

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Р7-88-89

В.Ф.Кушнирук, Гуинь Тхи Ха, Ю.С.Цыганов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИПЛИКАЦИИ ЗАРЯДА
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ
НА ПУЧКЕ ИОНОВ ^{40}Ar**

Направлено в журнал

"Приборы и техника эксперимента"

1988

Впервые anomальное возрастание амплитуд сигналов с ростом приложенного к детектору напряжения было обнаружено Бриттом и Уэгнером^{1/} при исследовании пригодности кремниевых поверхностно-барьерных детекторов для спектрометрии осколков спонтанного деления ^{252}Cf . В дальнейшем основные сведения о мультипликации заряда в полупроводниковых детекторах были получены также на осколках деления ^{235}U , имеющих широкий спектр масс, зарядов и энергий. Последняя особенность спектра осколков деления существенно осложняет исследование рассматриваемого явления.

Более детальную информацию об особенностях явления мультипликации можно получить при облучении детекторов моноэнергетическими тяжелыми ионами. В работах^{5,6/} мультипликацию заряда наблюдали при облучении ионами ^{136}Xe с энергией примерно 1 МэВ/нуклон детекторов на основе кремния как с электронным типом проводимости, так и с дырочным. Поскольку мультипликация заряда приводит к ухудшению разрешающей способности, а целью этих работ было исследование разрешающей способности и потерь заряда, то в указанных работах установлены лишь пороговые напряженности электрического поля, при которых мультипликация наступает. В данной работе приводятся более подробные сведения о мультипликации заряда в полупроводниковых детекторах при регистрации тяжелых ионов.

На рис. 1 дано схематическое изображение экспериментальной установки и электронной аппаратуры, использованной для получения

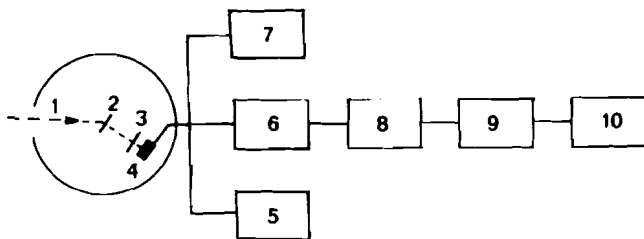
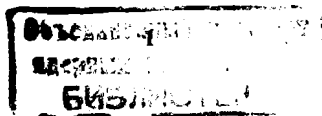


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки. 1 - пучок ионов ^{40}Ar , 2 - мишень, 3 - поглотитель, 4 - детектор, 5 - источник напряжения смещения, 6 - предварительный усилитель, 7 - генератор точной амплитуды, 8 - усилитель-формирователь, 9 - амплитудно-цифровой преобразователь, 10 - ЭВМ МERA-1300.



амплитудных спектров. Пучок ионов ^{40}Ar , ускоренных на ускорителе У-400 до энергии 340 МэВ, падал на мишень и после рассеяния под углом 21° попадал в поверхностно-барьерный детектор. В качестве мишени использовали Au ($1,86 \text{ мг/см}^2$) и Ag ($4,1 \text{ мг/см}^2$), а для изменения энергии ионов ^{40}Ar - поглотители из алюминиевой фольги, расположенные перед детектором.

Экспериментальные результаты

Исследовался амплитудный отклик двух кремниевых поверхностно-барьерных детекторов. Первый детектор изготовлен из n -кремния с удельным сопротивлением $500 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, второй - $245 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Удельное сопротивление определяли из вольт-фарадных характеристик детекторов. Стабильность усилительного тракта при наборе спектров, а также изменение коэффициента усиления при различных напряжениях на детекторе, обусловленное изменением его емкости, контролировали с помощью генератора точной амплитуды.

Трансформация амплитудных распределений с ростом напряжения, приложенного к детектору с удельным сопротивлением $500 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, показана на рисунке 2. Узкий пик, расположенный слева, соответствует

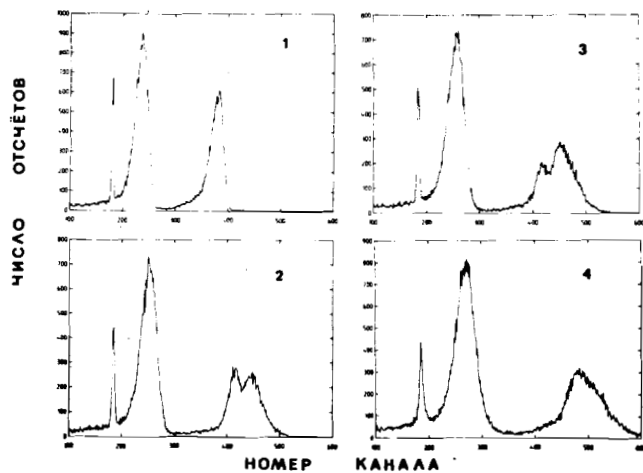


Рис. 2. Амплитудные спектры ионов ^{40}Ar , полученные с детектором № 1. 1 - напряжение смещения 60 В, 2 - 150 В, 3 - 200 В, 4 - 300 В.

распределению амплитуд от генератора точной амплитуды. Пик, расположенный за генераторным, соответствует ионам ^{40}Ar с энергией 208 МэВ, а правый пик - ионам с энергией 320 МэВ. Из рисунка видно, что при напряжении смещения 150 В появляется дополнительный пик со стороны больших амплитуд. При дальнейшем увеличении напряжения доля импульсов в пике с аномальной амплитудой возрастает, а при напряжении 300 В практически все сигналы, соответствующие ионам ^{40}Ar с энергией 320 МэВ, имеют аномально большие амплитуды.

На рис. 3 приведены зависимости наиболее вероятных амплитуд сигналов (номеров каналов), соответствующих распределениям амплитуд нормального и аномального пиков, от максимальной напряженности электрического поля в первом детекторе. Прямые 1 и 2 получены при энергии ионов ^{40}Ar 320 МэВ, а прямые 3 и 4 - при энергии 267 МэВ. Амплитуды сигналов приведены к одному и тому же коэффициенту усиления. Слабое возрастание амплитуд сигналов, не подвергшихся мультипликации (прямые 2, 4), обусловлено улучшением сбора генерированной частицей заряда. Возрастание амплитуд мультиплицированных сигналов (прямые 1, 3) происходит существенно быстрее и составляет примерно 1,4% на 1 кВ/см по сравнению с 0,2% на 1 кВ/см для немультимплицированных сигналов.

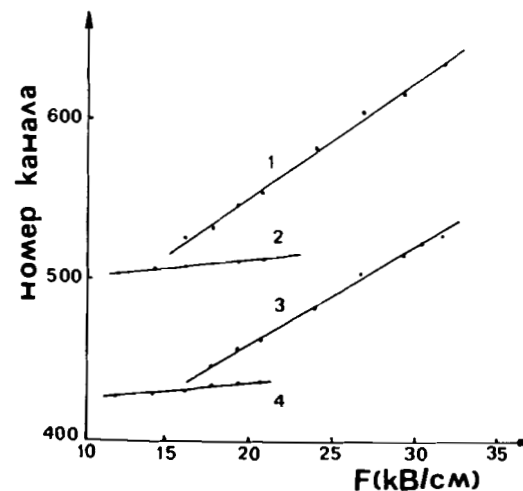


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигналов от максимальной напряженности электрического поля. Прямые 1, 3 соответствуют амплитудам мультиплицированных сигналов, прямые 2, 4 - амплитудам нормальных сигналов.

Следует также отметить, что амплитуды отдельных импульсов возрастают значительно больше, чем наиболее вероятная амплитуда мультиплицированных сигналов. При напряженности электрического поля 30 – 40 кВ/см увеличение амплитуды сигналов достигало ~50%. На рис. 4 показано изменение асимметрии распределения амплитуд мультиплицированных сигналов в зависимости от максимальной напряженности электрического поля для первого детектора при энергии ионов ^{40}Ar 320 МэВ. Асимметрия определена как отношение ширины линии на половине высоты справа от наиболее вероятного значения амплитуды к ширине линии слева от наиболее вероятного значения. Видно, что асимметрия линейно растет с увеличением напряженности электрического поля, и при полях ≈ 30 кВ/см достигает значения, равного 2.

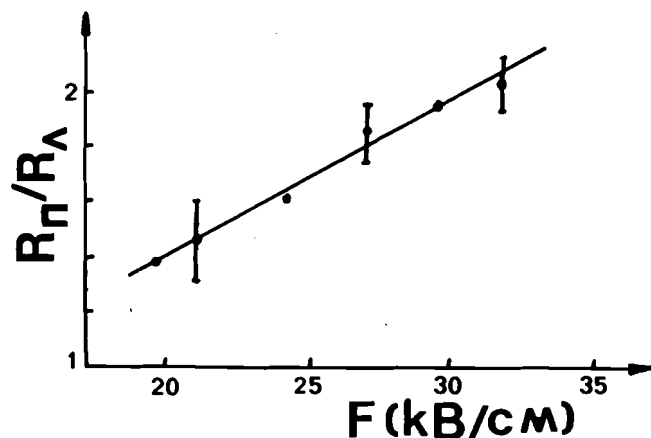


Рис. 4. Зависимость асимметрии распределения амплитуд мультиплицированных сигналов от максимальной напряженности электрического поля.

На рис. 5 приведена зависимость отношения числа мультиплицированных сигналов N_M к полному числу зарегистрированных импульсов N_3 от напряженности электрического поля. Необходимо отметить, что даже при одной и той же энергии ионов одна и та же доля мультиплицированных сигналов для разных детекторов достигается при существенно разных напряженностях поля. Для данного детектора кривые, соответствующие различным энергиям ионов ^{40}Ar , ведут себя подобным образом, а именно:

а) при данной напряженности поля доля мультиплицированных ам-

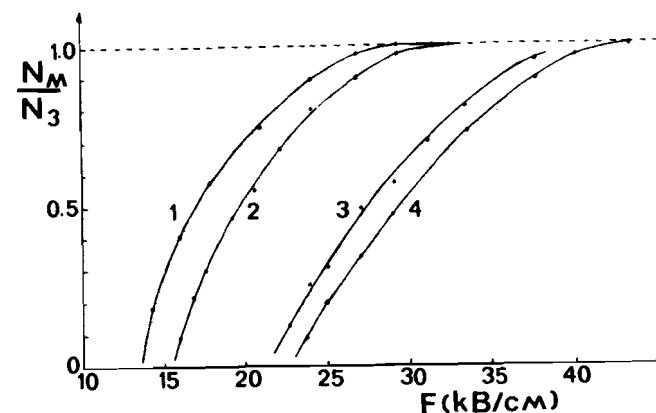


Рис. 5. Зависимость доли мультиплицированных сигналов от максимальной напряженности электрического поля. Кривые 1, 2 соответствуют детектору №1 при энергии ионов ^{40}Ar 320 и 267 МэВ, кривые 3, 4 детектору №2 при энергии 320 и 297 МэВ.

литуд больше для ионов с большей энергией;

б) напряженность поля, при которой практически все сигналы становятся мультиплицированными, уменьшается с ростом энергии.

Например, для первого детектора напряженность поля, при которой все амплитуды аномально возрастают, составляет ~ 29 кВ/см при энергии ионов 320 МэВ и ~ 33 кВ/см при энергии 267 МэВ.

Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты показывают, что явление мультипликации заряда имеет место во всем исследованном диапазоне энергий ^{40}Ar (320 ÷ 176 МэВ). Причем пороговая напряженность электрического поля, при которой появляется мультипликация заряда, уменьшается с ростом энергии иона. Следует отметить и другую особенность поведения мультипликации – для разных детекторов пороговая напряженность поля существенно зависит от индивидуальных свойств детектора. Так, например, при энергии 320 МэВ для первого детектора пороговое значение напряженности поля составляет ~ 14 кВ/см, а для второго – ~ 21 кВ/см. Отметим также, что диапазон изменения напряженностей электрического поля от появления мультипликации до того момента, когда все сигналы имеют аномально большие амплитуды, примерно составляет фактор 2 и практически не зависит от энергии ионов.

Широкий диапазон изменения напряженности поля, который требуется для того, чтобы амплитуды всех сигналов стали аномально большими, а также асимметричный характер распределения амплитуд аномальных сигналов свидетельствуют, по-видимому, о неоднородности объемных свойств материала детекторов или неоднородном распределении заряда на поверхности детекторов.

Для объяснения мультипликации заряда в поверхностно-барьерных детекторах в работе ^{12/} предложен механизм туннельной инжекции электронов с металлического электрода через тонкий (20 ÷ 30 Å) оксидный слой. Это предложение основано на том, что увеличение толщины оксидного слоя в результате обработки поверхности детектора в сильно окисляющих средах ослабляет мультипликацию.

Однако необходимо отметить, что указанный факт не является достаточным, чтобы однозначно можно было сделать такое заключение. Очевидно, что увеличение толщины оксидного слоя может сопровождаться ростом заряда, зафиксированного в этом слое, что само по себе меняет условия возникновения мультипликации. Кроме того, если механизм мультипликации один и тот же для поверхностно-барьерных и ионно-легированных детекторов, то туннелированием электронов с металлического контакта вряд ли можно объяснить мультипликацию в ионно-легированных детекторах, для которых расстояние между контактом и границей раздела при энергиях внедряемых ионов $V^+ 15 \div 60$ кэВ составляет $500 + 2000 \text{ Å}^{14/}$. И наконец, с помощью указанного механизма инжекции электронов совсем нельзя объяснить мультипликацию в поверхностно-барьерных детекторах из p -кремния ^{16/}. Необходимость привлекать разные объяснения для одного и того же явления в ионно-легированных и диффузионных детекторах с одной стороны, и в поверхностно-барьерных с другой, делает объяснение, основанное на прямой туннельной инжекции электронов с металлического контакта, весьма проблематичным.

Классическое лавинное размножение зарядов также может быть исключено из рассмотрения по той причине, что для его осуществления требуются напряженности электрического поля $\approx 10^5$ В/см ^{17/}, которые на порядок величины выше полей, стационарно существующих в детекторах. Следует, однако, отметить, что лавинное размножение носителей заряда могло бы служить объяснением явления мультипликации в детекторах. Следует, однако, отметить, что лавинное размножение носителей заряда могло бы служить объяснением явления мультипликации в области пространственного заряда плотного электронно-дырочного трека приводит к появлению сильного электрического поля. Так, например, в работе ^{18/} мультипликацию заряда связывают с лавинным размножением заряда в сильном поле на конце игловидного трека.

Другая альтернативная возможность заключается в том, что сильное поле, способное вызвать лавинный процесс генерации носителей тока, появляется в результате накопления плотного облака подвижных носителей того или другого знака вблизи границы раздела. При этом определяющая роль принадлежит помимо высокой плотности генерированных частиц носителей тока и динамике их накопления. Роль электрического поля, существующего в детекторе до попадания в него частицы, по-видимому, как раз и связана с динамикой накопления подвижных носителей.

Такая точка зрения на происхождение мультипликации позволяет найти некоторую характерную для данного детектора величину, ответственную за появление мультипликации. К моменту разделения электронов и дырок в плотном треке, который характеризуется плазменным временем T_p , плотность подвижных носителей, приходящаяся на единицу площади вблизи границы раздела можно охарактеризовать параметром P_M , который пропорционален величине $N/\pi r_{\text{эф}}^2$, где $N \sim E$ - число генерированных электронно-дырочных пар, $r_{\text{эф}}$ - эффективный радиус трека к моменту разделения носителей. Полагая $r_{\text{эф}}$ равным среднеквадратичному радиусу диффузионного растекания трека $\langle r_{\text{эф}}^2 \rangle = 4D_a T_p$, где D_a - коэффициент биполярной диффузии, и учитывая зависимость плазменного времени от электрического поля $F^{1/9}$, энергии частицы E и ее пробега R в соответствии с работой ^{19/}, получим

$$P_M = (ER)^{1/3} F_M \sim N/\pi r_{\text{эф}}^2,$$

где F_M - пороговая напряженность электрического поля.

С помощью этого параметра для данного детектора можно сравнить вероятность появления мультипликации для частиц с разными E и R . Зависимость обратной величины пороговой напряженности электрического поля F_M^{-1} от произведения $(ER)^{1/3}$ показана на рис. 6. Пороговую напряженность определяли путем экстраполяции наиболее вероятной амплитуды мультиплицированных сигналов A_M к

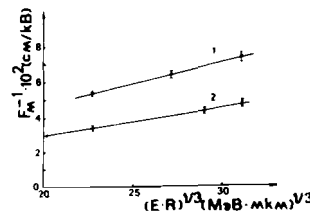


Рис. 6. Зависимость обратной величины пороговой напряженности электрического поля от произведения энергии и пробега частицы. Прямая 1 - первый детектор, прямая 2 - второй детектор.

амплитуде нормальных сигналов A_M ($A_M \rightarrow A_N$, рис. 3), экстраполяции к нулю отношения числа мультиплицированных сигналов к полному числу импульсов от частиц данной энергии ($N_M/N_3 \rightarrow 0$, рис. 5), а также экстраполяции параметра асимметрии к единице ($R_n/R_A \rightarrow 1$, рис. 4). Полученные с помощью этих трех экстраполяций значения пороговой напряженности хорошо согласуются друг с другом. Из рис. 6 видно, что зависимость $F_M^{-1} = f(E^{1/3} R^{1/3})$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью, что может служить основанием для заключения о справедливости приведенного выше выражения.

Параметр P_M , характеризующий вероятность появления мультипликации, объясняет также и ряд других экспериментальных фактов. Так, появление мультипликации сначала для легких осколков деления, а затем для тяжелых $^{10}/I$ объясняется тем, что произведение $(E R)^{1/3}$ для легких осколков больше по сравнению с тяжелыми осколками. Имеется еще один очень важный экспериментальный факт, который подтверждает изложенные выше рассуждения. На рис. 7 приведены амплитудные спектры осколков деления с массой $\approx 135 - 140$ а.е.м. и энергией 65 МэВ, полученные с помощью электростатической фокусирующей системы осколков деления МИФИ $^{10}/I_0$ на детекторе с удельным сопротивлением $\rho \approx 400$ Ом·см в режиме каналирования. Отличительной особенностью этого эксперимента является то обстоятельство, что в одних и тех же условиях детектор регистрирует частицы с одной и той же энергией, но с существенно различающимися пробегами. Канализующая частица имеет пробег примерно в 1,4 раза больше по сравнению с неканализующей частицей. В то же время энергия, выделенная каналирующей частицей в детекторе, должна превышать соответствующую энергию неканализующей частицы всего лишь на величину столкновительного дефекта, который в соответствии с работой $^{10}/II$ должен составлять примерно 3,5 МэВ. Отсюда в соответствии с параметром P_M следует, что вероятность мультипликации для каналирующего осколка при заданной напряженности поля в детекторе должна быть больше, чем для неканализующего осколка. Этот вывод хорошо согласуется с приведенными на рис. 7 амплитудными спектрами осколков, из которых видно, что при напряжении смещения 500 В имеет место деформация в сторону больших амплитуд именно в пике каналирующих осколков (правый пик амплитудного распределения).

Наблюдение мультипликации для ионов с энергией ≈ 140 МэВ $^{5,6}/$ и ее явное отсутствие для α -частиц с энергией ≈ 5 МэВ, имеющих примерно один и тот же пробег ($R \approx 20$ мкм), может быть связано с тем, что пороговая напряженность поля, необходимая для появления мультипликации при облучении детектора α -частицами, в соответст-

вии с параметром P_M должна быть примерно в 3 раза выше, чем для ^{136}Xe . Соответственно, для наблюдения мультипликации в случае α -частиц к детектору необходимо прикладывать примерно в 9 раз более высокие напряжения смещения (в нормальном режиме работы детектора без полного обеднения).

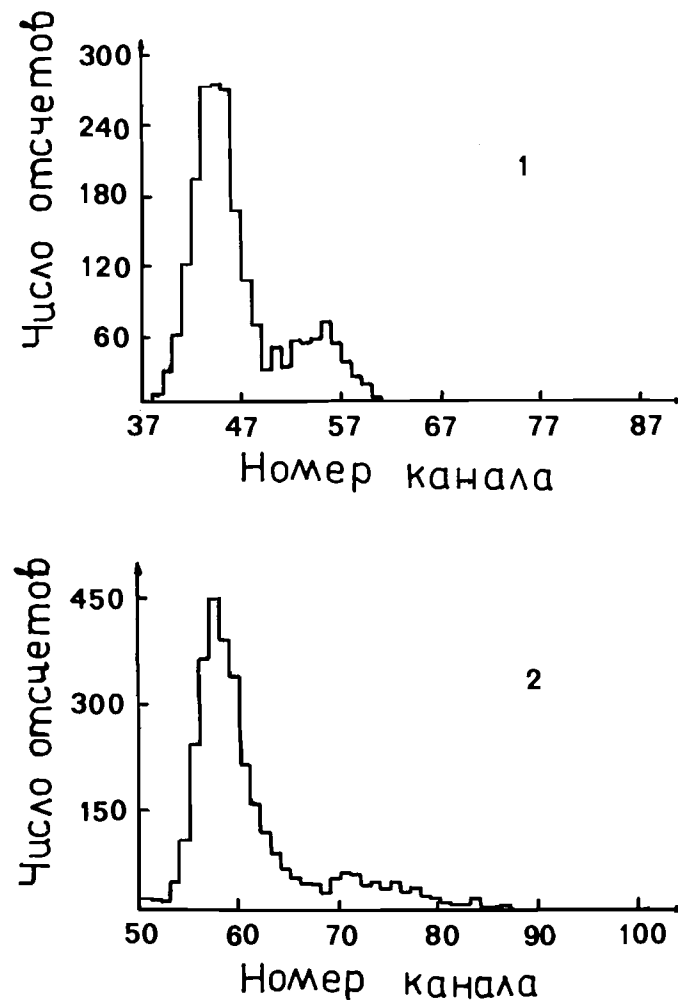


Рис. 7. Амплитудные спектры неканализующих (левый пик) и каналирующих (правый пик) осколков деления. 1 - напряжение смещения 50 В; 2 - напряжение смещения 500 В.

В заключение отметим, что для выяснения механизма мультипликации необходимы дальнейшие исследования детекторов, изготовленных из кремния как n - , так и p -типа проводимости. Кроме того, представляется также весьма важным исследование помимо амплитудных распределений и других параметров сигнала, например формы токовых импульсов.

Авторы благодарят академика Г.Н.Флерова, за постоянный интерес к работам по полупроводниковым детекторам, А.А.Александрова, любезно предоставившего нам спектры осколков деления, полученные в режиме канализирования, Ю.П.Харитонову, за полезные обсуждения, а также А.Н.Мезенцеву за помощь в работе.

Литература

- I. Britt H.C., Wegner H.E. Rev. Scien. Instrum. 1963, v. 34, no.6, pp. 627-632.
2. Walter F.J. IEEE Trans. 1964, NS-11, no.3, pp. 232-237.
3. Бельцаж Е., Сифферт П. ОИЯИ, I3-7990, Дубна, 1974, с. 21-22.
4. Heijne H.M., Belcarz E., Muller J.C., Siffert P. IEEE Trans., 1978, NS-25, no.3, pp. 378-385.
5. Кушнирук В.Ф., Харитонов Ю.П. ПТЭ, 1977, вып. 4, с. 76-79.
6. Александров А.А., Кушнирук В.Ф., Пятков Ю.В. и др. В сб. "Методы экспериментальной ядерной физики в исследованиях процессов и продуктов деления", под ред. Колобашкина В.М., М., Энергоатомиздат, 1983, с. 33-38.
7. Woods M.H., Johnston W.C., Lampert M.A. Solid. Stat. Electron. 1973, v.16, pp. 381-389.
8. Вербичкая Е.М., Еремин В.К., Исмаилов Х.Х. и др. Физика и техника полупроводников, 1987, т. 21, вып. 8, с. 1388-1392.
9. Seibt W., Sundström K.E., Tove P.A. Nucl. Instrum. Meth., 1973, v.113, no.3, pp. 317-324.
10. Ермаков С.В., Пятков Ю.В., Слосаренко А.И. и др. В сб. "Методы экспериментальной ядерной физики в исследованиях процессов и продуктов деления", под ред. Колобашкина В.М., М., Энергоатомиздат, 1983, с. 25-32.
- II. Wilkins B.D., Fluss M.J., Kaufman S.B. et al. Nucl. Instrum. Meth. 1973, v.92, no.2, pp. 381-391.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 февраля 1988 года.

Кушнирук В.Ф., Гуинь Тхи Ха, Цыганов Ю.С.
Исследование мультипликации заряда в полупроводниковых
детекторах на пучке ионов ^{40}Ar

P7-88-89

Экспериментально исследована мультипликация заряда в кремниевых поверхностно-барьерных детекторах на пучке ионов ^{40}Ar . Получены зависимости амплитуды мультиплицированных сигналов, асимметрии распределения амплитуд, доли мультиплицированных сигналов от максимальной напряженности электрического поля в детекторе. Показано, что в исследованной области энергий ионов ^{40}Ar и напряженности поля амплитуда и доля мультиплицированных сигналов, а также асимметрия распределения амплитуд линейно возрастают с увеличением максимальной напряженности поля. Экспериментальные результаты обсуждаются на основе механизма лавинного размножения носителей тока в сильных полях с учетом динамики движения носителей в плотном электронно-дырочном треке.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Kushniruk V.F., Huynh Thi Ha, Tsyganov Yu.S.
Investigation of Charge Multiplication in Semiconductor
Detectors Using ^{40}Ar Beam

P7-88-89

The charge multiplication in silicon surface barrier detectors has been investigated experimentally using ^{40}Ar beam. The dependences of multiplied pulse height amplitudes, the asymmetry of distributions and of the fraction of multiplied signals on the maximum electric field strength are obtained. It is shown that the pulse heights, the fraction of multiplied pulses and the asymmetry of distributions are linear function of the electric field. The experimental results are discussed on the basis of the mechanism of avalanche multiplication of current carriers in strong electric fields taking into account the dynamics of carrier motion in the electron-hole track.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988