

УДК 539.216.2

А.П. Авачёв, С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, К.В. Митрофанов, И.Г. Уточкин**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНОК a-Si:H
С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА**

Предложена методика расчета концентрации поверхностных и объемных состояний и плотности локализованных состояний в пленках аморфного гидрогенизированного кремния по результатам измерения поверхностного потенциала средствами атомно-силовой микроскопии. Показана корреляция микроструктурных параметров (средний диаметр и высота кластеров), определенных средствами атомно-силового микроскопа (АСМ) с электрофизическими параметрами, рассчитанными по предложенной методике.

Введение. За последние годы неупорядоченные полупроводниковые материалы, благодаря своим уникальным свойствам, стали базой многих устройств твердотельной электроники. Наиболее перспективным среди материалов является аморфный гидрогенизированный кремний (*a-Si:H*). Основное преимущество данного материала по сравнению с монокристаллическим кремнием связано с большим значением величины фотопоглощения и фоточувствительности.

Однако для широкого применения неупорядоченных полупроводников необходимо решение ряда проблем, среди которых наиболее важной является высокая чувствительность структуры и, как следствие, электрофизических свойств материала к технологическим условиям получения, что приводит к слабой воспроизводимости характеристик получаемых слоев пленок *a-Si:H*. Отсутствуют способы описания взаимосвязи между структурой, электрофизическими, физико-химическими свойствами материалов и условиями их роста. Прежде всего это относится к различным структурным неоднородностям, которые оказывают решающее влияние на стабильность характеристик приборов на основе *a-Si:H* [1].

Целью данной работы является установление взаимосвязей между структурой поверхности, технологией получения и электрофизическими свойствами пленок на основе *a-Si:H* для расширения представлений о физических процессах в неупорядоченных полупроводниках.

На сегодняшний день появились новые методы исследования свойств поверхности, и в частности, распределения поверхностных потенциалов и электрических полей, основанные на использовании атомно-силовой и туннельной микроскопии. Развитие таких методов дает воз-

можность определять электрофизические параметры микро- и наноструктур как по площади сканирования, так и по глубине электрически активных областей. Это определяет превосходство зондовых методов над электронной и растровой сканирующей микроскопией [2].

Общие положения. Свойства поверхности во многом определяют общие электрофизические свойства материала. Поверхностные состояния играют важную роль в *a-Si:H* и связаны с фиксированным зарядом, который может быть встроен в поверхность и обуславливает сильный изгиб зон. Заряд может создаваться, например, адсорбированными ионами газов, например кислорода или азота.

Присутствие на поверхности неупорядоченного материала поверхностных состояний приводит к локализации на них свободных носителей. Поверхность полупроводника благодаря этому приобретает электрический заряд Q_{ss} , который обычно принимается локализованным в плоскости поверхности. В силу электронейтральности в целом этот поверхностный заряд в условиях равновесия экранируется слоем пространственного заряда, простирающегося в глубину на дебаевскую длину экранирования L_D . Пространственный заряд Q_{sc} складывается из заряда ионизированных акцептороподобных и донороподобных состояний и заряда подвижных носителей, концентрация которых в условиях равновесия отлична от объемной концентрации. Появление заряда на поверхности приводит к изгибу энергетических зон в неупорядоченном полупроводнике относительно уровня Ферми [3].

Одна из главных задач исследователей, изучающих *a-Si:H*, состоит в снижении концентрации глубоких дефектов и мелких состояний в

хвостах зон, а также получении пленок из a-Si и его сплавов с улучшенными кинетическими свойствами. К таким улучшениям должны привести, с одной стороны, исследования микроструктурных особенностей a-Si:H и разработка новых технологических методов приготовления образцов, а с другой – развитие методов определения плотности состояний в аморфном полупроводнике [4].

Электрофизические параметры пленок a-Si:H во многом определяются особенностями микроструктуры аморфного материала, называемой морфологией. К таким особенностям морфологии относится столбчатая структура материала, наличие проколов, топология поверхности. Наличие хорошо различимой текстуры говорит о присутствии границ раздела внутри материала. На границах, как известно, микроструктура искажается, что оказывает влияние на электронные свойства материала.

Влияние микроструктуры и морфологии на электрофизические свойства неупорядоченных полупроводников представляет очень важное практическое значение и остается до сих пор не достаточно изученным, чтобы точно связывать морфологию поверхности получаемых пленок и их электрофизические параметры.

Для изучения влияния технологических режимов получения нелегированного a-Si:H на его структурные и электрофизические свойства исследовались пленки, осажденные на подложках следующих типов:

– стеклянные подложки марки «Corning Glass 7059» размером 15×15 мм и толщиной 1,2 мм (пластины-спутники) для исследования микроструктуры пленок a-Si:H посредством атомно-силового микроскопа (АСМ);

– стеклянные подложки марки «Corning Glass 7059» размером 15×15 мм и толщиной 1,2 мм, покрытые пленкой прозрачного проводящего окисла TCO (Transparent Conductive Oxide), фирмы «Asahi» (Япония), толщиной 0,5 мкм для измерений электрофизических свойств методом зонда Кельвина, а также микроструктуры методами АСМ.

Пленки a-Si:H были получены низкочастотным (55 кГц) плазмохимическим методом (НЧ ПХО). Технология осаждения пленок a-Si:H рассмотрена в [5]. Пленки получали при разной температуре подложки T_s от 40 до 325 °С, давлении в реакторе от 132 до 252 Па, времени осаждения на подложку от 2 до 30 мин. Мощность разряда и расход газа силана поддерживались постоянными и составляли 200 Вт и 200 см³/мин соответственно.

На рисунке 1 приведено типичное изображение микрорельефа участка (5×5 мкм) поверхности пленки a-Si:H (а) (при $T=250$ °С, $P=220$ Па, $d_{пл} = 710$ нм), полученное на АСМ, и соответствующее ему распределение потенциалов на поверхности (б), полученное методом зонда Кельвина. В методе зонда Кельвина [2] для измерения поверхностных потенциалов второй проход осуществлялся на расстоянии 70 нм ($Z = 70$ нм). Измерения проходили в полуконтактном режиме, при этом использовался кантилевер средней жесткости ($k_z \approx 11,5$ Н/м) радиусом кривизны зонда $r \approx 20$ нм с проводящим покрытием W_2C и резонансной частотой $f_R \approx 230$ кГц.

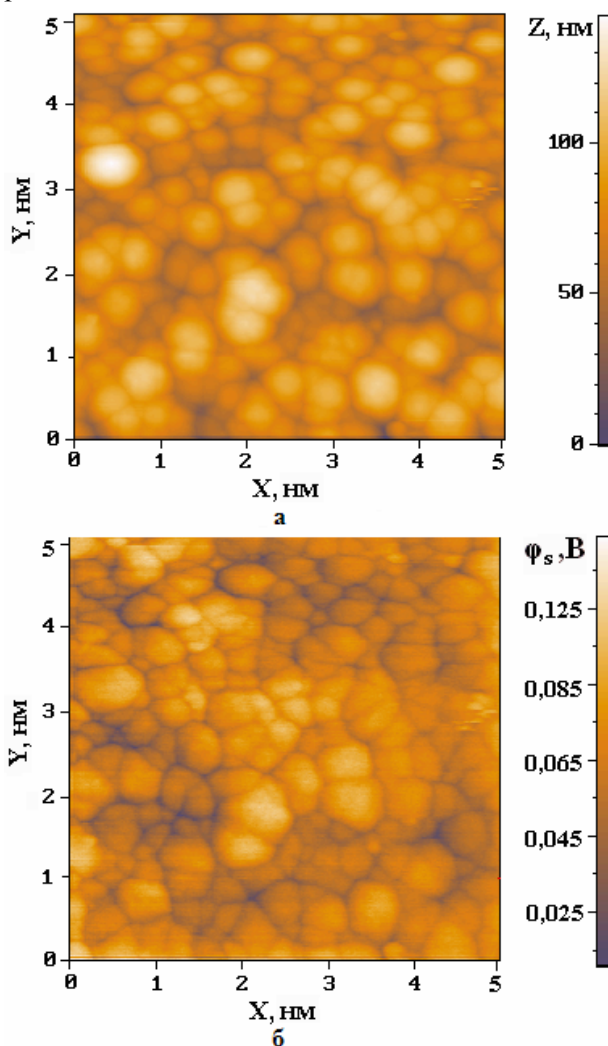


Рисунок 1 – Микрорельеф участка (5×5 мкм) поверхности пленки a-Si:H (а) и соответствующее распределение потенциалов (б)

Для определения корреляций между микроструктурой и электрофизическими свойствами пленок a-Si:H была разработана методика определения концентрации и плотности электрически активных локализованных состояний на равновесном уровне Ферми неупорядоченного полупроводника. Методика заключается в расче-

те этих величин на основе распределения поверхностного потенциала, полученного с помощью АСМ. Контактные действия проводящего кантилевера в методе зонда Кельвина можно рассматривать с позиции зонных диаграмм для системы металл/диэлектрик/полупроводник [6]. На рисунке 2 представлена энергетическая диаграмма контакта металл (электропроводящий зонд кантилевера) – a-Si:H при наличии промежуточного диэлектрического слоя (воздушная прослойка).

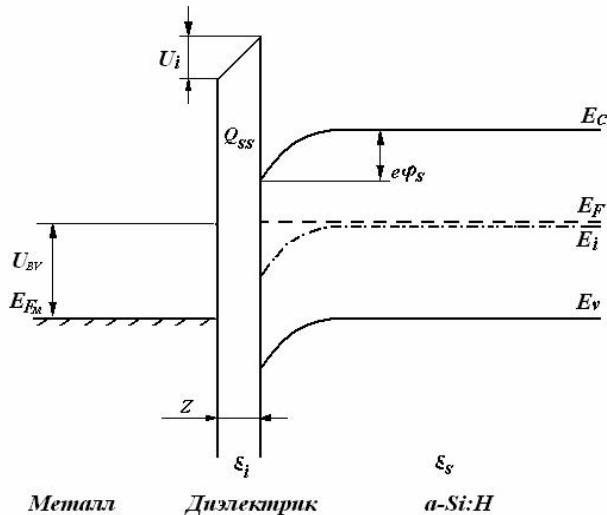


Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма контакта металл/диэлектрик/a-Si:H. U_{BV} – постоянное напряжение, прикладываемое к образцу; U_i – падение потенциала на промежуточном слое; ϕ_s – поверхностный потенциал; Z – толщина промежуточного слоя (расстояние от образца, на котором зонд осуществляет второй проход); Q_{ss} – заряд поверхностных состояний a-Si:H

Заряд на поверхности a-Si:H можно определить как: $Q_{ss} = -C_i \cdot U_i$, падение напряжения на промежуточном слое кантилевер – образец: $U_i = U_{BV} - U_{FB} - \phi_s$, где U_{BV} – постоянное напряжение смещения, прикладываемое к системе Me/a-Si:H, U_{FB} – напряжение плоских зон и ϕ_s – поверхностный потенциал в пленке a-Si:H. Для заряда можно записать: $Q_{ss} = -C_i \cdot (U_{BV} - U_{FB} - \phi_s)$.

Используя закон Гаусса и решая уравнение Пуассона, получаем выражение для расчета плотности локализованных состояний на равновесном уровне Ферми g_{F0} [6]:

$$g_{F0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i^2}{q \epsilon_s} \left(\frac{U_{BV} - U_{FB} - \phi_s}{\phi_s Z} \right)^2 \quad (1)$$

Результаты и обсуждение. С помощью программы по обработке данных и управления микроскопом были определены следующие топологические параметры исследуемых поверхностей: шероховатость (S_a); средняя высота и

диаметр островков (Z_{mean} , D_{mean}), толщина пленки ($d_{пл}$). Плотность электрически активных локализованных состояний на равновесном уровне Ферми полупроводника определялась по разработанной методике.

Исследования микрорельефа поверхностей используемых подложек, показали, что шероховатость поверхности стекла составляет 5-7 нм, шероховатость поверхности проводящего слоя TCO – 18-20 нм.

Анализ топографий пленок a-Si:H, полученных при различных температурах подложек (от 40 до 325 °C), показал, что основные структурные параметры (шероховатость, средний диаметр и высота кластеров) остаются постоянными (рисунок 3, таблица 1).

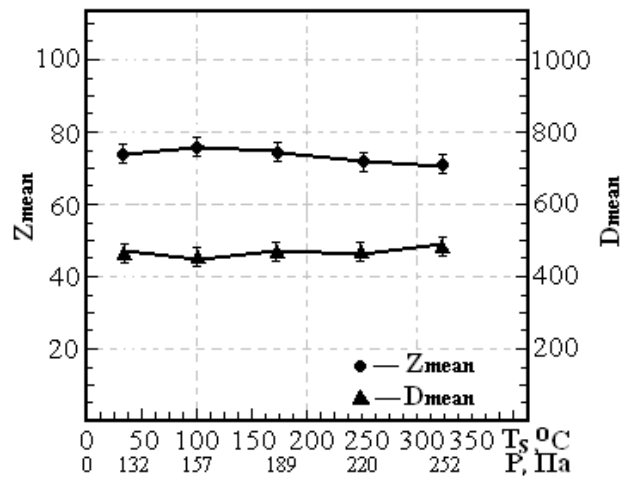


Рисунок 3 – Зависимость диаметра D_{mean} и высоты Z_{mean} островков на пленках a-Si:H от температуры подложки и давления SiH_4 в реакторе

Для пленок a-Si:H, осажденных на стеклянные подложки с проводящим слоем TCO при разном времени осаждения, было обнаружено, что при увеличении времени осаждения от 2 до 30 мин средний диаметр островков увеличивается с 222 до 510 нм, а средняя высота уменьшается со 112 нм до 61 нм (рисунок 4, А).

В пленках, выращенных на стекле, средний диаметр и высота островков увеличиваются со 155 до 823 нм и с 67 до 110 нм соответственно (рисунок 4, Б). Сравнение поверхностей пленок, осажденных на подложки с проводящим слоем (0,5 мкм) и без него, показывает, что структура подложки влияет на формирование структуры пленок лишь на начальной стадии роста при толщине пленок порядка 200-300 нм. При больших толщинах различия в микрорельефе пленок незначительны [7].

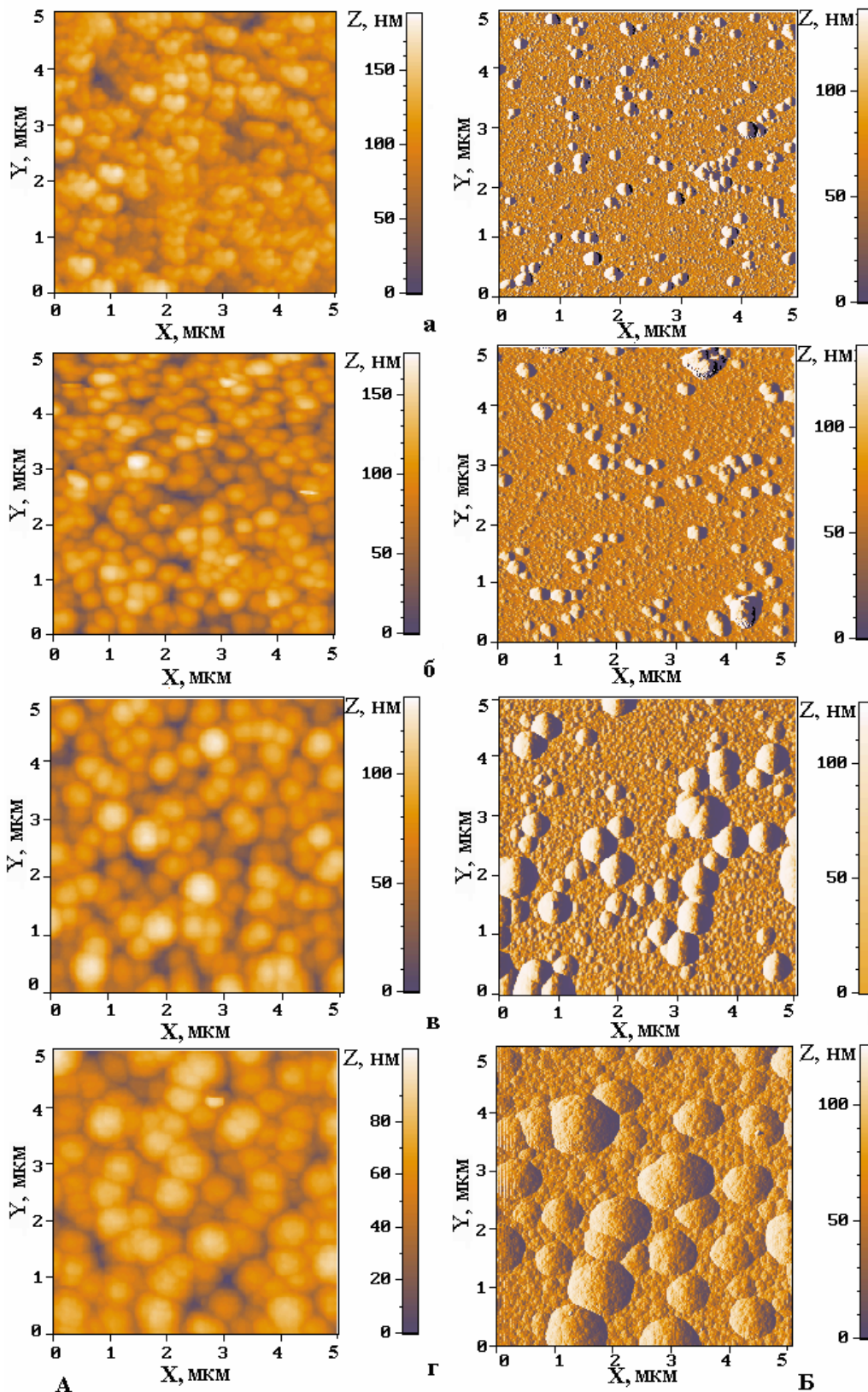


Рисунок 4 – Микрорельеф поверхности участков 5×5 мкм пленок a-Si:H при $T_s = 250$ °C, $P = 220$ Па, и различном времени осаждения t_{oc} :

А – на стеклянных подложках с проводящим слоем, Б – на стеклянных подложках без проводящего слоя:
 а – $t_{oc} = 2$ мин; б – $t_{oc} = 5$ мин; в – $t_{oc} = 12$ мин; г – $t_{oc} = 30$ мин

Анализ микрорельефа стеклянной подложки без проводящего слоя выявил большое количе-

ство неровностей (островков), являющихся центрами зародышеобразования. В результате на

пленках, выращенных на подложках этого типа, присутствуют островки большого (600-800 нм) и малого (50-80 нм) размеров. Островки больших размеров в большей степени вызваны влиянием характера подложки (рисунок 4, Б).

Диаметр и высота островков коррелируют с изменением скорости роста нелегированных пленок a-Si:H. На рисунке 5 показана зависимость D_{mean} и Z_{mean} от скорости осаждения, из которой следует уменьшение D_{mean} и увеличение Z_{mean} с ростом скорости осаждения. В свою очередь, скорость роста пленок V_{oc} уменьшается с увеличением времени осаждения t_{oc} , а толщина пленки $d_{пл.}$ растет (рисунок 6, таблица 2).

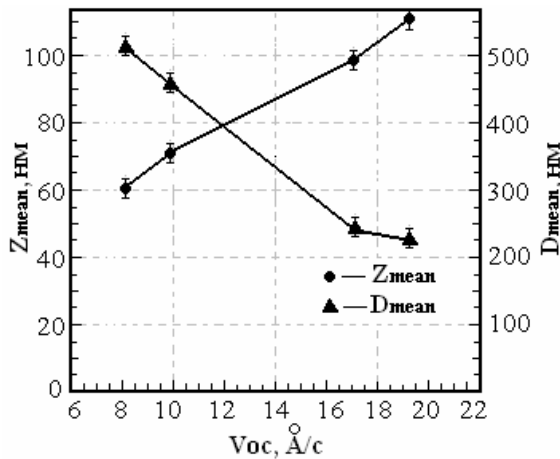


Рисунок 5 – Зависимость диаметра D_{mean} и высоты Z_{mean} островков на пленках a-Si:H от скорости осаждения

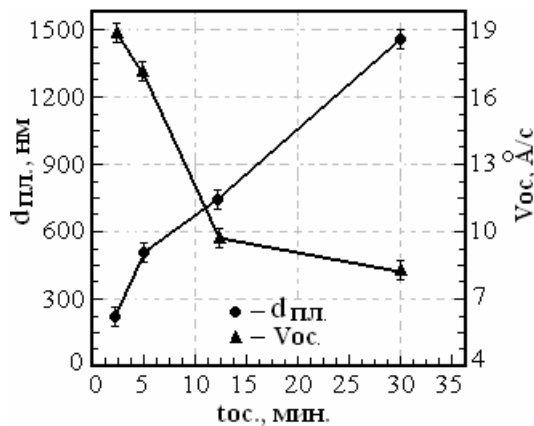


Рисунок 6 – Зависимость толщины пленки a-Si:H $d_{пл.}$ и скорости осаждения V_{oc} от времени осаждения t_{oc}

При увеличении времени осаждения пленки с 2 до 12 мин скорость осаждения уменьшается с 18 до 10 Å/c. Дальнейшее увеличение времени с 12 до 30 мин вызывает снижение скорости осаждения с 10 до 8 Å/c, что может свидетельствовать о смене механизма роста пленок a-Si:H при $t_{oc} > 12$ мин [5].

В таблице 1 сведены структурные параметры образцов a-Si:H, полученных при разных температурах и давлениях на стеклянных подложках «Corning Glass 7059» со слоем прозрачного проводящего окисла TCO.

Таблица 1 – Структурные параметры образцов a-Si:H: Мощность разряда - 200 Вт, время осаждения - 12 мин, расход SiH₄ - 200 см³/мин

№	T_s , °C	P , Па	$d_{пл.}$, нм	V_{oc} , Å/c	ϕ_s^* , В	g_{Fo} , см ⁻³ ·эВ ⁻¹	S_a , нм	Z_{mean} , нм	D_{mean} , нм
1	40	132	663	9,2	0,84	$8,83 \cdot 10^{16}$	17	74	460
2	100	157	678	9,4	0,58	$1,74 \cdot 10^{17}$	17	76	457
3	175	189	652	9,1	0,55	$1,61 \cdot 10^{17}$	17	74	462
4	250	220	710	9,9	0,46	$5,38 \cdot 10^{16}$	17	72	461
5	325	252	717	10	0,63	$5,87 \cdot 10^{16}$	17	71	469

* $U_{BV}=6$ В

Из таблицы 1 следует, что при увеличении температуры подложки структурные параметры (средний диаметр и высота кластеров) остаются постоянными, но электрофизические параметры изменяются: поверхностный потенциал изменяется от 0,55 до 0,84 В, плотность локализованных состояний изменяется от $5,38 \cdot 10^{16}$ до $1,74 \cdot 10^{17}$ см⁻³·эВ⁻¹. Для пленок, осажденных при температуре подложки $T=250^\circ\text{C}$ и давлении в камере $P=220$ Па, наблюдаются минимальная величина поверхностного потенциала (0,46 В) и минимальная величина плотности локализованных состояний на равновесном уровне Ферми ($5,38 \cdot 10^{16}$ см⁻³·эВ⁻¹).

Измеренные структурные параметры образцов a-Si:H, полученных при разных временах осаждения на стеклянных подложках «Corning Glass 7059» со слоем TCO, сведены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что толщине пленки 710 нм соответствуют значение поверхностного потенциала (0,46 В) и минимальное значение плотности локализованных состояний ($5,38 \cdot 10^{16}$ см⁻³).

Таблица 2 – Структурные параметры образцов а-Si:H, полученные при разных временах осаждения: мощность разряда - 200 Вт, температура подложки - 250 °С, давление - 220 Па

№	$t_{ос}$ мин	$d_{пл}$ нм	$V_{ос}$ Å/с	φ_{s}^* В	g_{Fos} см ⁻³ ·эВ ⁻¹	S_{as} нм	Z_{mean} нм	D_{mean} нм
1	2	225	18,7	0,42	$1,75 \cdot 10^{17}$	19	112	222
2	5	517	17,2	0,48	$3,27 \cdot 10^{17}$	19	98	244
3	12	710	9,9	0,46	$5,38 \cdot 10^{16}$	17	72	461
4	30	1470	8,2	0,55	$5,41 \cdot 10^{16}$	13	61	510

* $U_{BI}=6$ В

Заключение. В ходе проведенных исследований взаимосвязи топологических и электрофизических характеристик пленок аморфного гидрированного кремния получены следующие результаты:

– для исследуемых структур пленок а-Si:H, полученных методом НЧ ПХО при различных режимах осаждения, характеризующихся температурой подложек от 40 до 325 °С и давлением газов в камере от 132 до 252 Па, микроструктура (шероховатость, средняя высота и диаметр островков) остается неизменной, а электрофизические свойства изменяются (плотность локализованных состояний на равновесном уровне Ферми уменьшается в среднем с $1,7 \cdot 10^{17}$ до $5,38 \cdot 10^{16}$ см⁻³·эВ⁻¹, поверхностный потенциал изменяется от 0,84 до 0,46 В);

– для пленок а-Si:H, полученных при временах осаждения от 2 до 30 мин на подложках с проводящим слоем, средний диаметр островков изменяется с 222 до 510 нм, а средняя высота уменьшается с 112 нм до 61 нм. В пленках, выращенных на стекле, диаметр и высота островков увеличиваются с 155 до 823 нм и с 67 до 110 нм соответственно. При этом плотность локали-

зованных состояний на равновесном уровне Ферми уменьшается с $1,75 \cdot 10^{17}$ до $5,38 \cdot 10^{16}$ см⁻³·эВ⁻¹.

Работа выполняется при поддержке Федерального агентства по образованию.

Библиографический список

1. Неупорядоченные полупроводники: учебное пособие / А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С. П. Вихров, А.И. Попов; Под ред А.А. Айвазова. – М.: Издательство МЭИ, 1995. – 352 с.

2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. – 114 с.

3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Вышш. шк., 1987. – 239 с.

4. Авачёв А.П., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Митрофанов К.В., Уточкин И.Г. Методика исследования плотности локализованных электрически активных состояний в тонких пленках неупорядоченных полупроводников с помощью атомно-силовой микроскопии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. Вып. 19. С. 130-133.

5. Айвазов А.А., Бердников А.Е., Будагян Б.Г., Мейтин М.Н., Стряхилев Д.А. и др. Перспективный метод получения аморфного кремния / Известия ВУЗов, серия “Электроника”. 1997. Вып. 2. С. 44-48.

6. Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Вихров С.П., Мишустин В.Г., Митрофанов К.В., Уточкин И.Г., Попов А.А. Измерение поверхностного и объемного зарядов в микро- и наноразмерных структурах на неупорядоченных полупроводниках // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V международной конференции. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. – С. 233-234.

7. Уточкин И.Г., Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Попов А.А. Исследование неупорядоченных полупроводников методом атомно-силовой микроскопии // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV международной конференции. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. – С. 323-324.