

Термічна стабільність та експлуатаційна надійність нанорозмірних металевих плівок на діелектриках та напівпровідниках

Термическая стабильность и эксплуатационная надежность наноразмерных металлических пленок на диэлектриках и проводниках

Thermal stability and operating reliability of nanosized metal films on insulators and semi-conductors

- 1. Номер державної реєстрації теми - 0112U000818, НТУУ «КПІ» - 2509-ф.**
- 2. Науковий керівник - д.ф.-м.н., проф. Волошко С.М., Волошко С.М., Voloshko Svitlana M.**
- 3. Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

Розроблено комплексний науковий підхід для врахування «перехресних ефектів» впливу фізико-технологічних параметрів термічного осадження на структуру і властивості нанорозмірних металевих плівок Cu-Sn, Cu-Au, Cu-Mn, Cu-Sn-Mn, Al-Mn-Cr, Ni-Al, Ni-Au, Ti-Ag, Fe-Pt, тощо. Встановлено загальні закономірності перебігу дифузійних процесів внаслідок подальшого термічного відпалу в надвисокому вакуумі, кисень- та водневмісних атмосферах, йонно-плазмової та лазерної обробки. Встановлено роль фактору нанорозмірності, взаємозалежність процесів реакційної багатофазної дифузії, упорядкування, пороутворення, формування оксидних шарів, змін морфології поверхні та їх вплив на термічну стабільність та електрофізичні властивості. Розвинуто модельні уявлення щодо механізмів та кінетики термічно-стимульованої само- та гетеродифузії, а також специфічних ефектів, обумовлених інверсією матеріалів шарів, впливом додатково нанесених поверхневих та бар'єрних шарів тощо. Доведено, що процеси оксидо- та гідридоутворення на зовнішній поверхні термодинамічно визначають закономірності фазоутворення в об'ємі; на цій основі запропоновано феноменологічні та аналітичні моделі дифузії у багатошарових плівкових композиціях. Застосовано також підходи «ab initio», Car-Parinello молекулярної динаміки, кінетичної моделі Monte Carlo з метою комп'ютерного моделювання та оптимізації досліджуваних процесів. Запропоновано матеріалознавчі критерії для визначення режимів термічної обробки, які забезпечують підвищення термічної стабільності нанорозмірних металевих контактів, як частини мікроелектронних пристроїв із більш високим ступенем інтеграції, щільності монтажу, швидкодії та надійності.

(рос.)

Разработан комплексный научный подход для учета «перекрестных эффектов» влияния физико-технологических параметров термического осаждения на структуру и свойства наноразмерных металлических пленок Cu-Sn, Cu-Au, Cu-Mn, Cu-Sn-Mn, Al-Mn-Cr, Ni-Al, Ni-Au, Ti-Ag, Fe-Pt и т.д. Установлены общие закономерности протекания диффузионных процессов в результате последующего термического отжига в сверхвысоком вакууме, кислород- и водородсодержащих атмосферах, ионно-плазменной и лазерной обработки. Установлена роль фактора наноразмерности, взаимосвязь процессов многофазной реакционной диффузии, упорядочения, порообразования, формирования оксидных слоев, изменения морфологии поверхности и их влияние на термическую стабильность и электрофизические свойства. Развита модельные представления относительно механизмов и кинетики термически-стимулированной само- и гетеродиффузии, а также специфических эффектов, обусловленных инверсией материалов слоев, влиянием дополнительно нанесенных поверхностных и барьерных слоев. Доказано, что процессы оксидо- и гидридообразования на внешней поверхности термодинамически определяют закономерности фазообразования в объеме; на этой основе предложены феноменологические и аналитические модели диффузии в многослойных пленочных композициях. Используются также подходы «ab initio», Car-Parinello молекулярной динамики, кинетической модели Monte Carlo с целью компьютерного моделирования и оптимизации исследуемых процессов. Предложены материаловедческие критерии для определения режимов термической обработки, обеспечивающих повышение термической

стабільності нанорозмерних металічних контактів, як частини мікроелектронних пристроїв з більш високою ступенню інтеграції, щільності монтажу, швидкодії та надійності.

(англ.)

A comprehensive scientific approach to account for the "cross-effects" influence of physical and thermal deposition process parameters on structure and properties of nanoscale metal films Cu-Sn, Cu-Au, Cu-Mn, Cu-Sn-Mn, Al-Mn-Cr, Ni-Al, Ni-Au, Ti-Ag, Fe-Pt, and etc has been developed. The general regularities of diffusion processes due to subsequent thermal annealing in ultra-high vacuum, oxygen- and hydrogen containing atmosphere, ion-plasma and laser treatment have been discovered. The role of nanoscale factor, interdependent processes reactive multiphase diffusion, ordering, pore formation, the formation of oxide layers, the surface morphology changes and their influence on the thermal stability and the electrical properties have been established. Developed theoretical ideas concerning the mechanisms and kinetics of thermally-induced self- and heterodiffusion and specific effects due to inversion layers of materials have been found together with the influence of additional surface and deposited barrier layers and so on. The process oxide and hydrate formation on the outer surface thermodynamically determines regularities of phase formation in the bulk; on this basis the phenomenological and analytical models of diffusion in multilayer film compositions were developed. «Ab initio» approaches, Car-Parinello molecular dynamics, kinetic Monte Carlo model for the purpose of computer simulation and optimization of the studied processes have been applied. A materials science criteria for determining the heat treatment that enables increased thermal stability of nanoscale metal contacts as part of microelectronic devices with a higher degree of integration, density mounting, performance and reliability have been suggested.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

- Васильєв М.А., Сидоренко С.І., Волошко С.М. Спосіб виготовлення титанового імплантату з розвиненою поверхнею. Патент на корисну модель № 79160 від 10.04.2013 р.
- Васильєв М.О., Панарін В.Є., Сидоренко С.І., Волошко С.М., Бурмак А.П. Спосіб отримання твердого покриття на поверхні металевих виробів. Патент на корисну модель № 75866 від 10.12.2012 р.
- Сидоренко С.І., Волошко С.М., Замулко С.О. Термічна стабільність та експлуатаційна надійність нанорозмірних металевих плівок на монокристалічному кремнії // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 54884 від 20.05.2014 р.
- Сидоренко С.І., Волошко С.М., Олешкевич А.І. Закономірності керованого формування поверхневих та об'ємних структурно-фазових станів у тонких плівках системи Cu/Sn/Mn // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 54883 від 20.05.2014 р.
- Сидоренко С.І., Волошко С.М., Вилкова Н.Ю. Ефект формування поверхневих періодичних мікро- та наноструктур на поверхні багаточарових металевих плівок під дією лазерного опромінення // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 54885 від 20.05.2014 р.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню завдяки застосуванню комплексу найсучасніших висороздільних експериментальних методів дослідження (мас-спектрометрії вторинних іонів та нейтралей, електронної оже-спектроскопії, трансмісійної електронної мікроскопії, атомно-силової мікроскопії, рентгенівської рефлектометрії, резерфордівського зворотного розсіювання тощо), високому рівню наукового узагальнення, створенню на атомному рівні фізичних моделей та механізмів дифузійних процесів в нанорозмірних металевих шарах та розвитку фізико-матеріалознавчих основ тонкоплівкових нанотехнологій.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Отримані наукові результати мають практичний інтерес для вдосконалення режимів створення потрібних структурно-фазових станів у тонкоплівкових технологіях електронної промисловості, в галузі нанотехнологій; відкривають нові перспективи на шляху оптимізації технологічних процесів створення нанометрових плівкових шарів, покращення техніко-економічних показників виробництва мікроприладів різного функціонального призначення.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Одержані результати представляють практичний інтерес для Міжнародного центру електронно-променевої технології Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона м. Київ (вакуумні технології одержання плівок та покриттів, наноматеріали для медицини), Науково-технічного центру "Мікроелектроніка" м. Львів (виготовлення матеріалів та пристроїв для мікроелектроніки), НПП "БИТ" м. Київ (розробка напівпровідникових пристроїв, інтегральних мікросхем та електронної апаратури, проведення електрофізичних та аналітичних досліджень виробів електронної техніки), Інституту монокристалів м. Харків (розробка методів отримання плівкових матеріалів), «Квазар - Мікро. Компоненти та системи», "Мікрон" м. Київ (виробництво електронних компонентів), НДІ Мікроприладів м. Київ (розробка та виготовлення мікросхем) тощо.

8. Стан готовності розробки.

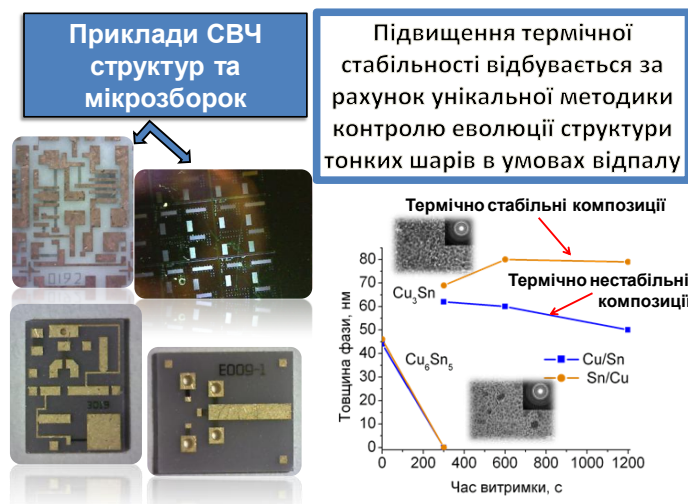
Розроблено наукові принципи керованого формування наперед заданих структурно-концентраційно-фазових розподілів речовин, досягнення нового – підвищеного – ступеня керованості і відтворюваності процесів виробництва тонких і надтонких плівок, тонких приповерхневих шарів, шаруватих композицій металів і металічних сплавів субмікронної і нанометрової товщини, досягнення якісно нових властивостей і характеристик, збільшення відсотку виходу годних.

9. Існуючі результати впровадження.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес: поставлено нові спецкурси «Атомний дизайн та зондові нанотехнології модифікації поверхні», «Комп'ютерне конструювання матеріалів»; розроблено 3 нових розділи з 3 дисциплін («Інформаційні та комунікаційні технології у науковій діяльності матеріалознавця» з дисципліни «Інформаційні технології розв'язання фізико-технічних задач», «Зерногранична дифузія в нанокристалічних матеріалах з ієрархічною структурою» з дисципліни «Теорія тепло- та масопереносу», «Матеріалознавчі основи ортопедичної стоматології» з дисципліни «Міждисциплінарні проблеми фізичного матеріалознавства»), впроваджено комп'ютерний практикум з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів тепло- та масопереносу».

10. Назва підрозділу, телефон, E-mail

НТУУ"КПІ", інженерно-фізичний факультет, кафедра фізики металів,
454-97-70, voloshko-s@yandex.ru.



11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, S.O. Zamulko, A.I. Oleshkevych. Diffusion and interfaces stability in thin film metallic contacts. – Kyiv: Naukova Dumka, 2014. – 178 p.
2. A.I. Oleshkevych, S.M. Voloshko, S.I. Sidorenko, et al. Enhanced Diffusion caused by Surface Reactions in Thin Films of Sn-Cu-Mn // *Thin Solid Films*. – 2014. – № 550. – P. 723–731. **Impact Factor: 1.6**.
<http://www.sciencedirect.com/sci-hub.org/science/article/pii/S0040609013017768>
3. A. Tynkova, G.L. Katona, G.A. Langer, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, D.L. Beke. Formation of $\text{Cu}_x\text{Au}_{1-x}$ phases by cold homogenization of Au/Cu nanocrystalline thin films // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2014. – 5. – P. 1491–1500. **Impact Factor: 2,332**.
<http://www.beilstein-journals.org/bjnano/single/articleFullText.htm?publicId=2190-4286-5-162>
4. V.V. Tarnavich, D. Lott, A.I. Oleshkevych, et al. Field-induced chirality in the helix structure of Ho/Y multilayers // *Phys. Rev. B*. – 2014. – 89. – P. 054406–054412.
Imp. Factor: 3.772. <http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.89.054406>
5. V.V. Tarnavich, A.S. Volegov, D. Lott, S. Mattauch, A.A. Vorobiev, A. Oleshkevych, S.V. Grigoriev. Structural and Magnetic Properties of the Holmium-Yttrium Superlattice // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 19 – 25. / **Impact Factor 0.36**.
6. B. Parditka, M. Verezhak, M. Ibrahim. Phase Growth in Thin Amorphous Si-Cu and Si-Co Systems: Combination of SNMS, XPS, XRD, and APT Techniques // *Defect and Diffusion Forum*. – 2014. – 353. – P. 269-274. **Impact Factor: 0,5**.
<http://www.scientific.net/DDF.353.269>
7. A. Tynkova, S. Sidorenko, S. Voloshko, et al. Interdiffusion in Au(120 nm)/Ni(70 nm) thin films at the low-temperature annealing in the different atmospheres // *Vacuum*. – 2013. – 87. – P. 69-74. **Impact Factor: 1.53**.
<http://www.sciencedirect.com/sci-hub.org/science/article/pii/S0042207X12003466>
8. S. Sidorenko, S. Voloshko, S. Zamulko, I. Kotenko et al. Structural and concentration heterogeneity under formation of silicide phases in thin film system Ti(5 nm)/Ni(24 nm)/Si(001) // *Defect and Diffusion Forum*. – 344. – 2013. – P. 79-84. **Imp. Factor: 0,5**.
<http://www.scientific.net/sci-hub.org/DDF.344.79>
9. B. Parditka, M. Verezhak, Z. Balogh, et al. Phase growth in an amorphous Si-Cu system, as shown by a combination of SNMS, XPS, XRD and APT techniques // *Elsevier, Acta Materialia*. – 2013. – 61, Issue 19. – P. 7173–7179. **Impact Factor: 3.94**.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645413006174>
10. B. Parditka, M. Verezhak, D. L. Beke, et al. Fázis növekedés amorf Si – Cu rendszerben; SNMS, XPS, XRD valamint APT rendszerek kombinált alkalmazása // *European Physical Journal, Debrecen*, 21-24 August 2013, P. 26. **Impact Factor: 1.463**.
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py/abstractBook?confId=225559>
11. S.M. Voloshko, M.O. Vasylyev, V.A. Tinkov et al. Generation of the periodic surface structures on the dental Co-Cr-Mo alloy by YAG:Nd laser in an inert atmosphere // *Applied Surface Science*. – 2012. – 258, №10. – P. 4424-4427. **Imp. Factor: 2.112**.
<http://www.sciencedirect.com/sci-hub.org/science/article/pii/S0169433212000128>
12. S.M. Voloshko, V.A. Tinkov, S.I. Sidorenko, et al. Formation of the Eutectic Structure and Grain Growth in Multilayer Thin Film System Cr/Cu/Ni at Pulsed Laser Heating // *Innovations and Technologies News*. – 2012. – №1 (14) – P. 23-29.
www.InnovationsLine.com (Solid State Physics).
13. A. Oleshkevych, I. Kotenko, S. Voloshko et al. Thermally driven redistribution of phases and components in Cu/Sn thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. – 535. – P. 108-113. **Impact Factor: 2.39**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.037>