



Ёкуб ЭРГАШОВ,
Профессор НУУз, д.ф.-м.н
Азиза САИДРАХМАНОВА,
Магистрантка Ташкентский государственный технический университет
Ботир ТУРАКУЛОВ,
Базовый докторант Национального университета Узбекистана

По отзыву к.ф.-м.н Н. Норкулова

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ CoSi_2 В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ КРЕМНИЯ

Аннотация

Методами измерения интенсивности проходящего через исследуемые образцы света различной частоты и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии определена ширина запрещенной зоны E_g нанокристаллических фаз CoSi_2 , созданных на поверхности и в приповерхностной области Si методом ионной имплантации в сочетании с отжигом. Наноразмерные фазы CoSi_2 на поверхности кремния получены имплантацией ионов Co с энергией $E_0 = 1$ кэВ; а в приповерхностной области (на глубине 15–16 нм) – имплантацией ионов с $E_0 = 15$ кэВ. Постимплантационный отжиг в основном осуществлялся температурным прогревом. Показано, что нанокристаллические фазы CoSi_2 как на поверхности, так и в приповерхностном слое кристаллизуются в кубическую решетку. Установлено, что E_g нанокристаллических фаз силицидов кобальта в зависимости от их размеров может изменяться в пределах 0.6–0.9 эВ.
Ключевые слова: Наноразмерные фазы, оптическое поглощение, степень покрытия, прохождение света, ионная имплантация, силицид, отжиг, доза ионов, интенсивность света, ширина запрещенной зоны.

OBTAINING AND STUDYING THE PHYSICAL PROPERTIES OF NANOSIZED CoSi_2 PHASES IN THE SURFACE REGION OF SILICON

Annotation

By measuring the intensity of light passing through the studied samples of different frequencies and ultraviolet photoelectron spectroscopy, the band gap E_g of nanocrystalline CoSi_2 phases created on the surface and in the near-surface region of Si by ion implantation in combination with annealing was determined. Nanosized CoSi_2 phases on the silicon surface were obtained by implanting Co ions with an energy $E_0 = 1$ keV; and in the near-surface region (at a depth of 15–16 nm) by implantation of ions with $E_0 = 15$ keV. Post-implantation annealing was mainly carried out by thermal heating. It is shown that nanocrystalline CoSi_2 phases both on the surface and in the subsurface layer crystallize into a cubic lattice. It has been established that E_g of nanocrystalline phases of cobalt silicides, depending on their size, can vary within 0.6–0.9 eV.

Key words: Nanoscale phases, optical absorption, degree of coverage, light transmission, ion implantation, silicide, annealing, ion dose, light intensity, band gap zone.

KREMNIYNING YUZA USTIDAGI NANOO'LCHAMLI CoSi_2 FAZASINI FIZIKAVIY XUSUSIYATLARINI OLISHI VA O'RGANISH

Annotatsiya

Turli chastotalar va ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyaning o'rganilgan namunalari orqali o'tadigan yorug'lik intensivligini o'lchash yo'li bilan tavlaniş bilan birgalikda ion implantatsiyasi orqali Si yuzasida va sirtga yaqin mintaqada yaratilgan nanokristalli CoSi_2 fazalarining tarmoqli oralig'i aniqlandi. Silikon yuzasida nano o'lchamli CoSi_2 fazalari energiya $E_0 = 1$ keV bo'lgan Co ionlarini implantatsiya qilish orqali olingan; va yer yuzasiga yaqin mintaqada (15-16 nm chuqurlikda) $E_0 = 15$ keV bo'lgan ionlarni implantatsiya qilish orqali. Implantatsiyadan keyingi tavlaniş asosan termal isitish orqali amalga oshirildi. Nanokristalli CoSi_2 fazalari sirtida ham, yer osti qatlamida ham kubik panjaraga kristallanishi ko'rsatilgan. Aniqlanishicha, kobalt silisidlarining nanokristal fazalari, ularning kattaligiga qarab, 0,6-0,9 eV oralig'ida o'zgarishi mumkin.
Kalit so'zlar: Nano o'lchovli fazalar, optik yutilish, qoplanish darajasi, yorug'lik o'tkazuvchanligi, ion implantatsiyasi, silitsid, tovlanish, ion dozasi, yorug'lik intensivligi, tarmoqli oralig'i zonasi.

Введение. Наноразмерные структуры, созданные на поверхности и в приповерхностной области полупроводниковых и диэлектрических пленок, имеют перспективы в создании новых приборов микро-, опто- и наноэлектроники. В частности, повышенный интерес к наноразмерным структурам CoSi_2 , прежде всего, обусловлен использованием их в создании нанопленочных МДП, ПДП структур, омических и барьерных контактов, магнитозапоминающих устройствах и др [1].

В данной работе методом измерения интенсивности проходящего через исследуемые образцы света различной частоты определены ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз CoSi_2 , созданных в поверхностной и приповерхностной области Si методом ионной имплантации в сочетании с отжигом.

Методика проведения экспериментов. Объектами исследования являлись эпитаксиальные пленки Si с толщиной ~ 100 нм, выращенные на поверхности монокристаллов CaF_2 (111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Экспериментальный прибор состоит из двух камер. В первой камере проводились все технологические операции (термообработка, ионная имплантация, лазерный отжиг), а во второй камере исследовались состав и электронная структура изучаемых материалов с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и посредством снятия энергетических зависимостей интенсивности I проходящего света через образец. Энергия фотонов $h\nu$ изменялась в пределах 0.2–1.5 эВ ($\lambda \approx 6200\text{--}800$ нм).

Поверхностный диаметр ионно-имплантированного участка составлял $\sim 1.5\text{--}2$ мм, а диаметр светового луча падающего на поверхность равнялся $\sim 0.5\text{--}0.6$ мм. Профили распределения атомов по глубине определялись методом ОЭС в сочетании с травлением поверхности ионами Ar^+ ($E_0 = 3$ кэВ, угол падения относительно нормали составлял $80\text{--}85^\circ$). Нами определены Оптимальные режимы ионной имплантации и отжига для получения нанокристаллов и нанопленок CoSi_2 (таблица-1).

Ионы	$E_0 = 1$ кэВ			$E_0 = 15$ кэВ		
	D, см $^{-2}$	$W^* + T^*$	Наноструктура	D, см $^{-2}$	T^{**} , К	Наноструктура
$\text{Co}^+ \rightarrow \text{Si}$ (111)	5×10^{14}	$1.1 + 900$	НК	5×10^{14}	1000	НК
	1015	$1.2 + 1000$	НК	1015	1000	НК
	5×10^{15}	$1.6 + 1200$	НК	5×10^{15}	1200	НК
	6×10^{16}	$1.8 + 1200$	НП			

Таблица-1. Примечание: W^* – плотность энергии лазерного излучения, Дж/см 2 ; T^* – кратковременный прогрев, К; T^{**} – время прогрева при каждой температуре $t = 30$ мин.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для системы CoSi_2 были получены зависимости интенсивности проходящего света от энергии (длина волны) фотонов. Из рис.1 видно, что резкое уменьшение интенсивности света в случае "чистого" происходит, начиная со значения $h\nu = 1.0$ эВ, а в случае пленки CoSi_2 — со значения $h\nu = 0.5$ эВ. Экстраполяция этих кривых к оси энергии фотонов показывает, что значения E_g для пленок Si и CoSi_2 равны — 1.1 эВ и 0.6 эВ соответственно.

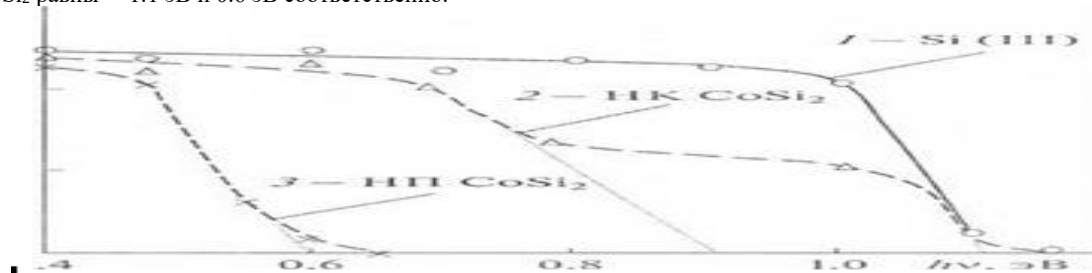


Рис. 1. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для: 1 – Si (111); 2 – Si с нанокристаллами CoSi_2 ; 3 – Si с нанопленкой CoSi_2 с толщиной 2.5–3.0 нм.

Отметим, что в работе [8] для увеличения точности определения края поглощения (ширины запрещенной зоны) прямозонной пленки ZnO построена зависимость $\text{Si}_2(h\nu)$, где α — показатель поглощения. Для ZnO ширина запрещенной зоны составляет ~ 3.3 эВ. В нашем случае Si является непрямозонным, а CoSi_2 прямозонным полупроводником с очень узкой шириной запрещенной зоны. Поэтому в данной работе целесообразно было оценить края поглощения экстраполяцией резко изменяющейся части кривой: $I_{\text{CoSi}_2}/I_{\text{Si}}(h\nu)$

В случае Si с нанокристаллами CoSi_2 (рис. 1, кривая 2) резкое уменьшение интенсивности света наблюдается при двух значениях $h\nu = 0.8$ и эВ. Первое уменьшение связано с поглощением света на участках покрытых нанокристаллами CoSi_2 , а второе — на не покрытых нанокристаллами CoSi_2 . Таким образом, значения E_g для нанокристаллов CoSi_2 , с поверхностными диаметрами, равными примерно 25–30 нм составляет приблизительно 0.85–0.9 эВ. Из этого следует, что ширина запрещенной зоны для нанокристаллических фаз значительно больше, чем для нанопленок.

По кривой 2 (рис. 1) можно оценить степень покрытия поверхности Si наночастицами CoSi_2 . Для этого предполагаем, что в случае "чистого" Si отношение интенсивностей: $I_{\text{CoSi}_2}/I_{\text{Si}} = 1$. Наличие на поверхности Si наноразмерных фаз CoSi_2 уменьшает это отношение: чем больше размер нанокристалла, тем больше уменьшается значение

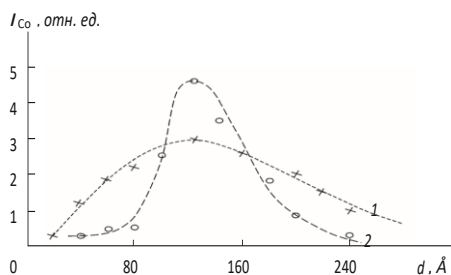


Рис. 2. Профили распределения атомов Co по глубине d для Si, имплантированных с энергией $E_0 = 15$ кэВ при $D \approx 1015$ ион $\cdot$ см $^{-2}$: 1 – до прогрева; 2 – после прогрева при температуре $T = 900$ К.

соотношения $I_{\text{CoSi}_2} / I_{\text{Si}}$. Поэтому при $\theta < 1$ степень покрытия поверхности нанокристаллами можно оценить по формуле:

$$\theta = 1 - I_{\text{CoSi}_2} / I_{\text{Si}} \quad (1)$$

где I_{Si} – интенсивность света проходящего через чистый Si, I_{CoSi_2} – интенсивность света проходящего через Si с нанокристаллами CoSi_2 . Как видно из кривой 2 в случае Si + НК CoSi_2 при $h\nu \approx 0.9$ эВ, соотношение $I_{\text{CoSi}_2} / I_{\text{Si}}$ составляет примерно 0.55, следовательно, значение θ составляет 0.45. Можно полагать, что 45% поверхности кремния покрыто нанокристаллами CoSi_2 , что близко к значению степени покрытия θ , полученное нами методами ОЭС и РЭМ [6].

Для создания нанокристаллических фаз в сравнительно глубоких слоях Si, имплантация проводилась более высокими энергиями. На рис. 2 приведены изменения интенсивности оже-пика Co ($E = 765$ эВ) по глубине Si (111), легированного ионами Co^+ с энергией $E_0 = 15$ кэВ при $D = 1015$ см $^{-2}$ до и после прогрева при температуре $T \approx 900$ К в течение 30 мин (таблица). В обоих случаях максимум распределения атомов Co располагается на глубине 15–16 нм. После прогрева наблюдается увеличение концентрации атомов в области максимума и существенное уменьшение полуширины кривой распределения $I_{\text{Co}}(d)$. В этих участках (на глубине ~15–16 нм) образовались нанокристаллические фазы CoSi_2 . Из энергетических соображений можно полагать, что эти фазы в отличие от поверхностных фаз, имеют сферическую форму [10]. Средний диаметр нанокристаллических фаз CoSi_2 , который оценен по ширине кривой $I_{\text{Co}}(d)$, составляет 10–12 нм (рис. 2).

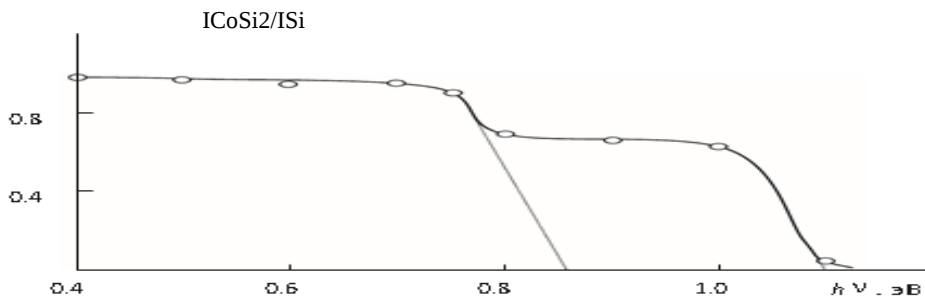


Рис. 3. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для Si с нанокристаллами CoSi_2 , сформированных в приповерхностном слое на глубине 15–16 нм.

Заключение. Показано, что ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз CoSi_2 с размерами $(1-2) \times 10^{-18}$ см 3 сформированных в поверхностной и приповерхностной областях Si лежит в пределах 0.8–0.9 эВ. В случае нанопленок CoSi_2 с толщиной $d \approx 3.0-3.5$ нм значение $E_g \approx 0.6$ эВ. Варьируя энергию и дозу ионов контролируемо, можно изменить размеры и глубину формирования наноразмерных структур. В частности при $E_0 = 1$ кэВ нанокристаллические фазы CoSi_2 формируются в поверхностном слое Si, а при $E_0 = 15$ кэВ на глубине 15–16 нм от поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colinge J.P. // Material Research Society Proceedings. 1985. V. 35. P. 653. <http://dx.doi.org/doi/10.1557/PROC-35-653>.
2. Rudakov V.I., Denisenko Y.I., Naumov V.V., Simakin S.G. // Russian Microelectronics. V. 40. Issue 6. P. 389. doi 10.1134/S1063739711060102.
3. Алтухов А.А., Жирнов В.В. Анализ морфологии и стехиометрии пленок $\text{CoSi}/\text{Si}(100)$, полученных методами ТФЭ и РЭ // Материалы II-го Всесоюзного межотраслевого совещания “Тонкие пленки в электронике”: Москва-Ижевск. 1991. С. 15.
4. Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Галль Н.Р., Молоцов С.Л., Вялых Д.В. // ФТТ. 2003. Т.45. Вып. 8. С. 1519.

5. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Курбанов Х.Х. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 7. С. 91.
6. Болтаев Х.Х., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 4. С. 24.
7. Муродкобилов Д.М., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 10. С. 58.
8. Сердобинцев А.А., Веселов А.Г., Кирясова О.А. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 4. С. 496.
9. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Мурадкабилов Д.М., Данаев С.Б. // ДАН РУз. 2011. № 4. С. 22.
10. Михайлов А.Н., Гусейнов Д.В., Белов А.И. и др. Ионно-лучевая инженерия наноматериалов на основе кремния // Труды XXI межд. конф. ВИП-2013. Т. 2. С. 31.