

ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.И. МЕЧНИКОВА
Специализированный совет К 068.24.03
по физико-математическим наукам

На правах рукописи

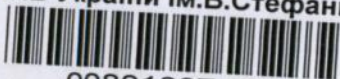
МАСМУ ФАОРС ЭЖЕН

ОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУР ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

01.01.10 - Физика полупроводников и диэлектриков

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

ОДЕССА - 1994



AB 29.880

Работа выполнена в Одесском государственном университете им. И.И. Мечникова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Ройзин Яков Свсеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Кив Арнольд Ефимович; кандидат физико-математических наук, доцент Игнатов Александр Вазильевич

Ведущая организация: Научно-исследовательский технологический институт "Темп" Министерства машиностроения, конверсии и военно-промышленного комплекса Украины, г. Сдеза

Защита состоится "10" Мая 1994 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета, шифр К 068.24.03, по физико-математическим наукам (физика) в Одесском государственном университете им. И.И. Мечникова (270100, г. Сдеза, ул. Ластера, 2X, Большая физическая аудитория).

←7

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Одесского государственного университета им. И.И. Мечникова.

Автореферат разослан "23" Марта 1994 г.

Учёный секретарь специализированного совета, кандидат физико-математических наук, доцент

А.П. Федчук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Истощение ископаемых энергоресурсов и нарастающие трудности решения эк логических проблем энергетики требуют поиска новых, нетрадиционных методов получения энергии. Наиболее привлекательным из них благодаря своей экологической чистоте, широкой доступности и относительной дешевизне является фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии. Как известно, спектр солнечного излучения близок к излучению абсолютно черного тела, нагретого до 5800 К, что значительно выше температуры среды, при которой это излучение используется. Это означает, что предельный коэффициент полезного действия солнечного преобразователя может приближаться к 100%. Одними из наиболее перспективных фотопреобразователей являются солнечные батареи на основе аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$). Этот материал имеет низкую стоимость и может быть сформирован на больших по площади подложках.

В то время как физические процессы в солнечных преобразователях на основе кристаллического кремния изучены достаточно полно, свойства аналогичных по своему функциональному назначению структур на $a\text{-Si:H}$ исследованы недостаточно. В частности, не проводились систематические исследования однородности фоточувствительных структур на основе $a\text{-Si:H}$ по площади. Недостаточно изучена стабильность преобразователей на основе гидрированного кремния к различным внешним воздействиям. В то же время солнечные элементы на основе $a\text{-Si:H}$ зачастую работают в экстремальных условиях. При работе с концентраторами солнечной энергии на них падают мощные световые потоки. При работе в составе устройств, функционирующих в космическом пространстве, они подвергаются воздействию ионизирующей радиации. Указанные обстоятельства делают актуальными проблемы изучения однородности электрофизических свойств солнечных полупроводниковых элементов на основе $a\text{-Si:H}$ по площади и анализ их устойчивости к деградационным воздействиям. Эти проблемы должны изучаться в комплексе, так как при деградационных воздействиях изменяются и параметры, характеризующие однородность.

Выяснение механизмов деградационных изменений важно, с одной стороны, для совершенствования технологии промышленных солнечных элементов, а с другой стороны для развития представлений о фундаментальных физических процессах в некристаллических твердых телах, к которым относится $\alpha\text{-Si:H}$, в частности, для выяснения природы дефектов, определяющих их физические свойства.

Цель работы - исследование исходной однородности параметров солнечных преобразователей на основе аморфного гидрогенизированного кремния по площади и анализ характера изменения свойств приборных структур при мощных световых и радиационных воздействиях.

Для достижения поставленной цели ставились следующие основные задачи:

1. Разработать устройства со сканирующими зондами и методики соответствующих исследований для проведения контроля однородности солнечных преобразователей по площади.

2. Исследовать однородность по площади р-І-п структур на основе аморфного кремния приборного качества, из которых изготавливаются солнечные элементы.

3. Исследовать процессы, происходящие в структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$, в частности, при мощных световых (терморadiационных) и радиационных воздействиях.

4. Построить физические модели, объясняющие особенности процессов, которые происходят в р-І-п структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$ при внешних воздействиях. Проанализировать причины изменения однородности основных параметров по площади.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые с помощью оригинальных сканирующих ртутных и фотозондов проведены систематические исследования однородности основных параметров солнечных преобразователей на основе $\alpha\text{-Si:H}$ по площади и проведена классификация дефектов в структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$. На квазиоднородном фоне выявлено три типа дефектов, которые отличаются соотношением величины

тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ и напряжения холостого хода $U_{хх}$ и особенностями спектральных характеристик фотосовета.

2. Изучена терморadiационная стабильность солнечных элементов при мощных световых воздействиях из области собственного поглощения. Обнаружены эффекты, связанные с локальной диффузией водорода и приводящие к формированию дополнительных каналов локальной утечки, токоперенос в которых сопровождается мощными шумами со спектром типа $1/f$.

3. Обнаружена корреляция между поверхностными свойствами р-І-п структур на основе α -Si:H и наличием дефектов в активной области. Дефекты, расположенные в І-слое (микротрещины, поры, области нестехиометрии по водороду), выходят на поверхность р-І-п структур и проявляются в экспериментах по сканированию ртутными зондами.

4. Проанализированы деградиационные явления в структурах на α -Si:H при γ -облучении. Определен порог радиационной устойчивости (от $5 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^7$ рад). На фоне уменьшения средних значений $U_{хх}$ и $I_{КЗ}$ обнаружено повышение однородности этих параметров по площади.

5. Разработан ряд оригинальных методик измерения однородности на основе использования установок со сканирующими ртутными и световыми зондами, в частности, системы, в которых совмещены функции ртутных и лазерных зондов.

Практическая ценность работы

Результаты по изучению радиационной и терморadiационной стабильности могут быть использованы при разработке новых типов солнечных элементов.

Разработанные в диссертации методики измерений и аппаратура апробированы на различных фоточувствительных структурах и могут быть с успехом использованы как при конструировании солнечных фотопреобразователей, так и для прогнозирования их надежности и стабильности.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В фоточувствительных р-І-п - структурах на основе

α -Si:H имеется три типа неоднородностей по площади, отличающихся соотношением токов короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжений холостого хода $U_{хх}$.

2. Деградационные изменения, происходящие при терморрадиационных воздействиях в р-І-р структурах на основе α -Si:H связаны с локальной эффузией водорода. Эффузия водорода приводит к образованию дополнительных каналов утечки, токоперенос в которых сопровождается шумами типа $1/f$.

3. Существует корреляция между свойствами внешней поверхности р-І-р структур на основе α -Si:H и наличием дефектов в активной области.

4. Однородность $U_{хх}$ и $I_{кз}$ солнечных элементов на основе α -Si:H при γ -воздействиях повышается (на фоне ухудшения средних значений этих параметров по площади).

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных научных конференциях (Италия - 1993, Германия - 1992), а также на научных семинарах в Институте Физики АН Украины (г. Киев), Сдесском государственном университете им. И.И. Мечникова и Сдесском педагогическом институте им. К.Д. Ушинского.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в двух статьях в республиканском межведомственном научном сборнике "Фотозлектроника" и в тезисах докладов международной конференции в Италии. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа содержит два приложения с распечатками программ, использовавшихся при обработке результатов измерений. Текст диссертации изложен на 113 страницах, в том числе 31 рисунок и три таблицы. Список литературы состоит из 57 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели проводимых исследований, анализируется научная и практическая значимость изучения фотопреобразователей на $\alpha\text{-Si:H}$. Содержатся также данные о современном состоянии исследуемой проблемы, сведения о научном заделе лаборатории, где проводились исследования, кратко характеризуется структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору технологии получения аморфного гидрогенизированного кремния приборного качества и анализу особенностей его структуры и электронных свойств. Сформулированы основные требования к тонкопленочным элементам, которым они должны удовлетворять для эффективного преобразования солнечной энергии в электрическую. Указывается, что независимо от метода получения в готовом материале приборного качества всегда существует большое количество структурных дефектов типа микротрещин, полостей, локальных отклонений от стехиометрии состава. Анализируются причины возникновения дефектов. Рассматриваются особенности свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния, связанные с присутствием в них водорода, приводятся и анализируются литературные данные о спектрах электронных состояний в щели подвижности $\alpha\text{-Si:H}$.

Анализируются конструкции фотопреобразователей на основе $\alpha\text{-Si:H}$. Описываются методы получения солнечных элементов. В параграфе, посвященном соответственно фотоэлектрическим приборам на основе $\alpha\text{-Si:H}$, особое внимание уделяется проблемам эффективности преобразования солнечной энергии и путям повышения коэффициента этого преобразования. Подробно описаны физические ограничения при использовании $\alpha\text{-Si:H}$ в солнечных батареях.

Во второй главе описываются использовавшиеся при исследованиях образцы, приводится описание применявшихся методик исследования и аппаратуры. Основной объем исследований выполнен на p-I-n структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$, сформированных на покрытых прозрачным проводящим слоем стеклянных подложках. Измерялись также аналогичные структуры на стеклянных подложках с непрозрачным нижним электродом и на подложках из монокрис-

таллического кремния. Пленки α -Si:H получались реакцией разложения силана в ЗЧ-ряде и легировались в процессе получения. Для апробации разработанных методик исследования применялись также фотоувствительные структуры из монокристаллического и поликристаллического кремния.

Особое внимание в главе уделяется описанию использовавшихся при измерениях ртутных зондов различной конструкции. Подчеркивается, что на практике для каждой конкретной задачи приходилось изготавливать специальные зонды. Дана классификация зондов по конструкции в зависимости от принципа формирования ртутного контакта. Анализируются особенности оригинальных зондов, разработанных в ходе выполнения работы. В частности, для исследования однородности параметров солнечных элементов на основе аморфного гидрированного кремния был разработан и изготовлен ртутный фотозонд специальной конструкции, который сочетает в себе преимущества светового (лазерного) зонда и сканирующего ртутного зонда. Такой зонд позволил проводить измерения фототока на непрозрачных подложках в режиме непрерывного сканирования исследуемой поверхности. Подробно рассмотрены устройство указанного зонда и особенности работы с ним.

Описывается разработанная в ходе выполнения работы автоматическая установка, предназначенная для исследования спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе α -Si:H, работающая в автоматическом режиме. Подробно анализируется методика обработки экспериментальных данных по анализу спектров оптического поглощения пленок α -Si:H (учет интерференционных эффектов). Соответствующая программа, написанная на языке "BASIC", приведена в Приложении 1.

Заключительная часть второй главы диссертации посвящена описанию установки для измерения шумов в структурах на основе α -Si:H. Эта методика используется в работе для анализа физических процессов в каналах локальной утечки. Результаты измерения шумов также обрабатывались на ЭВМ и выдавались на печатном устройстве в виде таблиц и графиков. Соответствующая программа приведена в Приложении 2.

В третьей главе приводятся и интерпретируются результаты измерений однородности параметров солнечных элементов на ос-

нове аморфного гидрированного кремния по площади. Исследованы неоднородности напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Проведена классификация неоднородностей, существующих в исходных структурах и возникающих в результате деградационных изменений при мощных световых воздействиях. Анализируются свойства p - i - n структур после таких воздействий.

Результаты измерений представлены в виде топограмм, на которых можно выделить ряд особенностей. Прежде всего, это места локальных каналов утечки, где напряжение холостого хода падает почти к нулевому значению, а ток короткого замыкания значительно ниже среднего по образцу значения. Другой особенностью, которую можно выделить на топограммах однородности, являются области с пониженными по сравнению со средними значениями величинами $I_{KЗ}$. Доказателем тот факт, что относительные изменения напряжения холостого хода значительно меньше относительных изменений тока короткого замыкания. Указанная закономерность связывается в работе с флуктуациями концентраций рекомбинационных центров в объеме пленки аморфного гидрированного кремния, что подтверждается экспериментами по терморadiационному отжигу p - i - n структур при воздействии концентрированного солнечного излучения.

Исследования спектральных характеристик солнечных элементов в точках с повышенными и пониженными по сравнению со средними значениями токов короткого замыкания не показали систематических сдвигов порога фотоэффекта в длинноволновую область. Тем не менее, обнаруживались отдельные точки с повышенной чувствительностью в длинноволновой области спектра.

При работе солнечного элемента большой площади происходит внутреннее усреднение его локальных характеристик, так что их флуктуации существенно уменьшаются. Отдельные участки элементов могут оказаться нагруженными друг на друга, что ведет к понижению коэффициента преобразования всей батареи. Достижение оптимальных значений параметров солнечной батареи возможно лишь при обеспечении высокой однородности p - i - n структур по площади и минимизации числа каналов локальных проводимостей.

С целью детального исследования особенностей крупномасштабных дефектов с помощью ртутных зондов были проведены измерения вольт-амперных и нагрузочных характеристик отдельных

участков p-I-p структур. Измерения вольт-амперных характеристик показали, что в зависимости от режима измерений наблюдаются токи, имеющие инжекционную природу и токи, ограниченные последовательным сопротивлением контактов. На участках сильных флуктуаций основных параметров ($I_{\text{д}}$ и $I_{\text{кз}}$) наблюдаются более низкие значения шунтирующих сопротивлений, более высокие значения ограничивающих сопротивлений каналов и наличие вместо омического участка зависимостей $I(\varphi)$ сублинейных характеристик. Последнее, видимо, является следствием появления в структуре потенциального рельефа типа встречно включенных барьеров Шоттки, что подтверждается специфическим видом вольт-фарадных характеристик на дефектных участках структуры. Частотные измерения емкости и проводимости p-I-p структур показали, что в области частот от 20 Гц до 50 кГц емкость образцов практически постоянна. Они могут рассматриваться как плоские конденсаторы с I-слоем в качестве диэлектрика. При более низких частотах результирующая емкость системы растет и определяется уже не размерами металлического контакта, а характерными размерами образца. При измерениях спектров диэлектрических потерь регистрируемые зависимости проводимости σ от частоты ω удовлетворительно спрямляются в логарифмических координатах. Для интерпретации полученных данных использовалась теория прыжковой проводимости на переменном токе. Проведенный анализ позволил оценить концентрацию ловушек до и после светового воздействия. Обнаружено, что после облучения концентрированным солнечным светом (100 Вт/см^2 , $t = 20 \text{ мин.}$) плотность ловушек возрастает примерно вдвое. Этот эффект связан с диффузией водорода и образованием дополнительных оборванных связей (рекомбинационных состояний), что отражается на параметрах фотообразования.

В ходе исследований обнаружена корреляция между поверхностными свойствами p-I-p структур на основе a-Si:H и свойствами объема p-I-p перехода. Такая корреляция наблюдается как на исходных структурах, так и на структурах, облученных фокусированным солнечным светом. Этот факт свидетельствует о наличии протяженных дефектов типа дислокаций для поликристаллического кремния либо пор для аморфного гидрогенизированного кремния, выходящих на поверхность образца. Такие дефекты ве-

дут к возрастанию концентрации ловушек в щели подвижности I-области p-I-n структуры, что приводит к уменьшению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания и, в конечном итоге, отрицательно влияет на эффективность работы солнечного элемента. Факт выхода дефектов на поверхность проявляется в экспериментах по записи заряда на поверхности с помощью сканирующих ртутных зондов.

Заключительная, четвертая глава посвящена исследованию влияния радиационных воздействий на свойства солнечных элементов на основе a-Si:H. Измерялись нагрузочные характеристики типичного p-I-n элемента с верхним металлическим электродом диаметром 3 мм в исходном состоянии и после γ -облучения дозами $1 \cdot 10^6$ рад, $1 \cdot 10^7$ рад и $2 \cdot 10^8$ рад. Полученные данные позволили оценить пороговые дозы, при которых начинают проявляться радиационные изменения. Эти дозы находятся в области от $5 \cdot 10^6$ рад до $1 \cdot 10^7$ рад. Следует отметить, что при указанных дозах не наблюдается существенных изменений коэффициента оптического поглощения аморфного кремния, из которого изготовлен солнечный элемент. Заметим также, что радиационные изменения частично отжигаются даже при комнатной температуре, но полного восстановления исходных параметров не удалось добиться даже в результате отжига при повышенных температурах.

Полученные результаты объясняются тем, что энергии γ -кванта достаточно для разрыва основных связей Si-Si и Si-H в аморфном гидрированном кремнии с образованием большого числа оборванных связей кремния. Ионы водорода могут соединяться в молекулы и эфундировать из пленочной структуры. Мощные световые воздействия также могут приводить к эффузии водорода. Часть водорода остается возле оборванных Si-Si-связей и образует новые квазиустойчивые состояния, которые являются эффективными центрами рекомбинации электронно-дырочных пар. При отжиге происходит обратный процесс, завершающийся частичным восстановлением деградированных структур. Генерация указанных дефектов при γ -облучении происходит однородно по всему объему пленки в отличие от локальных нарушений при облучении мощным видимым светом. Это приводит к повышению однородности электрических параметров p-I-n структур, естественно, на фоне общего ухудшения нагрузочных кривых.

В Н В. С. Д. И .

1. Проведена классификация неоднородностей в фоточувствительных структурах на основе аморфного кремния. Выделено три типа неоднородностей, отличающихся соотношением $U_{\text{кх}}$ и $I_{\text{кз}}$ и порогом спектральной чувствительности.

2. Исследовано влияние каналов локальной проводимости на характеристики фоточувствительных структур.

3. Проанализированы факторы, определяющие коэффициенты полезного действия фотопреобразователей. Построена эквивалентная схема фоточувствительных р-І-п элементов.

4. Изучены изменения, происходящие в р-І-п структуре на основе $\alpha\text{-Si:H}$ под действием мощного излучения из области собственного поглощения. Даны оценки изменений концентрации ловушек в активной области.

5. Показано, что в р-І-п структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$ ток утечки сопутствует мощные шумы со спектром $1/f$, которые увеличиваются при токовых, световых и термических воздействиях и объясняются токопереносом по локальным каналам утечки.

6. Обнаружены корреляции между поверхностными свойствами и характеристиками объема р-І-п структур. Указанные корреляции свидетельствуют о том, что часть дефектов І-слоя в р-І-п структуре выходит на поверхность солнечного элемента.

7. Проведены систематические исследования радиационной стабильности р-І-п фотопреобразователей на основе аморфного гидрогенизированного кремния под действием γ -излучения. Определено, что предельная допустимая доза облучения составляет от $5 \cdot 10^6$ рад до $1 \cdot 10^7$ рад. На фоне общего ухудшения нагрузочных кривых обнаружено повышение однородности $U_{\text{кх}}$ и $I_{\text{кз}}$ после облучения.

8. Построены физические модели, объясняющие характер радиационных изменений в структурах на основе $\alpha\text{-Si:H}$ под действием света из области собственного поглощения и под действием γ -излучения. Интерпретированы наблюдавшиеся изменения параметров фотоэлементов по площади.

9. Разработаны оригинальные методики контроля однороднос-

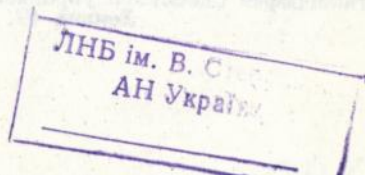

ти фоточувствительности планарных солнечных преобразователей по площади, специальные ртутно-световые сканирующие зонды и контактные устройства. Разработанные приборы и методики апробированы на солнечных элементах различного типа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Roizin Y.O., Maomou F.E., Soloshenko V.I., Sviridov V.N. Inhomogeneities of photosensitive α -Si:H based structures // International conference "From Galileo's oecialino to optoelectronics: frontiers of optical systems and materials" (Padova, June 9-12, 1992, Italy). - Padova. - 1992.

2. Дойчо И.К., Маому Ф.Э., Ройзин Я.О. Влияние жесткого облучения на свойства солнечных батарей на основе аморфного гидрированного кремния // Фотозлектроника. - 1993. - Вып. 6.

3. Лелеченко В.П., Маому Ф.Э., Ройзин Я.О. Неоднородности параметров солнечных элементов на основе гидрированного кремния по площади // Фотозлектроника. - 1993. - Вып. 6.



УЧЕБНИК

ВВЕДЕНИЕ
1. Цель и задачи учебника
2. Структура учебника

УЧЕБНИК

1. Цель и задачи учебника
2. Структура учебника

3. Методические рекомендации
4. Заключение

5. Приложение

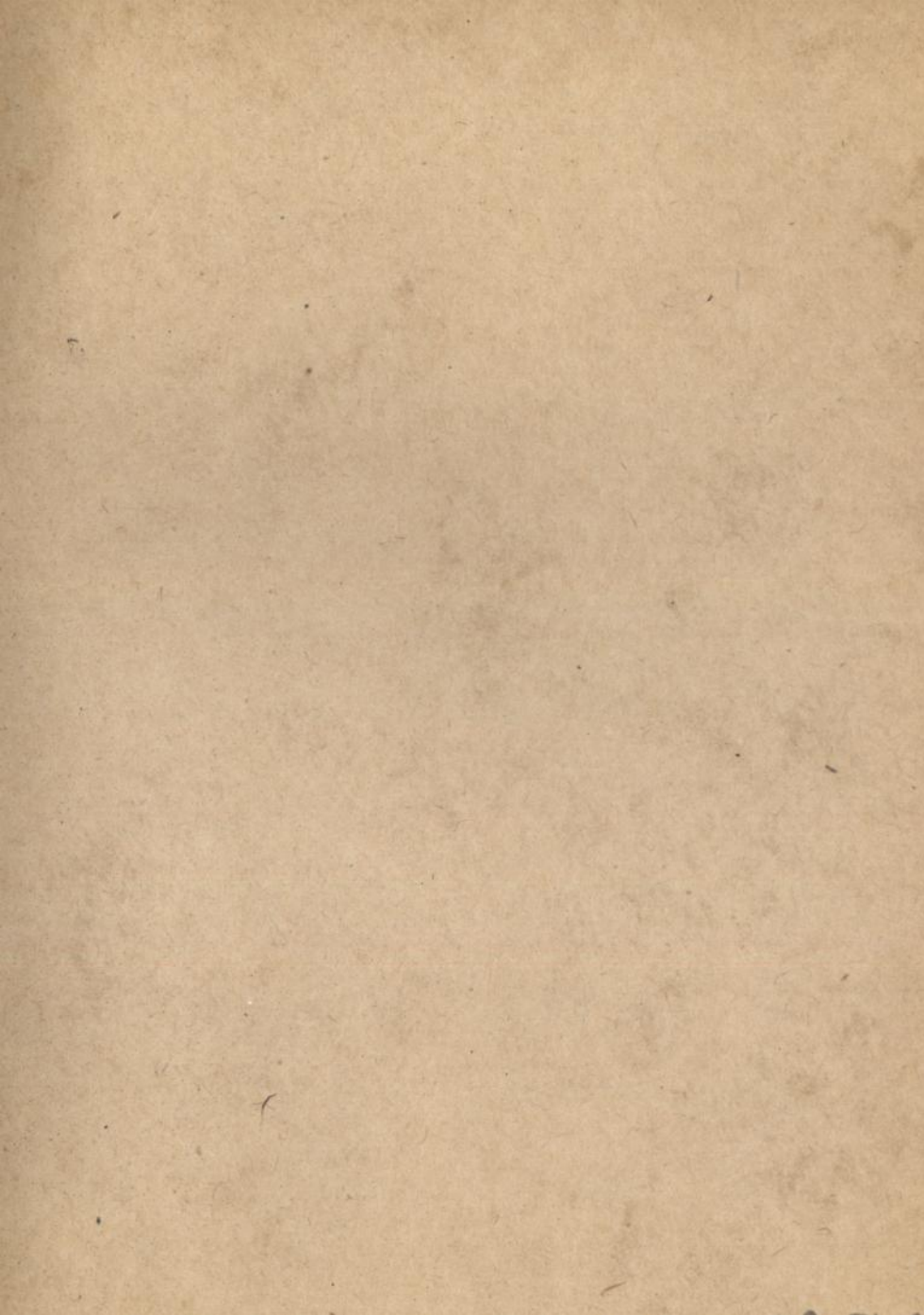
6. Литература

7. Заключение

8. Заключение

Подп. к печати 17.03.94г. Формат 60x84 I/16.
Объем 0,5уч. изд. л. 0,75п. л. Заказ № 305. Тираж 60экз.
Гортипография Одесского управления по печати, цех №3.
Ленина 49.





AB 29.880