



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

---

В.В. Бредель, В.Л. Михеев, С.М. Поликанов

Д-704

КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ  
ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ЖФЭ, 1961, №6, с.44.

Дубна 1961

В.В. Бредель, В.Л. Михеев, С.М. Поликанов

Д-704

КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ  
ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Д. В. Бредель, В. Л. Михеев, С. М. Поликанов

Направлено в журнал  
"Приборы и техника эксперимента"

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## А н н о т а ц и я

Описывается метод изготовления детекторов заряженных частиц из  $n$ -кремния. Приводятся спектры осколков деления и  $\alpha$ -частиц, полученные с помощью этих детекторов. Исследовано поведение детекторов при различных температурах и в магнитном поле.

## В в е д е н и е

В последнее время сильно возрос интерес к полупроводниковым счетчикам с  $p-n$ -переходами. В различных лабораториях удалось изготовить детекторы этого типа, обладающие прекрасными спектрометрическими характеристиками<sup>/1-8/</sup>.

Полупроводниковые детекторы с  $p-n$ -переходами могут рассматриваться как своеобразные миниатюрные твердые ионизационные камеры. По сравнению с обычными газовыми ионизационными камерами, они обладают целым рядом серьезных преимуществ. В полупроводниковом счетчике протоны,  $\alpha$ -частицы, тяжелые ионы и осколки деления тормозятся в тонком слое вещества порядка десятков-сотен микрон. В этом слое удается создать электрическое поле с напряженностью порядка  $10^4$  в/см, подавая на детектор небольшое запирающее напряжение /смещение/. Благодаря этому возникающие при регистрации частиц импульсы имеют крутой передний фронт  $\sim 10^{-8}$  сек/. На образование одной пары зарядов в полупроводниковом детекторе затрачивается, примерно, в десять раз меньше энергии, чем в газовой ионизационной камере. За счет большого общего заряда, возникающего при торможении частицы в полупроводнике, может быть получено лучшее энергетическое разрешение, чем в газовых ионизационных камерах. Сравнительно большие импульсы, которые удается получить на небольших рабочих сопротивлениях, облегчают проблему защиты от помех. Полупроводниковые детекторы линейны в широкой области энергий от нескольких сот Кэв /протоны,  $\alpha$ -частицы/ до сотни Мэв /осколки деления, тяжелые ионы/. Достоинством  $p-n$ -детекторов является также возможность работы в вакууме, при низкой температуре и в сильных магнитных полях. Наконец, полупроводниковые счетчики значительно проще изготавливать, чем ионизационные камеры, и для их работы не требуется высокого напряжения. В определенных условиях, например, при регистрации таких короткопробежных частиц, как осколки деления, можно работать вообще без внешнего напряжения. Полупроводниковые детекторы имеют малые размеры /рис.1/, что весьма выгодно при проведении ряда экспериментов, например, при исследовании угловых распределений заряженных частиц. В некоторых случаях, однако, малые размеры детектора ограничивают возможности эксперимента. Это затруднение до некоторой степени можно преодолеть увеличением чувствительной поверхности путем последовательного соединения ряда детекторов.



Р и с. 1

### Изготовление детекторов

Изготовление полупроводниковых детекторов может при сравнительно небольших затратах осуществляться в любой ядерной лаборатории. Необходимо, однако, иметь хороший исходный материал в виде монокристаллов кремния высокой чистоты и однородности. Необходимо также принять меры предосторожности, чтобы не загрязнить кристалл малыми примесями в процессе его обработки.

В основу нашей технологии изготовления полупроводниковых детекторов была положена методика, разработанная Дирнлеем и Уайтхедом в Харуэлле<sup>17/</sup>.

Мы пользовались монокристаллами кремния  $n$ -типа с сопротивлением 140 ом-см. Кристаллы нарезались алмазной дисковой пилой на пластинки размером 5 x 5 x 1 мм или 2 x 2 x 1 мм таким образом, чтобы большая сторона соответствовала кристаллографической ориентации  $\langle 111 \rangle$ . Иными словами, пластинки нарезались таким образом, чтобы их большая сторона была перпендикулярна направлению роста кристалла. Дальнейшая обработка нарезанных кристаллов сводилась к следующим этапам:

1. Полировка образца до зеркального блеска на вращающемся круге, обтянутом шелком, с применением в качестве абразива мелкого порошка карбида кремния.

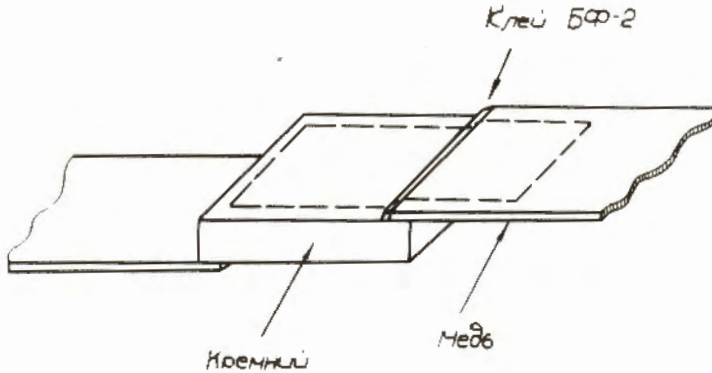
2. Промывка кристалла в чистой воде и затем кипячение в течение 10 минут в концентрированной азотной кислоте.

3. Травление в смеси кислот следующего состава: 2 части концентрированной / $\sim 80\%$ / азотной кислоты, 1 часть ледяной уксусной кислоты, 1 часть 40% плавиковой кислоты. Кислоты смешиваются в тefлоновом стаканчике. Объем травителя составляет  $\sim 20 \text{ см}^3$  на кристалл. Смесь охлаждается до температуры тающего льда. Травление ведется в течение  $\sim 10$  минут при постоянном помешивании раствора для удаления пузырей, образующихся на кристалле.

4. Промывка образца производится последовательным разбавлением травителя дистиллированной водой. Разбавленный раствор сливается так, чтобы кристаллы не попадали на воздух. Промывку необходимо производить очень тщательно. На последних стадиях промывки применяется бидистиллят.

5. Промытый кристалл осушается фильтровальной бумагой и переносится в сушильный шкаф / $\sim 100^\circ \text{C}$  /.

6. К кристаллу с двух сторон /рис. 2/ приклеиваются клеем БФ-2 листочки из медной фольги толщиной 100 мк.



Р и с. 2.

Медные листочки заходят на 0,5-1мм на кристалл. Необходимо следить за тем, чтобы клей обеспечивал плавный переход с кристалла на медную фольгу. Полимеризация клея производится в сушильном шкафу.

7. Кристалл с приклеенными медными листочками зажимается между двумя слюдяными пластинками, в одной из которых имеется прямоугольное отверстие

тие. Оно располагается над кристаллом в соответствии с пунктиром на рис. 2.

8. На кристалл и фольгу распыляется золото через отверстие в слюдяной пластинке. Распыление производится при вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм Hg. Между молибденовой лодочкой и кристаллом, находящимися на расстоянии 7 см друг от друга, может вводиться магнитная заслонка, на которую распыляется первая порция золота. Для контроля толщины распыленного слоя рядом с кристаллом устанавливается стеклянная пластинка с медными контактами, служащая для измерения сопротивления напыленного слоя золота. Толщина напыленного слоя составляет обычно 100-200 мкг/см<sup>2</sup>, но может быть сделана и меньше.

9. На вторую сторону кристалла напыление золота производится точно так же, как на первую.

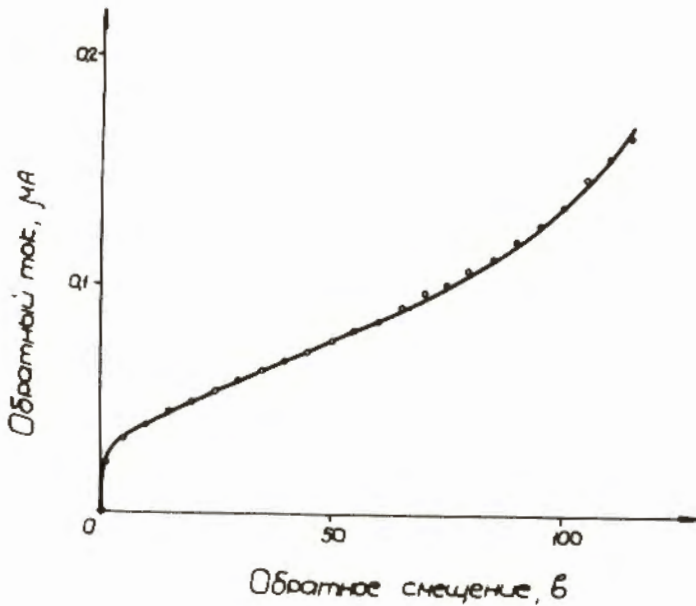
10. После напыления золота для обеих сторон детектора измеряется энергетическое разрешение при облучении  $\alpha$ -частицами и максимальное смещение, которое можно без пробоя подавать на детектор. В результате этого измерения определяется лучшая из двух сторон, которая в дальнейшем используется в качестве рабочей.

11. Готовый детектор заделывается в пластмассовую оправу /рис. 1/. В качестве клея используется БФ-2, полимеризуемый в сушильном шкафу.

#### Исследование свойств детекторов

Качество изготовленных  $p-n$ -детекторов оценивалось по энергетическому разрешению /ширина пика на полувысоте/ для  $\alpha$ -частиц и по максимальному смещению, которое можно без пробоя подавать на детектор. Эти характеристики довольно значительно меняются от детектора к детектору даже в том случае, когда исходные кристаллики вырезаны из одного и того же монокристалла кремния и проходят одинаковую обработку. Мы склонны приписать эти флуктуации неоднородностям в исходном монокристалле. На это указывает и тот факт, что детекторы с хорошими характеристиками получаются чаще из кристалликов малого размера. Энергетическое разрешение изготовленных детекторов колебалось для  $\alpha$ -частиц с энергией 6 Мэв от 5% до 1,5%, максимальное смещение - от 30 до 100 вольт.

На рис. 3 показана вольтамперная характеристика детектора с рабочей площадью 0,1 см<sup>2</sup>. Сопротивление запорного слоя составляет  $\sim 10^9$  ом.

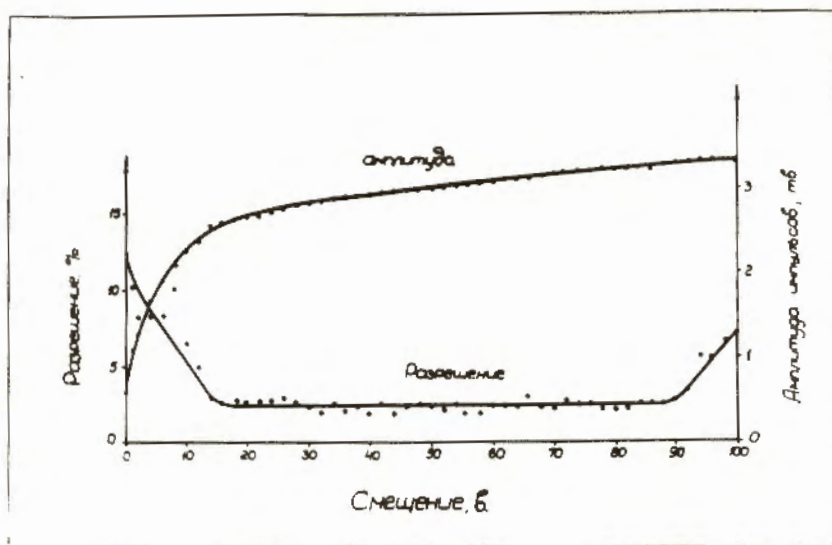


Р и с. 3.

Характерным свойством полупроводникового детектора является увеличение глубины чувствительной области с ростом смещения. Приближенно эту зависимость можно представить в виде  $d = 0,5 \sqrt{\rho(0,7+V)}$ , где  $d$  — толщина чувствительной области в микронах,  $\rho$  — удельное сопротивление  $n$ -кремния в ом-см,  $V$  — смещение в вольтах. Отсюда следует, что с ростом смещения увеличивается амплитуда импульсов, так как, во-первых, в чувствительном объеме укладывается все большая часть пробега частицы и, во-вторых, емкость чувствительной области уменьшается. Эта зависимость показана на рис. 4 для детектора с чувствительной площадью в  $0,1 \text{ см}^2$  при облучении  $\alpha$ -частицами  $\text{Cm}^{242}$  /6,1 Мэв/. С помощью этой кривой была определена емкость детектора, оказавшаяся равной  $37 \pm 3$  пф при смещении 50 в. Зная кроме того паразитную емкость /54 пф/ и абсолютную величину амплитуды импульса /3 мв/ при указанном смещении, мы оценили энергию образования пары электрон-дырка. В согласии с прежними данными /6/ она оказалась равной  $3,6 \pm 0,4$  эв.

На рис. 4 показана также зависимость энергетического разрешения для

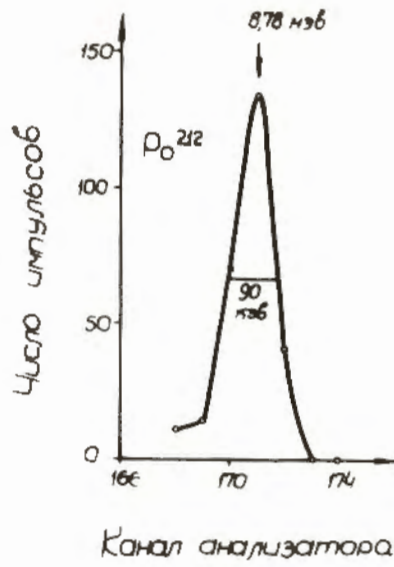




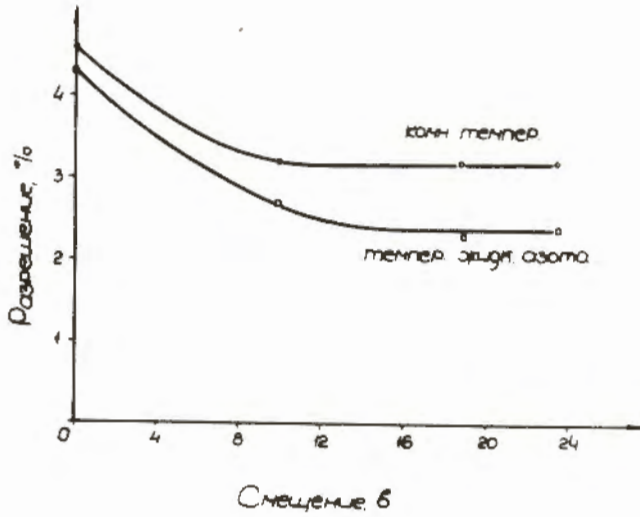
Р и с. 4.

$\alpha$ -частиц  $\text{Cm}^{242}$  от смещения. При малых смещениях разрешение плохое вследствие малой амплитуды импульсов, а при больших смещениях - в предпробойном состоянии - из-за сильного роста шумов детектора. Кривые рис. 4 получены при работе со сравнительно толстослойным источником  $\alpha$ -частиц. Чтобы определить максимальное разрешение, даваемое детектором с чувствительной поверхностью  $0,1 \text{ см}^2$ , нами был промерен спектр  $\alpha$ -частиц тонкого источника  $\text{Po}^{212}$  /рис.5/. Разрешение равно 90 Кэв / $\sim 1\%$ /. Чтобы оценить вклад шумов радиоаппаратуры в разрешение, был промерен спектр импульсов генератора ГИ-2А, подключенного на вход усилителя так, чтобы имитировать импульсы от  $\alpha$ -частиц. Разрешение в этом случае составило 58 Кэв. Предполагая, что разброс амплитуд импульсов генератора вызван только шумами радиоаппаратуры, получаем, что максимальное собственное разрешение детектора составляет  $\sim 70$  Кэв.

Некоторое улучшение разрешения может быть достигнуто за счет уменьшения шумов детектора при его охлаждении. На рис. 6 показана зависимость разрешения одного из детекторов от смещения при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Если при комнатной температуре лучшее разрешение равно 3,2% для  $\alpha$ -частиц с энергией 6 Мэв, то при температуре жидкого азота разрешение улучшается до 2,4%.

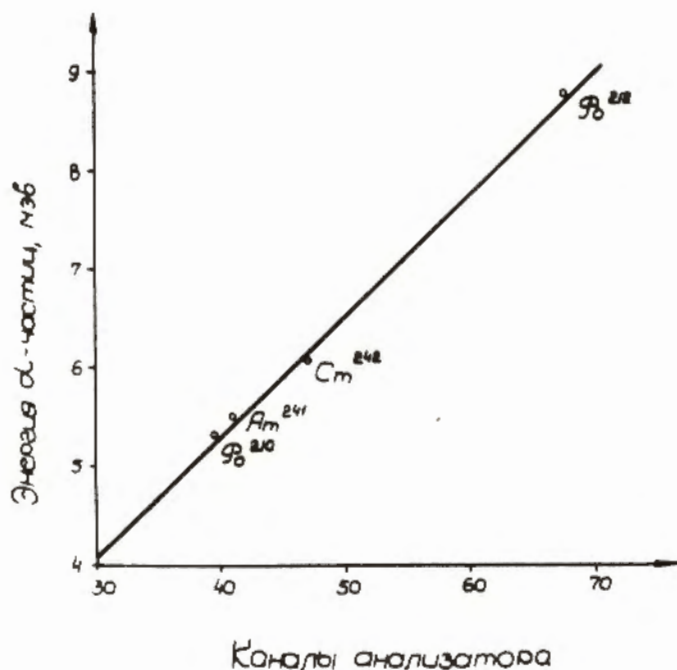


Р и с. 5.



Р и с. 6.

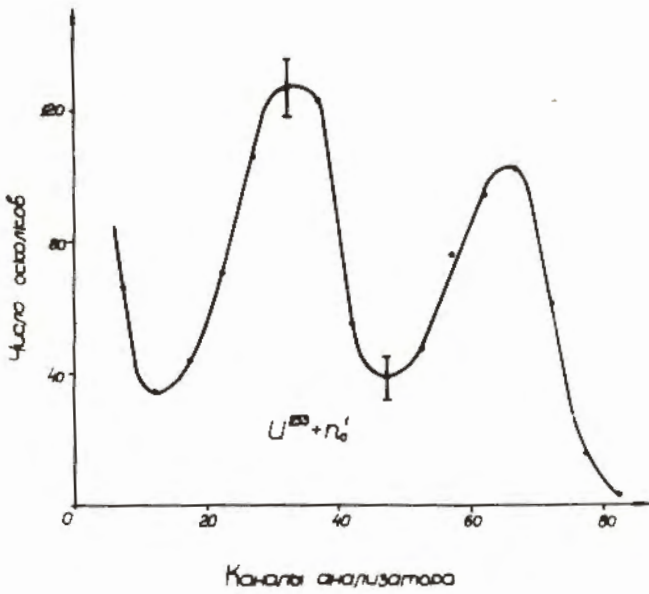
Линейность изготовленных нами детекторов проверялась для  $\alpha$ -частиц в области энергий от 5,3 до 8,78 Мэв /рис.7/. В литературе имеются указания /8/, что детекторы с  $p-n$ -переходами линейны по крайней мере до 120 Мэв



Р и с. 7.

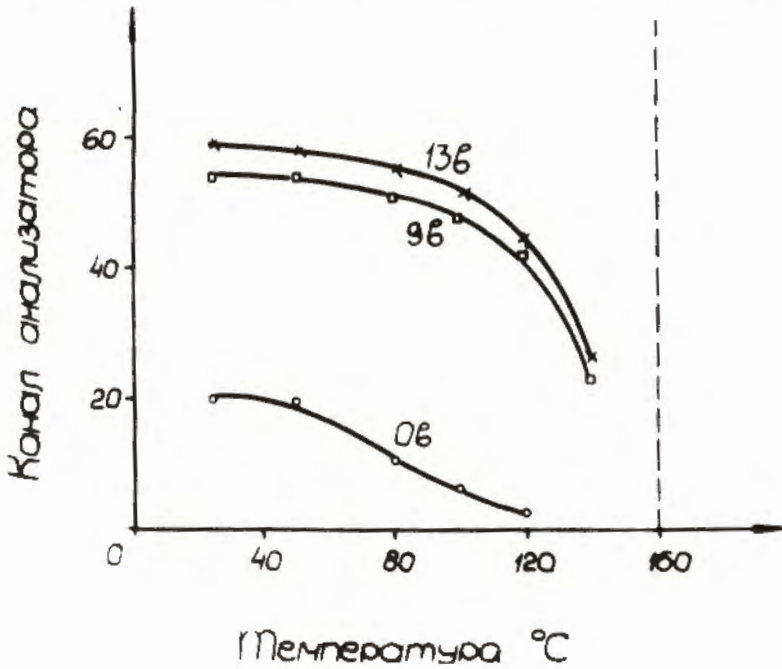
независимо от рода регистрируемой заряженной частицы при условии, что ее пробег укладывается в чувствительной области детектора.

С помощью полупроводникового счетчика очень удобно регистрировать осколки деления. В связи с малым пробегом осколков работа может, как правило, вестись без смещения. Это обстоятельство, а также меньшие требования к энергетическому разрешению, чем в случае  $\alpha$ -частиц, значительно облегчают задачу изготовления удовлетворительного  $p-n$ -детектора для осколков деления. На рис. 8 показан аппаратный спектр осколков, полученный при облучении мишени  $U^{233}$  /толщина мишени -  $0,3 \frac{мг}{см^2}$  / тепловыми нейтронами. Подъем кривой при малых энергиях обусловлен многократными наложениями  $\alpha$ -частиц  $U^{233}$ , так как специальных мер по формировке заднего фронта импульсов не принималось.

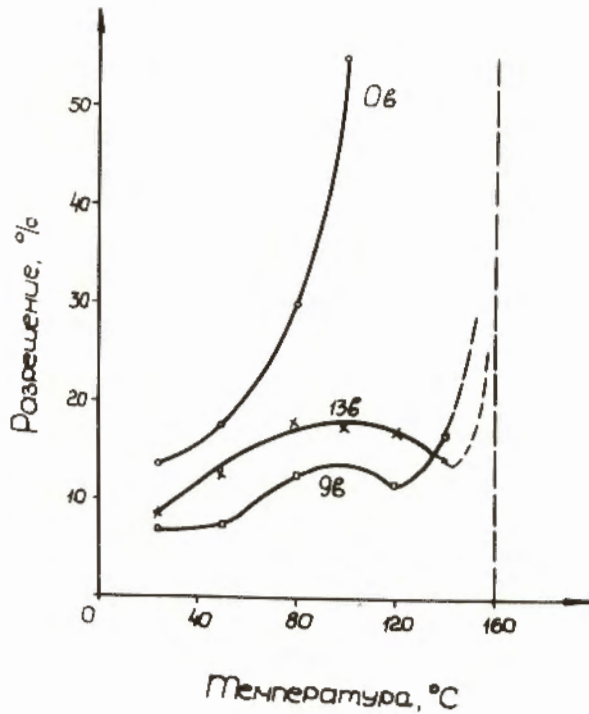


Р и с. 8.

Для целого ряда исследований важно знать поведение полупроводниковых детекторов при повышенных температурах. На рис. 9 и 10 приведены соответствующие кривые, полученные с  $\alpha$ -частицами  $^{242}\text{Cm}$  для одного из наших



Р и с. 9.



Р и с. 10.

детекторов при трех разных смещениях. С ростом температуры амплитуда импульсов уменьшается. При  $160^{\circ}\text{C}$  уже не удавалось отделить импульсы сигнала от импульсов шумов. Интересно изменение разрешения детектора с ростом температуры при смещении 9 и 13 вольт. Отвлекаясь от подробностей хода кривых /эта зависимость изучалась только для одного детектора/, можно все же сказать, что разрешение не ухудшается сильно вплоть до температуры  $140^{\circ}\text{C}$ , несмотря на значительное уменьшение амплитуды импульсов.

Исследовалось также влияние магнитного поля на кремниевый  $p-n$  -детектор. Установлено, что поле до 12000 гаусс независимо от взаимной ориентации кристалла и поля с точностью до 1,5% не сказывается на амплитуде импульсов.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента АН СССР проф. Г.Н. Флорова за постановку данной работы и постоянный интерес к ней. Мы весьма благодарны проф. С.М. Рывкину и его со-

трудникам из ЛФТИ АН СССР, которые на основании своего большого опыта работы с полупроводниковыми приборами оказали нам существенную помощь. Авторы выражают свою признательность также И.И. Чубурковой и Б.В. Фефилову.

### Л и т е р а т у р а

1. K.G.McKay. Phys. Rev., 76, 1537 (1949).
2. А.В. Айрапетянц, С.М. Рывкин. ЖТФ, 1957, 27, 95.
3. А.В. Айрапетянц, А.В. Коган, Н.М. Рейнов, С.М. Рывкин. ЖТФ 1957, 27, 1599.
4. S.S.Friedland, J.W.Mayer, J.S.Wiggins. Nucleonics, 18, 2,28 (1960).
5. J.M.McKenzie, D.A.Bromley. Report GPI-47, Chalk River, Ontario 1959.
6. M.L.Halbert, J.L.Blankenship. Nucl. Instr. & Methods, 8, 106 (1960).
7. G.Dearnaley, A.B.Whitehead. Report AERE-R 3437, Harwell, Berkshire, 1960.
8. Seventh scintillation counter Symposium, IRE Transactions on nuclear science, N S-7, N2-3 (1960).

Рукопись поступила в издательский  
отдел 9 марта 1961 г.