

Рисунок 4. – Кривые ZFC и FC после обжига при 500 °С (а); кривые намагничивания, после обжига при 500 °С и 900 °С (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен метод синтеза магний-цинкового феррита с использованием метода модифицированного аэрозольного пиролиза с последующей термообработкой. Установлены структурные особенности и магнитные свойства полученных ферритов с помощью рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, ИК-спектроскопии и магнитометрии.

Показано, что распыление суспензий прекурсоров с использованием инертного компонента в ходе синтеза и последующего термолиза приводит к образованию неагломерированных нанопорошков.

Повышение температуры термообработки приводит к частичной рекристаллизации частиц и упорядочиванию кристаллической структуры феррита, что вызывает рост удельной намагниченности материалов: от $24,4 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ (обжиг при 300 °С) до $38,7 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ (обжиг при 900 °С). При этом средний диаметр наночастиц после термообработки не превышает 100 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Magnetic nanoparticles: Surface effects and properties related to biomedicine applications / B. Issa [et. al.] // Int. J. Mol. Sci. – 2013. – V. 14. – № 11. – P. 21266-21305.
2. Modern microwave ferrites / Vincent G. Harris // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – V. 48. – I. 3. – P. 1075–1104.
3. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties / Ü. Özgür, Y. Alivov, H. Morkoç. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2009. – V. 20. – I. 9. – P. 789–834.

СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИНДИЯ-ГАЛЛИЯ-ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТВОРА

Б. А. Казаркин, А. А. Степанов, А. Г. Смирнов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П.Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: kazarkin_boris@mail.ru*

Представлены результаты исследования влияния атмосферы при двухстадийном отжиге тонкопленочных транзисторных структур на основе полупроводникового соединений оксида индия-галлия-цинка, полученных из раствора. Показано, что отжиг в атмосфере азота позволяет увеличить токи сток-затворной характеристики транзистора более чем в 6 раз.

Ключевые слова: отжиг; оксид индия галлия цинка; дисплейная техника.

THE PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES INDIUM-GALLIUM-ZINC OXIDE OBTAINED FROM SOLUTION

B. A. Kazarkin, A. A. Stepanov, A. G. Smirnov

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, st. P. Brovki 6,
220013 Minsk, Belarus*

Corresponding author: B. A. Kazarkin (kazarkin_boris@mail.ru)

The influence of the atmosphere during two-stage annealing of thin-film transistor structures based on a semiconductor compound based on indium-gallium-zinc oxide obtained from a solution has been studied. It is shown that the use of nitrogen as the atmosphere in the first and second stages of annealing increases the currents of the drain-gate characteristic of the transistor by more than 6 times.

Key words: annealing; indium gallium zinc oxide; display technology.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкоплёночные транзисторы (ТПТ) на основе аморфного оксида индия – галлия – цинка (InGaZnO) перспективны для использования в дисплеях следующего поколения, поскольку характеризуются высокой подвижностью носителей заряда, низкой температурой процесса изготовления, высокой степенью однородности, низкими токами утечки, совместимостью с традиционным процессом изготовления a-Si TFT, прозрачностью в видимом диапазоне спектра, возможностью формирования из жидкой фазы раствора на гибких подложках [1, 2].

В последнее время многие группы исследователей активно исследуют технологии формирования оксидных полупроводниковых материалов из раствора, поскольку этот подход имеет преимущества, заключающиеся в более низких производственных затратах, хорошем контроле состава материала и простоте изготовления на крупноформатных или гибких подложках [3–5].

Следует отметить, что процесс отжига очень важен для получения полупроводниковых слоев с хорошими электрическими характеристиками из растворов с использованием методов центрифугирования или инжекционной печати [6]. Состав атмосферы при отжиге после нанесения раствора полупроводникового материала может существенно влиять на морфологию и структуру полученного активного слоя ТПТ, а, следовательно, и на электрофизические характеристики приборных структур. В работе были исследованы электрические характеристики тестовых структур InGaZnO ТПТ, активный слой которых формировался на кремниевых подложках методом получения из раствора при помощи двухстадийного отжига в атмосферах азота и/или воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Растворы активного материала InGaZnO были приготовлены растворением гидрата нитрата индия [$\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$], гидрата нитрата галлия [$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$] и ацетата цинка [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] в 2-метоксизаноле. Для изготовления тестовых структур с пленками InGaZnO толщиной около 25 нм использовали следующее мольное соотношение для раствора: Ga:In:Zn = 1:6:3. Слои наносились методом центрифугирования при 4000 об/мин в течении 40 сек на кремниевую пластину со слоем SiO_2 толщиной 100 нм. Далее проводились различные двухступенчатые варианты

отжига в атмосфере азота (N) и/или на воздухе (A) (Таблица 1). После отжига проводилась фотолиитография для формирования тестовых структур.

Таблица

Параметры отжига образцов

Образец	Параметры первой ступени отжига	Параметры второй ступени отжига
A/A	10 мин. 180°C на воздухе	1 час 380°C на воздухе
N/A	10 мин. 180°C в азоте	1 час 380°C на воздухе
A/N	10 мин. 180°C на воздухе	1 час 380°C в азоте
N/N	10 мин. 180°C в азоте	1 час 380°C в азоте

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) образцов была проведена на установке Helios G4 CX DualBeam System, электрические характеристики приборных структур исследовали с помощью зондовой установки типа Keysight B2912A с закрытым боксом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

СЭМ-изображение скола тестовой структуры представлено на рисунке 1. Толщина активного слоя InGaZnO находится в пределах 24 нм, а толщина SiO₂ равна примерно 100 нм.

Из рисунка 1 видно, что активный слой InGaZnO распределён неравномерно, его толщина колеблется, что связано с неравномерностью как распределения смеси прекурсоров после центрифугирования, так и с их неравномерной скоростью разложения по площади в процессе отжига.

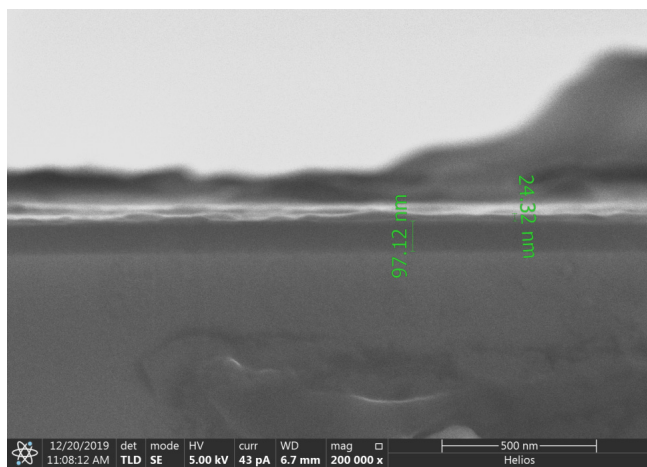


Рисунок 1. – СЭМ изображение скола тестовой структуры (по слоям снизу вверх: Si-SiO₂-InGaZnO)

На рисунке 2 приведены типичные характеристики Ids-Vgs (Vds = 5V) тестовых структур InGaZnO после соответствующих отжигов с логарифмической (а) и линейной (б) шкалами соответственно.

Очевидно, что замена атмосферы воздуха на атмосферу азота приводит к увеличению значений токов при тех же напряжениях. Так, на-

пример, ток Ids(Vgs) при Vgs = 15 В на тестовой структуре InGaZnO после отжига для образца N/N более чем в 6 раза больше, чем ток Ids(Vgs) на испытательной структуре InGaZnO после отжига для образца A/A. Кроме увеличения величины тока, также наблюдается небольшой отрицательный сдвиг относительно характеристики образца A/A для характеристик всех остальных образцов.

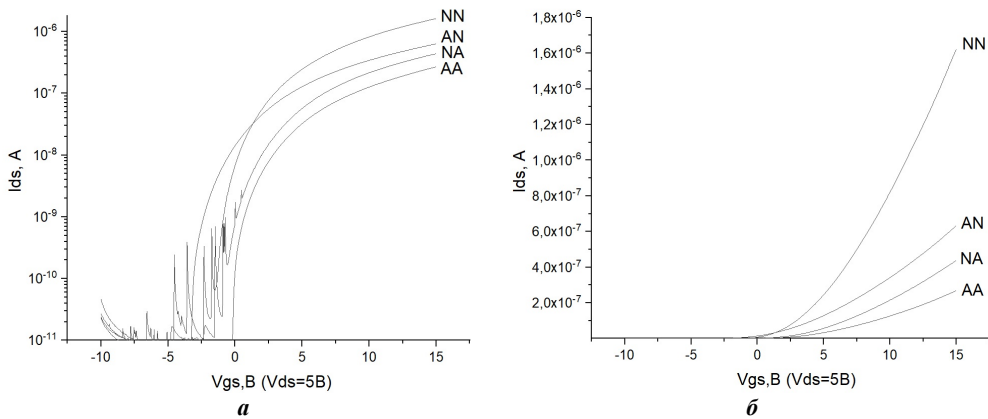


Рисунок 2. – Характеристики V_{gs} - I_{ds} ($V_{ds} = 5B$) тестовой структуры InGaZnO после процессов отжига A/A, N/A, A/N, N/N с логарифмической (а) и линейной (б) шкалами соответственно

Таким образом использование атмосферы азота в двух стадиях двухстадийного процесса отжига (N/N) вместо атмосферы воздуха (A/A) позволяет увеличить ток сток-затворной характеристики $I_{ds}(V_{gs})$ более чем в 6 раз. Замена атмосферы на азот только в одной стадии отжига (A/N или N/A) даёт промежуточный результат.

На рисунке 3 показаны типичные стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе для образцов A/A и N/N. Токи $I_{ds}(V_{ds})$ в структуре после отжига для образца N/N больше токов в образце A/A после отжига. При $V_{ds} = 15B$ и $V_{gs} = 15B$ разница в 6 раз, при $V_{ds}=15B$ и $V_{gs}=10B$ почти в 10 раз, а при $V_{ds} = 15B$ и $V_{gs} = 5B$ в 16 раз.

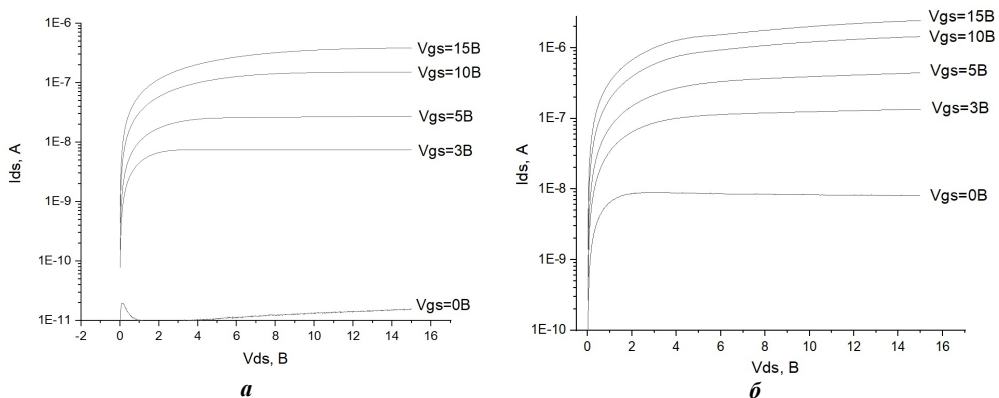


Рисунок 3. – Стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе после отжигов A/A (а) и N/N (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлены тестовые транзисторные структуры на основе полупроводникового соединения InGaZnO, полученного из раствора, исследовано влияние атмосферы при двухстадийном отжиге на сток-затворные и исток-стоковые характеристики исследованных структур. Показано, что использование азота вместо воздуха в двух стадиях отжига позволяет увеличить ток стока $I_{ds}(V_{gs})$ на сток-затворной характеристике более чем в 6 раз, а токи стока $I_{ds}(V_{ds})$ на стоковой характеристике в 6–16 раз, в зависимости от V_{gs} .

Таким образом использование азотной инертной атмосферы при отжиге вместо атмосферы воздуха позволяет существенно улучшить электрические параметры ТПТ-структур на основе InGaZnO, полученного из раствора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices / J.S. Park [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2012. – V. 520(6), – P. 1679–1693.
2. Тонкопленочные транзисторы с InGaZnO-полупроводниковым слоем для активно-матричной адресации / Б.А. Казаркин, А.А. Степанов, Е.В. Муха, И.И. Захарченя, Е.А. Хохлов, А.Г. Смирнов // Доклады БГУИР. – 2019. № 7 (125), – С. 101–106.
3. Fabrication of Indium Gallium Zinc Oxide (IGZO) TFTs Using a Solution-Based Process / Mi Sun Park [et al.] // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2010. – V. 529, – P. 137–146.
4. Low Temperature Solution-Processed IGZO Thin-Film Transistors / Wangying Xu [et al.] // *Applied Surface Science* – 2018. – V. 455, – P. 554–560.
5. Review of solution-processed oxide thin-film transistors / Si Joon Kim [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2014. – V. 53 – 02BA02.
6. Development of annealing process for solution-derived high performance InGaZnO thin-film transistors / Kwan-Soo Kim [et al.] // *Materials Science and Engineering* – 2013. – V. 178, – P. 811–815.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НАМАГНИЧЕННОСТЬ И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ CoFe НАНОПРОВОДОВ

А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, С. Л. Прищепа

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: kukharev.av@gmail.com*

Установлены закономерности влияния механических напряжений и внешнего магнитного поля на распределение намагниченности ферромагнитных CoFe нанопроводов, сформированных в пористых матрицах. Показано, что наличие механических напряжений в пористых структурах, заполненных CoFe, приводит к различным состояниям намагниченности нанопроводов: от однородного z -состояния до сложного неоднородного состояния. Через изменение магнитного состояния нанопроводов механические напряжения оказывают влияние на магнитосопротивление всей пористой структуры.

Ключевые слова: намагниченность; ферромагнетик; магнитоупругость; магнитосопротивление; спиновый вентиль.