

ИОНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА 2011–2021 гг.: ТРЕНДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ¹

© 2023 г. А. К. Иванов-Шиц^{a, b, *}

^aИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

^bМГИМО МИД РФ, Москва, Россия

*e-mail: alexey.k.ivanov@gmail.com

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 26.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

На основании анализа публикационной активности с использованием единой библиографической и реферативной базы данных рецензируемой научной литературы Scopus установлены тенденции развития основных разделов ионики твердого тела. Указаны перспективные области исследований, связанные с *in situ* и *operando* экспериментами, искусственным интеллектом (машинным обучением) и конструированием новых устройств с использованием суперионных материалов.

Ключевые слова: ионика твердого тела, твердые электролиты, суперионные проводники, Scopus

DOI: 10.31857/S0424857023010188, **EDN:** JXPPJA

ВВЕДЕНИЕ

Ионика твердого тела (ИТТ) изучает явления быстрого ионного переноса в твердых телах, таких как твердые электролиты (суперионные проводники) и смешанные ионно-электронные проводники (СИЭП) [1]. Рассматриваемая область науки лежит на пересечении физики и химии твердого тела, электроники и электрохимии, кристаллографии и неорганической химии, материаловедения и энергетики. Будучи междисциплинарной наукой, ИТТ тесно связана с разнообразными прикладными направлениями, такими как конструирование и создание металл-ионных аккумуляторов, топливных элементов, электролизеров, химических датчиков (сенсоров) и других разнообразных электрохимических устройств.

Термин “Solid State Ionics” (ионика твердого тела) для обозначения новой области твердых электролитов был введен Т. Такахаши (Япония) в 60-е годы прошлого века [2]. Однако общеупотребительным выражение ИТТ стало примерно через двадцать лет, после появления соответствующего нового научного журнала “Solid State Ionics”.

ИТТ охватывает широкий круг тем как в фундаментальной науке, так и в приложениях.

Основной предмет изучения ИТТ – материалы с быстрым ионным переносом, осуществляемым как катионами, так и анионами. Такие материалы и называют твердыми электролитами. Кро-

ме того, большое внимание уделяется и СИЭП, в которых наряду с высокой ионной проводимостью существует и значительная электронная составляющая. Материалы могут быть получены в различном виде – монокристаллы, поликристаллы, керамика, пленки. Сюда же следует отнести композиты и полимеры.

Исследования в области фундаментальной науки связаны, прежде всего, с изучением особенностей ионного транспорта в разупорядоченных фазах. Для этого используется широкий спектр современных экспериментальных методов – исследование особенностей кристаллической структуры суперионной фазы с помощью рентгеновского, нейтронного и синхротронного излучений; ИК- и электронная спектроскопия в УФ, разнообразные методики электронной и атомно-силовой микроскопии, ЯМР и измерения диффузии методом меченых атомов, импедансная спектроскопия и т.п.

Широко используются методы компьютерного моделирования – подход Монте-Карло, квантовохимические расчеты, классическая и *ab initio* молекулярная динамика.

В последние годы все больше внимания уделяется исследованию явлений и процессов, протекающих на границах. Во-первых, широкое использование композитных твердых электролитов заставляет ученых специально заниматься изучением межфазных и межзеренных границ. С другой стороны, при конструировании, например, литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) или твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) явления,

¹ По материалам доклада на 16-м Международном Совещании “Фундаментальные проблемы ионики твердого тела”, Черноголовка, 27.06.–03.07.2022.

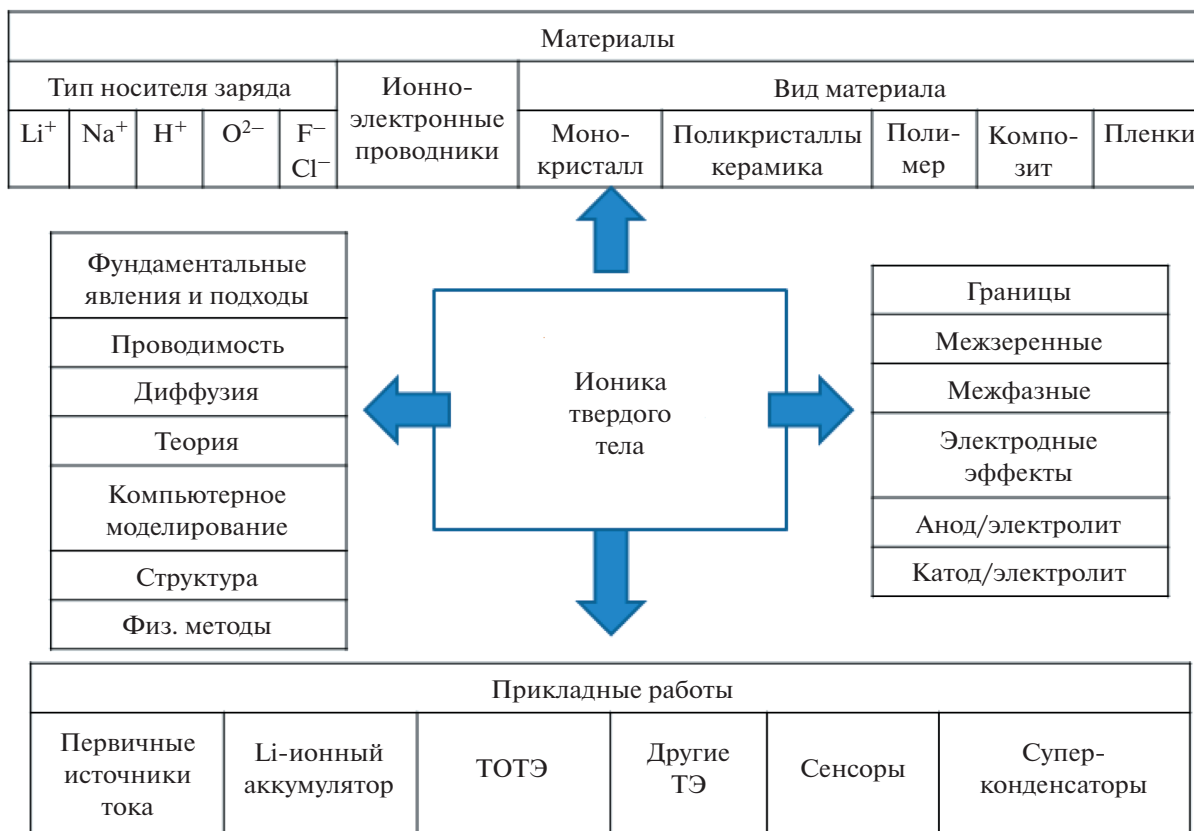


Рис. 1. Основные разделы ионики твердого тела.

протекающие на электродных интерфейсах, могут играть определяющую роль в работе таких (и многих других) электрохимических устройств.

Результаты фундаментальных работ открывают новые возможности как для поиска и синтеза новых материалов ИТТ с суперионной и/или смешанной ионно-электронной проводимостью, так и создания и усовершенствования различного рода устройств для прикладных работ. В частности, для разработки новых металл-ионных аккумуляторов (МИА), различного типа топливных элементов, химических сенсоров, сверхъёмких суперконденсаторов.

Основные направления и области ИТТ представлены на объединяющей схеме (рис. 1).

В литературе можно найти обзорные работы, в которых обсуждается как состояние ионики твердого тела в различные годы, так и перспективы ее развития [3–7]. Достаточно детальный анализ числа публикаций по разным аспектам ИТТ был сделан более 10 лет назад [8], поэтому вполне логичным представляется описать состояние рассматриваемой научной дисциплины за последние 11 лет – с 2011 по 2021 г.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

Большая часть работы основана на анализе публикационной активности с использованием единой библиографической и реферативной базы данных рецензируемой научной литературы Scopus [9]. В 2021 г. БД Scopus включала более 82 млн записей из 24600 периодических изданий, 101 000 конференций и 231 000 книг из 105 стран, а полный текст публикаций может быть на любом из 40 языков. Ежедневно БД пополняют около 10000 статей различной тематики. Следует отметить, что поиск ведется только по реферативной части базы, однако глубина базы данных не ограничена.

Помимо поиска публикаций по ключевым словам (подробнее о возможности поиска см., например, [10]), обсуждаемая БД Scopus позволяет провести расширенный поиск материалов с применением более 40 полей отбора. Для предварительного анализа полученной научно-исследовательской информации также можно использовать встроенные инструменты в БД Scopus в аналитической панели с опцией выбора объекта. Здесь предусмотрена возможность распределения документов по источникам, по годам и странам и т.п.

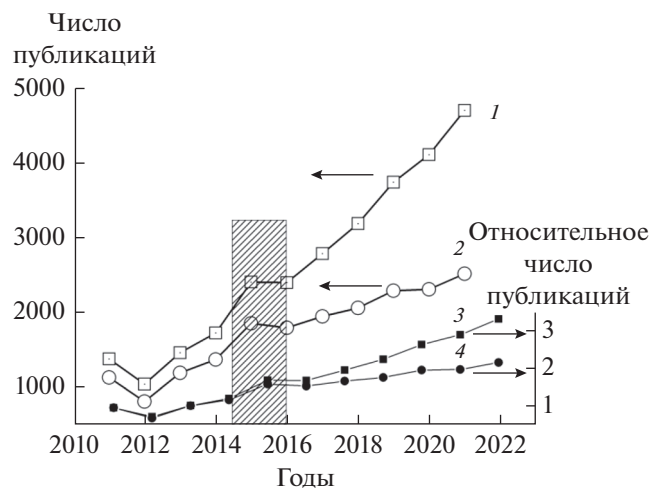


Рис. 2. Распределение общего числа публикаций по годам: 1, 3 – публикации всех стран, 2, 4 – публикации всех стран, за исключением КНР.

Для изучения ситуации в России автором статьи был проведен опрос ведущих исследователей (посредством анкетирования). Результаты этого опроса также использованы в публикации.

При обсуждении вопроса о распределении научных исследований между фундаментальными поисковыми направлениями и прикладными задачами в работе была использована информация, основанная на “ручном” анализе публикаций в журнале *Solid State Ionics*. Такой анализ, базирующийся на прочтении и осмыслении информации, изложенной в аннотациях статей (в случае необходимости осуществлялся и просмотр полной версии публикации), был проведен автором. Критерием отнесения исследования к прикладным задачам служила информация о наличии в статье результатов тестовых испытаний электрохимических устройств (первичных источников тока, аккумуляторов, топливных элементов, датчиков, суперконденсаторов и т.п.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие данные

В основной запрос по БД Scopus были внесены такие ключевые слова, как “solid state ionics”, “superionic conductors”, “solid electrolytes”, “fast ion transport”, “proton solid electrolytes” и “proton conductors”. Важно отметить, что для включения в поиск протонных проводников оказалось необходимым отдельное указание на эти ключевые слова. Всего было найдено 29119 документов разного типа, включая статьи, доклады на конференциях, патенты. В дальнейшем анализе использовали все найденные публикации.

На рис. 2 показано распределение публикаций по годам, при этом число публикаций за 11 лет возросло почти в 3.4 раза.

В последние годы существенно увеличилось число публикаций из Китая – из общего числа 29 тыс. документов почти треть (9642) – из КНР. Из приведенных на рис. 2 данных после нормировки на число публикаций в 2011 г. хорошо видно, что китайские ученые начали активно публиковаться после 2015 г. Отметим, что общее число публикаций китайских ученых (по всем научным направлениям) возросло за 1989–2013 гг. более чем в 50 раз, причем максимальный рост наблюдался именно в физических и химических науках. По данным Scopus, к 2014 г. Китай вышел на второе место (после США) по количеству научных работ [11]. Такой рост связан со специальной политикой властей КНР – например, расходы на НИОКР в Китае с 2014 г. превышают 2% ВВП, а инвестиции в НИОКР со стороны предприятий с 1995 по 2016 г. увеличились в 40 раз [12].

Посмотрим, какие страны (помимо Китая и США) являются лидерами в ИТТ. Из данных, представленных на рис. 3а, видно, что в десятку лучших входят наиболее экономически развитые страны, а также Индия. Кроме того, наблюдается значительный разрыв между сильнейшими странами (КНР, США) и остальными.

Очевидно, что общее количество публикаций не очень информативная величина, поэтому рассмотрим нормированные величины. На рис. 3б показаны данные по числу статей, приходящихся на одного исследователя (брали число исследователей в стране, занятых в области естественных наук в 2016 г. [13, 14]). Условная “стоимость” одной статьи (рис. 3в) рассчитывалась как частное от внутренних затрат на исследования и разработки на одного ученого, деленное на число публикаций [13]. Из рис. 3б видно, что происходит “выравнивание” публикационной активности стран, однако РФ значительно отстает от большинства стран по этому показателю.

Почти четверть научных статей по ИТТ относится к области материаловедения, более 20% – к области химии, затем следуют такие разделы, как инженерное дело, энергетика, физика, химическая технология, экология (рис. 4).

Раздел “Материалы”

В табл. 1 приведены цифры, характеризующие число публикаций как по типу носителя заряда, так и по виду материала. Напомним, что отбор публикаций проводился в Scopus по ключевым словам или заголовкам статей, поэтому относительно небольшое число статей, относящихся к керамическим материалам означает, что авторы статей не отметили в ключевых словах или в на-

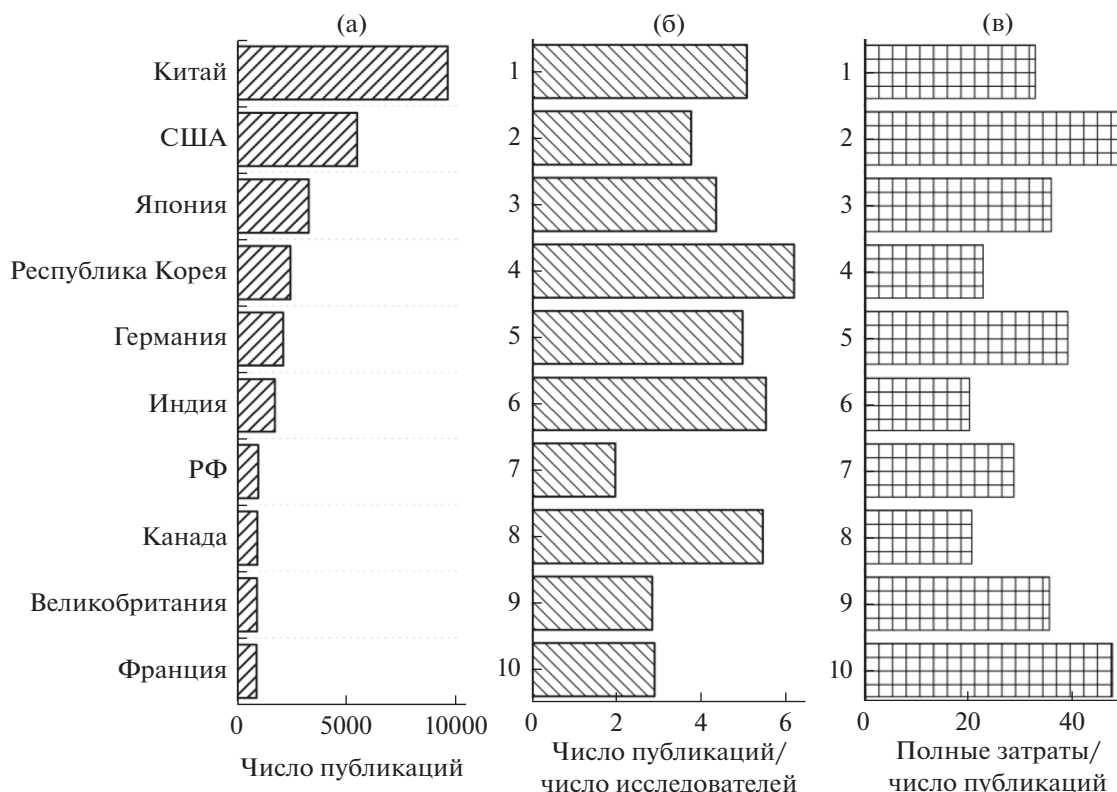


Рис. 3. Страны-лидеры в области ИТТ: а – общее число публикаций, б – число публикаций на одного исследователя, в – “стоимость” одной публикации.

званиях вид исследуемого или используемого материала (хотя в статье речь могла идти об исследованиях на керамических образцах).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5а, указывает, что число исследований по Li-проводящим материалам растет экспоненциально, в то время как число работ по кислород-ионным и протонным проводникам, начиная с 2015 г., практически остается неизменным.

Среди стран по всем показателям лидируют КНР и США, однако интересно отметить, что Китай основное внимание уделяет исследованиям композитных материалов, а США – полимеров, в Индии полимерные и композитные материалы изучаются в одинаковой пропорции (см. табл. 2).

Исследования фундаментальных явлений в объеме и на межфазных границах

В табл. 3 приведено число публикаций по исследованию фундаментальных явлений, наблюдающихся в объеме материала и на межфазных границах. Конечно, наибольшее число статей связано с изучением наиболее важных характеристик, связанных с процессами ионного переноса, прежде всего ионной проводимости и диффузии.

Для более глубокого понимания микроскопии этих процессов необходимо знать особенности кристаллической структуры соединений и использовать данные теоретических подходов, базирующихся на проведении компьютерных экспериментов. Применение современной техники физического эксперимента, особенно при прове-

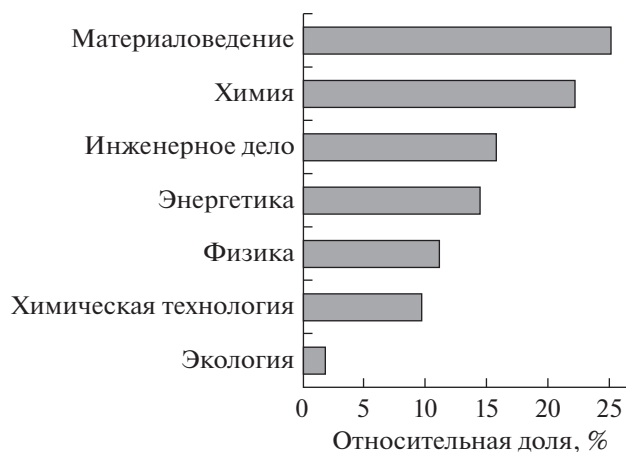


Рис. 4. Распределение публикаций по научным областям.

Таблица 1. Число публикаций в области материаловедения

Материалы			
вид носителя заряда в материале	число публикаций	вид материала	число публикаций
Литий	10856	Керамика	916
Натрий	1064	Полимеры	1816
Протон	5907	Композиты	1668
Кислород	7734	Пленки	910
Фтор, хлор	1495		
СИЭП	712		

дении работ в режимах *in situ* и *operando*, безусловно, существенно повышает уровень наших знаний об изучаемых объектах.

На рис. 6 показаны годовые изменения числа публикаций анализируемых областей ИТТ. Несколько странным выглядит очень слабый рост числа публикаций по изучению межзеренных явлений. Как отмечалось выше, во всем мире наблюдается развитие исследований композитных материалов (см. рис. 5б), а в этих материалах, как известно [15], существенную роль играют границы зерен. Кажется, логично было бы ожидать и увеличение числа работ в этом направлении. Наблюдаемая ситуация, возможно, связана с тем, что в композиционных материалах чаще используют термин межфазные границы (*interfaces*), а не межзеренные границы (*grain boundaries*). В этом случае подчеркивается, что речь идет о границах, разделяющих зерна различных фаз, входящих в композит. Однако выделить публикации, относящиеся к исследованию только межфазных границ в композитах, по ключевым словам не удается.

Прикладные работы

Число публикаций по прикладным работам разделилось следующим образом:

- Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) – 5980.
- Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) – 4746.
- Сенсоры – 1096.
- Суперконденсаторы – 1224.

Годовые распределения прикладных работ, представленные на рис. 7, свидетельствуют о взрывном характере роста публикаций по ЛИА после 2014 г., что связано, главным образом, с включением Китая в эту гонку (см. также табл. 2). Наша страна в области работ по ЛИА существенно отстает, как это видно из табл. 2.

Обращает на себя внимание снижение, начиная с 2015 г., числа публикаций по ТОТЭ. По мнению С. Сомова [16], это связано с двумя факторами: во-первых, большая часть фундаментальных вопросов уже решена, а во-вторых, и это, наверное, самое основное, работы в области ТОТЭ перешли к стадии внедрения ОКР, и технологиче-

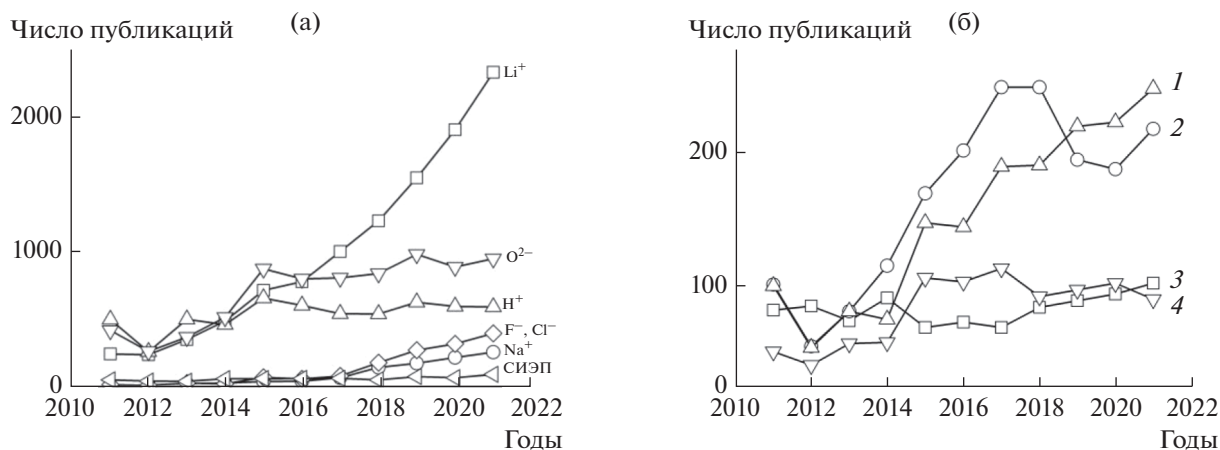


Рис. 5. Распределение публикаций: а – по типу носителя заряда и смешанные ионно-электронные проводники (СИЭП); б – по виду материала (1 – композиты, 2 – полимеры, 3 – керамика, 4 – пленки).

Таблица 2. Число публикаций для 10 ведущих стран мира по разным направлениям ИТТ

	КНР	США	Япония	Республика Корея	Германия	Индия	РФ	Канада	Великобритания	Франция
Общее число публикаций										
	9642	5511	3295	2457	2124	1753	977	947	933	903
Тип носителя заряда										
Li ⁺	4508	2692	1172	847	917	353	147	365	251	327
Na ⁺	433	210	84	83	83	91	31	37	36	39
H ⁺	1328	964	1000	599	460	353	162	345	238	173
O ²⁻	2257	1162	973	698	480	512	358	286	348	236
F ⁻ , Cl ⁻	582	247	105	117	110	158	45	42	41	44
Смешанные ионно-электронные проводники										
	152	167	47	54	72	40	38	15	64	47
Вид материала										
Керамика	227	98	100	48	78	35	84	22	29	47
Полимер	407	278	129	167	79	303	28	44	23	47
Композит	668	210	79	158	32	250	42	43	37	21
Пленки	161	206	144	120	87	50	37	19	23	41
Исследование объемных и межфазных явлений										
Ионный транспорт	2577	1209	732	530	476	710	290	227	227	222
Структура, компьютерное моделирование	551	521	287	106	142	83	85	42	100	87
Спец. физические методы	1319	858	387	349	376	503	94	121	120	160
Межзеренные границы	770	448	225	217	311	241	156	87	122	127
Интерфейс анод/электролит	2469	1271	480	480	364	120	68	165	133	111
Интерфейс катод/электролит	3063	1811	728	675	639	188	161	258	238	278
Прикладные работы										
ЛИА	2625	1424	611	515	540	174	52	228	170	179
ТОТЭ	1269	583	565	488	269	354	206	176	234	154
Сенсоры	375	228	173	76	114	44	40	25	42	29
Супер конденсаторы	591	166	35	145	24	50	11	33	36	24

Таблица 3. Число публикаций в области фундаментальных исследований в объеме и на межфазных границах

Объемные свойства	Число публикаций	Явления на границах	Число публикаций
Ионный транспорт	7374	Межзеренные границы	3052
Структура, компьютерное моделирование	1895	Интерфейс анод/электролит	5185
Спец. физические методы	4531	Интерфейс катод/электролит	7561

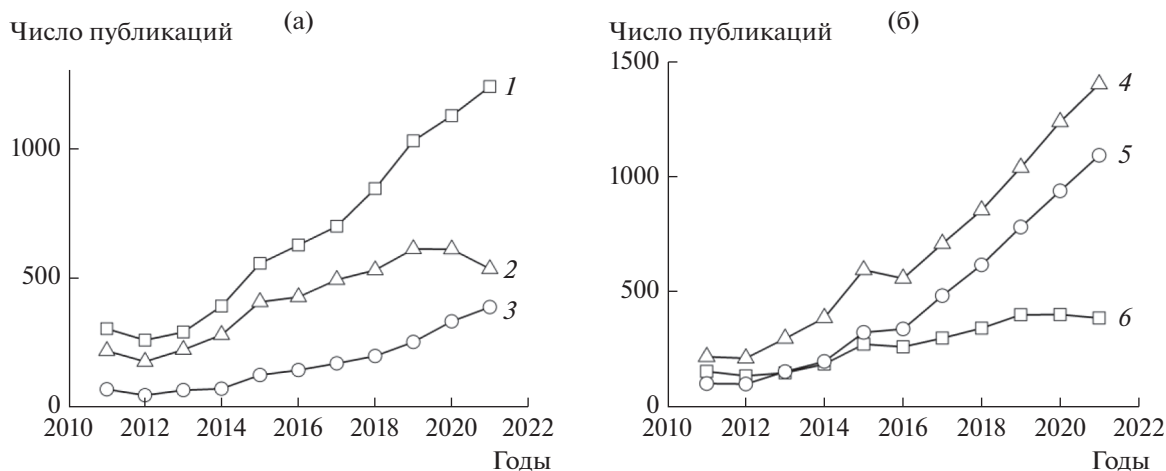


Рис. 6. Распределение публикаций по годам по исследованию объемных (а) и межфазных (б) явлений в ИТТ: 1 – транспортные характеристики, 2 – кристаллическая структура, компьютерное моделирование, 3 – физметоды, 4 – катодный интерфейс, 5 – анодный интерфейс, 6 – межзеренные границы.

ские разработки не публикуются. Тем не менее, в Японии и Южной Корее число статей по ЛИА и ТОТЭ примерно одинаковое, а в Индии, Великобритании и России преобладают работы в области ТОТЭ (подробнее см. табл. 2).

В аналитической обзорной работе Функе (2013 г.) [5] указывалось, что в настоящее время основной задачей *Solid State Ionics* является налаживание путей и “строительство мостов”, ведущих от фундаментальной науки, с одной стороны, к технологиям “чистой энергетики”, с другой. Оценим, насколько оправдалось это предположение. На рис. 8 показано относительное число статей прикладного характера, определенное как по данным Scopus, так и на основании собственного анализа

статей ведущего журнала “*Solid State Ionics*”. Действительно, если в 2011–2014 гг. работ прикладного и фундаментального характера было примерно поровну, то, начиная с 2015 г., число прикладных работ значительно увеличилось и в 2021 г. составляло 72%, по данным Scopus, и 63%, по результатам собственного анализа.

Состояние работ по ИТТ в России

Несколько слов о состоянии дел в области ионики твердого тела в России. В десятку наиболее продвинутых стран в области ИТТ Россия входит на 7-м месте (табл. 2). Кроме того, как видно из рис. 9, число работ за анализируемый пери-

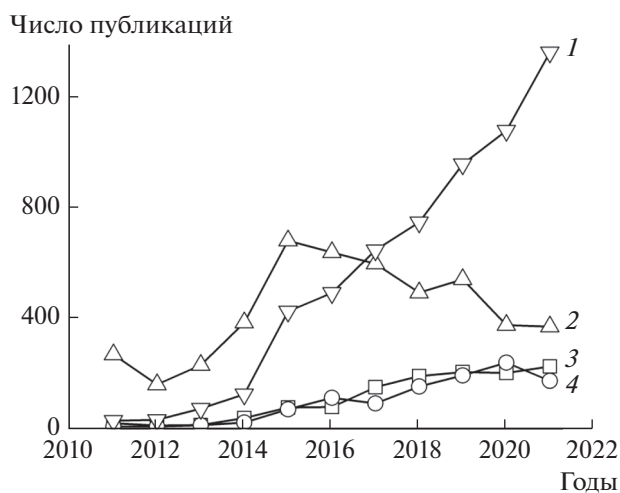


Рис. 7. Распределение публикаций по годам для прикладных работ в ИТТ: 1 – Li-ионные аккумуляторы, 2 – ТОТЭ, 3 – суперконденсаторы, 4 – сенсоры.

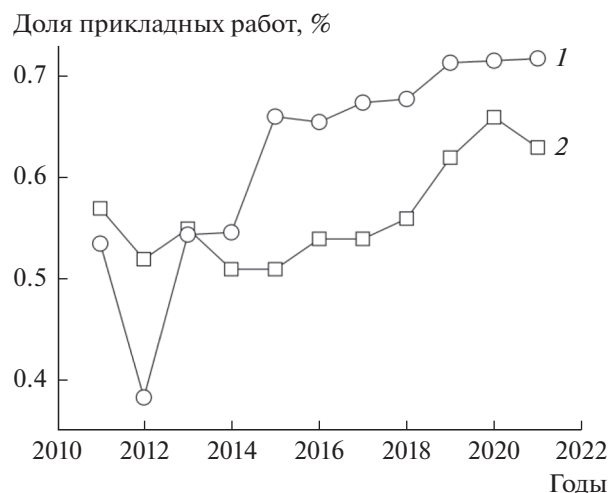


Рис. 8. Доля прикладных работ в общем числе публикации по ИТТ: 1 – по данным Scopus, 2 – собственный анализ статей журнала *Solid State Ionics*.

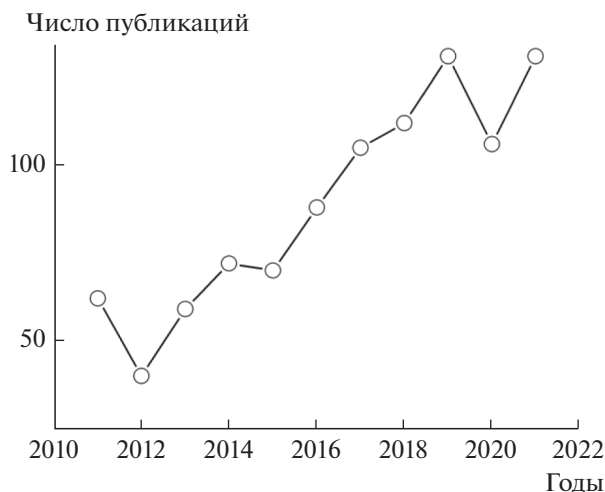


Рис. 9. Число публикаций по годам в России.

од выросло более чем в 3 раза, но общее число статей российских ученых почти в 10 раз уступает публикациям из Китая и в 5 раз – из США.

Говоря о направлениях ИТТ, которые развиваются в РФ, следует отметить большое внимание, которое уделяется работам с композитными твердыми электролитами, на что особенно указывают данные проведенного анкетирования (рис. 10).

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИОНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Экспериментальные методики *in situ* и *operando*

Для характеристики ионпроводящих материалов и изучения физико-химических процессов, протекающих в устройствах ИТТ, необходимо привлекать новые экспериментальные методики, например такие, как подходы *in situ* и *operando*.

Режим *in situ* подразумевает рассмотрение явления (например, изучение характеристик материала или исследование процесса) именно в том месте и в то время, где и когда это явление происходит, без перемещения объекта изучения в специальную измерительную ячейку. Следует отметить, что в практике научных исследований в области ИТТ методы *in situ* применяются в последние 15 лет. Однако широкое внедрение данного подхода тормозится тем, что переход от *ex situ* к режиму *in situ* требует использования сложной экспериментальной техники и конструирования специальных, зачастую уникальных измерительных ячеек.

Основные экспериментальные физические и электрохимические методы исследования *in situ* можно разделить на несколько групп:

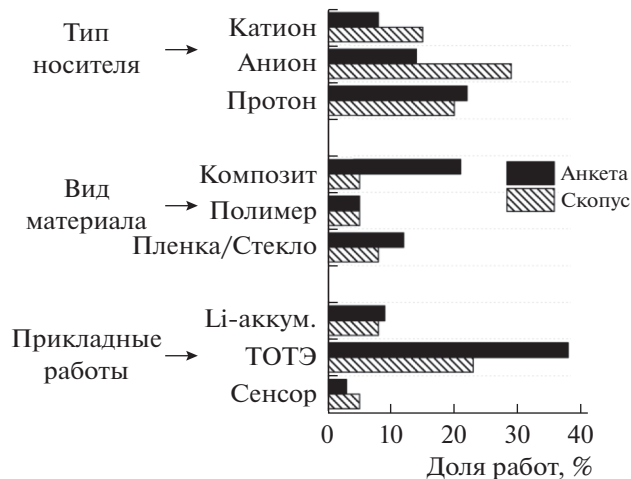


Рис. 10. Основные направления работ по ИТТ в России.

1. Микроскопические методы – просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия и т.п.

2. Магнитные методы – ЯМР, измерения магнитной восприимчивости, Мессбауэр.

3. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные методы – рентгеновская, нейтронная и синхротронная дифракция, EXAFS, XANES и т.п.

4. Спектральные методы – ИК-спектроскопия (в том числе FTIRS – ИК-спектроскопия с фурье-преобразованием; EMIRS – с модуляцией потенциала), комбинационное рассеяние (особенно SERS – усиленное поверхностью рамановское рассеяние), электронная спектроскопия в УФ и видимом диапазоне, импедансная спектроскопия и т.п.

Понятно, что *in situ* измерения предоставляют гораздо более глубокую информацию, позволяющую, например, напрямую связать структурные и химические изменения материала в условиях, близких к рабочим, с электрохимическим откликом системы. Более подробно ознакомиться с использованием отдельных методов в режиме *in situ* при изучении материалов и устройств ИТТ можно в обзорах [17–20] и экспериментальных работах [21, 22].

В то время как в режиме *in situ* часто ограничиваются рассмотрением отдельного компонента ячейки (например, изучением анодного или катодного интерфейса), режим *operando* предназначен для исследований во время работы всего устройства, а не его отдельных компонентов. Это технически еще более непростая задача (по сравнению с режимом *in situ*), поскольку она требует сложной конструкции измерительной ячейки с учетом проведения экспериментов при повышенных температурах, с использованием различ-

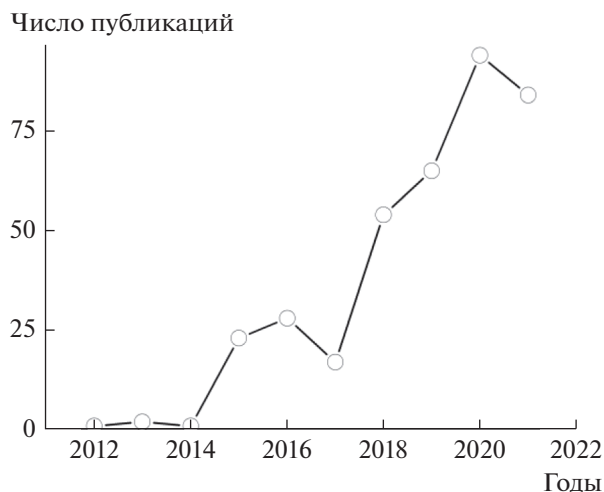


Рис. 11. Применение режима *operando* при проведении экспериментальных работ.

ных газовых сред, герметичной изоляции отдельных узлов и т.д. Тем не менее, *operando*-режим все чаще находит применение в экспериментальных работах в области ИТТ, как это показано на рис. 11. За более подробным знакомством с методом можно обратиться к работам [17–19, 23, 24].

Искусственный интеллект — применение методов машинного обучения

Машинное обучение (machine learning, ML) — одно из перспективных направлений искусственного интеллекта. Машинное обучение (МО) — это набор алгоритмов и методов, который “обучает” компьютерные модели и позволяет выявить в наборе данных общие тенденции и закономерности. Иными словами, на основе большого количества примеров (данных) модели машинного обучения самостоятельно учатся различать полученную информацию и использовать ее для решения поставленных задач. МО принципиальным образом отличается от обычных детерминированных алгоритмов со строго определенным набором действий.

В последние годы МО стало намного доступнее из-за развития инструментов (прикладных программ) и наборов данных для обучения; для моделирования материалов необходимые ресурсы можно найти в Интернете по адресу <https://github.com/atomisticnet/tools-and-data>.

Из данных, представленных на рис. 12, видно, что число публикаций по МО в области ИТТ за последние годы стремительно растет. В обзорных работах [25–30] дано описание состояния дел в этой области.

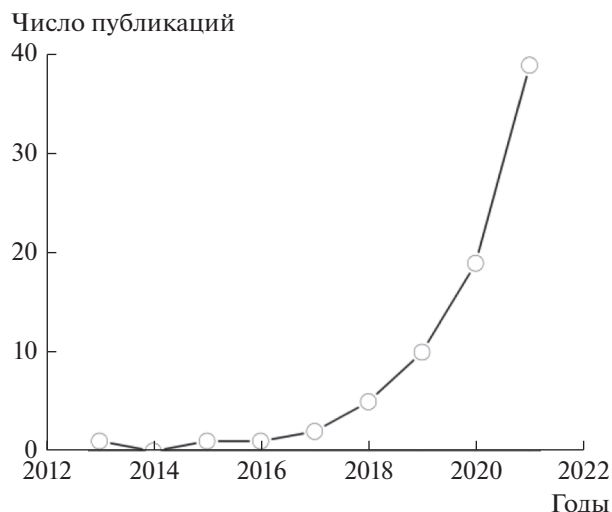


Рис. 12. Годовое распределение публикаций по использованию методов машинного обучения.

Большинство подходов МО для моделирования материалов (в том числе твердых электролитов и материалов со смешанной ионно-электронной проводимостью) на атомном уровне можно разделить на три основных группы:

1. Нахождение атомных потенциалов, не уступающих по точности потенциальным функциям, определенным из квантовомеханических расчетов (например, используя DFT методы).
2. Модели МО для прогнозирования свойств материалов, предсказанных на основе *ab initio* расчетов для данной атомной структуры.
3. Подходы обратного проектирования МО, которые предсказывают атомную структуру для заданного набора свойств материалов.

В [31–38] можно найти конкретные примеры поиска новых твердых электролитов разного типа — кристаллических и полимерных.

Машинное обучение может оказаться весьма полезным для разработки и изучения работоспособности устройств ионники твердого тела. Например, удается предсказать выбор электродных материалов [39] или изучить особенности поведения электродных интерфейсов (образование промежуточных фаз и/или рост дендритов) [40]. Более того, с помощью рекуррентной нейронной сети с поддержкой глубокого обучения возможно осуществить прогнозирование деградации литий-ионного аккумулятора [41].

Очевидно, что использование как реального физического, так и компьютерного эксперимента (включая применение искусственного интеллекта) является наиболее перспективным направлением в ИИТ.

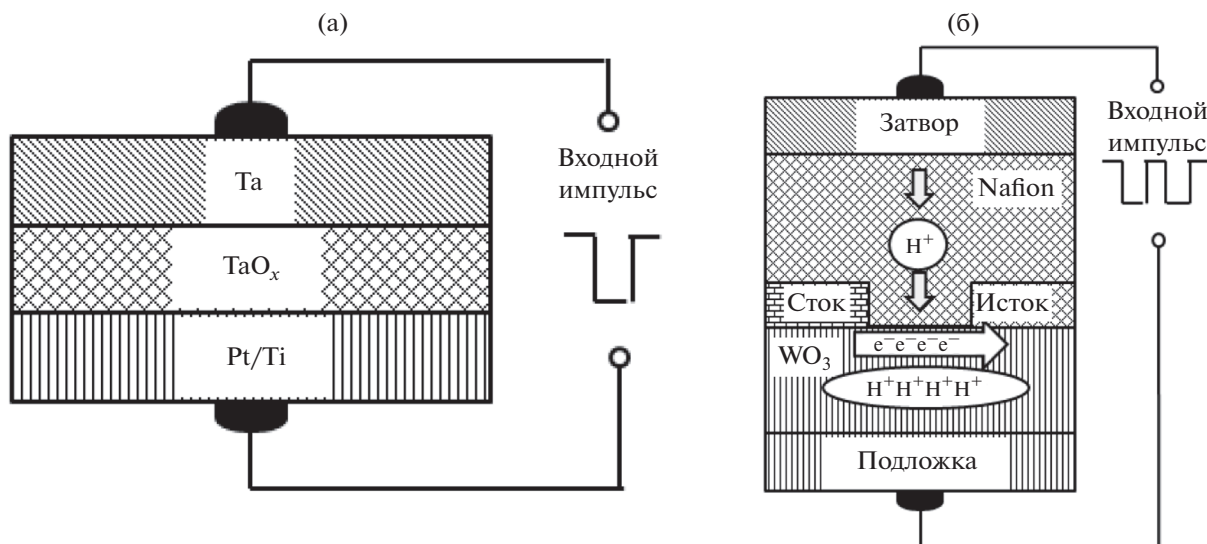


Рис. 13. а – Мемристор на основе оксида тантала; б – нейроморфный транзистор.

Новые области применения устройств ионики твердого тела

Нейроморфные сети и компьютеры. Нейроморфные системы – системы, функционирующие по принципам работы человеческого мозга. В человеческом мозге базовым элементом является нейрон (нервная клетка); сигнал от одного нейрона к другому передается через специальное соединение между двумя клетками, называемое синапсом. Синаптическое поведение, такое как обучение и забывание, связано с кратковременной памятью (STM). С другой стороны, запоминание связано с долговременной памятью (LTM). Одним из подходов к развитию нейроморфных вычислений может служить реализация синаптических функций с помощью электронных устройств, например с использованием устройств ИТТ.

Эмуляция биологического синаптического поведения возможна с помощью новых устройств – мемристоров (рис. 13а), которые изменяют свое электрическое сопротивление при протекании через него электрического тока (точнее, суммарного электрического заряда). Проводимость мемристора может модулироваться электрическими импульсами, подаваемыми на электроды, а модуляция проводимости используется для имитации функции обучения, забывания и запоминания [42].

Хотя обычный нейроморфный мемристор имеет простую и удобную многослойную структуру, для работы устройства необходимо использовать достаточно большие токи переключения. Для устранения недостатков функционирования мемристора было предложено вместо диодной конфигурации (с двумя электродами) использовать транзисторную (рис. 13б). Поведение типа

STM или LTM было продемонстрировано [43] в нейроморфном транзисторе с ионным проводником путем подачи напряжения на затвор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель настоящего обзора состояла в том, чтобы обозначить основные тенденции развития ионики твердого тела в целом. Возможно, это позволит молодым ученым определиться со своими научными предпочтениями, а сложившимся исследователям взглянуть на актуальность своих работ. Конечно, говоря о перспективных направлениях, автор основывался, в том числе, и на своем видении и восприятии ионики твердого тела. Безусловно, ИТТ продолжает активно развиваться, постоянно внедряются новые исследовательские стратегии, возникают и новые прикладные задачи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит д. х. н. С.И. Сомова и д. х. н. Н.Ф. Уварова за стимулирующие дискуссии по тематике статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Госзаданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Конфликта интересов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов-Шиц, А.К., Мурин, И.В. *Ионика твердого тела*. Т. 1. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 616 с. [Ivanov-Schitz, A.K. and Murin, I.V., *Solid State Ionics*, V.1 (in Russian), S.-Petersburg: S.-Petersburg Univ. Press, 2000. 616 p.]
- Takahashi, T., Yamamoto, O., Tsukuba, K., and Baba, A., Electrical Conductivity of Solid Electrolyte (Part VI). Electrical Conductivity in a $\text{Ag}_2\text{S}-\text{HgI}_2$ System, *Denki Kagaku*, 1967, vol. 35, p. 32.
- Knauth, Ph. and Tuller, H.L., Solid-State Ionics: Roots, Status, and Future Prospects, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 2002, vol. 85, p. 1654.
- Kim, S., Yamaguchi, S., and Elliott, J.A., Solid-State Ionics in the 21st Century: Current Status and Future Prospects, *MRS Bull.*, 2009, vol. 34, p. 900.
- Funke, K., Solid State Ionics: from Michael Faraday to green energy—the European dimension, *Sci. and Technol. Adv. Mater.*, 2013, vol. 14, p. 043502. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/4/043502>
- Terabe, K., Tsuchiya, T., Tsuruoka, T., Kim, S.-J., and Aono, M., Current Progress of Solid State Ionics on Information and Communication Device Technology, *Ext. Abs. the 17th Int. Workshop on Junction Technology*, 2017, p. S4-1.
- Yamamoto, O., Solid state ionics: a Japan perspective, *Sci. and Technol. Adv. Mater.*, 2017, vol. 18, p. 504. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1328955>
- Иванов-Шиц, А.К., Мурин, И.В. *Ионика твердого тела*. Т. 2. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010. 1000 с. [Ivanov-Schitz, A.K. and Murin, I.V., *Solid State Ionics*, V. 2 (in Russian), S.-Petersburg: S.-Petersburg Univ. Press, 2010. 1000 p.]
- <https://www.scopus.com/>.
- <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works>.
- Син, В., Ковалев, М. Китай строит экономику знаний. *Вестник ассоциации белорусских банков*. 2015. № 7. С. 3.
- Беляков, Г.П., Беляков, С.А., Шпак, А.С. Опыт КНР по реформированию системы стратегического планирования и управления научно-технологическим развитием. *Экономические отношения*. 2019. Т. 9. С. 1575. DOI
- Рейтинг ведущих стран мира по затратам на науку. Институт статистических исследований и экономики знаний, Дата выпуска 24.07.2018, <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/221869863>.
- Наука России в 10 цифрах. Институт статистических исследований и экономики знаний, Новости, Февраль 2021, <https://issek.hse.ru/news/442044357.html>.
- Уваров, Н.Ф. *Композиционные твердые электролиты*, Новосибирск, Изд. СО РАН, 2008. 258 с.
- Сомов, С.И. Частное сообщение.
- Stangl, A., Muñoz-Rojas, D., and Burriel, M., *In situ* and *operando* characterisation techniques for solid oxide electrochemical cells: recent advances, *J. Phys. Energy*, 2021, vol. 3, p. 012001.
- Li, X., Wang, H.-Y., Yang, H., Cai, W., Liu, S., and Liu, B., *In situ/operando* characterization techniques to probe the electrochemical reactions for energy conversion, *Small Methods*, 2018, vol. 2, p. 1700395.
- Meyer, Q., Zeng, Y., and Zhao, C., *In situ* and *operando* characterization of proton exchange membrane fuel cells, *Adv. Mater.*, 2019, vol. 31, p. 1.
- Abakumov, A.M., Fedotov, S.S., Antipov, E.V., and Tarascon, J.-M., Solid state chemistry for developing better metal-ion batteries, *Nature Commun.*, 2020, vol. 11, p. 4976. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18736-7>
- Yamada, T., Morita, K., Kume, K., Yoshikawa, H., and Awaga, K., The solid-state electrochemical reduction process of magnetite in Li batteries: *in situ* magnetic measurements toward electrochemical magnets, *J. Mater. Chem. C*, 2014, vol. 2, p. 5183.
- Agarkov, D.A., Burmistrov, I.N., Eliseeva, G.M., Ionov, I.V., Rabortkin, S.V., Semenov, V.A., Solovyev, A.A., Tartakovskii, I.I., and Bredikhin, S.I., Comparison of *in situ* Raman Studies of SOFC with Thick Single-crystal and Thin-film Magnetron Sputtered Membranes, *Solid State Ionics*, 2020, vol. 344, p. 115091. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115091>
- Gershinsky, G., Bar, E., Monconduit, L., & Zitoun, D., *Operando* electron magnetic measurements of Li-ion batteries, *Energy Environ. Sci.*, 2014, vol. 7, p. 2012.
- Drozhzhin, O.A., Tereshchenko, I.V., Emerich, H., Antipov, E.V., Abakumov, A.M., and Chernyshov, D., An electrochemical cell with sapphire windows for *operando* synchrotron X-ray powder diffraction and spectroscopy studies of high-power and high-voltage electrodes for metal-ion batteries, *J. Synchrotron Rad.*, 2018, vol. 25, p. 468. <https://doi.org/10.1107/S1600577517017489>
- Guo, H., Wang, Q., Stuke, A., Urban, A., and Artrith, N., Accelerated Atomistic Modeling of Solid-State Battery Materials With Machine Learning, *Front. Energy Res.*, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.695902>
- Terabe, K., Tsuchiya, T., and Tsuruoka, T., Solid state ionics for the development of artificial intelligence components, *Japan J. Appl. Phys.*, 2022, vol. 61, p. SM0803. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac64e5>
- Liu, Y., Guo, B., Zou, X., Li, Y., and Shi, S., Machine Learning Assisted Materials Design and Discovery for Rechargeable Batteries, *Energy Storage Mater.*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.06.033>
- Lv, C., Zhou, X., Zhong, L., Yan, C., Srinivasan, M., Seh, Z.W., Liu, C., Pan, H., Li, S., Wen, Y., and Yan, Q., Machine Learning: An Advanced Platform for Materials Development and State Prediction in Lithium-Ion Batteries, *Adv. Mater.*, 2021, N.2101474. <https://doi.org/10.1002/adma.202101474>
- Gao, T. and Lu, W., Machine learning toward advanced energy storage devices and systems, *iScience*, 2021, vol. 24, p. 101936. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101936>
- Ling, C., A review of the recent progress in battery informatics, *npj Computational Materials*, 2022, vol. 8, p. 33. <https://doi.org/10.1038>

31. Miwa, K. and Asahi, R., Molecular dynamics simulations of lithium superionic conductor $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ using a machine learning potential, *Solid State Ionics*, 2021, vol. 361, p. 115567. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2021.115567>
32. Kahle, L., Marcolongo, A., and Marzari, N., High-throughput computational screening for solid-state Li-ion conductors, *Energy & Environmental Science*, 2020, vol. 13. <https://doi.org/10.1039/C9EE02457C>
33. Chen, Y.-T., Duquesnoy, M., Tan, D.H.S., Doux, J.-M., Yang, H., Deysher, G., Ridley, P., Franco, A.A., Meng, Y.S., and Chen, Z., Fabrication of High-Quality Thin Solid-State Electrolyte Films Assisted by Machine Learning, *ACS Energy Lett.*, 2021, vol. 6, p. 1639. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.1c00332>
34. Sendek, A.D., Cubuk, E.D., Antoniuk, E.R., Cheon, G., Cui, Y., and Reed, E.J., Machine Learning-Assisted Discovery of Solid Li-Ion Conducting Materials, *Chem. Mater.*, 2019, vol. 31, p. 342. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b03272>
35. Zhao, Y., Schiffmann, N., Koeppe, A., Brandt, N., Bucharsky, E.C., Schell, K.G., Selzer, M., and Nessler, B., Machine Learning Assisted Design of Experiments for Solid State Electrolyte Lithium Aluminum Titanium Phosphate, *Front. Mater.*, 2022, vol. 9, p. 821817. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.821817>
36. Watanabe, S., Li, W., Jeong, W., Lee, D., Shimizu, K., Mimanitani, E., Ando, Y., and Han, S., High-dimensional neural network atomic potentials for examining energy materials: some recent simulations, *J. Phys. Energy*, 2021, vol. 3, p. 012003.
37. Zhang, X., Tang, B., and Zhou, Z., Unsupervised machine learning accelerates solid electrolyte discovery, *Green Energy & Environment*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.12.003>
38. Zhang, Y., He, X., Chen, Z., Bai, Q., Nolan, A.M., Roberts, C.A., Banerjee, D., Matsunaga, T., Mo, Y., and Ling, C., Unsupervised discovery of solid-state lithium ion conductors, *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, Article number: 5260.
39. Louis, S.-Y., Siriwardane, E.M.D., Joshi, R.P., Omee, S.S., Kumar N., and Hu, J., Accurate Prediction of Voltage of Battery Electrode Materials Using Attention-Based Graph Neural Networks, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 14, p. 26587. <https://doi.org/10.1021/acsaami.2c00029>
40. Bhowmik, A., Castelli, I.E., Garcia-Lastra, J.M., Jørgensen, P.B., Winther, O., and Vegge, T., A perspective on inverse design of battery interphases using multi-scale modelling, experiments and generative deep learning, *Energy Storage Mater.*, 2019, vol. 21, p. 446. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.06.011>
41. Lu, J., Xiong, R., Tian, J., Wang, C., Hsu, C.-W., Tsou, N.-T., Sun, F., and Li, J., Battery degradation prediction against uncertain future conditions with recurrent neural network enabled deep learning, *Energy Storage Mater.*, 2022, vol. 50, p. 139. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.05.007>
42. Shao, Z.-Y., Huang, H.-M., and Guo, X., Optimizing linearity of weight updating in TaO_x -based memristors by depression pulse scheme for neuromorphic computing, *Solid State Ionics*, 2021, vol. 370, p. 115746.
43. Manikandan, J., Tsuchiya, T., Takayanagi, M., Kawamura, K., Higuchi, T., Terabe, K., and Jayavel, R., Substrate effect on the neuromorphic function of nano-ionics-based transistors fabricated using WO_3 thin film, *Solid State Ionics*, 2021, vol. 364, p. 115638.