

6. Chang, B.-Y. Evaluation of Pt/In₂O₃–WO₃ nanopowder ultra-trace level NO gas sensor / B.-Y. Chang [at al.] // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2014. – Vol. 45, Issue 3. – P. 1056 – 1064.
7. Гайдук, Ю.С. Физико-химические свойства оксидной композиции WO₃—Co₃O₄, полученной золь-гель методом. / Ю.С. Гайдук [и др.] // Весці НАНБ. Серыя хімічных навук 2015 г., № 2, с. 9–13.

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПЛАТИНОВОГО ЭЛЕКТРОДА НА КРЕМНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Д. А. Голосов¹, Д. Э. Окоджи¹, А. С. Руденков², С. М. Завадский¹,
С. Н. Мельников¹, В. В. Колос³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
dmgolosov@gmail.com

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³ОАО «Интеграл»

В последние годы наметился резкий рост исследований, направленных на разработку сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти с произвольным доступом (*Ferroelectric Random Access non-volatile Memory* или *FeRAM*) [1]. В качестве наиболее вероятных сегнетоэлектрических материалов FeRAM в настоящее время рассматриваются соединения на основе цирконата-титаната свинца (PZT) с общей формулой Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ и танталата стронция-висмута (SBT) с формулой SrBi₂Ta₂O₉. В процессе производства FeRAM для формирования сегнетоэлектрической фазы пленку сегнетоэлектрика со структурой нижнего электрода необходимо отжигать в кислородосодержащей среде при высокой температуре. Температура формирования сегнетоэлектрической фазы для PZT составляет 550–650 °С [2] и 720–780 °С для SBT [3]. При этом материалы нижнего электрода должны выдерживать, по крайней мере, однократный высокотемпературный отжиг без изменения свойств. Это существенно ограничивает число материалов, обеспечивающих технологическую и физико-химическую совместимость. В качестве материала электродов сегнетоэлектрической ячейки памяти на данный момент рассматривается платина. При отжиге в кислородосодержащей среде платина показывает высокую термическую и химическую стабильность, на поверхности платины не возникает каких-либо переходных слоев, что обеспечивает хороший электрический контакт с другими материалами. Одним из главных недостатков применения платины является проблема, связанная с морфологией поверхности. При высокотемпературной обработке пленок платины происходит их рекристаллизация, которая проявляется в виде увеличения шероховатости поверхности пленки и роста локальных образований в виде холмиков [4]. Таким образом, целью работы была исследование возможности использования структур Pt/Ti/Si для формирования нижнего электрода ячеек памяти FeRAM.

Для формирования структур Pt электрода использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) *p*-типа проводимости Ø 150 мм. Адгезионный слой Ti толщиной 100 нм наносился методом DC магнетронного распыления при следующих режимах: мощность разряда 1.0 кВт, напряжение разряда 470 В, ток разряда 2,6 А. Пленки Pt толщиной 150 нм наносились методом DC магнетронного распыления при следующих режимах: напряжение разряда 450 В, ток разряда 1.0 А. Для ана-

лиза процессов деградации платинового электрода при повышенных температурах, структуры Pt электрода были подвергнуты термообработке в установке ИК нагрева «Изоприн» в атмосфере O_2 . Температура и время отжига изменялись в диапазоне 300–600 °C и 5–120 мин соответственно. Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Морфология поверхности пленок исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) с использованием атомного силового микроскопа Solver-P47 PRO NT MDT. На полученных изображениях поверхности с помощью специального программного обеспечения анализировались плотность, размер и высота формирующихся неровностей (шипов).

На рис. 1 представлены АСМ изображения поверхности структур Pt/Ti/Si, подвергнутых термообработке в атмосфере O_2 (время отжига 20 мин). Непосредственно после нанесения высота неровностей на поверхности Pt не превышала 10 нм (рис. 1 а). Процессы кристаллизации Pt пленок и формирование на поверхности шипов отмечены при температуре отжига более 300 °C (рис. 1 б).

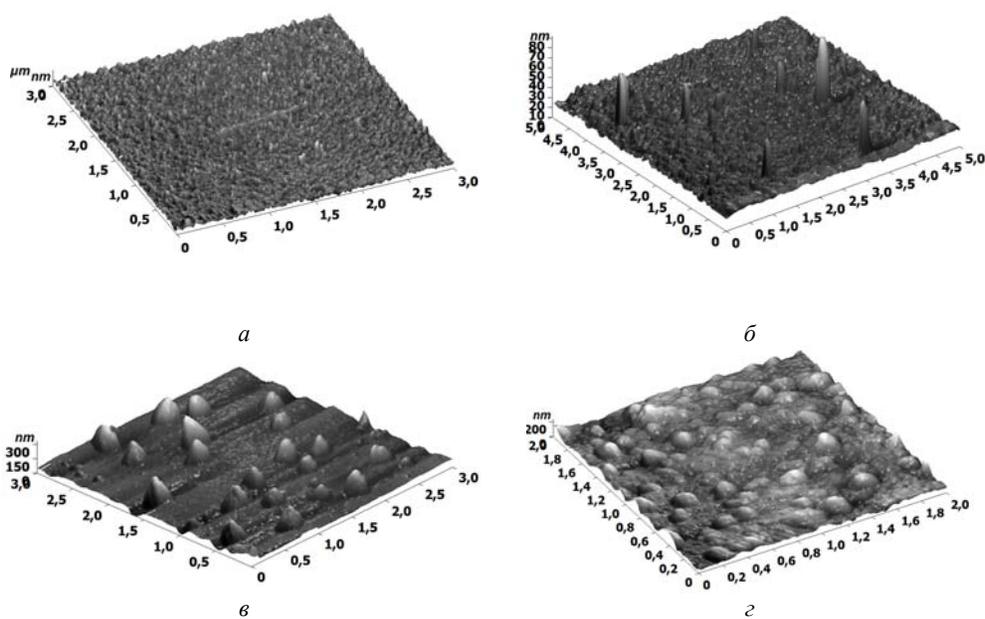


Рисунок 1. – АСМ изображение поверхности структуры Pt/Ti/Si до отжига (а) и после отжига в атмосфере O_2 при различной температуре: б – 400 °C, в – 460 °C, г – 600 °C (время отжига 20 мин)

При температуре 400 °C высота шипов достигала 70 нм. Дальнейшее увеличение температуры приводило к росту высоты шипов и увеличению их плотности (рис. 1 в, г). Также отмечался рост размера кристаллитов. При температуры отжига 460 °C высота шипов достигала 280 нм. Увеличение температуры отжига до 600 °C вело к дальнейшему росту кристаллитов и формированию сплошной шероховатой поверхности с высотой неровностей порядка 200 нм (рис. 1 д). При температурах более 600 °C платина и адгезионный слой титана начинали активно взаимодействовать с кремнием с образованием силицидов кремния. Это приводило к резкому снижению элект-

трической проводимости и разрушению платинового электрода. Увеличение высоты и плотности шипов также наблюдалось при увеличении времени отжига. На рис. 2, 3 представлены зависимости высоты и плотности шипов от времени и температуры отжига для структуры Pt/Ti/Si. Как видно, основными факторами, которые влияли на высоту и плотность шипов являлись время и температура отжига. Высота и плотность шипов увеличивалась практически пропорционально росту температуры и времени отжига. При высоких температурах и длительном отжиге высота шипов могла практически в два раза превышать толщину исходной платиновой пленки.

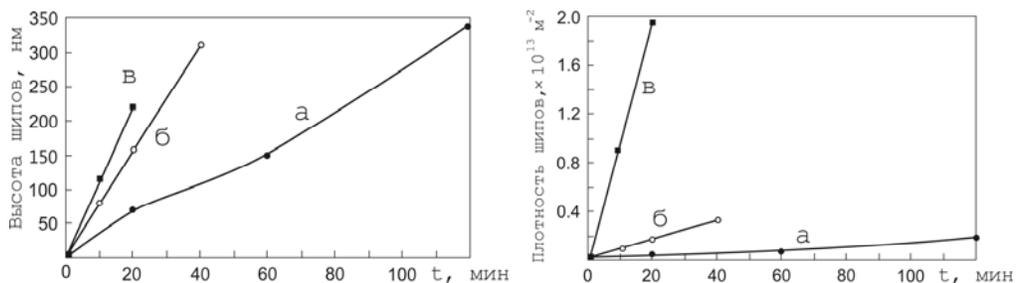


Рисунок 2. – Зависимость высоты и плотности шипов на поверхности структуры Pt/Ti/Si от времени отжига при различной температуре отжига: а – 400 °С, б – 460 °С, в – 600 °С

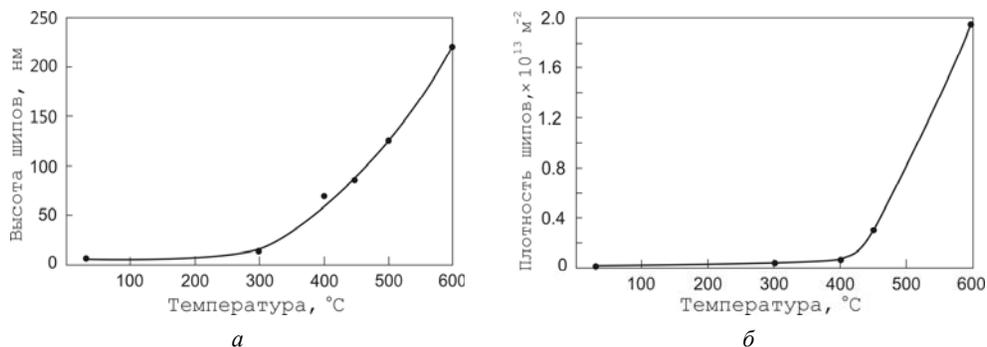


Рисунок 3. – Зависимость высоты (а) и плотности (б) шипов на поверхности структуры Pt/Ti/Si от температуры отжига. Время отжига 20 мин

Таким образом, максимальная температура отжига структур Pt/Ti/Si в атмосфере кислорода не превышает 600 °С. Сильный рост шипов и разрушение пленки при температурах более 600 °С не позволяет использовать данную структуру даже для нанесения PZT пленок, типичная температура отжига которых составляет 550–650 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Takashi, Eshita, Wensheng Wang, Kou Nakamura, Souichirou Ozawa, Youichi Okita, Satoru Mihara, Yukinobu Hikosaka, Hitoshi Saito, Junichi Watanabe, Ken'ichi Inoue, Hideshi Yamaguchi, Kenji Nomura / Development of ferroelectric RAM (FRAM) for mass production // Journal of Physical Science and Application. – 2015. – Vol. 5. – p. 29–32.

2. In-Ho Im, Kwang-Hyun Chung, Duk-Hyun Kim / Dependence of annealing temperature on properties of PZT thin film deposited onto SGGG substrate // Transactions On Electrical And Electronic Materials. – 2014. – Vol. 15, № 5. – p. 253–256.
3. Golosov D.A., Zavadski S.M., Kolos V.V., Turtsevich A.S. Ferroelectric properties of niobium-doped strontium bismuth tantalate films // Physics of the Solid State. – 2016. – Vol. 58, № 1. – p. 50–54.
4. Mardare C.C., Joanni E., Mardare A.I., Fernandes J.R.A., De Sá C.P.M., Tavares P.B. Effects of adhesion layer (Ti or Zr) and Pt deposition temperature on the properties of PZT thin films deposited by RF magnetron sputtering // Appl. Surf. Sci. – 2005. – Vol. 243. – p. 113124.

ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ ЭРБИЕМ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $TlInS_2$

В. Г. Гуртовой, А. У. Шелег

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь, hurtavy@physics.by

Проведены исследования диэлектрической проницаемости (ϵ) и электропроводности (σ) кристаллов $TlIn_{1-x}Er_xS_2$ в зависимости от температуры и состава. Выявлена дисперсия изученных свойств – с ростом частоты значения ϵ уменьшаются, а σ – увеличиваются. Показано, что с ростом температуры значения ϵ и σ увеличиваются. Обнаружено проявление последовательности фазовых переходов парафаза – несо-размерная фаза – соразмерная фаза в этих кристаллах. Установлено, что допирование $TlInS_2$ эрбием приводит к уменьшению величины диэлектрической проницаемости и возрастанию электропроводности, не оказывая заметного влияния на характер и температуры фазовых переходов.

Кристаллы $TlInS_2$ относятся к группе таллиевых халькогенидных соединений типа $A^{III}B^{III}C^{VI}_2$ с ярко выраженной слоистой структурой. Характерной особенностью кристаллов этого семейства является проявление ими как полупроводниковых, так и сегнетоэлектрических свойств. Поскольку кристаллическая структура соединений этого типа является слоистой, то, как правило, это приводит к образованию политипных модификаций кристаллов, что значительно сказывается на их физических свойствах [1]. Эти широкозонные полупроводники являются перспективными материалами для изготовления фотоэлектрических преобразователей, анализаторов спектров и детекторов рентгеновского и нейтронного излучений.

Кристалл $TlInS_2$ является одним из первых, в котором, сначала методом ИК-спектроскопии [2], а затем дифракционными методами нейтронов [3] и рентгеновских лучей [4] были обнаружены последовательности ФП при изменении температуры: парафаза – несо-размерная фаза – соразмерная сегнетоэлектрическая фаза. Дальнейшие исследования различных физических свойств, в том числе и диэлектрических, подтвердили наличие этой последовательности в кристалле $TlInS_2$. В [5] приводятся результаты исследований диэлектрических характеристик кристаллов $TlInS_2$ в зависимости от температуры. Следует отметить, что значения температур ФП у разных авторов не совпадают. В [6] приведены температуры ФП для кристаллов $TlInS_2$, полученные из измерений различных физических свойств. В некоторых случаях различия наблюдаются достаточно значительные. Такое расхождение результатов вероятнее всего обусловлено тем, что модулированная структура очень чувстви-