

PACS: 25.40.Lw; 82.80.Ej

CROSS-SECTION OF 90.6 keV γ -RAY GENERATION FOR THE $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ REACTION OVER THE PROTON ENERGY RANGE 0.95-2.8 MeV

V.N. Bondarenko, A.V. Goncharov, V.I. Sukhostavets, S.N. Utenkov

National Scientific Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

1, Akademicheskaya st., Kharkov 61108, Ukraine

E-mail: goncharov@kipt.kharkov.ua

Received November 18, 2014

The differential cross-section of $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ reaction was measured with 90.6 keV γ -rays (the transition from the first excited state of ^{49}V to the ground state) and 90° detection angle. An isotope titanium target of 97.8% ^{48}Ti content and thickness $3.6 \cdot 10^{18}$ at.Ti/cm² was used. Such a thickness value provided averaging of the cross-section over several contiguous resonances, improving the accuracy of cross-section measurements. There is general agreement of maxima and minima in the measured excitation function with analogous reference data for the excitation function measurements in relative units. It was shown that for proton energies up to 2.8 MeV the main channel of the $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ reaction is 90.6 keV γ -ray emission, and this channel can offer the greatest sensitivity for titanium analysis by the PIGE technique.

KEY WORDS: protons, nuclear reactions, target ^{48}Ti , differential cross-section, PIGE.

ПЕРЕРІЗ ГЕНЕРАЦІЇ γ -КВАНТІВ З ЕНЕРГІЄЮ 90,6 кЕВ З РЕАКЦІЇ $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ В ОБЛАСТІ ЕНЕРГІЙ ПРОТОНІВ 0,95-2,8 МЕВ

В.М. Бондаренко, О.В. Гончаров, В.І. Сухостаєць, С.М. Утенков

Національний Науковий Центр "Харківський фізико-технічний інститут"

вул. Академічна 1, м. Харків 61108, Україна

Диференційний переріз реакції $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ був вимірний для γ -променів з енергією 90,6 кЕВ (перехід з першого збудженого стану ^{49}V в основний стан) при куті реєстрації 90° . У вимірюваннях використовувалась ізотопна титанова мішень (вміст ^{48}Ti 97,8%; товщина $3,6 \cdot 10^{18}$ ат.Ті/см²). Мішень такої товщини забезпечувала осереднення перерізу по кільком суміжним резонансам реакції, що підвищувало точність вимірювання перерізу. Положення максимумів та мінімумів у вимірній функції збудження у цілому узгоджуються з наявними в літературі даними вимірювань функції збудження у відносних одиницях. Показано, що в області енергій протонів до 2,8 Мев випромінювання з енергією 90,6 кЕВ є основним каналом реакції $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$, що повинно забезпечувати максимальну чутливість для аналізу титану по методиці PIGE.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: протони, ядерні реакції, мішень ^{48}Ti , диференціальний поперечний переріз.

СЕЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ γ -КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ 90,6 кЭВ ИЗ РЕАКЦИИ $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ПРОТОНОВ 0,95-2,8 МЭВ

В.Н. Бондаренко, А.В. Гончаров, В.И. Сухостаец, С.Н. Утенков

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая 1, г. Харьков 61108, Украина

Дифференциальное сечение реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ измерено для γ -излучения с энергией 90,6 кЭВ (переход из первого возбужденного состояния ^{49}V в основное состояние) при угле регистрации 90° . В измерениях использовалась изотопная титановая мишень (содержание ^{48}Ti 97,8%; толщина $3,6 \cdot 10^{18}$ ат.Ті/см²). Мишень такой толщины обеспечивала усреднение сечения по нескольким смежным резонансам реакции, что повышало точность измерения сечения. Положения максимумов и минимумов в измеренной функции возбуждения в целом согласуются с имеющимися в литературе данными измерений функции возбуждения в относительных единицах. Показано, что в области энергий протонов до 2,8 МэВ излучение γ -квантов с энергией 90,6 кЭВ является основным каналом реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$, что должно обеспечивать максимальную чувствительность для анализа титана по методике PIGE.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: протоны, ядерные реакции, мишень ^{48}Ti , дифференциальное сечение.

Протонные пучки широко применяются для элементного анализа материалов [1-2]. В основном используются две методики. Одна из них основана на регистрации характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), возникающего при ионизации протонами внутренних оболочек атомов анализируемых элементов (методика PIXE: proton induced X-ray emission). Другая основана на регистрации γ -излучения из ядерных реакций, инициируемых протонами на ядрах атомов анализируемых элементов (методика PIGE: proton induced γ -ray emission). Несмотря на то, что при элементном анализе выходы γ -излучения существенно меньше, чем выходы ХРИ, методика PIGE имеет преимущество в исследовании распределений анализируемых примесей по глубине образцов. В этом случае используются известные резонансы ядерных реакций. Кроме того, из-за большей проникающей способности γ -лучей методика PIGE обладает большей глубиной анализа, что особенно важно при анализе металлических сплавов, поскольку элементный состав на малой глубине, т.е. в приповерхностном слое образца, может заметно отличаться от состава в объеме образца.

В последние годы в результате совершенствования характеристик детекторов из сверхчистого германия (HPGe-детектора) появилась возможность одновременного измерения энергетических спектров ХРИ и

низкоэнергетического γ -излучения с высокой эффективностью регистрации и тем самым расширились возможности анализа на пучках ускоренных ионов.

Параллельно происходит и развитие методик анализа на пучках. Так группа исследователей из Лиссабона развила вариант методики PIGE без использования стандартов [3]. Вариант основан на использовании известных энергетических зависимостей дифференциальных сечений PIGE для γ -квантов определенной энергии. Для вычисления выхода PIGE от анализируемого толстого образца производится интегрирование этих функций возбуждения с учетом торможения протонов в веществе образца. Такой подход облегчает деятельность по планированию эксперимента по анализу и выбору для него оптимальных условий.

Это направление требует создания банка данных по соответствующим энергетическим зависимостям сечений PIGE для анализа по различным элементам и поддерживается и координируется МАГАТЭ [4].

Для анализа титана в исследуемых образцах наиболее перспективным является использование реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$. Q реакции составляет +6,76 МэВ.

Измерение функции возбуждения этой реакции с целью определения структуры уровней ядра ^{49}V проводилось многими авторами [5-11]. Наиболее детальным было исследование, выполненное Дином и Камероном [11]. По их данным в диапазоне энергий протонов 1,0-2,5 МэВ наблюдается около 150 резонансов этой реакции. К сожалению данные этих работ нельзя использовать в PIGE-анализе, поскольку в большинстве их измерялись интегральные выходы γ -излучения в относительных единицах, а в работе Кеннета и др. [10] измерялось не дифференциальное сечение реакции для конкретного угла регистрации и конкретной γ -линии, а полное сечение.

Среди множества γ -линий в спектре излучения из реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ одной из самых интенсивных является линия 90,6 кэВ, соответствующая M1-переходу из первого возбужденного состояния ^{49}V в основное состояние. По данным Демортье [12] выход по этой линии составляет около 40 % от общего выхода PIGE на титане при энергии протонов 1,5 МэВ. Такая высокая относительная интенсивность объясняется тем, что переходы из большого количества высоковозбужденных состояний ^{49}V в основное состояние, так или иначе, совершаются через первое возбужденное состояние.

Целью настоящей работы было измерение дифференциального сечения генерации PIGE с энергией 90,6 кэВ из реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ в области энергий протонов 0,95 – 2,8 МэВ для угла регистрации $\theta=90$ градусов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения проводились на протонном пучке ускорителя ЭСУ-5 ННЦ ХФТИ [13]. Сколламированный пучок диаметром 2 мм падал на мишень. Средний ток пучка во время измерений составлял 0,2 мкА.

Геометрия измерений представлена на рис. 1. Регистрируемое γ -излучение из ядерной реакции на материале мишени попадало в детектор через бериллиевое окно толщиной 100 мкм в стенке камеры. Поскольку в такой геометрии данное излучение не проходит через материал подложки, то при обработке результатов измерений следует учитывать поглощение излучения только в материале мишени. Для используемой нами мишени (см. ниже) влияние этого поглощения на излучение с энергией 90 кэВ было пренебрежимо мало.

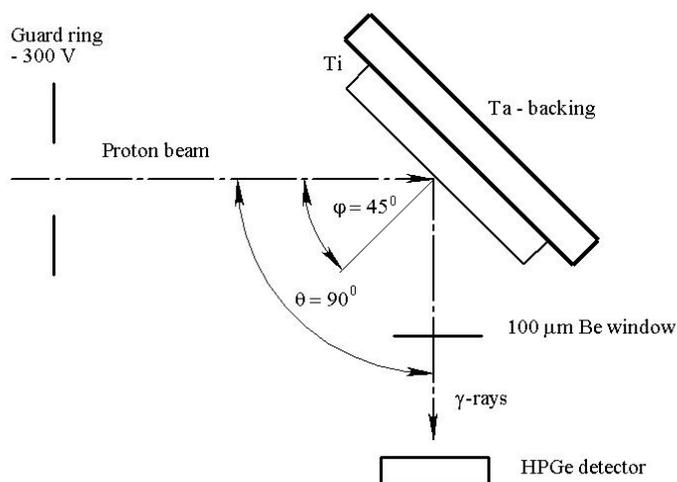


Рис.1. Схема проведения измерений.

Узел мишени был электрически соединен с камерой мишени, которая, в свою очередь, через интегратор тока [14] была соединена с землей. На охранное кольцо, расположенное перед узлом мишени, подавался отрицательный потенциал 300 В для подавления вторичных электронов, выбитых из мишени протонами пучка.

Энергетическая калибровка ускорителя проводилась с использованием известных резонансов 991,9 и 1683,6 кэВ реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$.

В измерениях использовалась изотопная мишень из титана, осажденного на подложку из тантала (толщина подложки 0,3 мм). Относительное содержание изотопа ^{48}Ti в веществе мишени составляло $f=0,978$.

Содержание остальных изотопов титана составило соответственно: ^{46}Ti (0,002), ^{47}Ti (0,01), ^{49}Ti (0,007), ^{50}Ti (0,003). Толщина мишени ($3,6 \cdot 10^{18}$ ат. Ti/cm²) была измерена с помощью резерфордского обратного рассеяния на пучке ионов гелия с энергией 1,6 МэВ. При этом были использованы данные работы [15] по тормозной способности ионов гелия в титане. Сброс энергии протонов в такой мишени и в такой геометрии составлял около 60 кэВ при энергии протонов 1 МэВ и около 30 кэВ при энергии 2,8 МэВ. Оценки среднего расстояния

между резонансами реакции в зависимости от энергии протонов можно получить, исходя из детальной функции возбуждения, приведенной в работе [11]. В соответствии с этими данными среднее количество резонансов в пределах сброса энергии протонов составило около трех при энергии 1 МэВ и около пяти – при энергии 2,8 МэВ. Таким образом, используемая величина толщины мишени позволяла проводить усреднение измеряемого сечения по нескольким смежным резонансам реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$, что повышало точность абсолютных измерений сечения.

Регистрация γ -излучения проводилась с помощью HPGe-детектора со следующими характеристиками: энергетическое разрешение по линии γ -квантов с энергией 59,6 кэВ составляет 350 эВ; толщина входного бериллиевого окна – 100 мкм; площадь и толщина чувствительной области, соответственно, 20 мм² и 6 мм. Последнее значение обеспечивало эффективную регистрацию γ -квантов с энергией до 200 кэВ, т.е. в нашей рабочей области измерений, но позволяло существенно снизить уровень загрузки детектора в высокоэнергетической области спектра. Во время измерений детектор был расположен на расстоянии 20 мм от мишени.

Для определения энергетической зависимости эффективности $\epsilon(E_\gamma)$ детектора в используемой геометрии применялись источники ОСГИ ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{241}Am . Полученное значение эффективности для энергии 90,6 кэВ составило 0,000246.

В разных точках функции возбуждения γ -спектры измерялись при разных экспозициях в диапазоне 50 – 300 мкК в зависимости от интенсивности излучения по линии 90,6 кэВ.

Типичный спектр представлен на рис. 2. В спектре наблюдаются линии 62,3, 90,6 и 152,9 кэВ, соответствующие переходам между нижними уровнями ядра ^{49}V , а также линии, характеризующие взаимодействие пучка с танталовой подложкой (линии ХРИ и γ -линия, обусловленная реакцией на ^{181}Ta).

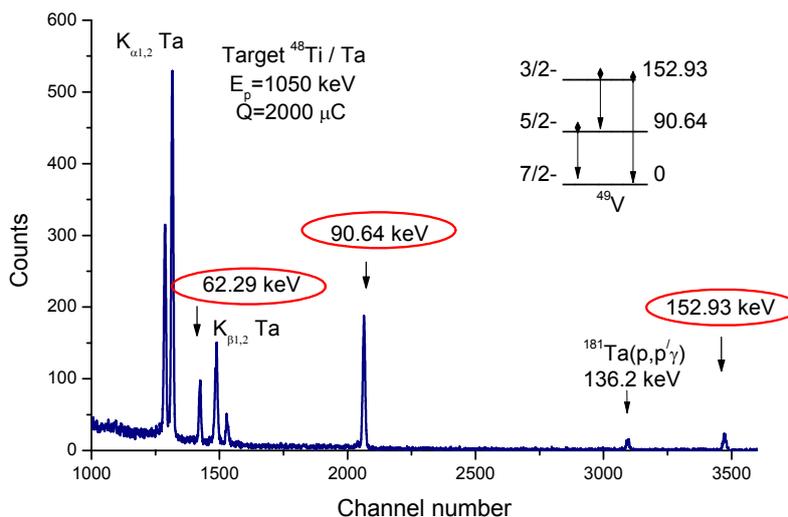


Рис. 2. Участок γ -спектра, измеренного при энергии протонов 1050 кэВ, и схема нижних уровней ^{49}V [16]. В низкоэнергетической части данного участка наблюдаются ряд К-линий ХРИ, обусловленного взаимодействием пучка с материалом танталовой подложки мишени.

Интенсивность линии 136,2 кэВ существенно возросла при энергиях протонов свыше 2 МэВ, в результате чего приходилось снижать величину тока пучка.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Усредненное по толщине t (ат.Тi/см²) дифференциальное сечение $d\sigma_\gamma(E_p, \theta)/d\Omega$ (см²/ср) генерации γ -квантов с энергией E_γ из реакции (p,γ) в лабораторной системе координат для угла регистрации θ определялось из общего выражения

$$N_\gamma(E_p, \theta) = kN_p \frac{d\sigma_\gamma(E_p, \theta)}{d\Omega} \Omega_{eff} \frac{ft}{\cos \varphi}, \quad (1)$$

где N_γ – количество зарегистрированных γ -квантов с энергией E_γ (площадь соответствующего пика над фоном в γ -спектре); N_p – количество протонов, упавших на мишень во время набора спектра; k – отношение живого времени к времени экспозиции; $\Omega_{eff} = \Omega_{eff}(E_\gamma)$ – эффективный телесный угол системы детектирования; f – относительное содержание изотопа, реакция на котором исследуется. Остальные обозначения были описаны выше.

Как обычно, величина N_p определялась из соотношения $N_p = Q/e$, где Q – интегральный электрический заряд, собранный на мишени во время экспозиции под протонным пучком, e – элементарный электрический заряд, а эффективный телесный угол определялся из соотношения $\varepsilon(E_\gamma) = \Omega_{eff} / 4\pi$.

Погрешность величины k в выражении (1) оценивалась из измерений при разных загрузках спектрометра и не превышает 3%. Погрешности измерения остальных параметров составили: 1% (интегральный заряд Q); 7% (эффективность $\varepsilon(E_\gamma)$ регистрации спектрометра); 2% (определение $\cos\theta$); 5% (толщина мишени). Последняя величина определялась в основном погрешностью данных по тормозной способности ионов He, использовавшихся в RBS методике определения толщины [15]. Статистическая погрешность определения площади N_γ пика в γ -спектре изменялась от 5% в максимумах измеренной функции возбуждения до 15% в минимумах. В результате средняя погрешность измерения сечений PIGE составила 15%.

Что касается возможного вклада реакции $^{49}\text{Ti}(p,\eta)^{49}\text{V}$ на изотопе ^{49}Ti , содержание которого в нашей мишени составляет 0,7%, в общий измеряемый выход по линии 90,6 кэВ, то при энергии 2,8 МэВ его относительная величина находится на уровне $<10^{-3}$. Эта оценка сделана на основе данных работ [10,17] по полным сечениям данных реакций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены измеренная нами функция возбуждения, а также менее детальная функция возбуждения, измеренная в работе [10] для полного сечения реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$. Мы не приводим здесь данные других авторов, полученные в относительных единицах. С ними можно ознакомиться в оригинальных работах [5-11].

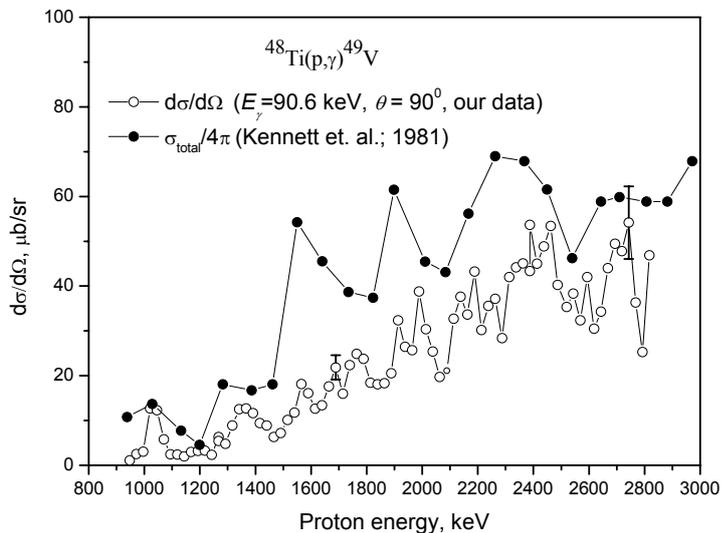


Рис. 3. Функция возбуждения реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$

измеренной в работе [11].

Из сопоставления наших данных с данными работы [10] по измерению полного сечения реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ следует, что выход реакции по линии 90,6 кэВ составляет от 30 до 80% общего выхода в зависимости от энергии протонов. Это согласуется и с данными Демортье [12].

Отметим, что для анализа титана с помощью методики PIGE могут быть использованы также дифференциальные сечения генерации γ -квантов с энергией 889 кэВ из реакции $^{46}\text{Ti}(p,p'\gamma)^{46}\text{Ti}$ и γ -квантов с энергией 983 кэВ из реакции $^{48}\text{Ti}(p,p'\gamma)^{48}\text{Ti}$, измеренные в работе [18] для угла регистрации $\theta=56^\circ$. В обоих случаях эти γ -кванты соответствуют E2-переходам из первого возбужденного состояния в основное состояние. Однако величины этих сечений существенно меньше сечения генерации γ -квантов с энергией 90,6 кэВ из реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$, измеренного в настоящей работе. Так, например, при энергии протонов 1,75 МэВ это различие достигает порядка.

ВЫВОДЫ

Измеренная энергетическая зависимость абсолютного сечения генерации γ -квантов с энергией 90,6 кэВ в реакции $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ согласуется с данными других авторов [10-12].

Выход излучения по данному каналу реакции составляет основную долю всего выхода реакции.

Для PIGE анализа примесей титана данная функция возбуждения может быть использована в области энергий протонов до 1,5 МэВ, поскольку при более высоких энергиях будет сказываться дополнительный выход по линии 90,6 кэВ, обусловленный реакцией $^{49}\text{Ti}(p,\eta)^{49}\text{V}$.

В измеренной функции возбуждения, несмотря на слияние большинства узких резонансов, обусловленное конечной толщиной использовавшейся нами мишени, проявляются ряд наблюдавшихся ранее резонансов [9,11]: дублет резонансов 1007+1013 кэВ, а также резонансы 1362 кэВ, 1564 кэВ, 1923 кэВ, 2199 кэВ.

Функция возбуждения, измеренная в относительных единицах в работе [11] на тонкой мишени до энергии протонов 2,5 МэВ была не сплошной, а содержала несколько пропущенных участков энергии. Обнаруженные в настоящей работе резонансы с энергиями ~ 1770 кэВ и ~ 2000 кэВ как раз и соответствуют таким участкам, а резонанс ~ 2740 кэВ находится в области за пределами функции возбуждения,

Авторы выражают признательность В.М. Мищенко и Е.А. Скакуну за полезные замечания, а также персоналу ускорителя ЭСУ-5 за содействие в проведении измерений.

Данная работа была выполнена при частичной поддержке МАГАТЭ (проект CRP No. 16698).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johansson S., Campbell J., Malmqvist K. (Eds.). Particle-induced X-Ray Spectrometry (PIXE). - New York: Wiley/Interscience, 1995.
2. Tesmer J.R., Nastasi M. (Eds.) Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis. MRS-Materials research Society. - Pittsburgh, PA, 1995.
3. Fonseca M., Jesus A.P., Luis H., Mateus R., Cruz J., Gasques L., Galavitz D., Ribeiro J.P. PIGE analysis of magnesium and beryllium // Nucl. Instrum. and Methods. - 2010. - Vol.B268. - P.1806-1808.
4. Ion Beam Analysis Nuclear Data Library.-<https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>.
5. Dubois J. Virtual levels in the Vanadium isotopes from bombardment of the Titanium isotope // Nucl.Phys. - 1961. - Vol.23.- P.537-559.
6. Klapdor H.V. Analogzustande in ^{49}V aus der reaction $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ (II) // Nucl.Phys. - 1969. - Vol.A134. - P.419-432.
7. Legg J.C. Megli D.G., Abraham D.R., Ellsworth L.D., Hechtl S. Gamma Decay of Analog Resonances in the $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ Reaction // Phys.Rev. - 1969.-Vol.186. - P.1138-1143.
8. Maripuu S. Analogue resonances in ^{49}V and ^{51}V // Nucl.Phys. - 1970. - Vol.A153. - P.183-192.
9. Kiuru A. Study of excited states in ^{49}V with the $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ Reaction // Z.Phys. - 1972. - Vol.251. - P.93-104.
10. Kennett S.R., Mitchell L.W., Andersen M.R., Sargood D.G. Cross-section measurements and thermonuclear reaction rates for $^{46}\text{Ti}(p,\gamma)^{47}\text{V}$, $^{47}\text{Ti}(p,\gamma)^{48}\text{V}$ and $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ // Nucl.Phys.-1981.-Vol.A368.-P.337-351.
11. Din G.U. and Cameron J.A. Reaction $^{48}\text{Ti}(p,\gamma)^{49}\text{V}$ from 1.75 to 2.5 MeV // Phys.Rev. - 1992. - Vol.C45. - P.2147-2160.
12. Demortier G. Prompt gamma-ray yields from proton bombardment of transition elements (Ti to Zn) // J. Radioanalit. Chemistry. - 1978. - Vol.45. - P.459-496.
13. Antuf'ev Ju.P., Beljaev V.H., Vergunov A.D., Ivashhenko V.A., Inopin E.V., Levchenko Ju.Z., Mishhenko V.M., Pistrjak V.M., Popov A.I., Storizhko V.E., Cygikalo A.A., Chekanov S.Ja. Kompleks elektrostatičeskikh uskoritelej dlja modelirovanija i diagnostiki radiacionnyh povrezhdenij // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Obshhaja i yadernaya fizika.-Har'kov: NNC HFTI. - 1983. - Vyp.3(24). - S.9-12.
14. Mishhenko V.M., Popov A.I., Storizhko V.E. Universal'nyj integrator toka. - Har'kov: Izdatel'stvo HFTI, 1971.-preprint HFTI-71-7. - 5s.
15. Ziegler J.F., Biersack J.B., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. - New York: Pergamon Press, 1985. - 321 p.
16. Burrows T.W. Nuclear Data Sheets for A=49 // Nuclear Data Sheets. - 2008. - Vol.109. - No.8. - P.1879-2032.
17. Kennett S.R., Andersen M.R., Switkowski Z.E., Sargood D.G. Cross-section measurements and thermonuclear reaction rates for $^{49}\text{Ti}(p,\gamma)^{50}\text{V}$ and $^{49}\text{Ti}(p,n\gamma)^{49}\text{V}$ // Nucl. Phys. - 1980. - Vol.A344. - P.351-360.
18. Krivososov G.A., Nemashkalo B.A., Storizhko V.E., Kljucharev A.P., Ehichev O.I., Chirt V.K. Neuprugoe rasseyanie protonov yadrami srednego atomnogo vesa pri nizkih energiayah // Yadernaya fizika. - 1976. - T.24. - Vyp.3. - S.461-470.