# Получение пленок $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ методом лазерного напыления и их электрофизические свойства

**Б.Е. Умирзаков[1], И.Р. Бекпулатов[*,1], Б.Д. Игамов[1], И.Х. Турапов[1], А.З. Фаттахов[2]**

[1]Ташкентский государственный технический университет, Университетская 4,100095, Ташкент, Узбекистан
[2]Научно-технологический центр НПО ПРМ и ТС АО «Алмалыкский ГМК»

Received 20.03.2022, revised 04.06 .2022

* Corresponding author: e-mail bekpulatov85@rambler.ru, Phone: +(99897) 755-77-64

В данном исследовании определен оптимальный режим формирования таблетки $CoSi_2$ методом высокотемпературного прессования. Пленку $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ получали напылением $CoSi_2$ на подложку $SiO_2/Si(111)$ под действием твердотельного импульсного лазера. Изучение зависимости энергии поглощенных пленкой фотонов от длины волны падаюших фотонов показало, что ширина запрещенной зоны чувствительна к длинам волн в видимой и ИК-областях. Рентгеноструктурный анализ системы $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$, сформированной при термическом нагреве, показал, что пленка $CoSi_2$ имеет поликристаллическую структуру. Элементный состав и ширину запрещенной зоны пленки $CoSi_2$ различной толщины определяли методом растровой электронной микроскопии. Для пленки $CoSi_2$ толщиной ≈3 монослоев ширина запрещенной зоны составляет ~0.8 эВ, а для массивной пленки $CoSi_2$ ~0.6 эВ.

**Ключевые слова:** импульсный лазер, распыление, ширина запрещенной зоны, термический отжиг, коэффициент поглощения и отражения света.

In this study, the optimal regime for the formation of $CoSi_2$ pellets by high-temperature pressing is determined. A $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ film was created by deposition of $CoSi_2$ onto a $SiO_2/Si(111)$ substrate sputtered under the action of a solid-state pulsed laser. A study of the dependence of the energy of photons absorbed by the film on the wavelength of incident photons showed that the band gap is very sensitive to wavelengths in the visible and IR regions. X-ray diffraction analysis of the $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ system formed at thermal heating showed that the $CoSi_2$ film has a polycrystalline structure. The elemental composition and band gap of the $CoSi_2$ film of various thicknesses were determined by scanning electron microscopy. For a $CoSi_2$ film with a thickness of ≈3 monolayers the band gap is ~0.8 eV, and for a bulk $CoSi_2$ film it is ~0.6 eV.

**Keywords:** pulsed laser, sputtering, band gap, thermal annealing, light absorption and reflection coefficient..

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i2 336

## I. Введение

Сегодня кремниевые пленки играют важную роль в развитии электроники и микроэлектроники. Была проделана большая работа по экстракции, изучению структуры и свойств пленок $CoSi_2$ в силицидах металлов. Изготовление структур полупроводник-диэлектрик-полупроводник (ПДП) и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе пленки $CoSi_2$ широко используется в оптических и электронных устройствах. Инертность пленки $CoSi_2$ по отношению к другим элементам, термостойкость и соизмеримость ее периода с кристаллической решеткой Si (1.23%), совместимость по кристаллической структуре

(кубическая) обеспечивают хороший рост пленки $CoSi_2/Si$ [1-8].

Также большая работа проделана по изучению свойств пленок $CoSi_2/Si(111)$, $CoSi_2/Si(100)$, $CoSi_2/SiO_2$ и $CoSi_2/CaF_2$, полученных методами твердофазной эпитаксии, ионной имплантации, молекулярно-лучевой эпитаксии [9-18]. Формирование пленки $CoSi_2$ осуществлялось методом импульсного лазерного напыления атомов Co на монокристалл Si(111). В импульсном лазере атомы порошкообразного Co образуют зародыши с высокой плотностью. Это приводит к формированию качественных пленок $CoSi_2$ [18-23].

Целью работы является изучение закономерностной формирования нанопленок $CoSi_2$ на поверхности $SiO_2/Si$ (111) при лазерном напылении и определение ее зонной структуры и оптических своств.

## II. Описание объекта и методов исследования

Мишени $CoSi_2$ готовили в искровом плазменном сварочном аппарате прессованием силой $7\times10^4$ Н в течение 1 ч в условиях вакуума с давлением $10^{-2}$ мм.рт.ст. при температуре 1200°C, смешивая в мельнице порошкообразные кобальт 51.3% и кремний 48.7% (по массе).

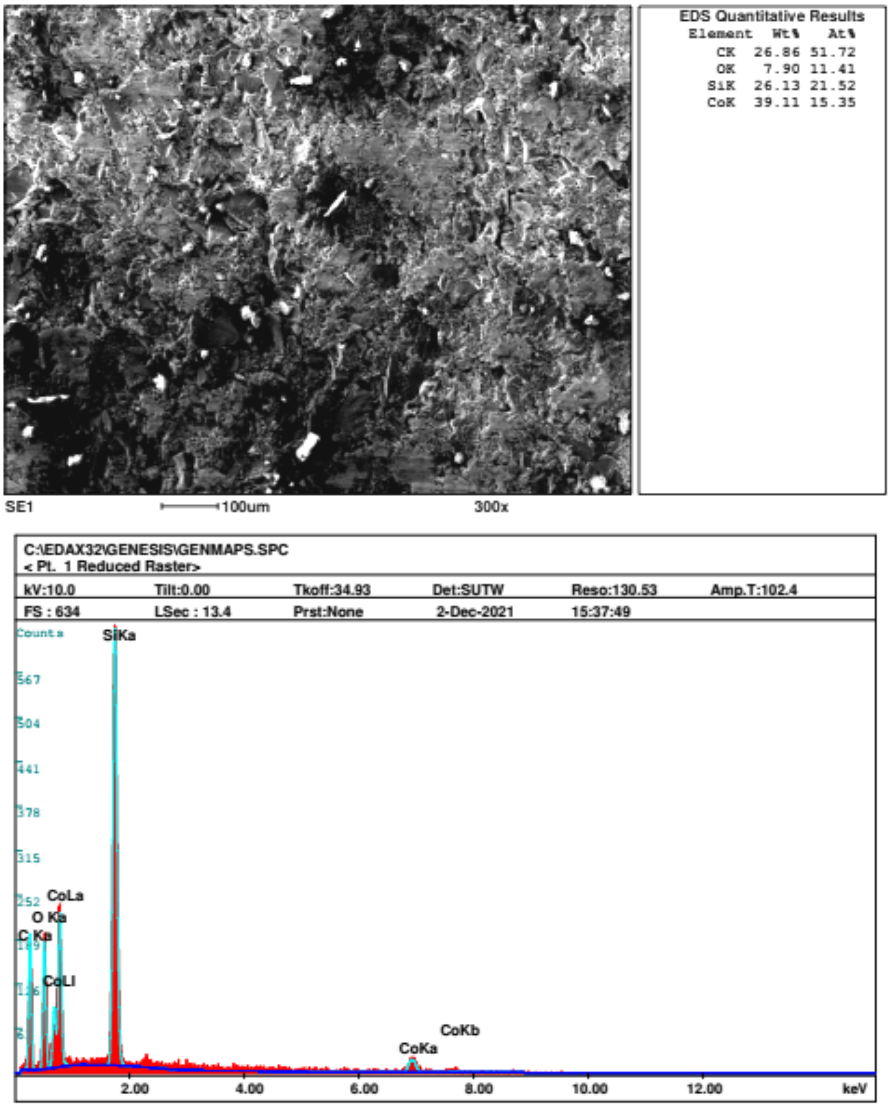



**Рисунок 1.** Изображение мишени $CoSi_2$, полученное на сканирующем электронном микроскопе (верхний снимок) и его состав (нижний снимок) по данным СЭМ.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Для напыления $CoSi_2$ на поверхность $SiO_2$/Si (111) сначала готовили мишени $CoSi_2$ с хорошим стехиометрическим составом. Состав и структуру мишени исследовали на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200-3D голландской фирмы FEI (рис. 1). Затем подложку $SiO_2$/Si(111) и напыляемое вещество ($CoSi_2$) устанавливали в прибор ВУП-5 (вакуумный универсальный пост). Перед напылением подложку очищали прогревом при $T$≈1100 К в течение 3–4 ч при вакуме $10^{-3}$ Па.

Пленку $CoSi_2$ на поверхности $SiO_2$/Si(111) очищали при комнатной температуре с использованием твердотельного импульсного лазера ЛТИ-403. На рис. 2 показана вакумная часть прибора и изображение поверхности мишени после напыления. Полученную гетеросистему $CoSi_2/SiO_2$/Si(111) нагревали при 900 К в течение 1 часа и медленно охлаждали.

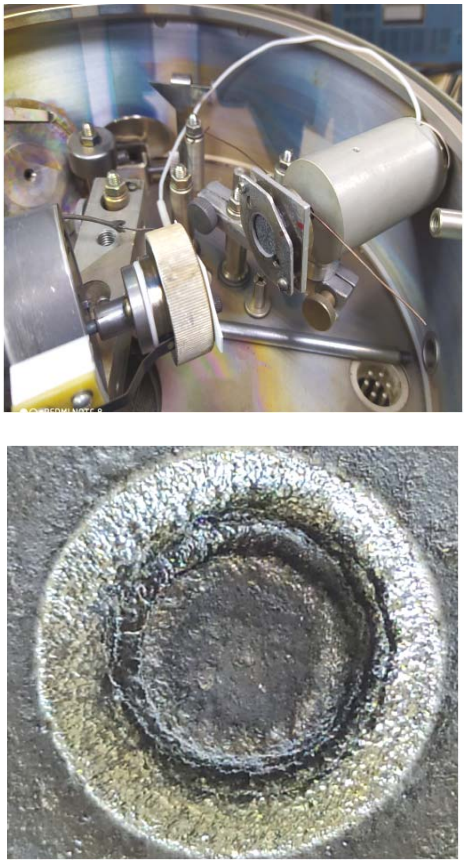


**Рисунок 2.** Прибор ВУП-5 с мишенью (верхний рисунок) и изображение поверхности мишени после напыления (нижний рисунок).

После нагрева систему $CoSi_2/SiO_2$/Si(111) подвергали рентгеновскому просвечиванию на SHIMADZU XRD-6100. Толщину пленки $CoSi_2$ определяли на приборе Hitachi SU8230 SEM. Ширину запрещенной зоны и значения коэффициентов отражения и поглощения света пленкой измеряли на высокоточном спектрометре HR-4000.

## III. Описание и анализ результатов

СЭМ-анализ поверхности мишени $CoSi_2$, сформированной методом горячего прессования, показывает, что атомы Co и Si распределены по поверхности неравномерно, на одном участке поверхности имеется высокая концентрация атомов Co (рис. 3а), а на другом участке - атомов Si (рис. 3б).

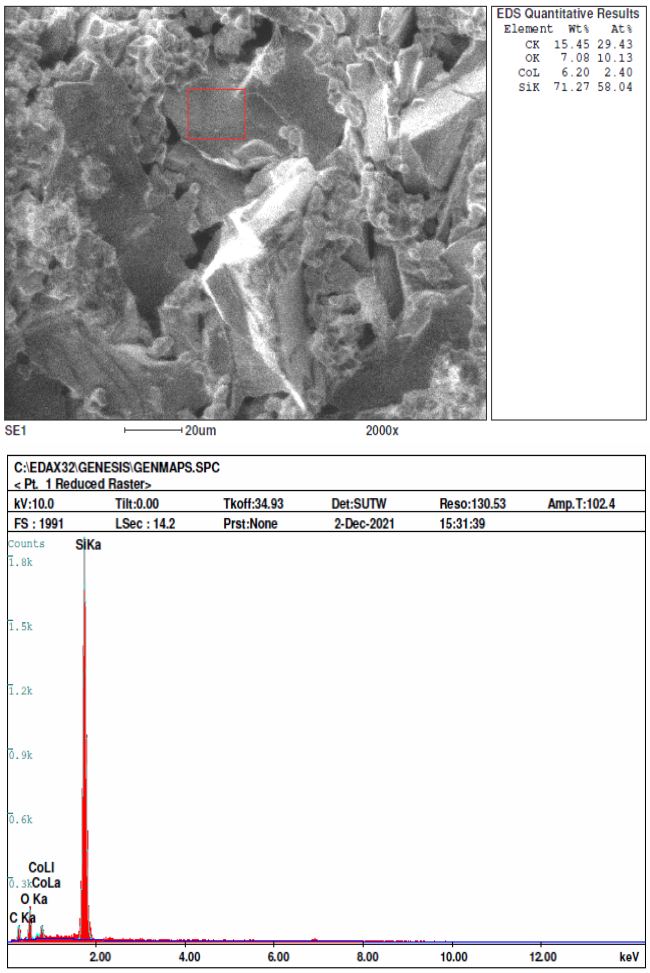



**Рисунок 3а.** Анализ поверхности мишени $CoSi_2$. СЭМ изображение участка с высокой концентрацией атомов Si.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

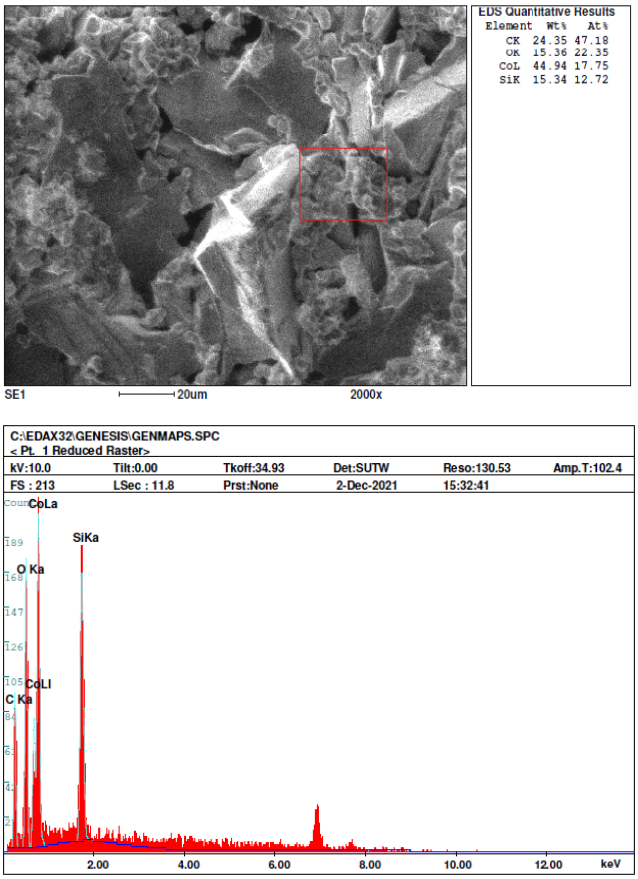



**Рисунок 3б.** Анализ поверхности мишени $CoSi_2$ СЭМ изображение участка с высокой концентрацией атомов Co.

При импульсном лазерном напылении вращательное движение мишени и подложки вокруг оси обеспечивает равномерное распределение атомов Co и Si по поверхности, которая находится в аморфном состоянии. При нагреве

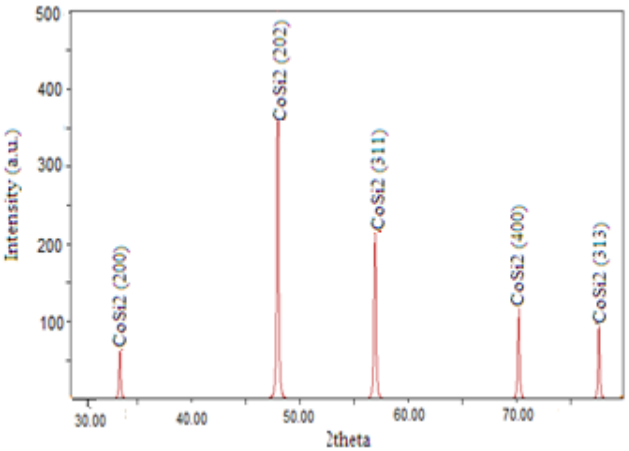



**Рисунок 4.** Рентгенофазовый анализ поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$.

этой системы при температуре 900 К в течение 1 часа и затем при медленном охлаждении формируется поликристаллическая пленка $CoSi_2$ (рис. 4). Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что структура кристалла кубическая и период решетки $a$ = 5.3560 Å, плотность 4.976 г/см³, что практически совпадает с результатами литературных данных [24, 25].

С помощью сканирующего электронного микроскопа определена толщина поперечного сечения сформированной поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$, которая (рис. 5) состоит из поликристаллической пленки $CoSi_2$ толщиной 32.7 нм и пленки $SiO_2$ толщиной 33.7 нм.

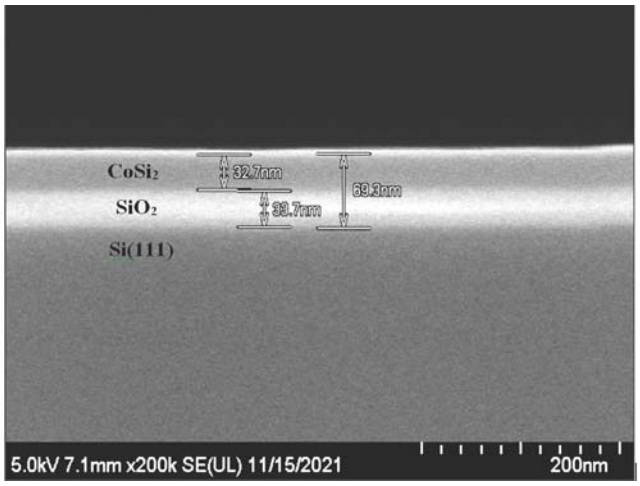



**Рисунок 5.** Толщина $CoSi_2$ и $SiO_2$ в поликристаллической пленке $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ по данным СЭМ.

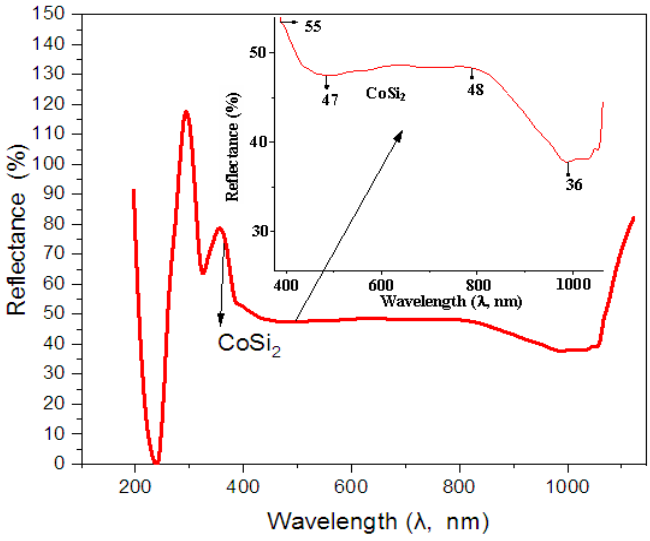



**Рисунок 6.** Коэффициент отражения света поликристаллической пленкой $CoSi_2/SiO_2/Si$.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

На рис. 6 приведен график зависимости коэффициента светоотражения поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$ от длины волны. Видно, что коэффициент отражения света при длине волны λ = 386 нм составляет 55%, в области 488–796 нм снижается до 47-48%, а затем в области 796–989 нмснова снижается до 36%.

На рис. 7 представлен график зависимости коэффициента светопоглощения поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$ от длины волны. Из этого рисунка видно, что коэффициент поглощения при длине волны λ = 373 нм видимой области имеет минимальное значение 0.2% (см. вставку на рис. 7). При длине волны ~463 нм коэффициент поглощения достигает значения 0.27%. В диапазоне длин волн 463–837 нм поглощение света незначительно увеличивается до 0.28%, а затем в диапазоне длин волн 837–986 нм растет до 0.39%.

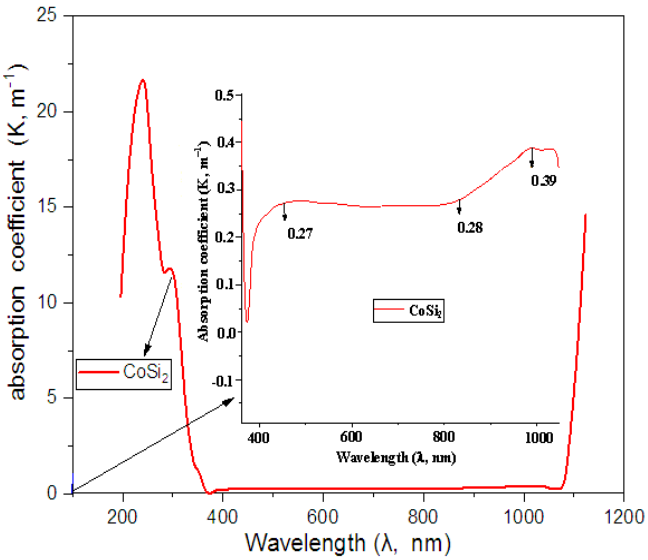



**Рисунок 7.** Коэффициент светопоглощения поликристаллической пленкой $CoSi_2/SiO_2/Si$.

Из рис. 6 и 7 также следует, что сформированная пленка $CoSi_2/SiO_2/Si$ обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях.

Из рис. 8 на основе зависимости энергии фотонов поглощения поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$ от энергии падающих фотонов с использованием функции “Kubelka – Munk” было установлено, что ширина запрещенной зоны составляет 0.65 эВ.

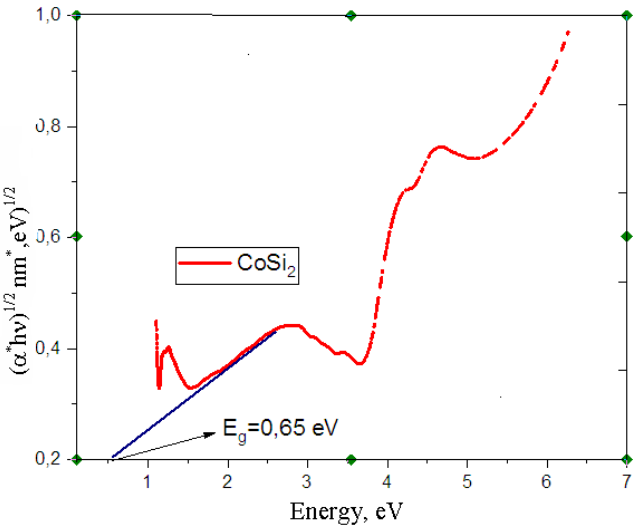



**Рисунок 8.** Ширина запрещенной зоны поликристаллической пленки $CoSi_2/SiO_2/Si$. α – коэффициент поглощения, *hν* – энергия фотона, λ – длина волны.

## IV. Заключение

Впервые с использованием метода лазерного напыления получены наноразмерные пленки $CoSi_2$ на поверхности $SiO_2/Si$ (111).

Анализ результатов зависимости коэффициентов поглощения и отражения света поликристаллической пленкой $CoSi_2$ от длины волны показал, что она обладает высокой чувствительностью в видимой и ИК-областях, что может использоваться в наноэлектронных устройствах, работающих в этих диапазонах. Для поликристаллической пленки $CoSi_2$ толщиной ≈3 монослоев ширина запрещенной зоны составляет ~0.8 эВ, а для массивной пленки $CoSi_2$ ~0.6 эВ.

## Метаданные

### Obtaining of $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ films by laser deposition and their electrical-physical properties

**B.E. Umirzakov[1], I.R. Bekpulatov[1], B.D. Igamov[1], I.Kh. Turapov[1], A.Z. Fattakhov[2]**

[1]Tashkent State Technical University, Universitetskaya str. 4, 100095, Tashkent, Uzbekistan
[2]Science and Technology Center of NPO PRM and TS of Almalyk MMC JSC

In this study, the optimal regime for the formation of $CoSi_2$ pellets by high-temperature pressing is determined. A $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ film was created by deposition of $CoSi_2$ onto a $SiO_2/Si(111)$ substrate sputtered under the action of a solid-state pulsed laser. A study of the dependence of the energy of photons absorbed by the film on the wavelength

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

of incident photons showed that the band gap is very sensitive to wavelengths in the visible and IR regions. X-ray diffraction analysis of the $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ system formed at thermal heating showed that the $CoSi_2$ film has a polycrystalline structure. The elemental composition and band gap of the $CoSi_2$ film of various thicknesses were determined by scanning electron microscopy. For a $CoSi_2$ film with a thickness of ≈3 monolayers the band gap is ~0.8 eV, and for a bulk $CoSi_2$ film it is ~0.6 eV.

**Keywords:** pulsed laser, sputtering, band gap, thermal annealing, light absorption and reflection coefficient

**Литература**

[1] S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, A.A. Abduvayitov. International Journal of Advanced Science and Technology **29**, No.11, 1423-1426 (2020).
[2] I.Kh. Turapov, B.E. Umirzakov, I.R. Bekpulatov. Yarimutkazgichlar fizikasi, mikro- va nanoelektronikaning fundamental va amaly muammolari (Tashkent, 2021),p. 80-82/
[3] S.B. Donaev, B.E. Umirzakov, B.D. Donaev, B.Kh. Barotova, V. Karimova. In Proceedings of International Scientific and Technical Conference on "Problems and Prospects of Innovative Technique and Technology in Agri-Food Chain". ISSN: 2394-3696, Website: www.ijiert.org, Organized on 24-25 April, 2020.
[4] F.M. D'heurle, C.S. Peterson. Thin Solid Films **128**, 283-297 (1985).
[5] M.V. Gomoyunova, G.S. Grebenyuk, I.I. Pronin. Tech. Phys. **56**, No.6, 865-868 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211060077.
[6] S.P. Murarka. Intermetallics **3**, 173-186 (1995). doi.org/10.1016/0966-9795(95)98929-3.
[7] Like Ruan, D.M. Chen. Appl. Phys. Lett. **72**, 3464 (1998). doi.org/10.1063/1.121667.
[8] Huang-Chung Cheng, Wen-Koi Lai, and Hon-Wen Liu. Electrochem. Soc. **145**, No.10 (1998).
[9] A.S. Rysbaev, Zh.B. Khuzhaniyazov, A.M. Rakhimov, I.R. Berkulatov. Technical Physics **59**, No.10, 1526-1530 (2014).
[10] Ganesh K Rajan, Shivaraman Ramaswamy, C. Gopalakrishnan, D.John Thiruvadigal. Bull. Mater. Sci. **35**, No.1, 13-18 (2012).
[11] Y.S. Ergashov, D.A. Tashmukhamedova, B.E. Umirzakov. Surf. Inves. X-ray. **11**, No.4, 104-108 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017020252.
[12] T.S. Kamilov, A.S. Rysbaev, V.V. Klechkovskaya, A.S. Orekhov, B.D. Igamov, I.R. Bekpulatov. Solar engineering materials science **55**, No.6, 380-384 (2019). Doi: 10.3103/S0003701X19060057
[13] B.E. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, E.U. Boltaev, A.A. Dzhurakhalov. Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology **101**, No.1-3, 124-127 (2003). Doi: 10.1016/S0921-5107(02)00677-3
[14] M.V. Gamoyunova, I.I. Pronin, N.R. Gall, S.L. Molodtsov, D.V. Vyalykh // FTT.**45**, No.8, 1519 (2003).
[15] B.Ye. Umirzakov, D.A. Tashmukhamedova, A.K. Tashatov, N.M. Mustafoyeva. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki No.5 (2019). Doi: 10.21883/JTF. 2019.05.47481.192-18.
[16] B.E. Umirzakov, S.B. Donaev. Surf. Inves. X-ray **11**, No.4, 746-748 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017040139
[17] S.B. Donaev. Technical Physics Letters **46**, No.8, 796-798 (2020).
[18] M. Loffler, J. Cordon, M. Weinelt, J.E. Ortega, T. Fauster. Appl. Phys. A **81**, 1651-1655 (2005). DOI: 10.1007/s00339-005-3374-2
[19] H.-U. Krebs, M. Weisheit, J. Faupel, E. Süske, T. Scharf, C. Fuhse, M. Störmer, K. Sturm, M. Seibt, H. Kijewski, D. Nelke, E. Panchenko, M. Buback, Adv. Solid State Phys. **43**, 505 (2003).
[20] J. Shena, Zheng Gaib, J. Kirschner. Surface Science Reports **52**, 163-218 (2004).
[21] S.I. Kurganskiy, N.S. Pereslavtseva. Fizika tverdogo tela, **42**, (2000).
[22] V.V. Klechkovskaya, A.S. Rysbaev, T.S. Kamilov, I.R. Bekpulatov, B.D. Igamov, I.Kh. Turapov. Uzbek J. Physics **22**, No.3, 43-48 (2021).
[23] B.D. Igamov, A.I. Kamardin, T.S. Kamilov, I.R. Bekpulatov, I.Kh. Turapov, D.D. Igamova. Technical Science and Innovation **4**, No.10, 255-263 (2021).
[24] F. Cheng, Ch. Jiang, J. Wu. Materials Transactions **45**, No.7, 2471-2473 (2004).
[25] Ayache Rachid, Sidoumou Mohamed, Kolitsch Andreas. Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec. **4**, No.3, 211-213 (2015).

## Лазерли чанглатиш усулида $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ плёнкасини ҳосил қилиш ва плёнканинг электрофизик параметрлари

**Б.Е. Умирзаков[1], И.Р. Бекпулатов[1], Б.Д. Игамов[1], И.Х. Турапов[1], А.З. Фаттахов[2]**

[1]Тошкент давлат техника университети, Университет куч. 4, 100095, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Илмий-технологик марказ НПО ПРМ ва ТС АО «Олмалиқ ТКК»

Мазкур мақолада вакуумда юқори ҳароратда пресслаш орқали $CoSi_2$ мишенини тайёрлашнинг оптимал режимлари аниқланган. $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ плёнкаси $SiO_2/Si(111)$ тагликга импульсли лазер ёрдамида $CoSi_2$ мишенини чанглатиш усули билан ҳосил қилинган. Яратилган плёнкаларнинг ютилган фотонлар энергиясининг тушаётган фотонларнинг тўлқин узунлигига боғлиқлиги шуни кўрсатдики, плёнка кўринувчи ва ИҚ тўлқин узунлиги соҳаларида кучли сезгирликга эга. Термик қиздириш натижасида ҳосил бўлган $CoSi_2/SiO_2/Si(111)$ тизимнинг рентгеноструктур таҳлили $CoSi_2$ плёнкаси поликристалл тузилишга эга эканлигини кўрсатди. Турли қалинликдаги $CoSi_2$ плёнкасининг элементар таркиби ва тақиқланган зона кенглиги сканерлаш электрон микроскопи спектрометри ёрдамида аниқланди. Қалинлиги ≈3 моноқатламли $CoSi_2$ плёнкаси учун тақиқланган зона кенглиги ~0.8 эВ, ҳажмий $CoSi_2$ плёнкаси учун эса ~0.6 эВ.

**Калит сўзлар**: импульсли лазер, чанглатиш, тақиқланган зона кенглиги, термик қиздириш, қайтган ва ютилган ёруғлик нурлар коэффициенти.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.