

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Эта чит. зала

7633

6 - 7633

В.Ф.Кушнирук, А.В.Рыхлюк, Ю.П.Харитонов

О СПЕКТРОМЕТРИИ α -ЧАСТИЦ
С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ
ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

6 - 7633

В.Ф.Кушнирук, А.В.Рыхлюк, Ю.П.Харитонов

**О СПЕКТРОМЕТРИИ α -ЧАСТИЦ
С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ
ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ПониЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Направлено в ПТЭ

Исследования, проведенные в последние годы с Si(Li)^{/1/} - и Ge(Li)^{/2/} - детекторами, дают сравнительно полную картину поведения компенсированных детекторов при пониженных температурах. В ранних работах ^{/3,4/} по некомпенсированным детекторам отмечалось лишь улучшение разрешающей способности, связанное с уменьшением обратного тока. Более подробно поведение таких детекторов исследовано при температуре ниже 30 °К, где наблюдается резкое уменьшение амплитуды импульса ^{/5/}.

При комнатной температуре редко реализуются условия для получения наилучшей разрешающей способности в спектрометрии тяжелых заряженных частиц кремниевыми поверхностно-барьерными детекторами. Ограничивающим фактором является обратный ток, который затрудняет, а иногда делает и невозможным точное измерение тонкой структуры в спектрах α -частиц.

С целью определения оптимальных условий для спектрометрии α -частиц в данной работе были исследованы характеристики шести поверхностно-барьерных кремниевых детекторов в интервале температур 300 - 120 °К. Изучалась зависимость разрешающей способности детекторов от температуры и напряжения смещения, а также связь энергетического разрешения с величиной обратного тока и амплитудой импульсов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕТЕКТОРОВ

Для исследования температурной зависимости детекторов использовалась камера, схематически показанная на рис. 1. Детекторы 7 крепятся на массивном мед-

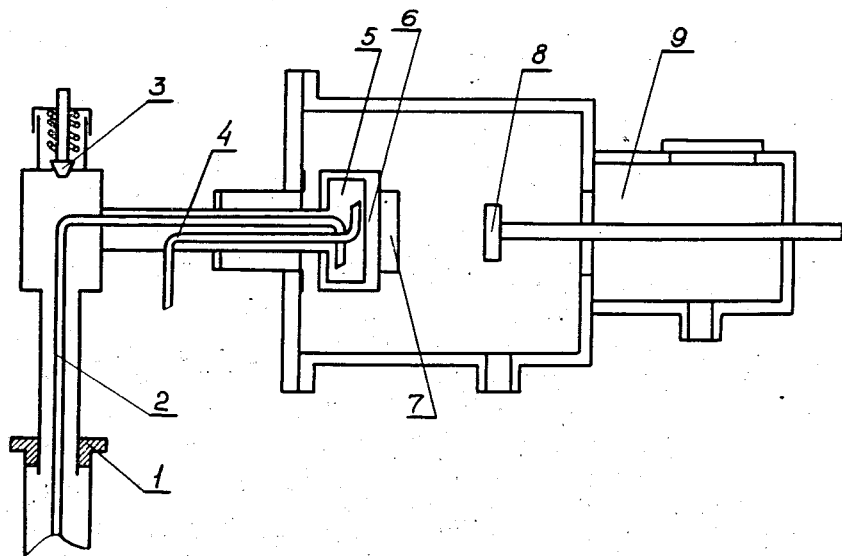


Рис. 1. Камера для охлаждения детекторов: 1 - уплотнение горловины сосуда Дьюара, 2 - трубка подачи азота, 3 - клапан для уравнивания давления, 4 - трубка для выхода азота, 5 - полость для накопления азота, 6 - охлаждаемое основание, 7 - детектор, 8 - источник α -частиц, 9 - камера шлюза.

ном основании 6, охлаждаемом с помощью жидкого азота, поступающего непосредственно в полость 5 основания. Благодаря избыточному давлению паров азота, создаваемому в сосуде Дьюара с помощью уплотнения 1, жидкий азот поднимается по медной трубке 2, накапливается в полости 5 и охлаждает детектор 7. Избыток азота под давлением выбрасывается через медную трубку 4. Регулировка температуры осуществляется с помощью клапана 3, который может уравнивать давление в сосуде Дьюара с атмосферным давлением.

Температура детекторов измерялась калиброванной терпарой и потенциометром КП-59. Изменение температуры за время набора спектра не превышало $1,5^\circ\text{C}$. Минимальное значение температуры на корпусе детектора - 150°C . При измерениях в камере поддерживался вакуум $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. с помощью постоянной откачки форвакуумным насосом через ловушку с жидким азотом.

Усиление сигналов и набор спектров α -частиц осуществлялся с помощью зарядочувствительного предусилителя УПЗ-53 и тракта линейного усиления, разработанных в Лаборатории ядерных реакций ^{6/}, а также многоканального анализатора импульсов LP-4050. Вывод данных осуществлялся посредством цифрпечатающего устройства или двухкоординатного самописца. Стабильность и шумы электронного тракта контролировались генератором точной амплитуды NZ-225. Во всех измерениях спектров применялось формирование импульсов в основном усилителе одной интегрирующей и одной дифференцирующей RC-цепочками с постоянной времени $\tau = 1$ мксек.

Используемые в эксперименте детекторы изготовлялись по обычной методике ^{7/}. Образцы кремния с нанесенными контактами прижимались к медному основанию фторопластовой крышкой. Между контактом детектора и медным основанием оправки помещалась прокладка из индия, обеспечивающая надежный тепловой контакт. Сигнал с золотого электрода снимался с помощью тонкой проволоочки, прикрепленной проводящей серебряной пастой. Такие контакты обеспечивали многократное охлаждение и согревание детекторов без нарушения их характеристик.

Некоторые характеристики детекторов при комнатной температуре и напряжении смещения 100 В, а также параметры исходного материала даны в табл. 1. Одинаковые буквенные индексы в обозначениях детекторов соответствуют материалу одного и того же изготовителя.

Таблица 1. Свойства детекторов и исходного материала.

Номер детектора	S мм ²	$I_{обр}$ мкА	C пФ	W мм	ρ ом.см.	τ месяц	$N_d \cdot 10^{-3}$ см ⁻³
A-1	100	0,49	47,0	230	1800	1000-1200	16
B-2	80	0,79	25,5	300	3400	1050-900	8
B-3	100	3,20	32,5	320	3900	1050-900	8
A-4	150	1,07	60,0	210	1600	1200-800	14
B-5	200	1,40	59,0	270	2500	800-300	12
Г-6	30	0,47	15,0	180	1300	500-800	20

S - площадь перехода, $I_{обр}$ - обратный ток, C - емкость детектора, W - толщина чувствительного слоя, ρ - удельное сопротивление исходного материала, τ - время жизни избыточных носителей, N_d - плотность дислокаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Зависимость обратного тока детекторов от температуры при напряжении 100 В показана на рис. 2. Обратный

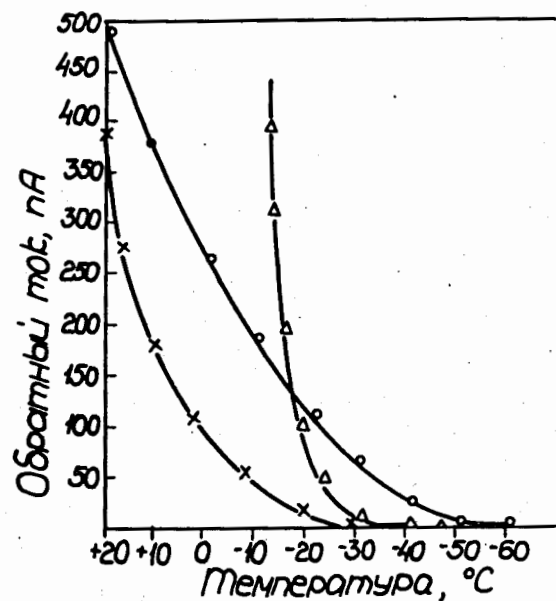


Рис. 2. Зависимость обратного тока от температуры. Напряжение смещения 100 В. \times — \times - детектор Г-6; o — o - детектор А-1; Δ — Δ - детектор Б-3.

ток всех детекторов быстро уменьшается с понижением температуры. При температуре $-30 \div -50$ °C ток не превышает 10^{-8} А и практически не дает вклада в ухудшение разрешающей способности при спектрометрии α -частиц с энергией в несколько мегаэлектронвольт.

Зависимость обратного тока от температуры можно сопоставить с изменением шумов. Такое сравнение шумов и обратного тока детектора Б-3 показано на рис. 3. Видно, что снижение шумов на начальном участке температурной зависимости обусловлено уменьшением обратного тока. Участок кривой с практически неизменной величиной шумов определяется шумами электроники с

учетом емкости детектора. Значения емкости для всех детекторов приведены в табл. 1.

В отличие от температурной зависимости обратного тока зависимость разрешающей способности /рис. 4/ оказалась различной для разных детекторов. По характеру этой зависимости детекторы разбиты на три группы.

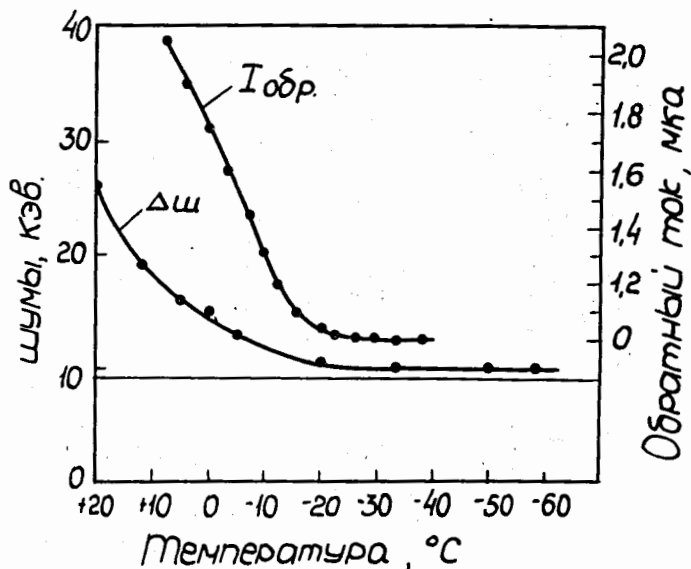


Рис. 3. Сравнение температурной зависимости обратного тока и шумов детектора Б-3. Горизонтальная линия соответствует шумам электроники при внешней емкости, равной емкости детектора.

На рис. 4а показан температурный ход разрешающей способности для детекторов Б-2, Б-3, А-4. Характерной особенностью этих детекторов является широкий минимум в температурной зависимости разрешающей способности.

На рис. 4б приведена аналогичная зависимость для детекторов второй группы /детекторы В-5, Г-6/. Характерной особенностью этой группы детекторов является плавное улучшение разрешающей способности при понижении температуры.

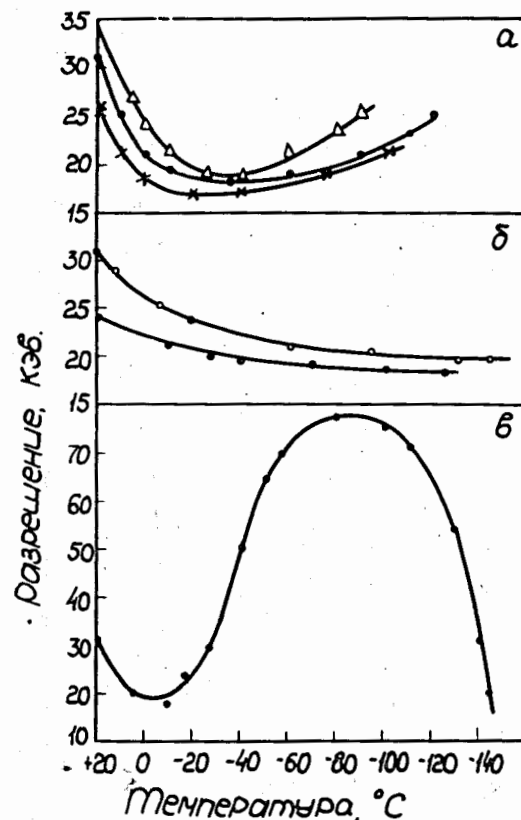


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности от температуры: а/ детекторы Б-2, Б-3, А-4; б/ детекторы В-5, Г-6; в/ детектор А-1.

Аномальная зависимость разрешающей способности от температуры обнаружена для детектора А-1, отнесенного к третьей группе /рис. 4в/. Он, как и все другие детекторы, имеет участок, где разрешающая способность улучшается с понижением температуры, затем наблюдается быстрое ухудшение разрешающей способности от 20 кэВ при температуре -20°C до ≈ 80 кэВ при температуре -80°C . После -80°C разрешающая способность опять начинает улучшаться и лишь при температу-

ре -140°C приближается к значению, полученному при комнатной температуре.

Необходимо отметить, что аномальную зависимость имеет не только разрешающая способность детекторов, изготовленных из данного слитка кремния, но и форма спектральных линий. На рис. 5а показан спектр α -частиц ^{241}Am и ^{244}Cm при температуре -50°C . Как видно,

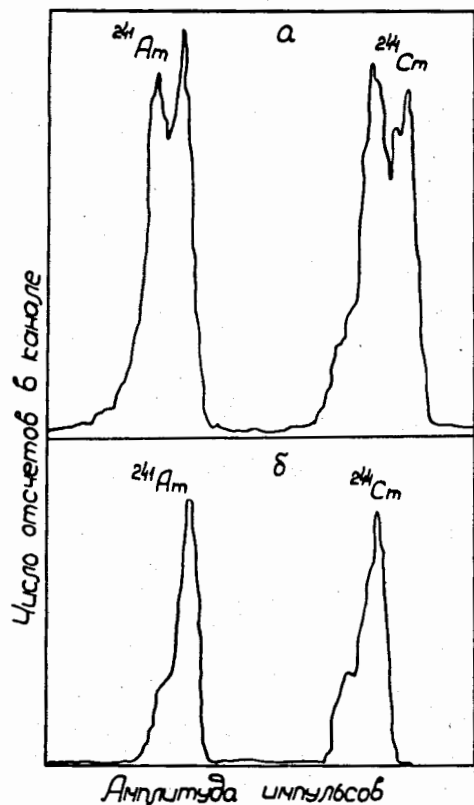


Рис. 5. Спектр α -частиц ^{241}Am и ^{244}Cm для детектора А-1 при температуре -50°C и напряжении смещения 100 В: а/ спектр снят без коллиматора; б/ спектр снят с коллиматором $\phi=2$ мм.

линии в спектре не только уширяются, но становятся очень несимметричными, появляются дополнительные пики. Несимметричность линий и раздвоение пиков, вероятно, связаны с сильной неоднородностью параметров исходного кремния, проявляющейся при охлаждении детектора. Это предположение подтверждается тем, что на спектрах, полученных при облучении детектора через коллиматор $\phi = 2$ мм, линии имеют почти правильную форму /рис. 5б/.

На рис. 6 приведена типичная для всех трех групп зависимость разрешающей способности от напряжения смещения при нескольких значениях температуры. Кривые имеют характерный минимум при некотором значении напряжения.

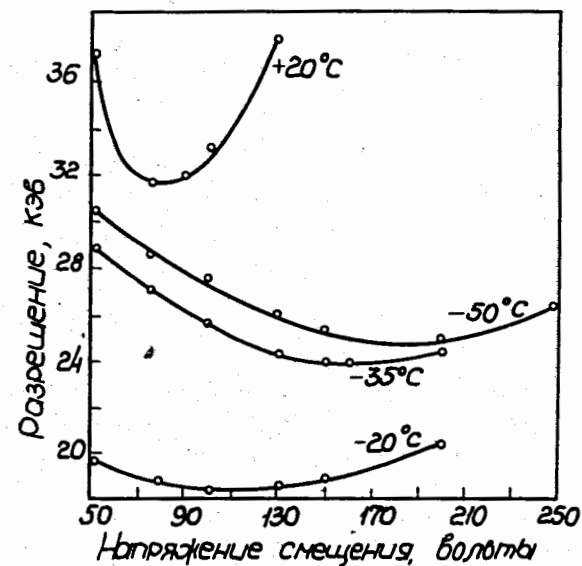


Рис. 6. Зависимость разрешающей способности от напряжения смещения при различных значениях температуры.

Кроме того, изучалось изменение амплитуды импульсов в зависимости от температуры. На рис. 7 приведены результаты для детектора Б-2, типичные для большей части детекторов, и изменение амплитуды для детектора А-1. Из рисунка видно, что характер зависимости для этих детекторов существенно меняется.

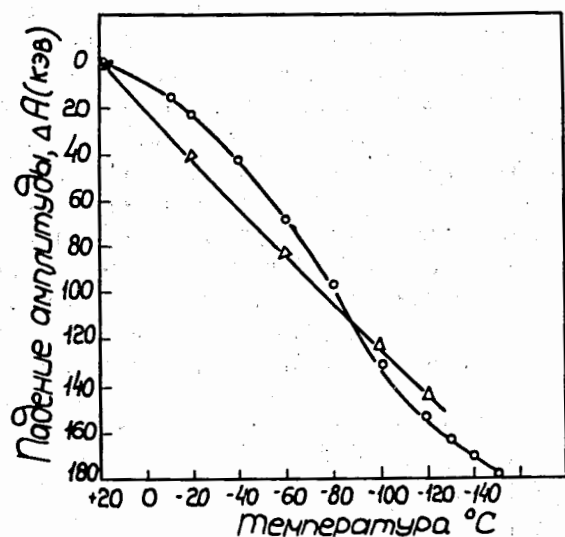


Рис. 7. Изменение амплитуды импульсов в зависимости от температуры. Δ — Δ - детектор Б-2, \circ — \circ - детектор А-1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Всю совокупность экспериментальных данных можно объяснить взаимодействием нескольких физических факторов, зависящих от температуры. К таким факторам необходимо отнести:

- 1/ обратный ток детекторов как объемный, так и поверхностный;
- 2/ дрейфовую скорость или подвижность носителей заряда;
- 3/ эффекты захвата носителей заряда на уровни прилипания и тепловой выброс носителей в зону проводимости или валентную зону;
- 4/ среднюю энергию, затрачиваемую на образование электронно-дырочной пары.

Резкое уменьшение обратного тока детекторов обусловлено уменьшением концентрации носителей, генерируемых в области пространственного заряда. Причем

уменьшение обратного тока до значений $< 10^{-8}$ А при охлаждении до $-30 \div -50$ °С наблюдается для всех детекторов независимо от величины тока при комнатной температуре /см. табл. 1/. Этот факт свидетельствует о сильной температурной зависимости не только объемной, но и поверхностной составляющей обратного тока.

Улучшение разрешающей способности для всех детекторов на начальном участке температурной зависимости, по-видимому, обусловлено в первую очередь уменьшением токовых шумов. Это хорошо подтверждается сравнением температурной зависимости шумов и обратного тока детектора Б-3 /рис. 3/.

Некоторое улучшение разрешающей способности на этом участке может быть связано также с увеличением подвижности носителей. Однако подвижность с понижением температуры растет не так резко по сравнению с уменьшением скорости генерации носителей. Это и определяет преобладающую роль обратного тока. С ростом подвижности можно связать лишь некоторое улучшение разрешающей способности при дальнейшем понижении температуры для детекторов второй группы.

Ухудшение разрешающей способности детекторов первой группы при температуре ниже -30 °С можно связать только с процессами собирания заряда, создаваемого частицей в чувствительной области детектора. Все остальные источники размытия линий слабо, либо совсем не зависят от температуры детектора /шумы электроники, статистика образования пар, флуктуации в мертвом слое и др./, либо их вклад уменьшается с понижением температуры /обратный ток детектора, дрейфовая скорость/.

Поскольку для электрически заряженных ловушек сечение захвата носителей заряда может быстро возрастать с понижением температуры благодаря кулоновскому притяжению /8/, то ухудшение разрешающей способности с понижением температуры связано или с уменьшением времени жизни избыточных носителей, или с их локализацией на ловушках.

О важной роли процесса захвата носителей свидетельствует также тот факт, что напряжение, при котором наблюдается наилучшее значение разрешающей способности,

смещается в сторону все более высоких значений с понижением температуры /см. рис. 6/.

Улучшение разрешающей способности детектора А-1 при повышении температуры, несмотря на рост токовых шумов, по-видимому, можно объяснить лишь захватом носителей тока на сравнительно глубокий уровень и тепловым выбросом их в зону проводимости или валентную зону. При пониженной температуре захваченные ловушкой носители остаются на ней на время, значительно большее, чем среднее время их дрейфа в электрическом поле и постоянная времени формирующих цепочек электронной системы. При повышении температуры среднее время пребывания носителей в захваченном состоянии быстро уменьшается, поскольку вероятность пребывания пропорциональна $\exp(-E_t/kT) / E_t$ - энергия активации ловушки/. В результате наблюдается тепловой выброс носителей в зону проводимости или валентную зону. Подобное явление захвата носителей на глубокие уровни наблюдалось рядом авторов ^{/2,9/} в Ge(Li) - детекторах при более низких температурах. В работе ^{/1/} имеется также слабое указание на тепловой выброс носителей из более глубоких уровней в Si(Li) - детекторах.

Захват носителей и тепловой выброс их в зоны подтверждается необычным изменением амплитуды импульсов детектора А-1, показанным на рис. 7. Уменьшение амплитуды детектора Б-2, не имеющего аномалий в ходе разрешающей способности, происходит со скоростью $\approx 0,02\%$ на $^{\circ}\text{C}$. Это хорошо соответствует увеличению средней энергии на образование электронно-дырочной пары из-за температурной зависимости ширины запрещенной зоны ^{/10/}. Для детектора А-1 с аномальной зависимостью разрешающей способности наблюдается более быстрый по сравнению с детектором Б-2 спад амплитуды, обусловленный, вероятно, захватом носителей. Причем интервал более быстрого падения амплитуды совпадает с интервалом температур, где наблюдается сильное ухудшение разрешающей способности.

Экспериментальные результаты не позволяют сделать вывод о конкретном типе захваченного заряда. Однако из рассмотрения движения электронов и дырок в области

пространственного заряда можно предположить, что захватываются электроны. Поскольку α - частицы имеют пробег $R_{\alpha} \approx 25$ мкм, то время движения дырок в области пространственного заряда до попадания на электроды очень мало, так как дыркам в среднем необходимо пройти путь $d_h < R_{\alpha}$. Необходимо учитывать также то, что движение дырок происходит в области максимальной напряженности электрического поля. Время собирания электронов намного больше времени собирания дырок, так как им необходимо проходить путь $d_e \approx W$, который, как видно из табл. 1, примерно на порядок превышает R_{α} . Кроме того, электроны движутся в область слабого поля, что, в свою очередь, должно привести к увеличению времени собирания, а, следовательно, и к увеличению числа захваченных электронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Оптимальная температура при спектрометрии α - частиц поверхностно-барьерными детекторами лежит вблизи -30°C .

2. При охлаждении детекторов ниже оптимальной температуры существенное влияние на разрешающую способность оказывают процессы собирания зарядов. Наличие в исходном материале уровней с большим сечением захвата носителей при охлаждении может привести к значительному ухудшению разрешающей способности по сравнению с разрешением при комнатной температуре.

3. С понижением температуры наблюдается резкое уменьшение не только объемной, но и поверхностной составляющей обратного тока. Улучшение разрешающей способности с понижением температуры в основном связано с уменьшением обратного тока.

4. По характеристикам детекторов при комнатной температуре невозможно предсказать их поведение при охлаждении. Детекторы, изготовленные из разных слитков даже одного и того же изготовителя, могут по-разному вести себя при охлаждении.

Авторы благодарят академика Г.Н.Флорова за постоянный интерес к работам по полупроводниковым детекторам и С.Н.Алексееву за помощь при измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.Martini and T.A.McMath. *Nucl. Instrum. and Meth.*, 76, 1 (1969).
2. E.Sakai, H.L.Malm and I.L.Fowler "Semiconductor Nuclear Particle Detectors and Circuit", *National Academy of Sciences, Publ.* 1593, 101 (1969).
3. F.J.Walter, J.W.T.Dabbs and L.D.Roberts. *IRE Trans. NS-8, No. 1*, 79 (1961).
4. R.G.Grainger, J.W.Mayer and J.W.Oliver. *IRE Trans, NS-8, No. 1*, 116 (1961).
5. W.R.Gorde, S.R.Domen, A.T.Hirchfeld and Hoppes, *IEEE Trans. NS-12, No. 1*, 295 (1965).
6. А.М.Зубарева, Г.Г.Субботина, В.Г.Субботин. *Сообщения ОИЯИ, 13-4458, Дубна, 1969.*
7. Ю.К.Акимов, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук, Х.Юнгклауссен. *Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Атомиздат, Москва, 1967.*
8. V.L.Bonch-Bruevich and E.G.Landsberg, *phys. stat. sol.*, 29, 9 (1968).
9. M.M.El Shishini and W.Zobel. *IEEE Trans, NS-13, No. 3*, 359 (1966).
10. R.H.Pehl, F.S.Goulding, D.A.Landis and Lenzlinger. *Nucl. Instrum. and Meth.*, 59, 45 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
25 декабря 1973 года.