

С 344.3 М  
В-17

3/IV-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2010



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Ван Цжень-ва, А.И. Сидоров, Л.П. Сидорова

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
i-ОБЛАСТИ В КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ,  
КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЛИТИЕМ

1965

3062/2 чр.

Ван Цжень-ва, А.И. Сидоров, Л.П. Сидорова

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
i-ОБЛАСТИ В КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ,  
КОМПЕНСИРОВАННЫХ ЛИТИЕМ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Для получения качественных спектрометрических кремниевых детекторов методом дрейфа ионов лития<sup>/1/</sup> интересно выяснить влияние диффузии и дрейфа лития на структуру детектора. При этом прежде всего необходимо уметь определять тип проводимости  $i$ -области<sup>/2/</sup>, а также ее удельное сопротивление. Решение этой задачи затруднено тем, что нужно уметь измерять очень высокоомный материал. Если определять тип проводимости  $i$ -области обычным методом по знаку термо э.д.с., то в случае очень высокоомного материала  $i$ -тип измеряется как  $n$ -тип из-за большей подвижности электронов. Определение типа проводимости с помощью измерения прямых характеристик детекторов при малых токах<sup>/2/</sup> дают не всегда легко интерпретируемый результат.

В данной работе использовался метод определения типа проводимости с помощью измерения фото э.д.с., заключающийся в следующем. Образец освещается с торца светом, проникающим приблизительно на 0,5 мм. В месте существования электрического поля (т.е. у переходов  $n^+n$ ,  $p^+p$  или  $p-n$ ) происходит разделение электронов и дырок, в результате чего в данном месте будет скачок напряжения. Если в первом приближении удельное сопротивление базы считать постоянным по длине детектора, то величина скачка будет пропорциональна контактной разности потенциалов соответствующего перехода.

Обсудим возможное влияние неоднородности  $i$ -области на измерение типа проводимости. Если каким-то способом (описание этих способов будет дано ниже) удалось выяснить, что  $i$ -область не меняется внутри типа проводимости и есть просто область неоднородной электронной проводимости, то ее сопротивление будет всегда ниже у  $n^+$ -области (из-за "хвостов" от диффузии электронов из этой области и других причин, рис. 5). Аналогично, если  $i$ -область - область неоднородной дырочной проводимости, то ее сопротивление по той же причине выше у  $n^+$ -области и ниже у  $p^+$ -области (рис. 8). Таким образом, в обоих случаях неравномерность сопротивления  $i$ -области такова, что контактная разность завышается для  $n-p$  перехода и занижается для  $L-N$ -перехода. Следовательно, неоднородность материала не мешает правильному определению типа проводимости. Следует, однако, иметь в виду, что для очень высокоомного материала  $i$ -типа возможна ошибка при определении типа проводимости из-за того, что концентрация лития вблизи  $n^+$ -перехода превышает концентрацию акцепторов в  $p^+$ -области.

На рис. 1 приведены примеры распределения фото э.д.с. по торцу образца в одном случае, когда  $i$ -область явно  $n$ -типа, в другом, когда она  $p$ -типа.

Разберем теперь методы определения сопротивления  $i$  - области.

Вначале опробовалась возможность измерения сопротивления из распределения потенциала по шлифованному торцу при обратном смещении на детектор. При смещении порядка милливольт все напряжение падает на  $p-n$  и  $L-N$  переходах, в  $i$  - области точность измерения мала. В то же время, даже при смещении порядка (0,2-0,5) в уже примешивается явление экстракции /7/, что приводит к завышению вычисленного удельного сопротивления и оно часто получается выше собственного (рис. 2).

В литературе /5/ описан метод измерения удельного сопротивления высокоомного монокристаллического кремния на высокой частоте. Этот метод был использован нами в настоящей работе. Измерительная схема изображена на рис. 3. Детектор включается во второй резонансный контур, у которого индуктивная связь с первым была сделана слабой. Амплитуда сигнала составляла величину (10-15) мв. Напряжение измерялось немеханическим вольтметром для высокой частоты с высоким входным сопротивлением Pohde Schwarz. На высокой частоте в резонансе емкость  $p-n$  - переходов и контактов должна шунтироваться. Напряжение целиком падает на  $i$  - область. Ее сопротивление должно вычисляться по формуле

$$R_{\text{с}} = \frac{R_{\text{H}} \left( \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{R}}} - 1 \right)}{\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{с}}} - 1}, \text{ где}$$

$V_{\text{max}}$  - напряжение в контуре при резонансе без детектора и с разомкнутой ветвью  $R_{\text{H}}$ ,  $V_{\text{R}}$  - резонансное напряжение на сопротивлении - ветвь с детектором разомкнута,  $V_{\text{с}}$  - резонансное напряжение на детекторе - ветвь с  $R_{\text{H}}$  разомкнута.

Однако проведенные измерения не дали правильных результатов по следующей причине. Эквивалентная схема детектора изображена на рис. 4а. На высокой частоте оспаривается эквивалентная схема, изображенная на рис. 4б, при этом

$$R = \frac{(R + R_{\text{p}+})^2 + \omega^2 c^2 R^2 \cdot R_{\text{p}+}^2}{R + R_{\text{p}+} + \omega^2 c^2 R^2 R_{\text{p}+}} \approx R_{\text{p}+}$$

при  $\omega \rightarrow \infty$ . Здесь  $R$  - сопротивление  $i$  - области,  $R_{\text{p}+}$  - сопротивление слоя исходного  $p$  - типа, всегда имеющегося в изготовленных детекторах,  $R$  - сопротивление, которое замеряется реально вместо замера сопротивления  $i$  - области при учете существования  $R_{\text{p}+}$ . Видно, что при увеличении частоты замеряемое  $R$  уменьшается, стремясь к  $R_{\text{p}+}$ , что и наблюдалось экспериментально.

По изложенным причинам в дальнейшем проводились измерения после сошлифовки  $p^+$  и  $p^+$  - областей (только  $i$  - слоя). При этом

$$\rho (\text{ом.м}) = R_{\Sigma} (\text{ом}) \cdot s_{\Sigma} (\text{кф}) \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}$$

Оказалось, что величина измеряемого удельного сопротивления зависит от материала контактов. Использовались следующие контакты: никелевые, из серебряной пасты, алюминиевые и из аквадага. Воспроизводимость измерений для всех контактов составляет величину (10 - 15)%. Измерения с контактами из никеля и серебряной пасты дают приблизительно одну и ту же величину удельного сопротивления. Измерения с алюминиевыми контактами дают меньшую величину удельного сопротивления. Еще меньшую величину дают измерения с использованием контактов из аквадага.

Таким образом, недостатком данного метода является сильное влияние контактов на результаты измерений, что, казалось бы, не следует из теории  $p-n$  перехода на высокоомных полупроводниках<sup>/3,4/</sup> (толщина измеряемых образцов варьировалась в пределах 0,8 - 2 мм).

Более надежные результаты были получены измерением распределения потенциала однозондовым методом при напряжениях порядка десятков милливольт. Измерения проводились в полной темноте методом компенсации с использованием в качестве гальванометра высокочувствительного прибора Ф116. С детектора сошлифовывались  $p^+$  и  $p^+$  - области и на шлифованные поверхности наносились никелевые контакты. Оказалось, что такие контакты имеют очень маленькое контактное сопротивление (алюминиевые контакты имели большое переходное сопротивление) и не мешают измерениям. Измерения потенциала проводились при смещении в одном и другом направлении, чтобы удостовериться в том, что влиянием контактов можно пренебречь. Выяснилось, что обе снятые кривые или полностью совпадают (рис. 5), или смещаются по оси  $x$  и  $y$  на небольшую величину (в случае несколько разной степени падения напряжения на контактах в прямом и обратном направлениях), не меняя наклона (рис. 6,7). Именно наклон кривых определяет удельное сопротивление.

Оценивалось влияние сопротивления утечки по шлифованному торцу на результаты измерений. Это сопротивление легко находится из кривой распределения потенциала по торцу детектора в области  $p-n$  перехода при смещении его в обратном направлении. Оказалось, что найденное таким образом сопротивление, пересчитанное на единицу длины, значительно превосходит сопротивление, соответствующее собственной проводимости в  $i$  - области (рис. 2).

Проводились измерения при различных падениях напряжения на всей толщине  $i$  - области (рис. 5,8 и 7). Вычисленные при этом удельные сопротивления практически совпадали. Следовательно, влиянием инжекции и экстракции в данном случае можно пренебречь.

Результаты измерений можно сформулировать следующим образом. Компенсированная область может иметь электронный тип проводимости, а может быть и дырочно-го типа. Кроме того, от образца к образцу имеется большой разброс по удельному сопротивлению. Замеряемые нами детекторы имели разброс по удельному сопротивлению от 150 до 3600 ом.м. Сам по себе  $i$ -слой часто имеет неоднородную по сопротивлению структуру (рис. 5,9). Кроме того, при измерении данным методом выявились и детекторы с  $i$ -слоем, структура которого была  $n-p$ . Распределение потенциала по торцу таких структур при изменении знака смещения, но для одного и того же тока не совпадает. Это свидетельствует о наличии  $n-p$  перехода внутри  $i$ -области (рис. 10,11).

Сравнение данного метода с измерениями на высокой частоте (таблица 1) показало, что измерения на высокой частоте с никелевыми контактами или контактами из серебряной пасты дают правильный результат в случае невысокого удельного сопротивления. В случае высокого сопротивления - выше 700 ом. м измерения на высокой частоте регулярно занижают удельное сопротивление материала. По-видимому, это как-то связано с контактными явлениями, о чем уже упоминалось выше.

Физические причины, приводящие к электронной или дырочной проводимости в  $i$  области, к ее неоднородности, появлению  $p-n$  переходов и т.д. будут исследованы в дальнейшем с помощью описанных методов.

### В ы в о д ы

Результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Экспериментально исследовались три метода измерения удельного сопротивления  $i$ -области детекторов. Наиболее объективный результат, по-видимому, дает измерение сопротивления однозондовым методом после шлифовки  $n^+$  и  $p^+$ -областей и нанесения на шлифованные поверхности никелевых контактов.

2. Предложен метод определения типа проводимости  $i$ -области по кривой фотоз.д.с. при равномерном освещении торца детектора.

3. Результаты измерений показывают, что в зависимости от условий диффузии, дрейфа и параметров кремния сопротивление компенсированной области может иметь и электронную и дырочную проводимости. Абсолютная величина удельного сопротивления по нашим измерениям меняется от образца к образцу от 150 до 3600 ом.м.

В дальнейшем предстоит четко выявить условие, в которых компенсированная область имеет дырочную проводимость. Это важно для создания спектрометрических детекторов на кремнии  $p$ -типа, у которых мертвый слой при облучении будет возникать со стороны  $p^+$ -области. /6/

В заключение выражаем благодарность А.И. Калинин за практическую и теоретическую помощь в измерениях сопротивления на высокой частоте.

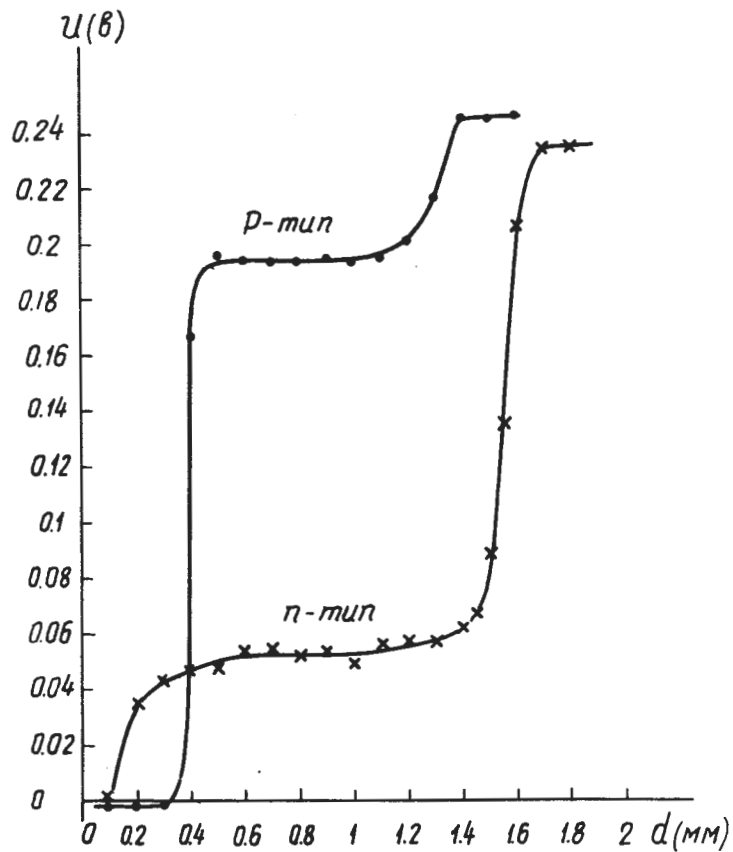
### Л и т е р а т у р а

1. Материалы совещания по полупроводниковым детекторам ядерных излучений. ОИЯИ, Дубна, 1962 г.
2. Ван Цжень-ва, А.И. Сидоров, А.П. Сидорова, Л.И. Симонова. ПТЭ, 84, № 4, 1964.
3. Э.И. Адирович, Е.М. Кузнецов. Радиотехника и электроника, 1959, № 10, 1708.
4. Э.И. Адирович, Ю.С. Рябинкин, К.В. Темко. ЖТФ, 1958, вып. 1, 55.
5. Nibler Ferdinand, Hellinger Ottor. "Z. Angew Phys.", 1963, 16, N=5, 308-311.
6. T. Messier, Y. Le coroller, J. Merlo Flores. IEEE Transactions on Nuclear Science N=3 1964, 276.
7. Low G.G.E., Proc. Phys. Soc., B 68, 310 (1955).

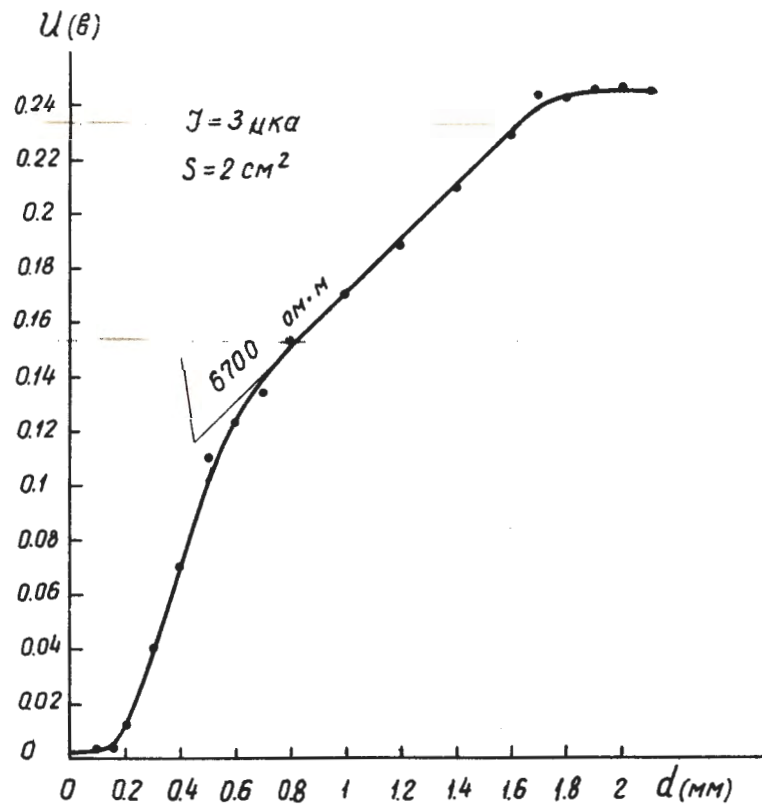
Рукопись поступила в издательский отдел  
18 февраля 1965 г.

Т а б л и ц а

№ детектора	$\rho$ (измерение на высокой частоте) ом.м.		(измерение распределения потенциала) $\rho$ ом. м
	с $N_1$ том	-контакт с контактом из серебря- ной пасты	
9 <sup>a</sup>	57.3	67.4	160.0
6 <sup>a</sup>	38.4	41.0	46.0
4 <sup>b</sup>	71.0	73.0	192.0
9 <sup>b</sup>	48.7	50.0	66000 - 100.0
1	16.6	18.4	17.900 - 86.0
7 <sup>b</sup>		47.7	с в -р - переходом внутри
2 <sup>c</sup>	129.0	141.0	с п -р -переходом внутри
8 <sup>c</sup>	85.3		362.0

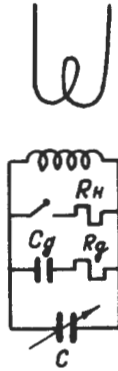


Р и с. 1. Кривая распределения фото э.д.с. по торцу детектора при освещении равномерным светом в случае  $\cdot$  — области дырочной проводимости,  $\times$  — то же в случае  $\times$  — области электронной проводимости.

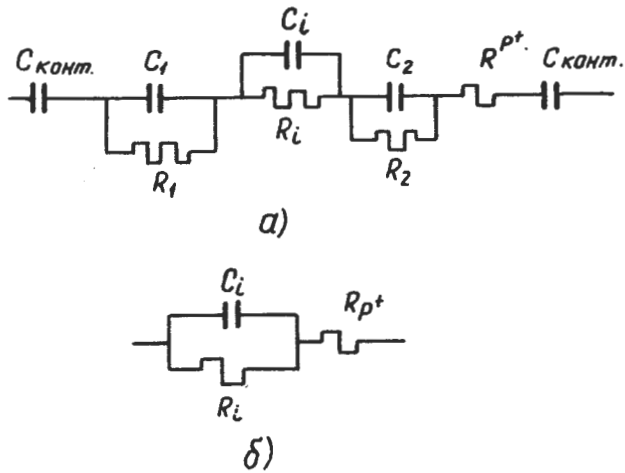


Р и с. 2. Кривая распределения потенциала по торцу одного из детекторов при обратном смещении на нем. Указано удельное сопротивление, высчитанное по наклону кривой в  $\cdot$  — области.

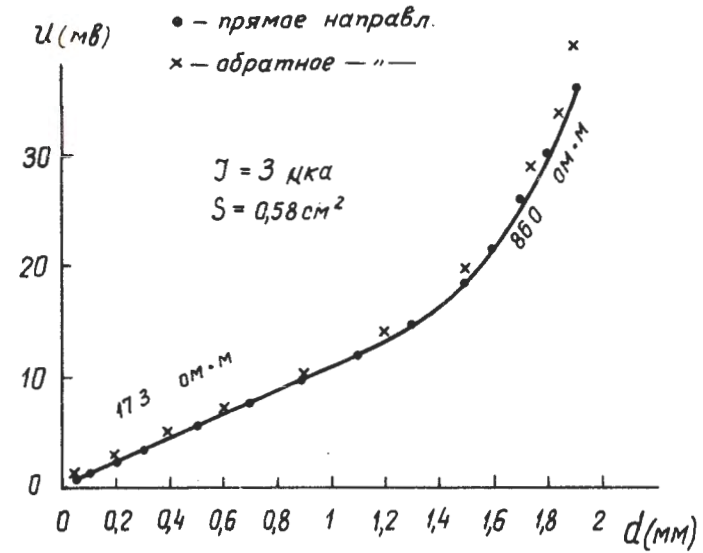




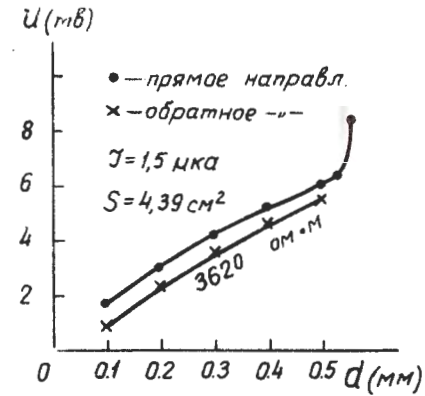
Р и с. 3. Схема измерения сопротивления детектора на высокой частоте.  $R_H$  - сопротивление нагрузки,  $C$  - переменная емкость,  $C_d$  и  $R_d$  - емкость и сопротивление, эквивалентные детектору.



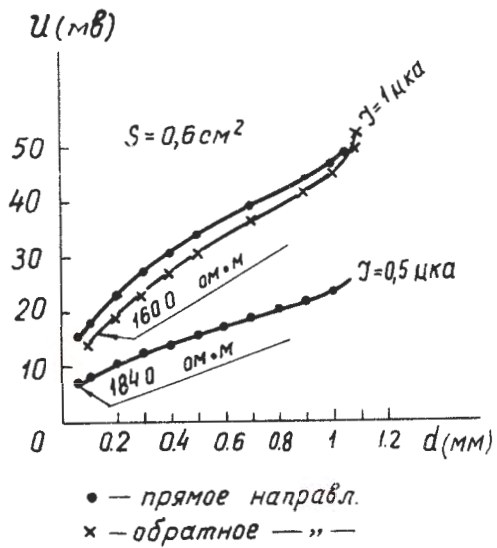
Р и с. 4. а) эквивалентная схема детектора на низкой частоте. б) эквивалентная схема детектора на высокой частоте.



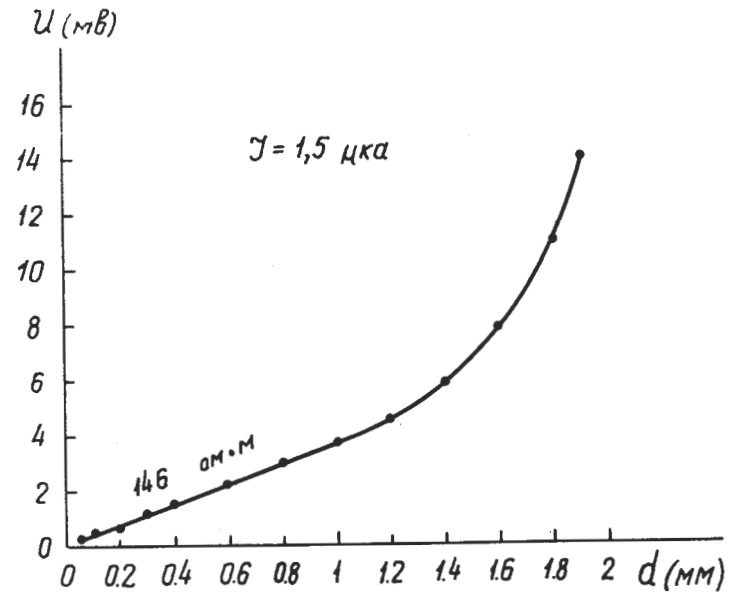
Р и с. 5. Кривые распределения потенциала при смещении в одном и другом направлении. В данном образце  $i$  - область электронного типа.



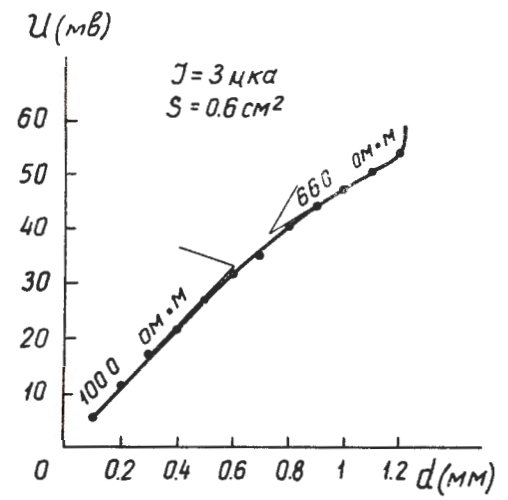
Р и с. 6. Кривые распределения потенциала при смещении в одном и другом направлениях. В данном образце  $i$  - область дырочного типа.



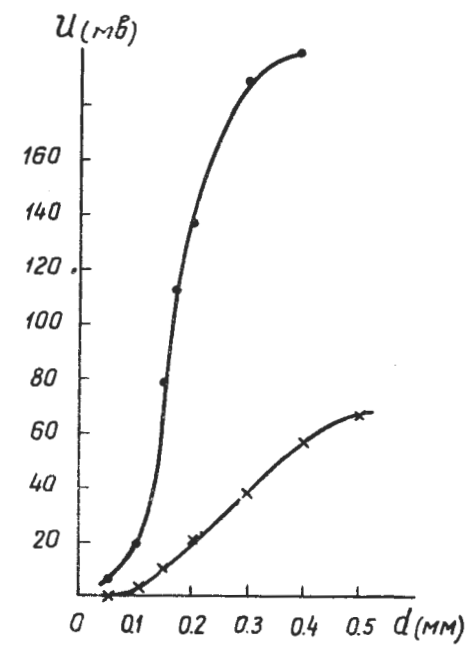
Р и с. 7. Распределение потенциала при смещении в одном и другом направлениях — две верхние кривые, соответствующие току  $I = 1$  мка. Нижняя кривая соответствует току  $I = 0,5$  мка. В данном образце  $i$  — область дырочного типа.



Р и с. 8. Кривая распределения потенциала, соответствующая току  $I = 1,5$  мка. Кривая, соответствующая току  $I = 3$  мка, для этого образца изображена на рис. 5.



Р и с. 9. Кривая распределения потенциала по торцу. В данном образце  $i$  — область дырочного типа.



Р и с. 10. Образец с p-n переходом внутри  $i$  — области. ● — кривая соответствующая одному направлению смещения, × — кривая, соответствующая смещению, противоположному первому.

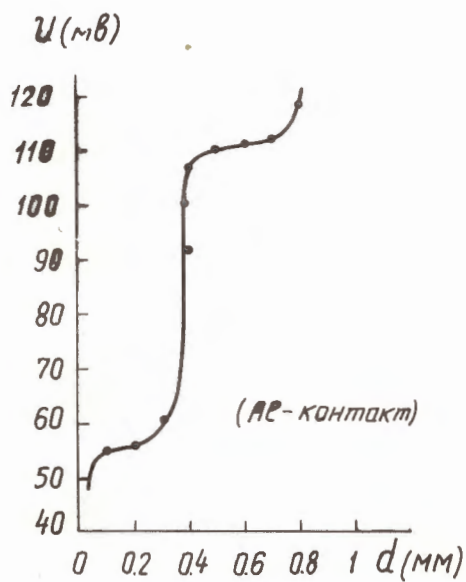


Рис. 11. Образец с р-п-переходом внутри  $i$ -области.