

Б-325

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



24/II-74

P13 - 8265

4913/2-74

И.Бачо, В.Ф.Кушнирук, А.Пажит, А.В.Рыхлюк,  
Ю.П.Харитонов

ПОВЕДЕНИЕ

ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В СРЕДЕ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

**1974**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

И.Бачо,\* В.Ф.Кушнирук, А.Пажит,\*\* А.В.Рыхлюк,  
Ю.П.Харитонов

ПОВЕДЕНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
В СРЕДЕ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

*Направлено в ПТ:)*

---

° Институт ядерных исследований Венгерской академии наук.

\*\* Университет им.Л.Кошута, г. Дебрецен, ВНР.

В физических экспериментах на ускорителе многозарядных ионов Лаборатории ядерных реакций широкое применение нашел метод собирания продуктов реакций с помощью газовой струи<sup>/1/</sup>. Представление об условиях работы детекторов в установках с газовым собиранием можно получить из рис. 1. Пучок ионов 1 с энергией  $\sim 6$  МэВ/иукл. попадает на мишень 2. Продукты реакций, выбитые из мишени, тормозятся в газе, наполняющем реакционную камеру 3, и вместе со струей этого газа переносятся в регистрационную камеру 4 на сборник 5. Излучение продуктов реакций регистрируется кольцевым детектором 6. Отметим два важных с точки зрения работы детекторов момента: а/ мишень во время облучения представляет собой интенсивный источник  $\gamma$ -квантов и нейтронов  $\sim 10^9$  и/сек/; б/ пучок ионов теряет в газе реакционной камеры энергию  $\sim 10$  МэВ, в результате чего образуется  $\sim 10^{17} \div 10^{18}$  пар ионов в секунду при интенсивности пучка  $\sim 10^{12} \div 10^{13}$  частиц/сек.

В некоторых экспериментах, где использовались интенсивные  $\sim 10^{12} \div 10^{13}$  частиц/сек/ пучки ускоренных ионов, выявилась нестабильность работы применявшихся поверхностно-барьерных детекторов, которая выражалась в сильном возрастании обратного тока во время облучения мишени пучком ионов. Рост тока наблюдался сразу же после начала облучения. После прекращения потока ионов ток детектора постепенно восстанавливался. Характерно быстрое восстановление тока при напуске в камеру атмосферного воздуха. Такое поведение в большей или меньшей степени наблюдалось практически для всех детекторов. Нередко обратный ток возрастал до  $40 \div 100$  мкА уже через 1-2 часа работы на пучке, что делало невозможным продолжение эксперимента.

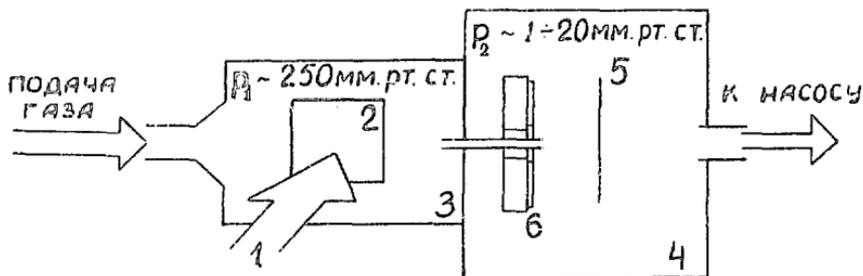


Рис. 1. Схема установки с использованием газового соби-  
рания продуктов реакций: 1 - пучок ионов; 2 - мишень;  
3 - реакционная камера; 4 - регистрационная камера;  
5 - сборник; 6 - кольцевой детектор.

Ранее отмечалось подобное поведение детекторов при работе на пучке дейтронов в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм рт.ст. и при облучении детекторов протонами малых энергий [2].

Быстрое восстановление обратного тока до первоначального значения при напуске в камеру воздуха указывает на то, что наблюдаемый эффект связан с воздействием радиации не на объем полупроводника, а на его поверхность. Одной из возможных причин изменения характеристик детекторов может быть воздействие ионов газа на поверхность детектора. В данной работе изучалось влияние ионизованного газа на величину обратного тока поверхностно-барьерных детекторов различного типа.

### Результаты эксперимента

Нами использовалась методика, аналогичная описанной в работе [3]. Блок-схема установки изображена на рис. 2. Для получения ионизованного газа под колпачком вакуумной установки УВР-2М при давлении  $10^{-1}$  мм рт.ст. создавался электрический разряд. Детектор помещался под колпачок вакуумного поста вблизи анода. Так как основное падение потенциала приходится на прикатодную область разрядного промежутка, то такое расположение

детектора обеспечивает попадание на его поверхность ионов с энергией ниже энергии катодного распыления. Была предусмотрена возможность разделения потока на детектор положительных ионов и отрицательно заряженных частиц.

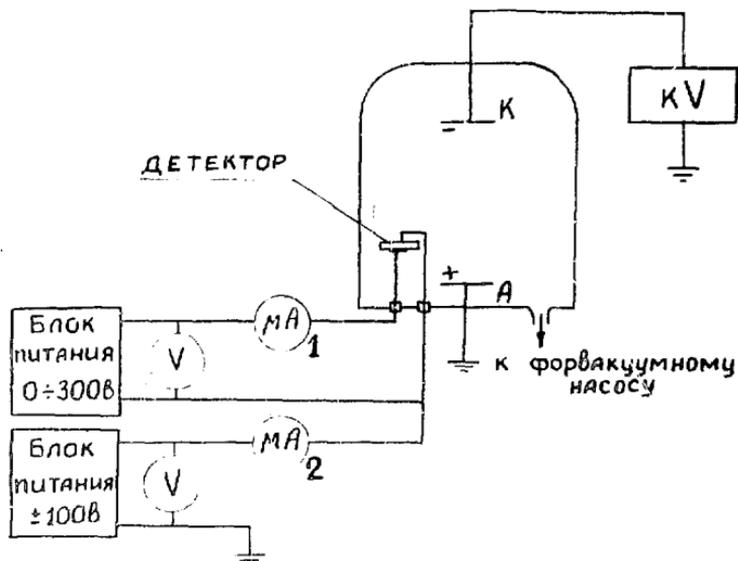


Рис. 2. Общая блок-схема установки для изучения влияния ионизованного газа на обратный ток детекторов.

Это достигалось путем подачи от отдельного источника питания на передний электрод детектора напряжения, изменяющего потенциал на поверхности в пределах  $\pm 100$  В по отношению к аноду разрядной камеры. С помощью микроамперметра 1 измерялся обратный ток детектора, микроамперметр 2 измерял поток положительно или отрицательно заряженных частиц на детектор.

Исследовались детекторы, отличающиеся типом проводимости исходного материала и способом изготовления /рис. 3/.

Первую группу составили детекторы, изготовленные по кремниевой технологии /4/, с открытым краем p-n-перехода /рис. 3а/.

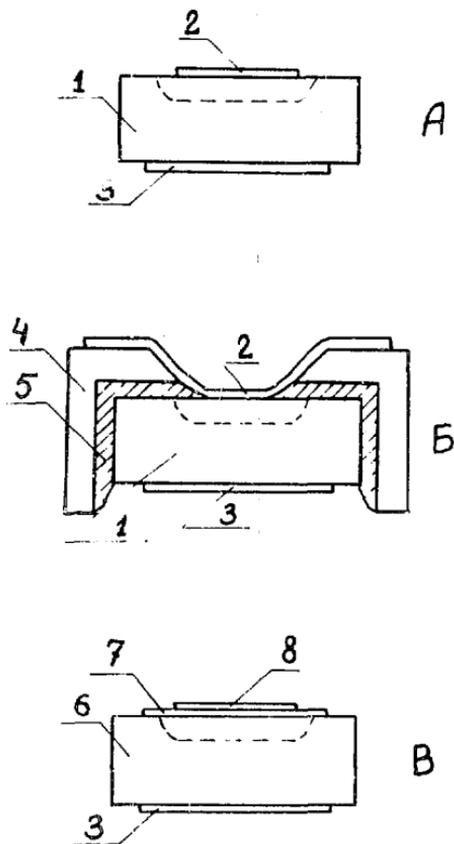


Рис. 3. Схема детекторов из кремния *n*-типа с незащищенным краем перехода /А/; с защитой края перехода /Б/; из кремния *p*-типа /В/: 1 - кремний *n*-типа; 2 - золотой контакт 40-70 мкг/см<sup>2</sup>; 3 - никелевый контакт; 4 - цилиндрическая оправка /плексиглас, керамика/; 5 - герметизация края перехода; 6 - кремний *p*-типа; 7 - пленка SiO<sub>2</sub> /20-40 мкг/см<sup>2</sup>/; 8 - алюминиевый контакт.

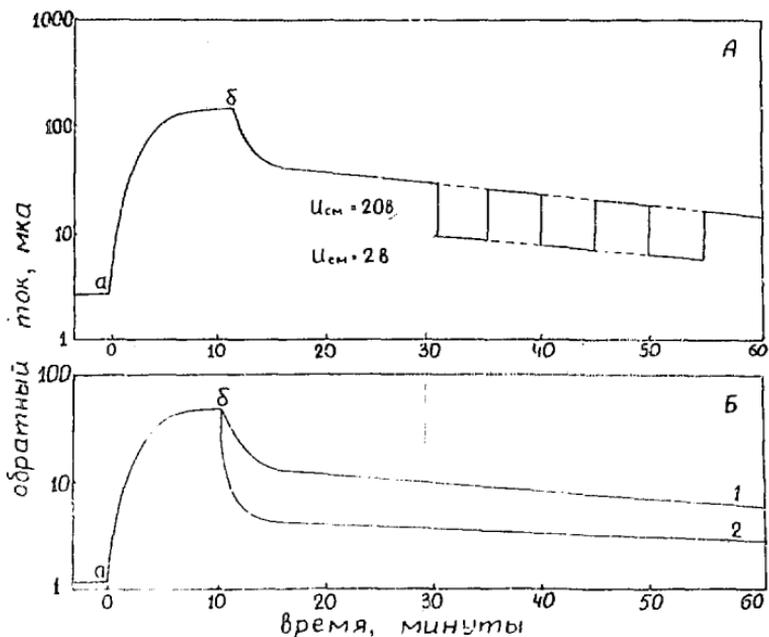


Рис. 4. Воздействие положительных ионов на величину обратного тока детекторов из кремния  $n$ -типа с незащищенным краем перехода. Участок "а-б" - облучение ионами, в момент времени 10 мин/точка "б"/ разряд выключен и происходит восстановление. А - восстановление при напряжении смещения 20 В /верхний участок кривой/ и 2 В /нижний участок кривой/. Б - восстановление тока при давлении  $10^{-1}$  мм рт.ст. /кривая 1/ и при атмосферном давлении /кривая 2/.

На рис. 4а показано воздействие положительных ионов на величину обратного тока одного из таких детекторов и восстановление обратного тока при давлении  $10^{-1}$  мм рт.ст., напряжении на переходе 20 В /верхний участок кривой/ и напряжении на переходе 2 В /нижний участок кривой/. Ток положительных ионов составлял 0,5 мкА. В момент  $t = 0$  /точка "а"/ включался разряд. Сразу же начинался быстрый рост обратного тока. Через 3-4 мин ток вырастал на 1,5-2 порядка. Затем рост за-

медлялся, и примерно через 10 мин достигалось насыщение /точка "б"/. В этот момент разряд прекращался, и ток детектора начинал падать. Первоначальное значение тока достигалось лишь через несколько часов восстановления при  $p = 10^{-1}$  мм рт.ст. Чистый атмосферного воздуха под колпак вакуумной установки приводит к очень резкому спаду тока в первые несколько минут до величины, всего лишь в несколько раз превышающей первоначальное значение тока /рис. 4б, кривая 2/. Окончательное восстановление происходит с постоянной времени такой же, как и при  $p = 10^{-1}$  мм рт.ст. /рис. 4б, кривая 1/.

При воздействии на детектор электронов /отрицательных ионов/ наблюдаем качественно отличную картину /рис. 5, кривая 1/. В момент времени, обозначенный на рисунке точкой "в", потенциал передней поверхности детектора был таким, что на нее могли попадать лишь отрицательные заряды. При этом ток мгновенно принимал

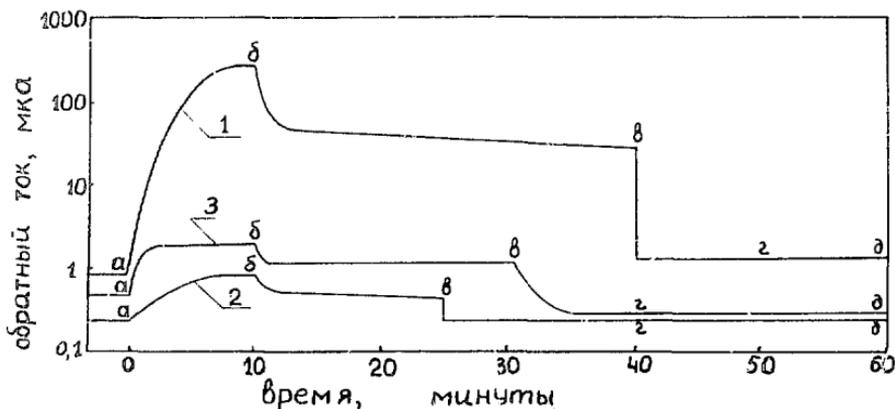


Рис. 5. Воздействие ионизованного газа на детекторы из кремния n-типа с незащищенным краем перехода /кривая 1/, с защитой края перехода /кривая 2/ и на детекторы из кремния p-типа /кривая 3/. Для всех детекторов  $U_{см} = 20$  В. Участок "а-б" - облучение положительными ионами; "б-в" - восстановление при  $p = 10^{-1}$  мм рт.ст.; "в-г" - облучение электронами; "г-д" - выдержка без разряда при  $p = 10^{-1}$  мм рт.ст.

свое первоначальное значение и не менялся после прекращения потока электронов /участок "г-д"/.

Помимо исследования изменения тока во времени при фиксированном значении напряжения смещения для всех детекторов, измерялась вольт-амперная характеристика на различных этапах восстановления после воздействия на поверхность детекторов положительно или отрицательно заряженными частицами. На рис. 6а показан ход вольт-амперных характеристик для одного из детекторов первой группы в трех случаях: первоначальная /1/, после облучения отрицательно заряженными частицами /2/ и после облучения положительными ионами /3/. Воздействие электронов /отрицательных ионов/ мало влияет на ход зависимости обратного тока детектора от напряжения, в то время как воздействие положительных ионов приводит к тому, что при  $U_{см} = 5 \div 10 \text{ В}$  наступает пробой.

Вторая группа детекторов была изготовлена также из  $n$ -кремния, но с защитой края перехода /рис. 3б/. У детекторов этой группы положительные ионы вызывают незначительный рост обратного тока /рис. 5, кривая 2/. Так, если у детекторов первого типа ток возрастает в 100 и более раз, то здесь происходит увеличение тока всего лишь в 2-3 раза. Восстановление происходит с той же постоянной времени, что и для детекторов первой группы. Воздействие электронов /отрицательных ионов/ практически мгновенно возвращает ток детектора к исходному значению.

Ход вольт-амперных характеристик для детекторов этой группы показан на рис. 6б.

Детекторы третьей группы /рис. 3в/ были изготовлены из  $p$ -кремния по технологии, описанной в работе /5/. Воздействие положительных ионов вызывает у детекторов этой группы незначительное увеличение обратного тока /рис. 5, кривая 3/. Следует отметить, что насыщение обратного тока при облучении положительными ионами наступает быстрее, чем для детекторов, изготовленных из кремния  $n$ -типа проводимости. После прекращения облучения /точка "б"/ при давлении  $10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$  наблюдается уменьшение обратного тока до значений, примерно соответствующих первоначальному значению тока, когда детектор не под-

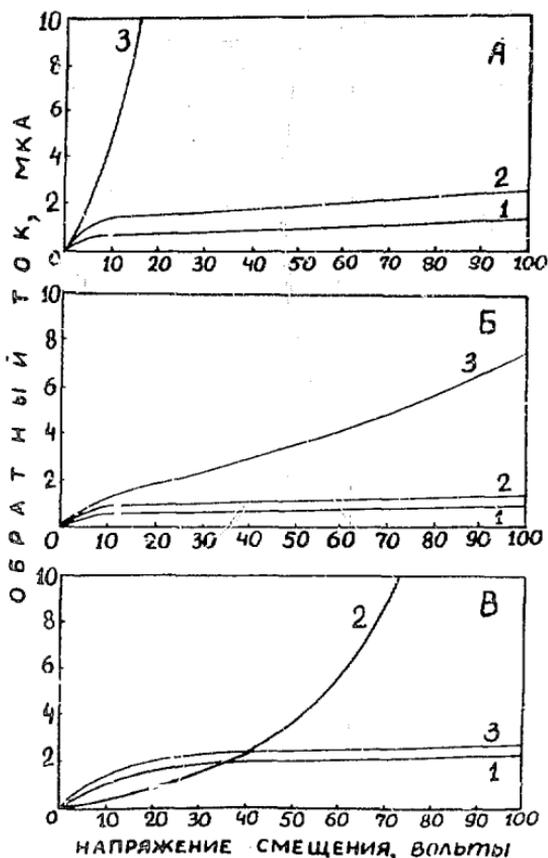


Рис. 6. Зависимость обратного тока детекторов от напряжения смещения. А - детекторы из кремния  $p$ -типа с незащищенным краем перехода, Б - детекторы из кремния  $p$ -типа с защитой края перехода, В - детекторы из кремния  $n$ -типа: 1 - первоначальная зависимость, 2 - после облучения электронами, 3 - после облучения положительными ионами.

вергался воздействию положительных ионов. Скорость уменьшения тока примерно соответствует скорости его увеличения при облучении положительными ионами. В отличие от картины, наблюдаемой при исследовании детек-

торов первых двух групп, после первоначального скачка ток далее не падает при выдержке детектора при давлении  $10^{-1}$  мм рт.ст., медленная составляющая в релаксационном процессе восстановления отсутствует.

Облучение электронами приводит к достаточно быстрому спаду тока до значений даже более низких, чем первоначальная его величина. Дальнейшее облучение электронами не влияет на полученную в начальный период облучения величину тока. Выдержка детектора без разряда при давлении  $10^{-1}$  мм рт.ст. после прекращения облучения электронами /участок "г-д"/ за указанное на рис. 5 время практически не вносит никаких изменений в величину обратного тока.

Вольт-амперные характеристики для одного из детекторов этой группы показаны на рис. 6в. Облучение положительными ионами мало влияет на величину тока и ход вольт-амперной характеристики. Облучение электронами приводит к быстрому росту тока. Отметим, что пробой в этом случае наступает при более высоком напряжении, чем для детекторов из кремния  $n$ -типа после облучения их положительными ионами.

### Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты позволяют сделать лишь качественные выводы о влиянии ионизованного газа на поверхность детекторов. Количественная интерпретация затрудняется тем, что исследовались образцы, изготовленные в разное время, из различных материалов, по различной технологии. Это приводит к тому, что поведение детекторов отличается не только количественно, но даже и качественно. Для одного и того же образца результаты зависят от его предыстории.

В целом поведение поверхностно-барьерных детекторов в среде ионизованного газа можно удовлетворительно объяснить на основе модели для неактивированных полупроводниковых приборов с газовым наполнением /6,7/. Согласно этой модели ионы газа сорбируются на поверхности полупроводника. В результате абсорбции ионов или в результате обмена зарядом между ионами и уже

присутствующими поверхностными примесями поверхность заряжается. Это приводит к изменению потенциала поверхности, следовательно, и к изменению ее проводимости. На поверхности полупроводника могут появляться обогащенные или обедненные основными носителями слоев, инверсионные слои или каналы проводимости.

Положительный заряд, который появляется в результате абсорбции положительных ионов газа, приводит к тому, что на поверхности  $n$ -кремния возникает обогащенный слой, а на поверхности  $p$ -кремния - инверсионный слой. Отрицательный поверхностный заряд приводит к противоположному эффекту. Из экспериментальных данных видно, что поверхностные эффекты вызываются как положительными ионами, так и электронами, но ионы являются более эффективными при образовании поверхностных состояний. Это различие обусловлено, по-видимому, различной подвижностью положительных ионов и электронов, а также особенностями строения поверхностного слоя, т.е. особенностями тех дефектов, на которых локализуются ионы или электроны.

Обогащение открытой поверхности  $n$ -кремния вблизи металлического электрода приводит к сужению области пространственного заряда на поверхности детектора. Сужение области пространственного заряда при одном и том же напряжении на переходе эквивалентно возрастанию напряженности электрического поля на поверхности детектора. В результате роста поля наступает поверхностный пробой. Напряжение пробоя снижается до нескольких вольт.

Согласно данным работы /8/ на основании хода вольт-амперной характеристики обратносмещенного полупроводникового прибора можно сделать вывод о состоянии поверхности. В случае инверсионного слоя обратный ток детектора должен вначале очень резко увеличиваться с ростом напряжения, а затем достигать насыщения. Образование слоев обогащения приводит к тому, что при малых обратных напряжениях величина тока мала, а с ростом напряжения наблюдается пробой.

Вольт-амперные характеристики детекторов из  $n$ -кремния с открытым краем  $p$ - $n$ -перехода /рис.6а/ свидетельствуют о пробое, что подтверждает предполо-

женне об образовании слоев обогащения при абсорбции положительно заряженных частиц на поверхности детектора. Как и следовало ожидать, бомбардировка образца электронами приводит к быстрой нейтрализации положительного поверхностного заряда, что ведет к уменьшению обратного тока до первоначального значения.

Восстановление обратного тока детекторов после прекращения бомбардировки положительными ионами, вероятно, связано с восстановлением термодинамического равновесия на поверхности полупроводника<sup>/9/</sup> и зависит от концентрации активных компонент среды, окружающей детектор /кислород, следы воды/. Это подтверждается тем, что восстановление тока сразу после прекращения разряда при атмосферном давлении происходит более резко, чем при  $p = 10^{-1}$  мм рт.ст. Независимость скорости восстановления от давления в камере и от напряжения смещения на участке, который следует за резким спадом тока, по-видимому, обусловлена диффузией к поверхности детектора компонент газа, находящихся в нейтральном состоянии.

Защита края перехода какими-либо компаундами предотвращает абсорбцию ионизованного газа, что приводит к сохранению свойств детектора. Незначительный рост тока, наблюдавшийся для таких образцов, скорее всего, связан с недостаточной герметизацией поверхности детекторов, хотя нельзя не учитывать возможности изменения свойств поверхности в результате диффузии сквозь тонкую пленку золота.

Оказалось, что повышенной стабильностью обладают детекторы, изготовленные из  $p$ -кремния. Как следует из принятой нами модели, действие положительных ионов и электронов на детекторы из  $p$ -кремния должно быть противоположно тому, что наблюдается для детекторов из  $n$ -кремния. Однако в эксперименте не было обнаружено такого большого возрастания тока, как для незащищенных детекторов из  $n$ -кремния. Причиной такого отличия может быть как конструкция самого детектора /наличие пленки  $\text{SiO}_2$ , выступающей за пределы алюминиевого электрода на несколько миллиметров/, так и то обстоятельство, что эффективность воздействия электро-

нов на поверхность полупроводника намного меньше эффективности положительных ионов.

Присутствие в пленке  $\text{SiO}_2$  большого положительного заряда приводит к тому, что для его нейтрализации требуется воздействие более интенсивными или более продолжительными потоками электронов. Лишь после захвата большого отрицательного заряда на поверхности может появиться обогащенный дырками слой, что приведет к пробое. Поэтому, в противоположность наблюдаемому для детекторов из  $n$ -кремния, при облучении электронами при напряжении смещения  $20 \text{ В}$  происходило умещение, а не увеличение тока. Однако это не противоречит принятой нами модели. Действительно, как видно из рис. 6, вольт-амперная характеристика обратносмещенного детектора после облучения электронами свидетельствует о пробое, и при больших напряжениях ток детектора существенно превышает значение тока до облучения.

Некоторое возрастание тока после бомбардировки положительными ионами обусловлено усилением имеющегося на поверхности детектора инверсионного слоя. Но поскольку открытая поверхность детектора отделена на несколько миллиметров от металлического электрода выступающей из-под него пленкой  $\text{SiO}_2$ , то действие положительного заряда смягчается.

Таким образом, поведение поверхностно-барьерных детекторов различных типов в среде ионизованного газа хорошо объясняется на основе предположения об абсорбции заряженных частиц на поверхности полупроводника. Кроме того, возможно и влияние озона и низших окислов азота, образующихся в электрическом разряде или при воздействии ядерных излучений.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянный интерес к работам по полупроводниковым детекторам.

#### *Литература*

1. В.А.Друин и др. *Ядерная физика*, 13, вып. 2, 251 /1971/.
2. G.Amsel, P.Baruch, O.Smulkowski. *IRE Trans.*, NS-8, N1, 21(1961).

3. P. J. Estrup. *IEEE Trans.*, NS-12, N1, 431 (1965).
4. Ю. К. Акимов, А. И. Калинин, В. Ф. Кушнирук, Х. Юнг-клауссен. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Атомиздат, Москва, 1967.
5. В. Ф. Кушнирук, Р. А. Никитина, Ю. П. Харитонов. ФТП, 7, 1396 /1973/.
6. В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. Атомиздат, Москва, 1969.
7. Дж. Митчел, Д. Уилсон. Поверхностные эффекты в полупроводниковых приборах, вызванные радиацией. Перев. с англ., Атомиздат, Москва, 1970.
8. T. M. Buck. *Nuclear Science Series Report No 32. National Academy of Sciences, Washington D.C.* 1961, p. III.
9. Ю. В. Федорович, В. А. Фогель. ФТП, 3, 840 /1969/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 сентября 1974 года.