементарних частинок, а також при ядерних реакціях. Як відомо, ядра атомів складаються з Z протонів і $(A-Z)$ нейтронів, де Z - зарядове число або, що те ж саме - порядковий номер у таблиці елементів Менделєєва, A - масове число, яке показує у скільки разів маса даного атома більше за $^{1/12}$ маси атома вуглецю ^{12}C . До створення СТВ і релятивістської механіки, як уже зазначалось, вважався справедливим закон збереження звичайної маси. Тому очевидно, що маса атома повинна виражатися формулою

$$M_{am} = Zm_p + (A - Z)m_n,$$

де m_p, m_n – маса протона і нейтрона відповідно.

Проте вся сукупність експериментальних фактів говорить про те, що маса атома менше величини, розрахованої за даною формулою на величину Δm , тобто на дефект мас:

$$M_{am} = Zm_p + (A - Z)m_n - \Delta m$$

звідки

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{am}. \quad (6)$$

Якщо ліву і праву частину виразу (6) помножити на c^2 і розділити на число частинок, то отримаємо енергію, яка приходить на один нуклон. Ця величина називається *енергія зв'язку частинок в ядрі*:

$$\varepsilon_{св} = \frac{\Delta mc^2}{A} = \frac{Zm_p c^2}{A} + \left(1 - \frac{Z}{A}\right)m_n c^2 - \frac{M_{am} c^2}{A}. \quad (7)$$

Для атомних ядер із масовим числом $A > 20$ енергія зв'язку нуклонів складає $\sim 8 \text{ MeV/нукл}$ (див. рис.1).

На практиці спостерігається не злиття протонів і нейтронів в ядра, а синтез легких ядер у більш важкі.

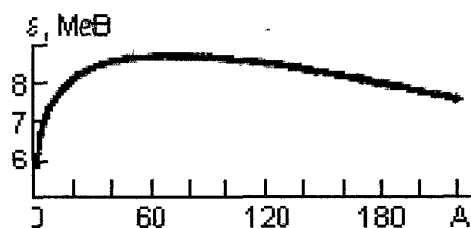
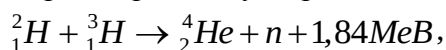
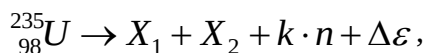


Рис.1. Залежність питомої енергії зв'язку ядер від числа нуклонів

Наприклад, синтез дейтерію і тритію з утворенням гелію і нейтрона



або розпад ядра урану



де X_1, X_2 - ядра, що утворюються в результаті розпаду, k - чисельний безрозмірний коефіцієнт від 2 до 3. Елементи X_1 і X_2 - можуть бути різні: стронцій, цирконій, свинець та ін. Всі вони знаходяться в середині періодичної системи елементів. Максимум енергії зв'язку для елементів періодичної системи відповідає приблизно номерам $A \sim 55-60$, а значить, найбільш стійкими будуть саме ядра із такими значеннями A , тобто найсильніше зв'язані ядра елементів, які в періодичній системі елементів знаходяться поблизу заліза і нікелю. Це означає, що для легких ядер енергетично вигідні реакції синтезу, а для важких - ділення на більш легкі осколки. Атоми з масовим числом $A > 238$ (масивніші за уран ${}^{238}\text{U}$) взагалі не можуть тривало існувати і їх отримують лише штучним шляхом. Така нестійкість важких ядер і енергія (атомна енергія), що виділяється при розпаді, а також енергія, яка виділяється при синтезі легких ядер (термоядерна енергія) є доказами справедливості висновків СТВ.

Література

1. Бом Д. Специальная теория относительности. – М.: Мир, 1967. – 285 с.
2. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. – М., Мир, 1964. – 456 с.
3. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. – М., Наука, 1985. – 400 с.
4. Бугаєнко Г.А., Фонкич М.Е. Курс теоретичної фізики. Електродинаміка. Теорія відносності. – Київ., Радянська школа, 1965. – 360 с.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1967. – 460 с.
6. Матвеев А.И. Электродинамика и теория относительности. – М.: В.Ш., 1964. – 343 с.
7. Мултановский В.В., Васильовський А.С. Курс теоретической физики (классическая электродинамика). – М.: Просвещение, 1990. – 271 с.
8. Мороз І.О., Іваній В.С., Холодов Р.І. Спеціальна теорія відносності. – Суми, видавництво «МакДен», 2011. – 335 с.

Анотація. Мороз І.О., Іваній В.С., Холодов Р.І. Кінематика процесів розпаду та злиття частинок у навчальному курсі СТВ. Розглядаються приклади застосування законів збереження у навчальному курсі СТВ.

Аннотация. Мороз И.А., Иваний В.С., Холодов Р.И. Кинематика процессов распада и слияния частиц в учебном курсе СТО. Рассматриваются примеры применения законов сохранения в учебном курсе СТО.

О.М. Пасько

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка***ПОЛІМЕРНІ НАНОКОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ****1. Вступ**

Історія використання людиною композиційних матеріалів (КМ) нараховує багато століть, а саме уявлення про композиційні матеріали запозичене в природі. Уже на ранніх стадіях розвитку цивілізації людина використовувала для будівництва цеглу із глини, у яку додавалася солома, що надавала підвищену міцність. Використання природних бітумів дозволило підвищити водостійкість природних матеріалів і виготовляти човни з очерету, просоченого бітумом. Прослідковується певна аналогія між створенням різних матеріалів у давнину і сучасними технологіями. Наприклад, виготовленням бойових луків у кочівників з використанням декількох шарів з дерева, рогу, шовку, що скріплюються за допомогою клею, і сучасними метало-дерево-тканевими шаруватими конструкціями, що з'єднуються тверднучими смолами. Одним з найбільш яскравих прикладів такого роду матеріалів є фиберглас зі скляних волокон, скріплених полімерним сполучним, структура якого повторює структуру бамбука, де безперервні волокна із целюлози перебувають у більш пластичній матриці [4].

Але наука не стоїть на місці. Одним із найцікавіших і найперспективніших напрямків матеріалознавства є розробка принципів отримання полімерних нанокомпозитів. Вони являють собою структуровані матеріали із середнім розміром однієї із фаз менше 100 нм [3].

Сьогодні накомпозиційні полімерні матеріали (НКПМ) широко використовуються починаючи з побуту і закінчуючи виробництвом космічної і авіаційної техніки.

Порівняно з низькомолекулярними речовинами у полімерів значення коефіцієнта теплового розширення на один два порядки більше, ніж у металів та скла. Ця особливість найчастіше призводить до небажаних явищ: в композиційних матеріалах типу «полімерна матриця – низькомолекулярний наповнювач» виникають залишкові напруження; в монолітних полімерних конструкціях виникають значні термічні напруження, які викликають розтріскування полімерного матеріалу. Дослідження теплового розширення полімерів має не тільки велике практичне значення, а й наукове. Це пов'язане, не дивлячись на постійний розвиток експериментальних досліджень, з тим що мало уваги звертається на дане явище. Найчастіше досліджують інші властивості, наприклад деформацію, міцність. Проте за зміною величини термічного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) і його температурною залежністю можна дослідити процеси, які відбуваються в матеріалі при нагріванні: фазові перетворення, процеси перебудови молекулярної структури, кристалізації, полімеризації, структурного склування і ін. З іншого боку знання коефіцієнтів розширення дає

інформацію про ступінь анізотропії матеріалу, величину термічних напружень і деформацій в елементах конструкцій при зміні температури. Отже відомості про теплове розширення речовини дадуть можливість технологам синтезувати матеріали з заданими властивостями, наприклад, регулювати в потрібних межах КТР, конструкторам – прогнозувати експлуатаційні властивості [2, 3].

У даній роботі досліджувались зразки на основі епоксидної смоли ЕД-20 і бентоніту. Епоксидна смола відігравала роль полімерної матриці, а бентоніт – наповнювача. Такий вибір обумовлений тим, що смоли широко використовуються у машинобудівній промисловості, а бентоніт із-за його здатності до самодиспергування є природним напівфабрикатом або основою для виробництва нанопорошків.

2. Методика і техніка експерименту

Технологія виготовлення зразка наступна. Зразки виготовлялися на основі епоксидної смоли ЕД-20 з отверджувачем ПЕПА. У ролі наповнювача був використаний бентоніт. Отримання мілкодисперсного порошку з бентоніту відбувалося у два етапи. Спершу глина висувувалася. Для цього вона була поміщена до електричної печі і витримувалася при температурі 423°K протягом однієї години. Другий етап полягав у тривалому розтиранні бентоніту в ступці з подальшим відпаленням.

Для дослідження було виготовлено дві серії зразків з різним вмістом наповнювача.

Спершу була приготовлена полімерна матриця (епоксидна смола з масовим вмістом отверджувача 10%). Потім у рідку епоксидну смолу додавали наповнювач у відповідній пропорції. Одержану суміш розлили у форми.

Серія № 1 мала вміст наповнювача 50% від загальної маси. Маса всього зразка складала 2 г.

Серія № 2 мала вміст наповнювача 30% від загальної маси. Маса всього зразка складала 3 г.

Після розливання по формах зразки застигали протягом 24 годин. Потім вони шліфувалися для отримання рівних поверхонь.

Для визначення ТКЛР використовувався метод механічної дилатометрії при динамічному режимі нагрівання зразків, тобто фіксування видовження зразка і температури відбувалося одночасно. При вимірюванні таким способом теплове розширення зразка викликає переміщення стержня, який має на кінці позначку. Нагрівання чи охолодження такої системи викликає зміщення позначки стержня шкали на різницю видовження зразка. Вимірювання положення стержня відбувається мікроскопом з окулярним мікрометром, ціна поділки шкали якого 10^{-3} мм. Паралельно фіксується температура за допомогою хромель-капелевої термопар [1, 86].

3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

В результаті проведення експериментальних досліджень для системи ЕД-20+бентоніт було отримано наступні результати.

На рис. 1 і рис 2. зображено залежність відносного видовження від температури для зразків ЕД-20+30% бентоніт та ЕД-20+50% бентоніт відповідно.

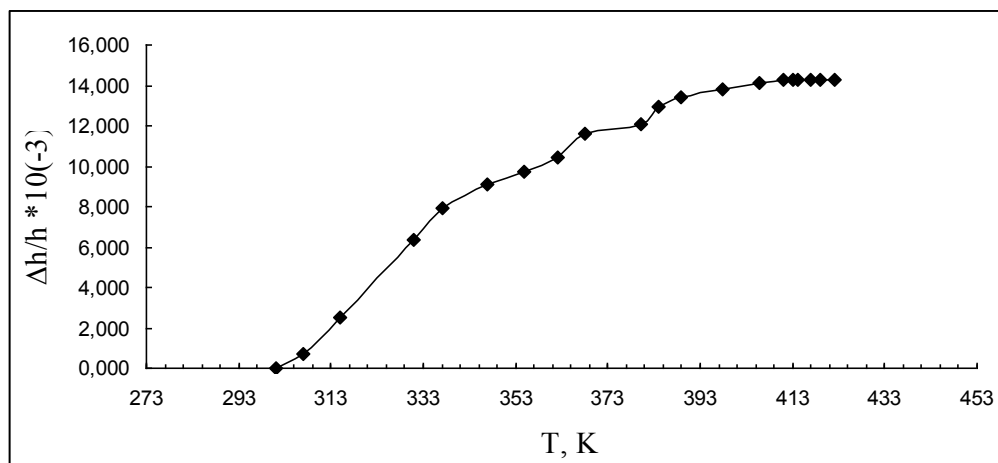


Рис. 1. Термічна залежність відносного видовження для зразка ЕД-20+30% бентоніт

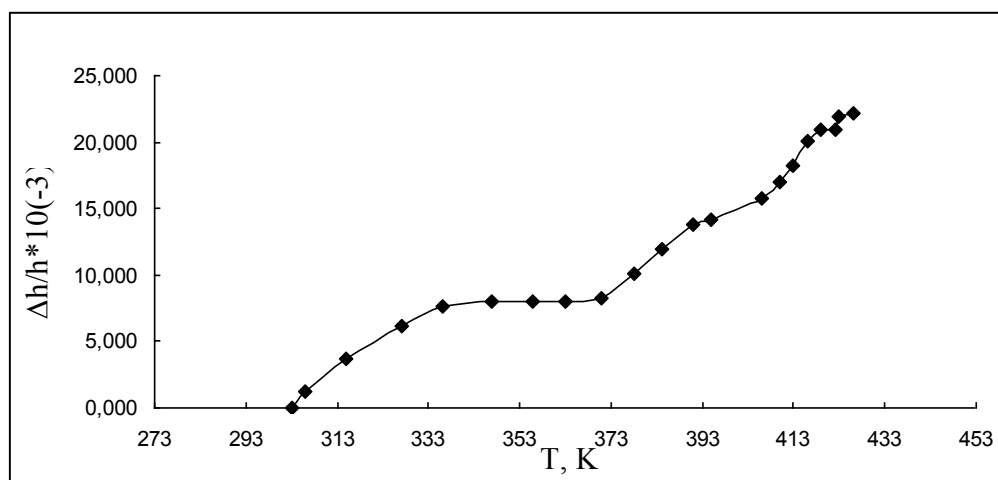


Рис. 2. Термічна залежність відносного видовження для зразка ЕД-20+50% бентоніт

Для зразка ЕД-20+30% бентоніт характерне монотонне зростання відносного видовження із насиченням видовження в районі 1,4 % від початкового розміру зразка. Момент сповільнення швидкості видовження припав на температуру порядку 403⁰K.

Для зразка ЕД-20+50% бентоніт спостерігається інтервал температур, в якому лінійні розміри зразка залишалися незмінними (333-373⁰K). Це можна пояснити початком дії непрореагованого затверджувача в ролі пластифікатора.

На рис. 3 зображено вплив відпалення на ЛКТР для зразка ЕД-20+30% бентоніт, а на рис. 4 – для зразка ЕД-20+50% бентоніт. Зразки відпалювалися протягом 2-х годин при температурах 328-333⁰К і 348⁰К.

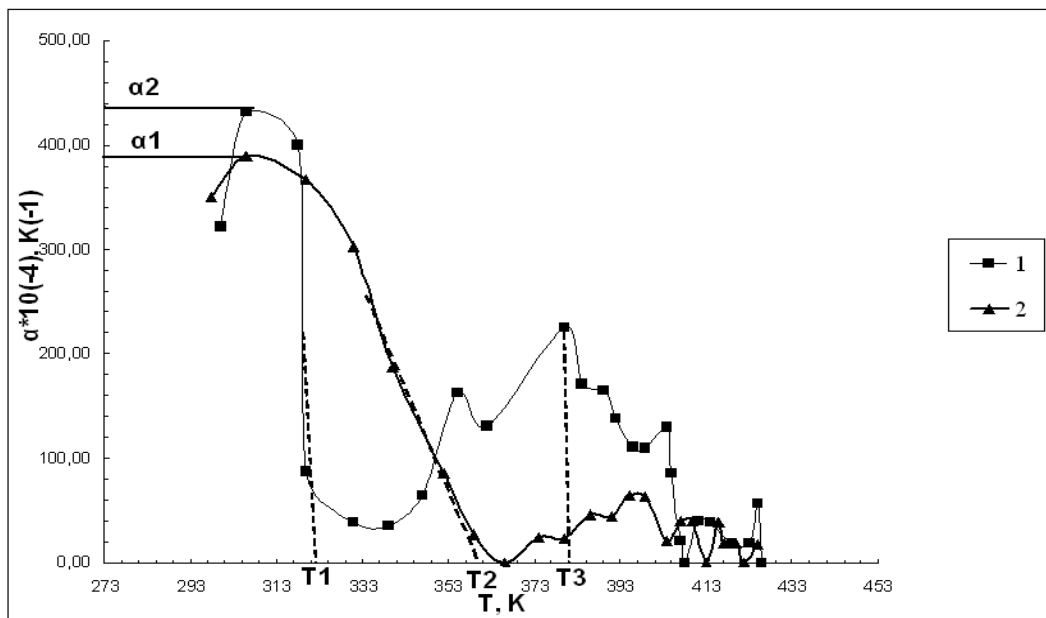


Рис. 3. Термічна залежність ТКЛР для зразка ЕД-20+30% бентоніт:
1 – відпалений при температурі 328-333⁰К, 2 – відпалений при температурі 348⁰К

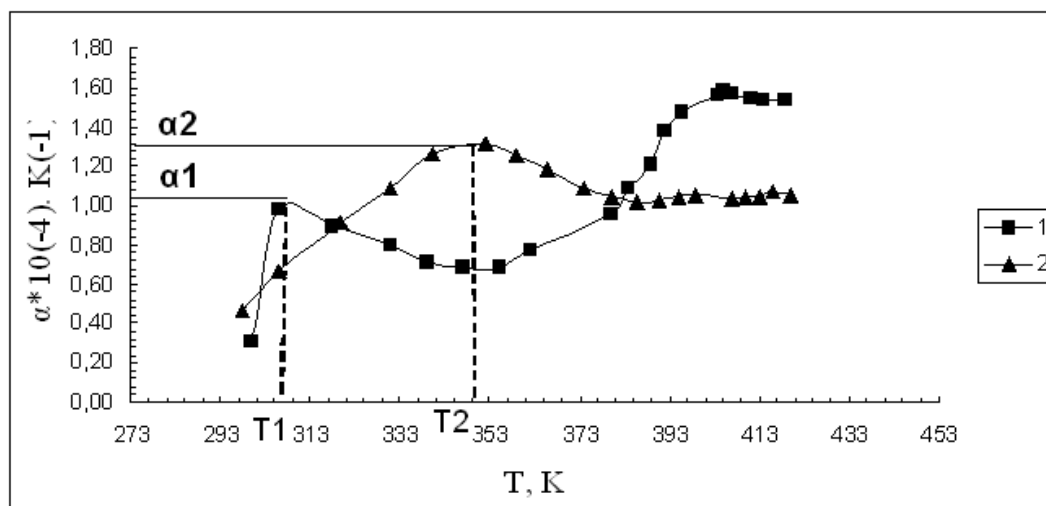


Рис. 4. Термічна залежність ТКЛР для зразка ЕД-20+50% бентоніт:
1 – відпалений при температурі 328-333⁰К, 2 – відпалений при температурі 348⁰К

Особливістю теплового розширення досліджуваних зразків є наявність однієї або кількох екстремальних точок. При чому в залежності від температури відпалювання вказані екстремальні точки (рис. 3) для зразка ЕД-20+30 % бентоніту змінюють своє положення по осі температур. Так для зразка ЕД-20+30 % бентоніту відпаленого при більш низькій температурі 328-333⁰К крива

коефіцієнта лінійного розширення α_1 досягає максимуму при температурі 321⁰К. Для цього ж зразка, але відпаленого при температурі 348⁰К максимум коефіцієнта лінійного розширення α_2 припадає на температуру 368⁰К.

Зауважимо, що різниця температур складає величину порядку 50⁰К. Наявність аномальних спадів на кривій термічної залежності $\alpha=f(T)$ пояснюється наступним чином. На першому етапі затвердження епоксидної смоли не весь затверджувач вступає в хімічну реакцію, тому ланцюги макромолекул не жорстко зв'язані між собою, а молекули затверджувача, які не прореагували додатково виконують роль пластифікатора. Тому, починаючи з деяких температур, відбувається релаксація напруг і макромолекули стискаються, що супроводжується аномальним падінням величини коефіцієнта лінійного розширення. Це відбувається лише до певного інтервалу температур. Так при температурі 343⁰С для зразка ЕД-20+30 % бентоніту відпаленого при температурі 328-333⁰К знову спостерігається ріст коефіцієнта лінійного розширення і максимум якого припадає на температуру ТЗ (381⁰К). Подальший ріст коефіцієнта лінійного розширення можна пояснити подальшим реагуванням затверджувача з епоксидною смолою.

Аналогічну ситуацію маємо і для зразка ЕД-20+50 % бентоніту (рис. 4).

4. Висновки

Було проведено ряд експериментальних досліджень термічного розширення наноконпозиційних полімерних матеріалів.

В результаті досліджень було встановлено наступне:

1. Властивості композиційного матеріалу залежать від концентрації наповнювача. Так для зразків ЕД-20+30% бентоніту спостерігалось майже монотонне зростання лінійного видовження з досягненням насичення при температурі 403⁰К. Тоді як для ЕД-20+50% бентоніту спостерігається інтервал температур з нульовим коефіцієнтом розширення.

2. Коефіцієнт лінійного розширення зразків змінюється з температурою не монотонно, має піки, які зумовлені процесами в зразку. При затвердженні епоксидної смоли не весь затверджувач вступає в хімічну реакцію, тому ланцюги макромолекул не жорстко зв'язані між собою, а молекули затверджувача, які не прореагували додатково виконують роль пластифікатора.

Література

1. Алатуни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 180 с.
2. Кан К.Н. Вопросы теории теплового расширения полимеров. – Л.: Ленинградский университет, 1975. – 80 с.
3. Чвалун С.Н. Полимерные наноконпозиты // Природа. – 2002. – №7.
4. <http://www.polymerbranch.com/publ/view/33.html>

А. Сакунов

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ПУЧКА У ЯДЕРНОМУ СКАНУЮЧОМУ МІКРОЗОНДІ

Канал ядерного скануючого мікрозонда

Експериментальна установка ядерного скануючого мікрозонда є окремим каналом аналітичного прискорюючого комплексу Інституту прикладної фізики НАН України, який заснований на малогабаритному електростатичному прискорювачі «Сокол» з максимальною напругою на високовольтному терміналі 2 МВ. Схема каналу ЯСМЗ у складі АУК наведена на рис. 1, а загальний вигляд самого каналу зображений на рис. 2.

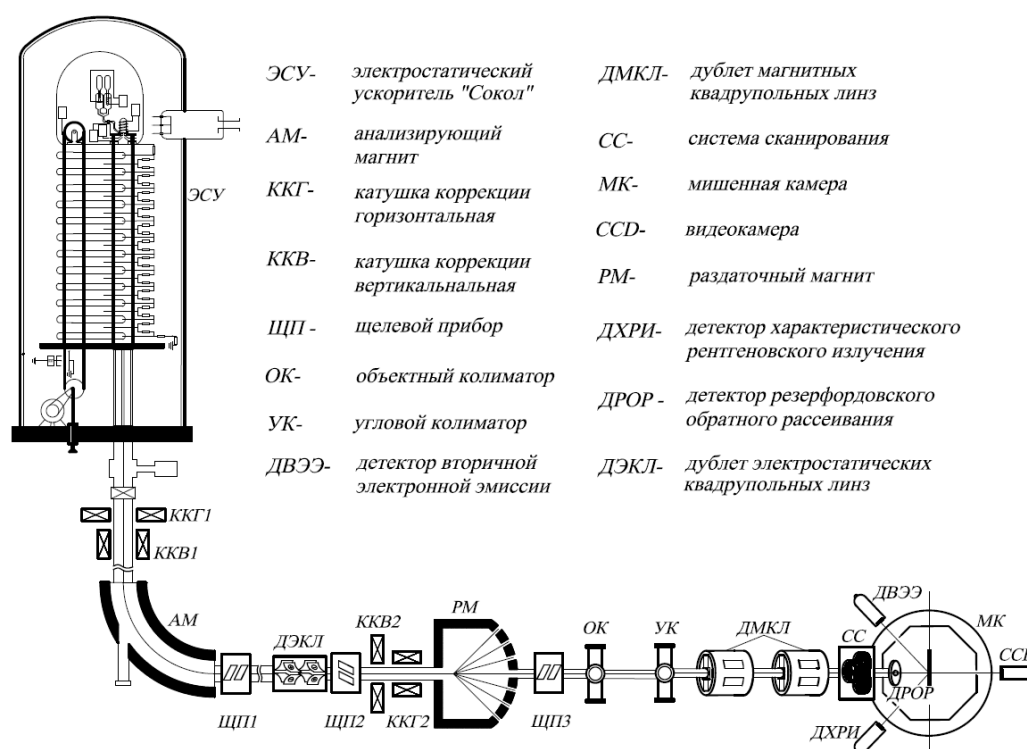


Рис. 1. Схематичне представлення розташування основних елементів і вузлів каналу ЯСМЗ у складі АУК ІПФ НАНУ

Як зазначалося вище основними елементами ЯСМЗ є: об'єктний і кутовий коліматори, магнітні квадрупольні лінзи з механізмами позиціонування, сканер, мішень камери з детектуючими пристроями і механізмом позиціонування зразків. До допоміжних систем відносяться іонопровід, вакуумна система і антивібраційна основа.

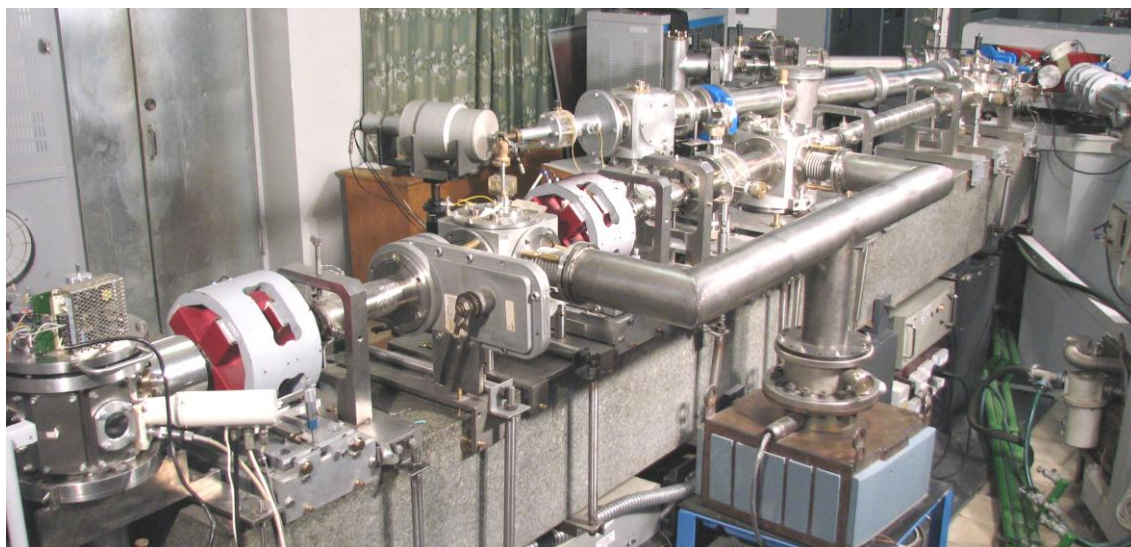


Рис. 2. Загальний вид каналу ЯСМЗ

Об'єктний і кутовий коліматори. Обидва коліматори мають однакову конструкцію у вигляді двох схрещених щілин. Ламелі щілин представляють собою круглі вольфрамові стрижні діаметром 5 мм. Для забезпечення паралельності переміщень вольфрамових стрижнів використовується схема, в якій стрижні закріплені на одному з плечей коромисла, закріпленого шарнірно в корпусі коліматора (рис. 3). Коромисло приводиться в рух за допомогою штовхача від диференціального мікрогвинта. Таке переміщення ламелі (вольфрамового циліндра) є нелінійним в залежності від переміщення штовхача. Однак внаслідок малого ходу штовхача 2 мм, нелінійність цього переміщення не перевищує 2%. Конструкторська документація на коліматор розроблена в ІПФ НАНУ.

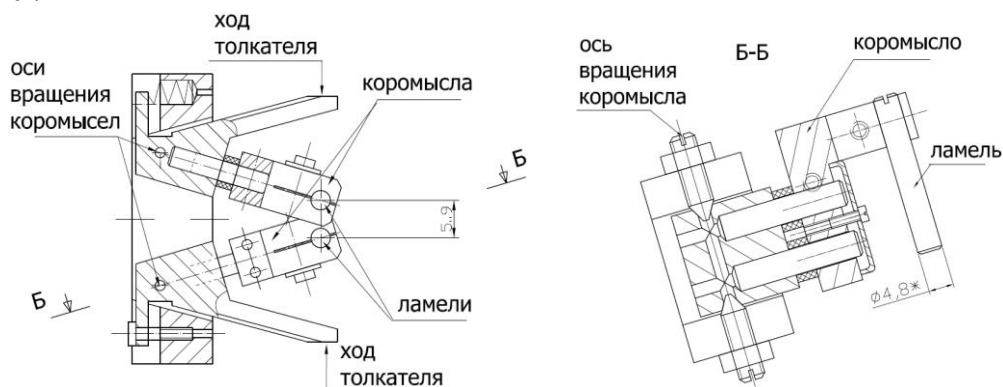


Рис. 3. Конструкція щілини коліматора

Основні технічні характеристики коліматорів:

кількість приводів	4
діапазон переміщення ламелей, мм	0 ... 2
переміщення ламелей на одну поділку лімба, мм	0,002

форма щілин
тип приводу

прямокутна
гвинтовий з
диференціальним
різьбленням
0,001.

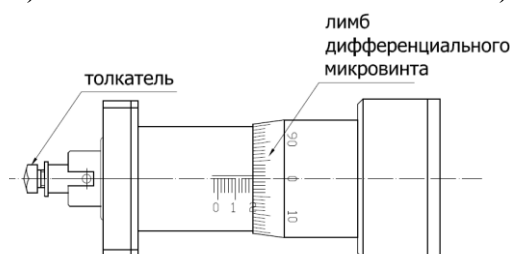
паралельність ламелей щілин, мм



а)



б)



в)

Рис. 4. Коліматор.

а) зображення кутового коліматора в складі каналу ЯСМЗ;

б) зображення коліматора в зборі, виготовленого на BAT SELMI, м. Суми;

в) схематичне зображення мікровинта з штовхачем

Конструктивно коліматор (рис. 4 а, б) являє собою корпус, виготовлений із сталі 12X18H10T з розміщеними в ньому двома однаковими щілинними пристроями. Щілинні пристрої розташовані в протилежних торцевих розточеннях корпусу і їх розворот один відносно іншого на 90° дозволяє створювати прямокутну горизонтально чи вертикально-розташовану щілину або квадратне вікно, площа якого може змінюватися від 0 до 16 мм^2 . Кожна ламель коліматора приводиться в рух індивідуальним ручним приводом (рис. 4 в), що переміщує важіль з ламеллю від периферії до центру. Зворотне переміщення відбувається за рахунок зусилля двох пружин, коли штовхач приводу переміщається у зворотний бік. Привід переміщення ламелі являє собою гвинтовий рушій з диференціальним різьбленням, що дозволяє переміщати шток на $0,2 \text{ мм}$ за один оберт рукоятки. Рукоятка з'єднана з круговим лімбом, які мають 100 поділок, тобто одній поділці кругового лімба відповідає переміщення штока на $0,002 \text{ мм}$. Герметизація між рухомими елементами приводу досягається застосуванням силфону з нержавіючої сталі, який приварений контактним зварюванням до нерухомої і рухомої частинах приводу. Між приводом і корпусом коліматора знаходиться гумовий ущільнювач. Ламелі кожної пари від'юстовані так, що їх утворююча

знаходиться на відстані -50 мкм від геометричної осі корпусу у напрямку свого руху. Це дозволяє повністю перекривати пучок, а також створює можливість зміщувати центр колімаційного вікна щодо осі коліматора, що важливо при виборі осі пучка з високою точністю. Конструкція коліматора передбачає можливість регулювання паралельності утворюючих вольфрамових ламелей. Контроль паралельності проводиться на оптичному мікроскопі з точністю приладу (0,001 мм). При експлуатації коліматорів неминучий «знос» ламелей від контакту з іонним пучком. Конструкцією передбачена можливість повороту ламелей щодо своєї осі для зміни області контакту поверхні ламелі з пучком або повна заміна ламелей.

Магнітні квадрупольні лінзи з системою позиціонування. У попередньому розділі розглянуто інтегровані дублети МКЛ, які застосовані в каналі ЯСМЗ. Кожен з дублетів забезпечений системою позиціонування має п'ять ступенів свободи. На рис. 5 показаний інтегрований дублет МКЛ з системою позиціонування.

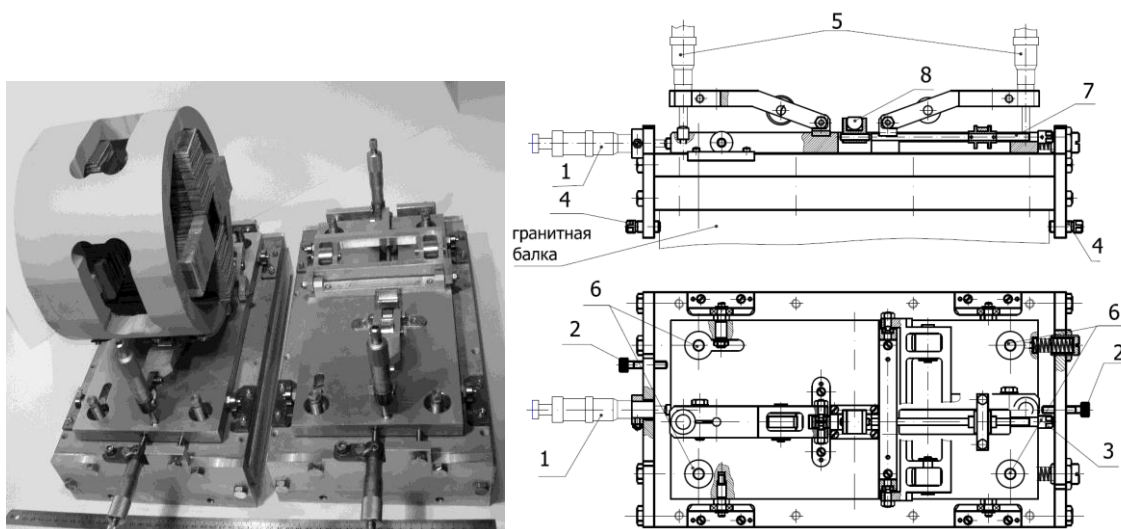


Рис. 5. Інтегрований дублет МКЛ з системою позиціонування
 а) загальний вигляд дублету і двох механізмів позиціонування;
 б) розташування елементів керування положенням дублету

Мікрогвинт (поз. 1, рис. 5 б) забезпечує зсув в горизонтальному напрямку поперечному до осі пучка платформи, на якій розташований дублет. Стопорні гвинти (поз. 2) забезпечують фіксоване положення платформи після завершення позиціонування дублету МКЛ. Мікрогвинт (поз. 3) дозволяє виробляти обертання дублету щодо поздовжньої осі в межах $\pm 3^\circ$ (кут крену) за рахунок поперечного переміщення штока (поз. 7) та зміщення штовхача (поз. 8). Чотири гвинти (поз. 4) забезпечують зміну кута risksання всієї системи позиціонування щодо гранітної балки, на яку встановлюється ця система. Мікрогвинта (поз. 5) дозволяють змінювати положення дублету у вертикальному напрямку, за рахунок зміщення коромисел, на яких встановлено дублет. Чотири гвинти (поз. 6) дають можливість змінювати кут тангажа дублету.

Феромагнітний сканер. Феромагнітний сканер здійснює сканування пучка по двох координатах. Він складається з чотирьох феромагнітних секцій з порядком відхилення мікропучка в площинах ХУУХ (рис. 6). Сканер дозволяє отримати растр сканування з розміром до $500 \times 500 \text{ мкм}^2$ пучка протонів з енергією 2 MeV при робочій відстані 23 см.

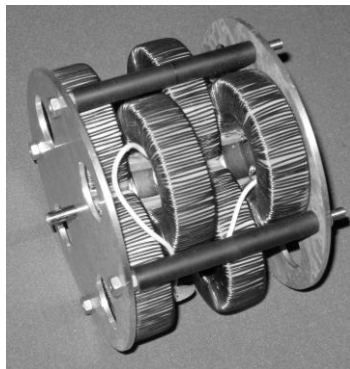
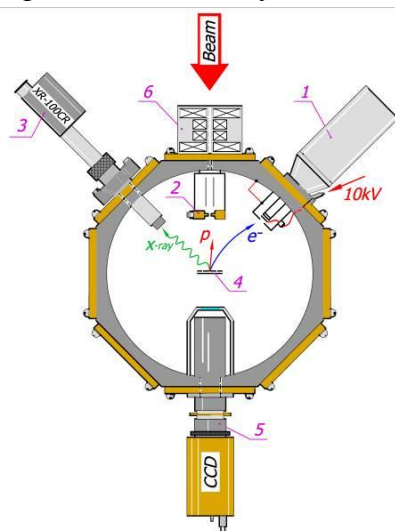


Рис. 6. Блоковий феромагнітний сканер

Камера взаємодії пучка з мішенями. Камера має форму прямокутної восьмигранної призми і виготовлена з нержавіючої сталі. На кожній з бічних граней є приєднувальні фланці, на яких розташовуються детектуючі пристрої, пристрої спостереження за пучком, вакуумні з'єднувачі і інші системи [65,156]. Схема розташування пристроїв і систем наведена на рис. 7 а. Загальний вигляд камери в складі каналу ЯСМЗ зображений на рис. 7 б.



а)



б)

Рис. 7. Камера взаємодії сфокусованого пучка з мішенями

а) схема розташування пристроїв і систем;

б) загальний вигляд камери в складі каналу ЯСМЗ

На рис. 7 а) показані:

- блоковий феромагнітний сканер встановлений на фланці 0° (поз. 6);
- детектор вторинних електронів розташований на фланці 45° (поз. 1);
- оптичний мікроскоп з CCD розташований на фланці 180° (поз. 5);

- детектор характеристичного рентгенівського випромінювання (напівпровідниковий детектор АМРТЕК® моделі XR-100CR з термоелектричним охолодженням на елементах Пельтьє) встановлений на фланці 315 ° (поз. 3);

- детектор заряджених частинок (кільцевий поверхнево-бар'єрний детектор ORTEC® моделі TC-017-050), що забезпечує реєстрацію назад розсіяних частинок, розташований усередині камери (поз. 2).

На верхній кришці камери розташований двокоординатний механізм позиціонування мішеней (рис. 8). На зовнішній частині показані крокові двигуни (поз. 3) і контролер (поз. 2) з джерелом живлення (поз. 1). Передача руху всередину камери здійснюється за рахунок обертання вакуум-ущільнених стрижнів. На внутрішній стороні верхньої кришки камери розташовані мішені на електроізолюваних утримувачі (поз. 5), з якого відбувається збирання накопиченого заряду. Переміщуваний коаксіальний детектор заряджених частинок зображений на (поз. 4). Для адекватної реєстрації заряду використовувалась установка системи подавлення вторинних електронів у вигляді кільця, що знаходиться під напругою +300 В.

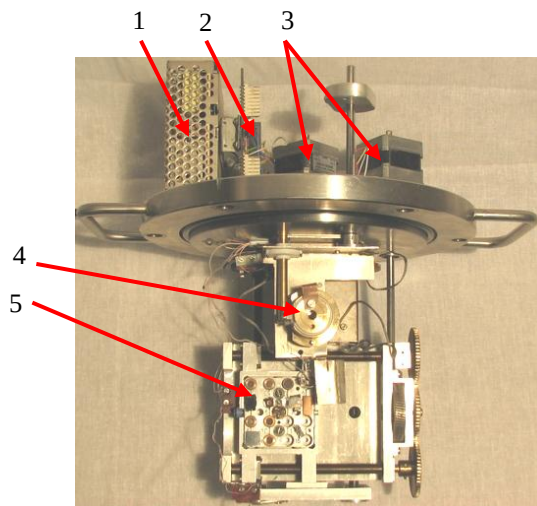


Рис. 8. Механізм позиціонування мішеней, розташований на верхній кришці камери

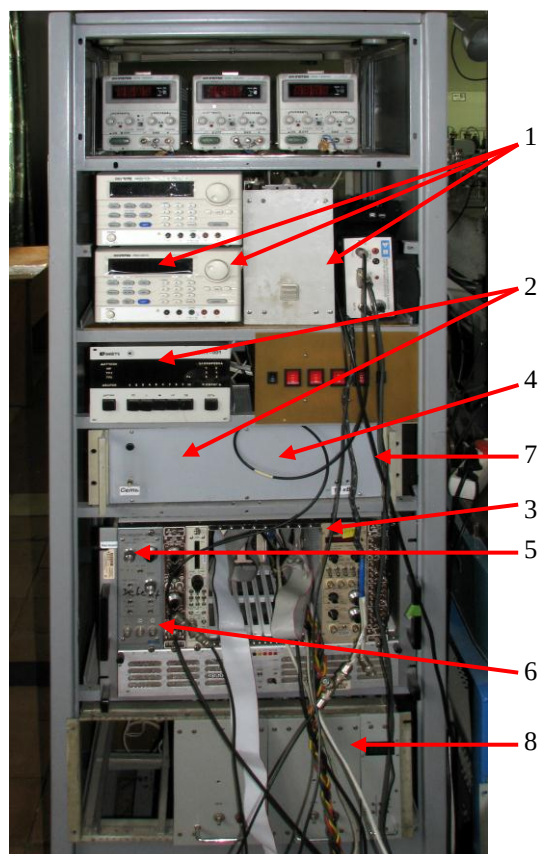


Рис. 9. Загальний вигляд стійки групи приладів каналу ЯСМЗ

Стойка для приладів каналу ЯСМЗ. Стойка включає групи приладів, що забезпечують живлення активних іонно-оптичних елементів, вимірювання

вакууму, управління процесом сканування пучка і збором спектрометричної інформації. Загальний вид стійки зображений на рис. 9. На поз. 1, рис. 9 показані три джерела живлення вертикального і горизонтального коректорів пучка і корекції магнітного поля розподіляючого магніту (GPS-1850D GOOD WILL INSTRUMENT). Відповідна група іонно-оптичних пристроїв схематично показана на рис. 1. Джерела живлення магнітних квадрупольних лінз (PSM-2010 GOOD WILL INSTRUMENT) та управління їх підключенням (поз. 2 і 3, рис. 9 відповідно) дозволяють змінювати струм у котушках з мінімальним кроком 1 мА в межах до 0 ... 10 А, стабільністю на рівні 10^{-4} і змінювати полярність під'єднання. Спеціалізоване джерело живлення скануючої системи, інтегратор струму для вимірювання накопиченого заряду і вимірювач вторинної електронної емісії розміщені в окремому блоці (поз. 4, рис. 9). Величина вакууму контролюється за допомогою вимірювача ВМТ-001 (поз. 5, рис. 9). Стійка також включає джерело живлення (10 кВ) детектора вторинних електронів (поз. 6, рис. 9), підсилювач і джерело живлення детектора характеристичного рентгенівського випромінювання (див. 7, рис. 9) і крейт NIM з набором спектрометричної апаратури (поз. 8, рис. 9).

А.І. Салтикова, М.В. Ісаєв

Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка

МЕТОД ВТОРИННО-ІОННОЇ МАС-СПЕКТРОМЕТРІЇ

Вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС) або іонний мікроаналіз є одним із сучасних фізичних методів дослідження тонких плівок та поверхні твердого тіла. Він ґрунтується на зондуванні досліджуваного зразка пучком прискорених іонів (здебільшого інертних газів), кінетична енергія яких становить 1–20 кеВ. Ці іони називаються первинними. В результаті їхньої взаємодії зі зразком відбувається декілька видів випромінювання, кожне з яких може бути використане для аналізу складу речовини мішені. У методі ВІМС для аналізу хімічного складу речовини використовуються позитивно або негативно заряджені іони, або нейтральні атоми мішені. Простіше використовувати іони, так як для реєстрації нейтральних атомів потрібно додатково мати обладнання для їхньої іонізації.

Найважливішими характерними особливостями методу ВІМС є:

- 1) Висока чутливість: кількість речовини, яка використовується для рядового аналізу, становить лише кілька пікограм (10^{-12} г);
- 2) Можливість досліджувати будь-яку речовину без попередньої підготовки (метал, сплав, напівпровідник, діелектрик);
- 3) Реєструються всі елементи періодичної системи;
- 4) Можливість здійснення ізотопного аналізу;
- 5) Можливість проводити пошаровий аналіз матеріалів з високою роздільною здатністю за глибиною – порядку 30-100 Å;
- 6) Ідентифікуються не тільки окремі елементи, але й їхні хімічні сполуки.

Промислові установки ВІМС складаються з таких основних блоків: джерела первинних іонів, пристрою для установки аналізованих зразків, електростатичних лінз, що витягують вторинні іони, мас-аналізатора для вторинних іонів і системи реєстрації (приймача) вторинних іонів.

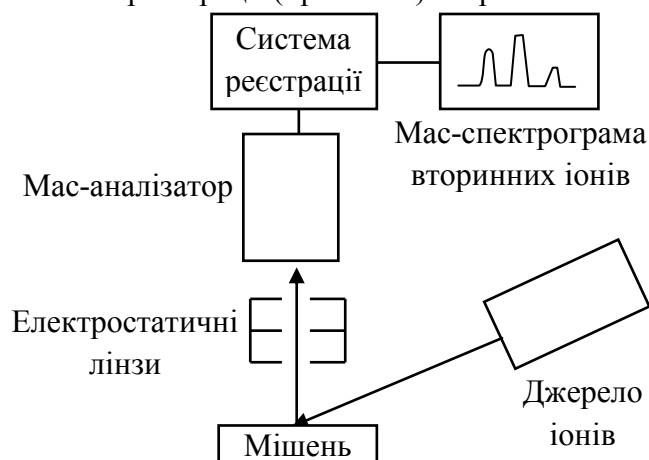


Рис. 1. Принципова схема методу ВІМС [2]

На рис.1 зображена принципова схема методу ВІМС. Розглянемо принцип її дії.

Досліджуваній зразок уводиться через шлюз і розміщується на маніпуляторі у вакуумній камері. Вакуум бажано створити надвисокий. Зразок бомбардується пучком первинних іонів, які вибивають з його поверхні нейтральні атоми, позитивно і негативно заряджені іони. Вторинні іони, вибиті з мішені, збираються системою електростатичних лінз, фокусуються у вузький пучок і направляються в мас-аналізатор, де відбувається їхній розподіл на пучки іонів з однаковою масою (точніше, з однаковим відношенням маси іона m до його електричного заряду q). Відношення m/q позначають через M і називають масовим числом іона, вимірюючи при цьому заряд іона q не в кулонах, а в зарядах електрона e ($q = 1$, $q = 2$ тощо). У випадку, коли $q = 1e$ ($M = m$), то говорять про однозарядні іони. Якщо $q = 2e$ ($M = m/2$), то говорять про двозарядні іони і т.д. Як правило, електричні параметри роботи джерела іонів добирають такими, щоб в основному в джерелі іонів виникали однозарядні іони. Тоді маса такого іона m збігається з його масовим числом M . Нарешті, після розділення групи іонів з однаковим відношенням m/q потрапляють у систему реєстрації, де створюють іонні струми, величина яких пропорційна кількості іонів у відповідному пучку. Спочатку ці струми підсилюються, а потім реєструються або за допомогою електронного самописного приладу, або, пройшовши цифрову обробку в АЦП (аналого-цифровий перетворювач), за допомогою персонального комп'ютера [2]. На виході одержуємо мас-спектр, нанесений на папір, якщо реєстрація відбувалася за допомогою самописця, або виведений на екран монітора, якщо реєстрація відбувалася за допомогою персонального комп'ютера. Мас-спектр є набором спектральних піків, що визначають масу іонів елементів речовини і створюваний ними струм. В якості прикладу на рис.2 подано мас-спектр вторинних іонів, одержаних при бомбардуванні зразка Fe.

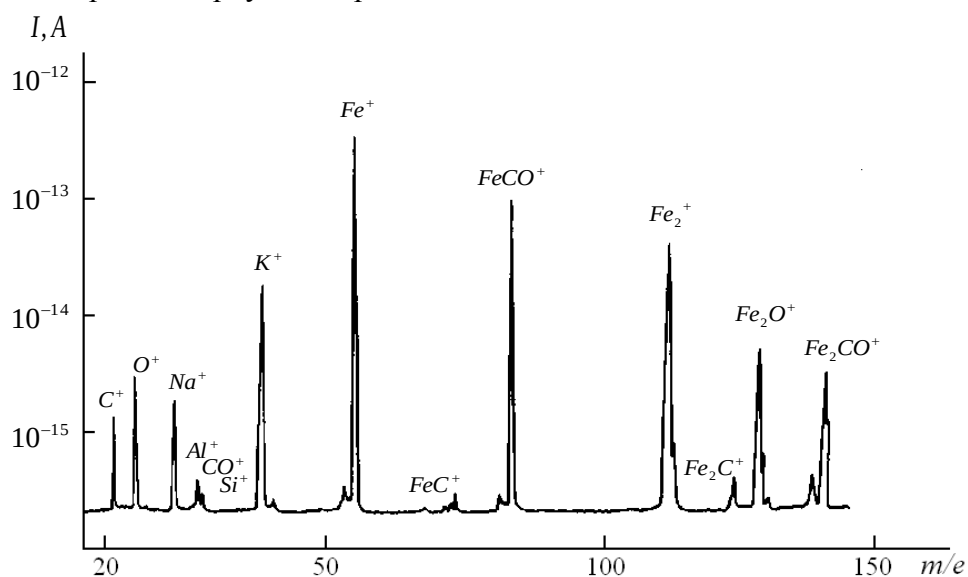


Рис.2. Мас-спектр Fe [1]

Мас-спектр містить інформацію про якісний склад речовини мішені (що за елементи) і про їх кількість. Процедура виявлення хімічного складу речовини за мас-спектром називається розшифровуванням мас-спектра. Ця процедура відбувається у три етапи. На першому етапі визначається наявність піків і складається список піків залежно від масового числа $M = m/q$. На другому етапі піки ідентифікуються на основі виділення серед них піків одноатомних іонів (та їх ізотопів), молекулярних іонів та їх фрагментів залежно від масового числа M . На третьому етапі складається список ідентифікованих хімічних елементів і відповідних їм атомних концентрацій (з урахуванням ізотопного складу елементів) [2].

Розшифровку мас-спектру можна здійснювати двома способами: уручну і за допомогою ЕОМ.

Ручний метод ідентифікації піків здійснюється за допомогою таблиць масових чисел, визначаючи відношення ізотопів і порівнюючи їх з таблицею природнього поширення ізотопів. Проте це не єдиний спосіб ручної розшифровки мас-спектру. Ідентифікувати піки також можна шляхом порівняння експериментального мас-спектру з відомими мас-спектрами окремих елементів і сполук, одержаних раніше. Сьогодні відомі мас-спектри десятків тисяч елементів і сполук, навіть опубліковані спеціальні каталоги мас-спектрів.

Однак при ручній розшифровці мас-спектрів, які дуже насичені лініями, неминучими є помилки оператора і суб'єктивні судження, наприклад, про склад багатоатомних іонів, тому для таких випадків бажано повністю автоматизувати процедуру ідентифікації піків таким чином, щоб оператор втручався лише у випадку крайньої необхідності. У наш час розроблений цілий ряд програм для ЕОМ, які дозволяють якісно аналізувати і ідентифікувати піки у спектрі ВІМС зразків повністю або частково невідомого складу.

Кількісний аналіз методом ВІМС можна здійснити двома способами:

- 1) прямим (за мас-спектром зразка);
- 2) еталонним (з використанням зразка-стандарту).

Перший метод дає можливість визначити концентрацію певного елемента безпосередньо за мас-спектром досліджуваного об'єкта-мішені. Ідея його досить проста. Якщо просумувати струми усіх піків спектру, то одержимо струм, що відповідає емісії усього, що є у зразку, тобто загальній концентрації 100 %. Кожному піку відповідатиме часткова концентрація, пропорційна його величині по відношенню до загальної величини струму.

Ідея методу еталонів також проста. Для досліджуваного зразка підбирають еталонний, тобто зразок з близькими фізико-хімічними властивостями, але відомими концентраціями елементів. Далі записують мас-спектри вторинних іонів еталона і досліджуваного зразка при ідентичних робочих параметрах приладу. Визначивши відношення висот піків відповідних елементів еталона і зразка, можна встановити їхню концентрацію у досліджуваному зразку, тому що дане відношення дорівнює відношенню концентрацій у зразку й еталоні [4].

Оскільки бомбардування досліджуваного зразка первинними іонами призводить до розпилення мішені, то метод ВІМС, крім якісного і кількісного аналізів, дозволяє здійснювати ще й пошаровий аналіз. Підбираючи енергію зонduючих іонів і примусивши їх рухатися по поверхні мішені, можна пошарово її стравлювати й одночасно аналізувати за допомогою мас-спектрометра хімічний склад розпиленої речовини, тобто одержувати інформацію про розподіл елементів за глибиною зразка.

Придатність методу ВІМС для проведення пошарового аналізу разом з його високою чутливістю до більшості елементів робить його провідним методом для вивчення тонких плівок, іонної імплантації та дифузії [3].

Для здійснення пошарового аналізу методом ВІМС необхідно налаштувати мас-спектрометр на пік, що відповідає елементу, який аналізується, і записати зміну висоти піка в залежності від часу іонного розпилення. Висота піка пропорційна концентрації, а час розпилення — глибині шару. Якщо відомо співвідношення між цими величинами, то можна побудувати концентраційний профіль.

Як і будь-який метод дослідження, вторинно-іонна мас-спектрометрія має свої недоліки. Вони пов'язані з його руйнівним впливом на досліджуваний зразок і складністю одержання точних результатів кількісного аналізу. Тому для одержання більш достовірної інформації його необхідно використовувати в комплексі з іншими методами дослідження речовини.

Література

1. Д. Вудраф, Т. Делчар. Современные методы исследования поверхности. — М.: Мир, 1989. — 564 с.
2. В.Б. Лобода, В.С. Іваній, С.М. Хурсенко, В.С. Кшнякін, В.О. Кравченко, А.І. Салтикова, Ю.О. Шкурдода. Сучасні методи дослідження структури речовини. — Суми: Університетська книга, 2010. — 259 с.
3. Методы анализа поверхностей. Под ред. А. Зандерны. — М.: Мир, 1979. — 582 с.
4. В.Т. Черепин. Ионный микрозондовый анализ. — К.: Наукова думка, 1992. — 344 с.

А.І. Салтикова, С.М. Хурсенко*Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка,
teorfiz09@rambler.ru*

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОСТІ ПРИРОДНИХ СОЛЕЙ

Якість знань студента завжди є показником ефективності освітнього процесу в будь-якому навчальному закладі. Зрозуміло, що вона залежить від багатьох об'єктивних і суб'єктивних факторів. Якість визначається, передусім, тим, наскільки студент вміє застосовувати набуті знання на практиці, в конкретних ситуаціях, у повсякденному житті.

Надзвичайно важливою частиною будь-якого курсу фізики є лабораторний практикум. Лабораторні роботи дають можливість перевірити на практиці правильність теоретичних уявлень про фізичні явища, що вивчаються в лекційному курсі. Крім того, на лабораторних роботах відпрацьовуються уміння й навички, необхідні для постановки експерименту.

У наш час при недостатньому фінансуванні системи освіти з одного боку і великої вартості обладнання з іншого боку виникає складна ситуація з обладнанням для проведення лабораторних практикумів. Обладнання в лабораторіях не обновлюється, а старе виходить з ладу. Все це призводить до складності при постановці нових лабораторних робіт

Особливо це стосується лабораторного практику з фізики ядра атома, обладнання для якого є досить складним і специфічним.

Пропонуємо розроблену нами лабораторну роботу по дослідженню радіоактивності природних солей, яку можна поставити на тому обладнання, що вже є в лабораторії. Перелік солей для дослідження та їх кількість може бути довільною, але серед них обов'язково повинна бути сіль калію, що має радіоактивний ізотоп.

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНОСТІ ПРИРОДНИХ СОЛЕЙ.

МЕТА РОБОТИ: визначити, які з запропонованих солей є радіоактивними.

ЗАВДАННЯ:

- 1) ознайомитись з установкою для вимірювання радіоактивності солей;
- 2) провести вимірювання радіоактивного фону;
- 3) визначити середнє значення кількості імпульсів, що фіксується установкою, для запропонованих солей;
- 4) зробити висновки щодо радіоактивності солей.

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ: радіометр-дозиметр МКС-01Р;

солі – сульфат міді, хлорид натрію, хлорид калію, хлорид кальцію.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Радіоактивність – властивість деяких ядер самовільно перетворюватись в інші ядра з випромінюванням частинок.

Радіація, або іонізуюче випромінювання – це частинки і гамма-кванти, енергія яких достатньо велика, щоб при дії на речовину створювати іони різних знаків. Радіацію не можна викликати за допомогою хімічних реакцій.

Радіоактивність буває природна та штучна.

В результаті ядерних реакцій можуть утворюватись радіоактивні ядра. Ці ядра мають **штучну радіоактивність**.

Природну радіоактивність мають радіоактивні нукліди, які зустрічаються в природі. Їх близько 300.

Природна радіоактивність існує мільярди років, вона присутня практично повсюди. Іонізуюче випромінювання існувало на Землі задовго до зародження на ній життя і було присутнє в космосі до виникнення самої Землі. Радіоактивні матеріали увійшли до складу Землі з самого її утворення. Будь-яка людина трохи радіоактивна: у тканинах людського тіла одним з головних джерел природної радіації є калій-40 і рубідій-87, причому не існує способу позбавитися від них. Калій є одним із 10 найбільш поширених елементів у земній корі і входить до складу багатьох мінералів і органічних речовин. Калій, який існує у природі, має три ізотопи: калій-39 (93,2581%), калій-41 (6,7302%) і радіоактивний ізотоп калій-40, кількість якого дорівнює лише 0,0117%. Період його піврозпаду $1,27 \cdot 10^9$ років. Він розпадається з імовірністю 89,3% через β -розпад і ймовірністю 10,7% через k -захоплення з емісією γ -випромінювання. Хоча питома активність калій-40 дуже низька через великий період його піврозпаду, але завдяки великому розповсюдженню, калій є відповідальним майже за 12% природної радіації, під дію якої ми підпадаємо. Людське тіло містить в середньому близько 15 г калію, що утворює в середньому радіоактивність від 3 до 5 кБк.

Сучасна людина до 80% часу проводить у приміщеннях – вдома або на роботі, де і одержує основну дозу радіації: хоча будівлі захищають від випромінювань ззовні, в будматеріалах, з яких вони побудовані, міститься природна радіоактивність. Істотний внесок в опромінювання людини вносить радон і продукти його розпаду.

Радіоактивний фон – це радіоактивність в певній місцевості. Вона обумовлена як природною радіоактивністю (корисні копалини, космічне випромінювання), так і діяльністю людини (техногенна радіоактивність).

На Землі існують населені області з підвищеним радіоактивним фоном. Це, наприклад, високогірні міста Богота, Лхаса, Кіто, де рівень космічного випромінювання приблизно в 5 разів вищий, ніж на рівні моря. Це також піщані зони з великою концентрацією мінералів, які містять фосфати з домішкою урану і торія - в Індії (штат Керала) і Бразилії (штат Еспіріту-Санту). Можна згадати ділянку виходу вод з високою концентрацією радію в Ірані (м. Ромсер). Хоча в деяких з цих районів потужність поглиненої дози в 1000 разів перевищує середню

по поверхні Землі, обстеження населення не виявило порушень у рівні захворюваності і смертності.

Крім того, навіть для конкретної місцевості не існує "нормального фону" як постійної характеристики, його не можна одержати як результат невеликого числа вимірювань. У будь-якому місці, навіть для неосвоєних територій, радіаційний фон змінюється від точки до точки, а також в кожному конкретному місці з часом. Ці коливання фону можуть бути доволі значними.

Техногенна радіоактивність виникає внаслідок людської діяльності.

Господарська діяльність, у процесі якої відбувається перерозподіл і концентрація природних радіонуклідів, приводить до помітних змін природного радіаційного фону. Сюди відноситься видобування і спалювання кам'яного вугілля, нафти, газу, інших горючих речовин, використання фосфатних добрив, видобування і переробка руди.

Так, наприклад, дослідження нафтопромислів на території країни показують значне перевищення допустимих норм радіоактивності, підвищення рівня радіації в районі свердловин, викликане відкладенням на обладнанні та ґрунті солей радію-226, торія-232 і калія-40.

Такий вид транспорту, як цивільна авіація, піддає своїх пасажирів підвищеній дії космічного випромінювання. І, звичайно, свій внесок дають випробування ядерної зброї, підприємства атомної енергетики та промисловості.

Безумовно, можливе і випадкове (неконтрольоване) розповсюдження радіоактивних джерел: аварії, втрати, розкрадання, розпилення і т.п. Такі ситуації, на щастя, дуже рідкісні. Крім того, їх небезпеку не слід перебільшувати. Для порівняння, внесок Чорнобиля в сумарну колективну дозу радіації, яку одержить населення, що проживає на забруднених територіях, в майбутні 50 років складе всього 2%, тоді як 60% дози визначатимуться природною радіоактивністю

Вимірювання радіаційного фону в місті Суми дозволяють вказати типові значення фону на відкритій місцевості – 10-16 мкР/год.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Визначити фонове значення кількості імпульсів за 100 секунд. Отримані значення занести до таблиці та знайти середнє.

№	τ , с	N_{ϕ}	N_{ϕ} за 100 с	$\tilde{N}_{\phi}$ за 100 с
1.				
2.				
3.				

2. Підрахувати кількість імпульсів за час $\tau = 100$ с; 200 с; 300 с для кожного зразку солей. Заповнити таблицю:

Зразки солі	τ , с	N	N за 100 с	$\tilde{N}$ за 100 с	$\tilde{N} - \tilde{N}_\phi$ за 100 с

3. Проаналізувати отримані результати і зробити висновок про те, які з досліджуваних солей є радіоактивними.
4. Визначити активність певної маси радіоактивної солі за вказівкою викладача.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Радіоактивність. Природна та штучна радіоактивність.
2. Радіоактивний фон. Чинники, які впливають на радіоактивний фон.
3. Типові значення радіоактивного фону в нашій місцевості.
4. Пояснити, яким елементом обумовлена радіоактивність досліджуваної солі.
5. Активність препарату. Одиниці вимірювання активності.

Література

1. Савельев Д.В. Общий курс физики. Т.3. – М.: Наука, 1989 г.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. т. 1. – Энергоатомиздат, 1983.
3. Мухин К.Н. Физика атомного ядра. т. 2. – Энергоатомиздат, 1983.
4. Вальтер А.К., Залюбовский И.И. Ядерная физика. – Харьков: Вища школа, 1993.
5. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. – Т.3. Оптика. Квантова фізика.– К.: Техніка, 2006. – 534 с.

С.І. Сидоренко

Сумський Державний Педагогічний Університет ім. А.С.Макаренка

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

В умовах сьогодення розвиток економіки не можливий без стабільного забезпечення виробництва паливом та іншими енергетичними ресурсами. За умов енергетичної залежності України та постійного зростання цін на імпортовані нафту й газ, з кожним днем дедалі актуальнішими стають питання переведення, передусім агропромислового та житлово-комунального комплексів, на вітчизняні екологічно чисті енергоносії біологічного походження.

Тільки сільське господарство щорічно потребує біля 1 *млн. 890 тис.тонн* дизпалива, 625 *тис.тонн* бензину, понад 500 *млн.куб.м.* природного газу, 3,2 *млрд.кВт.годин* електроенергії. Крім того, харчова промисловість споживає понад 3,5 *млрд.куб.м.* газу та 1 *млрд.кВт.годин* електроенергії. В Україні існує достатня сировинна база для видобутку альтернативних видів палива. Щорічна кількість органічних відходів по різних галузях народного господарства України складає більше 50 *млн. т.* На сьогоднішній день відходи не завжди знаходять застосування, хоч і є цінною сировиною. В сільськогосподарських підприємствах навіть не плануються показники, які б характеризували їх роботу щодо підвищення родючості ґрунту, внесення добрив особливо органічних. Тому й нагромаджуються на фермах мільйони тонн органічних добрив. Стоки тваринницьких комплексів становлять подвійну небезпеку, оскільки викликають одночасно і хімічне, і біологічне забруднення (мікроорганізмами).

Енергія, первинної і вторинної біомаси може конвертуватися в зручні для використання види палива або енергії декількома шляхами. Одним з шляхів використання біомаси є обладнання для газифікації твердої біомаси з метою виробництва автономних тепло і електростанцій.

Газифікація – спалювання біомаси при температурі 800-1500°C у присутності повітря або кисню і води з отриманням синтез-газу або генераторного газу з теплотою згорання від 10500 до 14600-16700 *кДж/м³* (за нормальних умов), чадного газу (моно оксид вуглецю), що складається з суміші, і водню: можливі домішки метану і інших вуглеводнів.

Застосовуючи більш досконалі пристрої, наприклад, *газогенератори* - пристрої для перетворення твердого або рідкого палива в газоподібну форму, що мають найбільш високу ККД (у межах 75-90%) при відносно низькій їх вартості, можна не тільки скоротити потребу у вихідному паливі більш ніж у 5 разів, але відповідно знизити емісію *CO₂* в атмосферу.

Реалізація модифікованої технології газифікації твердого палива, як складової біомаси, дозволяє використовувати його для роботи всіх типів двигунів внутрішнього згорання. При переході на газогенераторний газ потужність

двигунів практично не змінюється, значно поліпшуються екологічні показники, на 40-50% збільшується їх моторесурс.

У залежності від способу газоутворення газогенератори поділяються на три типи:

- а) газогенератори прямого процесу газифікації;
- б) газогенератори зворотного процесу газифікації;
- в) газогенератори поперечного процесу газифікації.

У газогенераторах прямого процесу газифікації (Рис.1) подання повітря здійснюється знизу (зазвичай через колосникові решітки), а газ відбирається зверху. Безпосередньо над решіткою розташована зона горіння, або окислювальна зона, в якій відбуваються окислювальні процеси. За рахунок тепла яке виділяється при цьому температура в зоні досягає 1300-1700 °С.

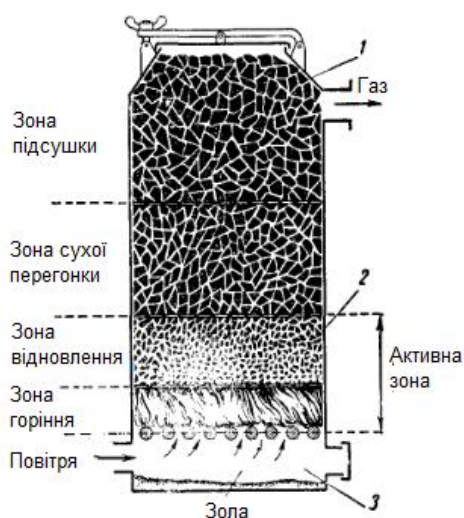


Рис. 1. Схема газогенератора прямого процесу газифікації:
1 — бункер; 2 — палильник;
3 — зольник.

Над окислювальною зоною, яка займає всього лише 30-50 мм висоти шару палива, знаходиться зона відновлення. Так як відновні реакції протікають з поглинанням тепла, то температура в зоні відновлення знижується до 700-900°С.

Вище активної зони розташовуються зона сухої перегонки і зона підсушування палива. Якщо газовідбірний патрубок, розташований у верхній частині газогенератора, як це показано на рис. 1, то ці зони обігріваються теплом, випромінюваним паливом активної зони, а також фізичним теплом газів які проходять через ці зони. Зазвичай, щоб уникнути зворотних реакцій газовідбірний патрубок розташовують на висоті, що дозволяє відвести газ

безпосередньо по його виході з активної зони.

Температура в зоні сухої перегонки становить 450-150°С, а в зоні підсушування 150-100°С. В цих зонах виділяється волога палива і летючі, смоли, які змішуються з генераторним газом, який виходить з активної зони, і виводиться через газовідбірний патрубок.

Найбільшого поширення отримали газогенератори з періодичним видаленням шлаку.

У цьому випадку висоту шахти необхідно збільшувати на деяку величину для накопичування шлаку і золи. Висота активного шару в цих газогенераторах є змінною і зменшується під час роботи.

Проведені дослідження і досвід будівництва газогенераторних установок, що був в країні в 30-40-х роках дозволили створити газогенератори нового покоління, що реалізують обернений процес газифікації.

Наявність великої кількості смол в газі, робить його непридатним, тому, що при подальшому охолодженні газу смоли конденсуються в газопроводах, порушуючи тим самим роботу газогенератора. Тому паливо з великим вмістом летючих газифікують в газогенераторах не прямого, а зворотного процесу газифікації (Рис.2). У цьому типі газогенератора повітря подається в середню по його висоті частину, в якій і відбувається процес горіння; при цьому процесі, утворювані гази рухаються донизу. Таким чином, активна зона займає частину газогенератора від місця підведення повітря до колосникової решітки, нижче якої розташований зольник з газовідбірним патрубком.

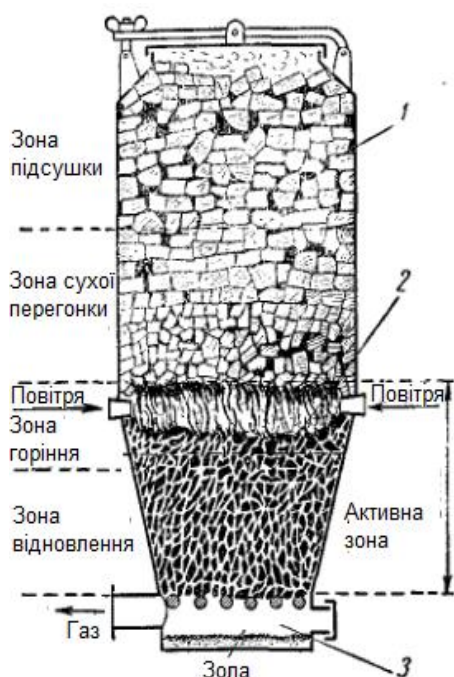


Рис. 2. Схема газогенератора зворотного процесу газифікації:
1 — бункер; 2 — пальник;
3 — зольник.

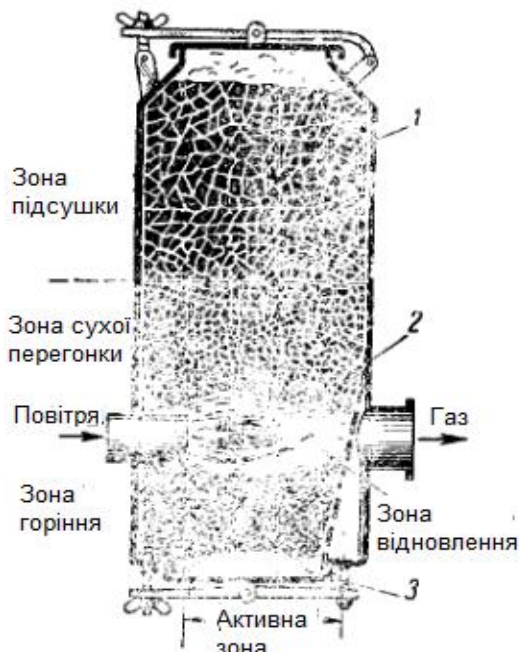


Рис. 3. Схема газогенератора поперечного процесу газифікації:
1 — бункер;
2 — пальник;
3 — зольник.

Зона сухої перегонки і зона підсушування розташовуються, як і з першому випадку, вище активної зони, але волога палива і летючі не можуть вийти з газогенератора, минаючи активну зону. Проходячи через зону з високою температурою, продукти сухої перегонки піддаються розкладанню, в результаті чого кількість смол при виході газу із генератора, як правило, незначна.

У газогенераторі поперечного процесу газифікації (рис. 3) повітря підводиться через фурму, розташовану збоку в нижній частині газогенератора. Газовідбірна решітка розташована з протилежного боку - з боку газовідбірного патрубку. Активна зона зосереджена на невеликому просторі між кінцем фурми і газовідбіркою решіткою. Над нею розташовуються зона сухої перегонки, а вище - зона підсушування палива. Цей газогенератор, так само як і газогенератор прямого процесу, непридатний для газифікації палива з великим вмістом летючих, так як він не може забезпечити отримання безсмоляного газу.

Наочне уявлення про процеси, що відбуваються в газогенераторі, дає схема, на рис. 4, яка складена стосовно прямого процесу газифікації.

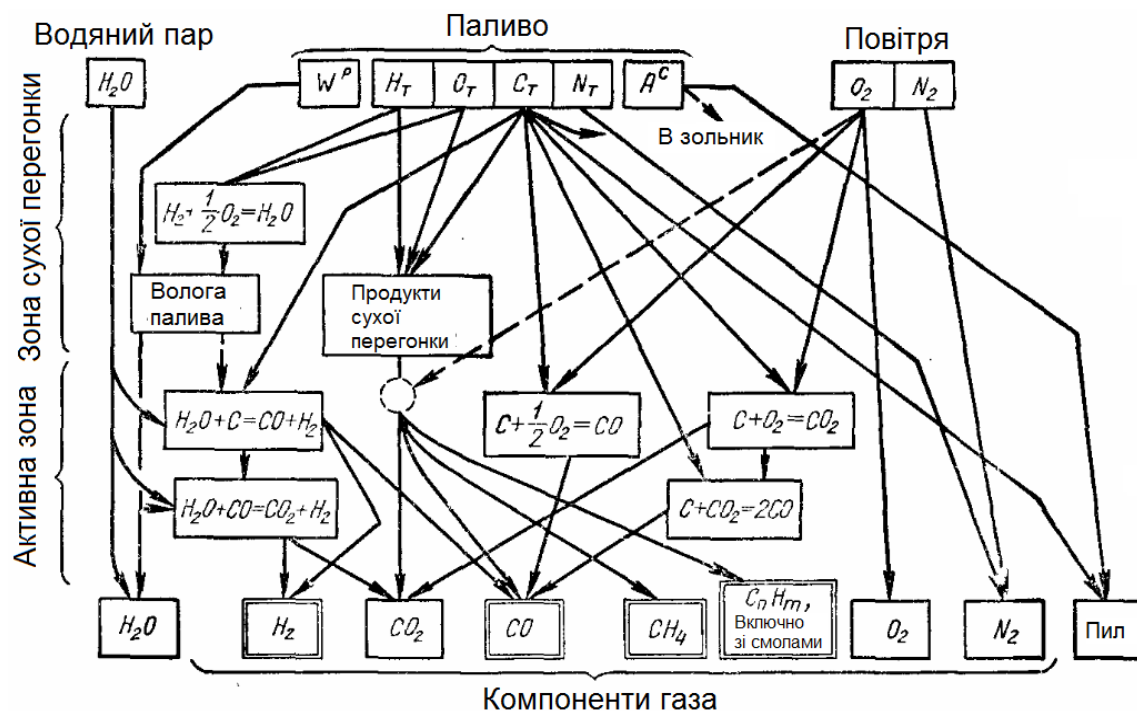


Рис. 4. Схема процесу газифікації

У верхньому ряду схеми показані вихідні продукти газифікації: паливо, що складається з вуглецю C_m , водню H_m , кисню O_m , азоту N_m , гігроскопічної вологи W^p і золи A^c ; повітря, що складається з кисню O_2 і азоту N_2 ; вода H_2O , що підводиться в газогенератор ззовні. У другому і третьому рядах, що відносяться до зон сушки і сухої перегонки, показані продукти, що виділяються в цих зонах, — гігроскопічна волога, хімічно зв'язана волога і легкі речовини. У четвертому і п'ятому рядах показані процеси, що відбуваються в активній зоні газогенератора. У нижньому ряду приведені кінцеві продукти — компоненти генераторного газу, отримані, в результаті газифікації і сухої перегонки палива.

З схеми видно, що в горінні вуглецю палива бере участь кисень повітря. Вуглець витрачається на утворення вуглекислого газу CO_2 , окисли вуглецю CO , а також на розкладання водяної пари з утворенням окислу вуглецю CO і вільного водню H_2 .

Азот повітря N_2 і азот палива N_m не беруть участь в реакціях і переходять в генераторний газ без зміни.

Частина кисню O і водню H палива утворюють хімічну воду, яка разом з гігроскопічною вологою палива W^p і вологою, підведеною ззовні, частково бере участь в процесі газифікації, а частково переходить в газ без змін.

Частини кисню, що не беруть участь у вказаних реакціях, водню і вуглецю палива утворюють продукти сухої перегонки (легкі), які в газогенераторах прямого і поперечного процесів газифікації переходять в газ в незміненому

вигляді, а в газогенераторі оберненого процесу в більшій своїй частині згорають і піддаються розкладанню (крекінг-процесу) в активній зоні.

Ці процеси, що додатково відбуваються в газогенераторі оберненого типу показані на схемі пунктирними лініями. У оберненому газогенераторі вода ззовні зазвичай не подається і компоненти водяного газу утворюються лише з вологи палива.

Зола палива A^c , а також частина не згорілого вуглецю палива C_m потрапляють в зольник і в деякій кількості виходять разом з газом з газогенератора. Таким чином, газ, що виходить з газогенератора, складається з горючих компонентів (CO , H_2 , CH_4 , C_nH_m), баласту (CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O) і містить пил, що складається із золи і сажі.

Приблизний склад газу, отриманого в газогенераторі оберненого процесу газифікації при роботі на деревних чурках з абсолютною вологістю 20%, наступний (у % за об'ємом):

Водню H_2	16,1
Вуглекислого газу CO_2	9,2
Окислів вуглецю CO	20,9
Метану CH_4	2,3
Вуглеводнів C_nH_m	0,2
Кисню O_2	1,6
Азоту N_2	49,7

На 1 м^3 сухого газу доводиться (г):

Вологи	97
Пилу	2,5
Смоли	0,5

Співвідношення між горючими компонентами і кількістю баласту в газі залежать від кількості води, що бере участь в процесі, кількості легких в паливі і від режиму газифікації.

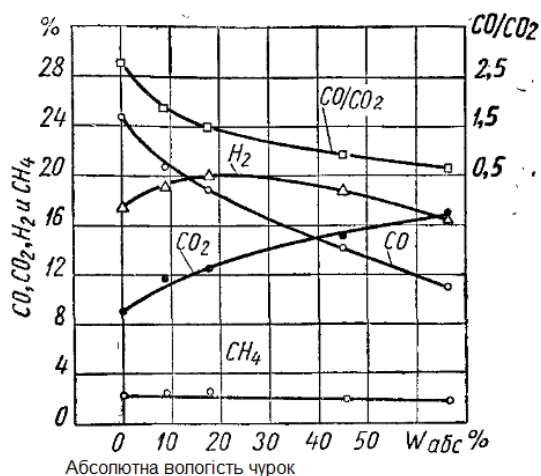


Рис. 5. Вплив вологості деревних чурок на склад генераторного газу

На рис. 5 показаний вплив вологості деревних чурок на склад генераторного газу. Як видно з діаграми, із збільшенням вологості деревини кількість вуглекислого газу збільшується, кількість окислу вуглецю зменшується, кількість водню спочатку збільшується (до вологості 20—25%), а потім теж зменшується в результаті пониження температури в активній зоні. Кількість метану CH_4 зі збільшенням вологості зменшується на незначну величину. В результаті теплотворність газу

зменшується зі збільшенням вологості деревних чурок.

На рис. 6 показаний вплив вмісту легких в деревному вугіллі на якість генераторного газу, отриманого в газогенераторі поперечного процесу газифікації.

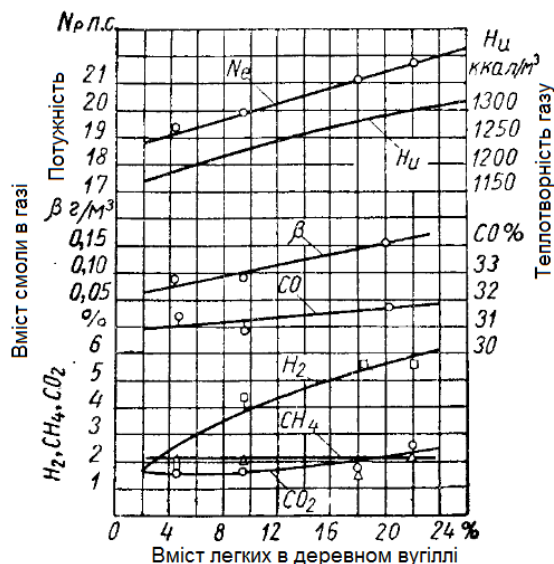


Рис. 6. Вплив вмісту легких в деревному вугіллі на якість генераторного газу і потужність двигуна при роботі газогенератора оберненого процесу газифікації

З діаграми видно, що зі збільшенням кількості легких з 2 до 22% вміст CO , H_2 , CO_2 і смол в газі безперервно зростає. В результаті цього теплотворення газу і потужність двигуна, працюючого на цьому газі, збільшуються на 15%. Максимальна кількість смол (при кількості легких 22%) не перевищує $0,16 \text{ г/м}^3$, що є допустимим. Проте при більшому вмісті легких в паливі, кількість смол в газі збільшується і перевищує допустиму величину.

Найбільш вигідний режим газифікації залежить від правильного вибору основних параметрів газогенератора: інтенсивності газифікації, швидкості дуття і висоти реакційного шару палива.

Під інтенсивністю газифікації або напруженістю горіння q розуміють кількість палива в кілограмах, що спалюється в 1 годину на 1 м^2 площі поперечного перетину камери газифікації в плоскості підведення повітря (площина фурменого поясу в газогенераторах оберненого процесу газифікації і площина колосників в газогенераторах прямого процесу). Інтенсивність газифікації

$$q = \frac{G_T}{F} \text{ кг/м}^2 \text{ год}$$

Чим більш інтенсивніше ведеться процес газифікації тим кращою буде якість газу, так як при цьому буде збільшуватись температура в активній зоні газогенератора. В результаті підвищення температури рівноважний склад газу зміщується у бік вмісту більшої кількості горючих компонентів CO і H_2 .

Проте при підвищенні інтенсивності горіння збільшується швидкість проходження газу в шарі палива, внаслідок чого посилюється опір газогенератора, а отже, зменшується коефіцієнт наповнення двигуна. Крім того, при роботі на паливах з високим вмістом золи підвищення напруженості горіння обмежене утворенням шлаку в камері газифікації і припиненням внаслідок цього нормальної роботи двигуна.

В залежності від вигляду вживаного палива інтенсивність горіння береться в межах $200\text{--}900 \text{ кг/м}^2\text{год}$.

Великий вплив на протікання процесу газифікації надає швидкість дуття повітря v в камеру газифікації. Із збільшенням швидкості дуття підвищується температура на поверхні палива, що знаходиться в струмені повітря, що поступає, тобто виходить місцеве збільшення інтенсивності горіння, величина якої досягає

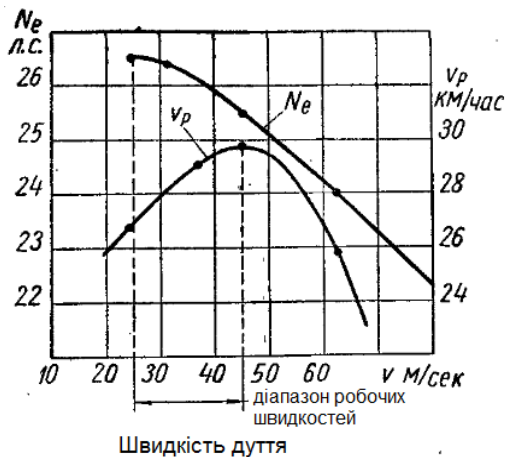


Рис. 7. Вплив швидкості дуття на потужність двигуна і прийомистість автомобіля

$50000 \text{ кг/м}^2\text{год}$. В результаті вихід первинного окислу вуглецю CO збільшується і робота газогенератора стає гнучкішою. Проте не можна підвищувати швидкість дуття безкінечно, оскільки опір газогенератора, що зростає при цьому, погіршуватиме наповнення циліндрів двигуна газо-повітряною сумішшю і знижуватиме його потужність. На рис. 7 показаний вплив швидкості дуття на потужність двигуна і прийомистість автомобіля, яка за інших рівних умов знаходиться в прямій залежності від гнучкості роботи газогенератора.

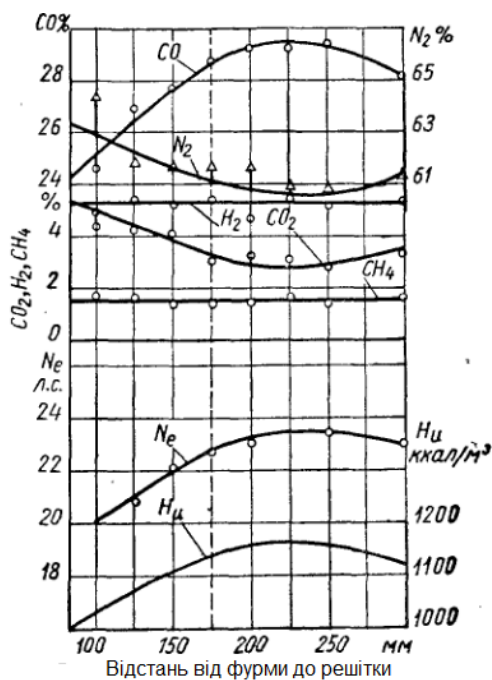


Рис. 8. Зміна якості газу і потужності двигуна в залежності від довжини активної зони газогенератора поперечного процесу газифікації, працюючого на деревному вугіллі

Із збільшенням швидкості дуття більше 25 м/сек потужність двигуна помітно падає, але, не дивлячись на це, має сенс збільшити цю швидкість до 45 м/сек , оскільки прийомистість автомобіля в цьому випадку стає найбільш високою. Подальше збільшення швидкості дуття супроводиться зниженням не лише потужності, але і прийомистості автомобіля. Зазвичай швидкість дуття в газогенераторах з фурменною подачею повітря приймається в межах $20\text{--}50 \text{ м/сек}$.

Висота активної зони H_3 робить істотний вплив на якість генераторного газу. Її величина визначає час зіткнення газу і водяної пари з розжареним вуглецем і залежить від температури активної зони і реакційної здатності палива. Чим більше буде температура і чим вище реакційна здатність палива (тобто більше пористість і менше розмір шматків), тим меншої висоти (або довжини) може бути активна зона, що

забезпечує завершення відновних процесів. Дуже велика висота активної зони створює сприятливі умови для протікання зворотних реакцій, і тому так само невигідна, як і дуже мала висота.

Це наочно показано рис. 8 діаграмою зміни складу і теплотворення газу залежно від довжини активної зони в газогенераторі поперечного процесу газифікації, що працює на деревному вугіллі (змінювалася відстань від фурми до газовідбірних ґрат)

Як видно з діаграми, для даної продуктивності газогенератора ($60 \text{ м}^3/\text{год}$ газу) найбільш вигідна довжина активної зони рівна 225 мм. При цій довжині вміст окислу вуглецю CO досягає максимального значення. Кількість водню H_2 і метану CH_4 не змінюється, оскільки метан утворюється в зоні сухої перегонки, а водень — в безпосередній близькості від газовідбірної решітки.

Отже, перехід до розширеного використання поновлюваних джерел енергії, дозволить вирішити не тільки енергетичні питання, але й низку проблем, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища, глобальним потеплінням, зменшить загрозу енергетичної та економічної кризи, сприятиме надійності енергопостачання, підвищить рівень національної безпеки і дозволить створити велику кількість нових робочих місць.

Тож, підсумовуючі викладене, можемо стверджувати, що газогенераторні установки:

1. Можуть застосовуватись на об'єктах різного призначення;
2. Мають високий ККД (у межах 75-90%);
3. Не завдають шкоди людині і навколишньому середовищу.

Література

1. Ямпольский Ю.П. Элементарные реакции и механизм пиролиза. – М.: Химия, 1990. – 216с.
2. Колеров Л.К. Газомоторные установки. – Москва-Ленинград: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951.

**II міжвузівська науково-практична конференція
«Наукова діяльність як шлях формування професійних
компетентностей майбутнього фахівця», «НПК-2011»**

Д. Астапович Ошибка! Закладка не определена.
Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Холодов Р.І.

**ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ BETACOOOL ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ЕМІТАНСА ПУЧКА АНТИПРОТОНІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
В НАКОПИЧУВАЛЬНОМУ КІЛЬЦІ HESR**

Сучасний рівень наукового пізнання світу багато в чому визначається досягненнями фізики елементарних частинок. Основним інструментом досліджень в ФЕЧ є найскладніші прискорювально-накопичувальні комплекси, призначені для проведення експериментів з частинками високих енергій.

Одним з таких нових міжнародних проєктів є проєкт з дослідження антипротонів і іонів - Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR, GSI, Німеччина).

Найбільш складною ланкою проєкту FAIR є антипротонне накопичувальне кільце на високу енергію High Energy Storage Ring (HESR) разом з експериментальною установкою PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt). Для управління параметрами іонних пучків в даному накопичувальному кільці використовується метод електронного охолодження, який в свою чергу може бути реалізовано за допомогою використання програмного пакета BETACOOOL.

Основна мета програми BETACOOOL - моделювання довготривалих процесів (порівняно з періодом обертання іонів), що ведуть до зміни функції розподілення іонів у шестимірному фазовому просторі. Рух іонів у накопичувачі передбачається стійким і розглядається в лінійному наближенні.

У програмі реалізовані три алгоритми для моделювання змінення функції розподілу іонів:

- 1) моделювання динаміки середньоквадратичних (RMS) параметрів функції розподілу;
- 2) моделювання зміни функції розподілу з використанням методу Монте-Карло (алгоритм «модельний пучок»);
- 3) багаточастинковий траєкторний аналіз (алгоритм «трекінг») на основі техніки молекулярної динаміки.

Фізична модель, використовувана в алгоритмі моделювання RMS-параметрів, оснований на наступних припущеннях:

- 1) іонний пучок має розподіл Гауса по всіх ступенях свободи, і вигляд розподілу не змінюється в процесі еволюції;
- 2) максимум всіх функцій розподілу збігається з рівноважною орбітою [8].

Еволюція параметрів іонного пучка при його русі всередині накопичувача описана за такою системою з чотирьох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{N} = N \sum_j \frac{1}{\tau_{life,j}} \\ \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i \sum_j \frac{1}{\tau_{i,j}} \end{cases}$$

де N є число часток, ε_i є середнім значенням фазового об'єму пучка (індекс i відповідає ступеню свободи). Для поперечних ступенів свободи ε_i відповідає емітансу пучка:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \varepsilon_v \sum_j \frac{1}{\tau_{v,j}}$$

$$\frac{d\varepsilon_h}{dt} = \varepsilon_h \sum_j \frac{1}{\tau_{h,j}}$$

де ε_h , ε_v - середньоквадратичні значення горизонтального і вертикального емітансів пучка відповідно.

Для позовжних ступенів свободи, він задається наступним виразом:

$$\varepsilon_{ion} = \begin{cases} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2, & \text{при границі} \\ \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \frac{1}{\Omega_s^2} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta p}{p} \right) \right]^2, & \text{згрупований} \end{cases}$$

Характерні часи є функціями трьох емітансів і числа частинок і мають позитивний знак для процесів нагріву і негативний - для процесів охолодження. Негативний знак характерного часу життя означає втрату частинок, позитивний знак можливий у разі збільшення числа частинок при інжекції. Результат моделювання представляється у вигляді залежностей емітансів і числа частинок від часу.

Дослідження динаміки іонного пучка для довільної форми функції розподілу виконується з використанням алгоритму модельного пучка. У цьому алгоритмі іонний пучок представляється масивом модельних частинок. Процеси охолодження і нагріву, що беруть участь у моделюванні, ведуть до зміни компонентів імпульсу і числа частинок, які розраховуються відповідно до кроку моделювання за часом. Результат моделювання може бути представлений як у вигляді зміни профілю пучка, так і у вигляді залежності емітансів і числа частинок від часу.

Для моделювання внутріпроменевого розсіювання через кулонівську взаємодію між іонами використовується алгоритм траєкторного аналізу «трекінг». Одна з цілей розвитку цього алгоритму - моделювання процесу утворення кристалічних станів іонних пучків [8].

Структура основних об'єктів програми BETACOOOL, зокрема моделі накопичувального кільця і іонного пучка, розроблена таким чином, що можливо використання всіх трьох алгоритмів для одних і тих самих вхідних параметрів. Ефекти охолодження і нагрівання розроблені на базі спільних стандартів, і з однаковими параметрами вони можуть бути використані в кожному з алгоритмів моделювання динаміки пучка.

Програма BETACOOOL складається з двох незалежних частин: фізичної коду, написаного в стандарті мови C++, і інтерфейсної частини, що працює тільки під управлінням операційної програми Windows. Взаємодія між двома частинами проходить за допомогою файлів трьох типів: вхідних, вихідних і файлів для управління процесом моделювання. Така організація дозволяє, з одного боку, використовувати BETACOOOL на ПК, контролювати процес моделювання та аналізувати результати під час розрахунку, з іншого боку, фізична частина коду може бути відкомпільована під UNIX і використана окремо від інтерфейсної частини.

Інтерфейсна частина складається з виконуваного файлу Bolide.exe, *.dfm, файлів, що містять інформацію про зовнішній вигляд BETACOOOL, і вхідних файлів для обробки результатів моделювання.

Фізична частина програми складається з виконуваного файлу Betacool.exe, відкомпільованого для операційних систем Windows або UNIX, і файлів вхідних параметрів.

Література

1. Alekseev N. et al. Project of TWAC Electron Cooler // Physica Scripta. 2003. V.T104. P. 160-163.
2. Lavrentev A., Meshkov I. The computation of electron cooling process in a storage ring. JINR Preprint E9-96-347. Dubna, 1996.
3. Lehrach A., Boine-Frankenheim O., Hinterberger F., Maier R., and Prasuhn D. Beam performance and luminosity limitations in the High-Energy Storage Ring (HESR)
4. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Trubnikov G., Pivin R. BETACOOOL Physics Guide for simulation of long term beam dynamics in ion storage rings (since 1995).- Dubna, 2007.
5. Meshkov I. et al. Computer simulation of ECOOL and IBS process in ACR and DSR using BETA-COOOL program. Preprint RIKEN-AF-AC-21. 2000.
6. Meshkov I. et al. Electron cooling application for luminosity preservation in an experiment with internal targets at COSY. Institut fur Kernphysik. 2003.

7. Syresin E. et al. S-LSR low ion energy mode. Preprint NIRS HIMAC-086. 2004.
8. Мешков И. Н., Пивин Р. В., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Трубников Г. В. Численное моделирование динамики частиц в накопителях с использованием программы BETACOOЛ// Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т.3, №7(136), С.84-88.

О. Дігтярьов

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Салтикова А.І.*

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Фактором, що визначає розвиток економіки людського суспільства є енергетика. Збільшення енергооснащеності промислової технології та зв'язаної з нею продуктивності праці базується на визначальних темпах росту виробництва електроенергії.

Аналіз процесів виробництва, передачі, розподілу та перетворення електроенергії свідчить про те, що великі резерви існують на етапі перетворення енергії, на який припадає близько 60 % від її виробництва. Тому зростає значущість ефективності пристроїв перетворювальної техніки, основу яких складають напівпровідникові перетворювачі.

Ресурси традиційних джерел енергії у попередній період забезпечували безперервне зростання економіки, проте в найближчому майбутньому обмеженість запасів природного палива приводить до зниження темпів виробництва та споживання енергії. Тому стає проблема розробки мір впливу на енергоємність існуючих технологій, створення нових технологій та альтернативних джерел енергії. У всьому світі проводяться дослідження практично по всіх відомих зараз напрямках пошуку нетрадиційних способів одержання енергії. Фотоелектричне перетворення сонячної енергії в електричну є перспективним і екологічно чистим способом з невичерпним запасом енергії.

Сучасний стан перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою напівпровідникових сонячних елементів дозволяє використовувати їх для енергозабезпечення різних наземних об'єктів, але знаходяться у віддалених районах далеко від централізованих ліній електропередач. Проте висока вартість сонячних елементів є основною причиною, що стримує наразі створення сонячних фотоелектричних станцій промислово значущих потужностей [1].

Використання монокристалічного кремнію з відходів електронної промисловості створює передумови для випуску більш дешевих сонячних елементів. Збираючи модулі сонячної батареї послідовно-паралельно, можна збільшувати або зменшувати робочі напруги та струм сонячних батарей для узгодження електричних характеристик сонячних батарей з енергоспоживачами. Внаслідок того, що кожний модуль сонячної батареї, у свою чергу, складається з послідовно-паралельно з'єднаних окремих елементів, кіл і секцій, не існує принципових обмежень на формування сонячних батарей практично на будь-яку напругу та струм.

Тому актуальним є підвищення ефективності та надійності автономних напівпровідникових систем електропостачання на основі сонячних елементів, а також комплексне вивчення способів зниження вартості сонячних елементів.

Мета роботи полягала в дослідженні шляхів підвищення ефективності роботи сонячних елементів.

Завданнями роботи було: розглянути фізичні основи роботи сонячних елементів, основні недоліки та шляхи підвищення ефективності роботи сонячних елементів та визначити ККД кремнієвого сонячного елемента та його фотохарактеристики.

На основі проведеного у роботі дослідження можна зробити такі висновки:

1. На основі літературних джерел проведено аналіз фізичних основ роботи сонячних елементів, приділено увагу перетворенню оптичного випромінювання в електроенергію в напівпровідникових елементах, розглянуто конструкції сонячних елементів;

2. Досліджено шляхи підвищення ефективності сонячних елементів, такі як застосування багатофункціональних оптичних покриттів, створення оптимізованих каскадних і матричних сонячних елементів, розглянуто способи поліпшення властивостей напівпровідникової структури оптимальним легуванням і створенням вбудованих електричних полів;

3. Проведено дослідження по визначенню фото характеристик кремнієвого фотоелемента, одержані залежності фото-ЕРС від світлового потоку, отримано навантажувальну характеристику кремнієвого фотоелемента та розраховано коефіцієнт корисної дії, який склав 4 відсотки [2].

Література

1. Глиберман А.Я., Зайцева А.К. Кремниевые солнечные элементы. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 72 с.
2. Колтун М.М. Солнечные элементы. – М.: Наука, 1987. – 192 с.

М. Дяченко

*Інститут прикладної фізики НАН України
Науковий керівник – Холодов Р.І.*

ЕЛЕКТРИЧНА СПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ЗАМАГНІЧЕНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ПЛАЗМИ З ВРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕМПЕРАТУРИ

На сучасному етапі розвитку фізики високих енергій при дослідженнях взаємодії швидких важких іонів переходять до експериментів із зустрічними пучками. У цьому випадку уся енергія початкового руху може перейти у енергію народжених нових частинок з великими масами, але така постановка експериментів потребує створення пучків іонів з малими емітансами. Найвідомішим і ефективно вживаним методом охолодження є електронне охолодження. Воно знаходить застосування у сучасних колайдерах важких та легких частинок. Це в свою чергу робить актуальними задачі з теорії проходження іонів через замагнічену електронну плазму.

Ідею методу електронного охолодження запропонував Будкер Г.І. в 60-их рр.. В основі такого охолодження покладено зіткнення накопичених іонів з частинками введенного "холодного" електронного пучка. При кожному зіткненні частина поперечної енергії іона передається електронам. Таким чином іонний пучок охолоджується, а електронний відповідно нагрівається. Нагрітий електронний пучок неперервно виводиться з накопичувальної системи і постійно "оновлюється" холодним пучком, так що циркулюючий пучок постійно охолоджується [4].

Слід підкреслити розходження експериментальних результатів з теорією парних зіткнень, яка успішно використовувалася до цього часу в методі електронного охолодження. Альтернативними теоріями є метод кінетичного рівняння Власова (діелектрична модель) та квантова теорія поля, які враховують дальні зіткнення частинки з електронною плазмою. Діелектрична модель дає можливість одержати результати лише з логарифмічною точністю. Перевагою ж методів квантової теорії поля є можливість отримання точних результатів та узагальнення їх на випадок температур, відмінних від нуля.

В реальних експериментах електронний пучок має розкид по швидкостях (в електронному охолоджувачі розподіл по швидкостям має ще й суттєву анізотропію, яка пов'язана з прискоренням пучка електронів), тому актуальним є врахування у втратах енергії поправок вищого порядку малості по температурі, але для цього необхідно знайти відповідно поправки для діелектричної проникності.

В даній роботі методами квантової теорії поля (метод функції Гріна та діаграмна техніка) знайдена електрична сприйнятливості замагніченої електронної плазми з врахуванням анізотропії температури та квантові поправки до неї. Цей метод вперше був застосований к дослідженню взаємодії зарядженої частинки з плазмою без магнітного поля в роботі Ларкіна [2]. Далі він був використаний Ахієзером [1] для знаходження втрат енергії в магнітоактивній електронній плазмі та діелектричної проникності холодної плазми.

За методом квантової теорії поля сприйнятливості плазми визначається

$$\chi(\vec{k}, \omega) = -\frac{P(\vec{k}, i\omega)}{k^2}, \quad (1)$$

де $P(\vec{k}, i\omega)$ – поляризаційний оператор, для розрахунку якого використовується діаграмна техніка і в однопетльовому наближенні

$$P(\vec{r} - \vec{r}', ik_0) = \frac{2e^2}{\beta} \sum_{p_0} G(\vec{r}, \vec{r}', p_0) G(\vec{r}', \vec{r}, p_0 - k_0), \quad (2)$$

де $ip_0 = \frac{2n+1}{\beta} \pi$, $\beta = \frac{1}{kT}$, $n = 0, \pm 1, \dots$, $G(\vec{r}, \vec{r}', p_0)$ – функція Гріна електрона в магнітному полі.

За результатами роботи Ахієзера [1] електрична сприйнятливості визначається

$$\chi(\omega, \vec{k}) = -\frac{2e^2 m \eta}{(2\pi\hbar)^2} \frac{1}{k^2} \sum_{\nu, \nu'} \Lambda_{\nu\nu'} \left(\frac{k_t}{\sqrt{2m\eta}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} dp_z \frac{n_{\nu p_z} - n_{\nu', p_z - \hbar k_z}}{\varepsilon_{\nu p_z} - \varepsilon_{\nu', p_z - \hbar k_z} - \hbar\omega}, \quad (4)$$

$$\text{де } \eta = \frac{eH}{mc}, \quad k_t = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad \Lambda_{\nu\nu'}(a) = \int_0^{\infty} J_0(2a\sqrt{s}) L_{\nu}(s) L_{\nu'}(s) e^{-s} ds.$$

В роботі розглядається замагнічений електронний газ з анізотропним за температурою розподілом з параметрами, які використовуються для охолодження пучків іонів ($N = 2,8 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$, $\omega_p = 3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$, $\eta = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$, $T_{\perp} = 1 \text{ eV}$, $T_{\parallel} = 0.01 \text{ eV}$). Враховуючи ці умови розклад $\Lambda_{\nu\nu'}(a)$ проводиться до членів, які дають можливість отримати температурну залежність, тобто

$$\Lambda_{\nu\nu'}(a) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k a^{2k} (k!)^{-2} \lambda_{\nu\nu'}^{(k)} \approx \lambda_{\nu\nu'}^{(0)} - a^2 \lambda_{\nu\nu'}^{(1)} + \frac{a^4}{4} \lambda_{\nu\nu'}^{(2)}, \quad (5),$$

$$\text{де } \lambda_{\nu\nu'}^{(0)} = \delta_{\nu\nu'}, \quad \lambda_{\nu\nu'}^{(1)} = -(\nu+1)\delta_{\nu+1, \nu'} + (2\nu+1)\delta_{\nu, \nu'} - \nu\delta_{\nu-1, \nu'},$$

$$\lambda_{\nu\nu'}^{(2)} = (\nu+1)(\nu+2)\delta_{\nu+2, \nu'} - 4(\nu+1)^2 \delta_{\nu+1, \nu'} + 2(3\nu^2 + 3\nu + 1)\delta_{\nu, \nu'} - 4\nu^2 \delta_{\nu-1, \nu'} + \nu(\nu-1)\delta_{\nu-2, \nu'}.$$

Спецфункція $\Lambda_{\nu\nu'}(a)$ та її наближення при $a \ll 1$ зображені на рис.1.

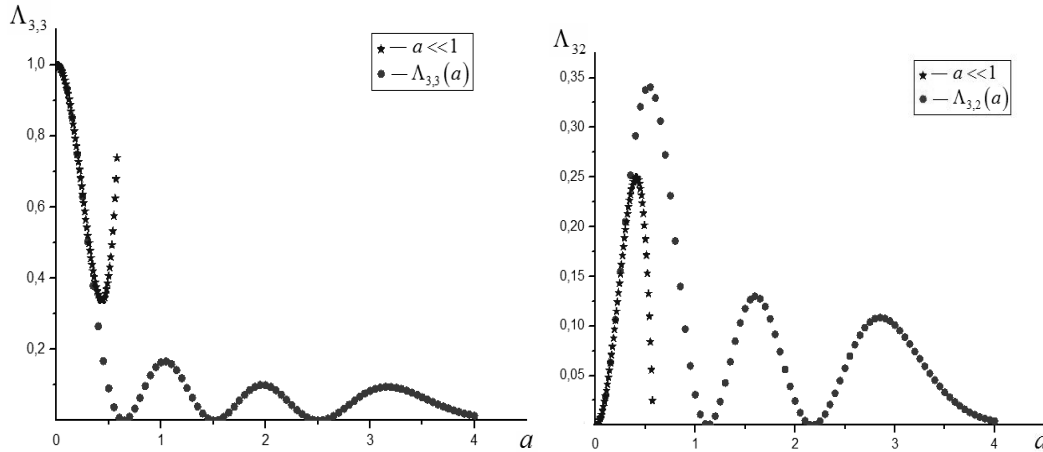


Рис. 1. Графіки точної залежності спецфункції $\Lambda_{\nu\nu'}(a)$ від параметру a та граничний випадок при $a \ll 1$

Після проведення математичних перетворень формули (4) можна отримати

$$\begin{aligned} \chi(\omega, \vec{k}) &= \chi_{кл}(\omega, \vec{k}) + \chi_{кв}(\omega, \vec{k}) \\ \chi_{кл}(\omega, \vec{k}) &= -\frac{\omega_{pe}^2}{k^2} \left\{ \frac{k_z^2}{\omega^2} + \frac{k_{\perp}^2}{(\omega^2 - \eta^2)} + \frac{T_{\parallel}}{m} k_z^2 \left[\frac{3k_z^2}{\omega^4} + k_{\perp}^2 \frac{(3\omega^2 + \eta^2)}{(\omega^2 - \eta^2)^3} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_{\perp}}{m} k_{\perp}^2 \left[\frac{3k_{\perp}^2}{(\omega^2 - 4\eta^2)(\omega^2 - \eta^2)} + \frac{k_z^2}{\omega^2} \frac{(3\omega^2 - \eta^2)}{(\omega^2 - \eta^2)^2} \right] \right\} \\ \chi_{кв}(\omega, \vec{k}) &= -\frac{\omega_{pe}^2}{k^2} \left\{ \frac{3\hbar k_{\perp}^4 k_z^2 T_{\perp}}{8m^2 \omega^2 \eta^3} + \frac{\hbar^2 k_{\perp}^4 k_z^2}{8m^2 \omega^2 \eta^2} + \frac{\hbar^2 k_z^6}{4m^2 \omega^4} + \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2 k_z^4}{4m^2} \frac{(3\omega^2 + \eta^2)}{(\omega^2 - \eta^2)^3} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

В граничних випадках (6) співпадає з добре відомими формулами класичної електродинаміки плазми.

Література

1. Ахиезер И.А. К теории взаимодействия заряженной частицы с плазмой в магнитном поле // ЖЭТФ. 1961. – Т.40. – № 3. – С.954-962.
2. Ларкин А.И. Прохождение частиц через плазму // ЖЭТФ. 1959. – Т.37. – № 1. – С.264-272.
3. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. – М.: Высшая школа, 1978. – 407 с.
4. Меньшиков Л.И. Новые направления в теории электронного охлаждения. // УФН. – 2008. – Т.178. – №7. – С.673-708.

М. Ісаєв

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Салтикова А.І.*

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ТОНКИХ ПЛІВОК МЕТОДОМ ВІМС

Відносно нещодавно у зв'язку із загальним розвитком експериментальної техніки і радіоелектроніки увагу фізиків привернули нові, раніше не досліджувані об'єкти, які отримали назву тонкі плівки. Сьогодні вони набули широкого використання у різних галузях науки і техніки. Вони використовуються у точних вимірних приладах, автоматичні, телебаченні, обчислювальній техніці, системах зв'язку. В останній час при використанні тонких плівок у нанотехніці велике значення має наявність інформації про їх елементний склад та розподіл складових компонент на їхній поверхні і в об'ємі.

З усіх існуючих експериментальних методів дослідження тонких плівок особливе місце займає вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС), так як тільки вона дозволяє в одному приладі і одним методом отримати найбільш повну інформацію про якісний і кількісний склад об'єкта, а також побудувати просторовий розподіл елементів у зразку. Цей метод також володіє низьким порогом чутливості для більшості елементів (менше 10^{-4} моноатомного шару), високою роздільною здатністю по поверхні (порядка мікрметра), можливістю ізотопного аналізу і виявлення елементів з малими атомними номерами (H, Li, Be і т.д.) [2].

Метод ВІМС ґрунтується на зондуванні поверхні досліджуваного зразка пучком прискорених іонів (здебільшого інертних газів), кінетична енергія яких становить 1–20 кеВ. Ці іони називаються первинними. Результатом їхньої взаємодії з зразком є декілька видів випромінювання, кожне з яких може бути використане для аналізу складу речовини мішені [1]. У методі ВІМС для аналізу хімічного складу речовини використовуються позитивно або негативно заряджені іони, або нейтральні атоми мішені. Простіше використовувати іони, так як для реєстрації нейтральних атомів потрібно додатково мати обладнання для їхньої іонізації.

Як і будь-який метод дослідження, ВІМС має свої недоліки. Вони пов'язані з його руйнівним впливом на досліджуваний зразок і складністю одержання точних результатів кількісного аналізу. Тому для одержання більш достовірної інформації його необхідно використовувати в комплексі з іншими методами дослідження речовини [3].

Література

1. В.Б. Лобода, В.С. Іваній, С.М. Хурсенко, В.С. Кшнякін, В.О. Кравченко, А.І. Салтикова, Ю.О. Шкурдода. Сучасні методи дослідження структури речовини. – Суми: Університетська книга, 2010. — 259 с.
2. Методы анализа поверхностей. Под ред. А. Зандерны. – М.: Мир, 1979. – 582 с.
3. В.Т. Черепин. Ионный микрозондовый анализ. – К.: Наукова думка, 1992. – 344 с.

К. Квашко

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Стадник О.Д.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи полягає в дослідженні електричних властивостей полімерного композиційного матеріалу на основі фторопласту, наповненого залізом, а саме знаходження залежності вольт-амперної характеристики від масової частки заліза і дослідження вольт-амперної характеристики при різних температурах.

У даній роботі був використаний метод вимірювання електричних властивостей композиційних матеріалів і метод кристалізації з розплаву для виготовлення досліджуваних зразків, методи розрахунку похибок вимірювань, а також методи аналітичного вивчення стану досліджуваної проблеми на основі відомих наукових джерел.

Теоретичне значення у дослідженні електричних властивостей полімеру, зокрема вольт-амперної характеристики, полягає в тому, що полівініліденфторид є мало дослідженим матеріалом, особливістю структури якого є можливість існування у трьох кристалічних α , β і γ – модифікаціях і раніше такі досліді практично не проводились.

Практичне значення даної роботи полягає у тому, що полівініліденфторид використовують в якості електроізоляційних матеріалів, електретів а також в хімічній промисловості, тому дослідження електричних властивостей дасть багато корисної інформації, щодо використання досліджуваного об'єкта в цих галузях.

Залежність сили струму від прикладеної напруги має нелінійний характер, причому сила струму зростає зі збільшенням масової частки заліза в полімерному композиті.

Температурна залежність вольт-амперної характеристики суттєво залежить від вмісту заліза у фторопласті, а сила струму збільшується при збільшенні температури, проте при малому вмісті заліза - 1-10% сила струму майже не відрізняється при різних температурах, що зумовлено вкладом в провідність переважно полімерної матриці.

Досліджувані зразки мають опір, який скачками змінюється при збільшенні температури, що зумовлено порушенням металічних контактів між частинками наповнювача.

Встановлено, що для зразків полівініліденфториду, який містив 40% і 70% заліза величина електричного опору спадає при збільшенні температури до 150⁰С, що, можливо, пов'язане з релаксацією напруг у композиційному матеріалі та виникненням значного усадження зразків.

Література

1. Баронин Г.С., Кербер М.Л., Физико-химические основы переработки полимеров в изделия для машин и оборудования. – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 115 с.
2. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В., Курс физики полимеров. – Л.: Химия, 1976. – С. 252-254.
3. Берлин А., Современные полимерные композиционные материалы (ПМК). – Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. – С. 57-65.
4. Блайт С.Р., Блур Д., Электрические свойства полимеров. Пер. с англ -Д.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
5. Болтон У., Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник. Пер. с англ. - М Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – С.207-210, ил (Серия «Карманный справочник»).
6. Вонсонский С.В., Магнетизм. – М.: Наука, 1971 – 1032с.
7. Практикум по химии и физике полимеров: Учеб. изд./ Н.И. Аввакумова, Л.А. Бударина, С.М. Дивгун и др.; Под ред. В. Ф. Куренкова. – М.: Химия, 1990. – С. 170-176.
8. Селвуд П., Магнетохимия. – М.: Ил, 1958. – 457 с.
9. Солоухин Р., Методы физических измерений. – М.: Наука, 1975. – 389с.

Т. Кулик

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

Науковий керівник – Салтикова А.І.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВІМС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ТОНКИХ ПЛІВОК

Мас-спектрометрія - один з найбільш вагомих та інформативних методів дослідження структури плівкових матеріалів і хімічного аналізу складних речовин та їх суміші.

Визначення хімічного складу поверхні твердого тіла або поверхні розділу твердих тіл набуває першочергового значення в таких галузях науки і техніки, як фізика тонких плівок, мікроплівкова електроніка, корозія, адгезія, поверхнева дифузія і спікання та ін., де знання елементного складу поверхні необхідне для розуміння суті фізико-хімічних процесів, що на ній відбуваються.

Одним із сучасних методів, який забезпечує розв'язання цих задач, є вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС), який ще часто називають іонним мікроаналізом.

ВІМС є одним із найбільш чутливих методів такого аналізу - кількість речовини, яка використовується для рядового аналізу, становить лише кілька пікограм (10-12 г). Це дозволяє здійснювати аналіз не тільки макрооб'єктів, а й мікрооб'єктів. Метод ВІМС ґрунтується на зондуванні досліджуваної поверхні твердого тіла пучком прискорених іонів інертних газів, кінетична енергія яких становить $E_k = 1-20$ кеВ. За таких енергій первинні іони проникають у досліджувану речовину на глибину в кілька нанометрів. Вибиті вторинні іони імітують з поверхневого шару, глибиною порядку 1 нм і поступають на вхід мас-спектрометра, де відбувається їх аналіз по масах. За допомогою мас-спектрометра можна одночасно аналізувати хімічний склад розпиленої речовини мішені і одержувати інформацію про розподіл елементів за глибиною поверхні зразка для будь-яких матеріалів: діелектриків, напівпровідників, металів.

На методі ВІМС ґрунтується робота мас-спектрометра МС-7201М, який дає можливість: контролювати хімічний та ізотопний склад поверхні металів, напівпровідників, тонких плівок; проводити дослідження в області фізики поверхні; здійснювати пошаровий аналіз; вивчати процеси корозії, окислення, об'ємної та поверхневої дифузії.

ВІМС є перш за все технікою пошарового аналізу, що відрізняється від інших тим, що "оголення" аналізованих шарів і формування сигналу про їх склад здійснюється в одному процесі, режимом якого легко керувати. ВІМС — руйнуючий метод, тому одне і те ж місце можна проаналізувати лише один раз. Але, оскільки пляма аналізу, як правило, мала, то збиток зразку завдається мінімальний, і пошаровий аналіз можна повторити на сусідньому місці, яке, правда, може бути забруднене продуктами розпилювання при першому аналізі, але це можна врахувати без особливих зусиль.

Пошаровий аналіз методом ВІМС методично надзвичайно простий. Необхідно налаштувати мас-спектрометр на пік, що представляє аналізований елемент або з'єднання, і записати зміну висоти піку залежно від часу іонного розпилювання. Висота піку пропорційна концентрації, а час розпилювання — глибині шару. Якщо відомі співвідношення між цими величинами, то можна побудувати концентраційний профіль. Зазвичай пропорційність між струмом і концентрацією витримується в багатьох важливих випадках, і практично завжди при малому вмісті (близько 1%) домішок заміщення.

Що стосується геометрії, то пошаровий аналіз доцільно приводити для шарів і плівок, товщина яких не перевищує декількох мікрометрів. Інакше час вимірювань стає дуже тривалим, й істотно позначається ефект стінок кратера. Загальна точність і правильність пошарового аналізу характеризується точністю визначення координат шару, в якому вимірюють концентрацію, тобто пошаровим дозволом, і точністю вимірювання самої концентрації.

У зв'язку з розвитком мікроелектроніки велике розповсюдження отримали багатошарові плівкові структури, що володіють комплексом унікальних властивостей. Існує цілий ряд завдань, у яких концентрації в пошарових розподілах великі, і найважливішою характеристикою аналізу є пошаровий дозвіл, що досягається застосуванням спеціальних методичних прийомів.

Використання метода ВІМС в комплексі з іншими методами дає достовірну інформацію про елементний склад тонких плівок та дифузійні процеси, які протікають в них.

С. Малій

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Салтикова А.І.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИFUЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ТОНКИХ ДВОШАРОВИХ ПЛІВКАХ НА ОСНОВІ FE, CO ТА CU

Двошарові плівкові системи на основі металів набули досить широкого використання у багатьох галузях науки і техніки. Зокрема такі зразки широко використовують в оптиці, атомній та космічній промисловостях, медицині, мікроелектроніці. Тонкі плівки відіграють дуже важливу роль у сучасній техніці. Особливо успішно вони використовуються у технології інтегральних схем. Вони служать також основними елементами в таких різноманітних областях техніки, як пристрої для перетворення сонячної енергії в електричну та надпровідникові прилади. Подальший розвиток багатьох галузей мікро-приладобудування й електронної техніки визначається широким використанням плівкових систем. У зв'язку з цим вивчення властивостей таких систем має не тільки теоретичне, а й прикладне значення.

Мета роботи полягала в дослідженні дифузійних процесів у двошарових плівкових системах на основі Fe, Co та Cu.

Для отримання тонких плівок використовувалася промислова вакуумна установка ВУП-5М виробництва Сумського ВАТ «Selmi», пристосована до вирішення наших завдань. Тиск залишкової атмосфери в процесі наплення плівок складав (10^{-3} - 10^{-4}) Па. Осадження плівок здійснювалося методом почергового випаровування чистих металів з незалежних джерел. Для визначення товщини шарів використовувався розрахунковий метод. Дослідження дифузійних процесів у тонкоплівкових системах проводилися методом ВІМС.

Проведені дослідження дифузійних процесів у плівковій системі Cu/Co показали, що дифузія Cu→Co проходить більш інтенсивно ніж Co→Cu, при цьому проходить перерозподіл атомів кобальту, одночасно по границях зерен і по об'єму, а мідь проникає в плівку кобальту головним чином по границях зерен. Розраховані ефективні коефіцієнти дифузії в тонких плівках системи Cu/Co ($\sim 10^{-18}$ м²/с) набагато більші (декілька порядків) коефіцієнтів об'ємної дифузії в масивних зразках цієї системи ($\sim 10^{-41}$ м²/с).

Література

1. Волошко С.М., Сидоренко С.И., Черкашанко Ю.В., Луценко Г.В. Модель «кислородного насоса» при диффузии в тонких пленках // Металлофиз. новейшие технол., 1999. –Т.21, N9. – С. 67-70.
2. Пазуха І.М., Проценко С.І., Проценко І.Ю. Салтикова А.І та ін. Дифузійні процеси та інтерфейсне розсіювання електронів в багатошарових металевих плівках // Вісник СумДУ, 2006, №9(93). – С. 7-35.

К. Мідловець

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

Науковий керівник – Салтикова А.І.

ФІЗИЧНА КАРТИНА СВІТУ НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОЛІТТЯ

Фізика є найбільш розвинена природнича наука і сучасна картина світу базується на її досягненнях, а розвиток самої фізики пов'язаний з побудовою фізичних картин світу, що змінюють одна одну. При постійному зростанні кількості дослідних даних картина світу тривалий час залишається незмінною. З її зміною починається новий етап в розвитку фізики з іншою системою початкових уявлень, принципів, гіпотез і стилю мислення.

Метою роботи є показати як відбувається зміна сучасної картини, і що вона завжди пов'язана із переглядом уявлення про простір і час, елементарні частинки, з яких побудована матерія, та взаємодії між ними.

У розвитку науки час від часу виникають переломні етапи, так звані наукові революції, в яких переглядаються фундаментальні поняття (простір – час, елементарні частинки, взаємодії). В історії фізики такий перегляд відбувався декілька разів, в результаті були побудовані механічна, електромагнітна та квантово-релятивістська картини світу (теорії). Але на думку багатьох вчених ми живемо у час, коли відбувається чергова революція яка приведе до побудови нової еволюційно - синергитичної картини світу.

Можливість побудови «закінчених теорій» (механістична, електромагнітна, квантово – релятивістська) які майже повністю описують різні форми руху матерії, не означає що вони зможуть пояснити різноманітні закони природи. Кожна з цих теорій не враховує багато параметрів, але вони стають важливими при подальшому поглибленні у суть. Це і призводить до перегляду фундаментальних понять.

Можливість «закінчених теорій» означало б можливість кінця науки, далі якої нічого було б пізнавати. І навпаки, не переробна обмеженість кожної окремої теорії передбачає нескінченність всього наукового пізнання. Відомі науки, узагальнюючі теорії становлять важливі етапи її розвитку. Всі вони засновані на конкретних принципах, узагальнюючих певне коло фактів, і допускають можливість і необхідність свого подальшого розвитку шляхом створення все більш загальних і глибоких теорій, що враховують нові, невідомі раніше факти.

Література

1. Опанасюк А.С., Сучасна фізична картина світу. Мікро-, макро- та мегасвіти, Навчальний посібник для студентів усіх спеціальностей денної форми навчання. Частина 1, 2. – Суми: Видавництво СумДУ, 2005. – 223 с.
2. Планк М. Единство физической картины мира. – М.: Наука, 1966.

О. Пасько

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка
Науковий керівник – Стадник О.Д.*

НАНОКОМПОЗИЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ

Сьогодні наноконпозиційні полімерні матеріали (НКПМ) широко використовуються починаючи з побуту і закінчуючи виробництвом космічної і авіаційної техніки. Тому створення і дослідження нових матеріалів з більш досконалішими властивостями є однією з провідних задач матеріалознавства [3].

Процес експлуатації виробів із наноконпозиційних полімерних матеріалів часто супроводжується зміною температури, що супроводжується зміною їх розмірів за рахунок теплового розширення. І цей факт необхідно враховувати при конструюванні деталей і агрегатів, а отже знання параметрів, які характеризують теплове розширення, є дуже важливими [2, 3].

Мета роботи полягала у виготовлення зразків епоксидна смола ЕД-20+бентоніт, дослідженні теплового розширення даної системи та впливу на нього температури відпалення. Зразки виготовлялися на основі епоксидної смоли ЕД-20 з отверджувачем ПЕПА. Для дослідження було виготовлено дві серії зразків з різним вмістом бентоніту: 30% і 50%. Вони були відпалені при температурах 328-333⁰К та 348⁰К протягом двох годин. Для визначення термічного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) використовувався метод механічної дилатометрії при динамічному режимі нагрівання зразків. При вимірюванні таким способом теплове розширення зразка викликає переміщення стержня, який має на кінці позначку. Нагрівання чи охолодження такої системи викликає зміщення позначки стержня шкали на різницю видовження зразка. Вимірювання положення стержня відбувається мікроскопом з окулярним мікрометром, ціна поділки – 10⁻³ мм. Паралельно фіксується температура за допомогою хромель-капелевої термопари [1, 86].

В результаті проведення експериментальних досліджень для системи ЕД-20+бентоніт було отримано наступні результати. Для зразка ЕД-20+30% бентоніт характерне монотонне зростання відносного видовження із насиченням видовження в районі 1,4 % від початкового розміру зразка. Момент сповільнення швидкості видовження припав на температуру порядку 403⁰К. Для зразка ЕД-20+50% бентоніт спостерігається інтервал температур, в якому лінійні розміри зразка залишалися незмінними (333-373⁰К). Це можна пояснити початком дії непрореагованого затверджувача в ролі пластифікатора.

Для відпалених зразків ЕД-20+30% бентоніт та ЕД-20+50% бентоніт спостерігається наявність однієї або кількох екстремальних точок. При чому в залежності від температури відпалювання вказані екстремальні точки для зразка ЕД-20+30 % бентоніту змінюють своє положення по осі температур. Так для зразка ЕД-20+30 % бентоніту відпаленого при більш низькій температурі 328-333⁰К крива коефіцієнта лінійного розширення досягає максимуму при температурі 321⁰К. Для цього ж зразка, але відпаленого при температурі 348⁰К максимум коефіцієнта лінійного розширення припадає на температуру 368⁰К.

Слід відмітити, що різниця температур складає величину порядку 50⁰К. Наявність аномальних спадів на кривій термічної залежності $\alpha=f(T)$ пояснюється наступним чином. На першому етапі затвердження епоксидної смоли не весь затверджувач вступає в хімічну реакцію, тому ланцюги макромолекул не жорстко зв'язані між собою, а молекули затверджувача, які не прореагували додатково виконують роль пластифікатора. Тому, починаючи з деяких температур, відбувається релаксація напруг і макромолекули стискаються, що супроводжується аномальним падінням величини коефіцієнта лінійного розширення. Це відбувається лише до певного інтервалу температур. Так при температурі 343⁰С для зразка ЕД-20+30 % бентоніту відпаленого при температурі 328-333⁰К знову спостерігається ріст коефіцієнта лінійного розширення і максимум якого припадає на температуру ТЗ (381⁰К). Подальший ріст коефіцієнта лінійного розширення можна пояснити подальшим реагуванням затверджувача з епоксидною смолою. Аналогічну ситуацію маємо і для зразка ЕД-20+50 % бентоніту.

У ряді проведених експериментів встановлено, що властивості композиційного матеріалу залежать від концентрації наповнювача. Так для зразків ЕД-20+30% бентоніту спостерігалось майже монотонне зростання лінійного видовження з досягненням насичення при температурі 403⁰К. Тоді як для ЕД-20+50% бентоніту спостерігається інтервал температур з нульовим коефіцієнтом розширення.

Коефіцієнт лінійного розширення зразків змінюється з температурою не монотонно, має піки, які зумовлені процесами в зразку. При затвердженні епоксидної смоли не весь затверджувач

вступає в хімічну реакцію, тому ланцюги макромолекул не жорстко зв'язані між собою, а молекули затверджувача, які не прореагували додатково виконують роль пластифікатора.

Література

1. Аматыни А.Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 180 с.
2. Кан К.Н. Вопросы теории теплового расширения полимеров. – Л.: Ленинградский университет, 1975. – 80 с.
3. <http://www.nnn-volga.narod.ru/5.doc>

А. Сакунов

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Пономарьов О.Г.*

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КАНАЛЮВАННЯ ПРОТОНІВ МЕВ-ЕНЕРГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ.

Можливість отримання відомостей про розподіл дефектів в тонких плівках та монокристалах значно розширився через розробку і удосконалення методів каналювання. Він включає в себе метод зворотного резерфордівського розсіяння іонів, метод кутового виходу каналюючого пучка і метод індукції м'якого рентгенівського випромінювання та інші методи. За допомогою цих методів можна аналізувати як саму поверхню, так і більш глибокі шари зразка глибиною порядку 500 нм. Більшість цих методів мають достатню чутливість для виявлення точкових дефектів.

Взаємодія зондуєчого пучка швидких іонів з певно орієнтованим монокристалом призводить до руху пучка вздовж каналу, що утворюється в результаті симетрії і упорядкування кристалічної решітки. Тим самим взаємодіючи зі стінками каналу і індукуючи м'яке рентгенівське випромінювання. На таких явищах і ґрунтується метод виявлення точкових дефектів. Хоча у нього, як і будь-якого іншого методу, є свої недоліки. Він дає широкі можливості виявлення місцезнаходження точкових дефектів як у площині зразку, так і по його глибині. Найбільш важливими характерними особливостями методу, які викликають підвищений інтерес до нього, є те що роздільна здатність по глибині складає 10 нм, і те, що цей метод є неруйнівним по відношенню до зразка.

Метою роботи є вивчення теорії руху каналюючих частинок і вивчення застосування на практиці методу дефектоскопії - методу кутового виходу каналюючого пучка іонів, для виявлення дефектів у монокристалі кремнію.

Поки що немає такого методу, який повністю задовольняв би всім вимогам дослідників, що мають справу з дефектами. Методи засновані на явищі каналювання не є виключенням в цьому відношенні. Особливостями цих методів є висока роздільна здатність, і те, що ці методи одні з небагатьох які відносяться до класу неруйнівних методів у відношенні до досліджуваного зразка. При використанні приладів сканування пучком, ці методи дають можливість вивчення розподілу дефектів по поверхні і глибині зразка, що робить ці методи – методами тривимірного аналізу дефектів. Дані методи застосовуються для з'ясування місцезнаходження точкових дефектів.

Література

1. Афросимов В.В., Ильин Р.Н., Панов М.Н и др. // Изв. РАН. 1995. Т. 59. Вып 10.
2. Линхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц. // УФН. 1969. Т. 99. Вып. 2. – С. 249-296.

С. Сидоренко

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С. Макаренка
Науковий керівник – Стадник О.Д.*

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

За останні 20 років у світі потреба у первинних енергоносіях зросла в 3,6 рази. Потреба в нафті зросла в 5,9 рази, газу - в 7,2 рази, а у вугіллі - в 1,8 рази. Запаси вугілля у світі становлять 83%, а нафти – 10% від загального об'єму розвіданих родовищ. Застосування джерел енергії, альтернативних нафті, є актуальною проблемою не тільки для України, а й для всього світу.

Сьогодні енергетичні потреби людства оцінюються в 11-12 млрд. т. умовного палива. Це становить 12% енергії щорічного приросту біомаси на землі. Задовольняються наші енергопотреби за рахунок нафти і газу на 58-60%, вугілля – на 30%, гідро - та атомної енергії - на

10-12% і біомаси на 1-2%. Один із способів вирішення проблеми альтернативи експлуатації нафтопродуктів – це можливість роботи як бензинових двигунів, так і дизелів на газогенераторному газі [1].

Біомаса є найдавнішим джерелом енергії, однак її використання до недавнього часу зводилося до прямого спалювання або у відкритих вогнищах, або в печах і топках з дуже низьким, в межах 14-15%, ККД.

Застосовуючи більш досконалі пристрої, наприклад, газогенератори - пристрої для перетворення твердого або рідкого палива в газоподібну форму, що мають найбільш високу ККД (у межах 75-90%) можна не тільки скоротити потребу у вихідному паливі більш ніж у 5 разів, але відповідно знизити емісію вуглекислого газу в атмосферу [2]. Даний процес можливий лише при високій температурі і цей процес називається газифікацією.

В залежності від властивостей палива і призначення газу, газифікація проводиться в різних по схемах і конструкціях газогенераторів.

Газифікація твердого палива є універсальним методом його переробки. Універсальність методів газифікації твердого палива може розглядатися в трьох напрямках.

По-перше, методом газифікації підвладні будь-які тверді палива, починаючи від торфу, бурого вугілля і закінчуючи кам'яним вугіллем і антрацитом, незалежно від їх хімічного складу, складу зольної частини, домішок сірки, вологості і інших властивостей.

По-друге, методом газифікації твердого палива можна отримувати горючі гази будь-якого складу, починаючи від чистого водню, оксиду вуглецю, метану, їх сумішей в різних пропорціях, і закінчуючи генераторним газом, який можна використовувати для енергетичних установок будь-яких типів і будь-якого призначення.

Нарешті, по-третє, важливою особливістю методів газифікації твердого палива є їх масштабні зміни. Газогенераторні установки можуть обслуговувати найбільші хімічні комбінати, що випускають мільйони тонн аміаку або метанолу в рік, і в той же час можуть забезпечувати газом невеликі автономні енергетичні і хімічні установки. Одержання енергії з біомаси сьогодні є одним з найбільш динамічних напрямків розвитку у багатьох країнах світу. Цьому сприяє її великий енергетичний потенціал, поновлюваний характер і екобезпека.

Мета дослідження - ознайомитися з фізичними основами роботи газогенераторних установок, зокрема з процесами окислення органічного палива та роллю зарядів в процесах горіння.

Завданням роботи було:

1. розглянути основні конструктивні елементи газогенераторних установок;
2. дати оцінку основним типами процесів газифікації біомаси;
3. ознайомитися з основними поняттями та законами кінетики фізико-хімічних реакцій які протікають у газогенераторних установках.

На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Розглянуто процеси піролізу і горіння органічного палива як фізико-хімічного процесу за участю заряджених елементарних частинок;
2. Наведено аналіз будови екологічних конструкцій піролізних газогенераторних установок;
3. Експериментально досліджено електричні властивості полум'я на модельних зразках;
4. Показано, що електричне поле суттєво впливає на структуру полум'я, і можливо ступінь окиснення.

Література

1. Ямпольский Ю.П. Элементарные реакции и механизм пиролиза. – М.: Химия, 1990. – 216 с.
2. Колеров Л.К. Газомоторные установки. – Москва-Ленинград: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951.

Ю. Синяговська

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка
Науковий керівник – Яременко О.В.*

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Сучасний етап розвитку мікро-, нано- та інших технологій є стимулом для створення необхідної експериментальної техніки. Для роботи з нею необхідні знання в використанні такої техніки.

В даній роботі викладені теоретичні основи та сучасні підходи до дослідження структури і

будови речовини. Розглядаються будова та принципи дії приладів для дослідження речовини, які знаходяться в лабораторіях кафедри фізики та експериментальної і теоретичної фізики СумДПУ ім. А. С. Макаренка. Більше уваги приділено методам електронної мікроскопії та електронографії, а також мас-спектрометричним дослідженням речовини. Вказано на можливості і межі застосування цих методів для таких досліджень. Найбільш детально розглянуті можливості електронної мікроскопії та електронографії.

Електронографія, метод вивчення структури речовини, оснований на дослідженні розсіяння зразком прискорених електронів. Застосовується для вивчення атомної структури кристалів. Фізична основа електронографії – дифракція електронів; при проходженні через речовину електрони, які мають хвильові властивості, взаємодіють з атомами, в результаті чого утворюються дифраговані пучки, інтенсивність і розташування яких пов'язані з атомною структурою зразка і іншими структурними параметрами. Цей метод дає нам дані про кристалічну решітку: тип та параметри решітки, міжплощинні відстані.

За допомогою електронної мікроскопії одержується інформація про макроструктуру: розміри кристалів, їх кількість, взаємну орієнтацію та огранку, морфологію поверхні зразка, характер границь зерен, розміри блоків мозаїки та областей когерентного розсіювання, та мікроструктуру: дефекти кристалічної будови, такі, як вакансійні комплекси, дефекти пакування, двійники, лінійні та гвинтові дислокації, центри напружень.

Наведені приклади практичного застосування приладів для визначення ряду фізичних властивостей металів.

Д. Терещенко

*Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка
Науковий керівник – Салтикова А.І.*

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Розвиток людського суспільства нерозривно пов'язаний з споживанням різних видів енергії. Сьогодні гостро стоїть проблема швидкого вичерпування запасів природних енергоносіїв – вугілля, нафти, газу. Теоретично ядерна енергія може вирішити цю проблему на сотні років вперед. Атомна енергетика вже сьогодні відіграє визначальну роль у виробництві електроенергії в Україні. Частка АЕС у вітчизняній електроенергетиці становить 22,7% за встановленою загальною потужністю і 48% – за обсягами енерговиробництва [1].

Мета роботи – характеристика стану та перспектив розвитку атомної енергетики в Україні.

Основою ядерної енергетики раніше були теплові реактори, робота яких забезпечувалася обмеженою кількістю дешевого палива. На українських АЕС працюють реактори тину ВВЕР, що виготовляються у Росії. Вони достатньо надійні: про це свідчить хоча б той факт, що такі реактори функціонують на багатьох європейських АЕС.

Упродовж найближчого десятиліття Україні належить побудувати (чи закупити) 10-12 реакторів, оскільки, починаючи від 2011 р., завершується проектний термін роботи 12 енергоблоків на вітчизняних АЕС[1].

Основними перевагами атомної енергетики взагалі, і в Україні є висока кінцева рентабельність і відсутність викидів в атмосферу продуктів згорання (із цього погляду вона може виглядати як екологічно чиста). Основними недоліками є потенційна небезпека радіоактивного зараження навколишнього середовища продуктами розподілу ядерного палива при аварії і проблема переробки ядерного палива[2].

Література

1. Б.Платон, В.Бар'яхтар, О.Бокай, І.Неклюдов. Майбутнє атомної енергетики. Вісник НАН України, 2006, №4.
2. Інтернет ресурс: <http://www.razumkov.org.ua/>

С. Хандога

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка
Науковий керівник – Салтикова А.І.*

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ СПЛАВУ CO-NI МЕТОДОМ ВІМС

Можливості отримання відомостей про склад зовнішнього атомного шару твердого тіла значно розширилися у зв'язку з розробкою і удосконаленням методу вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС). Метою роботи є дослідження елементного складу сплавів Co-Ni [1].

ВІМС є одним з фізичних методів дослідження поверхні твердих тіл[2]. Його принципова схема представлена на рис.1. Аналіз зразка проводиться в умовах високого вакууму. Зразок бомбардується пучком первинних іонів з енергією 1 - 100 кеВ. Стикаючись з поверхнею, первинні іони вибивають вторинні частинки, ці іони фокусуються і потрапляють в мас-аналізатор, де вони розділяються по масовим числам. Далі вони потрапляють на детектор, який передає інформацію на ЕОМ[3].

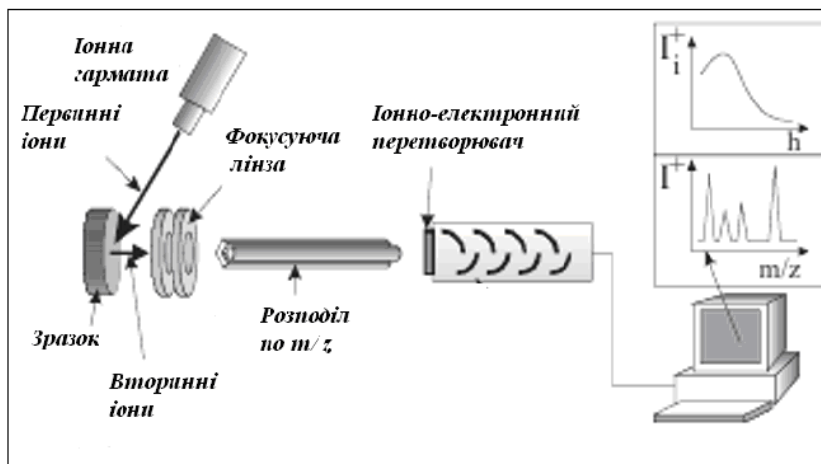


Рис.1. Принципова схема ВІМС

Для проведення досліджень використовувався вторинно-іонний мас-спектрометр МС 7201М[4]. Прилад складається з аналітичної частини та стійки з блоками живлення та реєстрації. До складу аналітичної частини входить вакуумна камера, мас-спектрометричний аналізатор, іонна гармата, блоки вимірювання вакууму. У стійці з приладами розташовані блоки живлення іонної гармати, вторинний електронний помножувач, цифровий вольтметр. Запис мас-спектра вторинних іонів здійснюється за допомогою електронного самописного приладу[5].

Методом ВІМС проведені дослідження вихідних масивних зразків сплаву Co-Ni з різною концентрацією компонент. Для характеристики однорідності зразка сплаву був введений коефіцієнт $\gamma = \frac{I(\text{Co}^{59})}{I(\text{Ni}^{58})}$, де $I(\text{Ni}^{58})$ - інтенсивність лінії Ni^{58} , $I(\text{Co}^{59})$ - інтенсивність лінії Co^{59} на

мас-спектрі. Дослідження показали, що даний коефіцієнт залишається незмінним при травленні зразка протягом 33 хв і становить приблизно 0,76. Для отримання інформації про елементний склад плівок сплавів Co-Ni було проведено ряд експериментів по дослідженню плівки сплаву Co-Ni з різною концентрацією складових цього сплаву. Було визначено коефіцієнт γ , а також побудовано залежність $\gamma = f(C)$ (Рис.2.-3.), де C – концентрація Co та Ni відповідно.

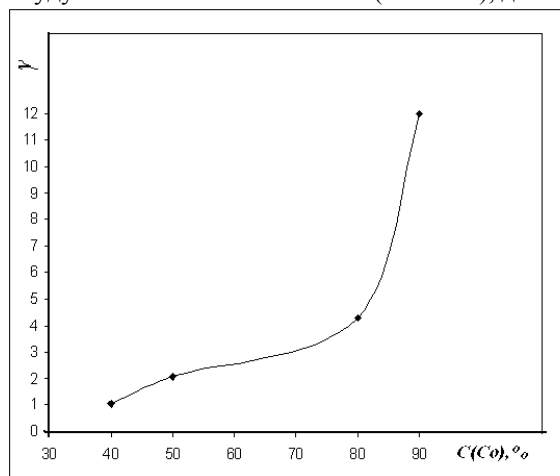


Рис.2. Градувальна крива для концентрації Co в плівці

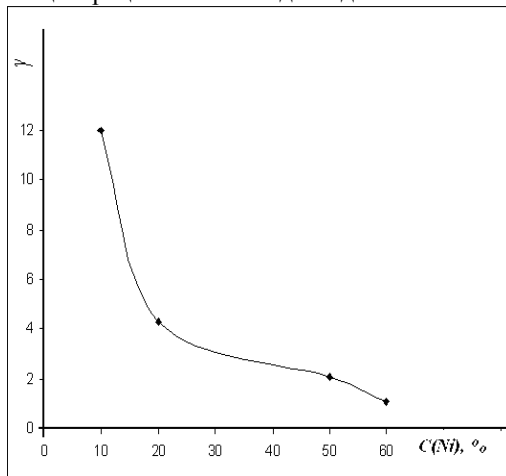


Рис.3. Градувальна крива для концентрації Ni в плівці

Дослідження елементного складу масивних зразків сплаву методом ВІМС вказали на однорідність елементного складу масиву. Проведені дослідження елементного складу плівкових

зразків сплаву Co-Ni з різною концентрацією компонент. За одержаними даними побудовані градувальні криві мас-спектрометра МС 7201М для визначення концентрації Co та Ni у плівковому сплаві.

Література

1. Черепин В. Т., Косячков А. А., Гудзенко Г. И. Рас шифровка масс- спектров ионов с помощью ЭВМ // Жх. – 1980. – 35, вып. 1. – С. 283 -287.
2. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. - М.: Мир, 1985. - 496 с.
3. Технология СБИС: В 2-х кн. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. - М.: Мир, 1986. - 453 с.
4. Лобода В.Б., Іваній В.С. Сучасні методи дослідження структури речовини. – Суми.: Університетська книга, 2010. – 259 с.
5. Волошко С.М. , С.И. Сидоренко, И.Н. Макеева Металлофизика и новейшие технологии.- 1994.- Т 16, №10. С. 61.

А. Хачатрян

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка
Науковий керівник – Бугай О.М.*

РЕНТГЕНІВСЬКІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ СКЛАДУ РЕЧОВИН

Дана робота присвячена освоєнню двох рентгенівських методів аналізу складу речовин:

- 1) Електронно-зондовий рентгенівський мікроаналіз (РМА);
- 2) Частино-індукована рентгенівська емісія (PIXE – Particle-Induced X-Ray emission spectrometry).

Завдання, поставлені переді мною:

- 1) Ознайомитися з фізичними принципами обох методів посередністю дослідження літератури, а також спілкування з науковими співробітниками, що мають безпосереднє відношення до використання вище приведених методів в реальних експериментах.
- 2) Освоїти спеціалізоване програмне забезпечення, пов'язане з обробкою та моделюванням результатів експериментів по рентгенівському дослідженню складу речовин.
- 3) Застосувати набуті знання, для виконання експерименту по дослідженню елементного складу археологічних артефактів.

1. РМА

1.1. Фізичні принципи РМА

Колімований пучок електронів потрапляє на поверхню зразка, викликаючи певні фізичні процеси, серед яких: генерація вторинних електронів, відбитих електронів, оже-електронів, рентгенівського характеристичного та рентгенівського гальмівного випромінювання, катодолумінесценція, збудження фононів та плазмонів. Для РМА використовується характеристичне рентгенівське випромінювання, яке реєструється спектрометром з дисперсією по енергії. Отриманий характеристичний спектр несе інформацію про склад досліджуваного матеріалу[1].

1.2. Експериментальна установка

Рентгенівський мікроаналіз передбачає використання мікрозонда для збудження характеристичного рентгенівського випромінювання з такими характеристиками ($E \sim 10-50$ KeV, діаметр ~ 1 нм, апертура ~ 30 мкм), які при суцільному електронному пучку електронних мікроскопів. Тому природно, що рентгенівські мікроаналізатори на сьогодні являють собою допоміжний блок електронного мікроскопу[1].

1.3. Якісний і кількісний рентгенівський мікроаналіз. Метод трьох поправок ZAF.

Оскільки внутрішні енергетичні рівні елементів у сполуках практично не розчіплюються, то характеристичний рентгенівський спектр елемента не залежить від природи матриці. Цей факт дає можливість просто по визначенню присутніх на спектрі піків, зробити висновок про наявні в досліджуваному матеріалі елементи, що і складає суть якісного аналізу[1].

Кількісний рентгенівський мікроаналіз базується на тому, що інтенсивності рентгенівських ліній від різних елементів пропорційні масовим долям цих елементів так, що відношення концентрації i -того елемента до інтенсивності однієї з його ліній є приблизно постійним числом[2].

Для більш точного кількісного аналізу потрібно враховувати поглинання характеристичного рентгенівського випромінювання від елемента в матриці, різницю в атомних

номерах елементів матеріалу та можливість вторинної флуорисценції. Це призводить до необхідності розв'язання кінематичних рівнянь руху електронів у зразку. Розв'язки цих рівнянь показують, що уточнення результатів кількісного аналізу можна звести до послідовного (ітераційного) множення концентрації i -того елементу (визначеного грубо) на три поправки, пов'язані з вище приведеними ефектами. Метод кількісного аналізу, який зводиться до визначення цих поправок носить назву методу ZAF (аббревіатура від: Z – поправка на атомний номер, A – поправка на поглинання – absorption, F – поправка на флуорисценцію – fluorescence)[2].

2. PIXE

2.1. Фізичні принципи PIXE

Як і в рентгенівському мікроаналізі, метод PIXE зводиться до збудження і аналізу характеристичного рентгенівського випромінювання. Основна відмінність полягає в тому, що в цьому випадку рентгенівське випромінювання збуджується пучком протонів. Така модифікація обґрунтована тим, що гальмування в електричному полі частинок більшої маси призводить до меншого фонового рентгенівського випромінювання, яке складає один з основних факторів погіршення точності експерименту. За грубою оцінкою, відношення коефіцієнтів пік-фон для випадків електронного і протонного пучків, приблизно рівне відношенню їхніх мас[4].

2.2. Експериментальна установка

Камера для проведення експериментів по методу PIXE розміщується на каналі протонного мікро зонда. Рентгенівське випромінювання реєструється напівпровідниковим детектором високої роздільної здатності, розміщеного в безпосередній близькості до зразка (≈ 20 см). Детектор реєструє імпульси з розділенням по амплітуді порядку 150 еВ, відправляючи їх на оцифровку в комп'ютер, де будується їх функція розподілу (спектр).

3. Програмне забезпечення

3.1. Програма для моделювання результатів кількісного рентгенівського мікроаналізу CITZAF.

Автор програми David C Joy. Аналітичну основу цієї програми складає метод трьох поправок. Рівняння, що їх вирішує програма, проводячи послідовні ітерації містять такі параметри, як поглинальна здатність рентгенівського випромінювання для різних матриць та перерізи рентгенівської іонізації для різних елементів при різних енергіях (і деякі інші). Дані про ці параметри були зібрані з різних відкритих наукових джерел. В якості вхідних даних програми служать: тип зразка (масивний, тонка плівка), геометрія зразка, склад матриці, енергія пучка, та ін. Вихідні дані представляють собою відсоткове співвідношення мас елементів, що входять в зразок[3].

3.2. Програма для моделювання результатів рентгенівського мікроаналізу Win-X-Ray.

Аналітичну основу програми складає метод Монте Карло. Вона дозволяє не лише провести кількісний аналіз, але і змодельовати траєкторії електронів, розподіл енергетичних витрат (радіально і по глибині), а також побудувати ряд інших функцій розподілу, корисних для дослідницьких цілей[5].

Література

1. Дж. Гоулдстейн и др. «Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ».
2. ЦКП Материаловедение и диагностика в передових технологіях при ФТИ ім. А. Ф. Иоффе «Физические основы рентгеноспектрального микроанализа», Санкт-Петербург 2010.
3. David C Joy EM Facility, University of Tennessee, and Oak Ridge National Laboratory A DATA BASE ON ELECTRON-SOLID INTERACTIONS.
4. SEVEN A. E. JONANSSON: Particle-Induced X-Ray emission spectrometry.
5. Raynald Gauvin, Eric Lifshin, Hendrix Demers, Paula Horny, and Helen Campbell Win X-Ray: A New Monte Carlo Program That Computes X-Ray spectra Obtained With Scanning Electron Microscope.

А. Чубенко

*Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка
Науковий керівник – Стадник О.Д.*

РОЗРАХУНОК ПРОВІДНОСТІ ГЕТЕРОГЕННОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОРМУЛ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ПРОВІДНОСТІ

Поняття композитні матеріали або композити увійшли в термінологію матеріалознавства на початку 20 століття, коли в будівництві і машинобудуванні почали інтенсивно використовувати штучні матеріали, які складалися з декількох компонентів. Сьогодні відбувається стрімкий

розвиток галузей з застосуванням нових технологій. Значне місце в номенклатурі композитів займають матеріали на полімерній матриці, або полімерні композити. В умовах підвищеного попиту на конструкційні матеріали виникла необхідність максимально використовувати всі шляхи покращення їх характеристик. Одним із ефективних напрямків рішення цієї проблеми – регулювання структури і властивостей матеріалів при застосування їх в умовах експлуатації [1].

В якості компонентів композиційних матеріалів на полімерній основі використовують практично всі матеріали, які має сучасна техніка. У процесі отримання і експлуатації композиційних матеріалів виникає необхідність знати і контролювати їх електрофізичні властивості, зокрема електропровідності.

Для прогнозування властивостей композиційних матеріалів, а саме електропровідності, теплопровідності використовують формули узагальненої провідності зокрема Оделевського, Максвелла [2,3].

Мета роботи полягає у експериментальному дослідженні зразків поліаміду-6+С, та теоретичному розрахунку їхньої провідності за допомогою формул узагальненої провідності та перевірка розрахунків на експерименті. Для дослідження було виготовлено 6 серій зразків з різним вмістом вуглецю: 0%, 1%, 3%, 5%, 25%, 200%. Вони виготовлялися методом гарячого пресування. Для цього провели механічне розтирання С в фарфоровій чашечці (5-6 хв) і змішування з поліамідом-6 у відповідних пропорціях. Потім у спеціальній установці відбувалося нагрівання суміші в прес-формі від температури плавлення 453 К до 473 К протягом 30 хвилин. Охолодження відбувалося на повітрі при кімнатній температурі.

Експериментально електропровідність зразків вимірювалася цифровим вимірювачем R,L,C E7-12. Зразок клався в пічку і нагрівався до температури 413 К, тобто до температури плавлення матриці. Температура нагрівання контролювалася диференціальною термопарою. Регулювання швидкості нагрівання пічки виконувалось за допомогою зовнішнього джерела з регулятором напруги. Провідність вимірювалась по трьох-електронній схемі (з охоронним кільцем).

Для даних зразків ПА-6+С було теоретично розрахована провідність за допомогою формул узагальненої провідності Максвелла та Оделевського. Також для цих зразків були отримані експериментальні значення електропровідності, які відрізнялися від теоретичних на 10%. Цей факт обумовлений тим, що в теоретичних формулах не враховується міжмолекулярна відстань полімерної матриці ПА-6 з наповнювачем С. За отриманими даними встановлено монотонну залежність електропровідності полімерної матриці в областях малих концентрацій наповнювача, що пояснюється різним вкладом ефектів взаємодії граничних шарів полімера з наповнювачем.

Виміряли залежність електропровідності від температури для різних зразків з різною концентрацією наповнювача. Ця залежність електропровідності від температури прямолінійна, але при $T > T_c$ спостерігається злам поблизу температури склування і криволінійні в області $T < T_c$. Все це вказує на іонний характер електропровідності досліджуваних зразків.

Література

1. Годовский Ю. К. ,Теплофизика полимеров.- М., Химия, 1982. – 280 с.
2. Гуль В.С., Электропроводні полімерні матеріали, вид. «Хімія», 1887. – 348 с.
3. Сажин Б.И. Электрические свойства полимеров. Изд. «Химия» ,Л.,1970. – 376 с.

Ю.О. Шкурдода, В.М. Коломісць

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка

МАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ ПЛІВОК Co/Ag/Fe/P та Co/Cu/Fe/P

За петлями магніторезистивного гістерезису були визначені коерцитивна сила H_c і поле насичення H_s . Коерцитивна сила визначалася за розташуванням піків петлі, а поле насичення приймали рівним полю, вимірюваному на висоті $0,9(\Delta R/R_0)_{\max}$ на кривій $\Delta R/R_0 = f(H)$.

Як відомо в тришарових плівках коерцитивна сила визначається компонентою, зумовленою обмінним зв'язком феромагнітних шарів H_c^* і компонентою, зумовленою закріпленням доменної стінки структурними дефектами H_c^0 [1]: $H_c = H_c^* + H_c^0$.

Структурними дефектами полікристалічних плівок є межі між зернами, дисперсія осей кристалографічної анізотропії, шорсткість поверхні.

Криві залежності $H_c = f(T_{\text{відп}})$ для тришарових плівок Co/Ag/Fe/P та Co/Cu/Fe/P з різною товщиною срібного та мідного прошарку представлені на рис. 1 а.

Для всіх плівок Co/Ag/Fe/П з $d_{Ag} = 5 - 20$ нм криві залежності $H_C = f(T_{відп})$ (крива 2) подібні поведінці H_C одношарових плівок чистого кобальту представлених у роботі [1] та двошарових зразків Co/Fe/П (крива 1). Коерцитивна сила цих плівок, відпалених при 400 К змінюється не суттєво, відпалених при 550 К, збільшується в 2 – 4 рази, а відпалених при 700 К – у 4 – 7 рази.

Зазвичай, збільшення величини коерцитивної сили у тришарових плівках пояснюється посиленням обмінної взаємодії між феромагнітними шарами. В нашому випадку ефективна товщина немагнітного прошарку срібла складає 5 – 20 нм, що призводить до значного послаблення обмінної взаємодії. Отже, компонентою коерцитивної сили, яка зумовлена обмінним зв'язком феромагнітних шарів, можна знехтувати. Виходячи з цих міркувань можна зробити висновок, що збільшення величини коерцитивної сили для плівок Co/Ag/Fe/П з $d_{Ag} = 5 - 20$ нм обумовлено тими ж причинами, що і для одно- та двошарових плівок. Згідно із [2] у одно- та двошарових плівках збільшення коерцитивної сили пов'язано із збільшенням розміру зерна і перерозподілом точкових дефектів по між зернових межах, що призводить до збільшення ролі об'ємних механізмів закріплення доменних стінок.

Слід відмітити, що після відпалювання плівок із $d_{Ag} = 6 - 12$ нм при $T_{відп} = 550$ нм спостерігається поява анізотропії магнітоопору.

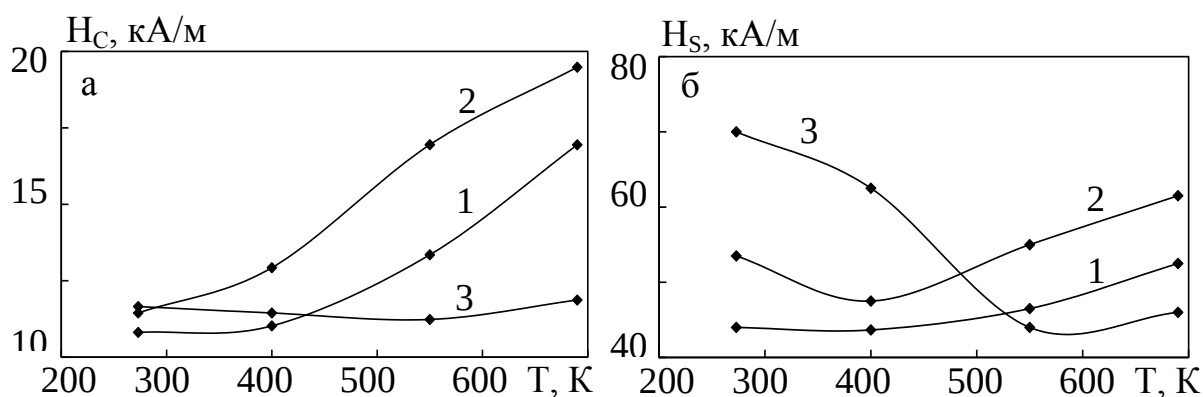


Рис. 6. Залежність коерцитивної сили H_C (а) та поля насичення H_S (б) від $T_{відп}$ для досліджуваних зразків: 1 – Co(50 нм)/Fe(50 нм)/П;

2 – Co(20 нм)/Ag(10 нм)/Fe(20 нм)/П; 3 – Co(20 нм)/Cu (6 нм)/Fe(20 нм)/П

У плівках Co/Cu/Fe/П з $d_{Cu} = 3 - 5$ нм (крива 3) відпалювання при $T_{відп} = 400$ К і 550 К призводить до зменшення величини коерцитивної сили у 1,5 – 2 рази. Зменшення коерцитивної сили відбувається за рахунок зменшення ролі закріплення доменних стінок, що пов'язано зі зменшенням шорсткості поверхні. Відпалювання при 700 К приводить до зростання H_C майже у 2 рази, що пов'язано із причинами, які описані для плівок із срібним прошарком.

На рис.1 б представлені криві залежності $H_S = f(T_{відп})$ для дво- та тришарових плівок з різною товщиною срібного та мідного прошарків (H_S – поле, в якому магнітні моменти в феромагнітних шарах розміщуються паралельно).

Для двошарових плівок (крива 1) спостерігається лише збільшення величини H_S (у 2 – 3 рази) після відпалювання при 700 К. Для тришарових плівок Co/Ag/Fe/П (крива 2) спостерігається зменшення H_S в 1,5 – 2 рази після відпалювання при температурі 400 К та зростання у 2 – 3 рази при подальшому збільшенні температури відпалювання. Для плівок Co/Cu/Fe/П (крива 3) суттєве зменшення (5 – 7 разів) H_S спостерігається до $T_{відп} = 550$ К. Відпалювання при температурі 700 К призводить до не значного збільшення поля насичення. Мінімум на кривих $H_S = f(T_{відп})$ пов'язаний із переходом ГМО в АМО.

Література

1. Чеботкевич Л.А. Структура и магнитные свойства отожженных пленок Co/Cu/Co / Л.А. Чеботкевич, Ю.Д. Воробьев, И.Н. Буркова, А.В. Корнилов // ФММ – 2000. – Т. 89, № 3. – С. 56-61.
2. Чеботкевич Л.А. Влияние кристаллической структуры и межслоевой обменной связи на коэрцитивную силу Co/Cu/Co – пленок / Л.А. Чеботкевич, Ю.Д. Воробьев, А.С. Самардак, А.В. Огнев // ФТТ. – 2003. – т. 45, №5. – С. 863 – 866.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

А		М	
Астапович Д.	13, 87	Малій С.	94
Б		Мідловець К.	95
Білик В.М.	18	Мороз І.О.	7, 12, 52
Булат В.	23	П	
Г		Пасько О.	59, 96
Гинку О.К.	18	С	
Грицай Ф.Ю.	18	Сакунов А.	64, 97
Д		Салтикова А.І.	71, 75
Дігтярьов О.	89	Сидоренко С.	79, 97
Дяченко М.	90	Синяговська Ю.	98
З		Стадник О.Д.	18
Завражна О.М.	35	Сторіжко В.Ю.	7
І		Т	
Іваній В.С.	12, 52	Терещенко Д.	99
Ісаєв М.	71, 92	Х	
К		Хандога С.	99
Квашко К.	41, 92	Хачатрян А.	101
Коломієць В.	103	Холодов Р.І.	52
Кравченко В.О.	45	Хурсенко С.М.	75
Кулик Т.	93	Ч	
Л		Чубенко А.	102
Лобас О.М.	35	Ш	
Лобода В.Б.	45	Шкурдода Ю.	103

НАШІ АВТОРИ

<i>Астапович Д.О.</i>	студентка
<i>Білик В.М.</i>	аспірант СДПУ імені А.С. Макаренка
<i>Булат В.</i>	студент
<i>Грицай Ф.Ю.</i>	науковий співробітник кафедри фізики
<i>Дігтярьов О.</i>	студент
<i>Дяченко М.</i>	студент
<i>Завражна О.М.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, викладач кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Іваній В.С.</i>	кандидат техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики
<i>Ісаєв М.В.</i>	студент
<i>Квашко К.В.</i>	студентка
<i>Коломієць В.</i>	аспірант СДПУ імені А.С. Макаренка
<i>Кравченко В.О.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, викладач кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Кулик Т.</i>	студент
<i>Лобас О.М.</i>	аспірантка
<i>Лобода В.Д.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики
<i>Малій С.</i>	студент
<i>Мідловець О.</i>	студентка
<i>Мороз І.О.</i>	кандидат техн. наук, в.о. професора кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Пасько О.М.</i>	студентка
<i>Сакунов А.</i>	студент
<i>Салтикова А.І.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Сидоренко С.І.</i>	студент
<i>Синяговська Ю.</i>	студентка
<i>Стадник О.Д.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, в.о. професора кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Сторіжко В.Ю.</i>	доктор фіз.-мат. наук, професор, академік НАНУ, директор ІПФ НАНУ, завідувач кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Терещенко Д.</i>	студент
<i>Хандога С.</i>	студент
<i>Хачатрян А.</i>	студент
<i>Холодов Р.І.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри експериментальної та теоретичної фізики
<i>Хурсенко С.М.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, викладач кафедри фізики
<i>Чубенко А.</i>	студентка
<i>Шкурдода Ю.О.</i>	кандидат фіз.-мат. наук, викладач кафедри фізики

Наукове видання

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА

Збірник наукових праць

ВИПУСК 2 (2)

Друкується в авторській редакції
Матеріали подані мовою оригіналу

Відповідальний за випуск
О.В. Семеніхіна

Комп'ютерна верстка
О.М. Удовиченко

Здано в набір 25.11.2011. Підписано до друку 28.04.2011.
Формат 60×84/8. Гарн. Times New Roman. Папір офсет. Друк ризогр.
Ум. друк. арк. 6,41. Обл.-вид. арк. 17,64. Тираж 100. Вид. № 69

Фізико-математичний факультет
СумДПУ імені А.С. Макаренка
вул. Роменська, 87
м. Суми, 40002
тел. (0542) 68 59 10

<http://fizmatsspu.sumy.ua>