



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-36

P13-96-36

В.Ф.Кушнирук, Э.Бялковский*,
И.В.Кузнецов, Ю.Г.Соболев

МУЛЬТИПЛИКАЦИЯ ЗАРЯДА
В КРЕМНИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
ДЕТЕКТОРАХ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

*Институт ядерных исследований, Краков, Польша

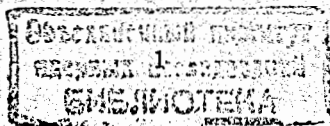
1996

Явление аномального возрастания амплитуды сигналов при достижении некоторого критического значения напряженности электрического поля в детекторе было обнаружено уже в первых исследованиях [1,2] поверхностно-барьерных Au-Si-детекторов в качестве спектрометров осколков спонтанного деления ^{252}Cf . Данный эффект получил название "явление мультипликации заряда". Неожиданность явления мультипликации заряда заключалась в том, что оно имеет место в условиях, когда максимальная напряженность поля в детекторе во много раз меньше напряженности поля, требуемой для лавинного размножения носителей тока. Эта особенность явления мультипликации заряда, проявляющегося при регистрации сильноионизирующих тяжелых заряженных частиц, выводит его за рамки известных физических свойств Si и поведения полупроводниковых приборов.

Дальнейшие исследования с осколками деления и ускоренными тяжелыми ионами [3-6] показали, что мультипликация заряда присуща не только поверхностно-барьерным детекторам на основе p-Si, в которых она была обнаружена, но и ионно-легированным, и диффузионным детекторам на основе Si как с электронным, так и с дырочным типом проводимости. Исследования отклика полупроводниковых детекторов при их облучении ускоренными ионами ^{40}Ar [7] и ^{34}S [8] показали, что мультипликация заряда наблюдается и в области масс ионов, существенно отличающейся от области масс осколков деления. Авторы работы [9] наблюдали слабовыраженный эффект мультипликации заряда в диффузионных структурах с сильным встроенным полем даже для α -частиц.

Для объяснения механизма мультипликации заряда было предложено несколько моделей [2,5,7,9,10]. Первым был предложен механизм туннельной инжекции электронов с металлического электрода через тонкий оксидный слой [2], объясняющий некоторые особенности мультипликации заряда в Au-Si-детекторах. В работах [5,7] рассматривается механизм мультипликации, основанный на ударной ионизации в сильном электрическом поле, возникающем при накоплении плотного облака подвижных носителей заряда вблизи входного электрода детектора в процессе собирания генерированной частицы заряда в условиях плазмы, а в работах [9,10] - на ударной ионизации в высоком электрическом поле, возникающем на конце трека сильно вытянутой эллипсоидальной формы. Различные модели дают объяснение отдельным экспериментально установленным фактам, но не описывают всю совокупность особенностей мультипликации заряда в различных типах детекторов.

Таким образом, для выяснения механизма явления мультипликации заряда в полупроводниковых детекторах требуются дальнейшие исследования этого явления на различных тяжелых ионах и в детекторах различных типов. Кроме того, исследование мультипликаций заряда представляет интерес не только с точки зрения выяснения механизма мультипликации, но и с точки зрения выбора оптимального режима работы детектора, исключающего возможность искажения энергетических распределений регистрируемых частиц.



В настоящей работе приведены результаты исследования на осколках спонтанного деления ^{252}Cf мультипликации в эпитаксиальных кремниевых детекторах, изготовленных на основе (n-Si)-(n⁺⁺-Si)- структур с толщиной эпитаксиального слоя 20÷50 мкм и удельным сопротивлением 30÷80 Ом·см [11].

Для исследования отклика эпитаксиальных детекторов использовался источник спонтанного деления ^{252}Cf интенсивностью $\approx 10^3$ делений/с. Набор одномерных энергетических спектров производился стандартной электроникой, включающей в себя зарядочувствительный предусилитель, спектрометрический усилитель и преобразователь "амплитуда - цифровой код" [12]. Изменение коэффициента усиления спектрометрического тракта, обусловленное широким диапазоном изменения емкости детектора, отслеживалось с помощью генератора точной амплитуды. Генераторный пик использовался для нормировки амплитудных распределений.

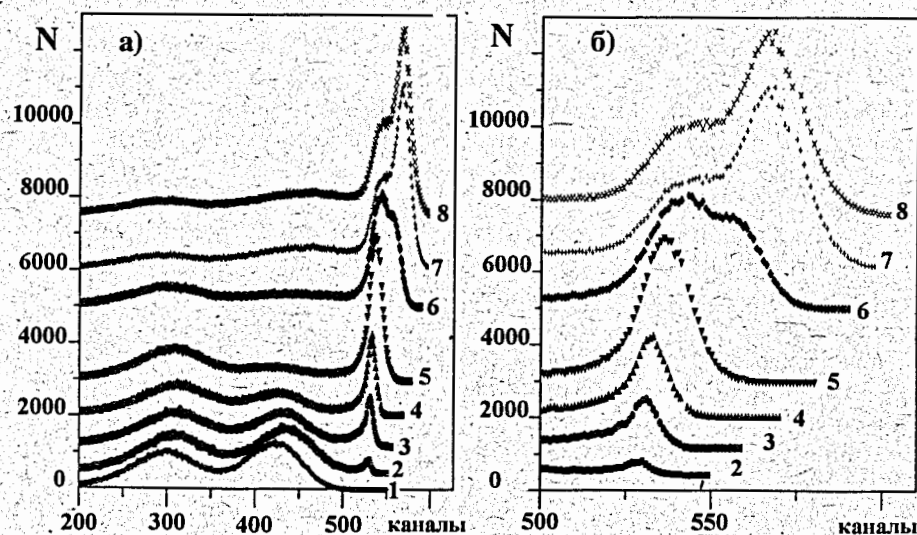


Рис.1. Энергетические спектры осколков деления ^{252}Cf при различных значениях напряжения V :
1 - 6 В; 2 - 12 В; 3 - 15 В; 4 - 19 В; 5 - 26 В; 6 - 33 В; 7 - 40 В; 8 - 42 В

На рис.1 представлен ряд энергетических спектров осколков деления ^{252}Cf при различных значениях напряжения V , демонстрирующий развитие процесса мультипликации заряда в детекторе. На рис.1а приведены полные амплитудные распределения осколков деления, а на рис.1б показаны участки спектров, соответствующие аномальным амплитудам сигналов. Разность потенциалов V , как и в работе [11], определена как сумма напряжения смещения V_0 и равновесной высоты потенциального барьера $V_0 \approx 0.5$ В в контакте Au-

(p-Si). Из рис.1 видно, что с ростом V энергетический спектр претерпевает сильную деформацию: наряду с нормальным двухгорбым распределением со стороны больших амплитуд в спектре появляется дополнительный пик, связанный с мультипликацией заряда.

Некоторую количественную информацию о поведении мультиплицированных сигналов можно получить из зависимостей параметров Шмитта [13] и амплитуд сигналов для групп легких и тяжелых осколков от разности потенциалов V . На рис.2 приведены зависимости отношения числа отсчетов в максимумах распределений для групп легких и тяжелых осколков (N_L/N_H) и отношения "пик-долина" для легкого (N_L/N_V) и тяжелого (N_H/N_V) осколков от напряжения V . Горизонтальные линии соответствуют рекомендованным значениям параметров.

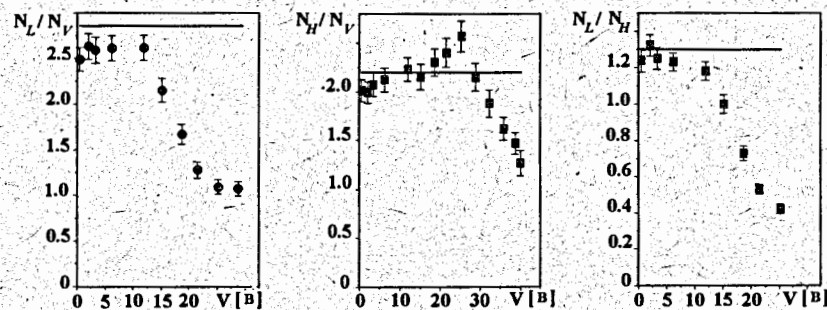


Рис.2. Зависимость параметров Шмитта от напряжения V

Зависимости отношений N_L/N_H и N_L/N_V от V показывают, что при $V \approx 13$ В наблюдается быстрое падение этих отношений, что свидетельствует о начале мультипликации сигналов, соответствующих группе легких осколков. Зависимость отношения N_H/N_V от V имеет более сложный характер. На начальном участке зависимости, вплоть до $V \approx 15$ В, наблюдается плавное возрастание параметра N_H/N_V , обусловленное улучшением сбора заряда. Участок более резкого роста данного параметра обусловлен мультипликацией сигналов от группы легких осколков деления, что, на наш взгляд, связано с уменьшением числа отсчетов в минимуме распределения нормальных сигналов. Отметим, что значения параметра N_H/N_V на данном участке заметно превышают рекомендованное Шмиттом значение, что свидетельствует о существенном возмущении спектра нормальных амплитуд сигналов. И наконец, начиная с $V \approx 25$ В, наблюдается резкое падение величины рассматриваемого параметра. Этот факт свидетельствует о развитии процесса мультипликации сигналов от тяжелых осколков и о соответствующем этому процессу уходу импульсов из пика тяжелых осколков в аномальный пик.

Дополнительные сведения о характере мультипликации можно извлечь из поведения зависимости амплитуд нормальных сигналов от величины $V^{0.5}$, пропорциональной напряженности электрического поля в детекторе. Зависимость

амплитуды сигналов от напряжения $A(V)$, связанная с улучшением сбора заряда с ростом напряжения, описывается простым выражением:

$$A = A_0 \left(1 - \frac{k}{V^{0.5}}\right), \quad (1)$$

где A_0 - насыщенное значение амплитуды сигналов при бесконечной напряженности электрического поля, k - постоянная величина.

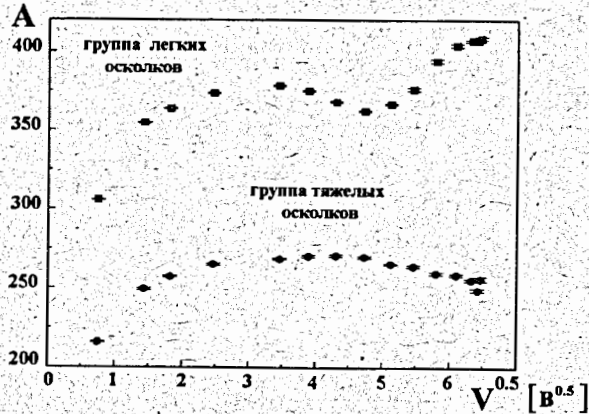


Рис.3. Зависимость амплитуд сигналов для групп тяжелых и легких осколков от напряжения

Типичные зависимости $A(V^{0.5})$ для групп легких и тяжелых осколков приведены на рис.3. Из рисунка видно, что на начальном участке зависимости $A(V^{0.5})$ соответствуют выражению (1). При дальнейшем увеличении напряжения соответствие экспериментальных точек аналитическому выражению (1) нарушается, что мы связываем с началом процесса мультипликации заряда. Отметим здесь, что нарушение нормального хода зависимости для группы легких осколков наступает при более низких значениях напряжения V по сравнению с группой тяжелых осколков.

Более информативными, на наш взгляд, являются зависимости величин $A_0/(A_0-A)$ для легких и тяжелых осколков от $V^{0.5}$, показанные на рис.4. Такое представление экспериментальных данных очень чувствительно к слабым вариациям амплитуды, что позволяет выявить детали поведения зависимостей амплитуд сигналов для легкого и тяжелого осколков от напряжения на детекторе. Из рис.4 видно, что начальные участки зависимостей находятся в полном согласии с выражением (1) и хорошо аппроксимируются прямыми линиями с параметром $k = 0.16$, а с ростом переменной $V^{0.5}$ наступает резкое снижение величины параметра $A_0/(A_0-A)$, связанное с началом мультипликации сигналов в пике легких и тяжелых осколков, соответственно. Дальнейшее

уменьшение величины параметра $A_0/(A_0-A)$ для легких, а затем и для тяжелых осколков свидетельствует, на наш взгляд, о том, что мультиплицированные сигналы связаны в первую очередь с высокоэнергетическими участками спектров как легких, так и тяжелых осколков, соответственно. Уход части отсчетов из высокоэнергетических участков спектров для групп легких и тяжелых осколков в пик аномальных амплитуд приводит к смещению центров тяжести распределений соответствующих групп осколков влево, что и объясняет поведение рассматриваемых зависимостей.

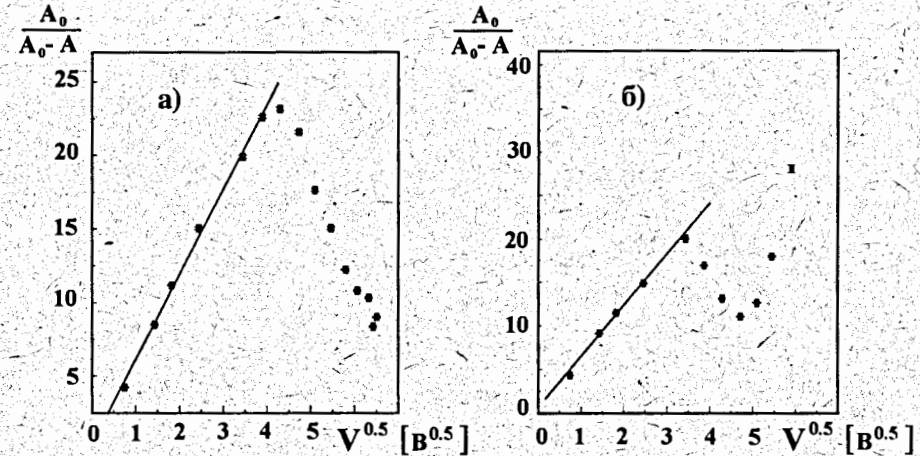


Рис.4. Зависимости величин $A_0/(A_0-A)$ для тяжелых (а) и легких (б) осколков от $V^{0.5}$

Наблюдаемый в случае легких осколков подъем параметра $A_0/(A_0-A)$ после участка его спада коррелирует по напряжению со спадом этого параметра для группы тяжелых осколков. Этот факт также подтверждает сделанный выше вывод о том, что в первую очередь мультипликации подвергаются сигналы, относящиеся к высокоэнергетической части спектра группы тяжелых осколков, поскольку уход значительной доли отсчетов из правой части распределения амплитуд тяжелых осколков в аномальный пик приводит к смещению центра тяжести распределения оставшихся немультимплицированными амплитуд сигналов от группы легких осколков теперь уже в сторону больших амплитуд.

Теперь перейдем к рассмотрению мультиплицированных сигналов (правой части амплитудных распределений, показанных на рис.1). Из наблюдаемой картины трансформации амплитудных распределений можно сделать ряд качественных выводов:

- 1) интенсивность пика аномальных амплитуд растет с ростом напряжения, а сам дополнительный пик узкий и имеет практически симметричную форму;
- 2) положение максимума пика аномальных амплитуд слабо зависит от напряжения на детекторе;

- 3) при дальнейшем повышении напряжения появляется еще один аномальный пик, интенсивность которого также растет с ростом напряжения;
- 4) положение второго аномального пика стабилизируется с ростом напряжения.

На рис.5 приведена зависимость отношения числа мультиплицированных сигналов N_m к числу нормальных сигналов N_n от величины $V^{0.5}$.

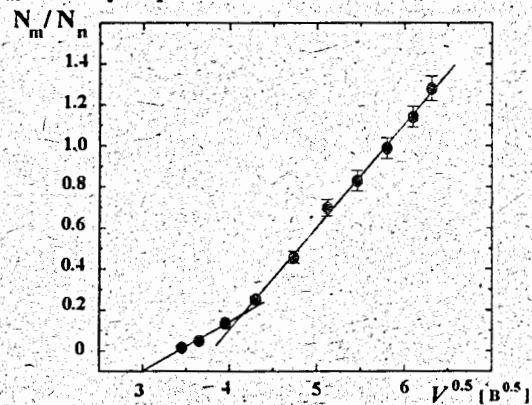


Рис.5. Зависимости отношения числа мультиплицированных сигналов N_m к числу нормальных сигналов N_n от величины $V^{0.5}$.

Из рис.5 видно, что рассматриваемая зависимость состоит из двух линейных участков, первый из которых связан с увеличением числа мультиплицированных сигналов, соответствующих пику легких осколков. Второй линейный участок представляет собой зависимость отношения суммы мультиплицированных сигналов как легких, так и тяжелых осколков от величины $V^{0.5}$, причем наклон второго линейного участка примерно вдвое превышает наклон первого участка, что свидетельствует о примерно равной скорости приращении числа мультиплицированных сигналов от обеих групп осколков.

Первый аномальный пик примерно на 20% сдвинут в сторону больших амплитуд по отношению к положению нормального пика легких осколков. Если принять во внимание улучшение собирания заряда с ростом напряжения и соответствующее этому эффекту увеличение амплитуды сигнала, то можно сделать вывод, что нормированное по генератору положение первого аномального пика практически не зависит от приложенного к детектору напряжения смещения. Зависимости, показанные на рис. 2, 4 и 5, позволяют с достаточной степенью точности определить пороговое напряжение как для группы легких, так и для группы тяжелых осколков. Например, для одного из детекторов пороговое напряжение мультипликации группы легких осколков составляет $V \approx 12$ В, пороговое напряжение мультипликации группы тяжелых осколков - $V \approx 16$ В, а второй аномальный пик появляется при напряжении $V \approx 33$ В. От-

сюда видно, что первый аномальный пик в области напряжений от 16 до 33 В представляет собой суперпозицию мультиплицированных сигналов от легких и тяжелых осколков. Учитывая сложный характер массовых, зарядовых и энергетических распределений осколков деления, можно сделать предварительный вывод, что пики аномальных сигналов от легких и тяжелых осколков практически совпадают. Слабая зависимость амплитуды мультиплицированных сигналов от напряжения и практическое совпадение этих амплитуд для тяжелых и легких осколков указывают на действие механизма отрицательной обратной связи [14], влияющего на напряженность электрического поля, локализованного в области мультипликации заряда и таким образом регулирующего процесс мультипликации.

Положение второго аномального пика, появляющегося при дальнейшем повышении напряжения смещения, примерно на 8% сдвинуто вправо по отношению к положению первого аномального пика. Из амплитудных распределений, показанных на рис.1, видно, что отношение числа отсчетов во втором аномальном пике к числу отсчетов в первом аномальном пике растет с увеличением приложенного к детектору напряжения. В то же время из рис.5, где представлена зависимость отношения числа всех мультиплицированных сигналов к числу немультимплицированных, видно, что в области напряжений, где появляется второй аномальный пик, каких-либо отклонений от линейной зависимости не наблюдается. Это позволяет нам сделать вывод о том, что в этой области происходит перераспределение отсчетов между первым и вторым аномальными пиками. Появление второго аномального пика мы связываем с горячими носителями электронной подсистемы кристаллической структуры, имеющими такую температуру, при которой возможен переход носителей тока в состояние с меньшей эффективной массой, что и приводит к повышению вероятности ударной ионизации [8].

Экспериментальные данные по пороговым напряжениям для групп легких и тяжелых осколков позволяют сделать некоторые предположения о механизме явления мультипликации заряда. Из модели динамической фокусировки электрического поля на полюсе сильно вытянутого трека [9] следует, что выражение, связывающее пороговые напряжения с параметрами легкого и тяжелого осколков, имеет следующий вид:

$$R_L \sqrt{V_L} - R_H \sqrt{V_H} = \frac{1}{k} (R_L^2 - R_H^2) > 0, \quad (2)$$

где

R_L, R_H - пробеги легкого и тяжелого осколков соответственно,

k - постоянная для данного детектора величина, $k > 0$.

Из (2) следует, что должно выполняться неравенство

$$\sqrt{V_H} < \frac{R_L}{R_H} \sqrt{V_L}. \quad (3)$$

Из неравенства (3) следует, что пороговое напряжение для группы тяжелых осколков должно быть меньше, чем пороговое напряжение для группы легких осколков, причем это неравенство усилено множителем $(\frac{R_L}{R_H})$, величина которого составляет 1.2, если в качестве R_L и R_H взять значения средних пробегов групп легких и тяжелых осколков.

Из модели, в которой появление поля, требуемого для начала развития процесса лавинного размножения носителей, связывается с накоплением подвижных носителей [7], следует выражение

$$\left(\frac{E_L R_L}{E_H R_H}\right)^{1/3} = \frac{\sqrt{V_H}}{\sqrt{V_L}}, \quad (4)$$

где

E_L, E_H - энергии легкого и тяжелого осколков соответственно.

Выражения (3) и (4) могут служить тестом различных моделей мультипликации заряда. Поскольку экспериментально показано, что $\sqrt{V_L} < \sqrt{V_H}$, следовательно, этот экспериментальный факт противоречит модели динамической фокусировки электрического поля на полусе трека. Экспериментальное отношение пороговых напряжений для легких и тяжелых осколков качественно согласуются с моделью мультипликации, основанной на накоплении плотного облака подвижных носителей вблизи входного электрода детектора. Более того, экспериментальная величина отношения $\sqrt{V_H}/\sqrt{V_L} = 1.17 \pm 0.05$ находится в хорошем количественном согласии с величиной $\left(\frac{E_L R_L}{E_H R_H}\right)^{1/3} = 1.19$. При вычислении данной величины в качестве значений E_L и E_H были использованы значения средних кинетических энергий для групп легких $< E_L >$ и тяжелых осколков $< E_H >$, уменьшенные на значения величин столкновительного дефекта ΔE_{nL} и ΔE_{nH} для легких и тяжелых осколков соответственно. Значения последних величин вычислялись в соответствии с работой [15]. Таким образом показано, что экспериментальные отношения пороговых напряжений для легких и тяжелых осколков хорошо согласуются с моделью мультипликации, основанной на накоплении носителей заряда вблизи входного электрода детектора.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. В эпитаксиальных детекторах, в отличие от поверхностно-барьерных, мультипликация заряда при регистрации осколков деления наблюдается в виде узкого симметричного пика, положение которого слабо зависит от приложенного к детектору напряжения.
2. Пороговое напряжение, при котором начинается процесс мультипликации для легких осколков, меньше по сравнению с пороговым напряжением для группы тяжелых осколков.
3. При достижении пороговых напряжений аномальные амплитуды сигналов на начальном этапе процесса связаны с высокоэнергетичными участками распределений как для группы легких, так и для группы тяжелых осколков.

4. Скорости приращения числа аномальных сигналов, связанных с группами легких и тяжелых осколков, примерно одинаковы.

5. Несмотря на сложный характер массовых зарядовых и энергетических распределений осколков деления можно сделать предварительный вывод, что положения пиков аномальных сигналов от легких и тяжелых осколков практически совпадают. Этот экспериментальный факт требует рассмотрения некоторого механизма отрицательной обратной связи, регулирующего процесс мультипликации заряда.

6. При достижении некоторого критического напряжения появляется второй аномальный пик, причем приращение числа отсчетов в нем в основном связано с перераспределением отсчетов между первым и вторым аномальными пиками. Появление второго пика мы связываем с разогревом электронной подсистемы кристаллической структуры до такой температуры, при которой возможен переход свободных носителей тока в состояние с меньшей эффективной массой, что в свою очередь приводит к увеличению вероятности ударной ионизации.

7. Экспериментальные отношения пороговых значений напряжений для легких и тяжелых осколков хорошо согласуются с моделью мультипликации, основанной на накоплении плотного облака подвижных носителей, и противоречат модели, основанной на динамической фокусировке электрического поля на полусе трека.

В заключение отметим, что для более детального изучения явления мультипликации заряда целесообразно провести корреляционный эксперимент по регистрации совпадающих пар осколков деления и исследовать временные характеристики мультиплицированных и нормальных сигналов при облучении детекторов осколками деления.

Авторы выражают благодарность профессору Ю.Э.Пенионжквичу за проявленное внимание к работе, а также благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку работы, осуществленной в соответствии с проектом РФФИ № 95-02-05676-а.

Литература

1. Britt H.C., Wegner H.E. Rev. Scient. Instrum., 1963, Vol. 36, p.627.
2. Walter F.J. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1964, Vol. NS-11, No.3, p.232.
3. Бельцаж Е., Сифферт П. Сообщение ОИЯИ 13-74-90, Дубна, 1974.
4. Кушнирук В.Ф., Харитонов Ю.П. ПТЭ, 1977, No.4, с.76.
5. Heijne H.M., Belcarz E., Muller J.C. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, Vol. NS-25, No.3, p.378.

6. Александров А.А., Кушнирук В.Ф., Пятков Ю.В. и др. "Методы экспериментальной ядерной физики в исследованиях процессов и продуктов деления". М: Энергоатомиздат, 1983, с.33.
7. Кушнирук В.Ф., Гуинь Тхи Ха, Цыганов Ю.С. ПТЭ, 1989, No.3, с.57.
8. Tsyganov Yu., Kushniruk V., Polyakov A. Preprint JINR E7-95-388, Dubna, 1995.
9. Вербицкая Е.М., Еремин В.К., Исмаилов Х.Х. и др. Физика и техника полупроводников, 1987, т.24, No.8, с.1388.
10. Цыганов Ю.С. Сообщение ОИЯИ P15-89-107, Дубна, 1989.
11. Кушнирук В.Ф., Бялковский Э., Кузнецов И.В. и др. Препринт ОИЯИ P13-95-492, Дубна, 1995.
12. Соболев Ю.Г., Иванов М.П., Кузнецов И.В., Даниэль А.В. Препринт ОИЯИ P13-92-331, Дубна, 1992.
13. Schmitt H.W. and Pleasonton F. Nucl. Instrum. and Methods, 1966, Vol. 40, p.204.
14. Sokol G.A., Kashevarov V.L. Preprint P.N.Lebedev Physical Institute Russia Academy of Science, No. 14, Moscow, 1993.
15. Wilkins B.D., Fluss M.J., Kaufman S.B. et al. Nucl.Instrum. and Method, 1971, Vol.92, p.381.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1996 года.