

РОЗДІЛ «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА»

УДК 539:216.2.536.42

ТАРАН В.Г., к.ф.-м.н., доцент
ПОПИЛЬ О.И., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ
НА МЕХАНИЗМ ПОЛЯРИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $BaTiO_3$

Введение. Интерес к сегнетоэлектрическому титанату бария обусловлен с одной стороны важностью физических проблем в области физики твердого тела, а с другой – всевозрастающим практическим применением сегнетоэлектриков [1, 2].

Кристаллы $BaTiO_3$ отличаются высокой диэлектрической проницаемостью и пьезомодулем, наличием диэлектрического гистерезиса, интересными электрооптическими, электромеханическими и фотоактивными свойствами и как нелинейные материалы дают возможность вести плодотворные исследования в таких современных направлениях, как термодинамика фазовых переходов, кристаллофизика, нелинейная оптика, пьезотехника и т.д. Титанат бария является сегнетоэлектриком-полупроводником [3] со сравнительно узкой запрещенной зоной ($E_d \sim 3$ эВ), в которой оказалось возможным исследовать электронную проводимость и другие явления переноса, механизм рассеяния носителей заряда, неравновесную проводимость и люминесценцию, собственное и примесное оптическое поглощение, зонную структуру и другие полупроводниковые свойства.

Развитие радиотехники, электроакустики, квантовой электроники и измерительной техники не было бы столь эффективным без сегнетоэлектрических материалов, которые применяются при изготовлении малогабаритных конденсаторов, пьезоэлементов, пироэлектрических приемников лучистой энергии, нелинейных емкостных элементов, позисторов, модуляторов лазерного излучения, параметрических генераторов и т.п.

Постановка задачи. Существенное влияние на физические свойства сегнетоэлектриков оказывают различного рода поверхностные слои, которые образуются в процессе выращивания монокристаллов [4, 5], их обработки (термической [6], механической или химической, а также внешним облучением радиоактивными потоками, ускоренными заряженными частицами и ионами различных химических элементов).

В этом плане актуальной является задача исследования влияния на свойства монокристаллов $BaTiO_3$ поверхностных слоев, образующихся в результате имплантации ускоренных ионов.

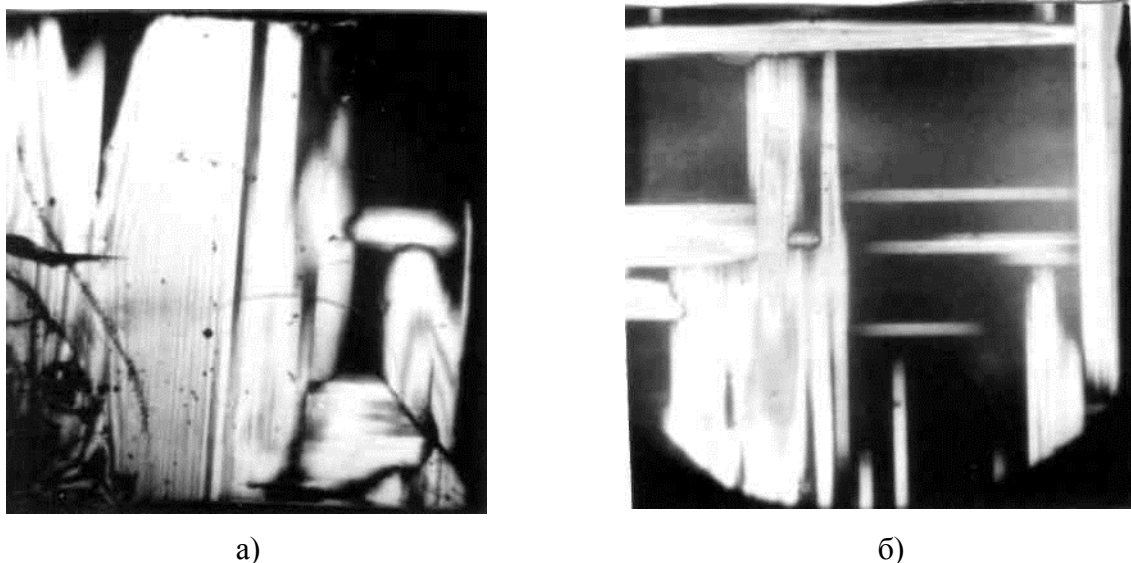
Результаты работы. В работе использовались монокристаллы сегнетоэлектрика $BaTiO_3$, без специального введения примесей выращенных в лаборатории кафедры физики по технологии [4] при вариации скоростей снижения температуры от 3,6 до 43 К/час.

Отбирались кристаллы в виде пластинок площадью порядка $0,3 \div 0,5$ см² и толщиной $0,1 \div 0,3$ мм. Образцы облучались протонами энергией $W_k = 10 \div 30$ кэВ на ускорителе с магнитной селекцией ионов водорода. Доза облучения варьировалась в пределах $1 \cdot 10^{19} \div 5 \cdot 10^{19}$ м². Расчетная глубина внедрения ионов составляла $1,5 \cdot 10^{-7} \div 2,5 \cdot 10^{-7}$ м.

Предыдущими исследованиями установлено, что доменная структура и процессы ее перестройки тепловыми полями и электрическими импульсами существенно зависят от наличия ростовых дефектов, слоистости структуры и наличия механических напряжений [5, 6].

В результате облучения исходных монокристаллов ионами водорода образовывался положительный имплантационный поверхностный слой толщиной порядка 0,2 мкм,

который приводил к модификации доменной структуры облучаемых кристаллов (рис.1).



а) – исходный образец (до облучения); б) – облученный ионами H^+

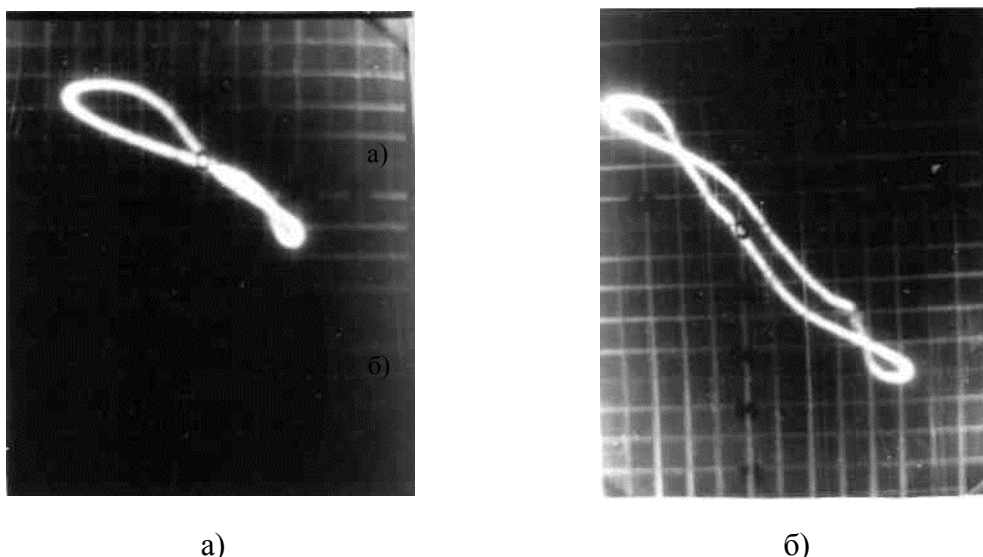
Рисунок 1 – Доменная структура кристаллов $BaTiO_3$ до и после облучения ионами водорода энергией $3 \cdot 10^4$ эВ и дозой $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$

Как правило, *a*-доменный образец приобретал *c*-доменные области, количество и площадь которых возрастали с увеличением энергии облучения. Кристаллы становились оптически более однородными, а степень рассеяния лазерного излучения уменьшалась, что приводило к возрастанию коэффициента оптического пропускания образцов на 25÷30%. Появление *c*-доменных областей связано с возникновением в тонком приповерхностном слое электрического поля пространственного заряда ионов, которое аналогично внешнему поляризирующему \vec{E} ориентирует спонтанную поляризацию нормально к плоскости кристалла.

Это подтверждается появлением двойной петли диэлектрического гистерезиса при односторонней имплантации ионов (рис.2, а) и тройной петли (рис.2, б) – при облучении образцов $BaTiO_3$ с обеих граней кристалла. Облучение кристаллов ионами H^+ приводит также к существенной униполярности гистерезисных характеристик образцов. Имплантированные образцы легче монодоменизируются внешним поляризирующим полем и стабильно сохраняют монодоменное состояние.

Исследуя кривые тока переключения при импульсной переполаризации образцов $BaTiO_3$ и проводя их анализ методом [7] установлено, что с возрастанием дозы облучения (*D*) активизируется механизм переключения за счет фронтального прорастания антипараллельных доменов (рис.3) и подавляется боковое движение доменных стенок. Эта тенденция особенно выражена в кристаллах, полученных при скоростях выращивания $\frac{dT}{dt} > 12$ К/час и обусловлена, по всей видимости, большей концентрацией ростовых дефектов, являющихся стопорами для бокового движения границ.

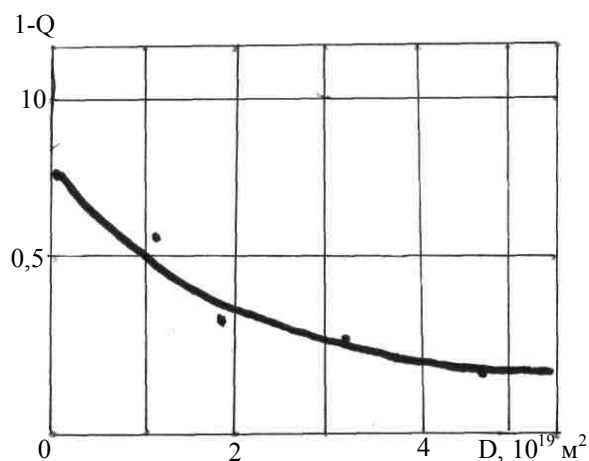
В образцах $BaTiO_3$, подверженных имплантации, уменьшается реверсируемая спонтанная поляризация тем сильнее, чем больше доза облучения (рис.4). Таким образом, возникновение имплантационного слоя на поверхности образца приводит к стабилизации поляризованного состояния титаната бария. При этом увеличивается характери-



а) – одностороннее внедрение ионов; б) – внедрение ионов на обе плоскости образца

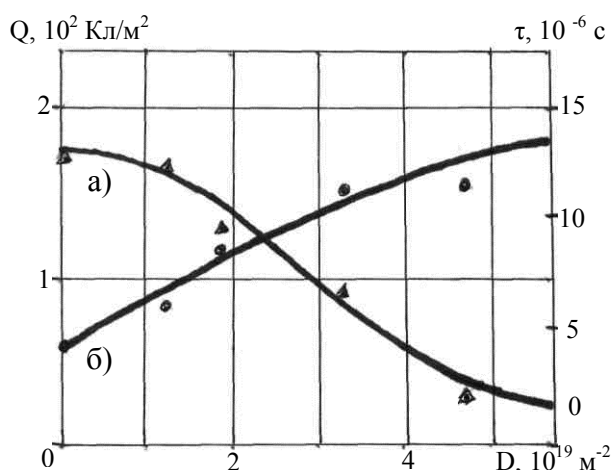
Рисунок 2 – Униполярность петель диэлектрического гистерезиса BaTiO₃ при односторонней и двусторонней имплантации

стическое время переключения (рис.4, б), а также коэрцитивное поле переполаризации образцов (рис.5).



Q – заряд, переключаемый механизмом фронтального прорастания зародышей антипараллельных домен

Рисунок 3 – Зависимость заряда, переключаемого за счет механизма бокового движения доменных границ (1-Q), от дозы (D) облучения ионами H⁺

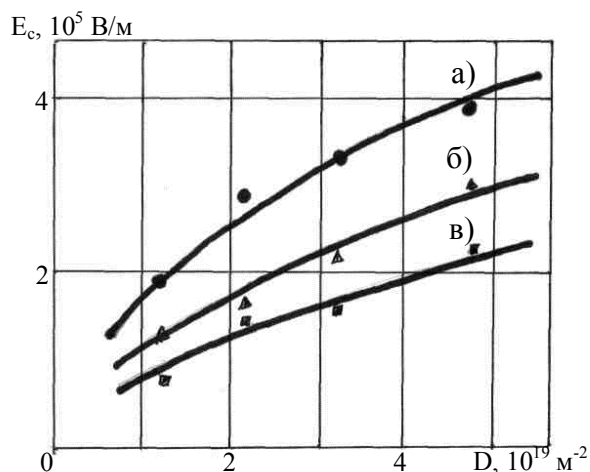


а) – переключаемый заряд; б) – время переключения

Рисунок 4 – Зависимость переключаемого заряда Q и характеристического времени переключения τ от дозы облучения

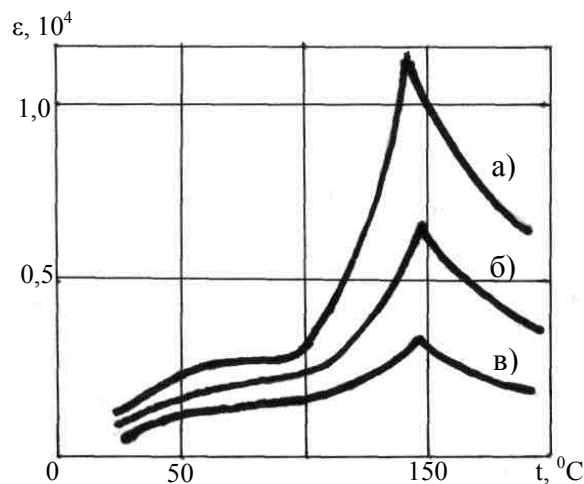
Установлено, что создание поверхностного заряда методом имплантации ионов H⁺ в образцах BaTiO₃ приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости ϵ (рис.6). По-видимому, этот заряд создает электрическое поле, которое играет роль своеобразного смещающего, что и подавляет низкочастотную ϵ .

Выводы. Экспериментально установлено, что монокристаллы BaTiO₃, облученные ионами H⁺ характеризуются дополнительно образованными с-доменными областями, покрывающими 30÷40% от общей площади образцов.



а) – $W_k = 30 \cdot 10^3$ эВ; б) – $W_k = 20 \cdot 10^3$ эВ;
в) – $W_k = 10 \cdot 10^3$ эВ

Рисунок 5 – Зависимость коэрцитивного поля E_c от дозы облучения ионами водорода с различными энергиями W_k



а) – исходный ($D=0$); б) – $D=2 \cdot 10^{19}$;
в) – $D=5 \cdot 10^{19}$

Рисунок 6 – Температурная зависимость диэлектрической проницаемости образцов титаната бария

Имплантированные ионами H^+ кристаллы титаната бария при переполяризации в гармонических полях характеризуются униполярными гистерезисными петлями с их перетяжкой при односторонней имплантации.

Анализ импульсов переключения в электрических полях показал, что облучение кристаллов $BaTiO_3$ ионами водорода приводит к активизации процесса переполяризации кристаллов за счет механизма фронтального прорастания антипараллельных зародышей доменов и подавляется механизм бокового движения доменных границ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением / Ю.С.Кузьминов. – М: Наука, 1982. – 400с.
2. Барфут Дж. Полярные диэлектрики и их применение / Дж. Барфут, Дж. Тейлор. – М.: Мир, 1981. – 526с.
3. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М.Фридкин. – М.: Наука, 1976. – 408с.
4. Таран В.Г. Влияние скорости кристаллизации на метрические характеристики кристаллов $BaTiO_3$ при выращивании из раствора в расплаве солей / В.Г.Таран, А.Т.Кугай // Сб. научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2005. – С.274-277.
5. Таран В.Г. Особенности доменной структуры и переполяризации монокристаллов $BaTiO_3$, выращенных при различных скоростях кристаллизации / В.Г.Таран, К.А.Примакова // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2012. – Выпуск 3(20). – С.99-103.
6. Таран В.Г. Влияние послеростовой термической обработки на свойства кристаллов $BaTiO_3$, полученных с различными скоростями кристаллизации / В.Г.Таран, А.В.Томина // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2013. – Выпуск 3(23). – С.75-79.
7. Gonzales-Jbeas J. Commutision de ferroelectricos con tiempo de trancito frontal muy grande / J.Gonzales-Jbeas // An. Fis. Real. Soc.esp. y guim. – 1970. – W. 64. – С.225-228.

Поступила в редколлегию 15.12.2014.

Дніпродзержинський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКІВ В ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ ВНЗ

Вступ. Важливою складовою навчального процесу студентів технічних спеціальностей ВНЗів є організація проведення лабораторного практикуму, в процесі виконання якого студент набуває практичних навичок роботи з сучасними вимірювальними приладами і безпосередньо переконується в достовірності фізичних теорій та закономірностей, а, отримуючи результати експерименту, дізнається, фіксує і запам'ятовує порядок і числове значення фізичних величин, які характеризують ті чи інші властивості об'єктів дослідження і визначає можливості їх подальшого використання в техніці. Тому головною задачею при створенні лабораторних робіт є підготовка різноманітних об'єктів для дослідження, які дозволяють виявити і виміряти реальні властивості досліджуваного матеріалу, а також з'ясувати можливості впливу на ці характеристики різних факторів. Так, вивчення електричних властивостей напівпровідників починається з визначення знаку, концентрації та рухливості носіїв заряду. Ці характеристики суттєво залежать від матеріалу напівпровідника та концентрації і природи домішкових атомів. Найбільш розповсюдженим методом виміру таких характеристик є виміри напруги Холла в ефекті Холла [1]. На основі ефекту Холла створено різноманітні напівпровідникові датчики Холла для вимірювання напруженості магнітного поля та інших електричних і неелектричних величин [2]. Датчики Холла різних типів та призначення широко випускаються промисловістю. Чутливим елементом цих датчиків є пластинки напівпровідників різної природи та домішкового складу. Тому використання таких датчиків в лабораторному практикумі в якості зразків при дослідженні електричних властивостей напівпровідників допоможе усунути складний процес їх виготовлення та урізноманітнити спектр об'єктів різних типів. З'ясуванню таких можливостей для отримання достовірних знань про електричні властивості напівпровідників і призначена ця робота.

Постановка задачі. Ефект Холла полягає у виникненні різниці потенціалів на протилежних гранях пластини провідника зі струмом, який розміщено у перпендикулярному струму магнітному полі. Величина цієї напруги дорівнює:

$$U_x = R \frac{I \cdot B}{a},$$

де $R = A/ne$ – стала Холла, A – коефіцієнт, числове значення якого залежить від механізму розсіяння носіїв і ступеня виродження напівпровідника, n – концентрація носіїв струму, I – керуючий струм, B – індукція магнітного поля, a – товщина пластинки напівпровідника. Отже, вимірявши U_x та знаючи I , B , a , можна визначити сталу Холла, а відповідно і її знак, тобто належність напівпровідника до n - або p -типу, та концентрацію носіїв струму. Якщо додатково виміряти питому електропровідність провідника $\sigma = en\mu$, то, знаючи R , можна визначити рухливість носіїв заряду [1]:

$$\mu = \sigma / en = R\sigma.$$

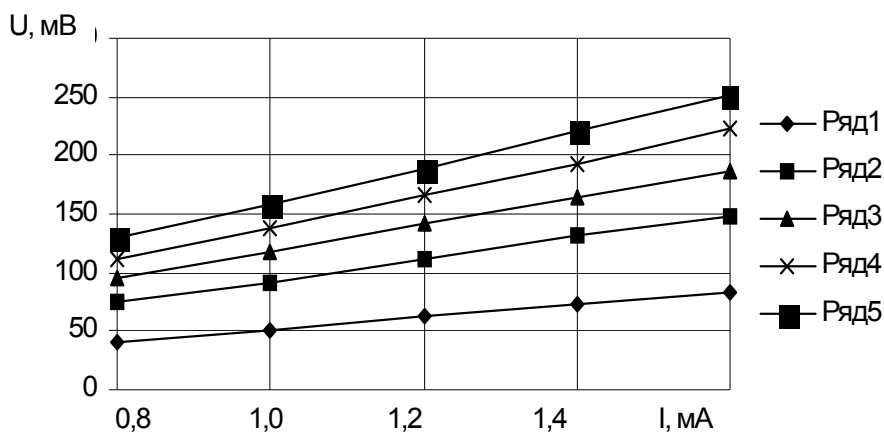
Таким чином, вимірювання, які проведені за допомогою ефекту Холла, спільно з вимірюванням провідності дають можливість визначити тип носіїв струму в провідниках, їх концентрацію n та рухливість μ .

Досліджуваний датчик Холла прилютовувався до контактів змінного тримача, конструкція якого дозволяла вимірювати електроопір датчика, і розміщувався між по-

люсними наконечниками електромагніту. Це дозволяло виміряти вольт-амперну характеристику керуючого струму та визначити електроопір датчика і відповідно питому електропровідність його чутливого елемента.

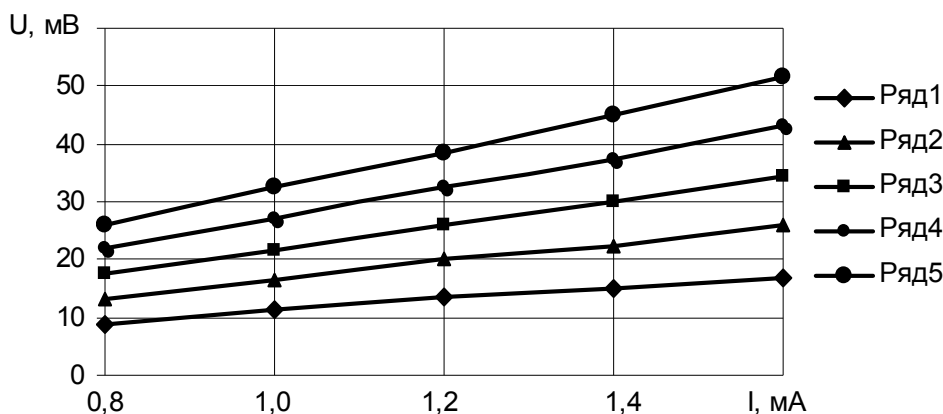
Виміри напруги Холла проводились при кожному значенні керуючого струму для двох протилежних напрямів магнітного поля, що дозволяло уникнути додаткового падіння напруги між холлівськими контактами, яке може бути обумовлено опором кристала між цими контактами в напрямі струму при їх неточному розташуванні.

Результати роботи. У роботі досліджувались датчик Холла ДХК-05, який виконано на основі планарної топологічної структури, створеної на поверхні кремнієвого кристалу, чутливим елементом якого є плівка Si [3], і датчик ПХИ-611, який створено на кристалі GaAs [3]. Геометричні розміри чутливих елементів датчиків вимірювались при розпакуванні датчиків такого ж типу і були наступними: $l \times b \times a = 0,8 \times 0,8 \times 0,01 \text{ мм}^3$ – для ДХК-05 (рис.1) і $1 \times 1 \times 0,2 \text{ мм}^3$ – для ПХИ-611 (рис.2).



1 – 0,092 Тл; 2 – 0,137 Тл; 3 – 0,183 Тл; 4 – 0,229 Тл; 5 – 0,275 Тл

Рисунок 1 – Залежність напруги Холла U_x від керуючого струму I крізь датчик ДХК-05 для різних значень магнітної індукції



1 – 0,049 Тл; 2 – 0,074 Тл; 3 – 0,098 Тл; 4 – 0,123 Тл; 5 – 0,148 Тл

Рисунок 2 – Залежність напруги Холла U_x від керуючого струму I крізь датчик ПХИ-611 для різних значень магнітної індукції

Вимірювалась залежність напруги Холла U_x від величини керуючого струму I крізь датчик при різних значеннях магнітної індукції B в зазорі електромагніту, де було розміщено датчик. Отримані результати цих вимірів для датчиків ДХК-05 і ПХИ-611

представлено на рис.1, 2. З куту нахилу цих залежностей $\alpha = \Delta U_x / \Delta I$ для відповідних значень магнітної індукції B (табл.1) методом лінійної регресії визначено сталу Холла R та концентрацію носіїв заряду:

$$n = \frac{A}{e R},$$

де a – товщина чутливого елемента датчика, $A = 1,18$ – коефіцієнт, який враховує розсіяння носіїв на фонах. Додаткові виміри вольт-амперної характеристики керуючого струму крізь датчики дозволили визначити питому електропровідність σ чутливих елементів і розрахувати рухомість носіїв заряду μ у напівпровідниковому матеріалі датчиків (табл.2).

Таблиця 1 – Залежність α від B за результатами рис.1, 2

ДХК-05	α , В/А	52,2	93,5	117,4	139,3	157,1
	B , Тл	0,092	0,137	0,183	0,229	0,275
ПХИ-611	α , В/А	11,0	16,3	21,7	27,1	32,3
	B , Тл	0,049	0,074	0,098	0,123	0,148

Таблиця 2 – Результати розрахунків електричних властивостей чутливих елементів датчиків Холла ДХК-05 і ПХИ-611 та їх порівняння з даними посилання [4]

Тип датчика Холла	Матеріал	R , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$	n , 10^{20} м^{-3}	σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	μ , $10^{-2} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Посилання
ДХК-05	Si	6,0±0,6	12,3±1,2	130,1±2,1	78±8	-
-	n-Si	5	26	80	-	Рис.21.9 а, б зразок №130 [4]
-	n-Si	-	21	-	15	Рис.21.14 [4]
ПХИ-611	GaAs	44,0±0,5	1,68±0,02	9,80±0,16	40,0±0,8	-
-	n-GaAs	4,4	-	50	-	Рис.21.76 крива 3 [4]
-	n-GaAs	-	38	-	80	Рис.21.77 [4]

Отримані з цих розрахунків значення сталої Холла, концентрації носіїв заряду, питомої електропровідності датчика і рухливості зарядів в матеріалі чутливого елемента для датчиків ДХК-05 і ПХИ-611 та їх порівняння з даними, викладеними в посиланні [4] для електричних властивостей відповідних напівпровідників, надані в табл.2. Співставлення отриманих результатів вимірів здійснювалось з величинами, які характеризують електричні властивості напівпровідникових матеріалів n-типу. Значення електричних характеристик цих матеріалів отримано з графіків відповідних залежностей, наданих в [4] для $T = 300 \text{ К}$. При цьому спостерігається добре співпадіння отриманого в роботі значення сталої Холла для Si (датчик ДХК-05) з величиною R в n – Si, який має близькі значення електропровідності σ і концентрації донорної домішки n (рис.21.9 а, б, зразок № 130 в [4]) та задовільний збіг величин рухомості μ для близької концентрації донорної домішки n (рис.21.14 в [4]). Деяка розбіжність результатів, отриманих для GaAs (датчик ПХИ-611, табл.2), можливо пов'язана з різницею в величині електропровідності σ при співставленні значення R (рис.21.76, крива 3 в [4]) або різницею в концентрації носіїв заряду при співставленні значень μ (рис.21.77 в [4]). Але, незважаючи

на це, отримані результати дають правильне уявлення про електричні властивості кристала GaAs.

Висновки. Таким чином в роботі на прикладі датчиків магнітного поля ДХК-05 і ПХИ-611 експериментально доведено можливість використання промислових датчиків Холла для їх дослідження в лабораторному практикумі ВНЗ з метою визначення електричних властивостей широкого класу напівпровідників, які використовуються в датчиках в якості чутливих елементів, і отримання достовірних параметрів з концентрації і рухливості носіїв заряду в них, сталої Холла та електропровідності. Така можливість дозволяє усунути складний процес виготовлення зразків для вимірювання в ефекті Холла електричних параметрів напівпровідників, який включає отримання пластинки напівпровідника певної форми і точних розмірів, а також точне розташування і прилютування холлівських та керуючих контактів на зразку. Невелика вартість цих датчиків і широка різноманітність їх типів, які виготовляються з напівпровідникових матеріалів різної природи та домішкового складу, дає можливість оминати стадію виготовлення зразків і охопити та отримати уявлення про електричні властивості напівпровідників різного складу. Не менш важливим є те, що при виконанні цієї роботи, ефект Холла використовується не тільки як метод дослідження, а і сам є об'єктом дослідження [1].

ЛІТЕРАТУРА

1. Меняйлов Н.Е. Лабораторний практикум з фізики / Н.Е.Меняйлов. – К.: Вища школа, 1972. – 304с.
2. Кобус А. Датчики Холла и магниторезисторы / А.Кобус, Я.Тушинский. – М.: Энергия, 1971. – 332с.
3. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л.Бараночников. – М.: ДМК Пресс, Т.1. – 2002. – 691с.
4. Таблицы физических величин: справочник / [под ред. акад. Кикоина И.К.]. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008с.

Надійшла до редколегії 24.11.2014.

УДК 621.314

МИХАЙЛЕНКО В.В, к.т.н., ст. викладач
ЧИБЕЛІС В.І., к.т.н., доцент
КОВАЛЬЧУК Д.В., студент
НЕВМОЩЕНКОВ М.В., студент

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВАНАДЦЯТИПУЛЬСНОГО НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ДЕСЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Вступ. Зміна перетворювачів у напівпровідникових пристроях дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1]. У роботах [2-6] показана доцільність використання напівпровідникових перетворювачів (НПП) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури НПП для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при п'ятизонному керуванні.

Постановка задачі. Метою роботи є створення математичної моделі дванадцяти-типульсного напівпровідникового перетворювача з десятизонним регулюванням вихідної напруги.

Результати роботи. *Аналіз електромагнітних процесів.* Структурна схема напівпровідникового перетворювача (НПП) показана на рис.1. На структурній схемі позначено: *СМ1* і *СМ2* – блоки силових модуляторів фазних і лінійних напруг відповідно; *ВВ1* і *ВВ2* – високочастотні випрямлячі фазних і лінійних напруг; *СК* – система керування і *Н* – навантаження, яке має активно-індуктивний характер. Кожний з блоків *СМ* має у своєму складі випрямлячі та інвертори, навантажені на узгоджувальні трансформатори.

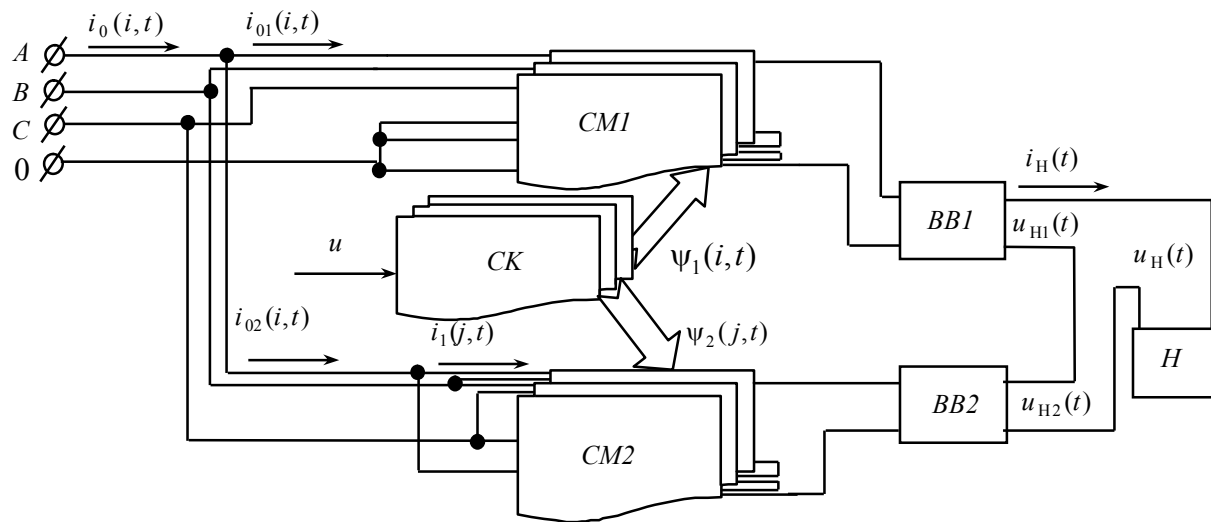


Рисунок 1 – Структурна схема НПП

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інвертора випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній із зон регулювання вихідної напруги не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Алгоритмічне рівняння перетворювача записано у публікації [2]:

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \left(\sum_{n=1}^{N=5} \sum_{i=1}^3 u_{n1}(i,t) \psi_1(i,t) \psi_{B1}(i,t) v_1(t) + \sum_{n=1}^{N=5} \sum_{j=1}^3 u_{n2}(j,t) \psi_2(j,t) \psi_{B2}(j,t) v_2(t) \right), \quad (1)$$

де: $i = 1, 2, 3$ і $j = 1, 2, 3$ – номери фазних і лінійних напруг енергетичної мережі відповідно; k_T – коефіцієнт трансформації трансформаторів; $v_1(t)$ і $v_2(t)$ – еквівалентні модулюючі впливи *ВВ1* і *ВВ2*.; $n = 1, 2, 3, \dots, N$ – номери зон регулювання вихідної напруги; N – кількість ІВН в кожному *СМ*; $\psi_{\hat{A}1}(i,t) = \text{sign} \left[\sin \left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right]$ – моду-

люючі функції, які співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг мережі живлення; $\Psi_{B2}(j, t) = \text{sign} \left[\sin \left(\omega_1 t - \varphi + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right]$ – модулюючі функції, які співпадають за часом з положенням відповідних лінійних напруг мережі живлення; $u_{11}(i, t) = E_m \sin \left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right)$ – миттєві значення вхідних фазних напруг мережі живлення, $u_{12}(j, t) = E_m \sin \left(\omega_1 t - \varphi + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right)$ – миттєві значення вхідних лінійних напруг мережі живлення, E_m – амплітудне значення фазної напруги; $\omega_1 = 2\pi f_1$ і φ – відповідно кругова частота і початкова фаза напруги живлення; $\psi_1(i, t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х СМ, $\psi_2(j, t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів j -х СМ.

Струм на навантаженні перетворювача знайдемо як реакцію одноконтурного RL-ланцюга на дію напруги $u_H(t)$

$$i_H(t)R + L \frac{di_H(t)}{dt} = u_H(t), \quad (2)$$

де R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Розв'язання (2) відносно струму навантаження визначимо числовим методом за допомогою функції `odesolve` математичного процесора `MATHCAD`

$$i_H(t) = \text{odesolve}(t, k, p), \quad (3)$$

де t – час; k – часовий інтервал; p – кількість точок на часовому інтервалі.

Діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача, побудовані за (3), для десятизонного регулювання представлено на рис.2.

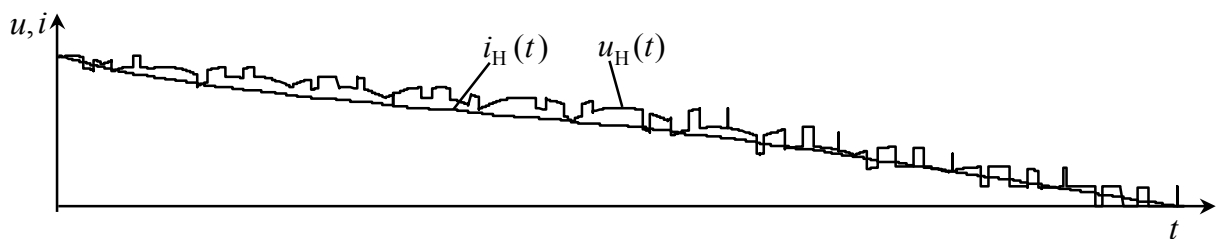


Рисунок 2 – Діаграми струму та напруги навантаження

Фазні струми $i_{01}(i, t)$ знаходимо з виразу

$$i_{01}(i, t) = \frac{\sum_{n=1}^{N=5} i_H(t) \Psi_{B1}(i, t) \psi_1(i, t) v_1(t)}{k_T}. \quad (4)$$

Лінійні струми $i_{12}(j, t)$ знаходимо з виразу виду

$$i_{12}(j,t) = \frac{\sum_{n=1}^{N=5} i_{Hn}(t) \Psi_{\Delta 2}(j,t) \Psi_2(j,t) v_2(t)}{k_T}. \quad (5)$$

Фазні струми $i_{02}(i,t)$ знаходимо зі співвідношень

$$i_{02}(1,t) = i_{12}(1,t) - i_{12}(3,t); \quad i_{02}(2,t) = i_{12}(2,t) - i_{12}(1,t); \quad i_{02}(3,t) = i_{12}(3,t) - i_{12}(2,t). \quad (6)$$

Вхідні фазні струми енергетичної мережі у кожній i -й фазі знаходимо з виразу

$$i_0(i,t) = i_{01}(i,t) + i_{02}(i,t). \quad (7)$$

Діаграми вхідних фазних струмів перетворювача в координатах напруг енергетичної мережі, побудовані за (7), представлено на рис.3.

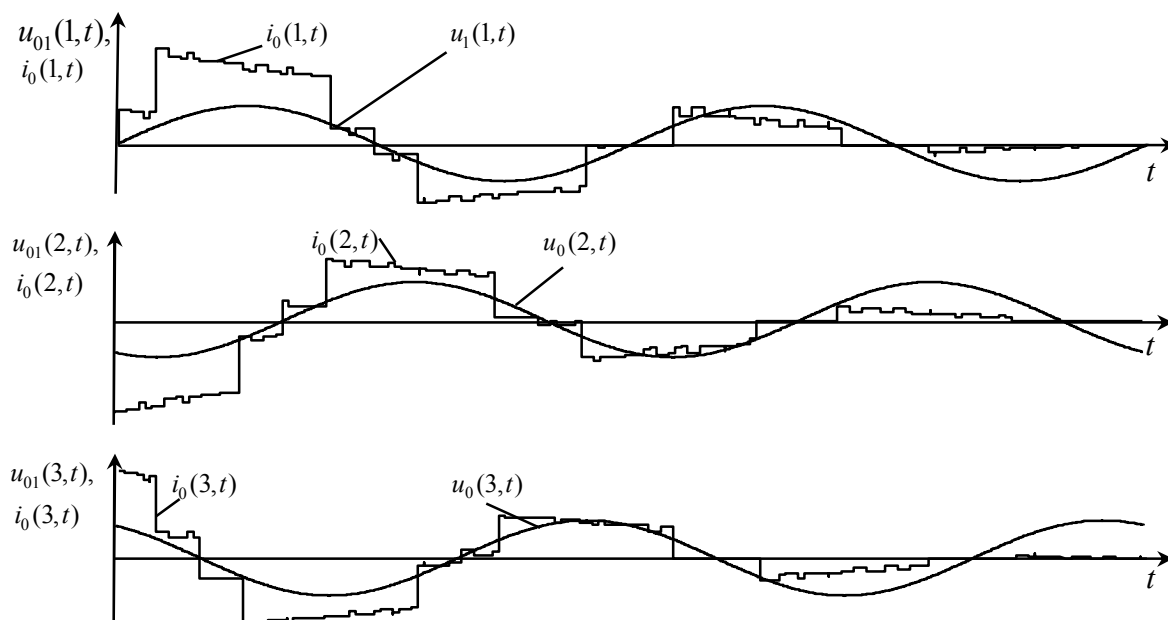


Рисунок 3 – Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Висновки. Наведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Окрім наведених співвідношень і діаграм розроблена модель дозволяє аналізувати форми напруг і струмів на виході окремих СМ, а також їх елементах у процесі зонного регулювання вихідної напруги перетворювача.

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів, котрі знаходяться в колах протікання струмів через силові транзистори.

У даній роботі виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій, знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача. У роботі розвинуто метод багатопараметричних функцій в частині розробки нової математичної моделі з багатозонним регулюванням вихідної напруги та

визначення модулюючих функцій для аналізу за підсистемними складовими структури електричних кіл з напівпровідниковими комутаторами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Макаренко М.П. Деякі аспекти комп'ютерного аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М.П.Макаренко, В.В.Михайленко // Техн. електродинаміка: тем. вип. „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2004. – Ч. 1. – С.112-115.
2. Макаренко М.П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М.П.Макаренко, В.І.Сенько, М.М.Юрченко. – К.: ІЕД НАН України, 2005. – 241с.
3. Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М.П.Макаренко, В.В.Михайленко // Техн. електродинаміка: тем. вип. „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2002. – Ч. 1. – С.19-22.
4. Макаренко Н.П. Анализ электромагнитных процессов в двенадцатипульсном преобразователе с зонным регулированием выходного напряжения / Н.П.Макаренко, В.В.Михайленко, Н.Н.Юрченко // Вестник НТУ „Харьковский политехнический институт”: „Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – 2002. – Т. 1. – С.233-234.
5. Макаренко М.П. Математична модель перетворювача трифазної напруги в постійну напругу / М.П.Макаренко, В.В.Михайленко // Електроніка і зв'язь. – 2002. – № 14. – С.73-75.
6. Макаренко М.П. Моделювання електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії з урахуванням параметрів мережі живлення / М.П.Макаренко, В.В.Михайленко // Техн. електродинаміка: тем. вип. „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2005. – Ч. 2. – С.48-51.

Надійшла до редколегії 10.03.2015.