

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СОБЫТИЙ В ДВУХФАЗНЫХ
АРГОНОВЫХ КАМЕРАХ

© 2013 г. Б. М. Овчинников, В. В. Парусов

Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

E-mail: ovchin@inr.ru

Поступила в редакцию 09.07.2012 г.

После доработки 11.02.2013 г.

Для детектирования событий в газовой фазе двухфазной аргоновой камеры предлагается использовать проволочные многоканальные газовые электронные умножители в сочетании с анодами-остриями. Для устранения обратных связей по фотонам, эмитируемым возбужденными молекулами аргона в процессах развития лавин при детектировании событий в газе — аргоне, в него добавляли водород в количестве 10% объемных. При использовании проволочных многоканальных газовых электронных умножителей с зазором 1 мм при детектировании α -частиц в среде Ar + 10% H₂ (1 ата) получен максимальный коэффициент размножения электронов, равный ~300. При использовании для детектирования α -частиц анода-острия максимальный коэффициент размножения составил $\sim 2.5 \cdot 10^5$ и при детектировании β -частиц (⁶³Ni) — $3 \cdot 10^6$. Расчетами и экспериментально показано, что добавление в жидкий аргон 100 млн⁻¹ H₂ не влияет на синглетную компоненту сцинтилляционного сигнала жидкого аргона и несущественно (на 20%) уменьшает эффективность эмиссии по сравнению с чистым Ar.

DOI: 10.7868/S0032816213050078

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] дан краткий обзор двухфазных аргоновых камер, создаваемых для поиска массивных слабо взаимодействующих частиц темной материи Вселенной, и впервые предложено использовать для этой цели камеру с массой аргона до 1000 т с полным подавлением фона ³⁹Ar.

Для детектирования сцинтилляционного излучения от событий в жидком аргоне предложено растворять в жидком аргоне фоточувствительную добавку тетраметилгермания (0.15 млн⁻¹). В результате каждое событие в объеме камеры будет представлять из себя практически точечный ионизационный бамп, окруженный облаком фотоэлектронов со средним диаметром около 10 см. Дрейфовым электрическим полем напряженностью ~1 кВ/см электроны бампа и фотоэлектроны транспортируются из жидкого Ar в газовую фазу, находящуюся под давлением ~1 ата, где детектируется пространственная структура каждого события с высоким коэффициентом размножения электронов.

Для эффективного подавления фона ³⁹Ar в работе [1] предложено сравнивать для каждого события отношение ионизационного сигнала к синглетной компоненте сцинтилляционного сигнала. В связи с этим в настоящей работе детектировалась только синглетная составляющая сцинтилляционного сигнала жидкого аргона.

Хорошо известно, что в чистом Ar не удастся получить коэффициент размножения электронов больше ~10 [2]. Для получения более высокого коэффициента размножения необходимо добавлять в газообразный аргон молекулярную гасящую добавку. Известно, что хорошей гасящей добавкой к аргону является метан. Однако в случае двухфазной Ar-камеры с детектированием сцинтилляционного излучения использование метана недопустимо, поскольку метан хорошо растворяется в жидком Ar и гасит сцинтилляционные сигналы жидкого аргона.

В данной работе в качестве гасящей добавки в газовой фазе использовался водород, слабо растворяющийся в жидком Ar. При содержании в газовой фазе 10% водорода, в жидком аргоне будет растворено только 100 млн⁻¹ H₂. Вероятность гасящих столкновений



в газообразном аргоне достаточно большая за счет большой концентрации водорода (10%), хотя сечение этого процесса в газе составляет всего 4.2 Å² [3]. Нами экспериментально показано, что добавка в газообразный аргон 10% водорода позволяет получить стабильно высокое размножение электронов. Также показано, что содержание в жидком Ar 100 млн⁻¹ H₂ не влияет на синглетную составляющую сцинтилляционного сигнала, имеющую время жизни ~7 нс, и несущественно (на 20%)

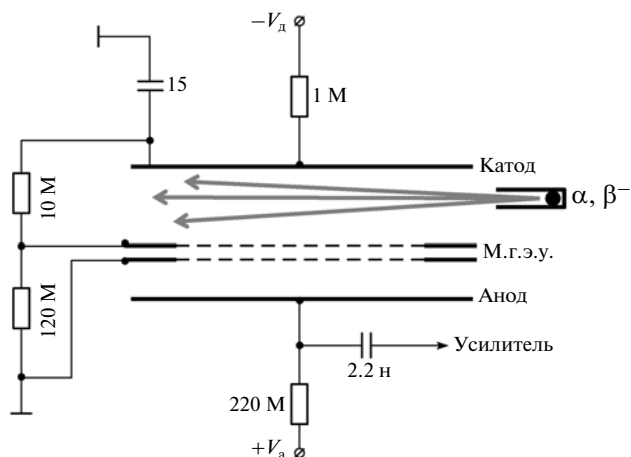
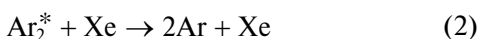


Рис. 1. Камера с проволочным м.г.э.у. V_d – напряжение делителя, V_a – анодное напряжение.

уменьшает эффективность эмиссии электронов по сравнению с чистым аргоном.

Для сравнения, величина сечения процесса



в газе составляет 140 \AA^2 [3], а добавка в жидкий Ar 100 млн^{-1} Xe позволяет подавить только долгоживущие триплетные состояния Ar_2^* , имеющие время жизни 1.5 мкс, и практически не влияет на синглетные состояния с временем жизни $\sim 7 \text{ нс}$ [4]. Из соотношения сечений для добавок Xe и H_2 очевидно, что добавка в жидкий Ar 100 млн^{-1} H_2 не может повлиять на синглетную компоненту сцинтилляционного сигнала. Это утверждение было нами подтверждено в данной работе экспериментально.

В работе [5] была сделана попытка использования в аргоновой двухфазной камере в качестве гасящей добавки водород, однако вследствие недостаточности чистого в камере аргона ее авторы не обнаружили при добавке водорода улучшения работы камеры. Хотя при этом они не обнаружили и эффекта существенного уменьшения эмиссии электронов из жидкого аргона в газовую фазу.

2. КАМЕРА С МНОГОКАНАЛЬНЫМ ГАЗОВЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖИТЕЛЕМ

На рис. 1 представлена проволочная камера с многоканальным газовым электронным умножителем (м.г.э.у.) с зазором 1 мм, электроды которой намотаны проводом из бериллиевой бронзы $\varnothing 0.1 \text{ мм}$ [6]. На рис. 2 представлена зависимость коэффициентов размножения электронов в м.г.э.у. от разности потенциалов между обкладками м.г.э.у. с газовой смесью Ar + 10% H_2 (1 ата) при детектировании α - и β -частиц. Газовая смесь была очищена от кислорода адсорбентом Ni/SiO₂ до уровня $\sim 10^{-9}$

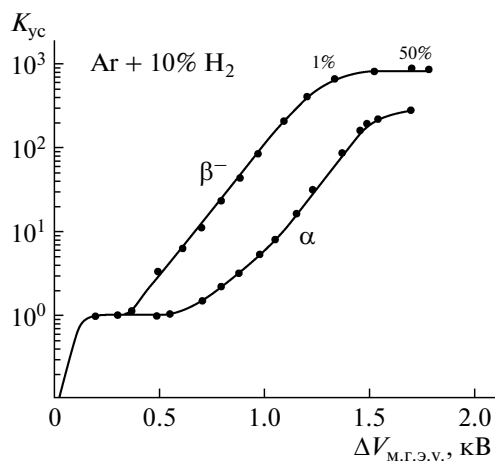


Рис. 2. Зависимость коэффициентов размножения электронов от разности потенциалов между электродами м.г.э.у. при регистрации α - и β -частиц (в процентах указано относительное количество стримерных разрядов). Камера (рис. 1) заполнялась смесью Ar + 10% H_2 (1 ата).

экв. O_2 . Максимальный коэффициент размножения электронов при регистрации α -частиц ограничивался искровыми пробоями и составил величину $K_{yc}^{max} = \sim 300$, практически совпадающую с результатом, полученным при заполнении этой же камеры неоном [7]. При детектировании β -частиц (^{63}Ni) $K_{yc}^{max} = 9 \cdot 10^2$.

3. КАМЕРЫ С АНОДОМ-ОСТРИЕМ

На рис. 3 представлена камера с м.г.э.у. и анодом-острием [8]. В качестве острия использована стальная швейная игла с диаметром в средней части $\sim 0.5 \text{ мм}$. Острие иглы располагалось в центре отверстия м.г.э.у., по высоте – на уровне плоскости, ограничивающей нижний электрод м.г.э.у. Камера заполнялась смесью Ar + 10% H_2 (1 ата).

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента размножения электронов на острие от анодного напряжения V_a . Разность потенциалов между электродами м.г.э.у. была небольшой, обеспечивающей только транспортировку электронов из дрейфового зазора камеры на острие без размножения в м.г.э.у. Максимальный коэффициент размножения на острие составил $2.5 \cdot 10^5$. Поскольку количество электронов ионизации, собираемых с α -трека, равно $\sim 2 \cdot 10^4$, то полный максимальный заряд электронов в лавине на острие равнялся $\sim 5 \cdot 10^9 e^-$, что существенно превосходит величины зарядов, полученных в детекторах Micropattern [9].

При заполнении камеры смесью Ne + $\sim 100 \text{ млн}^{-1}$ ($H_2O + O_2 + N_2$) [2] и одновременном размножении электронов в м.г.э.у. и на острие получен максимальный коэффициент раз-

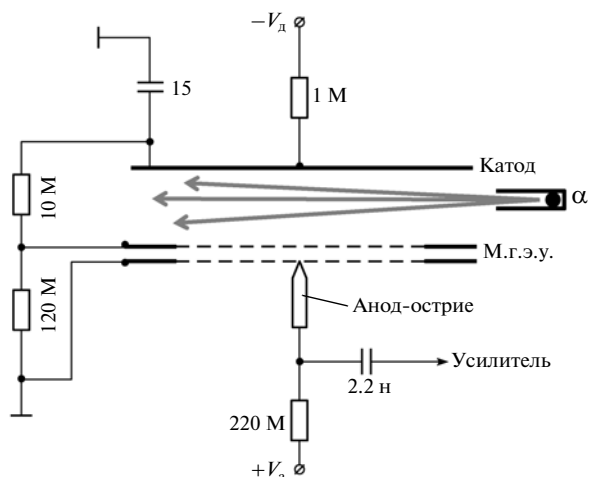


Рис. 3. Проволочный м.г.э.у. в сочетании с анодом-острием.

множения электронов $2 \cdot 10^6$ (рис. 5). Полный максимальный заряд электронов в лавине на острие составил для этой смеси величину около $2 \cdot 10^{10} e^-$, существенно превышающую предел Raether, равный 10^8 .

Причинами, позволившими получить в выбранной геометрии анод-острие + катод-отверстие столь высокий коэффициент размножения электронов, являются следующие:

1) высокая напряженность электрического поля вблизи острия, быстро уменьшающаяся по закону $E \sim 1/r^2$, позволяет получить у поверхности острия высокий коэффициент размножения электронов и невысокое размножение вдали от острия, что в результате приводит в области больших напряжений к образованию, в основном, самогасящихся стримеров, не вызывающих пробоев [9];

2) положительные ионы из лавины на острие транспортируются электрическим полем, в основном, на стенки отверстия, в котором расположено острие, и в меньшем количестве навстречу электронам ионизации, собираемым на острие (рис. 6), что подавляет возможность развития стримеров на границе облака положительных ионов и лавины электронов [9, 10];

3) в используемой конструкции детектора исключаются пробой по изолятору между острием и стенками отверстия-катода, в котором расположено острие [7, 11].

Фронты сигналов, получаемых на острие, составляют ≤ 3 мкс, однако дифференцирование сигналов позволяет выделить начальные участки фронтов $\sim 0.2-0.3$ мкс. Крутизна фронтов сигналов на острие определяется геометрией системы острие – отверстие и разностью потенциалов между ними. Высокая напряженность электрического поля вблизи острия обеспечивает быстрое удаление от острия чехла положительных ионов, что в

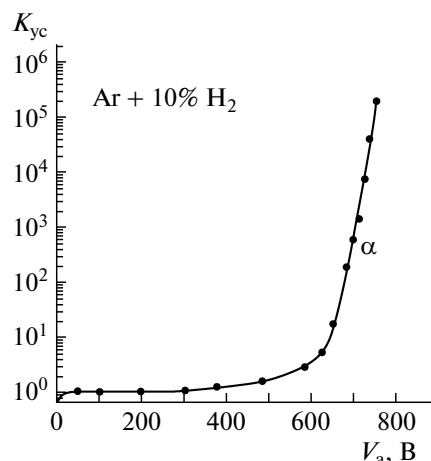


Рис. 4. Зависимость коэффициента размножения электронов на острие от анодного напряжения при заполнении камеры (рис. 3) смесью Ar + 10% H₂ (1 ата).

сочетании с небольшой величиной зазора между острием и стенками отверстия-катода (~ 0.4 мм) обеспечивает быстрое уменьшение величины сигнала, индуцированного на острие чехлом положительных ионов, т.е. обеспечивает большую крутизну фронта сигналов.

На рис. 7 представлена камера с анодом-острием, расположенным в катодном отверстии на расстоянии от м.г.э.у., равном 1.5 мм. Острие располагалось по

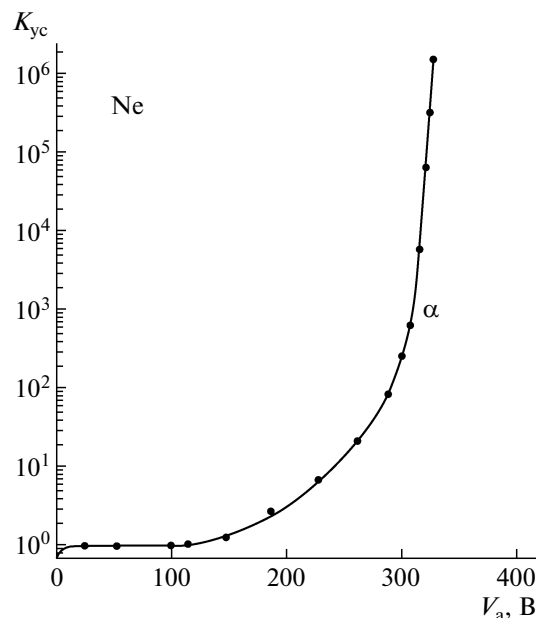


Рис. 5. Зависимость коэффициента размножения электронов одновременно в м.г.э.у. ($K_{yc1} \sim 200$) и на анод-острие ($K_{yc2} = 0-10^4$) от анодного напряжения при заполнении камеры (рис. 3) смесью Ne + ~ 100 млн⁻¹ (H₂O + O₂ + N₂) (1 ата) и детектировании α -частиц.

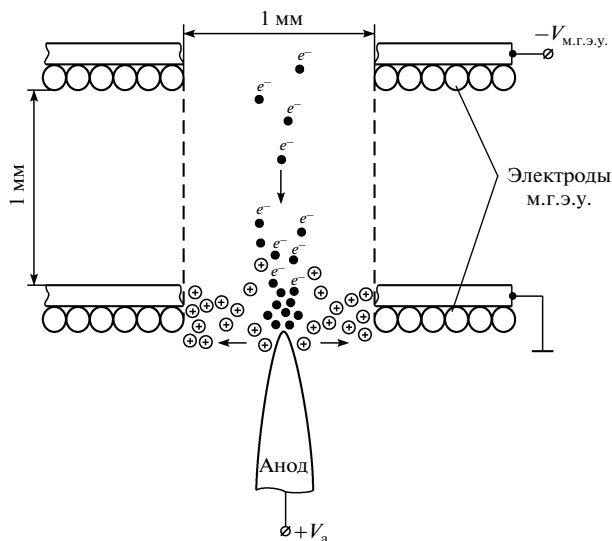


Рис. 6. Схема движения положительных ионов из лавин, развивающихся на острие, и электронов, собираемых на острие.

центру отверстия в м.г.э.у. Разность потенциалов между электродами м.г.э.у. была небольшой, недостаточной для размножения электронов, при этом в отверстии м.г.э.у. осуществлялась фокусировка электронов ионизации. На рис. 8 представлены результаты испытаний с β^- - и α -источниками при заполнении камеры смесью $Ag + 10\% H_2$ (1 ата) в зависимости от напряжения, поданного на иглу. Можно видеть, что с использованием α -источника в данной геометрии камеры получен максимальный коэффициент размножения, совпадающий с коэффициентом, полученным на камере с анодом-острием (рис. 3). С β^- -источником коэффициент размножения составил $3 \cdot 10^6$, причем в области $>2.5 \cdot 10^5$ наблюдались преимущественно самогасящиеся стримерные сигналы. На этом же рис. 8 представлена зависимость $K_{yc} = f(V_a)$ при заполнении камеры смесью $Ag + 20\% CH_4$ (1 ата) и облучении α -частицами. Можно видеть, что смесь $Ag + 10\% H_2$ обеспечивает на 2 порядка больший коэффициент размножения по сравнению со смесью $Ag + 20\% CH_4$.

4. ДВУХФАЗНАЯ АРГОНОВАЯ КАМЕРА

На рис. 9 представлена Ag -камера, созданная для проверки влияния добавки водорода на синглетную составляющую сцинтилляционного сигнала жидкого Ag . В эксперименте для выделения синглетной составляющей сигнал с фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) дифференцировался с постоянной 50 нс, усиливался и подавался на цифровой запоминающий осциллограф С9-8. Камера заполнялась поочередно чистым аргоном

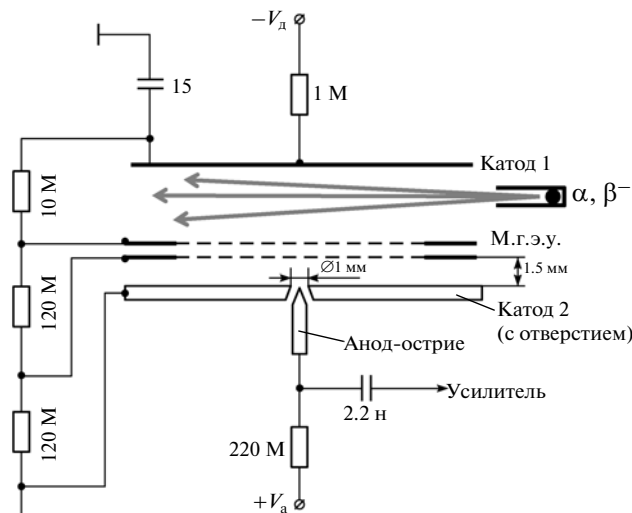


Рис. 7. Камера с анодом-острием, расположенном в катоде 2 на расстоянии 1.5 мм от м.г.э.у.

($\sim 10^{-8}$ экв. O_2) либо аргоном с содержанием в газовой фазе 10% H_2 . Разницы в величинах сигналов не было обнаружено на уровне 1%, что доказывает отсутствие влияния добавки $100 \text{ млн}^{-1} H_2$ в жидком Ag на синглетную составляющую сцинтилляционного сигнала.

При детектировании электронов ионизации в газовой фазе двухфазной аргоновой камеры при температуре нормальной точки кипения (87.28 К) плотность газообразного аргона составляет 2.849 кг/м^3 , что больше плотности газообразного аргона при 300 К в 3.28 раз. Для получения возможности работать при температурах $>87.28 \text{ К}$ предлагается газообразный аргон в области расположения детектирующей системы (м.г.э.у. + острия) нагре-

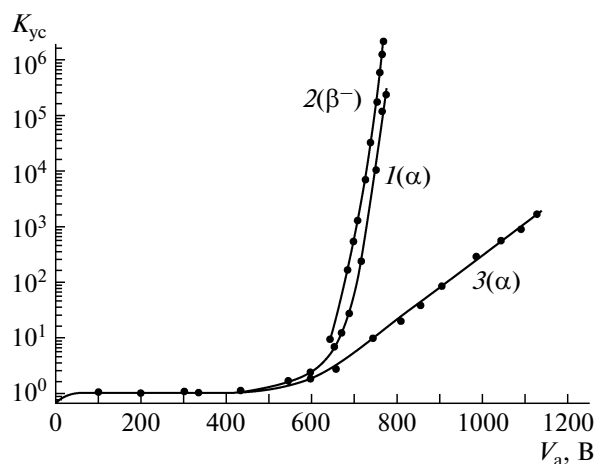


Рис. 8. Результаты испытаний камеры (рис. 7) с α - и β^- -источниками при заполнении ее смесью (1 ата): 1, 2 — $Ag + 10\% H_2$, 3 — $Ag + 20\% CH_4$.

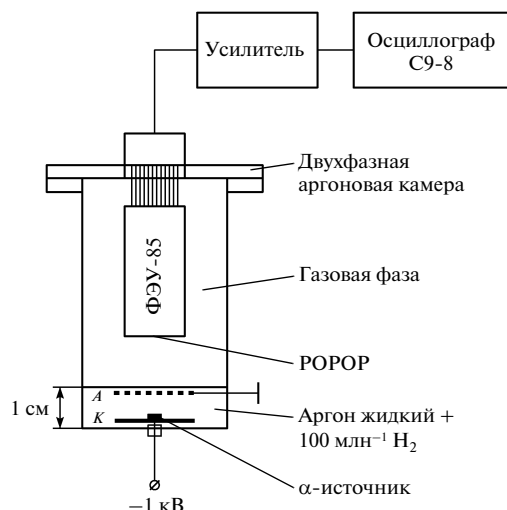


Рис. 9. Двухфазная Аг-камера, заполняемая поочередно Аг и Аг + Н₂.

вать, что позволит работать при меньших плотностях газа и, соответственно, меньших величинах разности потенциалов между электродами.

С целью демонстрации эффекта эмиссии электронов ионизации из жидкой смеси Аг + 100 млн⁻¹ Н₂ в газовую фазу нами использовалась Аг-камера (рис. 9). Камера поочередно заполнялась жидкими Аг и Аг + 100 млн⁻¹ Н₂ до уровня на 3 мм ниже анода-сетки. На катод К подавалось напряжение -2 кВ. Ионизационный сигнал снимался с анода-сетки А с помощью зарядочувствительного усилителя. При заполнении детектора жидкой смесью Аг + 100 млн⁻¹ Н₂ наблюдался сигнал, на 20% меньший сигнала, полученного при заполнении чистым жидким аргонном. Полученный результат согласуется с результатами работ [12, 13]. В работе [12] в двухфазной аргонной камере исследовали влияние добавки в жидкий аргон 0.6% N₂ на эффективность эмиссии электронов из жидкого аргона в газовую фазу, а также на работу м.г.э.у. в газовой фазе, и показали, что добавка N₂ практически не влияет на эффективность эмиссии электронов, хотя приводит к необходимости увеличения разности потенциалов на электродах м.г.э.у. В работе [13] исследовалось влияние добавки 2% CH₄ на работу двухфазной Хе-камеры и было показано, что эффективность эмиссии электронов из жидкого Хе в газовую фазу несущественно отличается от эмиссии из чистого Хе, несмотря на высокий порог эмиссии электронов из жидкого Хе в газовую фазу (1.75 кВ/см по сравнению с 0.25 кВ/см для жидкого Аг) и намного большее сечение рассеяния электронов на молекулах CH₄ по сравнению с Н₂, а также в 200 раз большей концентрации CH₄, чем Н₂.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опробованы методы детектирования событий в газовой камере, заполненной смесью Аг + 10% Н₂. Для размножения электронов использовался м.г.э.у. в сочетании с анодом-острием, размещенным в отверстии катода. С анодом-острием получен максимальный коэффициент размножения электронов, равный $3 \cdot 10^6$, на 2 порядка превышающий коэффициент размножения с использованием смеси Аг + 20% СН₄.

Показано, что добавка в газовую фазу аргонной двухфазной камеры 10% Н₂ объемных позволяет получить высокий коэффициент размножения электронов в газовой фазе, не влияя на синглетную компоненту сцинтилляционного сигнала жидкого Аг и несущественно уменьшает эффективность эмиссии электронов по сравнению с чистым аргонном.

Техника детектирования событий сочетанием м.г.э.у. и системы анодов-острий с использованием Аг + 10%Н₂-смеси может быть использована в аргонной двухфазной камере большой массы (до 1000 т) при поиске частиц темной материи Вселенной. Кроме того, этот метод может использоваться в любых проекционных газовых камерах. В заключение авторы благодарят И.И. Ткачева за содействие в выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ovchinnikov B.M., Ovchinnikov Yu.B., Parusov V.V. arXiv: 1102.3558 [physics.ins-det] 2011.
2. Овчинников Б.М., Парусов В.В., Овчинников Ю.Б. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 49.
3. Oka T., Kogota M., Imamura M. et al. // J. Chem. Phys. 1979. V. 70(7). P. 3384.
4. Kubota S., Hishida M., Suzuki M., Ruan J. // Nucl. Instrum. and Methods. 1982. V. 196. P. 101.
5. Долгошеин Б.А., Круглов А.А., Лебедев В.Н. и др. // ФЭЧАЯ. 1973. Т. 4. Вып. 1. С. 167.
6. Овчинников Б.М., Парусов В.В. // ПТЭ. 2010. № 6. С. 68.
7. Ovchinnikov B.M., Ovchinnikov Yu.B., Parusov V.V. arXiv: 1012.4716 [physics.ins-det] 2010.
8. Bateman J.E. // Nucl. Instrum. and Methods. 1985. V. A238. Issue 2-3. P. 524.
9. Peskov V., Fonte P., Danielsson M. et al. Preprint LIP/01-05. Coimbra Portugal, 2001.
10. Fonte P., Peskov V., Ramsey B.D. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998 V. A416. P. 23.
11. Peskov V., Ramsey B.D., Fonte P. // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. V. A392. P. 89.
12. Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A. et al. arXiv:1210/0649 [physics.ins-det] 2012.
13. Bondar A., Buzulutskov A., Grebennik A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A556. P. 273.