

## ФОРМИРОВАНИЕ ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК ТИПА $A^{III}B^V$ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ НАНОСЛОЕМ ХАЛЬКОГЕНИДОВ

контактов Ni/Ir – GaAs  $n$ -типа // Вестник ТГУ. Бюллетень оперативной научной информации. – 2003. № 11. – С. 5-22.

8. Фомина Л.В. Физико-химические аспекты формирования нанослоевых контактов Ir–GaAs  $n$ -типа в условиях халькогенной пассивации поверхности полупроводника и электрохимического осаждения металла // Автореф. ... кандидата химических наук. Барнаул, 2003. – 24 с.

9. Фомина Л.В., Безносюк С.А., Бочкарёв А.Г., Лебедеенко С.Е., Сподарев В.М. Халькогенная об-

работка при формировании выпрямляющих контактов металл VIII группы – полупроводник типа  $A^{III}B^V$  // Известия АлтГУ. – 2004. – № 3(33). – С. 42-48.

10. Фомина Л.В., Безносюк С.А., Лебедеенко С.Е., Привалов А.В. Термодинамика процесса халькогенной пассивации поверхности полупроводников типа  $A^{III}B^V$  // Ползуновский Вестник. – 2005. – № 4. – С. 139-142.

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ ХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Е.А. Тутов, В.И. Кукуев, Ф.А. Тума, Е.Е. Тутов, Е.Н. Бормонтов

*На примере тонких пленок триоксида вольфрама и гетероструктур Si/a-WO<sub>3</sub> показана возможность создания газовых и химических сенсоров с объемным (абсорбционным) механизмом чувствительности при достаточно высоких кинетических характеристиках. Электрофизический отклик сенсора связан как с вариацией стехиометрии в анионной подрешетке триоксида вольфрама, так и с внедрением катионов (H<sup>+</sup>) по структурным пустотам и образованием водородно-вольфрамовых бронз.*

### ВВЕДЕНИЕ

Достижения современной твердотельной микроэлектроники базируются на сочетании развитой теории твердого тела и физики полупроводников с успехами в технологии получения качественных монокристаллов и структур на их основе, в первую очередь, в области кремниевой технологии [1].

Наряду с этой генеральной линией, все большее значение приобретают фундаментальные и прикладные исследования материалов, отличающихся от идеализированных полупроводников и диэлектриков различными по характеру и масштабу пространственно-энергетическими неоднородностями, нанокристаллических, аморфных, пористых, (микро)гетерогенных и гетерофазных. Такие материалы и структуры на их основе зачастую обладают рядом уникальных свойств, отсутствующих у их монокристаллических аналогов, что определяет актуальность их изучения и приоритет его прикладного аспекта.

Исследование функциональных гетероструктур с неупорядоченными (нанокристаллическими) полупроводниками формируется в самостоятельное научное направление на стыке нанозлектроники, сенсорики и полупроводникового материаловедения [2].

Оксидные материалы, являясь самым распространенным типом соединений, проявляют и самый широкий диапазон свойств и наблюдаемых в них явлений. В некоторых высших оксидах переходных металлов с перовскитоподобной структурой металл-кислородные полиэдры сочленяются вершинами, что обеспечивает их максимальную подвижность и, как следствие, высокую чувствительность свойств к внешним воздействиям. В частности, протекание тока и ультрафиолетовое облучение приводят к обратимому появлению центров окраски (электро- и фотохромный эффекты). Эти эффекты, представляющие очевидный практический интерес, наиболее ярко выражены в тонких пленках аморфного триоксида вольфрама a-WO<sub>3</sub>–

основном объекте прикладных и фундаментальных исследований этих явлений.

В конце XX века наметилась явная тенденция к смещению интереса от области разработок пассивных устройств отображения, где электрохромные твердотельные дисплеи проиграли жидкокристаллическим, в область изучения других функциональных приложений  $\alpha\text{-WO}_3$ , в частности, в физических и химических сенсорах.

В настоящей работе отражены результаты экспериментальных исследований особенностей атомного и электронного строения пленок  $\alpha\text{-WO}_3$ , определяющих как проявление электро- и фотохромизма в этом материале, так и его сенсорные свойства.

### **БЛИЖНИЙ АТОМНЫЙ ПОРЯДОК В ПЛЕНКАХ $\alpha\text{-WO}_3$ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОКРАШИВАНИЯ, АБСОРБЦИИ И “СТАРЕНИЯ”**

Из арсенала многочисленных методов тонкопленочной технологии для получения пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  наибольшее распространение получила вакуумная конденсация термически испаренного материала ввиду относительной простоты этого метода, его технологической совместимости с другими операциями формирования многослойных электрохромных структур, хорошим качеством получаемых пленок и возможности управления их свойствами [3].

Локальный атомный порядок в пленках  $\alpha\text{-WO}_3$  изучали методом дифракции электронов высокой энергии “на просвет” и построения функций радиального распределения атомов (ФРПА) по стандартным методикам Фурье-преобразования.

Исследовали структуру прозрачных вакуумно-конденсированных пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  и пленок, окрашенных инъекцией водорода в момент его выделения при реакции цинка с соляной кислотой (аналог электрохромного процесса); пленок, окрашенных восстановлением при нагреве в вакууме (термохромный процесс); а также изучали влияние на строение пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  процессов абсорбции паров воды и “старения” [4,5].

В электрохромном процессе атомарный водород диссоциирует на каталитически активной поверхности  $\alpha\text{-WO}_3$ :



и образовавшиеся протон и электрон диффундируют в пленку триоксида вольфрама, обеспечивающую их пространственное и энергетическое разделение.

Анализ ФРПА и сопоставление радиусов координационных сфер и координационных чисел с параметрами кристаллического  $\text{WO}_3$  позволяет заключить, что вакуумно-конденсированная пленка  $\alpha\text{-WO}_3$  построена из правильных вольфрам-кислородных октаэдров, соединенных вершинами, причем упорядоченность в их расположении имеет одномерный характер. Наиболее вероятным элементом структуры такой пленки является цепочка из трех октаэдров с углом связи  $\text{W} - \text{O} - \text{W} \sim 150^\circ$ . Такая конфигурация октаэдров является структурным мотивом гексагональной модификации  $\text{WO}_3$ .

При окрашивании инъекцией водорода  $\text{WO}_6$  – октаэдр сохраняется неизменным, а перестройка локального порядка проявляется на ФРПА главным образом во второй координационной сфере и может быть представлена как взаимные развороты октаэдров с образованием планарных группировок из четырех таких октаэдров.

Конденсированные пленки  $\alpha\text{-WO}_3$  представляют собой термодинамически неустойчивый объект, и стабилизация их структуры может влиять на способность пленок к обратному окрашиванию. Высокая реакционная способность пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  проявляется в активной сорбции паров воды, которая располагается упорядоченно по структурным пустотам пленки.

Временная стабилизация строения пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  происходит с аксиальной деформацией основных структурных элементов ( $\text{WO}_6$  – октаэдров) и образованием из них двумерной сетки, что затрудняет их взаимные развороты и снижает способность пленок к обратному окрашиванию.

Термохромный процесс носит черты одновременно происходящих “старения” и окрашивания, поэтому ФРПА такой пленки имеет более сложный вид. В этом случае искажение октаэдров, затрудняющее изменение их взаимной ориентации, способствует более высокой стабильности окраски. Именно такие стабилизированные пленки и использовались при исследовании сенсорных свойств триоксида вольфрама.

Таким образом, с центром окраски ассоциируется конфигурация из четырех  $\text{WO}_6$  – октаэдров, центры которых лежат в одной плоскости. Протон или другой катион локализован в пространстве между октаэдрами. В этой позиции он расположен в непосредственной близости к ионам кислорода, а электрон, захваченный любым из этой группы октаэдров ионом вольфрама, приводит к ос-

лаблению связи соседних октаэдров. Происходящая при этом окислительно-восстановительная реакция, приводящая к образованию водородно-вольфрамовой бронзы – нестехиометрической фазы внедрения с широкой областью гомогенности, обычно представляется как

$WO_3$  (бесцветн.) +  $xe^- + xH^+ \leftrightarrow H_xWO_3$  (синяя), где  $0 \leq x \leq 0,5$ . Поглощение кванта света индуцирует интервалентный переход электрона между соседними ионами вольфрама разной степени окисления.

Этот переход электрона в структурном плане можно интерпретировать как переключение ослабленной связи  $W - O$ , которая, таким образом, будет делокализована в структурной группе из четырех октаэдров.

Отмеченные изменения в атомном строении пленок  $a-WO_3$  при окрашивании приводят к перестройке энергетического спектра электронов, для исследования которого привлекались методы рентгеновской и фотоэлектронной спектроскопии и вольт-фарадных характеристик.

#### ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛЕНОК ТРИОКСИДА ВОЛЬФРАМА И ГЕТЕРОСТРУКТУР $Si/a-WO_3$

В работе [6] парциальная плотность  $2p$  – состояний кислорода в валентной зоне  $WO_3$  изучалась с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра САРФ-1. Снимали  $K_{\alpha}$  – эмиссионную полосу кислорода, отвечающую переходам с  $O2p$ – на  $O1s$ – уровень. В приближении дипольных правил отбора К-спектры отражают распределение состояний  $p$ -симметрии [7].

Там же представлены результаты исследования электронного строения пленок триоксида вольфрама методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с помощью прибора РН1-551 в автоматическом режиме при возбуждении  $MgK_{\alpha}$  – излучением. Окрашивание пленки  $a-WO_3$  происходит с упорядочением ее строения, что подтверждается уменьшением “хвоста” плотности состояний в запрещенной щели на рентгено-электронных спектрах. На фоне этого упорядочения центр окраски является электронным дефектом, приводящим к уширению валентной полосы, что свидетельствует об уменьшении ионной составляющей связи  $W - O$  в окрашенной пленке. Электронная плотность с  $\sigma$ -связывающих молекулярных орбиталей передается на образующуюся при ок-

рашивании связь  $O - H$ , что приводит к появлению неэквивалентных связей  $W - O$ .

Инжектированные в пленку  $a-WO_3$  при окрашивании электроны приводят к уменьшению заряда на металле и к заполнению полосы состояний в запрещенной зоне триоксида вольфрама (рис.1), что связано с сильной пространственной локализацией  $5d$ -электронов вольфрама.

Дополнительную информацию о перераспределении электронной плотности и зарядов в пленках  $a-WO_3$  при окрашивании можно получить из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) гетероструктуры  $Si/a-WO_3$ , граница раздела которой отражает электронные процессы в триоксиде вольфрама. Результаты электрофизических исследований процессов возникновения центров окраски в  $a-WO_3$  также свидетельствуют об увеличении отрицательного заряда в триоксиде вольфрама и плотности поверхностных состояний на его гетерогранице с кремнием [6,8].

В работе [8] впервые фактически показаны возможности применения метода ВФХ к исследованию процессов дефектообразования в металлоксидных пленках на кремнии. Дальнейшее развитие эта идея получила в работах [9,10], где проведено систематическое изучение взаимосвязи ВФХ МДП структуры с пленками триоксида вольфрама со стехиометрией последних. По проявлениям в электронных процессах, отражаемых ВФХ структуры  $Si/a-WO_3$ , оказалось возможным увидеть тонкие различия в природе и механизмах электро- и фотохромизма, в то время как оптические и рентгеноэлектронные методы исследования в силу их меньшей чувствительности дают усредненную картину энергетического строения центров окраски различного происхождения.

Насыщение структурных пустот в  $a-WO_3$  молекулами, которые могут при внешнем воздействии отдавать электроны, то есть действовать как восстановители и способствовать образованию центров окраски, используется для визуализации такого воздействия.

Изменение оптических характеристик  $a-WO_3$  происходит при значительных концентрациях сорбата. Гораздо меньшие концентрации сорбируемых пленками  $a-WO_3$  молекул восстановителей и окислителей (донорных и акцепторных соответственно) могут быть зафиксированы электрофизическими методами, что лежит в основе использования пленок триоксида вольфрама в химических и газовых сенсорах [11-15].

В литературе рассматривалась возможность использования таких диодных структур как (фото)детекторов газов. По существу, изменение вольт-фарадной характеристики в рассмотренных электро- и фотохромном процессах демонстрирует работу этой структуры как химического сенсора водорода. Известно, что пленки  $\alpha$ - $\text{WO}_3$  хемосорбируют воду и другие водо-родсодержащие вещества, являющиеся усилителями фотохромизма, - спирты, альдегиды и др., отщепление протонов от которых приводит к следствиям, аналогичным прямой инжекции водорода. В сенсорных гетероструктурах, в отличие от обычной пассивной функции подзатворного диэлектрика, пленка  $\alpha$ - $\text{WO}_3$  является активным газо- или ионочувствительным слоем.

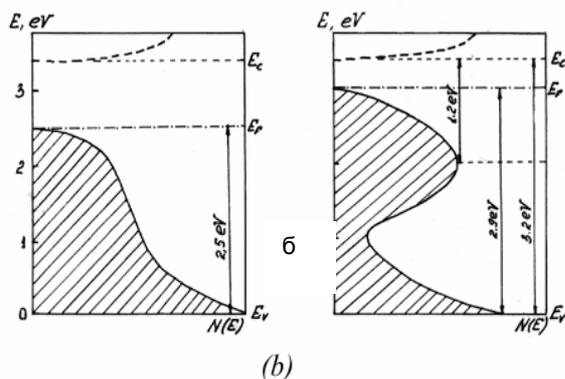
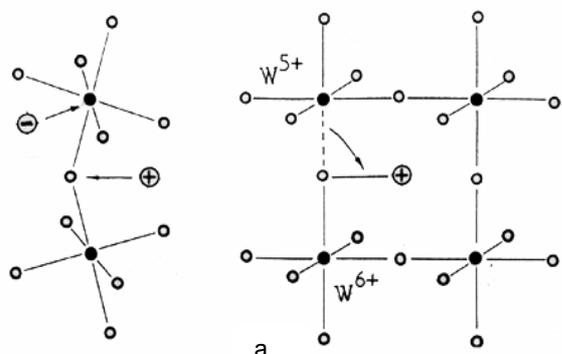


Рисунок 1 – Модель структурно-энергетической перестройки пленок  $\alpha$ - $\text{WO}_3$  при двойной инжекции электронов и протонов (а); распределение плотности электронных состояний аморфных пленок триоксида вольфрама прозрачных (слева) и с центрами окраски (слева) (б)

Отклик сенсора на водород (и другие водо-родсодержащие газы-восстановители) определяется структурно-энергетическими перестройками  $\text{WO}_3$  при образовании водородно-вольфрамовых бронз  $\text{H}_x\text{WO}_3$  (x может дос-

тигать значения 0,5), в то время как взаимодействие с атмосферным кислородом вызывает обратимые изменения стехиометрии в анионной подрешетке (с учетом этого формулу триоксида вольфрама следует писать  $\text{WO}_{3-y}$ ) и соответствующие вариации проводимости. Таким образом, оба процесса (восстановления и окисления) являются по механизму объёмными, что обеспечивает чувствительность при больших концентрациях газов, в то время как пористость и развитость внутренней поверхности пленок  $\alpha$ - $\text{WO}_3$  способствует высокой скорости этих процессов.

Каталитической активности  $\text{WO}_3$  и легкости диссоциации на его поверхности водо-родсодержащих молекул способствует большая величина диэлектрической проницаемости  $\text{WO}_3$ , что приводит к ослаблению кулоновского взаимодействия заряженных частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные публикации результатов исследований в области металлоксидных газовых сенсоров свидетельствуют о большом интересе к высокодефектным аморфным и нанокристаллическим материалам, среди которых широкой варибельностью свойств выделяются оксиды переходных металлов.

Высокая чувствительность оптических и электрофизических характеристик аморфного триоксида вольфрама к стехиометрии (дефициту в анионной подрешетке и наличию катионов внедрения в структурные пустоты) создает предпосылки использования этого материала в различных функциональных устройствах: индикаторных приборах, окнах с управляемым светопропусканием, (фото)электрохимических преобразователях, химических и газовых сенсорах.

Значительная пористость и разупорядоченное строение пленок  $\alpha$ - $\text{WO}_3$  определяют ряд их специфических черт - преобладание поверхностных свойств над объёмными, высокую ионную проводимость, большую ширину запрещенной зоны. Обратимые процессы окисления-восстановления пленок  $\alpha$ - $\text{WO}_3$ , протекающие с высокой скоростью при сравнительно низких температурах, являются физической предпосылкой их абсорбционной газочувствительности.

Отсутствие насыщения абсорбционной чувствительности сенсора при высоких концентрациях водорода, низкие рабочие температуры и хорошая кинетика (секунды) делают аморфный триоксид вольфрама перспективным материалом для контроля взрывоопас-

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ ХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

ных газовых смесей. Подобно водороду, к восстановлению  $\alpha\text{-WO}_3$  может приводить и диссоциативная абсорбция водородсодержащих газов, в частности, аммиака.

Тонкие пленки  $\alpha\text{-WO}_3$  как материал для полупроводниковых газовых сенсоров сочетают преимущества объемного механизма сорбции, который обеспечивает чувствительность в широком диапазоне концентраций детектируемых газов, с высокой скоростью отклика, характерной для поверхностного механизма, что связано со значительной пористостью пленки и высоким отношением поверхность/объем. Диссоциативная абсорбция аммиака и водорода пленками  $\alpha\text{-WO}_3$  приводит к частичному восстановлению триоксида вольфрама и росту его электропроводности. При этом ионы водорода занимают структурные пустоты в  $\alpha\text{-WO}_3$ , и образуется соединение типа водородно-вольфрамовых бронз  $\text{H}_x\text{WO}_3$ . Решеточная абсорбция кислорода приводит к восполнению его исходного дефицита и увеличению сопротивления пленки. Конкуренция процессов окисления и восстановления вызывает появление максимума на температурной зависимости отклика сенсора, а выбор его рабочей температуры позволяет оптимизировать чувствительность и, таким образом, обеспечить селективность.

При решении материаловедческих задач, связанных с выбором оптимального сорбента для полупроводниковых газовых и химических сенсоров (резистивного или емкостного типов), обычно предпочтение отдается поверхностному механизму чувствительности как имеющему лучшие кинетические характеристики по сравнению с объемным.

Анализ температурной и концентрационной зависимостей электропроводности аморфных пленок триоксида вольфрама при диссоциативной хемосорбции водорода и водородсодержащих газов-доноров ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), а также кинетика отклика показали перспективность пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  как материала для газовых сенсоров с объемным механизмом чувствительности.

Полифункциональный характер исследованных структур, дающий принципиальную возможность использования одного материала в качестве активного слоя в структурах различного назначения (физических и химических сенсорах, устройствах визуализации информации) является потенциально важным достоинством в решении задач их интеграции и совместимости технологий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия технологии полупроводниковых материалов. Электронная структура и свойства полупроводников. Том 1. / Пер. с англ. под ред. Э.П. Домашевской. – Воронеж: Водолей, 2004. – 982 с.
2. Васильев Р.Б. Неорганические структуры как материалы для газовых сенсоров / Р.Б. Васильев, Л.И. Рябова, М.Н. Румянцева, А.М. Гаськов // Успехи химии. – 2004. – Т. 73, № 10. – С. 1019-1038.
3. Кукуев В.И. Получение электрохромных пленок на основе триоксида вольфрама методом испарения и конденсации в вакууме / В.И. Кукуев, Е.А. Тутов, А.М. Солодуха, М.В. Лесовой, Э.П. Домашевская // Электронная техника. Сер. 6: Материалы. – 1985. – Вып. 6. – С. 3-6.
4. Кукуев В.И. Изменения ближнего атомного порядка в пленках  $\alpha\text{-WO}_3$  в процессе окрашивания, адсорбции воды и в результате старения / В.И. Кукуев, Е.А. Тутов, М.В. Лесовой, Э.П. Домашевская // Кристаллография. – 1988. – Т. 33, вып. 6. – С. 1551-1552.
5. Kukuev V.I. Application of HEED, XPS and XES techniques in the study of local order and electronic structure of electrochromic (photochromic)  $\text{WO}_3$  thin films / V.I.Kukuev [et al.] // J. Microsc. Spectrosc. Electron. – 1989. – V. 14. – P. 471-485.
6. Кукуев В.И. Поверхностные состояния и заряд в МДП-структуре с пленкой триоксида вольфрама / В.И. Кукуев, Е.А. Тутов, М.В. Лесовой, Л.Ф. Комолова, Н.Ф. Шевцова, И.В. Разумовская // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1988. – № 11. – С. 87-92.
7. Кукуев В.И. Физические методы исследования тонких пленок и поверхностных слоев: Учеб. пособие / В.И. Кукуев, И.Я. Миттова, Э.П. Домашевская. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. – 144 с.
8. Кукуев В.И. Управление плотностью эффективного поверхностного заряда в МДП структуре с пленкой триоксида вольфрама / В.И. Кукуев, Е.А. Тутов, Э.П. Домашевская, М.И. Яновская, И.Е. Обвинцева, Ю.Н. Веневцев // ЖТФ. – 1987. – Т. 57, вып. 10. – С. 1957-1961.
9. Тутов Е.А. Электронные процессы в гетероструктуре  $\alpha\text{-WO}_3/\text{Si}$  при электро- и фотохромизме / Е.А. Тутов, В.И. Кукуев, А.А. Баев, Е.Н. Боромонтов, Э.П. Домашевская // ЖТФ. – 1995. – Т. 65, вып. 7. – С. 117-124.
10. Tutov E.A. Charge transfer processes in heterostructure  $\alpha\text{-WO}_3/\text{Si}$  during electro- and photochromism / E.A. Tutov, A.A. Baev // Applied Surface Science. – 1995. – V. 90. – P. 303-308.
11. Tutov E.A. Bulk-surface gas sensors based on  $\alpha\text{-WO}_3$  / E.A. Tutov, S.V. Ryabtsev, E.P. Domashevskaya // Proc. Eurosensors-XII, 1998, Southampton, UK. – Vol. 1. – P. 665-668.
12. Тутов Е.А. Абсорбционная чувствительность аморфного триоксида вольфрама / Е.А. Тутов, С.В. Рябцев, А.Ю. Андрюков, А.В. Арсенов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 1999. – Т. 1, № 3. – С. 256-259.

13. Тутов Е.А. Тонкие пленки аморфного триоксида вольфрама и гетероструктуры  $\alpha\text{-WO}_3/\text{Si}$  для химических сенсоров / Е.А.Тутов, А.Ю.Андрюков, Э.П.Домашевская // Перспективные материалы.-2001.- № 2. - С. 23-27.

14.Тутов Е.А. Функциональные свойства гетероструктур кремний / несобственный оксид / Е.А. Тутов, С.В. Рябцев, Е.Н. Бормонтов // Письма

Тутов, С.В. Рябцев, Е.Н. Бормонтов // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, вып. 12. – С. 7-13.

15. Tutov E.A. Functional applications of large-area heterostructures of monocrystalline silicon – disordered semiconductors / E.A. Tutov, A.A. Baev, S.V. Ryabtsev, A.V. Tadeev // Thin Solid Films. – 1997. – V. 296. – P. 184-187.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ТЕТРАЗОЛСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ

А.М. Белоусов, Е.А. Пазников, Н.А. Орлова, Т.Р. Сеубаев

*Исследовано влияние соотношения взаимодействующих функциональных групп тетразолсодержащего полимера и отверждающего агента на период индукции, степень отверждения и параметры пространственно шитых образцов полимера с различным содержанием функциональных групп.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается значительный рост промышленного производства наполненных полимерных материалов, область применения которых весьма разнообразна от народного хозяйства до военно-космического комплекса. Большинство полимерных материалов производят посредством необратимых превращений вязкотекучих связующих с соответствующими наполнителями в упругоэластические неплавкие и нерастворимые сетчатые полимерные материалы. В результате такого структурирования обеспечивается заданный комплекс свойств готовых изделий.

Процесс перевода линейных полимеров в сетчатые при помощи специальных реакций, в результате которых формируются физико-механические свойства наполненных полимерных материалов, называется отверждением [1]. Процесс отверждения является наиболее важной стадией изготовления полимерных материалов.

Знание механизма пространственного структурирования полимера и факторов, влияющих на его проведение, позволит регулировать число и длину мостиков – «густоту» образующейся трехмерной сетки, и как следствие требуемый уровень эксплуатационных и физико-механических характеристик [2].

Ранее в работах [3,4,5] уже рассматривались результаты наших исследований, в частности были предложены механизмы взаимодействия полимера и отвердителя.

Однако, приведенные схемы отражают только некоторые стороны сложного гетерогенного процесса отверждения, на который сильно влияют условия его проведения, и соотношение взаимодействующих компонентов. Несмотря на широкие исследования в этой области, многие вопросы до сих пор остаются неясными и спорными.

В данной работе представлены результаты отражающие влияние соотношения функциональных групп полимера и отвердителя на период индукции, время отверждения и параметры получаемой трехмерной сетки образцов полимера с различным содержанием функциональных групп.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования нами был выбран полимер тетразолового ряда поли-N-метилаллил-5-винилтетразол (МПВТ-А) [6,7], полученным по ранее описанной методике [7]. Полимер перед использованием измельчали и протирали через сито с диаметром отверстий 100 мкм, сушили в термошкафу при 60<sup>0</sup>С 2 часа. Высушенный полимер помещали в эксикатор с прокаленным хлористым кальцием. В качестве пластификаторов использовали, в одном случае смесевой нитроэфир (связующее 1). Во втором случае нитротриазольный пластификатор (связующее 2). С учетом термодинамической совместимости, соотношение полимер : пластификатор составляло 15 : 85 (по массе). Связующее приготавливали непосредственным

*ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2006*