

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОФАЗНЫХ ПЛЕНОК $Cu_{15}Si_4/Si$ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ И ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА****KREMNIY YUZASIDA NANOFAZALI $Cu_{15}Si_4/Si$ PLYONKALARINING SHAKLLANISHI VA ULARNING ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARI****FORMATION OF NANOPHASE $Cu_{15}Si_4/Si$ FILMS ON THE SILICON SURFACE AND THEIR ELECTROPHYSICAL PROPERTIES****Нормурадов Мурадулла Тогаевич¹** ¹Каршинский государственный университет, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики**Довранов Кувандик Туракулович²** ²Каршинский государственный университет, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры теоретической и экспериментальной физики**Кадыров Асилбек Рахмон угли³** ³Докторант Каршинского государственного университета, кафедра теоретической и экспериментальной физики,**Нормупминова Дилнавоз⁴**⁴Магистрант кафедры теоретической и экспериментальной физики Каршинского государственного университета**Аннотация**

В данной работе представлена научная информация о формировании тонких пленок $Cu_{15}Si_4$ на поверхности монокристаллического кремния, морфологии их поверхности и механизме формирования пленок. Объяснен механизм формирования нанопленок металлов и силицидов при использовании различных режимов магнетронного распыления. Толщину пленок измеряли с помощью СЭМ. Элементный состав определялся методом энергодисперсионной спектроскопии. Морфологию поверхности исследовали с помощью лазерного конфокального микроскопа. Электрофизические свойства определялись с использованием SBA-458. Оптические свойства анализировались с помощью ИК-спектрофотометра. Образование пленки силицида меди (Cu) зависит от размера кристаллов меди и температуры подложки, и при температуре $467^\circ C$ под слоем меди толщиной 130 нм образовалась пленка $Cu_{15}Si_4$ толщиной 75 нм. Это исследование продемонстрировало потенциал использования медного кремния для улучшения производительности транзисторов на основе металла-оксида-полупроводника и высокоскоростных интегральных схем (ИС).

Анотация

Ushbu maqolada monokristall kremniy yuzasida yuqqa $Cu_{15}Si_4$ plyonkalarining hosil bo'lishi, ularning sirt morfologiyasi va plyonka hosil bo'lish mexanizmi haqida ilmiy ma'lumotlar keltirilgan. Magnetronli purkashning turli usullaridan foydalangan holda metallar va silitsidlarning nanoplyonkalarini hosil qilish mexanizmi tushuntirilgan. Plyonkalarining qalinligi SEM yordamida o'lchandi. Elementlarning tarkibi energiya dispers spektri yordamida aniqlandi. Sirt morfologiyasi lazer konfokal mikroskop yordamida tekshirildi. Elektr xususiyatlari SBA-458 yordamida aniqlandi. Optik xususiyatlar IQ spektrofotometr yordamida tahlil qilindi. Mis silitsid plyonkasi hosil bo'lishi mis kristall o'lchamiga va taglik haroratiga bog'liq bo'lib, $467^\circ C$ haroratda 130 nm qalinlikdagi mis qatlami ostida 75 nm qalinlikdagi $Cu_{15}Si_4$ plyonkasi hosil bo'ldi. Ushbu tadqiqot metall oksidli yarimo'tkazgichli tranzistorlar va yuqori tezlikdagi integral mikrosxemalar (IS) ish faoliyatini yaxshilash uchun mis kremniydan foydalanish imkoniyatlarini ko'rsatdi.

Abstract

This paper presents scientific information on the formation of $Cu_{15}Si_4$ thin films on the surface of single-crystal silicon, their surface morphology and the mechanism of film formation. The formation mechanism of metal and silicide nanofilms using different modes of magnetron sputtering is explained. The film thickness was measured using SEM. The elemental composition was determined by energy-dispersive spectroscopy. The surface morphology was investigated

using a laser confocal microscope. The electrical properties were determined using SBA-458. The optical properties were analyzed using an IR spectrophotometer. The formation of copper silicide (Cu) film depends on the copper crystal size and substrate temperature, and at 467°C, 75 nm thick $Cu_{15}Si_4$ film was formed under 130 nm thick copper layer. This study demonstrated the potential of using copper sputtered silicon to improve the performance of metal-oxide-semiconductor transistors and high-speed integrated circuits (IS).

Ключевые слова: силицид меди, нанопленка, нанофаза, ионно-плазменный.

Kalit so'zlar: mis silitsid, nanoplyonka, nanofaza, ion-plazma.

Key words: copper silicide, nanofilm, nanophase, ion-plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество методов получения тонких наноразмерных пленок Cu и пленок силицида меди, которые широко используются в электронных устройствах из-за их высокой стойкости к электромиграции и высокой электропроводности [1,2]. Cu и ее силицидные пленки широко используются во многих областях, таких как контакты в солнечных элементах [3], транзисторы металл-оксид-полупроводник [4] и высокоскоростные интегральные схемы (ИС) [5,6]. Cu и пленки ее силицидов обычно производятся с использованием различных методов, включая распыление магнетроном постоянного тока (ПТМР) [7-9], высокочастотное магнетронное распыление (РЧМР) [10-12], мощное импульсное магнетронное распыление (МИМР), молекулярное лучевая эпитаксия (МЛЭ) [13] и реактивное импульсное лазерное осаждение (РИЛО) [14]. Во многих статьях сообщалось о Cu и пленках ее силицидов; Однако большинство из них использовали стеклянные подложки для формирования контактных пленок, а несколько работ были посвящены кремниевым подложкам [15]. В данном исследовании мы одновременно формировали пленки различной толщины в вакууме с атмосферой аргона в двух различных режимах с использованием магнетронного распылительного устройства. Медь (Cu) чистотой 99,998% напылялась на поверхность монокристаллического кремния твердотельным ионно-плазменным методом с использованием магнетронного распыления с переменной реактивной частотой (РЧМР) и магнетронного распыления с постоянным током (ПТМР). Мы использовали импульсный радиочастотный сигнал с частотой 60 кГц и рабочим циклом 70% для улучшения кристаллизации и размера кристаллов тонких пленок меди (Cu), выращенных при комнатной температуре и 450°C. В качестве подложек использовались Si(111) и стекло "Corning 1737". Контроль и поддержание температуры основания осуществляется с помощью термопар TRM и ТХА. Очищение углерода и кислорода с поверхности пленки производилось путем бомбардировки поверхности подложки низкоэнергетическими ионизированными атомами аргона с использованием источника «ионная пушка» в вакууме. Рентгеновские спектры пленок Cu продемонстрировали высокое качество тонких металлических пленок Cu, что привело к хорошей электропроводности. Максимальная скорость осаждения и эффективность распыления источника ПТМР при плотности мощности $115 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² для мишени Cu составляют 17 Å/с, D=70% соответственно. Кроме того, были проанализированы оптические параметры тонких пленок Cu, их спектр поглощения и их корреляция с пропусканием. Высокая оптическая прозрачность медных пленок позволяет широко использовать их в современных технологиях, например, в производстве датчиков и полупроводников. Кроме того, термоэлектрические свойства пленок Cu определяют их способность преобразовывать тепловую энергию в электрическую. В данной работе исследованы закономерности формирования фазы силицида меди и спектр поглощения ультрафиолета, оптические и термоэлектрические параметры этих пленок, а также их зависимость от толщины и технических параметров магнетронного распыления [16].

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Нанопленки силицида меди формировались с использованием двух различных режимов магнетронного распылительного устройства "EPOS PVD DISK PRO". Использовался аргоновый газ чистотой 99,99%. Рабочее давление в камере составляет 10^{-6} торр. Тонкие пленки силицида меди формировались путем напыления меди на поверхность монокристаллического кремния, нагретого до 467°C, методом РЧМР на частоте 100 кГц и выходе D=70%. Толщина полученной гетероэпитаксиальной пленки $Cu/Cu_{15}Si_4/Si$ была

измерена с помощью СЭМ. Также методом ПТМР определено образование пленки $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ в результате термического нагрева нанопленок $\text{Cu}/\text{Si}(111)$ в вакууме при температуре 800 К в течение 1,5 часов. Морфологию поверхности полученных силицидных пленок изучали с помощью лазерного конфокального микроскопа Olympus «LEXT™ OLS5100». Элементный состав определялся с помощью ЭДС. Электропроводность измерялась с помощью прибора SBA-458. Оптические свойства анализировались на спектрофотометре UV-1900i.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов было установлено, что формирование пленок силицида меди зависит от температуры подложки при ионно-плазменном воздействии и температуры последующего нагрева. Мы описываем два метода с использованием магнетронного распылительного устройства. Процесс формирования пленок силицида меди показан на рисунке 1. Первоначально Cu напыляли на поверхность Si методом ПТМР при комнатной температуре с использованием ионно-плазменного метода, что подтвердило образование аморфных пленок Cu , как показано в СЭМ (рисунок 2(а)), а затем пленки $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ был сформирован путем нагрева в вакууме при температуре 800 К в течение 1,5 часов. это было. Согласно результатам, полученным с помощью СЭМ, рисунок 2(б), островки на поверхности пленки в результате последующего нагрева свидетельствуют об образовании пленки силицида $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ в результате кристаллизации с кремнием.

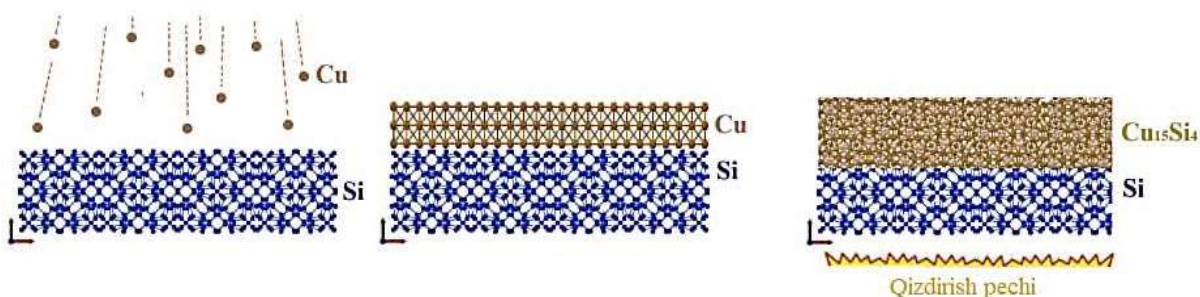


Рис. 1. Механизм образования пленок силицида меди

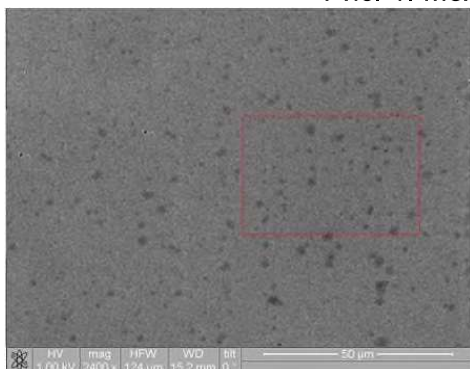


Рис. 2(а). СЭМ-изображение медной пленки, сформированной методом ПТМР на поверхности $\text{Si}(111)$ (до отжига)



Рис. 2(б). СЭМ-изображение пленки силицида меди, сформированной методом ПТМР (после отжига)

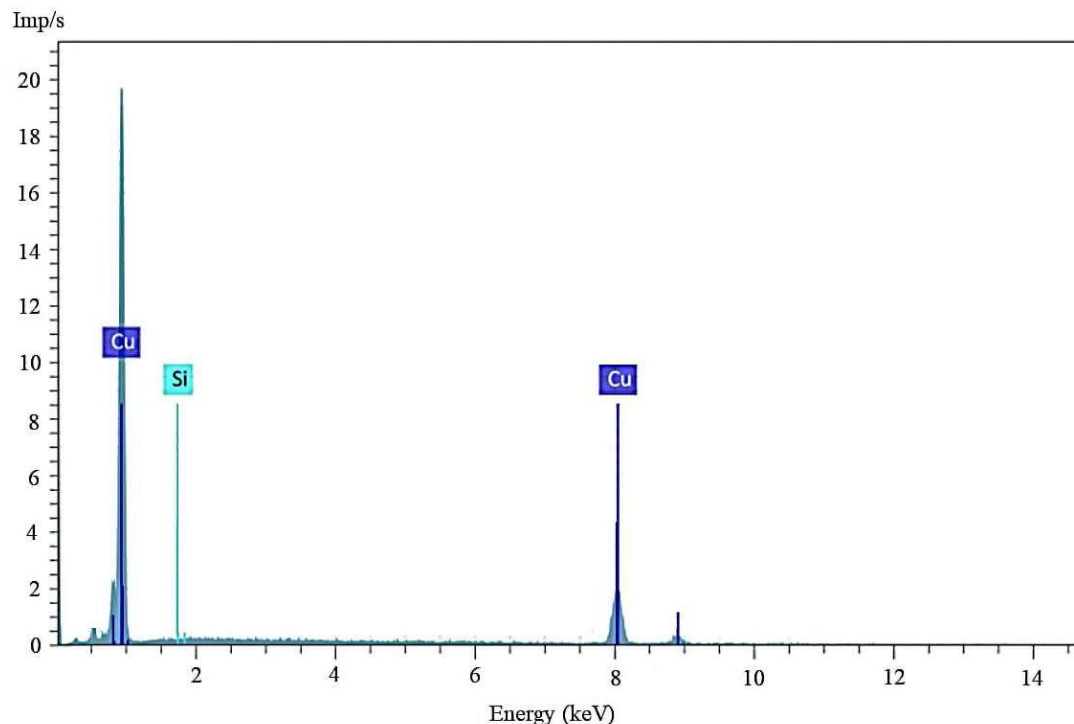


Рис. 3. Энергодисперсионный спектр силицидной медной пленки

Элементный состав тонкой пленки силицида меди **Таблица 1**

Элемент	масса. %	атом. %
Si	10.61	21.13
Cu	89.39	78.87
	100.00	100.00

2) Медь напылялась ионно-плазменным методом в течение 2,5 минут на поверхность Si(111), нагретую до 467°C методом РЧМР на частоте 100 кГц и эффективностью D=70%. При нагревании подложки наблюдалась диффузия атомов Cu в нагретый Si (рисунок 4). Толщина полученной гетероэпитаксиальной пленки Cu/Cu₁₅Si₄/Si была измерена с помощью СЭМ, рисунок 5. Образование пленки силицида меди зависит от размера кристаллов меди и температуры подложки, и при температуре 467°C под слоем меди толщиной 130 нм образовалась пленка Cu₁₅Si₄ толщиной 75 нм. Для анализа этих процессов структура изучалась с помощью рентгеновской дифракции, а молекулярные колебания определялись с помощью инфракрасного спектрофотометра.

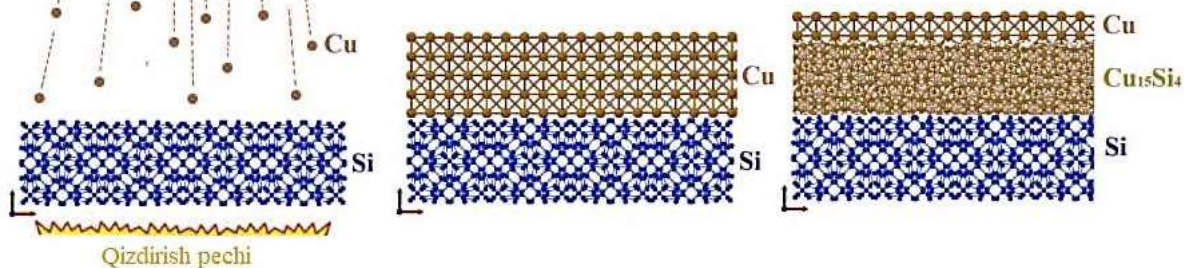


Рис. 4. Механизм формирования пленок силицида меди методом РЧМР

Для большей уверенности мы провели рентгенофазовый анализ образца. Элементный состав и массовая доля тонкой пленки определялись с помощью энергодисперсионного спектра (рис.6). По результатам измерений массовая доля образца в результате радиочастотного импульсного магнетронного распыления на поверхности

FIZIKA-TEKNIKA

монокристаллического кремния составляет: Si-10,61%, Cu-89,39%, атомная доля для кремния составляет 21,13%, для меди 78,87%.

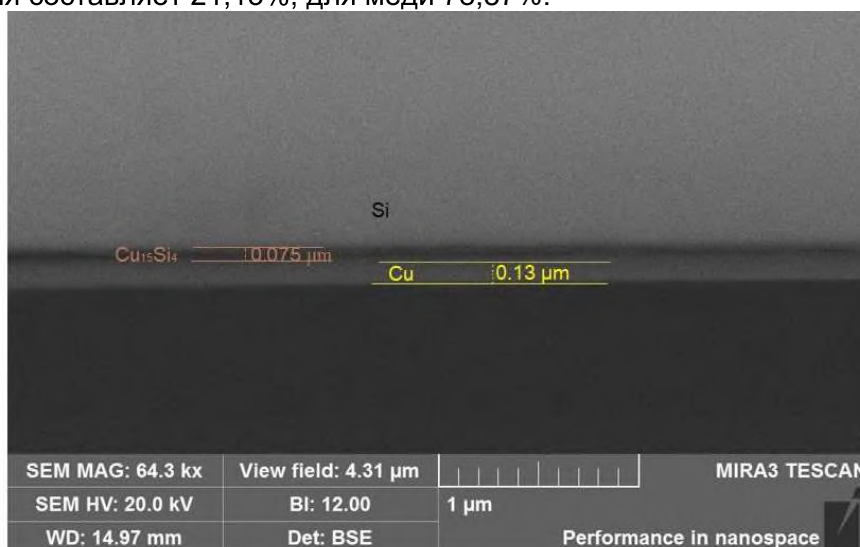


Рис. 5. СЭМ-изображение слоя Cu/Cu₁₅Si₄/Si, полученное методом РЧМС

По результатам исследования установлено, что формирование нанопленок Cu и ее силицидов из медной мишени методами ПТМР и РЧМР магнетронного прибора зависит от начальной температуры подложки или последующих температур нагрева пленки. Оптимальной температурой кристаллизации пленок оказалась 467°C. Морфология поверхности полученных нанопленок силицида меди была измерена и проанализирована с помощью атомно-силового микроскопа и лазерного конфокального микроскопа Olympus «LEXT™ OLS5100» (рис. 6). Благодаря усовершенствованным оптическим компонентам в этих микроскопах были получены высококачественные трехмерные изображения, а шероховатость поверхности составила 6 нм.

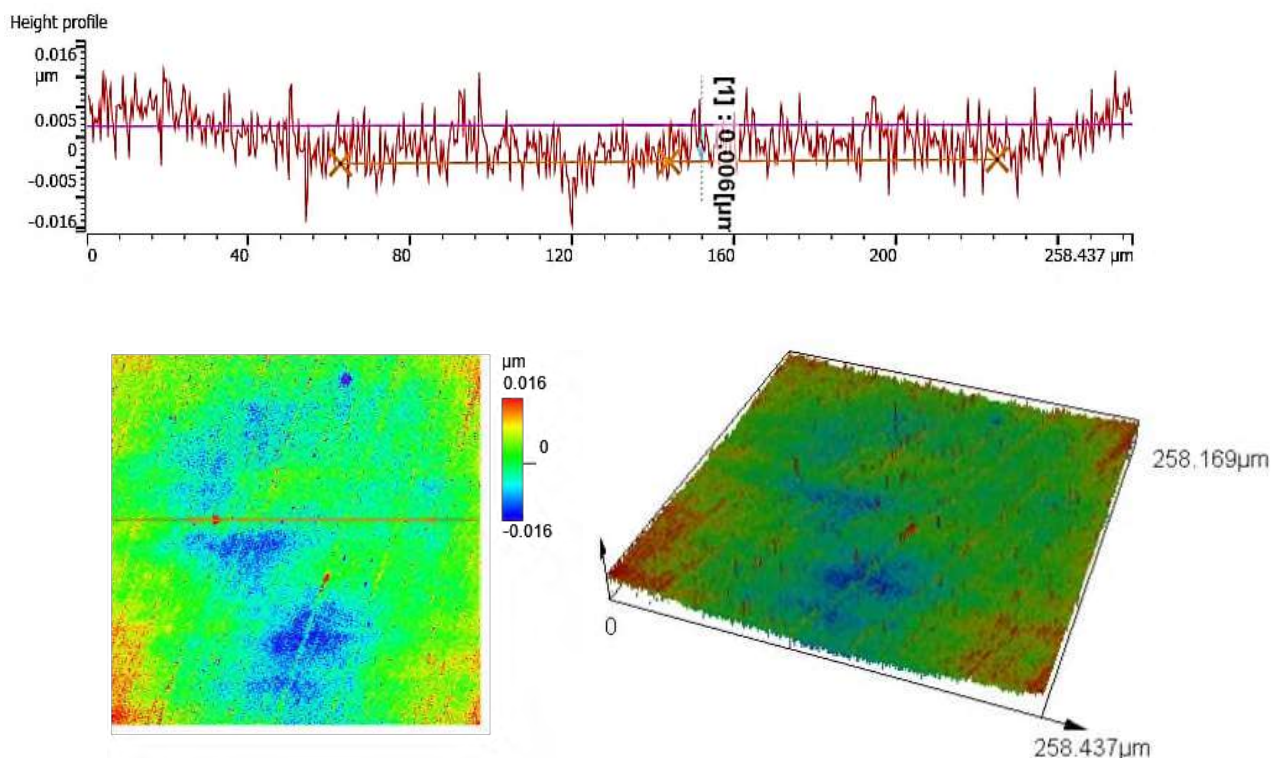


Рис.6. Морфология поверхности тонкой пленки Cu₁₅Si₄, сформированной методом DCRS. а) Изображение шероховатости поверхности, б) 2D-изображение, 3D-изображение

Таблица 2

№	Расстояние[мкм]	Ширина[мкм]	Высота[мкм]	Угол[°]
1	0,006	168,216	0,006	179,991

Электрофизические свойства тонких пленок силицида меди изучались с помощью измерительного прибора SBA-458. Термоэлектрические свойства пленок Cu определяют их способность преобразовывать тепловую энергию в электрическую. Высокий коэффициент Зеебека медных пленок делает их эффективными в процессах генерации энергии. Коэффициент Зеебека зависит от температуры, и его значение увеличивается с повышением температуры. В таблице 3 ниже представлена температурная зависимость коэффициента Зеебека пленок Cu. На рисунке 7 представлена температурная зависимость электропроводности пленки силицида меди, которая при комнатной температуре составила 54672 См/см, что согласуется со свойствами системы Cu-Si. С ростом температуры электропроводность вначале увеличивается незаметно, а резкий рост в диапазоне 180-265°C можно объяснить увеличением концентрации дырок в пленке $Cu_{15}Si_4$. Уменьшение электропроводности пленки силицида меди, образованной при термическом нагреве при 550 K, можно объяснить ее структурным строением при высоких температурах.

Таблица 3

Температура(°C)	Коэффициент Зеебека (мкВ/°C)
25	400
100	410
200	420
300	430
400	440
500	450

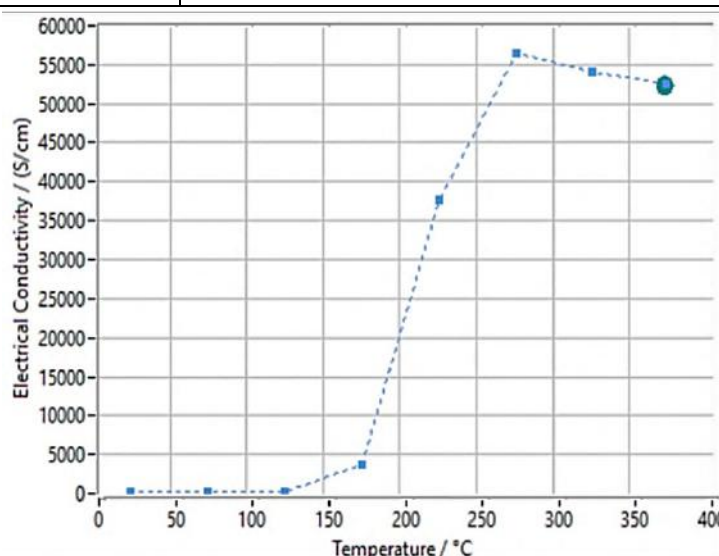


Рис.7. Температурная зависимость электропроводности медной нанопленки

Исследования проводились с использованием спектрофотометра UV-1900i. Этот спектрофотометр представляет собой высокоточный прибор, предназначенный для измерения ультрафиолетового и видимого спектра. Измерения проводились на пленках $Cu_{15}Si_4$ различной толщины (80 нм, 90 нм, 100 нм, 110 нм и 120 нм). Спектр поглощения измерялся для каждой толщины пленки, что позволяло определять взаимодействия между фотонами и электронами внутри пленок.

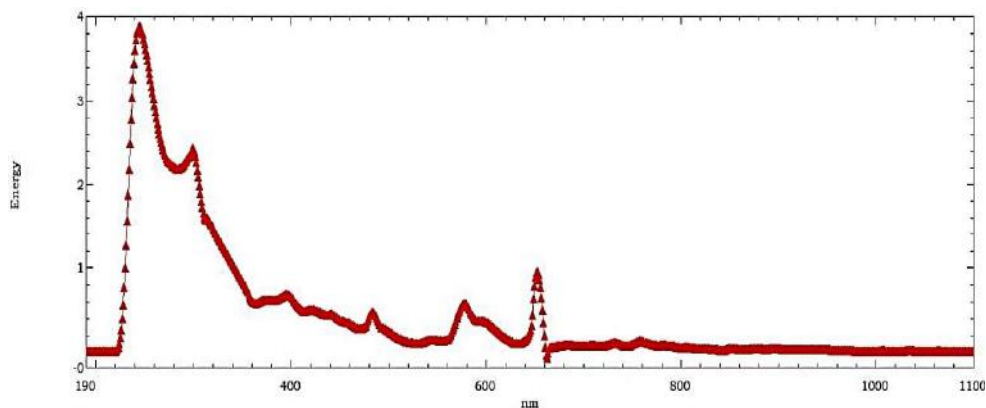


Рис. 8. УФ-поглощение и энергетические спектры тонкой пленки силицида меди

В результате эксперимента были изучены оптические параметры тонких пленок силицида меди, их спектр поглощения и их корреляция с коэффициентом пропускания и получены результаты (рис.8). Спектр поглощения ультрафиолета пленками силицида меди приведен в следующей таблице:

Таблица 4

Толщина пленки (нм)	Максимум поглощения (нм)	Степень поглощения (%)
80	250	85
90	240	90
100	230	93
110	220	95
120	210	97

Медные пленки обладают высоким оптическим пропусканием, что позволяет использовать их в современных устройствах, таких как полупроводниковое оборудование и высокотехнологичные датчики. С увеличением толщины пленки длина волны поглощаемого света уменьшалась, а коэффициент поглощения увеличивался. Высокий коэффициент пропускания улучшает проникновение фотонов в пленку и их поглощение электронами, что повышает эффективность работы устройств.

Результаты показывают, что с увеличением толщины пленки скорость поглощения также увеличивается. Это происходит потому, что более толстые пленки поглощают больше фотонов и увеличивают подвижность электронов. Максимальная скорость поглощения при каждой толщине варьируется в зависимости от структуры пленок и физических свойств материала. Спектр поглощения ультрафиолета медными пленками важен для повышения их энергоэффективности. Полученные результаты предоставляют важную информацию для применения пленок Cu в различных областях, включая производство полупроводников и датчиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе объясняется механизм формирования нанопленок силицида меди с использованием двух различных режимов магнетронного устройства «EPOS PVD disk pro». Тонкие пленки силицида меди формировались путем напыления меди на поверхность монокристаллического кремния, нагретого до 467°C, методом РЧМР на частоте 100 кГц и выходе $D=70\%$. Толщина полученной гетерозпитаксиальной пленки $\text{Cu}/\text{Cu}_{15}\text{Si}_4/\text{Si}$ была измерена с помощью СЭМ. Также методом ПТМР была сформирована пленка $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ путем термического нагрева нанопленок $\text{Cu}/\text{Si}(111)$ в вакууме при температуре 800 K в течение 1,5 часов. Образование пленки силицида меди зависит от размера кристаллов меди и температуры подложки. При 467°C под слоем меди толщиной 130 нм образовалась пленка $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ толщиной 75 нм. Установлено, что формирование пленок меди и ее силицидов при магнетронном распылении зависит от температуры подложки и температуры последующего

нагрева. Это исследование дополняет знания об использовании медно-кремниевых сплавов для повышения производительности транзисторов на основе металла-оксида-полупроводника и высокоскоростных интегральных схем (ИС).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aarju Mathew Koshy, A. Sudha, Satyesh Kumar Yadav, Parasuraman Swaminathan. Effect of substrate temperature on the optical properties of DC magnetron sputtered copper oxide thin films. *Physica B: Condensed Matter* 650 (2023) 414452. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414452>
2. Z.H. Zhang, S. Hasegawa, S. Ino. Epitaxial growth of Cu onto Si(111) surfaces at low temperature. *Surface Science*, 415 (1998) 363–375
3. A. Hojabri, F. Hajakbari, M. A. Moghri Moazzen, S. Kadkhodaei. Effect of Thickness on Properties of Copper Thin Films Growth on Glass by DC Planar Magnetron Sputtering. *JNS 2* (2012) 107-112
4. Jin-Hyo Booa, Min Jae Jung, Heon Kyu Park, Kyung Hoon Nam, Jeon G. Han. High-rate deposition of copper thin films using newly designed high-power magnetron sputtering source. *Surface Coatings Technology* 188–189 (2004) 721 – 727. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.07.005
5. Solovyev, A. A., Semenov, V. A., Oskirko, V. O., Oskomov, K. V., Zakharov, A. N., Rabotkin, S. V. (2017). Properties of ultra-thin Cu films grown by high power pulsed magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 631, 72-79.
6. Rtimi, S., Baghriche, O., Pulgarin, C., Ehiasarian, A., Bandorf, R., & Kiwi, J. (2014). Comparison of HIPIMS sputtered Ag-and Cu-surfaces leading to accelerated bacterial inactivation in the dark. *Surface and Coatings Technology*, 250, 14-20.
7. Paik, N. (2005). Characteristics of Cu films prepared using a magnetron sputter type negative ion source (MSNIS). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 229(3-4), 436-442.
8. Davranov, K.T., Normuradov, M.T., Davlatov, M.A., Toshev, T.U., Kurbonov, N.A. Preparation of calcium titanate perovskite compound, optical and structural properties. *East European Journal of Physics* This link is disabled., 2024, 2024(3), pp. 350–354.
9. Bekpulatov, I.R., Imanova, G.T., Jabarov, S.H., ... Tishkevich, D.I., Trukhanov, A.V. The solid-phase ion-plasma method and thermoelectric properties of thin CrSi₂ films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* This link is disabled., 2024, 35(20), 1426.
10. Bekpulatov, I.R., Imanova, G.T., Umirzakov, B.E., ... Turapov, I.X., Norbutaev, N.E. Formation of thin CrSi₂ films by the solid-phase ion-plasma method and their thermoelectric properties. *Materials Research Innovations* This link is disabled., 2024, 28(4), pp. 221–228
11. Dovranov, K.T., Normuradov, M.T., Davranov, K.T., Bekpulatov, I.R. Formation of Mn₄Si₇/Si(111), CrSi₂/Si(111), and CoSi₂/Si(111) thin films and evaluation of their optically direct and indirect band gaps. *Ukrainian Journal of Physics* This link is disabled., 2024, 69(1), pp. 20–2563
12. Baptiste Giroire, Mohamed Ali Ahmad, Guillaume Aubert, Lionel Teulé-Gay, Dominique Michau, et al.. A comparative study of copper thin films deposited using magnetron sputtering and supercritical fluid deposition techniques. *Thin Solid Films*, 2017, 643, pp.53-59. [ff10.1016/j.tsf.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.09.002)ff. [ffhal- 01652547f](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.09.002)
13. K. Mech, R. Kowalik, P. Zabinski. Cu thin films deposited by DC magnetron sputtering for contact surfaces on electronic components. *Arch. Metall. Mater.*, 56 (2011), pp. 903-908.
14. B.H. Wu, J. Wu, F. Jiang, D.L. Ma, C.Z. Chen, H. Sun, Y.X. Leng, N. Huang. Plasma characteristics and properties of Cu films prepared by high power pulsed magnetron sputtering. *Vacuum*, 135 (2017), pp. 93-100.
15. S. Du, Y. Li Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of magnetron sputtered Cu thin films. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 451 (2015), p. 969580.
16. Shiwen Du and Yongtang Li. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered Cu Thin Films. *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2015, Article ID 969580, 8 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/969580>