

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАР-
СТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии
и управления качеством

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ
КРЕМНИЯ И ПОЛИЭТИЛЕНИМИНА**
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Светлицыной Надежды Артуровны

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.В. Стецюра

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.Б. Вениг

инициалы, фамилия

Саратов 2020

Введение. В настоящее время с развитием нанотехнологий поверхность, её свойства и характеристики играют всё более важную роль в микро-, нано- и оптоэлектронике. В последнее десятилетие активно исследуются многослойные пленочные структуры нанометровой толщины на различных подложках.

На основе тонкопленочных полупроводниковых материалов создано большое количество разнообразных датчиков с высокой чувствительностью и селективностью. Также, чувствительность датчиков увеличивают, модифицируя поверхность полупроводника с помощью органических монослоев [1].

У большинства полупроводниковых датчиков принцип действия основан на изменении проводимости и зарядового состояния центров при внешнем воздействии. Об этих воздействиях судят, как правило, на основании изменений вольт-амперной (ВАХ) или вольт-фарадной характеристик (ВФХ), вид которых во многом зависит от свойств наноразмерных слоёв на поверхности полупроводников. Одним из методов управления электрофизическими свойствами поверхности является создание гибридных структур с применением органических соединений. Исследования в этом направлении проводились в ряде работ [2-3] и показали их перспективность. Но на данный момент имеются лишь разрозненные результаты экспериментальных исследований для ограниченного круга материалов, используемых для создания гибридных структур.

Наиболее интересными и перспективными для исследования и дальнейшего применения являются полупроводниковые подложки на основе монокристаллического кремния.

Также большое внимание уделяется аморфному кремнию (a-Si). Но, необходимо отметить, что недостаточно изученными являются характеристики гибридных структур, в которых одновременно присутствуют слои аморфного кремния и монокристаллического кремния. Их свойства и перспектива использования в настоящее время изучается [4].

В связи с изложенным, целью бакалаврской работы является исследование влияния слоя аморфного кремния (a-Si) различной толщины и органического слоя полиэлектролита на вольт-фарадные, вольт-амперные и частотные ха-

рактеристики структуры, созданной на основе монокристаллического кремния.

Для достижения цели данной работы решались следующие задачи:

1. Создание гибридных структур «верхний контакт – органическое покрытие – тонкоплёночный полупроводник – полупроводник – нижний контакт» и «верхний контакт – тонкоплёночный полупроводник – полупроводник – нижний контакт» на основе монокристаллического кремния и аморфных плёнок a-Si.
2. Исследование влияния слоя аморфного кремния на свойства структур Al/(a-Si)/p-Si/Ti и Al/(a-Si)/n-Si/Ti.
3. Исследование влияния освещения на изменение ёмкости структур и тока, протекающего через структуру.
4. Экспериментальное исследование вольт-амперных, вольт-фарадных и частотных характеристик указанных структур.
5. Проведение расчётов на основе экспериментальных данных потенциала плоских зон, коэффициентов выпрямления вольт-амперных характеристик и неидеальности и поверхностных потенциальных барьеров.

Дипломная работа занимает 58 страницы, имеет 50 рисунков и 7 таблиц.

Обзор составлен по 58 информационным источникам.

Во введении рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой обзор научной литературы по сформулированной выше проблеме.

Во втором разделе работы представлены получение слоистых гибридных структур ПЭИ/Al/a-Si/Si/Ti, экспериментальные результаты и анализ полученных характеристик. Проведен расчет коэффициентов выпрямления и неидеальности, поверхностных потенциальных барьеров и значений плоских зон. Он включает в себя такие подразделы, как описание объектов исследования, установки и режимов для исследования электрофизических характеристик, результаты измерения ВАХ, ВФХ и частотных характеристик и их анализ.

Основное содержание работы

Основная часть работы содержит как обзор научной литературы по сформулированной выше проблеме и методов анализа электрофизических характеристик, так и практическую часть, в которой представлены результаты выполнения поставленных задач.

Описание объекта исследования: материалов и технологии. Для проведения исследований были выбраны монокристаллические кремниевые пластины р- и n- типа. Данные пластины обрабатывались в перекисно-аммиачном растворе с целью удаления органических загрязнений с поверхности и активации отрицательно заряженных ОН-групп на поверхности [5].

На одной из сторон подложки получали аморфный кремний на установке магнетронного распыления в соответствии с технологией, разработанной в [6]. Толщина слоя аморфного кремния для первой партии образцов составляла 50 нм, для второй – 100 нм. Далее через квадратную маску наносился нижний контакт Ti методом магнетронного распыления на подложку. После чего на поверхность, свободную от контакта, наносился слой полиэтиленimina таким образом, чтобы он не попал на нижний контакт и не занимал всю площадь. Верхний контакт Al наносился через маску методом термического испарения в вакууме на установке ВУП-5, таким образом, чтобы контактные площадки располагались и на ПЭИ, и на «чистом Si».

Установка и режимы для исследования электрофизических характеристик. Электрофизические характеристики полученных многослойных гибридных структур на основе кремния исследовались на зондовой станции Cascade Microtech в комплексе с прибором Agilent Technologies B1500A в программе EasyEXPERT, которая позволяла проводить параметрические испытания. Источником света служил встроенный оптоволоконный осветитель MLC-150.

Для изучения свойств полученной структуры использовались методы, основанные на зависимости емкости от напряжения, емкости от частоты и тока от напряжения.

Результаты измерений частотных характеристик. Измерения частотных характеристик проводились при разных значениях постоянного напряжения -1, +4 и +7 В в диапазонах частот от 1 до 100 кГц и от 1 до 1 МГц при разных уровнях освещенности: в темноте и при освещенности 21000 люкс.

Время релаксации τ сигнала рассчитывалось по формуле (1)

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{C_1^2 - C_2^2}{(C_2 \times f_2)^2 - (C_1 \times f_1)^2}}, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – значения емкости на частотах f_1 и f_2 в Гц, соответственно.

Значение частоты f_2 выбиралось таким, чтобы величина емкости на этой частоте была в 0,7 раз меньше, чем при f_1 .

Результаты измерений вольт-амперных характеристик. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в диапазоне напряжений от -3 до 3 В с шагом 0,06 В при разных уровнях освещенности для структур Al/n-Si/a-Si/Ti и Al/p-Si/a-Si/Ti со слоем ПЭИ и без него. Толщина аморфного кремния составляла 50 и 100 нм.

Исследование полученных вольт-амперных характеристик. Первичная оценка ВАХ исследуемых образцов проводилась с помощью коэффициента выпрямления K , который определяется по формуле (2)

$$K = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}, \quad (2)$$

где $I_{пр}$ – максимальное значение тока на прямой ветви ВАХ при $U_{пр}$, $I_{обр}$ – величина тока на обратной ветви ВАХ при смещении, равном по величине и противоположном по знаку $U_{пр}$.

Проводилось сравнение изменения ВАХ структур Si/a-Si n- и p- типов проводимости монокристаллического Si в темноте и при освещении структуры с толщиной a-Si 50 и 100 нм.

Были рассчитаны коэффициенты выпрямления ВАХ по формуле (2). Полученные результаты записаны в таблицу 1.

Таблица 1 – Коэффициенты выпрямления ВАХ

Структура	Толщина a-Si, нм	Режим работы	К, отн. ед.
p-Si /a-Si	50	В темноте	1,1
		При освещении	1,3
	100	В темноте	2,19
		При освещении	3,13
p-Si /a-Si/ПЭИ	50	В темноте	1,33
		При освещении	1,34
	100	В темноте	1,51
		При освещении	7,55
n-Si /a-Si	50	В темноте	22,71
		При освещении	29,8

Расчет потенциального барьера и коэффициента неидеальности. Экспериментальные данные были использованы для изучения методики анализа ВАХ, имеющих выпрямление, с помощью модифицированной формулы Шоттки (3) для термоэлектронной эмиссии, в которую вводится коэффициент неидеальности n .

$$I = I_s \exp\left(\frac{qU}{nk_B T}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{qU}{k_B T}\right)\right), \quad (3)$$

где I_s – ток насыщения; T – температура; U – напряжение; q – модуль заряда электрона; n – коэффициент неидеальности; k_B – постоянная Больцмана; φ_{Bn} – барьерная разность потенциалов для полупроводника (в данном случае n -типа).

Для того, чтобы определить потенциальный барьер и коэффициент неидеальности, ВАХ перестраивались в координатах (формула 4).

$$\ln\left[\frac{I}{1 - e^{-\frac{qU}{k_B T}}}\right] = \ln(\sigma A^* T^2) + \frac{q}{k_B T} \left(-\varphi_{Bn} + \frac{U}{n}\right), \quad (4)$$

где σ – площадь контакта, I – сила тока, A^* – эффективная постоянная Ричардсона для данного полупроводника, φ_{Bn} – барьерная разность потенциалов для полупроводника (в данном случае n -типа).

Обратные ветви полученных графиков аппроксимировались линиями вида (формула 5)

$$y = k \cdot U + b, \text{ где } k = -\frac{q}{n \cdot k_B \cdot T}, b = \ln(\sigma \cdot A^* \cdot T^2) - \frac{q \cdot \phi_B}{k_B \cdot T}. \quad (5)$$

Полученные значения коэффициентов неидеальности и потенциального барьера представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента неидеальности и потенциального барьера

Образец	Режим работы	k	b	n	ϕ_B , мВ
p-Si/a-Si с толщиной a-Si 50 нм	В темноте	36,655	23,000	1,054	895
	При освещении	36,600	23,245	1,060	901
p-Si/a-Si/ПЭИ с толщиной a-Si 50 нм	В темноте	36,936	21,987	1,046	869
	При освещении	36,661	22,740	1,056	888
p-Si/a-Si с толщиной a-Si 100 нм	В темноте	37,211	21,467	1,039	855
	При освещении	36,676	21,799	1,054	864
p-Si/a-Si/ПЭИ с толщиной a-Si 100 нм	В темноте	37,244	26,161	1,038	870
	При освещении	36,583	22,212	1,057	976
n-Si/a-Si с толщиной a-Si 50 нм	В темноте	37,232	18,735	1,038	785
	При освещении	37,033	19,362	1,044	801

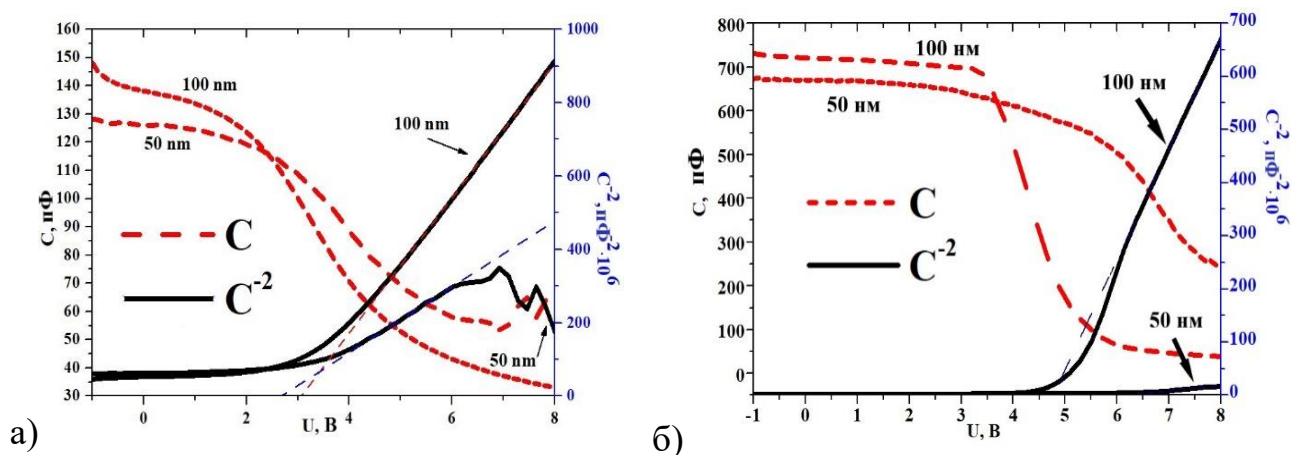
Результаты измерений вольт-фарадных характеристик. Вольт-фарадные характеристики измерялись в диапазоне напряжений от -1 до 8 В с шагом 0,18 В при разных уровнях освещенности, на частотах 1, 10 и 100 кГц. Освещение со стороны верхнего электрода осуществлялось с помощью встроенного оптоволоконного осветителя MLC-150. Уровень освещения изменялся с помощью стационарного переключателя контроля интенсивности.

Анализ полученных вольт-фарадных характеристик. Проводилось сравнение ВФХ структур Si/a-Si n- и p- типов проводимости монокристаллического Si при разных уровнях освещенности структуры с толщиной a-Si 50 и 100 нм, измеренные на разных частотах на структуре p-Si/a-Si. Изучалась стабильность измеряемых ВФХ во времени на максимальной освещенности при частоте 1 кГц. Измерения проводились в течении 35 минут с момента включения

света.

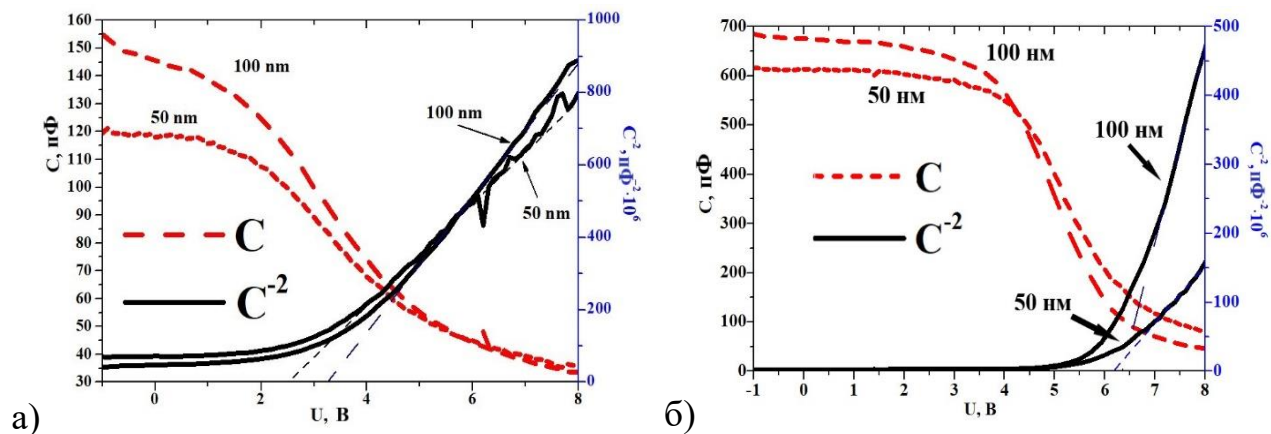
Нахождение значений плоских зон по вольт-фарадным характеристикам. Измерения ВФХ проводились на частотах 1 кГц с амплитудой измерительного сигнала 20 мВ.

ВФХ перестраивались в координатах Мотта-Шоттки – по линейному участку такого графика определялось напряжение U_0 , подаваемое на структуру, для достижения состояния «плоских зон». На рисунке 1 показаны ВФХ структур Al/a-Si/p-Si/Ti, а на рисунке 2 – ПЭИ/Al/a-Si/p-Si/Ti.



а) в темноте, б) при освещении интенсивностью 21000 лк

Рисунок 1 – ВФХ структур на основе p-Si со слоем a-Si толщиной 50 нм и 100 нм, измеренные на частоте 1 кГц



а) в темноте, б) при освещении интенсивностью 21000 лк

Рисунок 2 – ВФХ структур p-Si/a-Si/ПЭИ со слоем a-Si толщиной 50 нм и 100 нм, измеренные на частоте 1 кГц

На рисунках 3-4 представлены ВФХ структур ПЭИ/Al/a-Si/n-Si/Ti с тол-

щиной аморфного кремния 50 и 100 нм, измеренные в темноте (рисунок 4) и при освещении (рисунок 5) и ВФХ перестроенные в координатах Мотта-Шоттки.

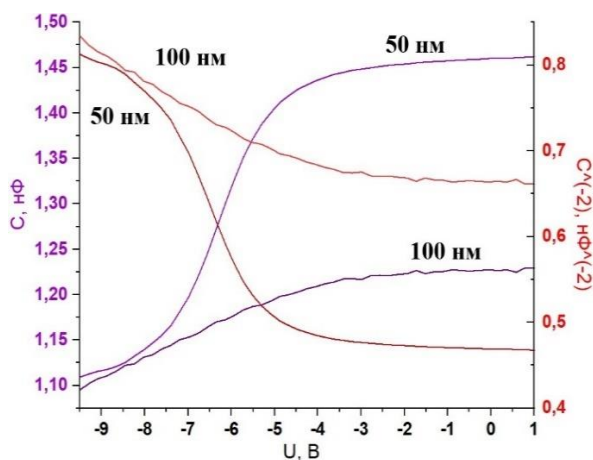


Рисунок 3 – ВФХ структур n-Si/a-Si/ПЭИ со слоем a-Si толщиной 50 нм и 100 нм, измеренные на частоте 1 кГц при освещении интенсивностью 21000 лк

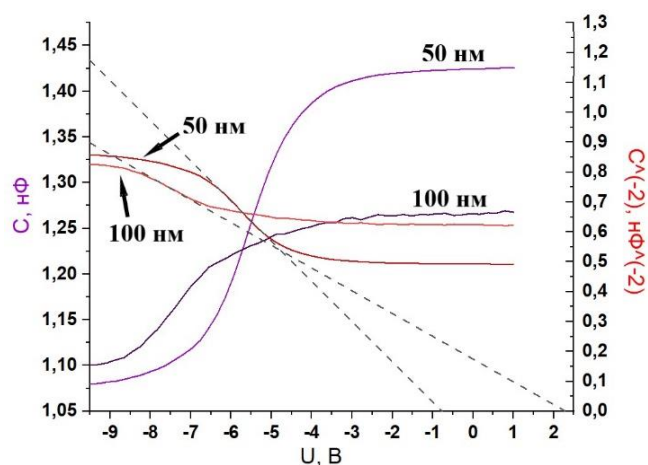


Рисунок 4 – ВФХ структур n-Si/a-Si/ПЭИ со слоем a-Si толщиной 50 нм и 100 нм, измеренные на частоте 1 кГц в темноте

Заключение. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие основные результаты:

1. Изучены вольт-амперные, вольт-фарадные и частотные характеристики полученных в лабораторных условиях гибридных слоистых структур на основе кремния. Исследуемые партии образцов отличались толщиной a-Si и наличием органического нанометрового покрытия из полиэтиленimina.

2. Получено, что при измерении характеристик на свету увеличивается ёмкость во всем диапазоне частот, но на низких частотах ёмкость от освещения изменялась больше, чем на высоких. Монотонное уменьшение ёмкости при увеличении частоты измерительного сигнала связано с тем, что на малых частотах поверхностные состояния успевают перезарядиться и большое количество носителей заряда участвует в формировании сигнала.

3. В темноте на частотах, меньших 10 кГц, слой ПЭИ приводит к уменьшению результирующей ёмкости гибридной структуры, а на частотах больших

10 кГц – к увеличению. При освещении во время измерения характеристик данный слой уменьшает ёмкость структуры во всем диапазоне частот.

4. При освещении на частотах от 1 до 2,5 кГц ёмкость структуры с толщиной аморфного кремния 100 нм больше, чем с толщиной 50 нм, а на частотах от 2,5 до 1000 кГц – меньше. После нанесения слоя ПЭИ во всём диапазоне частот при освещении ёмкость структуры с толщиной аморфного кремния 50 нм больше, чем с толщиной 100 нм.

5. При нанесении слоя ПЭИ значения токов прямой и обратной ветви для образцов p-Si/a-Si с толщиной a-Si 50 и 100 нм уменьшились.

6. Исследование вольт-фарадных характеристик показало, что при увеличении освещенности увеличивается ёмкость во всем диапазоне напряжений. Причем на низких частотах ёмкость изменялась больше, чем на высоких.

7. Увеличение толщины a-Si приводит к увеличению ёмкости структуры при малых значениях напряжений и к уменьшению – при больших в темноте и при освещении. Слой ПЭИ сильнее влияет на структуру с толщиной аморфного кремния 100 нм. Он значительно уменьшает ёмкость данной структуры при малых значениях напряжения по сравнению со структурой с толщиной аморфного кремния 50 нм.

8. Ёмкость структуры с подложкой n-типа в темноте и при освещении меньше, чем структуры с подложкой p-типа. Причем на образец с подложкой p-типа освещение структуры влияет значительно сильнее, чем на образец с подложкой n-типа.

9. Расчёт потенциала плоских зон, коэффициентов выпрямления и неидеальности и поверхностных потенциальных барьеров показал, что слой ПЭИ уменьшает барьер ϕ_B и коэффициент неидеальности для структуры p-Si/a-Si с толщиной a-Si 50 нм, как в темноте, так и при освещении, а для структуры p-Si/a-Si с толщиной a-Si 100 нм увеличивает барьер как в темноте, так и при освещении и увеличивает коэффициент неидеальности при освещении, в темноте – уменьшает его. Для физической интерпретации этих экспериментальных фактов требуются дальнейшие исследования.

10. По результатам исследований сделан доклад на Всероссийской конференции с опубликованием материалов доклада [7].

Список использованных источников

1 Струнин, В. И. Влияние внешних параметров осаждения на структурные изменения в тонких пленках аморфного кремния / В. И. Струнин, Л. В. Баранова, Г. Ж. Худайбергенов // Вестн. Ом. Ун-та. – 2015. – № 2. – С. 23-25.

2 Vilan, A. Molecules on Si: Electronics with Chemistry / A. Vilan, O. Yaffe, A. Biller, A. Salomon, A. Kahn, D. Cahen // Adv. Mater. – 2010. – № 22. – P. 140-159.

3 Har-Lavan, R. Toward metal-organic insulator-semiconductor solar cells, based on molecular monolayer self-assembly on n-Si / R. Har-Lavan, I. Ron, F. Thieblemont, D. Cahen // Appl. Phys. Lett. – 2009. – № 94. – P. 1-3.

4 Стецюра, С. В. Структуры для биосенсорики на основе Si/a-Si, полученные с помощью фотостимулированной адсорбции / С. В. Стецюра, А. В. Козловский, А. А. Сердобинцев, Д. М. Митин // Микро- и нанотехнологии в электронике: сборник, материалы X международной научно-технической конференции. – Нальчик : Издательство Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова, 2018. – С. 350-354.

5 Aswal, D. K. Self assembled monolayers on silicon for molecular electronics / D. K. Aswal, S. Lenfant, D. Guerin, J. V. Yakhmi, D. Vuillaume // Anal. Chim. Acta. – 2006. – № 568. – P. 84-108.

6 Митин, Д. М. Особенности роста тонких плёнок аморфного кремния, полученных методом магнетронного распыления / Д. М. Митин, В. А. Александров, А. А. Скапцов, С. Б. Вениг, А. А. Сердобинцев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 6. – С. 31-37.

7 Светлицына, Н. А. Исследование структур для ферментативных биосенсоров, работающих на полевом эффекте / Н. А. Светлицына, А. В. Козловский, С. В. Стецюра // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине –

2019: сборник статей Всероссийской школы-семинара, посвященной 110-летию Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. / под редакцией А. В. Скрипаля. – Саратов : Издательство "Саратовский источник", 2019. – С. 93-96.