

На правах рукописи

Скаляух Ольга Вячеславовна

**ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ  
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ  
С ЭНЕРГИЕЙ 5,4 МэВ**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Ульяновск – 2005

Работа выполнена на кафедре оптики и спектроскопии твердого тела  
Государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
Ульяновский государственный университет

Научный руководитель: д. ф.-м. н., профессор,  
чл.- корр. АН Татарстана  
Булярский Сергей Викторович

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н., профессор,  
Самохвалов Михаил Константинович  
д. ф.-м. н., доцент  
Скворцов Аркадий Алексеевич

Ведущая организация: Государственное образовательное  
учреждение высшего профессиональ-  
ного образования Самарский государ-  
ственный университет

Защита состоится 14 июня 2005 года в 13 часов на заседании диссертаци-  
онного совета ДМ 212.278.01 при Ульяновском государственном универ-  
ситете по адресу: Набережная р. Свияги 40, ауд. 703

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государ-  
ственного университета

Автореферат разослан « 11 » мая 2005 г.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу:

432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Управление научных  
исследований

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к. ф.-м. н., доцент

 Сабитов О.Ю.

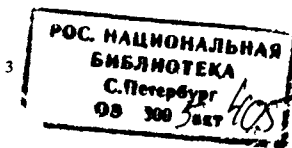
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Кремний является наиболее применяемым и дешевым материалом твердотельной электроники, самым распространенным материалом для изготовления различных полупроводниковых приборов. Проблемам выращивания монокристаллов и отклонения их от стандартов посвящено большое число монографий, публикаций и докладов на международных конференциях. В меньшей степени исследованы процессы дефектообразования под действием облучения. Однако и эта проблема является важной для практического использования кремния в электронике.

Облучение кремния протонами и альфа-частицами приводит к образованию в кристалле первичных точечных радиационных дефектов – вакансий и связанных с ними межузельных атомов кремния (пар Френкеля), которые генерируются вдоль траектории пробега ионов в результате развития каскадов столкновений ионов с атомами решетки кристалла. В процессе облучения при комнатной температуре основная часть образованных пар Френкеля исчезает в результате взаимной аннигиляции, а разделившиеся компоненты пар в процессе их миграции взаимодействуют друг с другом и с примесными атомами кристалла, создавая более сложные и стабильные вторичные радиационные дефекты. Вторичные дефекты впоследствии трансформируются, например, при температурном воздействии может происходить распад сложных комплексов на составляющие.

Так как радиационное дефектообразование сопровождается появлением в запрещенной зоне полупроводника локальных энергетических уровней, то облучение кремния альфа-частицами изменяет в широких пределах электрофизические характеристики полупроводника, такие как электропроводность, тип проводимости, концентрация, подвижность и время жизни носителей заряда.



Несмотря на большое количество работ, посвященных радиационному облучению кремния, лишь немногие из них рассматривают взаимодействие кремния с альфа-частицами. Большинство работ, исследующих свойства облученного кремния, ввиду сложности изучаемых процессов носят экспериментальный характер.

В данной работе, в процессе изучения дефектообразования при радиационном облучении кремния, ставится задача не только определения энергетических параметров образующихся рекомбинационных центров, но и разработки моделей возникновения дефектов при облучении и их дальнейшего поведения, что позволит предсказать характеристики образцов, без проведения длительных экспериментов по их облучению. В связи с этим тема диссертации является весьма актуальной.

### **Цель работы**

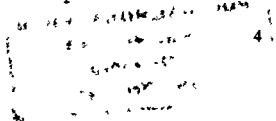
Целью данной работы является исследование процессов вторичного дефектообразования в кремнии и в полупроводниковых приборах на его основе при облучении альфа-частицами.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- изучение механизмов изменения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик кремниевых барьеров Шоттки после облучения;
- определение параметров дефектов методом термостимулированной емкости до и после облучения *p-n*-переходов на основе кремния;
- моделирование процесса дефектообразования в кремнии под воздействием облучения альфа-частицами;
- моделирование процесса развала сложных комплексов, возникающих в кремнии при его облучении альфа-частицами.

### **Научная новизна**

- 1) Было обнаружено, что при облучении кремния альфа-частицами возрастает концентрация *A*-центров и этот процесс приводит к уменьшению



времени жизни неосновных носителей заряда.

2) Различными методами были определены параметры вторичных дефектов, возникающих при облучении кремния альфа-частицами. На основе проведенных экспериментов, была создана математическая модель распределения заряженных дефектов в кремнии вблизи поверхности при его облучении альфа-частицами с учетом диффузии первичных и вторичных дефектов и показано, что профили обусловлены увеличением концентрации *A*-центров и комплексов с участием вакансий, включая дивакансии.

3) Предложена модель распада сложных комплексов, образующихся при облучении кремния альфа-частицами. Поведено численное моделирование зависимости емкости от температуры, обусловленной распадом сложных комплексов, и показано, что в результате распада комплексов высвобождается межузельный кремний.

4) Экспериментально определена пороговая доза облучения кремния альфа-частицами, свыше которой начинаются процессы аморфизации.

#### **Практическая ценность работы**

1) Получена эмпирическая зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии от дозы облучения альфа-частицами, позволяющая оценить граничную дозу облучения, после которой происходит деградация приборов.

2) Методом термостимулированной емкости были определены энергетические параметры центров рекомбинации, образующихся после облучения кремниевых *p-n*-переходов альфа-частицами: мелкие донорные центры –  $0,08 \pm 0,03$  эВ,  $0,02 \pm 0,03$  эВ,  $0,04 \pm 0,03$  эВ, *A*-центры –  $0,16 \pm 0,03$  эВ, *E*-центры или дивакансии  $0,40 \pm 0,03$  эВ, центры с энергией активации, соответствующей энергии миграции межузельного кремния  $0,90 \pm 0,03$  эВ, термодоноры первого типа  $0,14 \pm 0,03$  эВ.

3) Разработана модель распада сложных комплексов, описывающая производную термостимулированной емкости по температуре и позволяющая определить энергетические характеристики распада и параметры распадающихся комплексов.

4) Из вольт-амперных характеристик определены энергетические уровни центров рекомбинации, образующихся при облучении кремния:  $0,538 \pm 0,009$  эВ (вакансионно-кислородные комплексы);  $0,345 \pm 0,056$  эВ (акцепторное состояние дивакансии); начиная с дозы  $1 \cdot 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup> -  $0,237 \pm 0,043$  эВ, а начиная с дозы  $2 \cdot 10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup> -  $0,138 \pm 0,026$  эВ.

#### **Положения, выносимые на защиту**

- 1) Время жизни в кремнии, облученном альфа-частицами с энергией 5,4 МэВ, контролируется А-центрами. Уменьшение времени жизни при облучении дозами в диапазоне от  $4 \cdot 10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup>, вплоть до начала процессов аморфизации, обусловлено возрастанием концентрации этих центров.
- 2) Облучение кремния альфа-частицами с энергией 5,4 МэВ дозами в диапазоне от  $4 \cdot 10^{10}$  до  $8 \cdot 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup> может приводить к развитию в приповерхностной области компенсирующего слоя, обусловленного избыточными концентрациями А-центров и комплексов на основе вакансий, включая дивакансии.
- 3) Сложные комплексы, образующиеся при облучении кремния альфа-частицами, распадаются при нагреве с высвобождением межузельного кремния.

#### **Апробация работы**

По материалам диссертации были представлены доклады и опубликованы тезисы докладов на следующих конференциях: IV всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2002), IV международной

конференции “Оптика, оптоэлектроника и технологии” (Ульяновск, 2002), VI международной конференции “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы” (Ульяновск, 2004).

#### **Личное участие автора**

Основные теоретические положения разработаны совместно с д. ф.-м. н., профессором С.В. Булярским. Облучение исследуемых образцов проводилось в ГНЦ РФ НИИАР г. Димитровград. Экспериментальное исследование вольт-фарадных, вольт-амперных характеристик и термостимулированной емкости проведено автором самостоятельно на установках, разработанных сотрудниками кафедры оптики и спектроскопии твердого тела Ульяновского государственного университета. Также автор принимал участие в разработке установки и методики для измерения времени жизни и самостоятельно выполнял численное решение систем дифференциальных уравнений (главы 2, 3, 4).

#### **Публикации**

Основные результаты исследований отражены в 7 печатных работах, список которых приведен в заключении.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Материал изложен на 128 страницах, содержит 41 рисунок, 6 таблиц, 129 наименований в списке литературы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В первой главе диссертации сделан обзор литературных источников, касающихся вопросов дефектообразования и изменения параметров кремниевых структур под воздействием облучения. Рассмотрены проблемы, возникающие при радиационном облучении полупроводников. Описаны основные принципы дефектообразования в процессе радиационного облу-

чения и образования разупорядоченных областей. Рассмотрено влияние интенсивности и температуры облучения на образование дефектов, а также влияние образующихся дефектов на параметры полупроводниковых приборов.

**Во второй главе** описано исследование изменения времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии под воздействием облучения различными дозами альфа-частиц. Проанализировано влияние различных уровней рекомбинации, образующихся под воздействием облучения кремния альфа-частицами, на величину времени жизни неосновных носителей заряда.

В работе исследовались структуры, изготовленные на кристаллах монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, с удельным сопротивлением  $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , *n*-типа проводимости, к которым изготавливались омические контакты на основе никеля и барьерные контакты на основе кобальта и титана. Образцы облучались альфа-частицами, образующимися в результате альфа-распада  $^{244}\text{Cm}$  и имеющими энергию порядка  $5,4 \text{ МэВ}$ , при комнатной температуре, дозами в диапазоне от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  частиц/ $\text{см}^2$ .

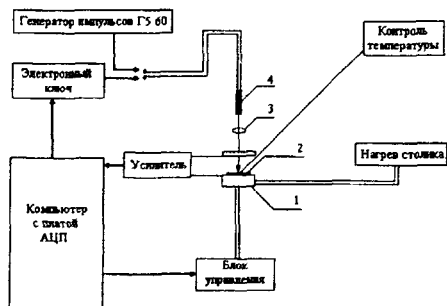
При исследовании облученных образцов кремния наблюдалось наличие тонких аморфизированных слоев вблизи поверхности образцов. На спектрах комбинационного рассеяния света, полученных на барьерных структурах, изготовленных на основе *n*-Si, для необлученных образцов наблюдается острый максимум в области  $0,0642 \text{ эВ}$ , соответствующий монокристаллическому кремнию. При обработке образцов альфа-частицами спектры уширяются и становятся асимметричными. Резко возрастает интенсивность в области  $0,063\text{-}0,064 \text{ эВ}$ , что указывает на присутствие дефектов на поверхности. Однако во всех случаях присутствует полоса колебаний кристаллического кремния. Это говорит о том, что аморфизация



прошла не полностью, и, наряду с аморфной фазой, существует и кристаллическая, поэтому для обработки пластин с целью полной аморфизации необходимо увеличить дозу облучения.

На основе проведенных экспериментов показано, что при облучении кристаллов Si происходит значительное изменение времени жизни неосновных носителей заряда. Был разработан метод измерения времени жизни по сигналу фото-ЭДС.

Для регистрации сигнала фото-ЭДС используется установка, блок-схема которой изображена на рис. 1. Исследуемый полупроводниковый образец помещается на подвижный координатный



столлик. Освещение образца производится полупроводниковым лазером с длиной волны 630 – 650 нм. Излучение лазера модулируется либо компьютером, либо генератором прямоугольных импульсов, что позволяет исследовать зависимость времени жизни носителей от мощности и частоты излучения. Луч с помощью микрообъектива фокусируется на исследуемую пластину. Сигнал фото-ЭДС снимается с металлического электрода и поступает на зарядочувствительный усилитель. Далее этот сигнал подается на устройство аналого-цифрового преобразователя и обрабатывается на компьютере. Разработана методика расчета времени жизни из осциллограмм сигнала фото-ЭДС. Анализ численного решения уравнений непрерывности для неравновесных носителей показывает, что при возбуждении полупроводниковой пластины прямоугольным световым импульсом кинетика поверхно-

Рис 1 Блок-схема установки для измерения времени жизни неравновесных носителей методом поверхностной фото-ЭДС: 1 - координатный столлик, 2 - исследуемый образец, 3 - фокусирующий микрообъектив, 4 - полупроводниковый лазер

стной концентрации этих носителей может быть аппроксимирована следующими законами: для процесса включения возбуждения  $\delta n \sim (1 - \exp(-t/\tau_n))$ , а для процесса выключения света  $\delta n \sim \exp(-t/\tau_n)$ . Получив экспериментально зависимость величины фото-ЭДС от времени при воздействии прямоугольного светового импульса и построив участок спада этой зависимости в полулогарифмических координатах, по углу наклона прямой можно определить время жизни.

$$\text{Для участка спада } \tau = -\frac{\Delta t}{\Delta \ln(U(t))}, \quad (1)$$

$$\text{для участка нарастания } \tau = -\frac{\Delta t}{\Delta \ln \left[ 1 - \frac{U(t)}{U_{\max}} \right]}. \quad (2)$$

Установка позволяет автоматически определять время жизни по осциллограммам кинетики нарастания и спада концентрации неравновесных носителей заряда.

Измерение времени жизни на образцах, подвергнутых различным дозам облучения, показало, что с увеличением дозы время жизни падает по экспоненциальному закону:  $\tau = 5,6 \cdot 10^{-3} \exp(-8,12 \cdot 10^{-14} F)$  (3)

Используя сведения о параметрах энергетических уровней радиационных дефектов в облученном кремнии, которые приведены в монографии [1], было проанализировано, какие именно дефекты оказывают наиболее существенное влияние на величину времени жизни, рассчитано время жизни для различной концентрации ловушек и различного уровня инжекции. Результаты расчетов приведены в таблице 1, из которой видно, что при малой концентрации ловушек значительно уменьшают время жизни А-центры, а при высокой концентрации ловушек влияние на уменьшение времени жизни оказывают также и дивакансии.

Значения времен жизни, измеренные экспериментально, близки к величине времени жизни, определяемой наличием А-центров при низкой

концентрации ловушек и низком уровне инжекции. Исходя из этого предположения была рассчитана концентрация  $A$ -центров, соответствующая измеренным экспериментально временам жизни.

Таблица 1

Время жизни, определяемое наличием радиационных дефектов  
в кремнии, облученном альфа-частицами.

Природа дефекта	время жизни $\tau$ , мс		
	Малая концентрация ловушек, $N_f=10^{11} \text{ см}^{-3}$		Высокая концентрация ловушек, $N_f=10^{18} \text{ см}^{-3}$
	Низкая инжекция	Высокая инжекция	
$(O-V)^{0-}$ , $A$ -центр	1,24	0,03	$2,5 \cdot 10^{-9}$
$(V-V)^{-/}$ , дивакансия	43,08	0,28	$2,8 \cdot 10^{-8}$
$(V-V)^{0-}$ , дивакансия	593,76	0,13	$1,1 \cdot 10^{-8}$
$(P-V)^{0-}$ , $E$ -центр	1479,83	0,20	$2,0 \cdot 10^{-8}$
$(V-V)^{0+}$ , дивакансия	97,30	0,53	$2,5 \cdot 10^{-9}$
$(O-C)^{0+}$ , $K$ -центр	77834,32	20,33	$2,0 \cdot 10^{-6}$

В ходе расчетов было получено, что концентрация  $A$ -центров экспоненциально возрастает с ростом дозы облучения:

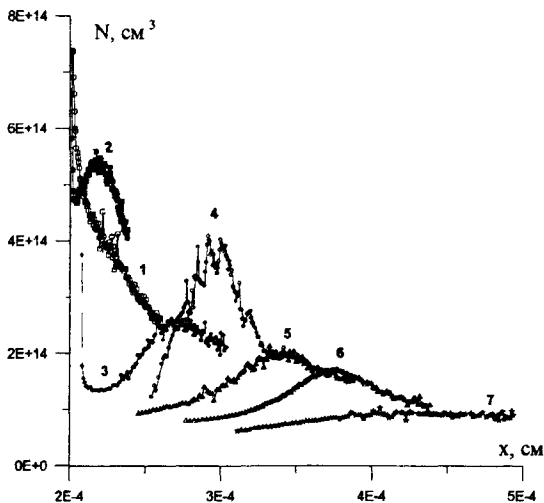
$$N_f = 5,31 \cdot 10^9 \exp(1,59 \cdot 10^{-13} F). \quad (4)$$

Таким образом, анализ известных из литературных источников параметров глубоких центров, возникающих при облучении кремния альфа-частицами показал, что наибольшее влияние на величины времени жизни при малой концентрации ловушек оказывают  $A$ -центры, а при большой концентрации ловушек –  $A$ -центры и дивакансии. Это подтверждает первое положение, выносимое на защиту.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию вольт-фарадных характеристик кремниевых барьеров на основе титана и кобальта. Получены изменения концентрационных профилей под воздействием облучения. Предложена модель описания дефектообразования в кремнии при облучении альфа-частицами, учитывающая диффузию и первичных и вторичных дефектов.

На вольт-фарадных характеристиках образцов обеих групп, как на основе титана, так и на основе кобальта, существует участок, в пределах которого емкость изменяется по квадратичному закону  $C^{-2} = aU$ . Наличие такого участка позволяет вычислить распределение концентрации дефектов вблизи поверхности образца по методу, описанному в работе [2]. Графики распределения концентрации мелких доноров для образцов на основе титана приведены на рис. 2 (для образцов на основе кобальта зависимости выглядят аналогично).

Вид данных зависимостей показывает, что концентрация примеси достаточно сильно меняется по координате. При увеличении дозы облучения профиль концентрации центров рекомбинации изменяется следующим образом: компенсированный слой возникает у поверхности и постепенно



развивается вглубь полупроводника. Уменьшение концентрации с ростом дозы облучения и сдвиг максимума концентрации вглубь полупроводника могут быть связаны с диффузией первичных дефектов и одновременным образованием А-центров и дивакансий.

Рис 2 Изменение профиля распределения центров рекомбинации в контактах металл-полупроводник на основе титана по мере увеличения дозы облучения (частиц/см<sup>2</sup>) 1)  $4 \cdot 10^{10}$ , 2)  $6 \cdot 10^{10}$ , 3)  $1 \cdot 10^{11}$ , 4)  $2 \cdot 10^{11}$ , 5)  $4 \cdot 10^{11}$ , 6)  $6 \cdot 10^{11}$ , 7)  $8 \cdot 10^{11}$

В работе была предложена теоретическая модель изменения концентрации центров рекомбинации в облученном кремнии с учетом диффузии дефектов. Альфа-частицы, которыми облучались образцы, образующиеся в ре-

зультате альфа-распада  $^{244}\text{Cm}$ , имели энергию порядка 5,4 МэВ. Эта энергия существенно превышает энергию разрыва химической связи, поэтому возникающие дефекты можно разделить на две категории:

1. *Первичные радиационные дефекты*, которыми являются вакансии кремния и междоузельные атомы кремния, так называемые пары Френкеля.

2. *Вторичные радиационные дефекты* являются результатом развития процессов облучения и взаимодействия первичных радиационных дефектов. Дело в том, что изолированные вакансии имеют малую энергию активации, поэтому весьма подвижны при комнатной температуре. Они в течение нескольких минут уходят на стоки, образуя комплексы, которые имеют различный состав. В первую очередь это дивакансии, которые являются весьма стабильными. В исходном кремнии всегда много кислорода - до  $10^{18}$  атомов/см<sup>3</sup>, поэтому достаточно интенсивно должны возникать А-центры.

Дивакансия в кремнии так же, как и вакансия, обладает амфотерными свойствами и может проявлять себя как донор и как акцептор. Следовательно, наиболее вероятным дефектом, который возникает при радиационном облучении и приводит к компенсации полупроводника, является дивакансия кремния.

Рассмотрим процесс образования радиационных дефектов с точки зрения уравнений диффузии. Уравнения диффузии для первичных радиационных дефектов – вакансий - имеет вид:

$$\frac{\partial N_V}{\partial t} = \text{div}(D_V(x)\text{grad}(N_V)) + G_F N_a(x,t) - W_{V \rightarrow A} N_V N_O - W_{2V \rightarrow V^2} N_V^2 - W_{V \rightarrow I \rightarrow O} N_V, \quad (5)$$

где первое слагаемое в правой части отвечает за диффузию вакансий ( $D_V$  – коэффициент диффузии вакансий), второе за их генерацию под воздействием альфа-частиц, а третье и четвертое слагаемые связаны с исчезновением вакансий и образованием А-центров и дивакансий соответственно ( $W_{V \rightarrow A}$  - вероятность образования А-центров,  $W_{2V \rightarrow V^2}$  - вероятность образования дивакансий), последнее слагаемое учитывает рекомбинацию вакан-

сий с межузельными атомами кремния, которые также образуются в процессе радиационного облучения ( $W_{V, I \rightarrow 0}$  - вероятность рекомбинации вакансий и межузельных атомов кремния).

Так как наибольшие энергетические потери, а, следовательно, и число образуемых электрон-ионных пар приходится на участок трека частицы, наиболее близкий к точке остановки, то можно считать, что все дефекты, образуемые альфа-частицей, приходятся на точку ее остановки. Следовательно, слагаемое, описывающее генерацию вакансий, можно записать в виде  $G_F N_\alpha(x, t)$ , где  $G_F$  - коэффициент, равный числу электронно-ионных пар, сгенерированных одной альфа-частицей, а  $N_\alpha(x, t)$  - распределение внедренных альфа-частиц, которое имеет вид:

$$N_\alpha(x, t) = \frac{F(t)}{\sqrt{2\pi\Delta R_{np}^2}} \exp\left(-\frac{[x - R_{np}(E_\alpha)]^2}{2\Delta R_{np}^2}\right), \quad (6)$$

где  $F(t)$  - интегральная доза облучения на единицу площади мишени (частиц/см<sup>2</sup>),  $R_{np}$  - проективный пробег, зависящий от энергии альфа-частиц  $E_\alpha$ ,  $\Delta R_{np}^2$  - дисперсия проективного пробега. С учетом потерь энергии альфа-частицы во время преодоления металлической пленки барьера Шоттки, был рассчитан остаточный пробег альфа-частиц в кремнии и его среднеквадратичное отклонение.

Так как  $A$ -центры образуются при взаимодействии вакансий и межузельного кислорода, присутствующего в кремнии, то уравнение для диффузии  $A$ -центров будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial N_A}{\partial t} = \text{div}(D_A(x)\text{grad}(N_A)) + W_{V \rightarrow A} N_V N_O. \quad (7)$$

Аналогично записывается уравнение диффузии для дивакансий:

$$\frac{\partial N_{V^2}}{\partial t} = \text{div}(D_{V^2}(x)\text{grad}(N_{V^2})) + W_{2V \rightarrow V^2} N_V (N_{V^2_{\max}} - N_{V^2}). \quad (8)$$

Для решения системы описанных выше уравнений диффузии необходимо записать граничные и начальные условия. Будем считать, что все

вторичные дефекты рекомбинируют на облучаемой поверхности, вблизи противоположной поверхности не образуются ни первичные, ни вторичные дефекты, а концентрация межузельного кислорода остается постоянной. Следовательно:

$$\text{при } x=0 \begin{cases} N_V = 0 \\ N_A = 0 \\ N_{V^2} = 0 \\ N_O = N_{O_{max}} \end{cases} \quad \text{при } x=L \begin{cases} N_V = 0 \\ N_A = 0 \\ N_{V^2} = 0 \\ N_O = N_{O_{max}} \end{cases} \quad (9)$$

Начальные условия запишем в следующем виде:

$$\text{при } t=0 \begin{cases} N_V(x) = 0 \\ N_A(x) = 0 \\ N_{V^2}(x) = 0 \\ N_O(x) = N_{O_{max}} \end{cases} \quad (10)$$

Для численного решения системы уравнений диффузии (6), (7), (8) при граничных условиях (9) и начальных условиях (10) использовался пакет FlexPDE 2.20. При решении варьировались следующие параметры:  $W_{V \rightarrow A}$  - вероятность образования  $A$ -центров,  $W_{2V \rightarrow V^2}$  - вероятность образования дивакансий,  $W_{V^2 \rightarrow 0}$  - вероятность рекомбинации вакансий,  $D_A$  - коэффициент диффузии  $A$ -центров,  $D_{V^2}$  - коэффициент диффузии дивакансий.

Из-за большого числа подгоночных параметров и сложности происходящих при радиационном облучении процессов (например, рассматриваемая модель не учитывает переменный коэффициент диффузии, который изменяется от точки к точке из-за локального повышения температуры при радиационном облучении) смоделировать точный вид экспериментальных зависимостей концентрации рекомбинационных центров от дозы не удалось, но результаты моделирования качественно отражают те же процессы, которые наблюдаются в эксперименте. На рис. 3. представлена зависимость разности концентраций  $A$ -центров и дивакансий от дозы облучения, в диапазоне, соответствующем диапазону экспериментальных измерений.

Уменьшение концентрации с ростом дозы облучения и сдвиг максимума концентрации вглубь полупроводника, связанные с диффузией первичных дефектов и одновременным образованием А-центров и дивакансий, подтверждают второе положение, выносимое на защиту.

В четвертой главе исследуется поведение термостимулированной емкости кремниевых *p-n*-переходов,

облученных альфа-частицами. Определяются параметры обнаруженных уровней и предлагается модель распада комплексов, объясняющая возникновение уровней с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны кремния.

Для определения параметров глубоких центров был проведен эксперимент по измерению термостимулированной емкости (TCE) *p-n*-переходов. Эксперимент проводился следующим образом: к образцу прикладывали напряжение прямого смещения, величина которого превышала диффузионный потенциал, в данном случае – 0,5 В, затем образец охлаждался в азоте до температуры 80 К, при неизменном напряжении смещения. После охлаждения полярность напряжения меняли на обратную, устанавливая величину смещения. Затем образец нагревался с постоянной скоростью  $\beta = 0,05 \text{ K}\cdot\text{c}^{-1}$ .

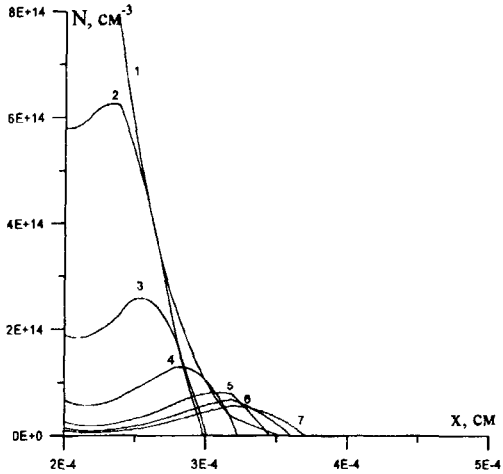


Рис 3 Моделирование изменения профиля распределения центров рекомбинации в кремнии в диапазоне экспериментального определения при увеличении дозы облучения (частиц/см²) 1)  $4 \cdot 10^{10}$ , 2)  $6 \cdot 10^{10}$ , 3)  $1 \cdot 10^{11}$ , 4)  $2 \cdot 10^{11}$ , 5)  $4 \cdot 10^{11}$ , 6)  $6 \cdot 10^{11}$ , 7)  $8 \cdot 10^{11}$



Методом термостимулированной емкости исследовались три образца, представляющих собой кремниевые *p-n*-переходы, два из них подвергались облучению альфа-частицами с дозами  $2,5 \cdot 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup> и  $1,2 \cdot 10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup>.

Функция термостимулированной емкости для необлученного образца монотонно возрастает в диапазоне от 90 до 350 К. Зависимость емкости от температуры для необлученных образцов воспроизводилась при повторном эксперименте. Для облученных образцов при нагреве до 300 К также наблюдается монотонный рост емкости, но при нагреве выше 300 К происходит резкое увеличение роста емкости. Этот факт указывает на то, что на этом участке температур происходят процессы, более сложные, чем ионизация глубоких центров. Можно предположить, что эти процессы связаны с распадом комплексов.

Метод определения параметров глубоких уровней заключается в следующем: производную термостимулированной емкости можно описать аналитической формулой:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = A \left( \frac{T}{T_m} \right)^2 \exp \left[ \frac{E_t}{k} \left( \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] \exp \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T_m} \right)^2 \exp \left[ \frac{E_t}{k} \left( \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

где  $A$  ( $n\Phi/c$ ),  $T_m$  - амплитуда и температура максимума пика, а  $E_t$  - энергия термической активации для генерации носителя заряда с некоторого локального состояния (ловушки). Положение максимума связано с коэффициентом захвата свободного носителя заряда на локальное состояние [3]:

$$c_n = \frac{E_t \beta}{kN_c T_m^2} \exp \left( \frac{E_t}{kT_m} \right). \quad (12)$$

Всего из производной ТСЕ для каждого из образцов удалось вычислить параметры пяти-шести уровней.

Во всех образцах наблюдаются уровни с энергией (0,06-0,07) эВ - мелкие донорные центры. В необлученных образцах наблюдаются уровни с энергией активации: 0,66 эВ; 0,20 эВ; 0,13 эВ и 0,53 эВ - вакансионно-кислородные комплексы. В облученных образцах наблюдаются уровни со следующими энергиями активации: 0,16 эВ – А-центр, 0,14 эВ - термодоноры I типа, 0,965 эВ - энергия миграции межузельного кислорода.

Таким образом, видно, что при облучении появляется энергетический уровень (0,40±0,03) эВ, соответствующий E-центрам, исчезает уровень (0,54±0,03) эВ, соответствующий вакансионно-кислородным комплексам, появляются пики с большими энергиями (близкими к ширине запрещенной зоны кремния) и высокими температурами активации.

Исходя из предположения, что участок TCE облученных образцов, лежащий в области высоких температур и имеющий более крутой наклон, связан с распадом комплексов, имеющих энергию 0,14 эВ (предположительно термодоноров I типа), была предложена следующая модель распада комплексов:

1) На первом этапе комплекс выбрасывает один электрон в зону проводимости. Энергия, характеризующая этот процесс – 0,14 эВ. Вероятность данного события определяется скоростью термической эмиссии носителя заряда с центра.

2) Второй этап происходит аналогично - комплекс выбрасывает второй электрон в зону проводимости. Энергия этого процесса близка к энергии середины запрещенной зоны - 0,5эВ. Вероятность данного события характеризуется скоростью термической эмиссии носителя заряда с центра.

3) На третьем этапе центр становится нестабильным, и происходит распад комплекса на две составляющие – неизвестный нейтральный (либо донорный уровень) и межузельный кремний. Энергия разрушения комплекса равна энергии отрыва кремния. Будем считать, что вероятность оп-

ределяется энергией взаимодействия и энергией миграции межузельного кремния.

Считая, что первый процесс (выброс первого электрона в зону проводимости) полностью завершается до начала второго процесса (выброса второго электрона в зону проводимости), а уравнения, описывающие концентрации уровней, образующихся в результате развала комплексов, идентичны, ограничимся системой трех уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_2}{\partial t} = -e_2' N_2 \\ \frac{\partial N_3}{\partial t} = +e_2' N_2 - W N_3, \\ \frac{\partial N_{Si}'}{\partial t} = W N_3 \end{cases} \quad (13)$$

где  $N_2$  – концентрация комплексов после выброса одного электрона,  $N_3$  – концентрация комплексов после выброса двух электронов,  $N_{Si}'$  – концентрация межузельного кремния, образующегося вследствие развала комплексов,  $e_2'$  – скорость термической эмиссии электронов,  $W$  – вероятность распада комплексов.

Общая концентрация донорных центров равна:

$$N_d(t) = N_2(t) + N_3(t) + 2N_{Si}'(t) + N_{\text{мелких доноров}} \quad (14)$$

Так как в эксперименте распад комплексов наблюдается при нагреве с постоянной скоростью, то в системе уравнений (13) необходимо перейти от производной по времени к производной по температуре, учитывая температурную зависимость скорости термической эмиссии в виде  $\frac{e_2'}{\beta} \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)$  (где  $\beta$  – скорость нагрева,  $E_2$  – энергия уровня) и вероятность распада комплексов  $\frac{W}{\beta} \exp\left(-\frac{E_w}{kT}\right)$  ( $E_w$  – энергия распада). Температура образца изменялась со скоростью  $T = T_0 + \beta t$ , следовательно  $dT = \beta dt$ . Начальные условия имеют вид:

$$N_2|_{T=T_0} = N_1, N_3|_{T=T_0} = 0, N_5'|_{T=T_0} = 0. \quad (15)$$

Уравнения, входящие в систему, нелинейные, решить систему аналитически, не используя упрощений, невозможно. Используя приближенное решение системы (13) (при разложении экспоненты в ряд Тейлора), получаем зависимость изменения общей концентрации доноров от температуры:

$$\beta \frac{d\Delta N_d(t)}{dT} = W \exp\left(-\frac{E_w}{kT}\right) N_1 \frac{e^{\prime} E_w}{e^{\prime} E_w - WE_i} * \quad (16)$$

$$* \exp\left(-\frac{e^{\prime} k(T^2 + T_0^2)}{2e\beta E_i}\right) \left\{ 1 + \exp\left(\frac{(e^{\prime} E_w - WE_i)}{2e\beta E_i E_w} kT^2\right) \right\}.$$

При расчете величины энергий  $E_i$  и  $E_w$ , жестко задавались и были равны 0,5 и 0,96 эВ соответственно, а величины скорости термической эмиссии и вероятности распада варьировались. Наилучшее согласование было получено при  $e_2^{\prime} = 0,5 \text{ с}^{-1}$  и  $W = 0,19 \text{ с}^{-1}$ . Решить в явной форме уравнение (16) относительно  $N_d(T)$  невозможно, но, можно численными методами построить решение этого уравнения. На рис. 4 представлено численное решение этого уравнения при тех же значениях  $E_i, E_w, e_2^{\prime}, W$ , что указаны выше.

Принимая во внимание использование приближенных формул и точность поддержания температуры, можно сказать, что предложенная модель удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

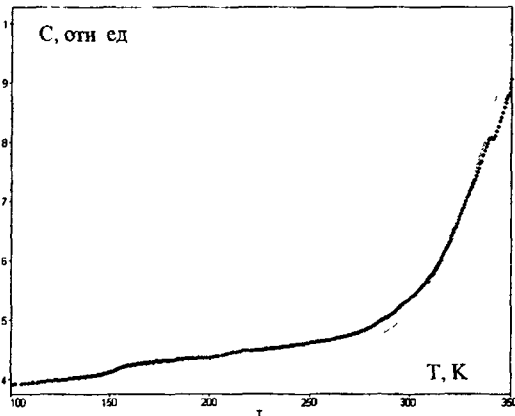


Рис 4. Температурная зависимость емкости сплошная линия - численное построение решения уравнения (16), точки - эксперимент

Пятая глава посвящена исследованию вольт-амперных характеристик барьеров Шоттки, облученных различными дозами альфа-частиц, и определению уровней рекомбинации из вольт-амперных характеристик образцов.

Из вольт-амперных характеристик образцов были определены параметры глубоких уровней. Алгоритм определения энергии активации глубоких уровней заключается в следующем:

- 1) вычисляем производную дифференциального показателя наклона

$$\beta = \frac{eI}{kT} \left( \frac{dI}{dU} \right)^{-1} \quad (17)$$

- 2) находим напряжение, при котором производная дифференциального показателя наклона имеет максимум

- 3) оцениваем энергию активации глубокого центра:

$$E_i = \frac{E_g - qU_0}{2} + \delta, \text{ где: } \delta = \frac{kT}{2} \ln \left[ \frac{1}{4} \frac{c_n N_c}{c_p N_v} \right]. \quad (18)$$

Вклад поправки  $\delta$  в большинстве случаев не превышает 0,03 эВ.

Анализ результатов, полученных в ходе обработки вольт-амперных характеристик образцов, подвергнутых облучению с дозами от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup>, позволяет сделать следующие выводы:

1. Во всех исследованных образцах с контактом на основе титана в области напряжений около 0,05 В наблюдаются рекомбинационные центры с энергией термической активации  $0,538 \pm 0,009$  эВ. Аналогичные центры обнаружены для образцов с контактом на основе кобальта –  $0,523 \pm 0,016$  эВ и  $0,475 \pm 0,013$  эВ. Амплитуда этих пиков не зависит от дозы облучения. Как показывает анализ литературных источников, эти центры связаны с вакансионно-кислородными комплексами.
2. При более высоких напряжениях смещения выделяется пик, соответствующий уровням с термической энергией активации  $0,345 \pm 0,056$  эВ, который связан с акцепторным состоянием дивакансии. С увеличением до-

зы облучения амплитуда этого пика значительно возрастает. Следовательно, результаты анализа вольт-амперных характеристик, основанные на методе рекомбинационной спектроскопии, подтверждают образование дивакансий в кремнии, подвергнутом облучению.

При увеличении дозы облучения появляются дополнительные уровни: начиная с дозы  $10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup> - уровни с энергией активации  $0,237 \pm 0,43$  эВ, а начиная с дозы  $2 \cdot 10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup> - уровни с энергией активации  $0,138 \pm 0,026$  эВ.

## **ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

1. С увеличением дозы облучения кремния альфа-частицами в диапазоне от  $4 \cdot 10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup> время жизни носителей заряда падает по экспоненциальному закону. Анализ известных из литературных источников параметров глубоких центров, возникающих при облучении кремния альфа-частицами, показал, что наибольшее влияние на величину времени жизни при малой концентрации ловушек оказывают *A*-центры, а при большой концентрации ловушек – *A*-центры и дивакансии.
2. При увеличении дозы облучения кремния альфа-частицами в диапазоне доз от  $4 \cdot 10^{10}$  до  $8 \cdot 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup> профиль концентрации центров рекомбинации изменяется следующим образом: компенсированный слой возникает у поверхности и постепенно развивается вглубь полупроводника. Уменьшение максимума концентрации с ростом дозы облучения и сдвиг максимума концентрации вглубь полупроводника связаны с диффузией первичных дефектов и одновременным образованием *A*-центров и дивакансий.
3. Предложена модель вторичного дефектообразования при облучении кремния альфа-частицами, учитывающая диффузию как первичных, так и вторичных дефектов. Показано, что данная модель дает качественное описание наблюдаемых процессов. В ходе изучения температурных зависимостей термостимулированной емкости определены параметры центров, являющих-

ся ловушками для электронов, и проанализирована возможная природа этих центров. В частности доминирующую роль играет дивакансия и *A*-центр.

4. Предложена модель, объясняющая аномальное поведение функции термостимулированной емкости образцов на основе кремния, облученных альфа-частицами, и заключающаяся в описании процесса распада во время нагрева сложных комплексов, образующихся при облучении. Наблюдаемая энергия соответствует энергии миграции межузельного кремния.

5. Исследование спектров комбинационного рассеяния света, изменения величины времени жизни неосновных носителей заряда, вольт-фарядных характеристик доказывает наличие аморфизированных слоев в кремнии при облучении альфа-частицами дозами свыше  $10^{13}$  частиц/см<sup>2</sup>.

## **СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Козловский В.В. Модифицирование полупроводников пучками протонов. – СПб.: Наука, 2003. – 268с.
2. Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников. – М.: Наука, 1972. – 125 с.
3. Булярский С.В., Радауцан С.И. Определение параметров глубоких рекомбинационных центров с помощью модифицированного метода термостимулированной емкости // ФТП. – 1981. – Т. 15. – С.1443-1446.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Булярский С.В., Насибов А.С., Светухина О.С., Скаляух О.В., Радченко В.М. Туннельно-рекомбинационные процессы в облученных полупроводниковых структурах // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2004. – № 7. – С. 53-58.
2. Булярский С.В., Скаляух О.В., Трифонов О.А., Радченко В.М., Топоров Ю.Г. Исследование изменения времени жизни носителей заряда в крем-

нии под воздействием облучения альфа-частицами // Уч. зап. УлГУ. Сер. Физическая. – 2004. – В. 1 (16). – С. 14-19.

3. Булярский С.В., Скаляух О.В., Радченко В.М., Топоров Ю.Г. Изменение концентрации свободных носителей при облучении кремниевых структур потоком альфа-частиц // Уч. зап. УлГУ. Сер. Физическая. – 2004. – В. 1 (16). – С. 19-23.

4. Кувырченкова О.В. (Скаляух О.В.), Светухин В.В. Разработка установки для измерения времени жизни неосновных носителей заряда методом фото-ЭДС // Уч. зап. УлГУ. Сер. Физическая. – 2004. – В. 2 (11). – С. 47-50.

5. Трифонов О.А., Кувырченкова О.В. (Скаляух О.В.), Амброзевич А.С., Светухин В.В. Исследование однородности времени по кремниевой пластине методом поверхностной фото-ЭДС // Тр. IV междунар. конф. «Оптика, оптоэлектроника и технологии». – Ульяновск, 2002. – С. 52.

6. Кувырченкова О.В. (Скаляух О.В.) Разработка установки для исследования распределения времени жизни неравновесных носителей по кремниевой пластине методом фото-ЭДС // Тез докл. IV всероссийской конф. по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанозлектронике. – СПб.: – Изд-во СПбГПУ, 2002. – С. 107.

7. Булярский С.В., Скаляух О.В., Радченко В.М., Топоров Ю.Г. Исследование электрических характеристик кремниевых структур при облучении альфа-частицами // Тр. VI междунар. конф. «Опто-, нанозлектроника, нанотехнологии и микросистемы». – Ульяновск, 2004. – С. 146.



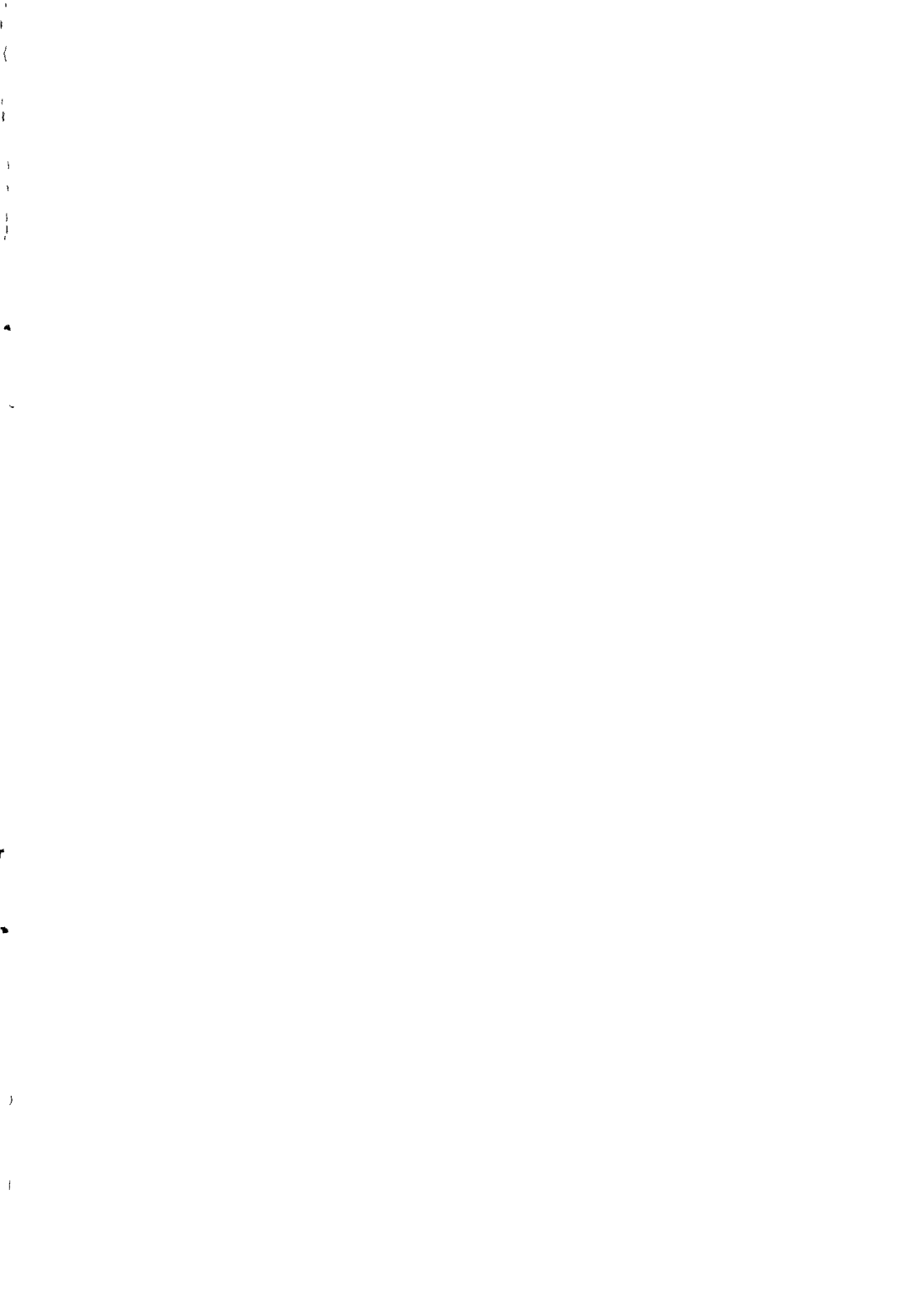
---

Подписано в печать 28 04 05  
Формат 60x84/16 Усл печ л 1,0  
Тираж 100 экз Заказ №38/272

---

Отпечатано с оригинал-макета  
в лаборатории оперативной полиграфии  
Ульяновского государственного университета  
432970, г Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42





№ 1 0 1 0 8

РНБ Русский фонд

2006-4  
6996