

# ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Si (111) ПОД ВЛИЯНИЕМ БОМБАРДИРОВКИ ИОНАМИ Ar<sup>+</sup>

М.Б. Юсупжонова, Д.А. Мирзаев, Д.М. Мурадкалилов, Ш.Ш. Хашимов, Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков  
Tashkent State Technical University, 100095, st. University, 2, Tashkent, Uzbekistan, [ftmet@rambler.ru](mailto:ftmet@rambler.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется изучению оптических и электронных свойств полупроводников с наночастицами и нанопленками на поверхностных слоях. Особый интерес представляют исследования, связанные с изменением свойств кремния при уменьшении его размеров до нескольких нанометров, а также исследования, направленные на изменения свойств нанопленок Si при различных воздействиях (адсорбция атомов, ионная и электронная бомбардировка, окисление). В работах показано, что увеличение пористости, следовательно, уменьшение размеров и изменение формы кремниевых наночастиц приводит к увеличению края поглощения света в сторону больших энергий, что объясняется увеличением ширины запрещенной зоны  $E_g$ . Наибольшие увеличения  $E_g$  (до 1,7 эВ) наблюдаются, когда размер нанокристаллических фаз Si составляет  $\leq 3 - 4$  нм. Увеличение  $E_g$  до 1,9 эВ наблюдается и в случае формирования тонких аморфных пленок кремния. Поэтому система аморфный кремний/нанокристаллический кремний является перспективным материалом для разработки солнечных элементов с высокой эффективностью [1-6].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования были использованы монокристаллические образцы Si (111) с размерами  $10 \times 10 \times 0.5$  мм. Термическая обработка, бомбардировка ионами Ar<sup>+</sup> и Ni<sup>+</sup> и исследования с использованием методов опико-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС), измерения энергетических и угловых зависимостей коэффициента неупругоотраженных электронов (НОЭ)  $\eta$  и квантового выхода фотоэлектронов осуществляли в одном и том же экспериментальном приборе при вакууме  $P \leq 10^{-7}$  Па. Энергия ионов Ar<sup>+</sup> и Ni<sup>+</sup> варьировали в пределах  $E_0 = 0.5 - 2$  кэВ, а их доза —  $D = 10^{14} - 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Модификация поверхностных слоев пленок Si осуществлялась бомбардировкой ионами направленными к поверхности  $5 - 6^\circ$  относительно нормали, следовательно каналированием ионов можно было пренебречь. Перед ионной бомбардировкой поверхность Si обезгаживали при  $T = 1200$  К в течении 4 — 5 часов в сочетании с кратковременными прогревами до  $T = 1500$  К при вакууме не хуже  $10^{-7}$  Па. Измерения зависимости интенсивности  $I$  проходящего через образец (коэффициент прохождения света  $K$ ) от энергии фотонов, осуществляли с использованием спектрофотометра UV-1280, а картины дифракции быстрых электронов снимались в приборе ЭМР-2.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены угловые зависимости коэффициента  $\eta$  измеренные при энергии первичных электронов  $E_p = 500$  эВ для Si (111) бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с  $E_0 = 1$  кэВ разными дозами. Зависимость  $\eta(\varphi)$  дает исчерпывающие сведения о степени разупорядочения поверхности монокристаллов.

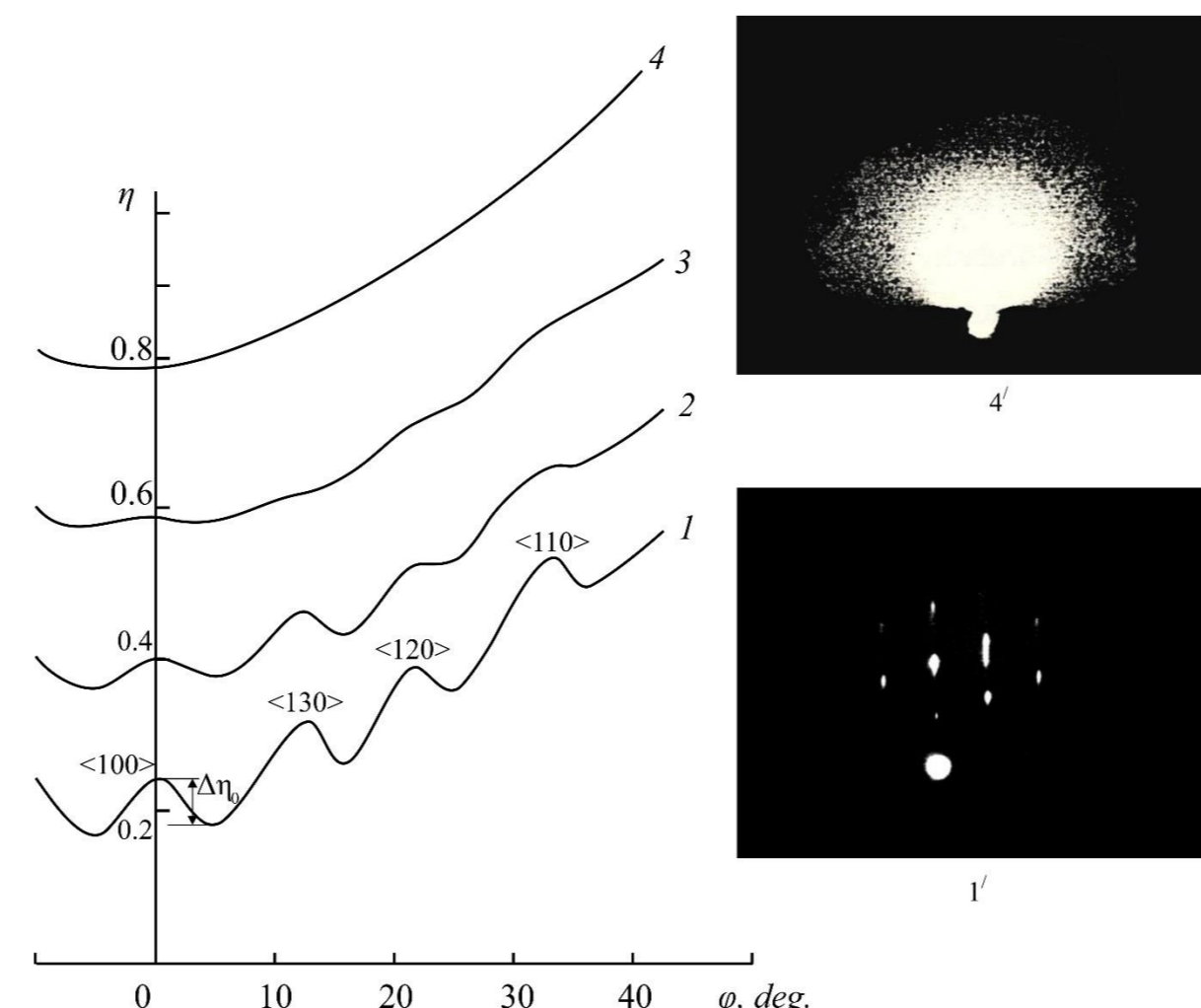


Рис. 1. Влияние бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> с  $E_0 = 1$  кэВ разными дозами облучения на зависимости  $\eta$  от угла падения  $\varphi$  первичного пучка  $E_p = 500$  эВ (кривые 1 — 4) и на ДБЭ изображения (вставки 1' и 4') поверхности пленки Si/CaF<sub>2</sub> (111): 1 и 1' —  $D = 0$ ; 2 —  $D = 5 \cdot 10^{14}$ ; 3 —  $D = 5 \cdot 10^{15}$ ; 4 и 4' —  $D = 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Кривые 2, 3, 4 сдвинуты на 0,2; 0,4 и 0,6 относительно кривой 1.

Разупорядочение приповерхностного слоя Si (111) приводит к уменьшению коэффициента прохождения света  $K$  во всей исследуемой области энергии фотонов ( $h\nu = 0.4 - 1.5$  эВ) (рис. 2). Из рис. 2 видно, что в случае чистого Si (111) в области  $h\nu = 0.6 - 0.9$  эВ значение  $K$  заметно не меняется, в очень короткой области  $h\nu = 0.9 - 1$  эВ зависимость  $K(h\nu)$  имеет экспоненциальный характер, а в области  $h\nu = 1.0 - 1.1$  эВ  $K$  резко, почти линейно, с большой крутизной уменьшается до нуля.

На рис. 3 приведены фотоэлектронные спектры ( $h\nu = 10.8$  эВ) для Si (111) измеренных до и после бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> с  $E_0 = 1$  кэВ при  $D = 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Из рис. 3 видно, что аморфизация приводит к резкому изменению плотности состояния валентных электронов.

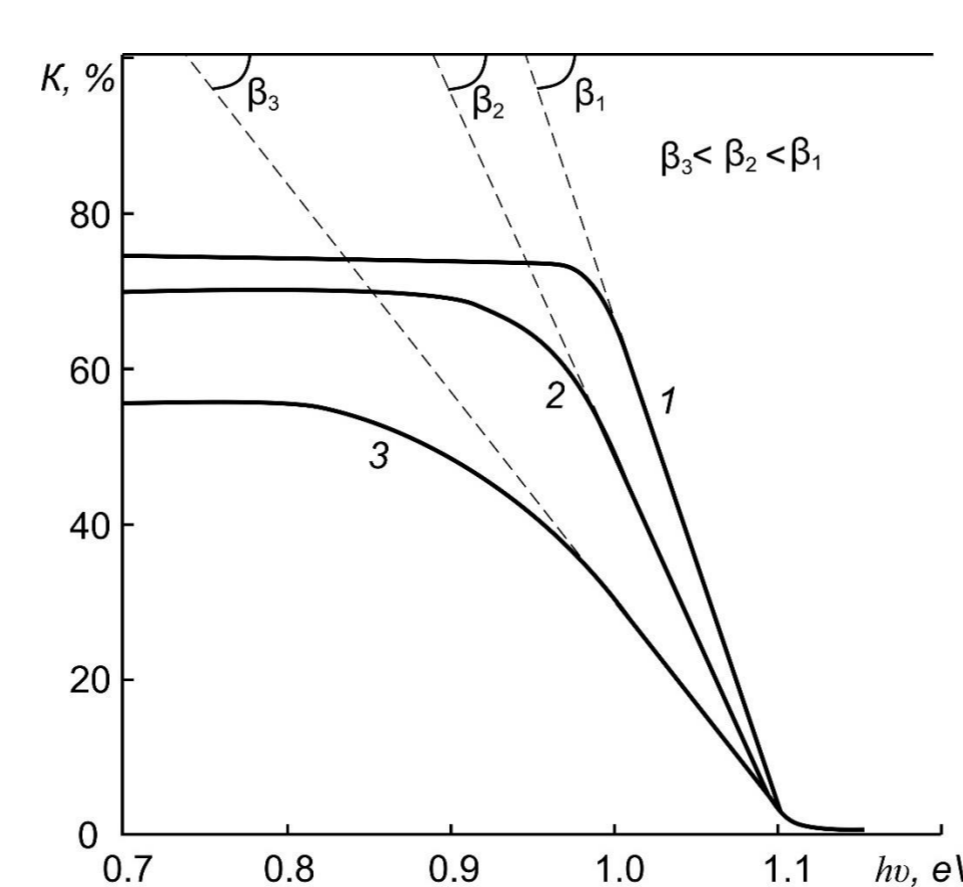


Рис. 2. Зависимости коэффициента прохождения света  $K$  от энергии фотонов для пленки Si(111) бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с  $E_0 = 1$  кэВ при дозах  $D$ , см<sup>-2</sup>: 1 — 0; 2 —  $5 \cdot 10^{15}$ ; 3 —  $5 \cdot 10^{16}$ .

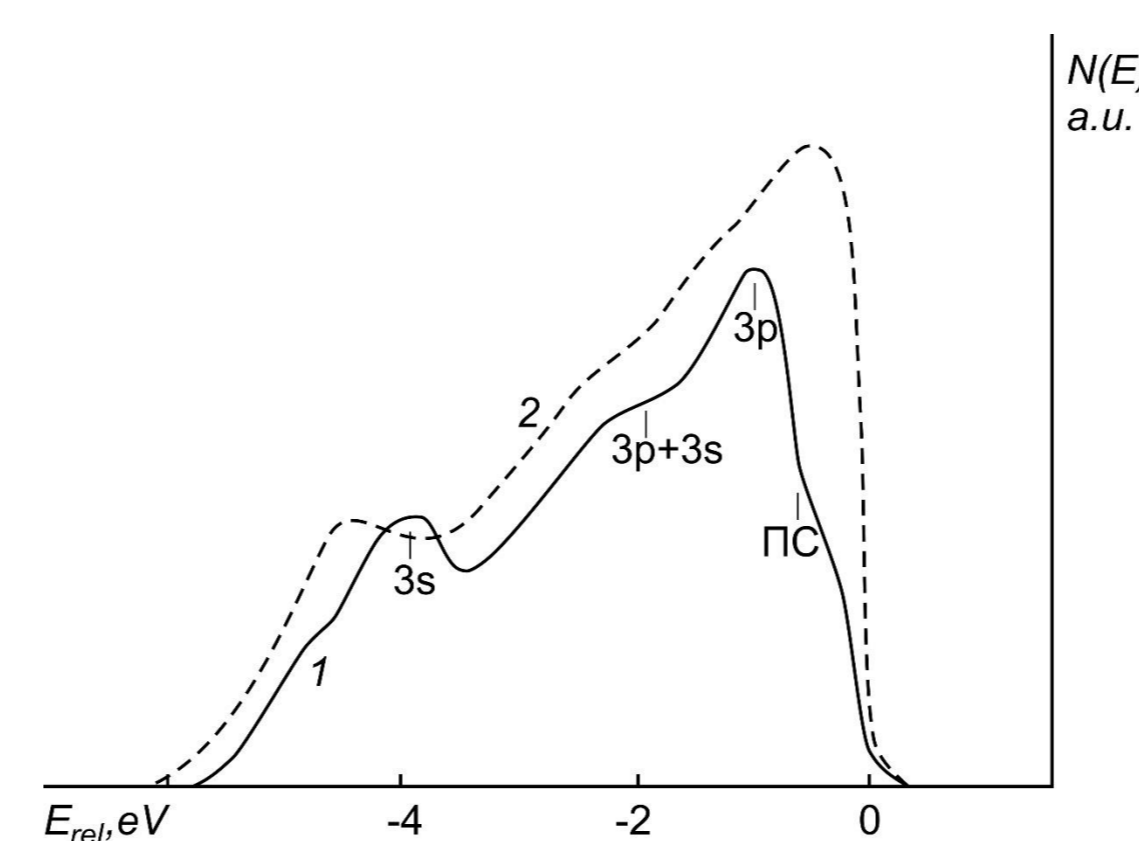


Рис. 3. Фотоэлектронные спектры, измеренные при  $h\nu = 10.8$  эВ для пленки Si (111) до (кривая 1) и после бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> с  $E_0 = 1$  кэВ при  $D = 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> (кривая 2).

В таблице 1 приведены основные параметры энергетических зон и коэффициент прохождения света для  $h\nu = 0.4$  и  $1.0$  эВ. Видно, что после ионной имплантации коэффициент пропускания в области  $h\nu \approx 0.8$  эВ уменьшается до 20 — 30 %, уменьшение  $K$  происходит сильнее при приближении значения  $h\nu$  к  $E_g$ .

Таблица 1

Значение  $E_v$ ,  $E_g$ ,  $\chi$  и  $K$  для Si до и после аморфизации ионной бомбардировкой

	$E_v$ , эВ	$E_g$ , эВ	$\chi$ , эВ	Коэффициент пропускания, %	
				$h\nu = 0.8$ эВ	$h\nu = 1.0$ эВ
Si (111)	5.2	1.1	4.1	75	62
Ar <sup>+</sup> → Si (111)	5.0	1.25	3.85	56	27

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в данной работе проведены сравнительные исследования влияния бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> и Ni<sup>+</sup> на состав, структуру и коэффициент прохождения света монокристаллического Si. В обоих случаях имплантация приводит к разупорядочению поверхностных слоев и уменьшению  $K$ . В первом случае разупорядочение происходит без изменения состава приповерхностного слоя, а во втором случае эти слои обогащаются несвязанными атомами Si, Ni и молекулами типа Ni + Si. После прогрева при  $T = 900$  К Si, имплантированного ионами Ni<sup>+</sup>, в поверхностной области Si в зависимости от дозы ионов формируются эпитаксиальные фазы (при  $D < 5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) и пленки (при  $D = 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) NiSi<sub>2</sub>. Впервые определена толщина аморфизированных слоев, степень разупорядочения поверхности и степень покрытия поверхности аморфизированными фазами Si (111), бомбардированного ионами низких энергий ( $E_0 = 0.5 - 2$  кэВ).

## ЛИТЕРАТУРА

- S.B. [Donaev](#), F. [Djurabekova](#), D.A. [Tashmukhamedova](#), B.E. [Umirzakov](#). *Physica Status Solidi (C)*, **12(1-2)**, 89 (2015). DOI 10.1002/pssc.201400156
- B.E. [Umirzakov](#), D.A. [Tashmukhamedova](#), M.K. [Ruzibaeva](#), F.G. [Djurabekova](#), S.B. [Danaev](#). *NIMB*, **326**, 322 (2014).
- Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Г.Х. Аллаярлова, Ж.Ш. Содикжанов. *Письма в ЖТФ*, **45(7)**, 49 (2019). [B.E. [Umirzakov](#), D.A. [Tashmukhamedova](#), G.K. [Allayarova](#), Z.S. [Sodikzhanov](#). *Technical Physics Letters*, **45(4)**, 356 (2019).
- П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. *ЖТФ*, **87(3)**, 443 (2017).
- Д.М. Седракан, П.Г. Петросян, Л.Н. Григорян. *ЖТФ*, **85(5)**, 94 (2015).
- И.М. Бронштейн, Б.С. Фрайман. *Вторичная электронная эмиссия*. (М., Наука, 1969). с. 170 — 175, с. 244 — 246.