

10;11

Формирование волнообразных наноструктур на пленках аморфного кремния распылением ионами азота

© И.В. Журавлев, Д.С. Кибалов, Г.Ф. Смирнова, В.К. Смирнов

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль
E-mail: IBTec@rambler.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2003 г.

Получены зависимости длины волны и глубины формирования волнообразной наноструктуры, образуемой распылением ионами азота, от угла бомбардировки и энергии ионов для монокристаллического кремния и пленок аморфного кремния, изготовленных различными методами. При помощи двумерного преобразования Фурье проведен сравнительный анализ изображений волнообразной наноструктуры. Установлено, что пленки аморфного кремния, осажденные электронно-лучевым испарением и магнетронным распылением кремния, наиболее близки по свойствам к кристаллическому кремнию в отношении формирования наноструктуры.

Наклонная ионная бомбардировка различных материалов может приводить к самоформированию на их поверхности волнообразного рельефа или волнообразной наноструктуры. Волны ориентируются перпендикулярно направлению ионной бомбардировки. Впервые волнообразный рельеф на поверхности твердого тела наблюдался при облучении стекла ионами газовой смеси воздуха, основу которых составляли ионы азота [1]. Среди систем ион-полупроводник система N_2^+-Si отличается планарностью, минимально достижимым периодом λ до 20 nm, малыми глубинами формирования D_F и постоянством длины волны и амплитуды структуры при ионном распылении до глубин, превышающих D_F [2]. Изучение формирования волнообразных наноструктур на поверхности слоев аморфного кремния ($a-Si$) в сравнении с монокристаллическим кремнием ($c-Si$) актуально, так как замена $c-Si$ на $a-Si$ может существенно расширить область применения данных наноструктур.

Свойства пленок аморфного кремния и волнообразных наноструктур

	D, nm	$T, ^\circ\text{C}$	D_m, nm	D_F, nm	λ, nm	$\Delta\lambda, \text{nm}$	$\lambda/\Delta\lambda$
<i>c</i> -Si			125	205	122	87	1.40
<i>a</i> -Si _E	480	35	120	160	131	90	1.46
<i>a</i> -Si _M	270	120	130	185	128	80	1.59
<i>a</i> -Si _V	400	560	110	160	131	110	1.19
<i>a</i> -Si:H	380	220	40	110	152	175	0.87

В настоящей работе исследовались слои аморфного кремния, полученные известными методами [3]: магнетронным распылением кремниевой мишени (*a*-Si_M); электронно-лучевым испарением кремния (*a*-Si_E); химическим осаждением из газовой фазы при низком давлении (*a*-Si_V); осаждением из низкочастотного разряда силана (*a*-Si:H). Толщины слоев *a*-Si (D) и температуры подложки (термически окисленного *c*-Si) приведены в таблице. Режимы осаждения пленок *a*-Si_M и *a*-Si:H приведены в [4,5].

Формирование наноструктур на поверхности образцов проводилось в камере высоковакуумной установки, оснащенной ионной пушкой с источником типа дуоплазмотрон.

Процесс образования наноструктуры во времени характеризуется глубинами распыления, отвечающими появлению малоамплитудного рельефа с углами наклона склонов волн относительно плоскости исходной поверхности около 5° — глубина D_m и формированию стабилизированного рельефа с насыщенной амплитудой и углами наклона склонов волн около 30° — глубина D_F . В настоящей работе морфология поверхности до и после ионной бомбардировки исследовалась при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ). Двумерное преобразование Фурье РЭМ-изображений наноструктур позволяло получать наиболее вероятные значения длины волны λ и ширины распределения $\Delta\lambda$, отвечающей половине высоты максимума распределения (ширина на полувысоте).

Результаты измерений D_m и D_F , λ и $\Delta\lambda$ сведены в таблицу. Данные таблицы соответствуют наноструктурам, сформированным при энергии ионов $N_2^+ E = 8 \text{ keV}$ и угле падения ионов $\theta = 45^\circ$ относительно нормали к поверхности. Значения λ и $\Delta\lambda$ получены для наноструктур,

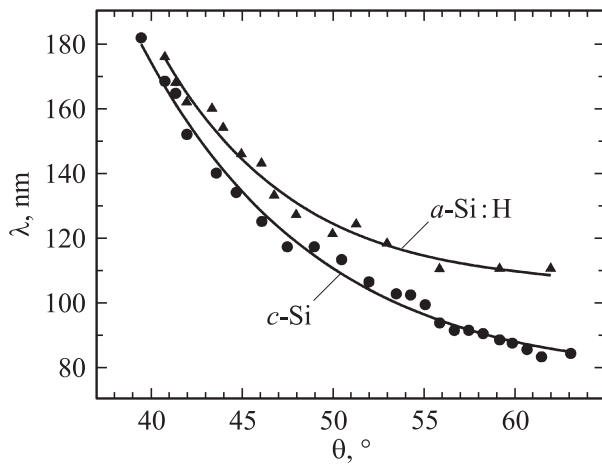


Рис. 1. Зависимости периода наноструктуры от угла ионной бомбардировки.

сформированных на глубинах D_F . Отношение $\lambda/\Delta\lambda$ коррелирует со степенью упорядоченности наноструктур на РЭМ-изображениях.

Из таблицы видно, что слои $a\text{-Si}_E$ и $a\text{-Si}_M$ наиболее близки к $c\text{-Si}$ в отношении формирования наноструктуры, а слой $a\text{-Si:H}$, напротив, наиболее отличается от $c\text{-Si}$ и характеризуется наибольшим ускорением процесса формирования наноструктуры.

На динамику процесса формирования наноструктуры влияет исходная топография поверхности материала до момента ионной бомбардировки [6], что нашло отражение в значениях D_m и D_F пленок $a\text{-Si}$. Анализ РЭМ-изображений исходной поверхности выявил следующие особенности морфологии образцов. На поверхности $a\text{-Si}_M$ обнаружены отдельные неоднородности диаметром около 100 nm с расстоянием между ними более 10 μm . Для поверхности $a\text{-Si}_E$ характерно наличие топографических неоднородностей с размером 20–30 nm. Исследование сколов образцов в РЭМ показало, что высота этих неоднородностей 2–3 nm. Близкая топография поверхности характерна и для $a\text{-Si}_V$. В случае $a\text{-Si:H}$ были выявлены еще большие неоднородности сферической формы диаметром 10–200 nm и высотой 3–100 nm.

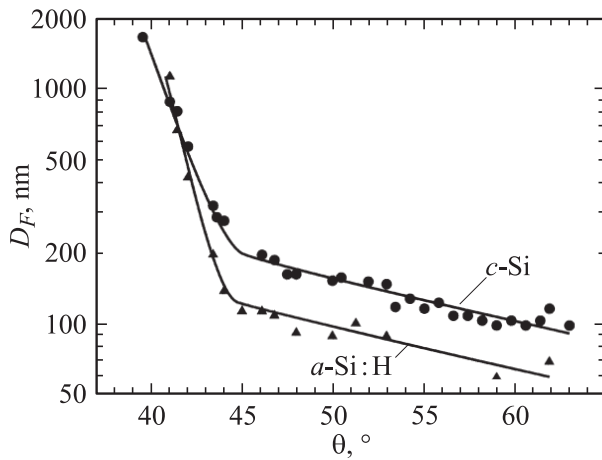


Рис. 2. Зависимости глубины формирования наноструктуры от угла ионной бомбардировки.

Угловые зависимости λ и D_F для *c*-Si и *a*-Si:H, как наиболее отличающихся по свойствам в отношении формирования наноструктуры, приведены на рис. 1, 2 для энергии ионов $E = 8$ keV. Видно, что поведение зависимостей аналогичное. Максимальные превышения значений λ для *a*-Si:H — 30%, а понижения D_F — 50%. При $E = 3-9$ keV, $\theta = 45^\circ$ зависимости λ от E линейны: для *a*-Si:H $\lambda(\text{nm}) = 14.6E(\text{keV}) + 28.7$, для *c*-Si $\lambda(\text{nm}) = 14.1E(\text{keV}) + 16.9$.

Таким образом, на пленках аморфного кремния, полученных магнетронным распылением и электронно-лучевым испарением кремния, могут формироваться волнообразные наноструктуры без потери их качества в сравнении с монокристаллическим кремнием. Определенная степень шероховатости пленок ускоряет процесс формирования наноструктур, не снижая их качества.

Авторы выражают благодарность П.А. Лепшину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена в рамках договора № 1-2002/7И между Институтом микроэлектроники и информатики РАН и ООО „Агентство маркетинга научных разработок“.

Список литературы

- [1] *Navez M., Sella C., Chaperot D.* // C.R. Acad. Sci. Paris. 1962. V. 254. P. 240–244.
- [2] *Smirnov V.K., Kibalov D.S., Krivelevich S.A.* et al. // Nucl. Instrum. Methods B. 1999. V. 147. P. 310–315.
- [3] *Ed. by Sze S.M.* VLSI Technology. McGraw Hill. New York, 1983. 654 p.
- [4] *Бочкарев В.Ф., Наумов В.В., Трушин О.С.* и др. // Труды ФТИАН. 1995. Т. 9. С. 25–30.
- [5] *Budaguan B.G., Sherchenkov A.A., Stryahilev D.A.* et al. // J. Electrochem. Soc. 1998. V. 145. P. 2508–2512.
- [6] *Смирнов В.К., Кибалов Д.С., Лепшин П.А.* и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2000. Т. 64. № 4. С. 626–630.