

ИСТОЧНИКИ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ-63 ДЛЯ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

© 2022 г. Р. А. Кузнецов*, К. С. Бобровская, И. С. Белобров,
М. Ю. Тихончев, С. Г. Новиков, А. В. Жуков

*Научно-исследовательский технологический институт
им С.П.Капицы Ульяновского государственного университета,
432017, Ульяновск, ул. Университетская Набережная, д. 1., корп. 4
e-mail: rostislavkuznetsov@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021, после доработки 06.12.2021, принята к публикации 07.12.2021

Рассмотрены основные методологические аспекты технологии изготовления в лабораторных условиях экспериментальных источников β -излучения на основе радионуклида ^{63}Ni , предназначенных для испытания полупроводниковых структур бета-вольтаических элементов питания, включая стадию контролируемого электрохимического осаждения металлического никеля-63 на медную подложку, и способы определения основных параметров источников – толщины осажденного слоя, активности и выхода β -частиц. Для определения выхода β -частиц с поверхности источника предложен способ, основанный на жидкостно-сцинтилляционном измерении активности. Оценена погрешность определения радиационных параметров. Работоспособность предложенной методологии подтверждена при изготовлении партии источников активностью 0.2–2 ГБк с толщиной слоя никеля от 0.2 до 5 мкм.

Ключевые слова: никель-63, электрохимическое осаждение, бета-вольтаические элементы питания.

DOI: 10.31857/S0033831122030121, **EDN:** FQQDFZ

ВВЕДЕНИЕ

Одно из перспективных направлений применения радионуклида ^{63}Ni – изготовление бета-вольтаических элементов питания (БВЭП), состоящих из источника ионизирующего излучения (ИИИ) и полупроводниковой структуры, содержащей p - n -переходы и преобразующей энергию β -излучения в электрическую посредством β -вольтаического эффекта. Разработке и оптимизации параметров полупроводниковых структур БВЭП посвящено большое количество исследований, результаты которых обобщены в ряде обзоров, например [1–4]. Публикации же, посвященные разработке технологии изготовления ИИИ, предназначенных для использования в составе БВЭП, в доступной нам литературе практически отсутствуют.

Отдельные аспекты технологии изготовления источников β -излучения на основе радионуклида ^{63}Ni , использующей электрохимическое осаждение никеля на подложку, обсуждались в публикациях [5–10]. Вместе с тем, информации, приведенной в этих работах, недостаточно для разработки технологии изготовления ИИИ, а методологические аспекты различных этапов реализации рассматриваемой технологии и ее аналитического сопровождения описаны в литературе фрагментарно.

Методология изготовления источника должна рассматривать как способы формирования активного слоя заданной толщины, так и способы определения параметров источника, а именно толщины активного слоя и выхода β -частиц, поскольку именно эти параметры определяют эффективность БВЭП [11–14]. Цель настоящей работы заключалась в

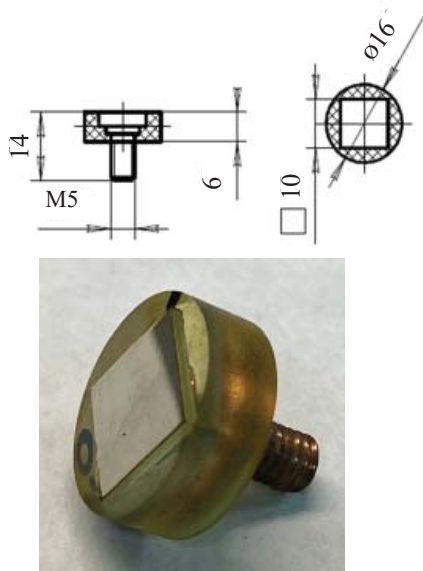


Рис. 1. Конструкция и фотография источника.

разработке методологических аспектов технологии изготовления и определения характеристик ИИИ на основе радионуклида ^{63}Ni , предназначенных для β -вольтаических применений.

В качестве способа формирования активного слоя источника было выбрано электрохимическое осаждение ^{63}Ni на медную подложку. Особенность этого способа в рассматриваемом нами случае заключается в малой концентрации радионуклида в электролите (природа данного ограничения рассмотрена нами ниже). Ввиду малоизученности процессов осаждения никеля из разбавленных растворов нами была исследована кинетика электрохимического осаждения никеля на металлическую подложку, а выявленные кинетические зависимости использованы для прогнозирования режимов осаждения, обеспечивающих заданную толщину активного слоя и выход β -частиц.

Процесс осаждения контролировали, определяя концентрацию никеля в растворе методом спектрофотометрии или активность ^{63}Ni в растворе методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии. И в том, и в другом случае методики анализа были адаптированы к решению задач настоящей работы. Кроме того, нами была предложена оригинальная методика оценки выхода β -частиц для изготавливаемых источников.

Перечисленные методологические аспекты разрабатывались на примере изготовления ИИИ,

конструкция которых определялась конструкцией устройства, предназначенного для испытания полупроводниковых структур БВЭП (рис. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы и оборудование. Все использованные в работе реактивы имели квалификацию х.ч. и применялись без дополнительной очистки. Воду, применяемую для приготовления растворов, очищали с использованием системы очистки воды Arium mini (Sartorius, Германия).

В работе применяли радиоактивный препарат ^{63}Ni – никеля хлорид производства НИИАР, удельная активность ^{63}Ni составляла 427 ГБк/г (11.55 Ки/г). Препарат имел радионуклидную чистоту $>99.99\%$ и применялся без дополнительной очистки.

Гравиметрические измерения проводили с использованием аналитических весов Shimadzu AP225W (Япония). Кислотность растворов контролировали с помощью рН-метра Mettler Toledo Five Easy Plus (Швейцария). Спектрофотометрический анализ растворов проводили с использованием спектрофотометра ПЭ-5400УФ (Экрос, РФ).

Определение содержания никеля в растворах электролита. При изучении кинетики электрохимического осаждения никеля и при измерении удельной активности ^{63}Ni для определения его содержания в растворе применяли методику спектрофотометрического измерения оптической плотности растворов диметилглиоксимата никеля при длине волны 465 нм, разработанную на основании материалов, представленных в монографии [15]. Детальное описание и характеристики методики приведены в дополнительных материалах к статье.

Измерение активности растворов никеля-63. Измерение активности растворов проводили с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра HIDEX 300SL (HIDEX Oy, Финляндия) по методике, рекомендуемой производителем, обработку результатов измерений проводили с помощью программы MicroWin 300 SL. Во всех случаях активность измеряемой пробы подбирали таким образом, чтобы скорость счета не превышала 10^2 – 10^3 с^{-1} (допустимая скорость счета 2×10^4 с^{-1}). Погрешность измерения активности с учетом по-

грешности пробоотбора и пробоподготовки (разбавления проб) не превышала 3–4%.

Электрохимическое осаждение никеля. Электрохимическое осаждение никеля проводили из сульфатно-боратного электролита, для подготовки которого аликвоту раствора $^{63}\text{NiCl}_2$ с заданным количеством радионуклида упаривали под ИК лампой, сухой остаток растворяли в 10 мл водного раствора сульфата натрия ($[\text{Na}_2\text{SO}_4] = 21.3$ г/л) и борной кислоты ($[\text{H}_3\text{BO}_3] = 40.3$ г/л) с pH 5.5, установленным с помощью раствора NaOH. Концентрацию никеля в электролите варьировали в диапазоне от 0.06 до 1 мг/мл. Осаждение проводили в гальваностатическом режиме при силе тока 20 мА.

При изготовлении ИИИ для испытания полупроводниковых структур активность ^{63}Ni в растворе в электролитической ячейке составляла 0.26–4.6 ГБк (7–125 мКи), носитель (нерадиоактивный никель) в электролит не вводился. Активность ^{63}Ni в ИИИ варьировалась от 74 МБк до 1.85 ГБк (от 2 до 50 мКи).

При изготовлении калибровочных источников для определения коэффициента самопоглощения активность введенных индикаторных количеств ^{63}Ni составляла $(2.5–50) \times 10^3$ Бк. Концентрацию никеля в электролите в этом случае поддерживали за счет добавления носителя (нерадиоактивного никеля).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

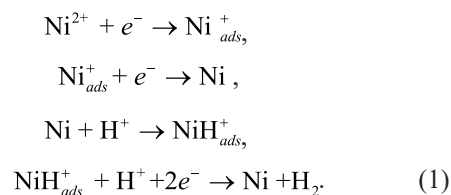
Традиционно источники на основе радионуклида ^{63}Ni представляют собой слой металлического никеля, зафиксированного на поверхности металлической токопроводящей подложки, выполняющей функцию держателя активного слоя [8]. В последние годы появились публикации, описывающие способы нанесения радиоактивного слоя непосредственно на поверхность полупроводникового преобразователя [9, 10] или изготовления радиоактивной фольги с ^{63}Ni [16], однако для исследований характеристик БВЭП более удобно применение источников на подложке-держателе. При изготовлении коммерчески доступных источников на основе ^{63}Ni в качестве подложки используют никелевую фольгу [17]. К сожалению, это исключает возможность последующей регенерации радионуклида без потери его удельной активности, и более радио-

нальным в данном случае является использование в качестве материала подложки металлической меди [5, 6].

Электрохимическое осаждение никеля часто проводят, используя электролит Уоттса, в котором содержание сульфата никеля составляет 200–300, хлорида никеля – 40–60 г/л. Процесс хорошо отработан, и многочисленные рекомендации по его выполнению можно найти в справочной литературе [18–20]. Однако использование электролита с подобными характеристиками при изготовлении ИИИ малой активности (несколько десятков мКи) нецелесообразно. Для «стандартного» электролита Уоттса с концентрацией никеля 300 г/л при удельной активности ^{63}Ni 10–12 Ки/г масса радионуклида в электрохимической ячейке объемом, например, 10 мл составит 3 г, а активность – более 30 Ки. Обращение с такими количествами радиоактивного материала требует как специальной техники работы с радиоактивными веществами, так и существенных финансовых затрат на приобретение радиоактивного материала. При использовании модифицированного электролита Уоттса [6], позволяющего проводить осаждение при концентрации никеля-63 1.5 г/л, активность радионуклида в вышеупомянутой электролитической ячейке составит менее 150 мКи. Это обеспечивает безопасность даже при работе в перчаточном боксе, требует меньше затрат на приобретение радиоактивного материала, и, таким образом, более предпочтительно при изготовлении малых партий источников в лабораторных условиях.

В доступной нам литературе сведения о кинетике электрохимического осаждения никеля при его малых концентрациях в электролите немногочисленны [21, 22]. Вместе с тем, эта информация необходима для разработки режимов контролируемого осаждения слоев заданной толщины.

Кинетика осаждения никеля. Процесс электрохимического осаждения никеля может рассматриваться как последовательность следующих реакций [22]:



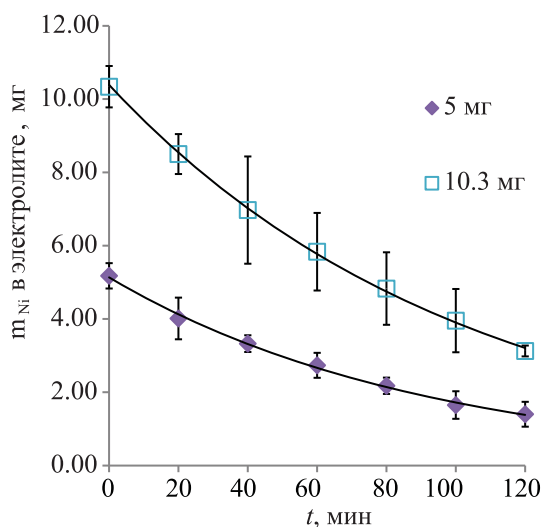
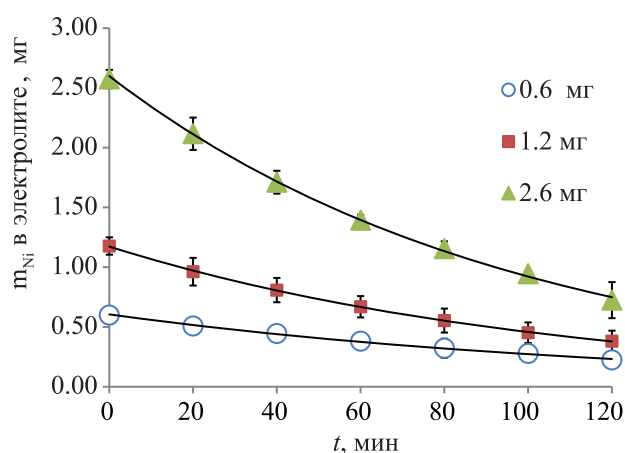


Рис. 2. Скорость осаждения никеля из раствора электролита при различных начальных содержаниях никеля в электрохимической ячейке.

Результаты исследования, представленные в работе [22], показали, что осаждение никеля из сульфатного электролита является диффузионно-контролируемым процессом, определяющим скорость зародышеобразования, и зависит от концентрации никеля в растворе. Для определения длительности процесса электроосаждения и достижения необходимой массы или толщины покрытия часто применяют закон Фарадея, связывающий величину осажденной массы металла и количество электричества, прошедшего через раствор. Однако подобная оценка может оказаться неточной, поскольку процесс протекает на границе раздела фаз электрод–раствор и на его характер влияют структура и свойства этой границы [18]. Это не учитывается законом Фарадея. Кроме того, не следует исключать протекание других конкурирующих электрохимических процессов, в частности, разложения воды, выделения водорода и защелачивания приэлектродного пространства. Наиболее значимые отклонения от известных закономерностей могут наблюдаться при осаждении никеля из разбавленных растворов. Разработка теоретической модели, описывающей рассматриваемую нами систему, и определение ее параметров представляются весьма трудоемким процессом. Поэтому указанные кинетические зависимости нами были исследованы эмпирически.

Во всех экспериментах, результаты которых представлены на рис. 2, уменьшение концентрации

никеля в процессе осаждения описывается зависимостью

$$m_{\text{Ni},t} = ae^{-bt}, \quad (2)$$

где $m_{\text{Ni},t}$ – масса никеля в ячейке в момент времени t , a и b – коэффициенты, при этом $a \approx m_{\text{Ni},0}$ – начальное содержание никеля в электролите, а коэффициент b изменяется от 0.008 до 0.011 с изменением начального содержания никеля. Природа этих изменений может быть связана с вышеупомянутой многоступенчатостью процесса восстановления никеля на поверхности электрода или с изменением концентрации ионов водорода в приэлектродном слое, зависящей от концентрации металла. Изучение природы выявленных закономерностей осаждения никеля не входило в задачи настоящей работы и является предметом самостоятельного исследования.

Полученные кинетические зависимости позволяют рассчитать время, необходимое для осаждения заданного количества никеля с помощью следующего соотношения:

$$t = \frac{\ln(m_{\text{Ni},0}) - \ln(m_{\text{Ni},0} - m_{\text{Ni}})}{b}, \quad (3)$$

где m_{Ni} – масса осажденного никеля, мг.

Эти зависимости использовались нами для планирования режимов осаждения никеля-63 при изготовлении источников для испытания полупроводниковых структур.

Определение коэффициентов самоослабления β -излучения. Активность радионуклида в осажденном слое можно оценить по массе и удельной активности радионуклида. Однако для БВЭП более важно значение параметра выхода (потока) β -частиц с поверхности источника, иногда называемого «поверхностной активностью», A_n . Этот параметр связан с активностью радионуклида соотношением

$$A_n = \eta A, \quad (4)$$

где A – активность радионуклида в источнике, Бк; η – коэффициент самоослабления β -излучения. При прочих равных условиях (плотность материала, средний атомный номер, химическая форма и т.п.) коэффициент самоослабления η является функцией толщины активного слоя.

Прямое измерение потока β -частиц ^{63}Ni ионизационными методами осложнено особенностями спектра и низкой энергией β -излучения [23] и требует применения специальной измерительной аппаратуры и/или специальных методов измерения активности. Кроме того, совокупность эффектов поглощения и самопоглощения β -излучения в окружающей среде и в материале активной части источника приводит к значительным погрешностям измерений.

Известны попытки применения прямого измерения поверхностной активности никеля-63, нанесенного на металлическую подложку, методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС) [24]. В данном случае измеряется не активность радионуклида, содержащегося в активном слое ИИИ, а поток β -частиц, вылетающих с поверхности источника и попадающих в сцинтиллятор. Отметим, что возможность измерения активности гетерогенных образцов (например, суспензий в жидком сцинтилляторе) в принципе известна, однако количественная интерпретация результатов измерения активности в этом случае крайне сложная [25] и не может быть рекомендована для измерения абсолютного значения активности. Тем не менее, при таком способе измерения регистрируемая активность коррелирует с величиной поверхностной активности и может быть использована для оценки данного показателя. К сожалению, ограниченное временное раз-

решение спектрометрической аппаратуры не позволяет измерять образцы с активностью более 10^4 Бк, т.е. прямое измерение активности источников в интересующем нас диапазоне ($n \times 10^7$ – $n \times 10^8$ Бк) с использованием штатных жидкостно-сцинтилляционных спектрометров невозможно. Однако, если известна масса (активность) ^{63}Ni , формирующего активный слой ИИИ, и значение коэффициента самоослабления для данного слоя, то поверхностная активность ИИИ может быть рассчитана с помощью выражения, приведенного выше.

Зависимость коэффициента самоослабления от толщины слоя никеля может быть измерена экспериментально с помощью серии специально подготовленных калибровочных источников, имеющих активность, адекватную разрешающей временной способности используемого жидкостно-сцинтилляционного спектрометра. Поскольку геометрия и другие характеристики активного слоя (в частности, плотность и морфология осадка) могут влиять на выход β -частиц, геометрия и условия осаждения никеля для калибровочных и «рабочих» источников должны быть идентичными. Подобный подход к оценке коэффициента самоослабления в доступной нам литературе не описан и был проверен в настоящей работе.

Эксперимент по измерению зависимости коэффициента самоослабления от толщины никелевого покрытия включал следующие стадии:

- изготовление серии модельных источников с активностью ^{63}Ni в диапазоне 0.8–18 кБк и толщиной активного слоя 0.2–5 мкм;
- измерение выхода β -частиц (поверхностной активности) источников погружением источников в сцинтилляционный коктейль;
- растворение источников вместе с подложкой и измерение активности ^{63}Ni в источниках методом ЖСС.

Детали эксперимента приведены в дополнительных материалах к статье.

На основании выполненных измерений поверхностной активности образцов и активности ^{63}Ni в растворах, полученных после растворения ИИИ,

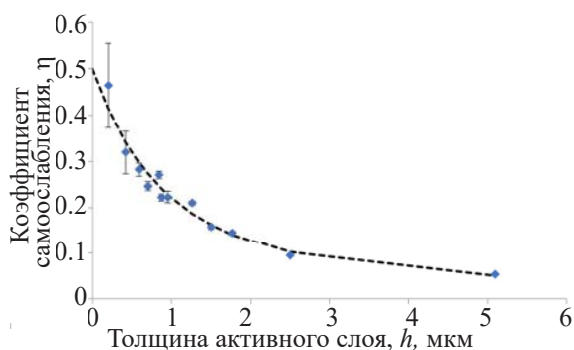


Рис. 3. Зависимость коэффициента самоослабления β-излучения ^{63}Ni от толщины осажденного слоя (излучение в угол 2π).

рассчитали коэффициент самоослабления по формуле:

$$\eta = \frac{A_{\eta}}{A}, \quad (5)$$

где A_{η} — скорость счета образца (регистрируемый выход β-частиц с поверхности источника), имп/мин; A — скорость счета образца после растворения, имп/мин.

Для подбора аналитической зависимости величины η от толщины осажденного слоя никеля h , мкм, сначала было рассмотрено произведение $P(h) = \eta h$. Поскольку абсолютная активность источника прямо пропорциональна толщине осажденного слоя, функция $P(h)$ описывает выход β-частиц с поверхности источника (поверхностную активность) в относительных единицах (а именно, в единицах длины). Из литературы известно (см., например, работу [26]), что эффект самопоглощения в источниках на основе ^{63}Ni хорошо описывается формулой

$$P(h) = W_{\infty}(1 - e^{-\mu h}), \quad (6)$$

где W_{∞} — асимптота выхода β-частиц для источников большой толщины, μ характеризует самопоглощение. Для подбора коэффициентов W_{∞} и μ следует достичь условия

$$\lim_{h \rightarrow 0} \eta(h) = 1/2 \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что при бесконечно малых толщинах плоского источника через одну его грань выходит ровно половина произведенных β-частиц. Следовательно, коэффициенты W_{∞} и μ должны удовлетворять уравнению

$$\lim_{h \rightarrow 0} W_{\infty}(1 - e^{-\mu h}) / h = A_{\infty} \mu = 1/2 \quad (8)$$

т.е. $W_{\infty} = 1/(2\mu)$. Таким образом, подбор параметра μ с использованием метода наименьших квадратов для функции (6) с учетом уравнения (8) показал, что $\mu = 1.94 \text{ мкм}^{-1}$, при этом параметр $W_{\infty} = 0.26 \text{ мкм}$. Таким образом, зависимость коэффициента самоослабления η от толщины осажденного слоя никеля описывается аппроксимирующей функцией

$$\eta = 0.26(1 - e^{-1.94h}) / h, \quad (9)$$

что подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 3. Полученная зависимость использовалась нами далее при оценке выхода β-излучения из источников, предназначенных для испытания полупроводниковых структур.

Изготовление источников для испытания полупроводниковых структур. На основании приведенных выше кинетических зависимостей выбирали концентрацию никеля в электролите и продолжительность процесса осаждения, обеспечивающие заданную толщину осажденного слоя. Концентрацию никеля в растворе контролировали до и после осаждения по изменению активности раствора. Массу m , мг, и толщину осажденного слоя никеля h , мкм, рассчитывали по формулам

$$m = \frac{\Delta A}{A_{\text{уд}}}, \quad (10)$$

$$h = \frac{\Delta A}{A_{\text{уд}}} \cdot \frac{10}{\rho S}, \quad (11)$$

где $\Delta A = A_1 - A_2$ — разность активностей раствора до и после осаждения никеля, ρ — плотность никеля (8.9 г/см^3), S — поверхность источника (1 см^2).

Активность ^{63}Ni в источнике рассчитывали по изменению активности радионуклида в растворе. Выход β-излучения проводили по данным измерения толщины слоя и активности ^{63}Ni по соотношению (4).

Характеристики изготовленных источников представлены в табл. 1. Оценку погрешностей определения параметров источников проводили стандартным образом с учетом закона накопления погрешностей. Подробный анализ погрешностей определения параметров источников приведен в дополнительных материалах.

Результаты определения массы осажденного слоя удовлетворительно, с точностью 10–15%, совпали с прогнозируемыми значениями, рассчитан-

Таблица 1. Характеристики изготовленных источников

№	[Ni] _{эл} , мг/10 мл	Время осаждения, мин	Масса Ni расчетная, мг	Масса Ni измеренная, мг	Толщина слоя Ni, мкм	Активность ⁶³ Ni в источнике, Бк, ·10 ⁻⁸	Выход β-излучения, с ⁻¹ , ·10 ⁻⁷
1	0.6	45	0.18	0.22 ± 0.01	0.24 ± 0.02	0.89 ± 0.05	3.55 ± 0.22
2	1.2	56	0.45	0.51 ± 0.03	0.57 ± 0.04	2.08 ± 0.12	6.30 ± 0.36
3	2.5	37	0.67	0.67 ± 0.04	0.76 ± 0.05	2.75 ± 0.17	7.20 ± 0.45
4	2.5	52	0.89	1.12 ± 0.14	1.26 ± 0.16	4.57 ± 0.21	8.67 ± 0.37
5	2.5	90	1.34	1.60 ± 0.06	1.80 ± 0.07	6.55 ± 0.17	9.10 ± 0.24
6	5	47	1.78	2.08 ± 0.15	2.33 ± 0.17	8.48 ± 0.56	9.29 ± 0.61
7	5	66	2.22	2.21 ± 0.12	2.49 ± 0.13	9.04 ± 0.42	9.29 ± 0.43
8	5	82	2.67	3.00 ± 0.09	3.38 ± 0.10	12.3 ± 0.2	9.38 ± 0.15
9	5	134	3.56	3.61 ± 0.17	4.06 ± 0.19	14.7 ± 0.6	9.34 ± 0.38
10	10	68	4.45	4.69 ± 0.19	5.27 ± 0.22	19.1 ± 0.6	9.35 ± 0.29

ными на основании предварительно измеренных кинетических зависимостей, что подтверждает возможность контролируемой реализации процесса при малых концентрациях радионуклида в растворе электролита. Отклонения экспериментальных данных от расчетных, вероятно, обусловлены погрешностями пробоотбора и вариабельностью условий осаждения никеля (температура, концентрация компонентов электролита, качество подготовки поверхности подложки и др.). В то же время примененные нами методы контроля позволяют оценить радиационные параметры ИИИ с погрешностью, не превышающей 10%, что можно считать удовлетворительным для практического использования ИИИ при испытаниях полупроводниковых структур БВЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения настоящей работы показана возможность контролируемого электрохимического осаждения тонких слоев радионуклида из электролитов с низким содержанием радионуклида. Предложена зависимость массы (толщины) осажденного слоя от времени электролиза при различных начальных концентрациях ⁶³Ni в электролите. Условия электролиза (начальная концентрация ⁶³Ni, продолжительность осаждения) для нанесения слоя заданной толщины при конкретных значениях плотности тока могут быть выбраны с использованием найденных кинетических зависимостей. Предложен новый способ оценки коэффициента самопоглощения бета-излучения ⁶³Ni и

расчета выхода β-частиц с поверхности источника (поверхностной активности), основанный на измерении поверхностной активности источников методом жидкостно-сцинтилляционного счета. Погрешность определения основных параметров источников не превышает при этом 10%.

Методология, описанная в настоящей работе, применима для изготовления источников с иной геометрией и/или с иными подложками, может применяться при варьировании состава электролита и условий осаждения радионуклида, в частности плотности тока, температуры, продолжительности осаждения и др.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по <https://doi.org/10.31857/S0033831122030121> для авторизованных пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Revankar S.T., Adams T.E. // J. Energy Power Sources. 2014. Vol. 1, N 6. P. 321.
2. Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L., Lukosi E.D., Schott R.J., Wisniewski D.A. // Prog. Nucl. Energ. 2014. Vol. 75. P. 117.
3. Krasnov A., Legotin S.A. // Instrum. Exp. Tech. 2020. Vol. 63, N 4. P. 437.

4. Быков А.С., Малинкович М.Д., Кубасов И.В., Кислюк А.М., Киселев Д.М., Ксенич С.В., Жуков Р.Н., Темиров А.А., Чичков М.В., Полисан А.А., Пархоменко Ю.Н. // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. 2016. Т. 19, № 4. С. 221.
5. Petek M., Wike J.S., Phillips B.F., Sampson C.A. Plating nickel on copper coupons: ORNL/TM-10989. Oak Ridge, USA: Oak Ridge National Laboratory, December 1989.
6. Kumar M., Udhayakumar J., Gandhi Sh.S., Satpati A.K., Dash, A., Venkatesh M. // Appl. Radiat. Isot. 2009. Vol. 67, N 6. P. 1042.
7. Steeb J.L. Nickel-63 microirradiators and applications: PhD Dissertation. Georgia Inst. of Technology, August 2010. 146 p.
8. Сытин В.П., Теплов Ф.П., Череватенко Г.А. Радиоактивные источники ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1984. 128 с.
9. Харитонов И.Д., Меркушкин А.О., Веретенникова Г.В., Магомедбеков Э.П., Калмыков С.Н. // Радиохимия. 2018. Т. 60, № 1. С. 24.
10. Krasnov A.A., Starkov V.V., Legotin S.A., Rabinovich O.I., Didenko S.I., Murashev V.N., Cheverikin V.V., Yakimova E.B., Fedulova N.A., Rogozev B.I., Laryushkin A.S. // Appl. Radiat. Isot. 2017. Vol. 121. P. 71.
11. Yun-peng Liu, Xiao-bin Tang, Zhi-heng Xu, Liang Hong, Hao Wang, Min Liu, Da Chen // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2015. Vol. 304, N 2. P. 517.
12. Aydin S., Kam E. I // Int. J. Energy Res. 2019. P. 1.
13. Guoping Zuo, Jianliang Zhou, Guotu K.E. // Appl. Radiat. Isot. 2013. Vol. 82. P. 119.
14. Belghachi A., Bozkurt K., Moughli H., Özdemir O., Amiri B., Talhi A. // Acta Phys. Polon. A. 2020. Vol. 137, N 3. P. 324.
15. Пешкова В.М., Савостина В.М. Аналитическая химия никеля. Сер.: Аналитическая химия элементов / Под ред. А.И. Бусева. М.: Наука, 1966. 204 с.
16. Давыдов А.А., Марковин С.А., Попкова А.В., Федоров Е.Н. // Цветные металлы. 2016. № 7. С. 71.
17. <https://ritverc.com/ru/produkcija/promyshlennye-istochniki/istochniki-beta-izlucheniya/63ni>
18. Gamburg Yu.D., Zangari G. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. New York: Springer, 2011. 378 p.
19. Бельский М.А., Иванов А.Ф. Электроосаждение металлических покрытий: Справ. М.: Металлургия, 1985. 288 с.
20. Садаков Г.А. Гальванопластика. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
21. Torabi M., Dolati A. // J. Appl. Electrochem. 2010. Vol. 40. P. 1941.
22. Chassaing E., Jousellin M., Wiart R. // J. Electroanal. Chem. 1983. Vol. 157. P. 75.
23. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О., Заборенко К.Б., Иофа Б.З. Радиоактивные индикаторы в химии. Проведение эксперимента и обработка результатов. М.: Высш. шк., 1977. 280 с.
24. Zhang Li-feng, Ma Jun-ping, Zhang Lei, Zhang Hai-xu, Yan Su-juan, Yao Li-nong, Luo Zhi-fu // J. Isot. 2015. Vol. 28, N 1. P. 25.
25. Broda R., Cassette P., Kossert K. // Metrologia. 2007. Vol. 44. P. 36.
26. Sims, G.H.E., Juhnke, D.G. // Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1967. Vol. 18. P. 727.