

Компактный ускоритель ионов для ионно-лучевых технологий

© С.Ф. Белых,¹ А.Д. Беккерман,² Д.А. Богуславский,³ А.Б. Толстогузов^{4,5,6,¶}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993 Москва, Россия

² Shhulich Faculty of Chemistry, Technion — Israel Institute of Technology,
Haifa 32000 Haifa, Israel

³ IB Labs Inc., 137 West End Ave, Brooklyn, NY
11235 New York, USA

⁴ Centre for Physics and Technological Research, Universidade Nova de Lisboa,
2829-516 Caparica, Portugal

⁵ Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина,
390005 Рязань, Россия

⁶ School of Physics and Technology, Wuhan University,
430072 Wuhan, China

¶ e-mail: a.tolstoguzov@fct.unl.pt

Поступило в Редакцию 9 мая 2020 г.

В окончательной редакции 30 июня 2020 г.

Принято к публикации 30 июня 2020 г.

Предложены пути разработки и конструирования простого в изготовлении и компактного ускорителя положительных ионов металлов с разной кратностью заряда в диапазоне энергий 1–500 keV. Такой ускоритель будет пригоден для проведения исследований и прикладных работ в области передовых ионно-лучевых технологий. Компьютерное моделирование траекторий движения ионных пучков в ускорителе с использованием программного кода SIMION 8.0 подтвердило перспективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: ускорители, многозарядные ионы, имплантация, ионно-лучевые технологии, компьютерное моделирование, переходные и редкоземельные металлы.

DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50282.161-20

Введение

Ионно-лучевые технологии, в том числе метод ионной имплантации (см., например, [1,2] и ссылки в этих публикациях), широко применяются для модификации физико-химических свойств приповерхностных слоев твердых тел. Пучки ионов с энергиями до нескольких MeV, пригодные для реализации этих технологий, получают с помощью ускорителей различных типов [3,4], представляющих собой, как правило, громоздкие, сложные в изготовлении и дорогостоящие приборы, содержащие источники ионов, вакуумные системы и высоковольтные блоки питания для ускорения и фокусировки ионных пучков. Такие приборы потребляют много электрической энергии, должны размещаться в специально подготовленных помещениях, а для их эксплуатации и поддержания в рабочем состоянии требуется многочисленный штат сотрудников. Необходимость использования дорогостоящих ускорителей ограничивает экспериментальные возможности исследователей и технологов. Существует запрос на разработку и создание компактных, простых в изготовлении и эксплуатации, а поэтому относительно недорогих ускорителей, пригодных для проведения исследовательских и прикладных работ в области ионно-лучевых технологий.

В настоящей работе предложен метод построения и обсуждается конструкция компактного ускорителя поло-

жительных ионов различных металлов в диапазоне энергий 1–500 keV. Компьютерное моделирование процессов формирования ионных пучков в ускорителе подтвердило перспективность предлагаемого подхода.

1. Принцип работы ускорителя

Суть предлагаемого подхода состоит в использовании в ускорителе не только однозарядных, но и многозарядных ионов металлов. Пучки таких ионов эффективно генерируются источником [5], ранее созданным для изучения ионно-фотонной эмиссии и реакций окисления на поверхности металлов, бомбардируемых ионами редкоземельных элементов. Уникальные особенности такого источника позволили развить оригинальные методы исследования траекторий ионных пучков в ионно-оптических системах, содержащих электрические и магнитные поля, и на основе этого оптимизировать режимы работы ионно-оптической системы масс-спектрометра вторичных ионов, осуществить прямое обнаружение и провести изучение долгоживущих возбужденных состояний одно- и многозарядных ионов переходных и редкоземельных металлов [6–8].

Принцип действия источника ионов основан на использовании сфокусированного пучка электронов для нагрева и испарения рабочего вещества, размещенного

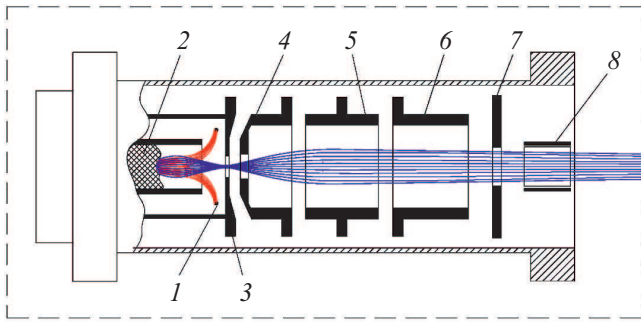


Рис. 1. Схема источника ионов: 1 — катод, 2 — резервуар-анод для загрузки рабочего вещества, 3 — отражающий электрод, 4 — ускоряющий электрод, 5 и 6 — электроды одиночной электростатической линзы, 7 — выходная апертура, 8 — дефлектор. На рисунке также приведены траектории электронного пучка (красные линии в on line версии) и пучка однозарядных ионов (синие линии в on line версии), рассчитанные с использованием программы SIMION 8.0 [12] при следующих значениях потенциалов, приложенных к электродам источника и обеспечивающих оптимальный режим ускорения однозарядных ионов до энергии 25 keV: $U_1 = 23.65$ kV, $U_2 = 25$ kV, $U_3 = 23.60$ kV, $U_4 = 16.3$ kV, $U_5 = 20.5$ kV, U_6 и $U_7 = 0$ V.

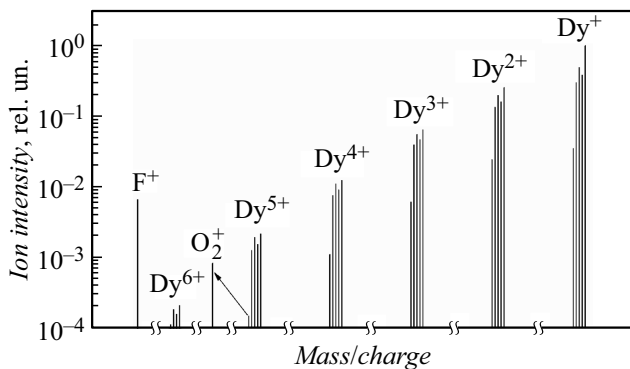


Рис. 2. Диаграмма масс-спектра пучка положительных ионов Dy^{q+} ($q = 1-6$). Для каждого значения кратности заряда q регистрировалось 5 масс-пиков, соответствующих стабильным изотопам диспрозия с массовыми числами 160, 161, 162, 163 и $164m/q$.

в резервуаре-аноде, с последующей ионизацией испаренных атомов (рис. 1). Режим генерации ионов и формирования пучков, а также характеристики этих пучков обсуждаются в [5].

Тестирование источника ионов при заданных параметрах электронного пучка ($E_e = 0.5$ keV, $I_e = 70$ mA) выявило следующие значимые для настоящей работы результаты:

1. Источник способен генерировать положительно заряженные ионы различных металлов M , таких как Al, Sc, Cu, Nb, Gd, Dy, Ho и Yb.
2. Ионные пучки содержат в своем составе как однозарядные, так и многозарядные ионы M^{q+} ($q = 1-6$).

В качестве примера на рис. 2 приведен масс-спектр пучка ионов диспрозия.

3. Энергия однозарядных ионов изменялась в диапазоне 1–25 keV, а для ионов с кратностью заряда $q = 6$ — соответственно в диапазоне 6–150 keV. Изменение энергии ионов достигалось за счет изменения электрического потенциала, прикладываемого к резервуару-аноду источника.

4. Для исследованных металлов ток однозарядных ионов был в диапазоне 1–30 μ A, а ток ионов с кратностью заряда $q = 6$ на три порядка величины меньше.

5. Долговременная стабильность ионного тока на уровне 0.1% обеспечивалась за счет отрицательной обратной связи между электрическими цепями измерения тока ионов и управления током накала катода.

6. Показано, что для переходных и редкоземельных металлов (Sc, Dy, Ho, Gd, Yb) существенная часть однозарядных и многозарядных ионов находится в долгоживущих возбужденных состояниях с временами жизни $\tau > 10^{-5}$ s, и распад таких состояний приводит к интенсивной эмиссии фотонов с линейчатым спектром, расположенным в видимом диапазоне [7].

2. Обоснование предложенного подхода

Анализ процессов ионизации испаренных атомов диспрозия показал, что образование многозарядных ионов за счет последовательных столкновений атомов с ускоренными электронами имеет крайне малую вероятность, поскольку наиболее эффективная ионизация происходит вблизи анода в электрическом поле, локализованном в промежутке „катод–анод“. Однозарядные ионы, образовавшиеся после первого столкновения, ускоряясь, быстро покидают область эффективной ионизации.

Гораздо более вероятен механизм формирования многозарядных ионов при образовании вакансий во внутренних электронных оболочках атомов. В этом случае каскадный процесс многоэтапного распада вакансий (возбужденного состояния иона) путем оже-переходов приводит к эмиссии k -электронов и, следовательно, к образованию многозарядного иона с кратностью заряда $q = k + 1$ [9]. Количество эмитируемых электронов можно оценить исходя из соотношения для баланса энергии

$$E_{Xy} = \sum_2^k A_k + (k - 1)E_e + E^*,$$

где E_{Xy} — энергия образования вакансии во внутренней электронной оболочке атома X_y ($X = K, L, M, N \dots$, $y = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$), A_k — энергия удаления k -го электрона из атома, E_e — средняя кинетическая энергия эмитированных электронов (предполагается, что $E_e \sim 10$ eV), $E^* \sim 4$ eV — энергия возбуждения многозарядного иона (см. п. 6 в перечне, представленном выше).

Таблица 1. Значения энергии образования вакансий $E_{X\gamma}$ в электронных оболочках атома диспрозия [10,11]

Оболочки	$N_1(4s)$	$N_2(4p_{1/2})$	$N_3(4p_{3/2})$	$N_4(4d_{3/2})$	$N_5(4d_{5/2})$	$M_4(3d_{3/2})$	$M_5(3d_{5/2})$
$E_{X\gamma}, \text{eV}$	414.2	333.5	293.2	153.6	153.6	1333	1292

Таблица 2. Значения энергий A_k удаления k -го электрона из атома ($k = 1-12$) [10,11]

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A_k, eV	5.73	11.24	22.1	39.8	59.9	89.7	106	123	147	164	185	210

В табл. 1 и 2 приведены значения энергий образования вакансий $E_{X\gamma}$ в электронных оболочках атома диспрозия $N_1(4s)$, $N_2(4p_{1/2})$, $N_3(4p_{3/2})$, $N_4(4d_{3/2})$, $N_5(4d_{5/2})$, $M_4(3d_{3/2})$ и $M_5(3d_{5/2})$ и энергий A_k ($k = 1-12$) [10,11]. Согласно этим данным, электроны с энергией $E_e = 500 \text{ eV}$ способны генерировать вакансии в оболочках $N_1(4s)$, $N_2(4p_{1/2})$, $N_3(4p_{3/2})$, $N_4(4d_{3/2})$ и $N_5(4d_{5/2})$. Как правило, максимум сечения образования вакансии наблюдается при энергиях электронов $E^* \sim (2-3) \cdot E_{X\gamma}$. Такому условию удовлетворяют оболочки $N_4(4d_{3/2})$, $N_5(4d_{5/2})$ и в гораздо меньшей степени оболочки $N_3(4p_{3/2})$, $N_2(4p_{1/2})$ и $N_1(4s)$.

Оценки, сделанные с использованием приведенной выше формулы и данных из таблиц, показали, что распад вакансий в оболочках $N_4(4d_{3/2})$ и $N_5(4d_{5/2})$ вызывает эмиссию 3-х электронов ($q = 4$), в оболочках $N_3(4p_{3/2})$ и $N_2(4p_{1/2})$ — эмиссию 5 электронов ($q = 6$), а в оболочке $N_1(4s)$ — эмиссию 6 электронов ($q = 7$). При $E_e \ll E^*$ сечение образования вакансии в оболочке $N_1(4s)$ существенно меньше своего максимального значения, и распад такой вакансии дает пренебрежимо малый вклад в эмиссию многозарядных ионов. Действительно, в этих условиях специально предпринятая попытка обнаружения ионов с кратностью заряда $q > 6$ не увенчалась успехом, хотя система измерения ионного тока позволяла регистрировать ток на два порядка величины меньший, чем ток ионов с кратностью заряда $q = 6$. Таким образом, анализ процесса ионизации испаренных атомов диспрозия при использованных параметрах электронного пучка показал, что источник способен генерировать ионы с максимальной кратностью заряда $q = 6$, что согласуется с результатами, приведенными на рис. 2. Вместе с тем режим генерации ионов с кратностью заряда $q = 6$ не является оптимальным.

Величину тока и кратность заряда q ионов можно повысить, увеличив энергию электронов. Например, столкновения электронов с энергией $E_e = 2 \text{ keV}$ с атомами диспрозия способствуют образованию вакансий в более глубоких оболочках $M_4(3d_{3/2})$ и $M_5(3d_{5/2})$. Оценка, аналогичная предыдущей, показала, что распад вакансий в этих оболочках приводит к эмиссии десяти электронов и, следовательно, к генерации ионов с кратностью заряда $q = 11$. Увеличение энергии электронов желательнее производить при постоянной мощности электронного пучка,

обеспечивающей оптимальную концентрацию испаренных атомов в области ионизации. При этом уменьшение электронного тока (примерно в 4 раза) не приведет к существенному спаду интенсивности выхода ионов с кратностью заряда $q = 10$, поскольку в этих условиях сечения образования вакансий в оболочках $M_4(3d_{3/2})$ и $M_5(3d_{5/2})$ близки к своим максимальным значениям. Таким образом, источник способен генерировать пучки положительных ионов металлов с кратностью заряда в диапазоне $q = 1-10$ и с величиной ионного тока, пригодной для решения прикладных задач.

Приведенные результаты и выводы, следующие из анализа процессов ионизации испаренных атомов, демонстрируют перспективность использования источника многозарядных ионов металлов для создания простого в изготовлении и компактного ускорителя, способного генерировать ионные пучки в широком диапазоне энергий 1–250 keV. Принципиально важно, что для ионов с кратностью заряда $q = 10$ их кинетическую энергию можно увеличить до значения 500 keV, если, помимо положительного потенциала 25 kV, приложенного к аноду источника, добавить к облучаемому образцу-мишени отрицательный потенциал 25 kV. Компактность ускорителя достигается за счет использования источника, генерирующего ионы с кратностью заряда $q = 1-10$, и применения стандартных высоковольтных блоков питания (1–25 kV) для создания электрического поля, ускоряющего ионы и формирующего ионные пучки.

3. Компьютерное моделирование конструкции ускорителя ионов

На рис. 3 схематически показана конструкция ускорителя, состоящего из источника многозарядных ионов [5], секторного магнитного масс-сепаратора, вакуумной и технологической камер. Вакуумная камера содержит ионно-оптическую систему для формирования, фокусировки и сканирования ионного пучка, смотровое окно для регистрации оптического излучения, испускаемого возбужденными ионами (см. п. 6 в перечне, представленном в разд. 1) и откачную систему. Технологическая камера содержит откачную систему, электрически изолированный держатель образца, к которому можно

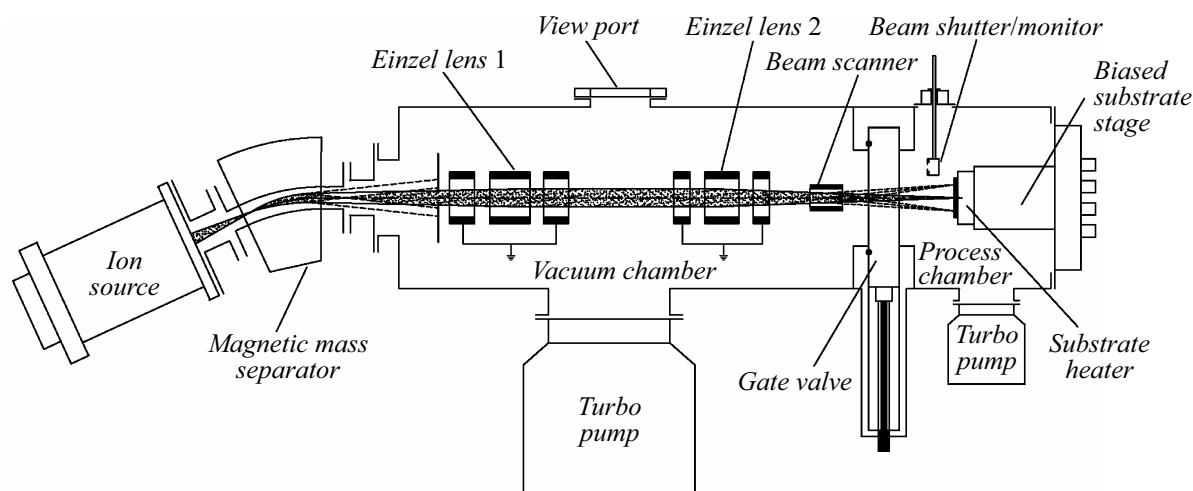


Рис. 3. Схематическое изображение ускорителя ионов.

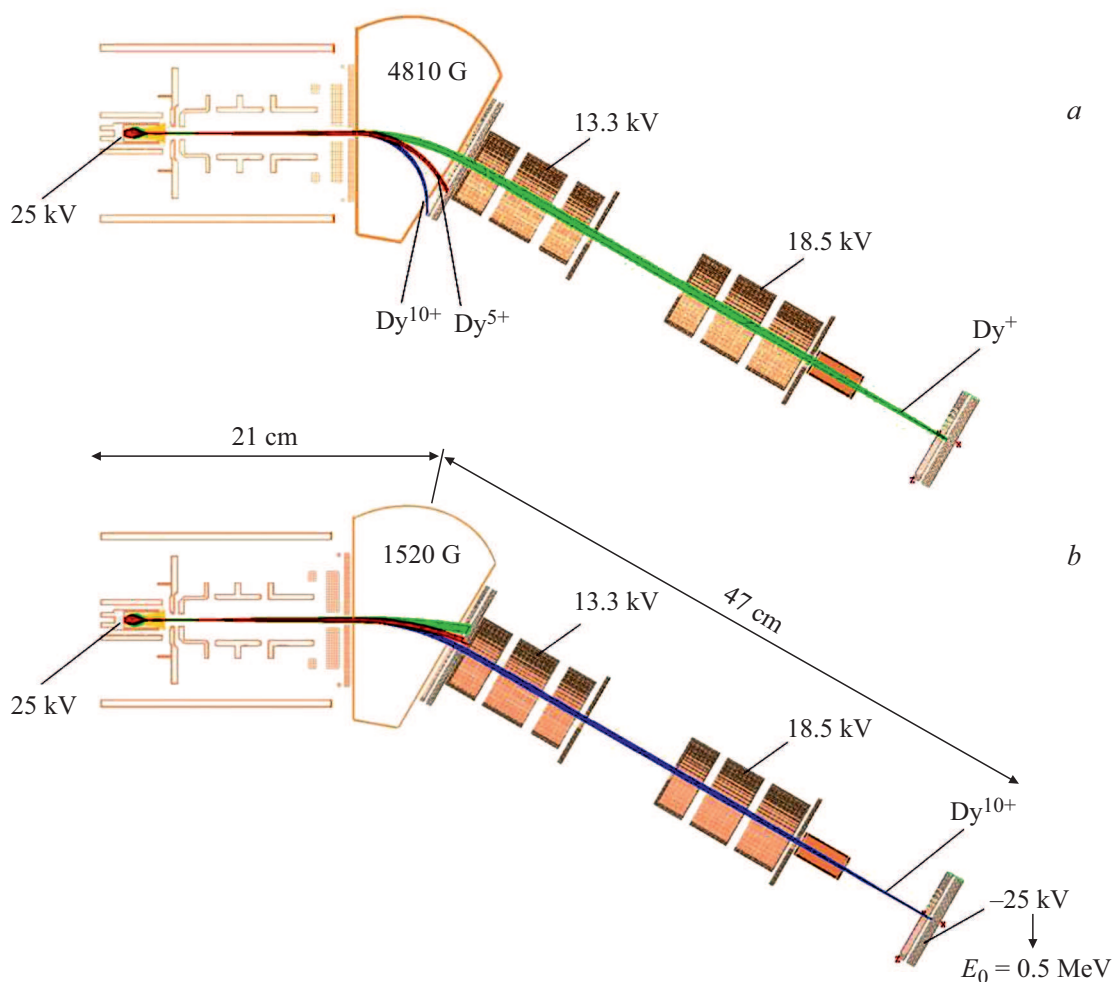


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования траекторий ионных пучков диспрозия в ускорителе: *a* — однозарядные ионы ($q = 1$), *b* — ионы с кратностью заряда $q = 10$. Расчеты выполнены с использованием программы SIMION 8.0 [12].

прикладывать потенциал до 25 kV, термоэлектронный эмиттер для нагрева образца электронной бомбардировкой, выдвижной экран для прерывания ионного пучка

с установленным на нем цилиндром Фарадея для измерения ионного тока и определения корреляции между интенсивностью оптического излучения возбужденных

ионов и величиной ионного тока. Такая конструкция позволяет в онлайн режиме проводить бесконтактный контроль величины ионного тока на образце-мишени. Вакуумная и технологическая камеры разделены вакуумным затвором, обеспечивающим быструю смену образца без разгерметизации вакуумной камеры.

Конструкция ускорителя базировалась на результатах взаимосогласованного компьютерного моделирования траекторий электронных и ионных пучков. Расчеты были выполнены с использованием программного кода SIMION 8.0 [12]. На рис. 1 приведены расчетные траектории электронного и ионного пучков в источнике, а на рис. 4 траектории пучков ионов с разной кратностью заряда в ускорителе. Там же указаны электрические потенциалы, приложенные к электродам ионно-оптической системы, значения магнитного поля в масс-сепараторе, а также характерные размеры ускорителя.

Из рис. 4 видно, что полная длина ионных траекторий от анода источника до образца-мишени не превышает 70 см, и, следовательно, ускоритель, включая все элементы конструкции, можно разместить на площади $100 \times 60 \text{ см}^2$. Результаты моделирования показывают, что простая ионно-оптическая система ускорителя обеспечивает формирование и управление пучком ионов с различной кратностью заряда. Изменение кратности заряда ионов в пучке (сепарация по отношению m/q , где m — масса иона, а q — его заряд) достигается путем изменения напряженности магнитного поля масс-сепаратора при постоянных значениях всех потенциалов, приложенных к электродам ионно-оптической системы, что обеспечивает стабильность ионных траекторий.

Заключение

В работе предложен подход к разработке и конструированию простого в изготовлении и компактного ускорителя положительных ионов различных металлов с широким диапазоном энергий 1–500 keV, пригодного для проведения исследовательских и прикладных работ в области ионно-лучевых технологий. Предлагаемый подход основан на использовании оригинального источника, генерирующего многорядные ионы с кратностью заряда $q = 1–10$, которые ускоряются до высокой энергии в электрическом поле с относительно невысокими значениями ускоряющих потенциалов.

Финансирование работы

Работа подготовлена при частичной финансовой поддержке в рамках гранта Российского научного фонда № 19-05-00554 (А.Б. Толстогузов). В будущем предполагается использование предложенного компактного ускорителя ионов для геохимических исследований образцов магматических пород и минералов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Rimini. *Ion Implantation: Basics to Device Fabrication* (Kluwer Academic Publ., Boston, 1995).
- [2] Ф.Ф. Комаров, А.П. Новиков, А.Ф. Буренков. *Ионная имплантация* (Университетское, Минск, 1994).
- [3] S. Bernal. *A Practical Introduction to Beam Physics and Particle Accelerators* (Morgan & Claypool Publ., Bristol, 2016).
- [4] А.П. Черняев. *Ускорители в современном мире* (Изд. МГУ, М., 2012).
- [5] R.N. Evtukhov, S.F. Belykh, I.V. Redina. *Rev. Sci. Instrum.*, **63** (4), 2463 (1992).
- [6] S.F. Belykh, R.N. Evtukhov, I.V. Redina, V.Kh. Ferleger. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **95** (3), 300 (1995).
- [7] С.Ф. Белых, Р.Н. Евтухов, Л.В. Луткова, Ю.Н. Лысенко, У.Х. Расулев, И.В. Редина. *ЖТФ*, **62** (6), 179 (1992).
- [8] С.Ф. Белых, А.Б. Толстогузов, А.Д. Беккерман, Т.В. Богданова. *Письма в ЖЭТФ*, **109** (8), 511 (2019). [S.F. Belykh, A.B. Tolstoguzov, A.D. Bekkerman, T.V. Bogdanova. *JETP Lett.*, **109** (8), 502 (2019).]
- [9] А.Г. Кочур. *Соросовский образовательный журнал*, **6** (12), 94 (2000).
- [10] J.A. Bearden, A.F. Burr. *Rev. Mod. Phys.*, **39** (1), 125 (1967).
- [11] M. Cardona, L. Ley (Eds.) *Photoemission in Solids I: General Principles* (Springer-Verlag, Berlin, 1978).
- [12] D.A. Dahl. *Simion 3D V. 8.0. User Manual*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, USA (2000) <https://simion.com/>