

УДК 621.315.594

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ И УСЛОВИЙ ТРАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Е.Н. Абрамова

(Московский государственный университет тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова)

Научные руководители: к.х.н., ст.н.с. А.М. Хорт; д.т.н., профессор А.Г. Яковенко

(Московский государственный университет тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова)

Предыдущие исследования образования слоев нанопористого кремния (НК) в ходе электролитического травления в растворах фтористоводородной кислоты позволили сформулировать несколько теорий возможного образования слоев НК. Данные теории в большей или меньшей степени рассматривали химический аспект взаимодействий ионов в растворе с монокристаллическим кремнием, ведущие к образованию пористого слоя. Основной упор при этом делался на формирование самого массива слоя НК. При этом вопрос, связанный с начальной стадией процесса зарождения пор оставался открытым. В основном этот аспект был сведен к случайному зарождению пор так или иначе связанных с различными поверхностными дефектами. Однако такой подход оставляет слишком широкую неопределенность в этом вопросе.

Таким образом, целью наших исследований являлось изучение влияния различных факторов на процесс зарождения наноразмерных пор в кремнии в ходе электролитического травления.

Нами были проведены исследования влияния различных факторов состояния поверхности на слои НК, в частности на диаметр пор, как параметр прямо связанного с точками зарождения пор и начальной стадией формирования слоя. Ни степень полировки, ни шлифовка, ни плотность дислокаций не оказывали на слои НК практически никакого влияния. В тоже время концентрация мелких примесей, таких как бор или фосфор значительно влияют на диаметр пор и толщину слоев НК. Было получено, что на пластинах кремния *p*-типа, легированного бором, толщина слоев не превышает 45–50 мкм, в то время как на пластинах *n*-типа, легированного фосфором можно получать слои, толщиной до 250–270 мкм.

Наиболее существенным было влияние концентрации мелкой примеси фосфора на диаметр пор в слое НК. Увеличение содержания мелкой примеси однозначно влечет за собой уменьшение диаметра пор и увеличение плотности их распределения. Для слоев, полученных на пластинах *p*-типа, данная зависимость проявляется значительно слабее.

Анализируя полученные данные и данные других авторов можно предположить, что во-первых: природа слоев НК, получаемых на *n*- и *p*-типе кремнии различна, а во-вторых: можно предположить, что центрами зарождения пор на *n*- и *p*-типе кремния будут различные области. Мы предполагаем, что в ходе анодного травления анионы фтористоводородной кислоты подходят к разным областям пластин. Для пластин *p*-типа проводимости этими областями являются области, непосредственно примыкающие к атомам бора, в то время как для пластин *n*-типа проводимости этими преимущественными областями служат области между атомами фосфора. Тем самым атомы фосфора служат как бы каркасом (поверхностной сеткой) для зарождения пор. В сочетании с защитной пленкой, образующейся из сложных

кремниевых фторсодержащих соединений, это позволяет формировать слои НК значительной толщины. В случае p -типа кремния такого удерживающего эффекта нет, а влияние защитной пленки недостаточно. Это приводит к подтравливанию верхних слоев НК и уменьшению их толщины.

УДК 621.484/486

ПРОИЗВОДСТВО РАБОТЫ СПЛАВОМ TiNi ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР $B2 \leftrightarrow R$ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

К.О. Аншукова

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Научные руководители: к.ф.-м.н., ст.н.с. Н.Н. Реснина; к.ф.-м.н., вед.н.с. С.П. Беляев

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Одним из перспективных направлений применения сплавов с памятью формы является создание тепловых мартенситных двигателей. В этих двигателях в качестве рабочего тела выступает сам сплав с памятью формы, который может производить полезную работу при перепаде температур в несколько десятков градусов. Несмотря на очевидные преимущества перед обычными тепловыми машинами, такие как нерасходуемость рабочего тела, высокая экологичность и нетоксичность, тепловые мартенситные двигатели не нашли широкого применения. В первую очередь это связано с тем, что сплавы с памятью формы демонстрируют плохую стабильность свойств при термоциклировании. Это приводит к изменению рабочих характеристик двигателя, изменению геометрических размеров рабочего тела и уменьшению долговечности.

Обычно в качестве рабочего тела выбирают сплавы на основе TiNi, претерпевающие термоупругое мартенситное превращение из кубической B2 решетки в моноклинную B19'. Такое превращение сопровождается сдвиговой деформацией, величина которой составляет 10–12%, что и является причиной проявления высоких функциональных свойств. Вместе с тем, большая сдвиговая деформация приводит к тому, что растущая мартенситная пластина создает в аустенитной матрице высокие внутренние напряжения, значение которых в локальных областях может превысить дислокационный предел текучести. Это вызывает дислокационное скольжение и приводит к возрастанию плотности дефектов кристаллической решетки. В результате в сплаве с числом циклов накапливается необратимая деформация, которая является причиной нестабильности размера и функциональных свойств рабочего элемента, уменьшения работоспособности, коэффициента полезного действия и долговечности аппарата.

Однако в сплаве TiNi может наблюдаться другое мартенситное превращение из кубической B2 фазы в ромбоэдрическую R фазу. Этот переход сопровождается небольшой сдвиговой деформацией, не превышающей 1,5%, и увеличения плотности дефектов при повторяющихся превращениях практически не происходит. Однако, до настоящего времени, производство работы на данном мартенситном превращении почти не исследовалось. Поэтому целью данной работы является исследование работоспособности сплава TiNi при термоциклировании в интервале температур $B2 \leftrightarrow R$ мартенситного превращения.

В качестве объектов исследования были выбраны цилиндрические образцы диаметром 4 мм и длиной рабочей части 25 мм, предварительно отожженные при температуре 773К в течение 2 часов. По данным калориметрических исследований после указанной термообработки в сплаве наблюдается $B2 \leftrightarrow R$ мартенситное превращение с характерными температурами: $R_s=251\text{K}$, $R_f=236\text{K}$, $A_s=253\text{K}$, $A_f=263\text{K}$. Для производства полезной работы использовали следующий рабочий цикл. Сначала образец охлаждали до температуры 245К под постоянным напряжением $\tau_{\text{охл}}$, затем в мартенситном состоянии при постоянной

температуре напряжение увеличивали до значения $\tau_{\text{наг}}$, и нагревали до температуры 295К под постоянным напряжением $\tau_{\text{наг}}$. После этого нагрузку уменьшали до значения $\tau_{\text{охл}}$ и всю описанную процедуру повторяли тридцать раз.

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов исследовалось влияние напряжений, действующих на образец при охлаждении $\tau_{\text{охл}}$, на значение удельной работы и коэффициента полезного действия, при этом напряжение, действующее при нагревании, оставалось постоянным, $\tau_{\text{наг}}=200\text{МПа}$. Во второй серии экспериментов исследовалось влияние напряжений, действующих на образец при нагревании $\tau_{\text{наг}}$, на значение удельной работы и коэффициента полезного действия, при этом напряжение, действующее при охлаждении, оставалось постоянным, $\tau_{\text{охл}}=100\text{МПа}$.

В результате исследования было определено, что максимальное значение удельной работы $A=1,5\text{ МДж/м}^3$ и максимальное значение КПД=2,1% реализуется в цикле, в котором при охлаждении на образец действует напряжение $\tau_{\text{охл}}=100\text{ МПа}$ и при нагревании $\tau_{\text{наг}}=400\text{МПа}$. Для сравнения в сплавах TiNi и TiNiCu при термоциклировании через интервал $B2\leftrightarrow B19'$ превращения работоспособность может достигать 10–13 МДж/м³, а максимальный КПД, наблюдаемый в интервале $B2\leftrightarrow B19'$ превращения, находится в пределах от 2,5 до 3%.

Также отметим, что при таком циклическом нагружении за тридцать циклов образец деформируется на 8,4%, что значительно меньше необратимой деформации, которую накапливает образец при $B2\leftrightarrow B19'$ превращении.

Таким образом, малая деформация решетки при $B2\leftrightarrow R$ мартенситном превращении, с одной стороны, является причиной небольшой величины производимой полезной работы и малого коэффициента полезного действия. С другой стороны, это обеспечивает высокую размерную стабильность рабочего элемента из сплава TiNi в условиях многократного его срабатывания.

УДК 538.958

ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaN ОТ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ

Е.В. Борисов

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент А.Ю. Серов

(Санкт-Петербургский государственный университет)

С каждым годом расширяется область применения полупроводниковых материалов в различных направлениях современной науки и индустрии. Нитрид галлия и разнообразные наноструктуры на его основе относятся к числу широкозонных полупроводниковых систем наиболее востребованных для прикладных и научных целей. Вследствие большой ширины запрещенной зоны, эти полупроводники могут быть использованы в качестве материала для создания УФ лазеров и устройств, работающих при высоких температурах. В последние два десятилетия энергетическая структура и динамика носителей заряда в нитриде галлия интенсивно изучаются оптическими методами [1]. Большое количество работ посвящено изучению зависимости излучательных и транспортных свойств GaN от типа и уровня легирования (элементы II, IV и VI групп, группы железа и лантана и т.д.) [2–5]. Оптические свойства кристаллов GaN со структурой вюрцита определяются переходами между тремя валентными подзонами Γ_9 , Γ_7 и Γ_7 и зоной проводимости Γ_6 , которым соответствуют экситонные резонансы с большими силами осциллятора (экситоны А, В и С соответственно). **Целью работы** является изучение спектров экситонной люминесценции и спектров КРС эпитаксиальных слоев GaN с различной концентрацией лоноров (от $4,1\cdot 10^{16}$ до $4,8\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$).

Экситонные резонансы в спектре поглощения (отражения) слоев GaN, выращенных на

сапфировой подложке, смещены в сторону низких энергий относительно спектра свободного кристалла. По мере увеличения концентрации доноров N_D полосы спектра экситонного отражения уширяются и сдвигаются в сторону низких энергий, при $N_d > 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ линии $A_{n=1}$ и $B_{n=1}$ уже не наблюдаются. Уширение экситонных резонансов и их сдвиг определяются ухудшением качества решетки, экранированием кулоновского взаимодействия и перенормировкой ширины запрещенной зоны в условиях экранирования.

В спектре излучения образца № 1 при $T=5\text{K}$ присутствуют полосы свободных экситонов $A_{n=1}$, $A_{n=2}$ и $B_{n=1}$, полосы D^0x и A^0x экситонов, связанных на нейтральных донорах и акцепторах, а также фоновые реплики свободных и связанных экситонов, соответствующие испусканию ЛО-фононов с энергией 91 meV . По мере увеличения концентрации кремния наряду с уширением и сдвигом экситонных резонансов усиливается вклад широкой фоновой полосы, обусловленной структурными дефектами, в частности, вакансиями галлия, при этом пиковая интенсивность люминесценции GaN уменьшается на порядок. В диапазоне концентраций кремния от 10^{18} до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в спектре люминесценции отчетливо видно наложение примесной зоны на зону проводимости.

Спектры КРС системы сапфир – нитрид галлия были получены при комнатной температуре при использовании 488 нм лазера. Фоновые компоненты, активные в КРС были получены и проанализированы. Донорные уровни кремния отстоят от зоны проводимости на 30 мэВ , что практически совпадает с величиной kT . В результате, в зоне проводимости при комнатной температуре находится большое количество свободных носителей в образце GaN с самой высокой концентрацией доноров ($4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$); все доноры ионизованы. Ансамбль этих свободных электронов создает плазмон-фононное взаимодействие, которое наблюдалось в КРС.

Литература

1. Reshchikov M., Morkoç H. Luminescence properties of defects in GaN // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 061031.
2. Farvid S., Hegde M., Hosein I.D., Radovanovich V. Electronic structure and magnetism of Mn dopants in GaN nanowires: Ensemble vs single nanowire measurements // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 99. – P. 222504.
3. Reshchikov M.A., Willyard A.G., Behrends A., Bakin A., Waag A. Extremely high absolute internal quantum efficiency of photoluminescence in co-doped GaN:Zn,Si // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 99. – P. 171110.
4. Reynolds D.C., Look D.C., Kim W., Aktas Ö., Botchkarev A., Salvador A., Morkoç H., Talvar D.N. Ground and excited state exciton spectra from GaN grown by molecular-beam epitaxy // J. Appl. Phys. – 1996. – 80. – P. 594.
5. Zhang M., Zhou T.F., Zhang Y.M., Li B., Zheng S.N., Huang J., Sun Y.M., Ren G.Q., Wang J.F., Hu F., Yang H. The bound states of Fe impurity in wurtzite GaN // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – P. 041904.

**МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
В АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ TiNi****М.А. Дроздова**

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Научные руководители: к.ф.-м.н., ст.н.с. Н.Н. Реснина; к.ф.-м.н., вед.н.с. С.П. Беляев

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Благодаря своим уникальным свойствам сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) широко используются в разных областях науки и техники. Они нашли свое применение в электронике, медицине и космической промышленности. С точки зрения практического применения наиболее перспективными из данных материалов являются сплавы на основе никелида титана.

В последнее время особый интерес представляют наноструктурированные сплавы с ЭПФ, полученные методом интенсивной пластической деформации (ИПД). Большие пластические деформации позволяют существенно уменьшить размеры зерен и улучшить прочностные и функциональные свойства. Кроме того, интенсивной пластической деформацией можно добиться аморфизации сплава. Варьируя параметры последующей кристаллизации можно получить сплавы с различной кристаллической структурой, отличающиеся как размером зерна, так и объемной долей кристаллической фазы. Аморфно-кристаллические сплавы с памятью формы представляют большой интерес поскольку они, по сути, являются биметаллическим композитом, в котором сосуществуют упругая аморфная фаза и кристаллическая фаза, испытывающая мартенситные превращения. Механическое поведение таких систем практически не изучено, поэтому целью данной работы являлось изучение функционально-механических свойств сплава TiNi после интенсивной пластической деформации сдвигом под давлением, и последующей контролируемой частичной кристаллизации.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы из сплава Ti – 50,2 ат.% Ni диаметром 5 мм и толщиной 0,55 мм. Образцы были подвергнуты сдвигу под давлением 8 ГПа на 3,5 оборота в наковальнях Бриджмена при температуре 23°C. Истинная деформация ϵ составила 5,3 единицы.

Для изучения процессов выделения тепла при нагревании деформированных сплавов образцы нагревали в камере дифференциального сканирующего калориметра до температуры 550°C разными скоростями. При этом наблюдали три пика выделения тепла, которые могут быть связаны со структурной релаксацией, кристаллизацией и последующим ростом зерен. Мартенситные превращения в сплаве, подвергнутом сдвигу под давлением и последующей контролируемой кристаллизации, исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии в интервале температур от 140°C до –110°C со скоростью изменения температуры 10°C/мин. Полученные результаты показали, что в образцах после интенсивной деформации и последующей контролируемой кристаллизации, кинетика мартенситных превращений зависит от степени кристаллизации. Так, в образцах с содержанием кристаллической фазы 50% при охлаждении и нагревании реализуется превращение из кубической B2 фазы в ромбоэдрическую R фазу. Вместе с тем, в образце, с содержанием кристаллической фазы 100%, при охлаждении наблюдается двухстадийное превращение из кубической B2 фазы в моноклинную B19' через образование промежуточной R фазы.

В образцах, подвергнутых различной кристаллизации, были исследованы механические и функциональные свойства по специальной методике.

Полученные результаты показали, что аморфные образцы деформируются упруго до деформации 4%. Дальнейшее увеличение деформации приводит к незначительной пластической деформации и разрушению, которой наблюдается в том случае, если

деформация превышает 5%. Наличие кристаллической фазы приводит к тому, что неупругая остаточная деформация наблюдается после деформирования до 1%. Вместе с тем, максимальная деформация, которую испытывают образцы до разрушения, незначительно увеличивается при возрастании доли кристаллической фазы до 75%. Увеличение объемной доли кристаллической фазы до 100% существенно увеличивает деформацию до разрушения. Так, образец, подвергнутый нагреванию до температуры 550°C со скоростью 20°C/мин, разрушается при 18%.

Исследование эффекта памяти формы показало, что увеличение объемной доли кристаллической фазы приводит к возрастанию величины эффекта памяти формы. Так, в образце с содержанием кристаллической фазы 50%, максимальная величина обратимой деформации составляет 0,2%, а в полностью кристаллическом образце – 3,2%. Кроме этого было обнаружено, что в сплаве, в котором сосуществует аморфная и кристаллическая фазы, наблюдается эффект обратимой памяти формы, величина которого меняется от 0,2% до 0,35%. Таким образом, результаты работы показали, что аморфно-кристаллические образцы, полученные контролируемой кристаллизацией сплава TiNi, аморфизированного методом интенсивной пластической деформации, проявляют эффекты памяти формы, величина которых определяется предварительной деформацией и величиной кристаллической фазы.

УДК 543.426

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ УСТАНОВКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УЧЕТА
МАТРИЧНОГО ЭФФЕКТА В КОЛИЧЕСТВЕННОМ
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОМ АНАЛИЗЕ ОБЪЕКТОВ С ЭФФЕКТИВНЫМ
АТОМНЫМ НОМЕРОМ ОТ 11 ДО 24**

Г.Ю. Егоренкова

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Научный руководитель – к.г.-м.н., ст.н.с. Л.П. Коробейникова

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Многоканальные спектрометры с Si-Pin и SDD полупроводниковыми детекторами высокой эффективности и энергетического разрешения, порядка 150 эВ, позволили предложить новый вариант способа фундаментальных параметров, а также новый вариант стандарта-фона.

В варианте с присоединенным стандартным образцом в качестве «нулевого» приближения массовой доли химических элементов обычно используется оценка модели линейной связи интенсивностей от концентраций. Когда могут быть статистически надежно определены все интенсивности рассеянного излучения характеристических линий анода, за «нулевое» приближение принимаем содержание химического элемента, определенного способом стандарта-фона, с нормированием на некогерентно рассеянное излучение ведущих характеристических линий анода рентгеновской трубки (Rh, Mo...).

Целью работы является совершенствование аппаратуры рентгеноспектрального энергодисперсионного полупроводникового спектрометра и определение геометрического положения дополнительного детектора, регистрирующего некогерентно рассеянное излучение, для оптимального учета матрицы при реализации количественного анализа способом стандарта-фона в варианте использования некогерентно рассеянного излучения.

Для повышения точности метода можно использовать установку дополнительного полупроводникового детектора, находящегося в положении регистрации максимальной интенсивности некогерентно рассеянного излучения. Вариации угла рассеяния с

определенной дискретностью и теоретические расчеты интенсивности некогерентно рассеянного излучения позволяют выявить оптимальные углы рассеяния, при которых влияние матрицы на аналитический параметр (спектральное отношение) минимально.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены и уточнены факторы, влияющие на точность количественного анализа способом стандарта-некогерентно рассеянного излучения. Было проведено математическое моделирование. В результате были теоретически рассчитаны интенсивности характеристического излучения ведущих информативных элементов (Si, S, Ca, Cr, Fe, Cu, Zr, Sn, Ba) в различных типах матрицы (кремниевые, титановые и алюминиевые матрицы) при регистрации в геометрии основного ППД. Для геометрии дополнительного ППД рассчитывали интенсивности некогерентно рассеянного излучения характеристических линий анода рентгеновских трубок (Rh и Mo) при изменении с определенным шагом угла рассеяния для моделей с фиксированным рядом содержаний информативных химических элементов при изменении матрицы от эффективного атомного номера 11 до 24.

По полученным результатам моделирования были построены уравнения стандарта-фона для всех образцов и выявлены оптимальные геометрические условия расположения дополнительного полупроводникового детектора для реализации количественного анализа способом фундаментальных параметров и стандарта-фона в варианте использования некогерентно рассеянного излучения Rh и Mo анодов.

УДК 539.21

ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И ФОТОННЫХ СТЕКОЛ ИЗ МОНОДИСПЕРСНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ КРЕМНЕЗЕМА

Д.А. Еуров

(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.Г. Голубев

(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе)

Фотонные материалы, состоящие из разупорядоченных в пространстве структурных элементов, являются предметом интенсивных исследований в последние четверть века [1]. В последние годы предложено создавать твердотельные фотонные материалы с разупорядоченным расположением в пространстве идентичных монодисперсных полимерных сфер – фотонные стекла (ФС). Усиление рассеяния света на длинах волн, соответствующих резонансам Ми в каждой рассеивающей сфере, обуславливает резонансную спектральную зависимость ключевых параметров материала, определяющих диффузионное распространение света в ФС [2]. Данные материалы предложено использовать для создания миниатюрных безрезонаторных лазеров со спектральной селективностью эмиссионных спектров и низким порогом генерации [3].

Получение разупорядоченных структур из монодисперсных сферических частиц – сложная технологическая задача. Водная суспензия коллоидных монодисперсных частиц субмикронного размера, как правило, агрегативно устойчива. Когда концентрация частиц в ней повышается под влиянием внешних факторов, то под действием сил молекулярного притяжения и электростатических сил отталкивания частицы оказываются на определенном расстоянии друг от друга, образуя плотноупакованную упорядоченную структуру. Такой процесс длится от одного до нескольких часов, является равновесным и обратимым (частицы могут быть вновь диспергированы). Для формирования разупорядоченной структуры (ФС) необходимо, чтобы процесс взаимодействия частиц протекал быстро и спонтанно. Для этого используют необратимую коагуляцию агрегативно неустойчивой суспензии с последующей седиментацией флоккул на подложку. В работе [2] описана коагуляция суспензии полимерных

монодисперсных сферических частиц водным раствором CaCl_2 .

Целью настоящей работы было развитие метода седиментации для получения ФС из монодисперсных сферических частиц термически и химически стойкого материала – аморфного кремнезема ($\alpha\text{-SiO}_2$). Для коагуляции суспензий монодисперсных сферических частиц кремнезема (МСЧК) в процессе синтеза ФС использованы NH_4Cl , HCl и цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ). Механизм коагуляции в случае каждого из соединений различен, в результате чего образуются флокулы (структурные элементы ФС), различные по размеру и с разной разупорядоченностью МСЧК внутри самих флокул, что обеспечивает варьирование степенью разупорядочения ФС. Все выбранные коагулянты без труда удаляются из конечных структур либо простой отмывкой, либо термическим отжигом.

МСЧК синтезированы путем гидролиза тетраэтоксисилана в спирто-водно-аммиачной среде [4]. Средний размер сфер определялся из анализа электронных микрофотографий 200 частиц путем построения гистограммы распределения их размеров с последующей ее аппроксимацией функцией Гаусса. Полученный средний диаметр МСЧК составил 380 нм, среднеквадратичное отклонение – не более 4%.

Методом спектроскопии пропускания определены значения концентраций используемых соединений, необходимые для быстрой (<10 мин) коагуляции суспензий МСЧК. Соответствующие значения концентраций для NH_4Cl , HCl и СТАВ равны, соответственно, 0,33 мол/л, $6,3 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-1}$ мол/л и $4 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ мол/л.

Из водных суспензий МСЧК выращены 4 коллоидные пленки: фотонно-кристаллическая (ФК) с добавлением HCl-PC(HCl) и 3 пленки ФС с добавлением вышеперечисленных коагулянтов – $\text{PG(NH}_4\text{Cl)}$, PG(HCl) и PG(СТАВ) , соответственно. В процессе синтеза МСЧК осаждались из суспензии на поверхность горизонтально расположенной стеклянной подложки методом седиментации. Процесс седиментации происходил при нагревании (90°C) в кварцевом цилиндре, установленном на подложку. Цилиндр снимался с подложки после полного испарения дисперсионной среды. Толщины выращенных пленок составили 250–350 мкм. Отметим, что толщина полученной ФК пленки на 2 порядка превышает толщины ФК пленок, получаемых методом вертикального осаждения [4].

Для определения разупорядоченности полученных коллоидных пленок проведен анализ автокорреляционных функций (АКФ) АСМ-изображений их поверхностей. АКФ упорядоченной структуры (ФК) представляет собой периодическое распределение максимумов из-за корреляции дальнего действия (трансляционная симметрия). Беспорядок в структуре приводит к экспоненциальному убыванию АКФ, которое описывается с помощью корреляционной длины (l_c) – расстояния, на котором еще существует порядок в расположении МСЧК. Чем меньше корреляционная длина, тем более разупорядоченным является материал. Соответствующие расчетные значения корреляционных длин для фотонного кристалла PC(HCl) $l_c = 4,5d$, для фотонных стекол: $\text{PG(NH}_4\text{Cl)}$ $l_c = 0,4d$; PG(HCl) $l_c = 0,35d$; PG(СТАВ) $l_c = 0,2d$, где d – диаметр сфер.

Использование солевого коагулянта NH_4Cl позволяло варьировать степень разупорядоченности получаемого материала, благодаря наличию области частичной коагуляции, что обеспечивало получение материалов, обладающих структурой промежуточной между структурами ФК и ФС. В случае потенциалобразующего коагулянта (HCl) также наблюдалась область частичной коагуляции, которая, однако, значительно меньше, чем при применении NH_4Cl . Использование HCl позволило на 2 порядка снизить концентрацию добавляемого коагулянта, необходимую для полной коагуляции МСЧК, что облегчает удаление коагулянта из образца. Кроме того, добавление HCl при синтезе ФС улучшало адгезию образца к подложке. С использованием амфифильного коагулянта СТАВ получена наиболее разупорядоченная пленка ФС ($l_c=0,2d$), что объясняется особенностями механизма коагуляции и размерами молекул коагулянта. Значение концентрации СТАВ, вызывающее коагуляцию МСЧК, на 3 порядка ниже критической концентрации солевого

коагулянта.

Гравиметрическим методом определена пористость выращенных коллоидных пленок. Полученные значения пористости для пленок PG(NH₄Cl), PG(HCl) и PG(СТАВ) соответствуют характерным значениям пористости для фотонных стекол [3]. Пористость 26%, полученная для ФК пленки, соответствует объему пор между плотноупакованными в ГЦК решетку МСЧК. Показано, что, варьируя тип и концентрацию коагулянта, можно изменять пористость материала.

Таким образом, в настоящей работе методом седиментации выращены пленки фотонных кристаллов и фотонных стекол из монодисперсных сферических частиц SiO₂. Продемонстрирована возможность управляемого изменения степени структурного разупорядочения коллоидных пленок путем варьирования агрегативной устойчивости водной суспензии частиц.

Литература

1. Sheng P. ed. Scattering and Localization of Classical Waves in Random Media // World Scientific Series on Directions in Condensed Matter Physics. – 1990. – V. 8. – 635 p.
2. García P.D., Sapienza R., Bertolotti J., Martín M.D., Blanco Á., Altube A., Viña L., Wiersma D.S., C. López. Resonant light transport through Mie modes in photonic glasses // Phys. Rev. A. – 2008. – V. 78. – P. 023823.
3. Gottardo S., Sapienza R., García P.D., Blanco Á., Wiersma D.S., López C. Resonance-driven random lasing // Nature Photonics. – 2008. – V. 2. – P. 429.
4. Трофимова Е.Ю., Алексенский А.Е., Грудинкин С.А., Коркин И.В., Курдюков Д.А., Голубев В.Г. Влияние предварительной обработки тетраэтоксисилана на синтез коллоидных частиц аморфного диоксида кремния // Коллоид. журн. – 2011. – Т. 73. – № 4 – С. 535–539.

УДК 621.484/486

ПРОИЗВОДСТВО РАБОТЫ СПЛАВАМИ НА ОСНОВЕ TiNi ПРИ ОБРАТНЫХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Р.Н. Журавлев

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Научные руководители: к.ф.-м.н., ст.н.с. Н.Н. Реснина; к.ф.-м.н., вед.н.с. С.П. Беляев

(Санкт-Петербургский государственный университет)

В настоящее время вопрос энергетического обеспечения стоит очень остро. Это связано с невозобновляемостью мировых запасов большинства основных источников энергии, таких как нефть, природный газ, каменный уголь и др. Следует отметить их экологическую опасность, как при добыче и использовании, так и при транспортировке. Поэтому все большую актуальность приобретает разработка и использование возобновляемых источников энергии. Основные преимущества таких источников это неисчерпаемость и экологическая чистота. Вместе с тем их использование зачастую связано с разработкой новых материалов и технологий, что в свою очередь может быть дорого, а иногда и нерентабельно. По этим причинам использование возобновляемых источников на данный момент не получило широкого распространения. Например, энергия геотермальных вод, выходящих на земную поверхность, используется всего лишь на 5%.

Особое место в этой сфере занимают тепловые машины, использующие в качестве рабочего тела сплавы с памятью формы (мартенситные двигатели). Такие сплавы способны восстанавливать при нагревании под нагрузкой значительные неупругие деформации, или, другими словами, преобразовывать тепловую энергию в механическую. Мартенситные

двигатели абсолютно безопасны для экологии, дешевы в эксплуатации и могут использовать не только энергию возобновляемых источников (солнечная радиация, геотермальные источники, тепло Мирового океана и т.д.), но и низкокалорийную бросовую энергию тепловых отходов промышленных предприятий и электростанций. За последние 40 лет было создано множество опытных образцов двигателей различной конфигурации. Однако, в связи с рядом проблем, возникающих при работе таких тепловых машин, широкого применения они не получили. К таким проблемам относятся: низкая стабильность функциональных свойств сплавов при термоциклировании; накопление в образце односторонней пластической деформации в каждом термоцикле; неэффективная схема преобразования тепловой энергии в механическую с низким КПД; широкий гистерезис рабочих температур, который не позволяет использовать низкокалорийную тепловую энергию; низкая коррозионная стойкость.

Эти проблемы могут быть решены двумя путями: созданием новых сплавов с памятью формы с подходящими свойствами или разработкой новых режимов производства работы, обеспечивающих стабильность свойств, высокую работоспособность и высокий КПД. Ранее было показано, что разработка режимов термоциклирования является первоочередной задачей. Для этого был разработан новый «симметричный» цикл производства работы, который позволяет сохранить стабильность функциональных свойств сплава с памятью формы в ходе термоциклирования.

Хорошо известно, что механические свойства сплавов с памятью формы на основе TiNi зависят от концентрации Ni, а значит можно предположить, что термоциклирование в «симметричном» режиме будет по-разному влиять на рабочие характеристики этих сплавов.

Целью работы является исследование изменения функциональных свойств и работоспособности сплавов на основе TiNi с памятью формы с различным содержанием Ni при термоциклировании в «симметричном» режиме производства работы.

Для достижения поставленной цели цилиндрические образцы из сплавов Ti – 50 at.% Ni и Ti – 51,5 at.% Ni были подвергнуты термоциклированию в «симметричном» режиме производства работы. Величины напряжений $|\tau_{охл}|$ и $|\tau_{н}|$, приложенных при охлаждении и нагревании, были равны 50 МПа и 200 МПа соответственно. В каждом цикле были определены величины пластичности превращения γ^{III} , памяти формы $\gamma^{ПФ}$, необратимой деформации $\gamma_{пл}$ и удельной работоспособности A .

Было показано, что при термоциклировании сплава Ti_{48,5}Ni_{51,5} величины $\gamma^{ПФ}$ и γ^{III} стабильны. В свою очередь, термоциклирование сплава Ti₅₀Ni₅₀ приводит к стабилизации этих величин только к десятому циклу. Также было обнаружено, что средняя величина $\gamma^{ПФ}$, измеренная для образца из эквиатомного сплава TiNi, в три раза выше, чем у заникеленного.

Было показано, что при термоциклировании сплава Ti₅₀Ni₅₀ величина A возрастает в течение первых шести циклов от 5 МДж/м³ до 9,5 МДж/м³, а затем становится стабильной. Также следует отметить, что средняя величина удельной работоспособности сплава Ti₅₀Ni₅₀ в три раза выше, чем Ti_{48,5}Ni_{51,5}.

Было обнаружено, что термоциклирование заникеленного сплава TiNi приводит к немонотонной зависимости необратимой деформации от номера цикла, так что в тридцатом цикле величина $\gamma_{пл}$ становится равной –0,5%. В свою очередь, при термоциклировании эквиатомного сплава TiNi величина пластической деформации меняется монотонно и к тридцатому циклу достигает значения 3,3%. С другой стороны, сравнение результатов настоящей работы с данными, полученными при термоциклировании сплава Ti₅₀Ni₅₀ в других режимах производства работы, показало, что применение «симметричной» схемы позволяет существенно снизить величину необратимой пластической деформации, накопленной в образце к тридцатому циклу.

Таким образом, в работе было установлено, что стабильность рабочих параметров сплавов с памятью формы и накопление необратимой пластической деформации определяются в основном схемой производства работы.

Результаты, полученные в рамках данной работы позволяют разработать рекомендации

для инженеров и конструкторов, необходимые для создания эффективных тепловых машин с рабочим телом из сплава с памятью формы, преобразующих энергию возобновляемых источников или низкокалорийное бросовое тепло в механическую и электрическую энергии. Применение таких двигателей на практике позволит получить значительную энергетическую, а значит и экономическую выгоду.

УДК 539.958

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЕВ (In)GaPN(As), ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ GaP МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

А.А. Лазаренко

(Санкт-Петербургский Академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., н.с. Е.В. Никитина

(Санкт-Петербургский Академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН)

Применение монокристаллических оптоэлектронных интегральных схем (МОЭИС) позволяет изготавливать более компактные оптические системы (по сравнению с системами на основе дискретных оптических компонентов), а также предоставляет возможность их интеграции с электронными схемами для миниатюризации многофункциональных оптико-электронных систем и приборов. В настоящее время МОЭИС реализованы в системе материалов АЗВ5 [1, 2]. Реализация МОЭИС на основе кремния кардинально увеличит функциональность кремневой микроэлектроники и откроет совершенно новые области ее применения. Кремний, наиболее широко-распространенный полупроводниковый материал, имеет непрямую структуру энергетических зон, что делает получение светоизлучающих приборов на кремнии чрезвычайно сложной задачей.

Основной проблемой для создания МОЭИС на основе кремния является отсутствие технологии синтеза прямозонного полупроводникового материала на кремнии, на основе которого могут быть реализованы источники оптического излучения [3].

Фосфид галлия практически согласован с кремнием по постоянной кристаллической решетки, однако, так же как и кремний имеет непрямую структуру энергетических зон. Добавление азота в фосфид галлия уже на уровне 0,5% приводит к формированию прямой структуры электронных зон таких твердых растворов.

В работе исследовались спектры фотолюминесценции образцов с объемными слоями GaPN и структур с квантовыми ямами InGaPN и GaPAsN в матрице GaPN, выращенных на подложках фосфида галлия методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Образцы были выращены на установке GEN III фирмы Veeco (США). Для получения атомарного азота использовался источник с высокочастотным газовым разрядом. В качестве подложек использовались epi-ready нелегированные пластины GaP (100). Спектры фотолюминесценции получены на установке фирмы Accent Optical Technologies. Для накачки использовался твердотельный УФ лазер ($\lambda=266$ нм).

Для исследования мольной доли азота в объемных слоях GaPN была выращена серия образцов с различными параметрами во время эпитаксиального роста (температурой подложки, скоростью роста и мощностью, подаваемой на источник азота). Методом фотолюминесценции рассматривалось влияние этих параметров на кристаллическое совершенство растущего слоя и на процентное содержание азота в слое.

Для расчета энергии перехода в зависимости от состава твердых растворов GaPN и GaPNAs использовалась модель антипересечения зон (band anticrossing, BAC). В BAC-модели рассматривается взаимодействие локализованного азотного уровня с зоной

проводимости, в результате которого происходит расщепление зоны проводимости на две подзоны E_+ и E_- . При этом минимум зоны проводимости понижается, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны образующегося соединения $\text{III-V}_{1-x}\text{N}_x$ [4].

Установлено, что содержания азота в растущем слое уменьшается при увеличении температуры подложки во время роста структур при прочих неизменных условиях осаждения. Так как при более высокой температуре подложки образуется меньше азотных кластеров, которые являются центрами безызлучательной рекомбинации, интенсивность пика фотолюминесценции возрастает.

Обнаружено, что при увеличении мощности на источнике азота и при уменьшении скорости роста структуры, мольная доля азота в слоях увеличивается.

Произведен сравнительный анализ спектров фотолюминесценции структур с квантовыми ямами InGaAsN и GaPNAs в матрице GaPN . Установлено, что структуры с квантовыми ямами GaPNAs обладают лучшим кристаллическим совершенством.

Образцы демонстрируют интенсивную фотолюминесценцию при комнатной температуре в диапазоне длин волн 595–637 нм.

Литература

1. Kuno M., Sanada T., Nobuhara H., Makiuchi M., Fujii T., Wada O. and Sakurai T. Four-channel AlGaAs/GaAs optoelectronic integrated transmitter array // *Appl. Phys. Lett.* – 1986. – V. 49. – P. 1575; doi: 10.1063/1.97284.
2. Shibata Jun, Kajiwara Takao Opto-electronic integrated circuits using the InGaAsP/InP system // *Optical and Quantum Electronics.* – 1988. – V. 20. – P. 363–371.
3. Furukawa Yuzo, Yonezu Hiroo and Wakahara Akihiro. Monolithic integration of light-emitting devices and silicon transistors // *SPIE Newsroom.* – 2007.
4. Kunert B., Volz K., Stolz W. Dilute nitride Ga(NAsP)/GaP -heterostructures: toward a material development for novel optoelectronic functionality on Si-substrate // *Phys. Status Solidi B.* – 2007. – V. 244. – P. 2730–2739.

УДК 681.2-5

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКАНЕРА В СОСТАВЕ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

М.А. Михайлов

Научный руководитель – д.т.н., доцент В.В. Манойлов

Для того что бы удовлетворять растущие потребности в проведении экспериментов в нанотехнологиях, необходимо в первую очередь развивать основной инструмент в нанотехнологиях – сканирующие зондовые микроскопы. Одной из неотъемлемой составной частей является сканер, который представляет из себя три пьезокерамических движителей, позволяющие с высокой точностью перемещать по трем координатам образец, закрепленный на нем. Пьезокерамика обладает большим количеством нелинейностей, влияющих на точность перемещений, таких как крип, гистерезис, тепловые расширения, краевые эффекты. Достаточно часто искажения, вызванные этими нелинейностями устраняются на этапе постобработки изображения с помощью различных математических фильтров. Альтернативным методов устранения искажений – использование системы автоматического регулирования перемещения сканера.

Для построения подобной системы необходимо решить следующие задачи:

1. выбрать соответствующий датчик перемещения;
2. выбрать метод измерения информационного сигнала;

3. сконструировать устройство для реализации измерений и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС);
4. разработать, промоделировать и реализовать под конкретную архитектуру необходимые алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Создание такой системы для сканирующего зондового микроскопа NanoEducator MiniLab обладает новизной, благодаря уникальности конструкции сканера данного микроскопа. Практическое значение ее для сканера – повышение точности сканирования поверхности изучаемого образца.

Основные результаты. На данный момент были достигнуты следующие результаты:

- выбран емкостной датчик перемещения, благодаря простой технологии изготовления, дешевизне и чувствительности к малым перемещениям;
- выбрана методика измерения емкости – измерением времени заряда конденсатора, которая удобна и имеет высокие метрологические характеристики при применении в цифровых устройствах;
- для реализации измерений и алгоритмов цифровой обработки сигналов был апробирован контроллер ЦОС семейства STM32 F4 на базе ядра ARM Cortex M4.

Литература

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Российская академия наук. Институт физики микроструктур. – Нижний Новгород, 2004. – 110 с.
2. Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1997. – № 5. – С. 101–124.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – Изд-во: Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.

УДК 539.37:669.018

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

А.С. Моторин

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Научный руководитель – д.т.н., ст.н.с. А.И. Разов

(Санкт-Петербургский государственный университет)

Сплавы с эффектом памяти формы привлекают внимание исследователей и конструкторов своими уникальными функциональными свойствами. Одной из практически значимых областей применения является использование этих материалов в быстропотекающих процессах. В связи с этим исследование функционально-механических свойств никелида титана при высокоскоростном нагружении представляет значительный практический интерес и актуальность.

Объектом исследования служил сплав TiNi эквиатомного состава с температурой начала прямого мартенситного превращения $M_n = 75^\circ\text{C}$. Образцы с рабочей частью диаметром 5 мм и длиной 10 мм отжигали при 500°C 1 час и деформировали растяжением до 10–20% остаточной деформации при температурах от 20 до 300°C , охватывающих интервал температур обратимого мартенситного превращения. Квазистатическое нагружение

осуществляли на испытательной машине Lloyd LR30K Plus со скоростями около 10^{-2} с^{-1} , а высокоскоростное – со скоростями около 10^3 с^{-1} на установке, реализующей метод Кольского для разрезных стержней Гопкинсона.

Никелид титана обладает двумя пределами текучести – фазовым, при достижении которого начинается фазовая обратимая неупругость, и обычным дислокационным, при достижении которого начинается только необратимое деформирование. Опыты показали, что оба предела текучести и при квазистатическом и при высокоскоростном нагружении ведут себя одинаковым образом – дислокационный снижается с повышением температуры, а фазовый ведет себя немонотонно с минимумом чуть выше температуры начала прямого мартенситного превращения. Установлено, что пределы текучести при высокоскоростном нагружении больше, чем при квазистатическом.

Эффекты однократной и обратимой памяти формы исследовали при термоциклировании от 20 до 180°C через интервал обратимых мартенситных превращений. При первом нагреве в некоторых случаях наблюдали эффект памяти формы, а при последующих охлаждениях и нагревах всегда наблюдали обратимую память формы.

Однократный эффект памяти формы в обоих вариантах нагружения с ростом температуры, при которой осуществлялось деформирование, падает и полностью исчезает после деформирования при температурах 90–130°C, причем после высокоскоростного нагружения это происходит раньше (по температуре), чем после квазистатического нагружения.

С повышением температуры, при которой осуществлялось деформирование, эффект обратимой памяти формы мартенситного типа сменяется эффектом обратимой памяти формы аустенитного типа. В небольшом диапазоне температур выше температуры начала прямого мартенситного превращения появляется реверсивная обратимая память формы. Обратимая память формы аустенитного типа после высокоскоростного и квазистатического нагружений практически не отличается друг от друга.

Таким образом, в работе установлены основные закономерности изменения механических и функциональных свойств никелида титана с вариацией температуры, при которой осуществлялось квазистатическое и высокоскоростное нагружение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-01-00050.

УДК 621.315.59:546.681:535.37

ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ALGAN СЛОЕВ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛАНА

И.В. Осинных

(Новосибирский государственный университет)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., вед.н.с. К.С. Журавлев

(Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН)

Прямозонные полупроводники GaN и AlGaN – очень удобные материалы для разработки светодиодов и фотодетекторов ультрафиолетового спектрального диапазона, транзисторов с высокой подвижностью электронов, резонансно туннельных диодов. Изменяя содержание Al в твердых растворах AlGa_xN_{1-x}, можно получать материал с шириной запрещенной зоны от 3,43 до 6,2 эВ, покрывая, таким образом, спектральный диапазон 200–365 нм. В процессе роста AlGa_xN_{1-x} слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) из аммиака в качестве источника легирования традиционно используется кремний. Примесь кремния, однако, сложным образом воздействует на свойства выращенных слоев. Целью

работы было исследование влияния кремния на морфологию поверхности, структурные, электрические и люминесцентные свойства слоев AlGaN.

Слои GaN и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ толщиной 1,1–1,3 мкм были выращены методом МЛЭ из аммиака на (0001)-ориентированной сапфировой подложке. В качестве источника легирования использовался силан (SiH_4). Концентрация атомов кремния в слоях измерена методом вторичной ионной масс спектроскопии (ВИМС). Структурные свойства выращенных слоев были исследованы средствами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской дифрактометрии. Радиус кривизны образцов определялся на двухкристальном дифрактометре (ДКД). На трехкристальном дифрактометре (ТКД) регистрировались дифракционные пики для $(2\theta-\omega)$ - и ω -мод сканирования, дающих распределение дифрагированной интенсивности вдоль вектора дифракции \mathbf{H} и по нормали к нему, соответственно. Анализировалась полная ширина на половине максимума интенсивности (FWHM) для этих мод сканирования. Электрические свойства были определены из холловских измерений и спектров комбинационного рассеяния света, оптические свойства были исследованы методами фотолюминесцентной (ФЛ) и катодолуминесцентной (КЛ) спектроскопии.

С ростом потока силана концентрация примесных атомов кремния в выращенных слоях линейно возрастала, в тоже время линейная зависимость концентрации электронов от потока силана наблюдалась только для слоев GaN, в случае $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ зависимость была корневой. Спектры ФЛ исследуемых образцов при комнатной температуре содержат ультрафиолетовую полосу краевой люминесценции с максимумом на уровне ширины запрещенной зоны, соответствующей переходам зона-зона, и широкую желтую полосу, которую связывают с рекомбинацией через структурные дефекты. Интенсивность желтой полосы падает с ростом уровня легирования. Полоса краевой люминесценции состоит из двух пиков, соотношение интенсивностей которых меняется с ростом концентрации кремния в слоях. Этот эффект связан с частичной релаксацией слоев, основной пик соответствует напряженной фазе, а дополнительный – релаксированной. О расщеплении слоев свидетельствует также форма $(2\theta-\omega)$ – ТКД кривых дифракции слоев GaN и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$, помимо основного пика они содержат дополнительное плечо, амплитуда которого растет с ростом легирования и трансформируется в отдельный пик у сильнолегированных образцов $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$. При слабом уровне легирования в спектрах ФЛ слоев GaN присутствует только один пик с максимумом при 3,42–3,43 эВ, что превышает значение запрещенной зоны GaN ненапряженного GaN и свидетельствует о доминировании напряженной фазы. При росте уровня легирования начинает проявляться низкоэнергетичное плечо полосы краевой люминесценции, что показывает увеличение доли релаксированной фазы в слоях GaN. В спектрах ФЛ слоев $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ два пика наблюдались при возбуждении излучением лазера с длиной волны 244 нм, тогда как при возбуждении лазером с длиной волны 266 нм регистрировалась только одна полоса краевой ФЛ, которая соответствует напряженному слою. В спектрах ФЛ нелегированных образцов при возбуждении коротковолновым (244 нм) лазером присутствовала также полоса, связанная с релаксированной фазой. При росте уровня легирования высокоэнергетичный пик пропадает и остается только пик, соответствующий переходам в релаксированной фазе. Биаксиальные напряжения в напряженной фазе были определены по сдвигу пика краевой люминесценции по сравнению с объемным материалом, который был вычислен с учетом эффекта Бурштейна-Мосса [1] и сужения запрещенной зоны при легировании [2]. Также напряжения были рассчитаны из величин радиусов кривизны образцов, полученные значения были меньше, чем из сдвига ФЛ пика, что связано с усреднением по всему объему слоев.

С ростом уровня легирования структурное совершенство исследуемых образцов ухудшалось, однако при этом интенсивность краевой люминесценции возрастала. После достижения критического значения концентрации ($>5,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для GaN и $>3,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$) интенсивность люминесценции резко падала до уровней нелегированных

образцов. Механизм данного явления, скорее всего, различался для слоев GaN и $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$. Интенсивность люминесценции пропорциональна отношению концентрации доноров (N_D) к концентрации центров безызлучательной рекомбинации (N_{NR}), таким образом, интенсивность люминесценции растет, если N_D увеличится быстрее, чем N_{NR} [3]. В слоях GaN N_{NR} увеличивается медленнее, чем N_D с увеличением уровня легирования. Однако в сильнолегированных образцах электроны заполняют зону проводимости и делокализуются. Эти свободные электроны могут быть легко захвачены центрами безызлучательной рекомбинации, следовательно, интенсивность излучательной рекомбинации падает. В то же время легирование вызывает образование дефектов, становящихся ловушками для электронов. При очень высоком уровне легирования слоев AlGaN безызлучательный канал рекомбинации становится доминирующим. Увеличение плотности прорастающих дислокаций с повышением потока силана ведет себя похожим способом для сплавов GaN и AlGaN, поэтому канал безызлучательной рекомбинации не обусловлен этим типом структурных дефектов.

Литература

1. Cavalcoli D., Pandey S., Fraboni B. and Cavallini A. Band gap shift in $Al_{1-x}In_xN/AlN/GaN$ heterostructures studied by surface photovoltage spectroscopy // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 98. – P. 142111.
2. Bulutay C., Turgut C.M. and Zakhleniuk N.A. Carrier-induced refractive index change and optical absorption in wurtzite InN and GaN: Fullband approach // Phys. Rev. B. – 2010. – V. 81. – P. 155206.
3. Schubert E.F., Goepfert I.D. and Grieshaber W., Redwing J.M. Optical properties of Si-doped GaN // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V. 71. – P. 921–923.

УДК 621.316

ПОВЕДЕНИЕ ZNO ВАРИСТОРОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Д.Б. Пинская

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина))

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.А. Мошников

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина))

Оксидно-цинковые керамические варисторы широко применяются для защиты мощных современных электродвигателей, используемых на транспорте. Поглощаемая варистором и рассеиваемая в виде тепла энергия может приводить к значительному разогреву устройства. Для стабильной работы варистора необходимо обеспечить достаточный теплоотвод, чтобы предотвратить переход варистора в состояние саморазогрева и теплового пробоя. Однако конструкция большинства современных ограничителей перенапряжения подразумевает использование различных компаундов для достижения необходимой гидро- и электроизоляции, что, в свою очередь, затрудняет теплоотвод. В связи с этим приходится снижать длительно-допустимое рабочее напряжение варисторов для предохранения устройства от перегрузок при выделении чрезмерно избыточного количества тепла.

Целью работы было исследование поведения варисторов различного состава в условиях повышенной температуры окружающей среды и тепловой стабильности при моделировании ситуации саморазогрева. Построены зависимости плотности токов утечки варисторов различных составов от приложенного рабочего напряжения при температурах 25

и 110°C.

Варисторы для данного исследования были получены по классической керамической технологии с использованием прогрессивной технологии ротационно-пульсационного смешения наноразмерных порошков в жидкой среде. Полученные порошки высушивались, гранулировались со связкой и прессовались в диски диаметром 46 мм и толщиной 5 мм при давлении 0,5 т/см². После чего образцы подвергались обжигу в камерной печи при температуре 1140°C. Далее проводилась термообработка при температурах размягчения стеклофазы, необходимая для достижения большей нелинейности и уменьшающая деградацию варисторов. И методом шопирования алюминием на торцевые поверхности наносились электроды. Были изготовлены опытные образцы стандартного производственного состава, состава с повышенной концентрацией оксида марганца и составов, допированных оксидами иттрия и циркония.

Исследование образцов проводилось по методикам, разработанным в соответствии со стандартом МЭК-99-4, на специализированном оборудовании для измерения электрических характеристик.

Измерения токов утечки проводились при рабочих напряжениях, равных 0,8; 0,85 и 0,9 от классификационного уровня (измеренного при плотности тока 60 мкА/см²). Ток утечки фиксировался при комнатной температуре при трех значениях напряжения, после чего образцы нагревались в термостате до температуры рабочих испытаний варисторов (110±5°C), и после выдержки в 10 минут снова фиксировались значения токов при трех рабочих напряжениях.

Результаты показали, значительное снижение токов утечки допированных варисторов по сравнению с образцами стандартного состава. Разница в значениях плотности токов утечки варисторов различного состава увеличивается при переходе от комнатной к повышенной температуре окружающей среды с сохранением явного преимущества иттриево-циркониевых образцов.

Исследования термостабильности варисторов стандартного и допированного составов проводились при моделировании условий саморазогрева варистора проходящим через него током. Варистор помещался в теплоизолированный корпус для ослабления теплоотдачи через электроды и нагревался в термостате до 60°C, после чего к нему прикладывалось рабочее напряжение в диапазоне от 0,8 до 0,9 от классификационного и с выдержкой по 10–20 минут регистрировались изменения температуры варистора и тока утечки. Затем на варистор подавали большее напряжение (0,91–0,99 от классификационного), необходимо-достаточное для того, чтобы он начал разогреваться собственным током, и по достижении варистором температуры в 100°C напряжение уменьшалось до уровня 0,9, а в случае отсутствия видимого начала охлаждения – до 0,85.

Результаты показали, что иттриево-циркониевые варисторы обладают улучшенной термостабильностью по сравнению со стандартными: опытный образец в меньшей степени разогревался в процессе выдержки при рабочем напряжении, перешел в состояние саморазогрева при большем приложенном напряжении, вышел из этого состояния уже при снижении напряжения до $0,9U_{кл}$ и охлаждался быстрее, чем образец стандартного состава.

Срок службы и безотказная работа варистора определяются не только ресурсом пропускной способности, но и возможностью их теплового пробоя в результате старения или в экстремальных условиях использования (повышенная температура и влажность окружающей среды). Допирование варисторной керамики оксидами иттрия и циркония позволяет повысить защитный уровень варисторов в области малых токов и поднять рабочее напряжение до 0,9 от классификационного за счет снижения токов утечки.

Работа выполнена на Научно-производственной фирме «Магнетон Варистор». Результаты внедрены в производственный процесс и используются при производстве мощных защитных устройств для силовой электроники, создании уникальных энергопоглотителей ЭПН 4/100-2 для защиты системы электропривода первого российско-

немецкого магистрального электровоза нового поколения с асинхронным тяговым приводом 2ЭС10, получивший название «ГРАНИТ».

УДК 544.032.65

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ

А.А. Слабодянюк, А.В. Откеева, Ф.С. Погорелый
Научный руководитель – д.т.н., профессор В.П. Вейко

Необходимость в улучшении свойств используемых в промышленности деталей и материалов создает потребность в получении антикоррозийных, адгезионных, обладающих высокой биосовместимостью и других функциональных поверхностей. Ключевым параметром взаимодействия жидкости с металлом является угол смачивания, и от него зависят такие свойства как устойчивость к коррозии, обледенению, а также каталитическая активность.

Лазерное формирование структуры поверхности металла предоставляет уникальную возможность управления геометрией поверхности металлов, что позволяет изменять физико-химические свойства.

Механические методы обработки поверхности материалов предполагают контактную форму, а также ограничены областью обработки материала.

Цель работы. Исследование возможности управления гидрофизическими свойствами поверхности металлов методом формирования упорядоченных структур в процессе лазерного локального воздействия в любой области обработки.

Базовые положения исследования. Гидрофобные и супергидрофобные материалы обладают рядом уникальных свойств, таких как водонепроницаемость, стойкость к коррозии и др. Вблизи поверхности гидрофобных материалов облегчено скольжение жидкости.

Формирование рельефа на поверхности в большинстве рассмотренных в работе случаев происходит за счет расплавления приповерхностного слоя металла. При этом следует отметить антибактериальный эффект, лазерного воздействия при структурировании поверхности.

Контакт жидкости с поверхностью может быть осуществлен двумя способами – гетерогенным и гомогенным. Из которых наибольший интерес представляет гетерогенный способ.

Ключевым параметром взаимодействия жидкости с твердым телом является угол смачивания, и от него зависят такие свойства как устойчивость к коррозии, обледенению, каталитическая активность.

Результаты

- Продемонстрирована возможность получения рельефа с гидрофобными и гидрофильными свойствами на поверхности стали и титана путем обработки лазерным излучением с $\lambda=1,06$ мкм.
- Определена зависимость гидрофобности от геометрии рельефа для стали.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Ю.С. Кукуня, Е.Ю. Ремшев

(Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Титов

(Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

На машиностроительных предприятиях большую актуальность имеют задачи оценки качества исходного материала и прогнозирования эксплуатационных характеристик готовых изделий. В настоящее время на предприятиях, как правило, осуществляется выборочный контроль качества исходного материала, часто методом визуального осмотра. Существующие методики имеют повышенную трудоемкость и не всегда гарантируют высокий результат. На стадии входного контроля технологического процесса предлагается внедрить методику, основанную на регистрации сигналов акустической эмиссии, которая позволит без больших затрат времени дать оценку качества поступившего исходного материала на соответствие его свойств значениям, указанным в сертификате и на отсутствие недопустимых дефектов. Также важно уметь прогнозировать качество изготовленного изделия во времени (эксплуатационные свойства). Существующие в настоящее время способы прогнозирования эксплуатационных характеристик машиностроительных изделий в большинстве своем разрушающие, основаны на результатах оценки выборочной партии изделий, связаны со значительными трудовыми и энергетическими затратами. Предлагается использовать методику, основанную на регистрации сигналов акустической эмиссии. Методика встраивается в технологический процесс и позволяет контролировать 100% изготавливаемой продукции. Научные результаты экспериментального исследования установления закономерностей между параметрами акустической эмиссии и эксплуатационными свойствами упругих элементов [1–3].

1. Проведен анализ применения метода акустической эмиссии для выявления наружных и внутренних дефектов в металлических деталях и прогнозирования релаксационных свойств упругих элементов механизмов при статическом, динамическом и циклическом нагружении в процессе длительного срока эксплуатации. Обоснована актуальность применения метода акустической эмиссии для оценки качества и прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин.
2. На основании результатов экспериментального исследования установлены закономерности изменения уровня сигналов акустической эмиссии в зависимости от наличия и развития дефектов, релаксационной стойкости и микроструктуры тарельчатых пружин на этапе их изготовления и предэксплуатационных испытаний, установлены критерии оценки микроструктуры титанового сплава ВТ23 на основе уровня сигналов акустической эмиссии.
3. Построены двухфакторные математические модели прогнозирования для количественной оценки релаксационной стойкости тарельчатых пружин (из стали 60С2А и титанового сплава ВТ23) в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии.
4. Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследования и построена научно обоснованная методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин из сталей и титановых сплавов на базе установленных закономерностей изменения сигналов акустической эмиссии.
5. Получен патент на изобретение №2011132601/28(048037) «Способ прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин». Разработанная методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин внедрена в технологический процесс изготовления в виде отдельного контрольного блока

предъэксплуатационной подготовки изделия на предприятии ОАО «НПП Пружинный центр» г. Санкт-Петербург.

6. В номинации «лучший инновационный проект» на всероссийском конкурсе научных и инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых по основным направлениям инновационного развития крупнейших отечественных компаний, работающих в области машиностроения, телекоммуникаций и связи в 2012 г. получен приз 1 степени, в основу проекта вошли результаты научно-исследовательской работы.

В работе установлены зависимости между уровнями сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении и релаксацией тарельчатых пружин, под действием циклических нагрузок. Показана возможность применения метода акустической эмиссии для качественной оценки микроструктуры тарельчатых пружин изготовленных из рессорно-пружинной стали и титанового сплава ВТ23. Разработаны математические модели прогнозирования релаксации в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии и временем эксплуатации. В некоторых случаях несоответствие параметров физико-механических свойств исходного материала приводит к технологическим отказам в процессе изготовления изделия. Наличие поверхностных и внутренних дефектов приводит к разрушению полуфабрикатов в процессе изготовления. Отсутствие возможности прогнозирования эксплуатационных свойств каждого изготовленного изделия может привести к эксплуатационным отказам в процессе работы. Существуют изделия контроль параметров качества, которых невозможен после установки его в узел (космические, морские системы и т.д.), применение методик прогнозирования на базе метода акустической эмиссии, которые встраиваются в технологический процесс изготовления, позволят качественно и количественно оценивать параметры качества изделия и изменение эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Данилин Г.А., Титов А.В., Ремшев Е.Ю. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе излучения сигналов акустической эмиссии // Металлообработка. – 2011. – № 2. – С. 17–21.
2. Данилин Г.А., Титов А.В., Ремшев Е.Ю. и др. Оценка релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе метода акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 3. – С. 41–44.
3. Ремшев Е.Ю. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества тарельчатых пружин из сплава ВТ23 // Металлообработка. – 2012. – № 4. – С. 27–33.

УДК 778.38; 535.317.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ СЕРЕБРА В НАНОПОРИСТЫХ МАТРИЦАХ

С.В. Саитов, Н.В. Андреева

Научный руководитель – к.ф.-м.н., с.н.с., доцент О.В. Андреева

Развитие трехмерной голографии и ее практических применений неотделимы от прогресса в области разработки и создания материалов для регистрации трехмерных голограмм. В разное время использовались различные регистрирующие среды: кристаллы, фотохромные стекла и т.п., которые не удовлетворяют комплексу требований, предъявляемых к средам для регистрации объемных голограмм, предназначенных для использования в качестве голограммных оптических элементов и голограмм с долговременным хранением информации.

Данная работа посвящена исследованию оптических свойств коллоидных частиц

серебра в регистрирующих средах для объемной голографии на основе нанопористых матриц. Образцы таких сред представляют собой пористый каркас, внутри которого находится светочувствительная композиция, занимающая только часть свободного объема пор (около 50%). Отличительной особенностью галогенидосеребряных пористых сред является их безусадочность и возможность использования традиционной химико-фотографической обработки, разработанной для фотоматериалов на стеклянной подложке. Экспериментальные исследования спектров ослабления проявленных частиц проводились для образцов нанопористой среды со светочувствительной композицией AgHal в желатине, и фотопластинок ПФГ-03 в воздушно-сухом состоянии и в водной иммерсии. Для сравнения были рассмотрены образцы нанопористых сред с частицами коллоидного серебра, полученными химическим методом. Полученные экспериментальные данные были использованы для оценки показателя преломления среды, окружающей частицу серебра при введении иммерсий с различными показателями преломления.

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты: измерены спектры поглощения образцов в воздушно-сухом состоянии и в водной среде. Показано, что при перемещении образцов из воздушной среды в водную в связи с изменением показателя преломления среды, окружающей частицу серебра, происходит сдвиг спектров: для проявленных образцов AgHal-ПС в длинноволновую область на 40 нм, для образцов Ag-ПС также в длинноволновую область спектра на ~20 нм, для проявленных образцов ПФГ-03 в коротковолновую область спектра на 40 нм. На основании теоретических представлений оценена величина изменения показателя преломления (Δn) среды, окружающей частицу серебра, при перемещении исследуемых образцов из воздушной среды в водную: $\Delta n = -0,15$ (ПФГ-03), $\Delta n = +0,15$ (AgHal-ПС), $\Delta n = +0,33$ (Ag-ПС). Сделано предположение о том, что в проявленных образцах AgHal-ПС частица серебра находится в порах кварцевого каркаса с желатиновой оболочкой, которая в воздушно-сухом состоянии занимает около 20% свободного объема пор.

УДК 538.95

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

О.Н. Сергаева, В.В. Свирина

Научный руководитель – д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев

Модель лазерного окисления разработана еще в 1970-е гг., до появления лазеров, способных генерировать ультракороткие импульсы [1]. Эта модель основана на вагнеровском законе, учитывающем рост окисла только на поверхности. Согласно модели поверхностного окисления, воздействие ультракоротких лазерных импульсов не должно инициировать рост окисной пленки на поверхности металлов [2]. Однако, в экспериментах [3] было показано окисление металлических пленок при воздействии как серии ультракоротких лазерных импульсов, так и одиночных импульсов. Поэтому появилась необходимость более детального изучения механизмов окисления ультракороткими лазерными импульсами. Выяснение механизма окисления металлических пленок под действием лазерного излучения позволит более эффективно использовать лазерный термохимический метод на производстве, и в частности усовершенствовать технологии изготовления ДОЭ, увеличив их разрешающую способность.

Цель исследования – выяснение механизма окисления тонких металлических пленок под действием ультракоротких лазерных импульсов.

Окисление металла проходит через несколько стадий и включает в себя адсорбцию кислорода на поверхности, связывание свободных электронов металла или растущего окисла,

диффузию и электроперенос ионов металла и кислорода по вакансиям, междоузлиям и другим дефектам сквозь слой продукта реакции к межфазным границам и собственно химическую реакцию с образованием нового слоя окисла [2].

В работе рассмотрено окисление тонкой пленки хрома на подложке из стекла, происходящее при воздействии последовательности ультракоротких импульсов лазерного излучения. Окисление было смоделировано в условиях, совпадающих с экспериментальными [3], что позволило сделать выводы об адекватности полученных результатов. Численное моделирование проводилось на основе метода конечных разностей с использованием явной разностной схемы. Процесс окисления был рассмотрен на основе моделей поверхностного и объемного окисления, а также с учетом влияния многоквантового фотофозбуждения на кинетику окисления.

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что лазерное окисление при воздействии ультракоротких лазерных импульсов происходит по нескольким механизмам одновременно.

Литература

1. Вейко В.П., Котов Г.А., Либенсон М.Н. и Никитин М.Н. Термохимическое действие лазерного излучения // Доклады АН СССР – 1973. – Т. 208. – С. 587–590.
2. Либенсон М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. – СПб: Наука, 2007. – 423 с.
3. Вейко В.П., Иванов А.И., Ярчук М.В. Исследование низкочастотных механизмов модификации структуры тонких пленок хрома под действием сверхкоротких лазерных импульсов // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78. – № 8. – С. 56–64.

УДК 544.032.65

РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

А.М. Кулажкин, Д.А. Синев

Научный руководитель – д.т.н., профессор Е.А. Шахно

Термохимическое действие лазерного излучения на тонкие пленки является основой целого ряда технологических процессов формирования пленочных элементов и структур в оптике, микроэлектронике, информационных системах и т.п. В последние годы интерес к этому направлению возрос вследствие ужесточения требований к разрешающей способности и размерам получаемых элементов.

Последние теоретические и экспериментальные исследования одного из традиционных направлений лазерной термохимии – окисления тонких пленок хрома – показали [1], что нелинейность зависимости скорости окисления пленки от ее температуры является причиной возможного достижения высокой разрешающей способности, превышающей разрешающую способность оптики. Однако существенным недостатком технологии локального лазерного окисления пленок хрома является необходимость проведения операции травления необлученных областей пленки после лазерной обработки для выявления «скрытого» изображения. В этом отношении представляет интерес исследование возможностей локального лазерного окисления пленок титана. Показатели поглощения излучения титаном и его окислами значительно различаются, так что тонкие пленки титана при сквозном окислении имеют большое пропускание и оптически контрастируют с необработанными областями пленки, что исключает необходимость последующего травления, как это было показано ранее экспериментально [2].

Теоретическое исследование процессов локального лазерного окисления тонких пленок

необходимо для адекватного выбора параметров режима обработки, позволяющих достигнуть минимальных размеров получаемых элементов. Разработанная ранее расчетная модель локального лазерного окисления пленок хрома выявила оптимальные режимы обработки, которые были также подтверждено экспериментально [1]. Окисление титановых пленок не может быть проведено по этой модели вследствие существенной нелинейности процесса, связанной с изменением поглощательной способности пленки непосредственно в процессе обработки.

В настоящей работе разработаны основы расчетной модели импульсного локального лазерного окисления тонких пленок титана. Расчет тепловых полей проведен методом источников. На основе кинетики изменения температуры рассчитана толщина образующегося слоя окисла. Разработанная математическая модель позволяет исследовать геометрические характеристики получаемых элементов в зависимости от параметров режима обработки.

Данная работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 12-02-00974-а.

Литература

1. Вейко В.П., Синёв Д.А., Шахно Е.А., Полещук А.Г., Саметов А.Р., Седухин А.Г. Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36. – № 4. – С. 562–571.
2. Gorbunov A.A., Eichler H., Pompe W., Huey B. Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films // Appl.Phys.Lett. – 1996. – V. 69(19). – P. 2816–2819.

УДК 621.382.002

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТВОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ КОМПЛЕМЕНТАРНОЙ ПАРЫ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ИС 590-ОЙ СЕРИИ И.С. Сорочан, А.А. Мямикеев, Е.Д. Гончаров Научный руководитель – д.т.н., профессор А.М. Скворцов

На основе изучения технологического процесса изготовления МОП ИС 590-ой серии разработан технологический процесс изготовления тестовых образцов, представляющих собой затворную композицию комплементарной пары транзисторов:

- подготовка подложек, включающая очистку подложек травителях в растворах КАРО и ПАР;
- окисление подложек (выращивание в специальных условиях слоя подзатворного диэлектрика толщиной 0,12 мкм);
- осаждение поликристаллического кремния с разными толщинами слоев на окисленных подложках (0,50; 0,35; 0,20; 0,10 мкм);
- очистка в перекисно-аммиачном растворе;
- легирование поликристаллического кремния с помощью диффузии фосфора из газовой фазы при температуре 950°C;
- травление фосфоро-силикатного стекла в растворе плавиковой кислоты;
- фотолитография в слое поликристаллического кремния (формирование затворов МОП-транзисторов);
- очистка в растворах КАРО и ПАР;
- напыление алюминия;
- фотолитография в слое алюминия (формирование омических контактов);
- очистка в растворах КАРО и ПАР.

На тестовых образцах проведены исследования вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик и проведено сопоставление полученных измерений на сформированных подложках. Установлена связь пороговых напряжений и напряжений плоских зон при анализе вольт-фарадных характеристик. Сопоставлены значения пробивных напряжений затворных композиций в зависимости от структуры затворной композиции.

УДК 669, 621.745

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ ШИХТЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

А.Н. Тюрин

(Тульский государственный университет)

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.А. Протопопов

(Тульский государственный университет)

В настоящее время с ростом дефицита чистой металлошихты необходимой для выплавки сталей все большую популярность получает применение композиционных материалов в качестве шихтового материала. Использование данных материалов обусловлено возможностью влияния на физико-химические и тепловые процессы внутри сталеплавильных печей путем ввода дополнительных компонентов на стадии производства шихтового материала.

Наиболее распространенным композиционным материалом, используемым при выплавке стали является синтиком, который получают введением в жидкий чугуны или другие железоуглеродистые расплавы во время их разлива в чушки различных материалов, прежде всего оксидов железа и углеродсодержащих материалов. Количество наполнителя варьируется в пределах от 5 до 50% от общей массы.

По ходу плавления чушек синтика компоненты, входящие в их состав – железо, углерод и другие химические элементы реагируют с кислородом. Взаимодействие между собой компонентов плавки в результате приводит к тому, что первоначальная (исходная) концентрация элементов и углерода металлической основе снижается, образуя шлаковую массу.

Так применение синтика позволяет улучшить использование углерода как топлива и восстановителя в электропечах вследствие увеличения степени дожигания СО до СО₂ при непрерывном в течение всей плавки окислении углерода. Одновременное наличие в материале оксидов железа, углерода и шлакообразующих элементов, развитой поверхности контакта основы и наполнителя, а также пониженная температура плавления шихты обеспечивают высокие скорости протекания окислительно-восстановительных реакций и как следствие увеличение производительности, меньшее энергопотребление, лучшую экологичность сталеплавильного процесса. Снижаются затраты, связанные с эксплуатацией и обслуживанием тепловых агрегатов.

В последнее время широкое применение также получили брикеты, изготавливаемые методом «холодного» брикетирования, основу которых, как правило, составляет стальная и чугунная стружка. При этом в качестве добавок могут использоваться всевозможные компоненты, добавление которых при производстве синтика не представлялось бы возможным по причине всплытия легковесных элементов из-за разности плотностей их с жидким чугуном.

К данному классу шихты относятся металлургические брикеты, основные добавляемые компоненты которых состоят из оксидов железа и углерод, идущий на восстановление и науглераживание восстановленного железа. При этом существенным фактором регулирования соотношения углерод/оксиды железа является открытая пористость

брикета, которая в одном случае привлекает восстановительный газ в печи для процессов, идущих в теле брикета, в другом, не дает доступа кислорода для дополнительного окисления углерода. Основным принципом работы брикетов является прямое восстановление оксидов железа углеродом за счет многочисленных и сильно развитых контактов этих составляющих внутри брикетов.

Нередко, применяются металлургические брикеты, в которые не добавляются углеродистые составляющие, т.е. их основой является восстановленное железо, оксиды железа и флюсующее вяжущее. Технологическая задача этих брикетов состоит в создании фракционной шихты с высоким содержанием железа из мелкофракционных и тонкодисперсных материалов, к которым можно отнести отсев чугуновой дробы, чугуновую стружку, металлоотсевы, дробленую стальную стружку, окалину и т.п. В данном случае экономический эффект достигается за счет улучшения газодинамики процесса. При этом процесс производства брикета более экономичен и прост, чем для производства с использованием жидкого металла.

Возможность свободного контроля физико-химическими и тепловыми процессами в сталеплавильных печах за счет использования таких новых видов сталеплавильной шихты как композиционные материалы выводят производство стали на новый уровень, в результате которого добавленные в матрицу шихтового материала компоненты способны оказывать влияния на скорость и интенсивность протекания основных окислительно-восстановительных реакций процесса производства стали.

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ НА ЭНЕРГИЮ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.А. Храмков

(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

Научный руководитель – д.т.н., доцент Е.Л. Лебедев

(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)

Оценка остаточного ресурса металлических конструкций критически важных объектов является в настоящее время одним из важнейших направлений науки о прочности металлических материалов. В частности, для определения остаточного ресурса объекта необходимо знать, как изменились механические свойства металлических конструкций. Для определения механических свойств, применяют структурно-чувствительные физические методы исследования (удельное сопротивление, коэрцитивную силу, определение модуля нормальной упругости и его амплитудной зависимости). Однако данные методы имеют некоторые ограничения в применении [1]. В работе рассмотрен один из перспективных методов неразрушающего контроля механических характеристик – метод акустической эмиссии. **Целью работы** является проведение экспериментальных исследований по оцениванию источников акустико-эмиссионных сигналов в металлах как информативных признаков для определения их механических характеристик.

Источники акустической эмиссии можно условно классифицировать на две группы. Первая группа является следствием изменения внутренней структуры под воздействием внешних сил (движение дислокаций к краям зерен, скопление дислокаций, выход дислокаций на свободную поверхность, торможение быстро движущихся дислокаций, формирование полосы скольжения). Вторая группа является следствием взаимодействия микродефектов, аннигиляции дислокаций, работа дислокационных источников, образование или захлопывание микроскопических скоплений, отрыв дислокаций от примесных атмосфер и прорыв препятствий, зернограничное скольжение [2]. Первую группу источников

планируется использовать как первичный информативный признак определения изменения механических свойств, основываясь на том, что до эксплуатации металлоконструкции плотность дислокаций в зернах металла равномерная, далее под воздействием внешних нагрузок (механических, тепловых) распределение дислокаций изменяется в сторону увеличения плотности на краях зерен.

Для проверки влияния распределения плотности дислокаций на характер сигналов акустической эмиссии был поставлен следующий эксперимент. Образец размером 10×10×55 мм, выполненный из материала Сталь 45, нагружался твердосплавным индентором (диаметром 5 мм, глубина вдавливания 0,8 мм) на твердомере ТБ-5001. В ранее выполненных работах нагрузка создавалась путем деформации исследуемой области одноосным растяжением или циклической нагрузкой. В предлагаемом эксперименте инициатором передвижения дислокаций является напряжения, создаваемые внедряемым индентором. Вдавливание индентора происходило последовательно с каждой стороны образца (по периметру). При каждом внедрении индентора регистрировались сигналы акустической эмиссии, для этого использовалась акустико-эмиссионная система «Малахит АС-12» с шумовым порогом датчиков 25 дБ. Статистическая обработка потока данных происходила путем суммирования энергии каждого зарегистрированного сигнала акустической эмиссии.

Проанализировав полученные экспериментальные данные можно сделать вывод о том, что при внедрении индентора создается сферическая область напряженно-деформированного состояния. Возникающие при этом напряжения (при превышении порога активации перемещения дислокаций) являются инициатором движения дислокаций в зернах металла, что в свою очередь оставляет свой след в виде зарегистрированных сигналов акустической эмиссии. Движения дислокаций приводит к изменению распределения плотности дислокаций в сторону увеличения ее концентрации на краях зерен. Дальнейшее движения дислокаций ограничено барьером в виде межзеренной границы, для преодоления которого необходима более высокая энергия, чем при иницировании движения в теле зерна. При последующем внедрении индентора с другой стороны образца наблюдается падение суммы энергии сигнала акустической эмиссии, это объясняется тем, что при перехлесте областей напряженно-деформированного состояния существует область, в которой передвижения дислокаций произошли при предыдущем нагружении.

Таким образом, в работе было показано, что плотность дислокаций, изменяясь в процессе воздействия напряжений в зернах металла, влияет на энергию сигналов акустической эмиссии.

Увеличение плотности дислокаций на краях зерен приводит к возрастанию вероятности образования трещин, путем объединения несплошностей, что является признаком предразрушающего состояния металла. Поэтому по измерению энергетической составляющей сигнала акустической эмиссии можно судить о распределении дислокаций внутри зерен неразрушающим способом. Распределение дислокаций в зерне один из информативных признаков, по которому можно сделать вывод об изменении механических свойств металла. Например, по этому признаку можно говорить о деградации механических свойств по причине предварительной упруго-пластической деформации. Кроме того данным способом можно определить зоны концентрации напряжений ввиду того, что при воздействии полей напряжений произойдет падение энергетической составляющей сигналов акустической эмиссии.

Литература

1. Семашко Н.В., Шпорт Б.Н. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
2. Фридель Ж. Дислокации. – М: Мир, 1967. – 643 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

А.А. Черкаев, М.А. Михайлов

Научный руководитель – д.т.н., доцент В.В. Манойлов

Краткое вступление, постановка задачи. Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) на сегодняшний день является базовым инструментом нанотехнологий. Он позволяет визуализировать поверхность и изучать широкий ряд характеристик изучаемого образца. Основным недостатком подобных систем является поточечное сканирование с применением цепей обратной связи (ОС), что, хотя и увеличивает точность измеряемых величин, в значительной степени замедляет работу СЗМ.

В качестве цифровой системы автоматического управления для СЗМ мы используем микроконтроллер Kinetis TWR-K60N512 на базе ядра ARM CortexM4 для обеспечения требуемой скорости и точности сканирования.

Задачи

1. Проанализировать различные алгоритмы системы автоматического управления СЗМ.
2. С помощью физико-математической модели фильтра, реализованного подпрограммой в микроконтроллере Kinetis TWR-K60N512, подобрать его параметры для получения различных переходных характеристик.
3. Произвести эксперименты, включив систему автоматического регулирования в состав СЗМ «NanoEducator», используя полученные алгоритмы.
4. Оценить качество регулирования. Сравнить полученные топологии поверхностей.

Промежуточные результаты. В среде моделирования Matlab Simulink была создана модель фильтра, реализованного в микроконтроллере. Для данной модели, с помощью инструментального пакета Simulink Response Optimization – Signal Constraint, были подобраны параметры фильтра, обеспечивающие различные переходные характеристики. С помощью подобранных параметров получили переходные характеристики с микроконтроллера.

Литература

1. Михайлов М.А., Манойлов В.В. Оценка параметров цифрового управления в зондовом микроскопе «NANO EDUCATOR» на основе физико-математической модели // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22. – № 2. – С. 98–104.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Российская академия наук. Институт физики микроструктур. – Нижний Новгород, 2004. – 110 с.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.