



УДК: 533.537

Жамолiddин ШОХИМАРДОНОВ,

Базовый докторант, Каршинский государственный университет, ORCID 0009-0001-5586-3239

E-mail: shjmadu@gmail.com

Нодира МУСТАФАЕВА,

Доцент, Университет информационных технологий и менеджмента, PhD

Ёкуб ЭРГАШЕВ,

Профессор, д.ф.-м.н, Национального университета Узбекистана

Алланазар ТАШАТОВ,

Профессор, Каршинский государственный университет, д.ф.-м.н, ORCID 0009-0006-0164-829X

E-mail: atashatov@mail.ru

РАМАНОВСКИЕ СПЕКТРОСКОПИИ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Аннотация

Отметим, что рамановской спектроскопии достоверно показали, что тонкие пленки металлов Cr, сформированные на Si(111), содержат силицидные фазы, обладают высокой степенью кристалличности и в некоторых случаях содержат углеродистые примеси. Это расширяет возможности использования полученных гибридных структур в дальнейших опто- и нанозлектронных устройствах.

Ключевые слова: морфология поверхности, оптическая спектроскопия, тонкие пленки, рентгеновская дифракция, рамановский спектр, отражательные способности, пропускания.

SURFACE RAMAN SPECTROSCOPY OF THIN METAL FILMS

Annotation

It should be noted that Raman spectroscopy reliably demonstrated that thin Cr metal films formed on Si(111) contain silicide phases, possess a high degree of crystallinity, and in some cases contain carbon impurities. These results expand the possibilities for using the obtained hybrid structures in future optoelectronic and nanoelectronic devices.

Keywords: surface morphology, optical spectroscopy, thin films, X-ray diffraction, Raman spectroscopy, reflectance, transmittance.

YUQORI METALL PLYONKALARINING SIRFA RAMAN SPEKTROSKOPIYASI

Annotation

Shuni ta'kidlash kerakki, Raman spektroskopiyasi Si(111) da hosil bo'lgan Cr metallarining yupqa plyonkalarida silitsid fazalari mavjudligi, yuqori darajadagi kristallanishni namoyish etishi va ba'zi hollarda uglerodli aralashmalarni o'z ichiga olishini ishonchli tarzda ko'rsatdi. Bu natijada hosil bo'lgan gibrud tuzilmalarni kelajakdagi opto- va nanoelektron qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini kengaytiradi.

Kalit so'zlar: sirt morfologiyasi, optik spektroskopiya, yupqa plyonkalar, rentgen difraksiyasi, Raman spektri, aks ettirish, o'tkazuvchanlik.

Введение. Структура тонкой пленки и последовательность фазового образования связаны между собой, имеет большое значение [1-6]. Поэтому в данном исследовании была проведена поверхностная характеристика ряда переходных металлических силицидных тонких пленок, лежащих на кремниевой подложке, с использованием РФЭС (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) в сочетании с ХРД (Рентгеновская дифракция) для определения фаз. Рамановская спектроскопия особенно важна при работе с тонкими пленками для определения границы раздела между пленкой и подложкой, межфазных изменений, окисления или примесей. Среди разнообразия силицидных композиций дисилициды являются наиболее широко используемыми соединениями, и поэтому они были выбраны в качестве объектов для данного исследования [7-11].

Методика. Тонкие пленки Cr выращивались на кремниевой подложке с использованием методом магнетронного распыления (твердотельной ионной плазмы (в режиме постоянного тока). Температура подложки при осаждение составляла 460°C, а вакуумное давление поддерживалось на уровне $\sim 10^{-2}$ Па. Эти условия позволяли атомам Cr быть достаточно подвижными при осаждении на поверхность. Поэтому изначально наблюдалось, что полученные слои имеют, преимущественно поликристаллическую структуру.

Измерения отражательной способности и пропускания в инфракрасной области были проведены для пленки CrSi₂ толщиной 90 нм, осажденной на подложку Si(111). Измерения отражения и пропускания света были выполнены с использованием прибора Transmittance "IRTracer-100" (Qatr-10), размещенного в образцовом отсеке FTIR-спектрометра с углом падения $\approx 18^\circ$. Для выявления образования силицидных фаз эксперименты проводились микро-Рамановской спектрометре. Мощность лазерного пучка была установлена на уровне 7,3 мВт, чтобы избежать термического нагрева пленки [12,13].

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света изучены структура и фазовое состояние пленок, сформированных на поверхности образцов, напыленных металлами Cr на поверхность Si(111) ионно-плазменным

методом. Основной целью получения данного типа спектров является определение состава веществ, степени кристалличности, фазового состояния и химических связей.

Результаты. Тонкие пленки напыляются хромом высокой чистоты с помощью ионно-плазменного метода, что обеспечивала хорошую адгезию атомов хрома к поверхности кремния и позволяла контролировать их химическое состояние. На рис.1. приведены спектры энергии связи пика $2p_{3/2}$ чистого Cr и силицида Cr. А также на рисунке показаны различия в позициях ЭС для различных комбинаций Cr и Si, исследуемых в этих двух случаях. Как видно на рисунке, после всех процессов силицидирования наблюдается значительное смещение ЭС в $2p$ состоянии. Основной пик расположен около 574 эВ, соответствующий уровню Cr $2p_{3/2}$. Для Cr было установлено, что существует отрицательное смещение ЭС на 0,1 эВ. Двойные фазовые соединения CrSi + CrSi₂ привели к формированию Cr-Si системы. Соответствующие позиции ЭС для смеси CrSi и CrSi₂ составляют 573,6 эВ и 574,2 эВ соответственно. Анализ спектра РФЭС что указывает на отсутствие значительных изменений в электронной конфигурации атомов хрома.

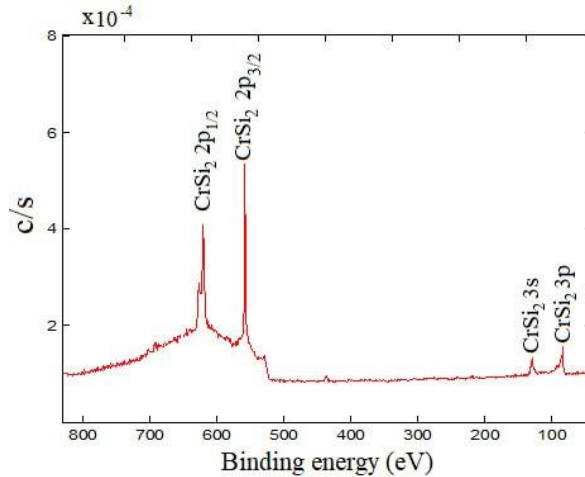


Рис.1. Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, сравнивающие уровни энергии $2p_{3/2}$ хрома до и после силицидирования

Спектр чистого хрома (черная линия) имеет широкий пик на более высоких значениях связи (слева), тогда как спектр силицидированной пробы (красная линия) показывает более узкий и симметричный пик. Это свидетельствует о небольших различиях в химическом состоянии атомов хрома.

Силицидированная проба показывает более низкий уровень фона в области низких энергий (580-576 эВ), что подтверждает изменение химической связи. Представленный спектр РФЭС подтверждает образование фаз CrSi и CrSi₂. Очень небольшие изменения в энергии связи и изменение формы спектра указывают на то, что атомы хрома связаны с кремнием. Энергетические уровни Cr $2p_{3/2}$ подвергаются, незначительным изменениям в процессе силицидирования и показывает, что химическая связь между хромом и кремнием осуществляется с относительно слабым перераспределением электронов.

Раман-спектроскопическая оценка имеет преимущества с точки зрения простоты, быстроты, отсутствия использования химических реагентов и отсутствия специальных требований к форме измеряемых образцов. Ранее в работах [14,15] была проведена экспериментальная исследования воздействия формирования нанокристаллитов на колебательные, электронные и оптические свойства тонких пленок.

Основные пики зарегистрированные, Рамановской спектроскопией достоверно свидетельствовали об образовании в пленках соответствующих силицидных фаз.

На рис.2 приведена Раман-спектр и электронно-микроскопическое изображения поверхности пленки CrSi₂. Раман-спектры полученные для поликристаллических тонких пленок, выявила наличие Раман-активного режима на 508 cm^{-1} . Это подтверждает теоретические расчеты с использованием плотностной-функциональной теории, предсказывающие наличие режима на 297 cm^{-1} , который до сих пор было трудно наблюдать на поликристаллическом CrSi₂.

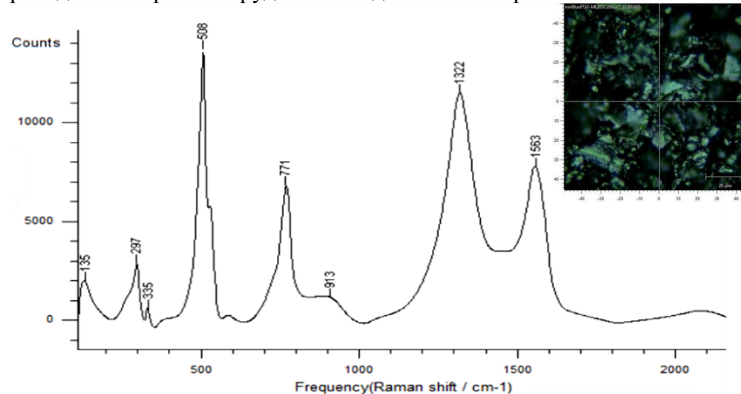


Рис.2. Раман-спектр и электронно-микроскопическое поверхности (вставки) изображение тонкой пленки CrSi₂

Также были наблюдаемы комбинированные колебания, одна из широких особенностей, расположенных в центре на 1322 и 1563 cm^{-1} . В частности, интенсивные пики, расположенные при 355 cm^{-1} и 398 cm^{-1} в спектре комбинационного рассеяния, полученном для системы Cr/Si, подтвердили наличие фазы CrSi₂. Эти пики связаны с колебательными состояниями кристаллической структуры, образованной между атомами Cr и Si, что указывает на то, что произошел процесс кристаллизации высокого уровня. Кроме того, пики около 771 cm^{-1} и 913 cm^{-1} указывают на наличие интердиффузии и дополнительных фазовых образований на границе раздела.

Пик хрома силицида CrSi₂ на 335 cm^{-1} также были наблюдаемы в низкочастотной области Раман-спектров. Отсутствие колебаний, зависящих от кислорода, в Раман-спектрах указывает на отсутствие окисления в образце.

На рис.3 приведен Раман-спектр и электронно-микроскопическое изображение пленок CrSi₂ и CrSi.

Аналогичные признаки образования силицидов наблюдались в другом спектре Рамана, возможно, из другого типа системы Cr/Si или CrSi₂/Si. Пики при 297 cm^{-1} , 586 cm^{-1} , 771 cm^{-1} и 1322 cm^{-1} в спектре указывают на наличие нескольких фаз в пленках. В частности, резкий интенсивный пик при 586 cm^{-1} соответствует известному рамановскому активному режиму силицидов.

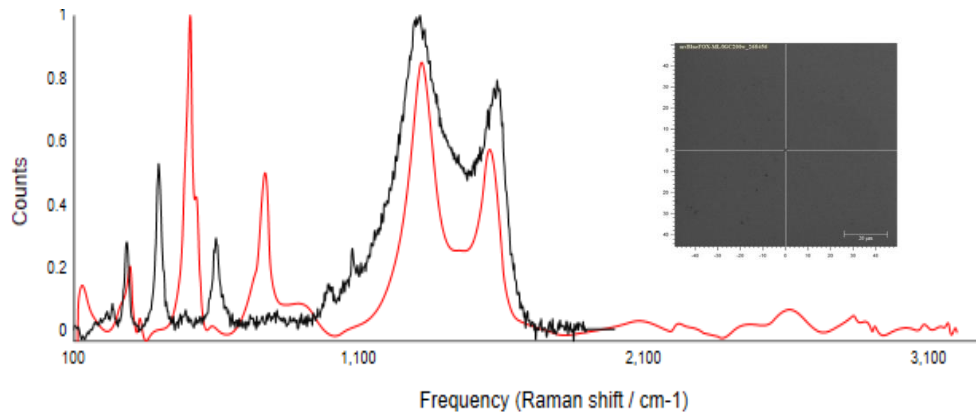


Рис.3. Раман-спектр и электронно-микроскопическое изображение тонкой пленок CrSi₂ (красные линии) и CrSi (черные линии)

В целом результаты рамановской спектроскопии достоверно показали, что тонкие пленки металлов Cr, сформированные на Si(111), содержат силицидные фазы, обладают высокой степенью кристалличности и в некоторых случаях содержат углеродистые примеси. Это расширяет возможности использования полученных гибридных структур в дальнейших опто- и наноэлектронных устройствах.

На рис.4 резонансные пики, расположенные при 135 cm^{-1} , 293 cm^{-1} и 355 cm^{-1} , указывают на образование фазы силицида CrSi₂. Эти пики указывают на то, что между атомами Cr и Si образовались кристаллические связи и что фаза представлена активными модами колебаний Рамана. В частности, пик около 355 cm^{-1} характерен для фазы CrSi₂, что указывает на высокий уровень передачи энергии при формировании этой фазы.

Кроме того, сильный и острый пик, расположенный при 532 cm^{-1} , согласуется с сигналом комбинационного рассеяния монокристаллической кремниевой подложки. Это означает, что полученная пленка получается тонкой, а лазерный луч достигает подложки и отражается от нее. Это свидетельствует о высокой плотности и кристалличности пленки.

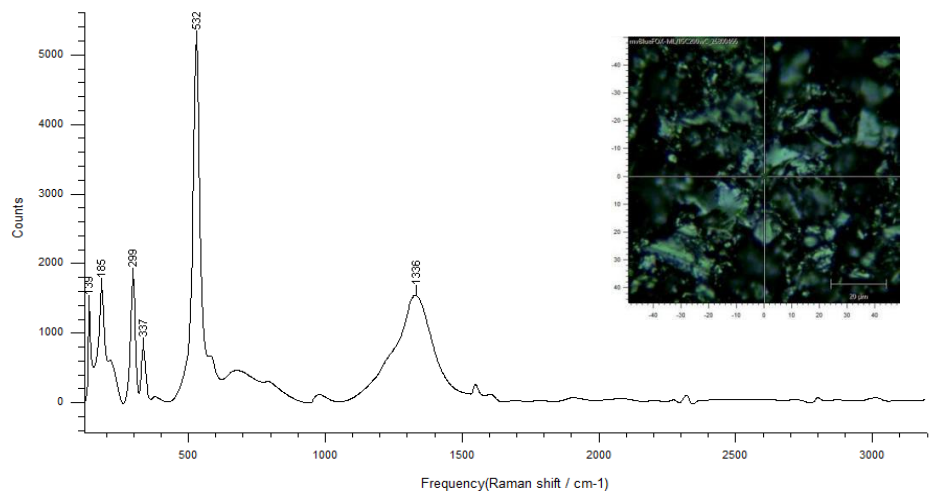


Рис.4. Раман-спектр и электронно-микроскопическое изображение пленки Cr/Si

Широкий пик, обнаруженный в высокочастотном диапазоне (1336 cm^{-1}), указывает на наличие возможной графитовой углеродной фазы. Этот пик может быть связан с активными состояниями углеродистых компонентов, оставшихся в процессе напыления, и наблюдаемые в спектрах Рамана.

Полученные результаты дают основание рассматривать систему Cr-Si как стабильный, хорошо структурированный и перспективный материал для оптоэлектронных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaumseil, P., Kozlov, S.M., Besmehn, A. Nickel silicide contacts to silicon nanowire transistors: Formation, properties and reliability. // *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, Vol. 56, pp. 38–46.
2. Yu-Ru Lin, Wan-Ting Tsai, Yung-Chun Wu 1 and Yu-Hsien Lin. Ultra Thin Poly-Si Nanosheet Junctionless Field-Effect Transistor with Nickel Silicide. // *Contact. Materials* 2017, 10, 1276; doi:10.3390/ma10111276
3. Eshboboyev S.N., Tashatov A.K. Study Of The Process Of Formation Of Heterostructural Nanofilms Me_xSi_y/Si And $Ga_xMe_{1-x}As/GaAs$ By Ion Implantation. // *Journal of Physical Science*, 2025, Vol. 36(1), pp.17–25.
4. Eshboboyev S., Dovranov K., Vinnichenko M., Korablev V., Normuradov M., Egamberdiyeva O. Raman and IR Spectrum Analysis of $CrSi_2$ Thin Films Formed in Direct Current and Variable Frequency Modes of a Magnetron Sputtering Device. International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech- 2024, (2024), pp 304–307. (Scopus, IF: N/A).
5. Eshboboev S., Ergashov Y., Tashatov A. Surface morphology and structural features of nickel silicide thin films fabricated by ion-plasma deposition. *O'zbekiston milliy universiteti xabarlari*, 2025, [3/2] ISSN 2181-7324, pp. 494-497. (<http://journals.nuu.uz>)
6. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М. Морфология поверхности пленок $NiSi_2/Si$ полученных методом твердофазной эпитакции. // *Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы*; Сборник материалов международной онлайн конференции (www.e-science.uz); Ташкент. 2020. 92-97 с.
7. Galkin N.G, Goroshko D.L, Galkin K.N. et al. "Influence of Cr^+ ion implantation and pulsed ion-beam annealing on the formation and optical properties of $Si/CrSi_2/Si(111)$ heterostructures" // *Tech. Phys.* 2010. vol. 55, no. 7, pp. 1036–1044.
8. Эшбобоев С.Н., Ташатов А.К. Создание переходных согласующихся слоев на границах раздела систем $Si/CaF_2/GaAs$ и $GaAs/CaF_2/GaAs$. // *Физика полупроводников и Микроэлектроника. Научный журнал*, 2023, 5(1/2), С. 67-71.
9. Eshboboyev S, Ergashev Y, Tashatov A. Surface morphology and features on nickel silicide thin films fabricated ion-plasma deposition. // *Вестник НУУз*. 2025, 3/2. С.494-497.
10. Ташатов А.К, Мустафоева Н.М. // Морфология, состав и структура поверхности пленок $NiSi_2/Si$ полученных методом твердофазной эпитакции // *Узбекский физический журнал*, 23(2), 2021. С.55-60.
11. Tashatov A.K, Mustafoyeva N.M. // Surface morphology of $NiSi_2/Si$ Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // *Journal of surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2020, Vol.14, No1, pp.81-84
12. Moll A et al., "Influence of nanostructuring on the vibrational, electronic, and optical properties of $CrSi_2$ thin films" // *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020. Vol. 124, No. 51, pp. 28267–28276.
13. Vaskova H, "Raman microscopic detection of chromium compounds". // *MATEC Web of Conferences*, 2016, Vol. 76, Art. No. 05012, doi: 10.1051/mateconf/20167605012.
14. Bellani V, Guizzetti G, Marabelli F and Piaggi A. Theory and experiment on the optical properties of $CrSi_2$. // *PHYSICAL REVIE*. 1992 Volume 46, Number 15.
15. Lee P.S, Mangelinck D, Pey K.L, Shen Z.X, Ding J, Osipowicz T, See A, Micro-Raman spectroscopy investigation of nickel silicides and nickel (platinum) silicides. // *Electrochemical Solid State Letters* 2000. 3 (3), 153–155.