

РАДИОНУКЛИДЫ ДЛЯ β -ВОЛЬТАИЧЕСКИХ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ (МИНИАТЮРНЫХ, ЭНЕРГОЕМКИХ, С МНОГОЛЕТНИМ СРОКОМ СЛУЖБЫ)

© 2022 г. Л. А. Цветков^{а,*}, С. Л. Цветков^а, А. А. Пустовалов^б,
В. Н. Вербецкий^б, Н. Н. Баранов^в, А. А. Мандругин^г

^а ООО «ЭкоБиоЭнергия», 156005 Кострома, ул. Свердлова, д. 88.

^б Институт динамики геосфер РАН, 119334, Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1

^в Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

^г Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

*e-mail: levtsvet@gmail.com

Поступила в редакцию 20.04.2021, после доработки 01.12.2021, принята к публикации 08.12.2021

Миниатюризация изделий микросистемной техники с энергопотреблением на уровне милли- и микроватт требует соответствующего уменьшения характерных размеров индивидуальных источников энергии и увеличения длительности их действия, иначе не удастся обеспечить должную автономность и длительность действия перспективных разработок. Наиболее актуально проблема проявляется в сфере информационных технологий, медицине и космической деятельности. Согласно этой потребности, наблюдается постоянное совершенствование традиционных (химических, пьезоэлектрических и т.д.) источников в рамках существенных объективных ограничений. Значительные новые перспективы открываются, если в качестве источника энергии применить энергию, выделяющуюся при радиоактивном распаде. Удельный (на единицу массы) запас энергии радионуклидов превышает этот параметр наилучших химических источников в сотни тысяч раз. В статье анализируется, какие из известных радионуклидов удовлетворяют соответствующим требованиям и могут быть применены для решения проблемы разработки и серийного выпуска радиационно-безопасных β -вольтаических атомных батарей длительного срока действия.

Ключевые слова: радионуклид, период полураспада, β -излучение, удельная мощность, α -излучение, β -вольтаическая атомная батарея.

DOI: 10.31857/S003383112203011X, EDN: FQODNW

ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия β -вольтаической атомной батареи (далее АБ) аналогичен работе фотоэлектрических (солнечных) батарей с той разницей, что в β -вольтаических АБ неосновные носители заряда (электрон–дырка) в полупроводнике с p – n -переходом образуются под действием β -частиц, испускаемых радионуклидом, а не фотонов солнечного излучения [1–3]. АБ представляют собой новый класс надежных, бесперебойных и долговечных источников электропитания. По сравнению с химическими источниками тока АБ обладают на 3–4 порядка большей энергоемкостью, устойчивой работой при

отрицательных температурах, отсутствием саморазряда. Продолжительность автономной непрерывной работы может исчисляться десятилетиями [4–7].

Анализ публикаций показывает, что интерес к разработке и созданию АБ в последние годы значительно вырос, хотя технологическое и производственное становления их выпуска по-прежнему находится в начальной стадии развития [7–15].

Выходные параметры АБ – величина рабочего тока, напряжение, удельные энергетические характеристики, срок службы – в основном определяются характеристиками используемого радионуклида.

В данной работе ставится задача обосновать выбор радионуклидов для создания серийных β -вольтаических АБ с точки зрения соответствия их радиационно-физических характеристик и с учетом реальных возможностей промышленного выпуска таких радионуклидов.

Характерные особенности радионуклидов как первичных источников энергии для β -вольтаических батарей. Выбор радионуклида, используемого в радионуклидном источнике питания в качестве первичного источника энергии, основывается на сравнительном анализе таких характеристик, как тип и энергия распада, период полураспада, мощность дозы, создаваемой радионуклидом при его производстве в промышленном масштабе, стоимость его наработки. Два важных параметра АБ – длительность работы и удельная мощность – обусловлены основным принципом радиоактивного распада: чем короче период полураспада, тем выше удельная мощность, а для использования в АБ радионуклиды должны удовлетворять ряду дополнительных специфических требований [3, 4]. Для достижения стабильных во времени электрических параметров АБ период полураспада используемого радионуклида должен превосходить или, по крайней мере, быть соизмерим с заданным сроком службы АБ. При этом:

- средняя энергия испускаемых радионуклидом заряженных частиц не должна превышать порога радиационных нарушений структуры используемого преобразователя;
- радионуклид должен производиться в промышленном масштабе в достаточных количествах при относительно низкой стоимости;
- используемый радионуклид не должен создавать дозиметрических проблем при эксплуатации АБ (недопустимо присутствие γ -квантов, тормозного и рентгеновского излучений). Источник питания следует изготавливать на основе радионуклидов, имеющих только «чистое» β -излучение.

Основным препятствием для использования в атомных батареях радионуклидов α -излучателей является тот факт, что энергия α -частиц составляет около 5 МэВ, что более чем на порядок превышает порог радиационных нарушений известных полупроводников [16].

Таблица 1. Радионуклиды – β -излучатели [18–20]

Радионуклид	Период полураспада	Максимальная энергия β -частиц и γ -квантов (при наличии), кэВ
Никель-63	100.1 года	66.7
Стронций-90	28.8 года	546; γ 1700 (100%)
Тритий	12.3 года	18.6
Криптон-85	10.7 года	687.1; 173; γ 514 (0.43%)
Сера-35	87 сут	167.1
Фосфор-32	14.2 сут	1710.6
Углерод-14	5730 лет	156.4
Кальций-45	162 сут	256.8
Прометий-147	2.62 года	224.1
Радий-228	5.75 года	45.9

В итоге получается, что для создания малогабаритных атомных батарей с широкой сферой применения, включающей терапевтическую медицину, предпочтение следует отдать β -излучателям, причем желательно низкоэнергетическим, чтобы в качестве преобразователя можно было использовать полупроводники и при этом не возникало проблем с обеспечением радиационной стойкости полупроводникового преобразователя.

Это не исключает, однако, возможность применения α -активных радионуклидов в батареях с непосредственным сбором заряда, фотоэлектрических или основанных на механических колебаниях консоли [4, 17].

Радионуклиды – β -излучатели. Значительное количество техногенных (получаемых искусственным путем) радионуклидов образуется при работе ядерного реактора в виде осколков деления ядерного горючего. Кроме того, большое количество неосколочных радионуклидов может быть получено путем облучения стабильных изотопов (мишеней) в ядерном реакторе.

В табл. 1 перечислены основные β -излучающие радионуклиды, которые в принципе доступны для получения.

Критически анализируя представленную в табл. 1 выборку β -излучателей, можно установить, что для создания долговечной и безопасной АБ пригодны далеко не все из них.

Таблица 2. Основные характеристики β -излучателей для АБ

Характеристика	β -Активный радионуклид			
	никель-63	углерод-14	третий T_2	третид титана TiT_2
Плотность, г/см ³	8.75	1.87	2.68×10^{-4}	4.05
Период полураспада $T_{1/2}$, годы (с)	100.1 (3.16×10^9)	5730 (1.808×10^{11})	12.26 (3.87×10^8)	12.26 (3.87×10^8)
Постоянная распада λ , с ⁻¹	2.19×10^{-10}	3.83×10^{-12}	1.791×10^{-9}	1.791×10^{-9}
Энергия β -частиц, кэВ: максимальная (средняя)	65.9 (17)	156 (50)	18.61 (5.69)	18.61 (5.69)
Концентрация радионуклида, см ⁻³	8.36×10^{22}	8.03×10^{22}	2.69×10^{19}	9.05×10^{22}
Удельная активность, Ки/см ³ (Ки/г)	495 (56.6)	8.31 (4.44)	2.6 _{н.у.} (9720)	4381 (1082)
Энерговыведение, мкВт/Ки	101	296	33.7	33.7
Энерговыведение, мВт/см ³	49.9	2.46	0.088	148
Энерговыведение, мВт/г	5.7	1.32	328	36.5
Запас энергии до полного распада изотопа в 1 г излучателя, Вт·ч	7230	95540	5083	5658

Стронций-90 – чистый β -излучатель и имеет удобный период полураспада, но энергия β -частиц слишком велика. К тому же стронций-90 находится в равновесии с дочерним радионуклидом иттрием-90, и в результате на каждые 10000 актов распада стронция возникает один жесткий γ -квант с энергией 1.7 МэВ, что неприемлемо из-за возникновения дозиметрических проблем.

Криптон-85 тоже имеет слишком жесткое излучение, к тому же по агрегатному состоянию это газ, что создает трудности при создании АБ.

Сера-35, фосфор-32 и кальций-45 имеют короткий период полураспада, а у фосфора-32 неприемлемо жесткое β -излучение. Получение кальция-45 и радия-228 в промышленном масштабе невозможно.

Прометий-147, выделяемый из осколков деления при радиохимической переработке облученного ядерного топлива, загрязнен другими изотопами прометия, в том числе жестким гамма-излучателем прометием-146. Глубокая очистка от него – сложная и дорогостоящая задача изотопного разделения. Это обстоятельство, а также относительно короткий период полураспада заставляют исключить прометий-147 из числа претендентов на роль β -излучателя для долгоживущей АБ, невзирая на то, что

уже есть некоторый опыт практического освоения миниатюрной батареи на его основе [2, 4].

В итоге остаются три потенциальных радионуклида, претендующие на использование в серийной АБ – тритий, углерод-14 и никель-63. В связи с этим рассмотрим и проанализируем радиационно-физические и энергетические характеристики этих β -излучателей, а также реально существующие возможности их промышленной наработки.

Характеристика β -излучателей, пригодных для создания β -вольтаических АБ. В табл. 2 приведены основные характеристики β -излучателей, пригодных для применения в β -вольтаических источниках электрического питания. Кроме названных выше изотопов, в табл. 2 включены данные по тритиду титана TiT_2 , который можно рассматривать в качестве наиболее вероятного носителя трития в β -вольтаических АБ.

Рассматривая целесообразность использования радионуклидного соединения в β -вольтаической батарее, помимо его энергетических характеристик необходимо коснуться радиационных нагрузок, связанных с возможным присутствием в конечном соединении посторонних γ -излучающих примесей. Конечно, хотелось бы использовать в АБ абсолютно «чистые» (мононуклидные) вещества, состоящие

только из целевых радионуклидов и свободные от любых других «ненужных» источников излучений. Однако нередко полностью избавиться от примесей нереально. Эта проблема не актуальна для трития, который не подвержен загрязнению радиоактивными примесями. Нерадиоактивные примеси в виде водорода, дейтерия, гелия отделяются хорошо основными методами.

Углерод-14 производится в ядерном реакторе путем облучения азота (в виде его химических соединений) и не подвержен загрязнению другими изотопами углерода, но может быть разбавлен ими при последующей обработке с соответствующим снижением и без того малой величины удельной мощности. Поэтому к технологии и составу используемых материалов при выделении углерода-14 из облученной мишени предъявляются весьма жесткие требования, усложняющие и удорожающие процесс его производства.

Никель-63 образуется в ядерном реакторе всегда в смеси со стартовым и другими изотопами никеля и загрязняется побочно образующимися γ -излучателями, из которых наиболее активным и «вредным» является кобальт-60 с неудобным периодом полураспада 5.2 года. Возникает необходимость дополнительной радиохимической очистки, удовлетворяющей весьма жестким требованиям к содержанию примесей [21, 22].

Перспективы использования радионуклидов в составе β -вольтаических АБ. Для практического применения конкретного радионуклида в β -вольтаической АБ рассмотрим возможность создания на его основе источника излучения, обладающего определенной технологичностью для интеграции его с полупроводниковым преобразователем, а также существующие возможности получения такого радионуклида в достаточно большом количестве.

Никель-63

Радионуклид никель-63 является чистым β -излучателем, средняя энергия β -частиц 17 кэВ, что значительно ниже порога возникновения радиационных нарушений полупроводников. После радиоактивного распада образуется медь. Никель – это пластичный металл, легко поддающийся механической обработке. β -Излучатели на основе никеля-63 можно изготавливать в виде металлической фольги или микронных слоев, наносимых различными спо-

собами на подложки определенных размеров или непосредственно на поверхность полупроводникового преобразователя [21, 22].

До настоящего времени никель-63 получали путем облучения мишеней из никеля-62 в ядерном реакторе СМ-2 с супервысоким потоком нейтронов [10^{15} н/(см²·с)]. По такой технологической схеме никель-63 можно получать только в небольших количествах (десятки кюри в год) и при невысоком (на уровне 15–18%) содержании его в конечном препарате [23]. Эти факторы не позволяли прогнозировать целесообразность его использования для АБ.

Интерес к никелю-63 как перспективному радионуклиду для АБ значительно возрос после того, как была технически и экономически обоснована новая концепция промышленного производства никеля-63 (десятки кг в год) с обогащением (концентрацией) его в конечном продукте не менее чем до 80% на действующих предприятиях Росатома [24, 25]. В настоящее время никель-63 рассматривается как приоритетный радионуклид для создания на его основе β -вольтаических АБ со сроками службы 30 и более лет.

Тритий

Тритий при нормальных условиях представляет собой двухатомный газ, в связи с чем создание на его основе эффективных источников излучения является достаточно сложной технической задачей. Использование жидкого трития трудноосуществимо. Применять газообразный тритий под высоким давлением сложно технически и опасно при эксплуатации. Рассмотрим некоторые более реальные технологические возможности использования трития в АБ.

Применение гидридов. Гидриды – твердые вещества, поддающиеся разным видам обработки, и их использование, видимо, есть реальный путь создания работоспособной конструкции эффективного источника β -излучателя с тритием.

Литературных данных по тритидам мало, поэтому воспользуемся обширными данными по изучению свойств их аналогов – гидридов [26]. Ввиду малого размера атома и высокой диффузионной способности водород способен хемосорбироваться и внедряться в решетку твердого металла, сплава или интерметаллида с образованием химического соединения – гидрида. Для многих металлов воз-

можная степень насыщения так велика, что концентрация водорода в единице объема гидрида существенно больше, чем в случае жидкого водорода. Наиболее емкими по водороду являются гидриды титана, лития, магния, кальция, скандия, циркония, содержащие от 530 до 1400 см³ водорода в 1 г гидрида.

Интерметаллиды

В качестве перспективных материалов для создания АБ, кроме гидридов металлов, привлекают внимание гидриды интерметаллических соединений. Интерметаллические соединения (ИМС) (интерметаллиды, интерметаллические фазы, металлиды) – химические соединения двух и более металлов между собой. В плотнейших кристаллических упаковках структур ИМС имеются октаэдрические и (или) тетраэдрические междоузлия, в которые могут внедряться атомы меньшего размера (H, N, C) с образованием на этой основе гидридов, нитридов, карбидов.

Среди ИМС, образующих гидриды в сравнительно мягких условиях, особое внимание привлекают те, в состав которых входят металлы, в подобных условиях гидридов не образующие. Таким металлом, в частности, является никель. Интерметаллиды, в которых никель является одним из компонентов, для β -вольтаики представляют особый интерес, поскольку в этом случае возможно при использовании радиоактивного никеля-63, получить суммарный поток β -частиц от трития и никеля-63.

Типичным представителем таких интерметаллических соединений является LaNi_5 , образующий гидрид LaNi_5H_6 при 20°C и давлении 0.25 МПа. Расчет показывает, что в тритиде $\text{LaNi}_{4.5}\text{T}_{6.7}$ с природным никелем удельное энерговыделение составляет 133 мВт/см³, а замена природного никеля на никель-63 с обогащением 80% увеличивает энерговыделение до 160 мВт/см³, или на 16%, причем со временем относительный вклад никеля растет. В начальный момент времени интерметаллид с никелем-63 и тритием выделяет примерно в 3 раза больше энергии, чем такой же объем (или масса) никеля-63.

Для практического применения наиболее предпочтительными представляются гидриды интерметаллических соединений с давлением диссоциации

много меньше 0.1 МПа – $\text{LaNi}_{5-x}\text{M}_x$ (M = Al, Mn), Ti_2Ni и ZrNi [27–31].

Углерод-14

Природный углерод состоит из двух стабильных изотопов ¹²C (содержание в природной смеси 98.93%) и ¹³C (1.07%) и одного радиоактивного изотопа ¹⁴C, сосредоточенного в атмосфере, верхней части земной коры и океанах. Углерод-14 постоянно образуется в нижних слоях стратосферы в результате воздействия нейтронов космического излучения на ядра азота по реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$.

Углерод-14 является чистым β -излучателем, как было указано ранее, с очень большим периодом полураспада – $T_{1/2} = 5730$ лет, что определило его основное применение в геологии, археологии для радиоактивного датирования, а также в качестве радиоактивной метки в научных исследованиях.

Для практического применения углерод-14 получают путем облучения в ядерном реакторе безуглеродных мишеней, содержащих соединения азота, такие как нитраты кальция (приоритетно), натрия, калия, нитрид алюминия и другие соединения азота. Для исключения изотопного разбавления и без того низкой величины удельной мощности углерода-14 (1.32 мВт/г) радиохимическая очистка облученных мишеней должна проводиться с безуглеродными реактивами, что создает значительные трудности в случае необходимости наработки радионуклида ¹⁴C в больших объемах.

По-видимому, поэтому прогнозируемый объем мирового производства углерода-14 в обозримом будущем находится на уровне ~1000 Ки в год, что явно недостаточно для производства на его основе даже небольшого количества АБ [32]. Кроме того, следует учитывать, что высокая биологическая активность углерода, являющегося обязательным элементом любого органического соединения, требует принятия дополнительных мер для исключения выхода углерода-14 в окружающую среду, т.е. обеспечение сохранности целостности корпуса АБ в экстремальных ситуациях, например при пожаре или в случае возникновения сильных механических воздействий.

Изменения энергетических характеристик β -излучателей во времени. Для определения прогнозируемого срока службы АБ (при отсутствии деградации полупроводникового преобразователя)

Таблица 3. Изменение во времени мощности, выделяемой 1 г β -излучателя (мВт/г)

Время, лет	TiT ₂	⁶³ Ni	¹⁴ C	Время, лет	TiT ₂	⁶³ Ni	¹⁴ C
0	36.5	5.7	1.32	50	2.17	4.03	1.312
5	27.5	5.51	1.32	70	0.70	3.51	1.309
10	20.76	5.32	1.32	100	0.129	2.86	1.304
20	11.8	4.96	1.317	200	0.000457	1.43	1.288
30	6.71	4.63	1.315	500	2.02×10^{-11}	0.18	1.243
40	3.82	4.32	1.314	1000	1.12×10^{-23}	0.00567	1.170

Таблица 4. Расчетный срок службы атомных батарей

Допустимое снижение мощности в конце периода эксплуатации, %	Срок службы батареи, лет			
	прометий-147	тритий ³ H	никель-63	углерод-14
10	0.4	<2	15	870
20	0.85	~ 4	32	1850
30	1.35	6.3	51	2950
40	1.9	9	74	4200

представляет интерес рассчитать и проанализировать временные изменения энергетических характеристик β -излучателя. С течением времени удельная мощность β -излучателя уменьшается по закону радиоактивного распада. В относительных единицах это показано на рис. 1 для трех основных нуклидов (⁶³Ni, T₂, ¹⁴C). Для сравнения приведена кривая для интерметаллида LaNi₅T_{6,7}, улучшающего параметры тритиевой батареи в конце срока действия (в качестве никеля используется никель-63), и прометия-147, уже использовавшегося ранее. Зависимость характеристик β -излучателей, содержащих

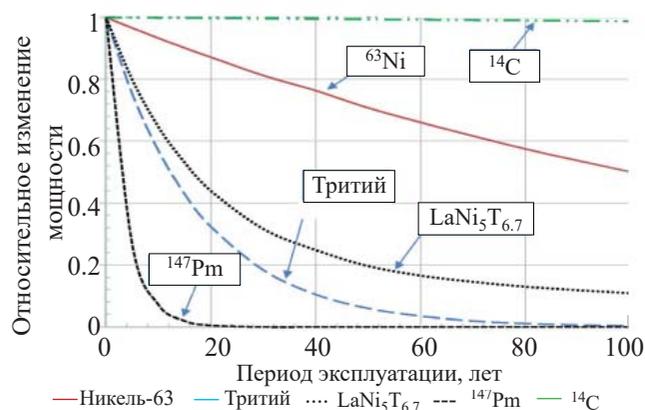
тритид титана, от времени совпадает с характеристиками β -излучателей, содержащих тритий.

В абсолютных единицах (мВт/г) в табл. 3 приведены результаты расчета изменения величины энергии, выделяемой 1 г β -излучателя за период до 1000 лет.

Срок службы атомной батареи можно определить как период, в течение которого мощность снизится до заданного уровня, допустимого в конце эксплуатации. Соответствующий расчет представлен в табл. 4.

Вывод из анализа результатов расчетных исследований состоит в следующем. Тритиевая и никелевая батареи имеют различные, хотя и частично перекрывающиеся, области применения. Если нужна батарея с рабочим периодом на 10–15 лет – надо применять тритий; в диапазоне 20–100 лет безальтернативен никель-63. β -Вольтаическая батарея на углеводе-14 – это экзотика для эксклюзивных применений, когда (и если) потребуется батарея со сроком службы от 300 до 3000 лет.

Что касается никелевой батареи, ее преимущество в интервале 10–100 лет неоспоримо. Скорее всего, срок службы такой батареи будет определяться эксплуатационной деградацией полупроводникового преобразователя, а не распадом излучателя. Справедливости ради следует отметить, что максимальная энергия β -частиц

**Рис. 1.** Относительное падение мощности β -излучателей в течение эксплуатации.

никеля-63 составляет 65 кэВ, что намного ниже порога радиационных повреждений, равного 300 кэВ для кремния или арсенида галлия.

В отличие от химических источников тока изменение мощности во времени для атомных батарей не зависит от внешней нагрузки, температуры или давления в окружающей среде.

Резюмируя вышеизложенное, приходим к выводу, что для создания миниатюрных радионуклидных источников электрической энергии со сроком службы, исчисляемым десятилетиями, для серийного производства с обширным кругом применений реально следует рекомендовать радионуклиды никель-63 и тритий. Радионуклид углерод-14 может найти применение в своей специфической узкой сфере.

ВЫВОДЫ

По обобщенным показателям (удельная мощность, средняя энергия β -частиц, период полураспада, практические возможности промышленной наработки) только два радионуклида – никель-63 с обогащением не менее 80% и тритий (в виде тритида титана TiT_2 и на основе интерметаллических соединений $LaNi_5$, $ZrNi$) целесообразно использовать для создания энергоемких β -вольтаических источников электрической энергии со сроками службы от 10 до 50 лет. Для миниатюрных радионуклидных источников электрической энергии на тритии срок службы может составлять 10–15 лет, а на никеле-63 – 15–50 лет. Совместное использование обоих радионуклидов может продлить срок службы батареи до ~25 лет.

Радионуклид углерод-14 ввиду малой величины удельной мощности (1.32 мВт/г) и принципиальных технических трудностей его наработки в больших объемах с учетом его потенциальной экологической опасности нельзя рекомендовать для массового выпуска энергоемких и экологически безопасных β -вольтаических источников электрической энергии с широким спектром применения.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-08-00452.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корлис У., Харви Д. Источники энергии на радиоактивных изотопах. М.: Мир, 1967. 327 с.
2. Olsen L.G. // Trans. Electron Devices. 1969. Vol. 2. P. 481.
3. Кодюков В.М., Гусев В.В., Почтаков А.А., Пустовалов А.А. Радиационная техника. М.: Атомиздат, 1975. С. 61–67.
4. Лазаренко Ю.В., Пустовалов А.А., Шаповалов В.П. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1992. 176 с.
5. Баранов В.Ю., Паль А.Ф., Пустовалов А.Ф., Старостин А.Ф., Суэтин А.Ф., Филипов М.В., Форттов Ф.В. Радиоизотопные генераторы электрического тока. Изотопы, свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит, 2005. 315 с.
6. Пустовалов А.А., Гусев В.В., Заддэ В.В., Петренко Н.С., Тихомиров А.В., Цветков Л.А. // Атом. энергия. 2007. Т. 103, № 6. С. 353–356.
7. Olsen L.C., Cabauy P.A., Elkind B.J. // Phys. Today. 2012. Vol. 65, N 12. P. 35–38.
8. Резнев А.А., Пустовалов А.А., Максимов Е.М., Передерий А.Н., Петренко Н.С. // Нано-и микросистемная техника. 2009. № 3. С. 14–16.
9. Chandrashekar M.V., Thomas C.I., Li H., Spenser M.G., Lal A. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. Article 033506.
10. Нагорнов Ю.С. Современные аспекты применения β -вольтаического эффекта. Ульяновск: УлГПУ, 2012. 145 с.
11. Xiaoyi Li, Jingbin Lu // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53. P. 321–332.
12. Chunlin Zhou // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2021. Vol. 10. Article 027005.
13. Urchuk S.U., Krasnov A.A. // J. Nano Electron. Phys. 2015. Vol. 7, N 4. P. 04005-1–04005-4.
14. Chen Zhao, Lin Lei // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 117. Article 263901.
15. Alam T.R. // Int. J. Energy Res. 2018. Vol. 42, N 7. P. 2564–2573.
16. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Радио, 1971. 324 с.

17. *Li H., Lal A., Blanchard J.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 271–274.
18. *Круглов А.К., Рудик А.П.* Реакторное производство радиоактивных нуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 423 с.
19. *Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Рудик А.П.* Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. М.: ЭАИ, 1989. 346 с.
20. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 345 с.
21. *Заддэ В.В., Пустовалов А.А., Пустовалов С.А., Цветков Л.А., Цветков С.Л.* Пат. RU 2452060. 10.12.2011.
22. *Мандругин А.А., Баранов Н.Н.* Пат. RU 2608058. 14.07.2015. Оpubл. 12.01.2017.
23. *Цыканов В.А., Клинов В.А.* // Атом. энергия. 2002. Т. 93, № 3. С. 45–48.
24. *Пустовалов А.А., Тихомиров А.В., Цветков Л.А.* Пат. RU 2313149. 26.06.2006.
25. *Пустовалов А.А., Цветков Л.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 10. С. 19–24.
26. Гидриды металлов / Под ред. В. Мюллера. М.: Атомиздат, 1973. 342 с.
27. *Ivanova T.V., Sirotina R.A., Verbetsky V.N.* // J. Alloys Compd. 1997. Vol. 253, N 1–2. P. 210–211.
28. *Ivanova T.V., Verbetsky V.N.* // Allerton Press Inc. (United States). 1998. N 6. P. 28–31.
29. *Семенов К.Н., Вербецкий В.Н., Золотов В.С.* // ЖНХ. 1981. Т. 26, № 10. С. 2603–2605.
30. *Vasut F., Anisoara P., Stefanescu I.* // Asian J. Chem. 2010. Vol. 22, N 6. P. 4291–4294.
31. *Nemirovskaya E., Alekseev A.M., Lunin V.V.* // J. Alloys Compd. 1991. Vol. 177, N 1. P. 1–15.
32. *Пустовалов А.А., Цветков Л.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 1. С. 34–38.