

# СОЗДАНИЕ НАНОФАЗ НА ПОВЕРХНОСТИ SiO<sub>2</sub> ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ Ar<sup>+</sup>

Д.А. Ташмухамедова, Б.Е. Умирзаков, Ё.С. Эргашов, М.А. Миржалилова, А.Н. Уроков, Ж.У. Усманов  
Tashkent State Technical University, 100095, st. University, 2, Tashkent, Uzbekistan, [ftmet@rambler.ru](mailto:ftmet@rambler.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наноразмерные структуры и слои на основе Si, Ge и их оксидов имеют перспективы при создании приборов нано- и оптоэлектроники. В частности, гетероструктуры SiO<sub>2</sub>/Si с различными нановключениями служат основой при разработке новых видов высокочастотных транзисторов, интегральных схем, оптических преобразователей и солнечных элементов.

Нанокластеры Si в матрице оксидов кремния в основном получают методами термического испарения, лазерной абляции, химического осаждения из газовой фазы. Во всех случаях для того, чтобы осуществлять пассивацию оборванных поверхностных связей, в случае аморфных нанокластерных фаз требуется проведение последующего отжига до T = 623 K в кислородсодержащей атмосфере. Для получения нанокристаллических фаз кремния (nc -Si) пленка α-SiO<sub>2</sub>:H

отжигается при температуре T = 1273 K. При этом внутри кристаллизованной пленки формируются с -SiO<sub>2</sub> и nc -Si. Свойства аморфных и кристаллических наночастиц Si существенно отличаются друг от друга. Технология получения и свойства этих наночастиц более подробно рассмотрены в обзоре.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для создания наноразмерных структур на поверхности полупроводников и диэлектрических пленок часто используется метод ионной бомбардировки.

Впервые на поверхности пленок SiO<sub>2</sub>/Si получены нанофазы и нанопленки Si при бомбардировке ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями E<sub>0</sub> = 0.5–5 keV в сочетании с отжигом. Оценены размеры и толщина наноструктур Si. Их толщина при E<sub>0</sub> = 1 keV составляла ~ 25–30 нм. Однако до сих пор практически не исследовано влияние бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями E<sub>0</sub> ≥ 10 keV на состав и структуру приповерхностных слоев пленок SiO<sub>2</sub>. Настоящая работа посвящена получению наноразмерных фаз и слоев Si на различных глубинах пленки SiO<sub>2</sub> путем бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup>, а также определению их состава, размеров, структуры и ширины запрещенной зоны.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объектов исследования были выбраны аморфные пленки SiO<sub>2</sub>/Si толщиной ~ 50 нм, полученные методом термического окисления, и монокристаллические образцы SiO<sub>2</sub> (α-кварц) толщиной 0.2–0.3 мм. Ионная бомбардировка и все исследования проводились при вакууме не хуже 10<sup>-7</sup> Па. Энергия ионов варьировалась в пределах от 1 до 25 keV, а доза их облучения - от 5 · 10<sup>14</sup> до 5 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. Для создания наноструктур Si в случае пленок SiO<sub>2</sub> ионы Ar<sup>+</sup> направлялись к поверхности перпендикулярно, а в случае монокристаллов SiO<sub>2</sub> - под углом 3–4° относительно нормали, чтобы избежать каналирования ионов.

Для определения профиля распределения атомов по глубине проводился послойный оже-анализ путем распыления поверхности образца ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 1 keV при угле падения ~ 80 – 85° относительно нормали со скоростью (3 ± 1) Å/min. Погрешность измерений при определении концентрации атомов составляла 5 – 8 at.%. Степень разложения SiO<sub>2</sub> на составляющие (кремний и кислород) в процессе бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> оценивалась по изменению формы, интенсивности и энергетического положения оже-пика L<sub>23</sub>VV (E = 92 eV) Si, а концентрация чистого Si определялась по изменению интенсивности как низкоэнергетического (92 eV) пика, так и высокоэнергетического пика LMM (E = 1619 eV) Si.

На рис. 1 приведено изменение поверхностной концентрации атомов кремния C<sub>Si</sub> образующихся на поверхности SiO<sub>2</sub>/Si при бомбардировке ионами Ar<sup>+</sup> разными энергиями при дозе D<sub>нас</sub> = D = 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. После каждого цикла ионной бомбардировки проводился прогрев при T = 800 K в течении 30 min. Концентрация Si определялась по изменению интенсивности L<sub>23</sub>VV оже-пика кремния.

На рис. 2 приведен концентрационный профиль распределения атомов Si по глубине для системы SiO<sub>2</sub>/Si бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 15 keV при D = 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. Измерение проводилось после прогрева при T = 800 K. Видно, что в приповерхностном слое SiO<sub>2</sub> на глубине ~ 18 нм образуется слой Si толщиной 8 – 10 нм.

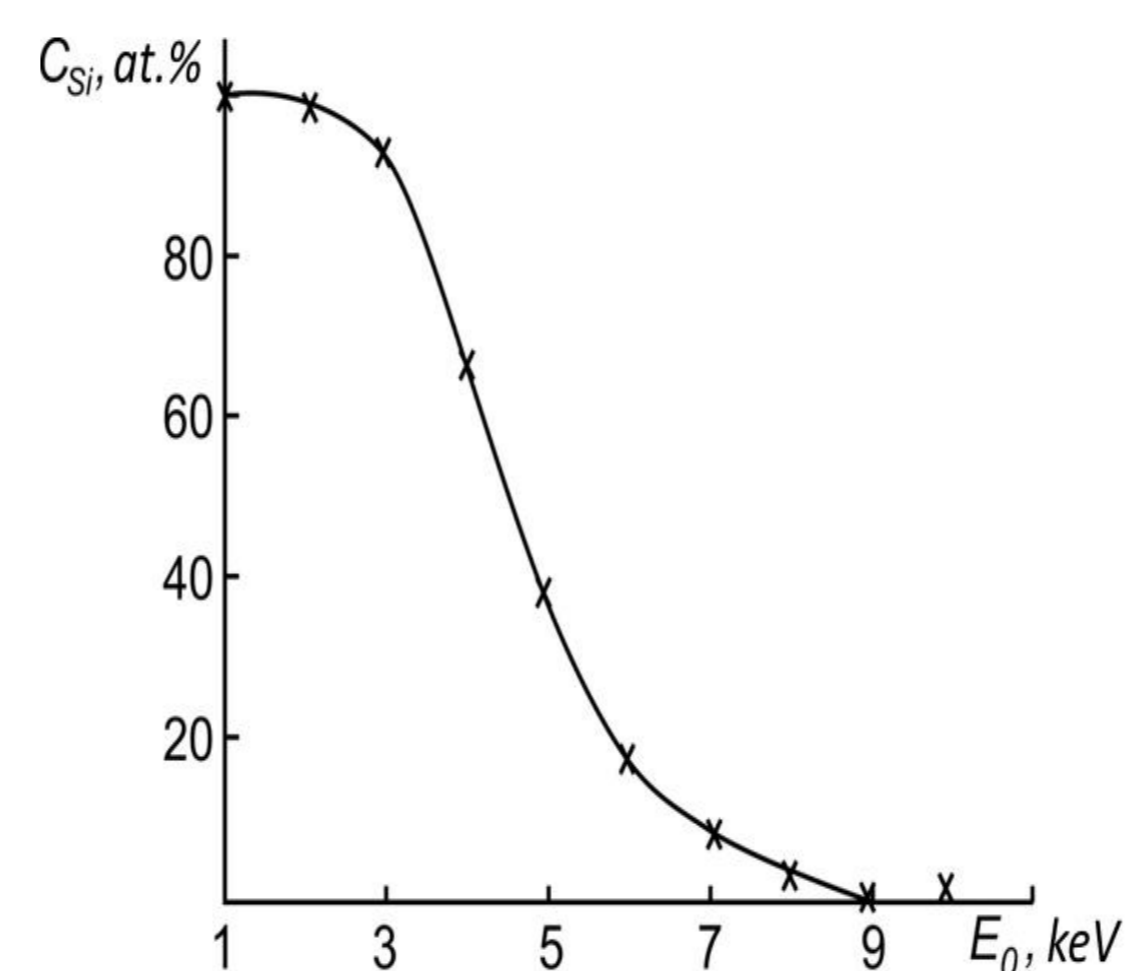


Рис. 1. Зависимость поверхностной концентрации атомов Si от энергии ионов для SiO<sub>2</sub>, бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup>.

В целом формируется нанопленочная система SiO<sub>2</sub> – Si – SiO<sub>2</sub>. На границах SiO<sub>2</sub> – Si и Si – SiO<sub>2</sub> формируются переходные слои толщиной ~ 5 – 6 нм. Средняя глубина d<sub>ср</sub> образования кремниевых слоев зависит от энергии ионов: при E<sub>0</sub> = 10 keV d<sub>ср</sub> = ~ 15 нм, при E<sub>0</sub> = 15 keV – 19 нм, а при E<sub>0</sub> = 25 keV d<sub>ср</sub> = 25 нм. При увеличении E<sub>0</sub> от 10 до 25 keV толщина слоя Si существенно не меняется и составляет 8 – 10 нм.

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности проходящего света I<sub>отн</sub> от энергии фотонов для SiO<sub>2</sub> (111) бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 15 keV при дозах 0 (чистый SiO<sub>2</sub>), 10<sup>15</sup>, 10<sup>16</sup> и 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. После каждого цикла ионной имплантации проводился отжиг при T = 800 – 850 K в течение 30 min. Где I<sub>отн</sub> = I<sub>6</sub>/I<sub>SiO<sub>2</sub></sub>; I<sub>SiO<sub>2</sub></sub> и I<sub>6</sub> интенсивности проходящего света через чистый и ионно-бомбардированный SiO<sub>2</sub>, соответственно.

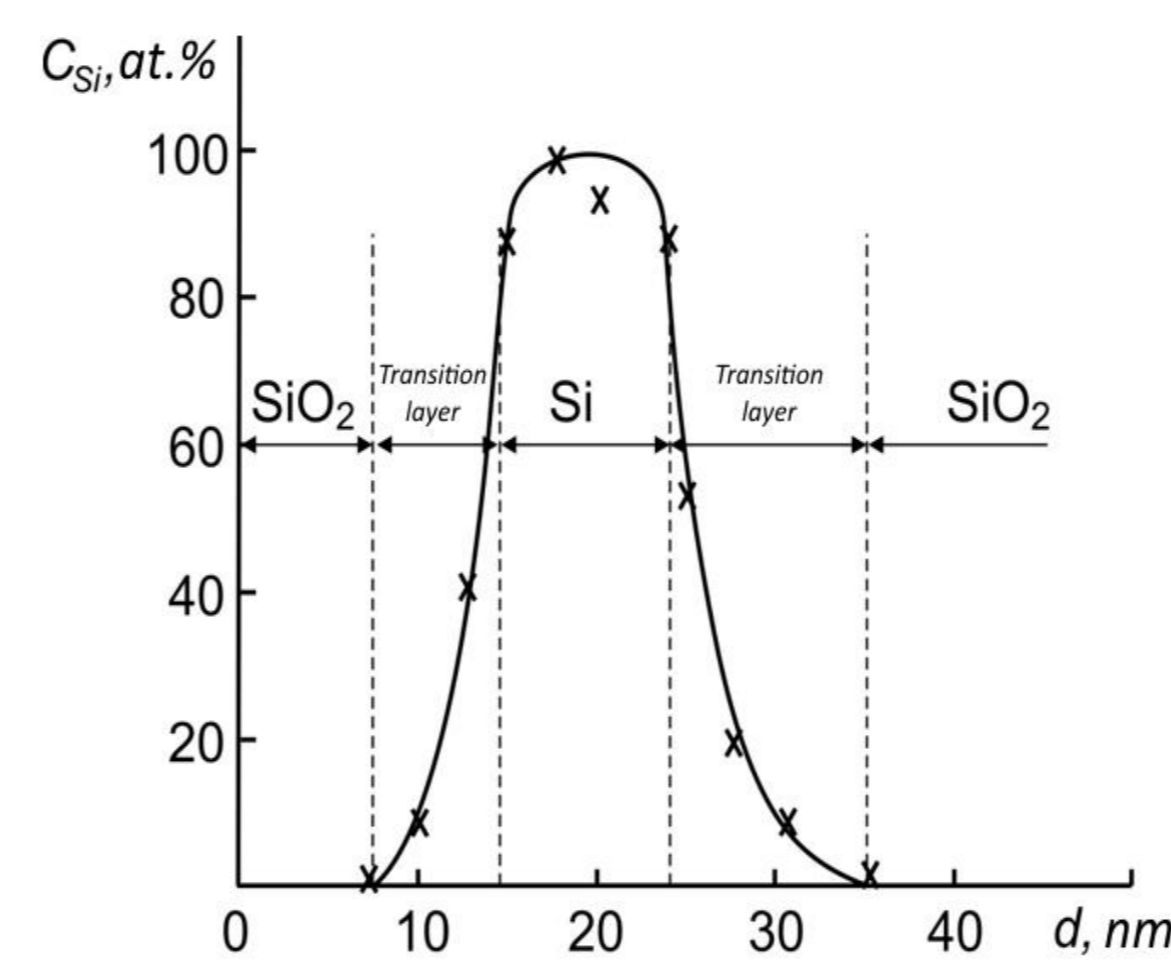


Рис. 2. Концентрационный профиль распределения атомов Si по глубине SiO<sub>2</sub>/Si (111) бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 15 кэВ при D = 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>, измеренные после прогрева при T = 800 K в течении 30 мин.

Из кривой 1 видно, что при D = 0 значение I<sub>отн</sub> = 1 и она в исследуемой области энергии фотонов (hv = 0.8 – 2.2 eV) заметно не меняется. После бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup> с дозой 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> значения I<sub>отн</sub> начиная с hv = 1.8 eV резко уменьшаются на ~ 0.30 – 0.35, т.е. 30 – 35 % падающего света поглощаются нанокристаллическими фазами Si, следовательно степень покрытия θ приповерхностного слоя SiO<sub>2</sub> нанокристаллами Si составляет 30 – 35 %.

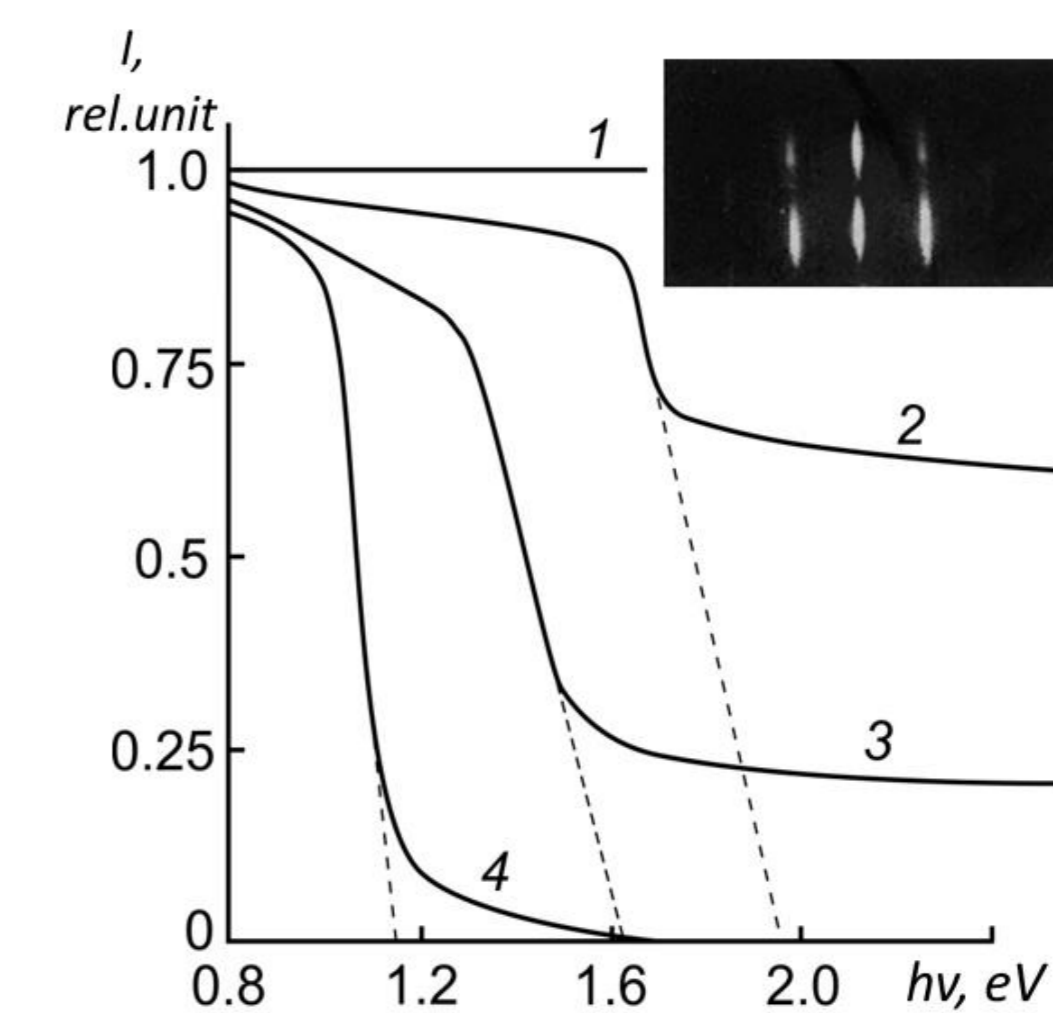


Рис. 3. Зависимость интенсивности проходящего света от энергии фотонов для SiO<sub>2</sub>, бомбардированного ионами Ar<sup>+</sup> с E<sub>0</sub> = 15 кэВ, при дозах D, см<sup>-2</sup>: 1 – 0; 2 – 10<sup>15</sup>; 3 – 10<sup>16</sup>; 4 – 2 · 10<sup>17</sup>. На вставке приведена ДБЭ-картина поверхности для образца бомбардированного при D = 2 · 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе методом ионной бомбардировки в сочетании с отжигом впервые получены нанофазы и слои Si на различных глубинах приповерхностного слоя аморфных пленок и монокристаллических образцов SiO<sub>2</sub>. В частности установлено, что при E<sub>0</sub> ≤ 9 keV нанослой Si формируются на поверхности SiO<sub>2</sub> и вблизи неё, а при E<sub>0</sub> > 9 – 10 keV в приповерхностном слое. Оценены их толщина, глубина образования и определена ширина запрещенной зоны. Установлено, что при увеличении энергии ионов от 10 до 25 keV толщина слоя Si существенно не меняется и составляет 8 – 10 нм, а средняя глубина образования нанофаз Si изменяется от 15 до 25 нм. В случае монокристаллического SiO<sub>2</sub> после ионной имплантации и отжига формируется монокристаллические слои кремния. Показано, что в нанокристаллических фазах Si сформированных при дозах D ≤ 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> проявляются квантово-размерные эффекты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юсупжанова М.Б., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 148 – 150. <http://journals.ioffe.ru/articles/42980>
2. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Аллаярова Г.Х., Содикжанов Ж.Ш. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 7. С. 49 – 51. DOI: [10.21883/PJTF.2019.07.47539.17650](https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.07.47539.17650)
3. Болтаев Х.Х., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014, № 4, с. 24. DOI: 10.7868/S0207352814010107
4. Lo Savio R., Repetto L., Guida P., Angeli E., Firpo G., Volpe A., Ierardi V., Valbusa U. // Solid State Commun. 2016. V. 240. P. 41 – 45. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2016.04.023>
5. Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Раббимов Э. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 4. С. 38. DOI: 10.7868/S0207352815040083
6. Эргашов Ё.С., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017, № 4, с. 104. DOI: 10.7868/S0207352817040084