

Н-517

26/III-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3701



С.В.Ненова-Пакева, Б.П.Осипенко

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЗОНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИЕВЫХ **n-i-p** -ДЕТЕКТОРАХ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1968

13 - 3701

С.В.Ненова-Пакева, Б.П.Осипенко

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЗОНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИЕВЫХ $n-i-p$ -ДЕТЕКТОРАХ

Направлено в ПТЭ



22/3/2 чф.

Качество диффузионно-дрейфовых полупроводниковых детекторов ядерных излучений во многом зависит от равномерности компенсации ионами лития акцепторов в слое объемного заряда. Часто, имея сведения о распределении концентрации примесей после дрейфа ионов лития, удается выровнять концентрацию примесей у детекторов, в которых они были распределены неравномерно.

В работе ^{/1/} для исследования дрейфа и преселитации лития в n -области $Ge(Li)$ - детекторов использовались измерения термозондом.

В настоящей работе, используя зависимость величины и знака термоэлектродвижущей силы (тэдс) от концентрации и типа носителей тока в полупроводниках, измеряли распределение примесей по толщине детектора и определяли глубину залегания переходов в $n-i-p$ - детекторах.

Известно, что абсолютную величину тэдс определить трудно, так как она зависит не только от концентрации основных носителей тока, но также и от того, какой механизм рассеяния носителей тока преобладает ^{/2/}, т.е. зависит от чистоты и совершенства монокристалла кремния. Кроме этого, когда тэдс снимается с помощью точечного контакта, тэдс зависит от ряда трудно контролируемых условий, как, например, от потенциального барьера на поверхности, от изменения времени жизни носителей тока под влиянием изменений в материале, возникающих под давлением точечного зонда и т.д. ^{/3/}.

Наша задача облегчается тем, что нам необходимо определить относительное изменение тэдс по длине образца, поэтому мы ограничиваемся грубой оценкой зависимости тэдс от концентрации носителей тока, считая, что при перемещении термозонда по измеряемой поверхности все другие параметры, влияющие на тэдс, остаются неизменными.

Для определения коэффициента тэдс - α от концентрации основных носителей тока используем известное выражение для α в полупроводнике со смешанной проводимостью /2/:

$$\alpha = \frac{\alpha_+ n_+ \mu_+ - \alpha_- n_- \mu_-}{n_+ \mu_+ + n_- \mu_-},$$

где α_+ - коэффициент тэдс для дырок в отсутствие электронов и α_- - соответственно - коэффициент тэдс для электронов в отсутствие дырок; n_+ и n_- - соответственно концентрации дырок и электронов; μ_+ и μ_- - подвижности дырок и электронов.

α_+ и α_- вычисляются отдельно для электронов и дырок по формуле

$$\alpha_{\mp} = \mp \frac{k}{e} \left[A + \ln \frac{2(2\pi m_{\mp}^* k T)^{3/2}}{h^3 n_{\mp}} \right].$$

Здесь k - константа Больцмана; e - заряд электрона; A - постоянная, зависящая от механизма рассеяния токовых носителей; m_{\mp}^* - эффективная масса носителей тока; h - постоянная Планка и n_{\mp} - концентрация носителей тока.

Член, в который входит постоянная A , считаем приблизительно постоянным и пренебрегаем его вкладом в зависимость. Численные величины взяты такие же, как в работе /4/.

При оценке тэдс концентрация акцепторов в исходном материале взята 10^{13} см^{-3} , что имеет место в наших условиях. Считаем, что в

этот материал вводится донорная примесь с концентрацией, изменяющейся от 10^{17} см⁻³ до 10^9 см⁻³. Коэффициент тэдс вычисляется для температуры $T = 300^\circ$ К.

Результаты расчета приведены на рис.1. Из рисунка видно, что область собственной проводимости - i показывает n - тип ввиду большей подвижности электронов по отношению к дыркам. Влево от точки, где концентрация доноров превышает концентрацию акцепторов в 10^2 раз, кривая имеет ход, аналогичный ходу кривой, относящейся к кремнию с концентрацией доноров выше 10^{15} см⁻³. Направо от точки, где концентрация акцепторов превышает концентрацию доноров в 5 раз, тэдс меняет знак и становится постоянной при уменьшении концентрации доноров в 10^3 раз по сравнению с концентрацией акцепторов, при этом она равняется тэдс кремния с концентрацией акцепторов 10^{13} см⁻³.

Методика эксперимента

Измерение тэдс проводилось с помощью термозонда по образующей образца, где $n - p$ - переход выходит на поверхность. Принципиальная схема установки показана на рис.2. Образец крепится в специальном держателе с электродами. Держатель закреплен на столике микроскопа, который используется в качестве микроманипулятора для перемещения образца относительно термозонда. Термозонд выполнен из вольфрамовой электролитически заточенной проволоки диаметром 0,5 мм и вместе с нагревателем и термопарой укреплен на кронштейне, который во время измерений с помощью пружинки прижимает иглу к поверхности образца. Образец во время измерений затемняется специальным кожухом.

Для измерения тэдс использовалась компенсационная схема, термоток измерялся гальванометром.

Измеряемая тэдс не зависит от размеров образца и определяется температурой зонда и коэффициентом тэдс.

Термоток зависит от тэдс и от сопротивления цепи.

При измерении термотока переход металл-полупроводник и $n-p$ -переход детектора включаются в прямом направлении. Инжекция дырок в переходе металл-полупроводник пренебрежимо мала по сравнению с инжекцией электронов из n -области в p -область детекторов. Коэффициент инжекции j можно записать

$$j = \frac{J_h}{J} = \frac{\sigma_p L_n}{\sigma_p L_n + \sigma_n L_p},$$

где J_h - дырочный ток, J - общий ток, σ_p и σ_n , соответственно, проводимость дырочной и электронной областей перехода, L - диффузионная длина электронов в p -области и L_n - диффузионная длина дырок в n -области диода.

Так как $\sigma_p L_n \ll \sigma_n L_p$, то $j \rightarrow 0$ и переход становится эффективным контактом для инжекции электронов в область полупроводника p -типа, причем инжектирующим электродом служит n -область. При перемещении термозонда над n -областью в направлении к i -области с уменьшением σ_n уменьшается коэффициент инжекции и величина тэдс. При перемещении термозонда над i -областью, если концентрация примесей постоянна, тэдс и инжекция сохраняются постоянными. При перемещении зонда над p -областью детектора знак тэдс меняется, ток уменьшается, так как последовательно включается большое омическое сопротивление p -области.

Кремниевые $n-i-p$ детекторы изготавливались по технологии, описанной в работе /5/.

Измерение распределения тэдс было проведено на 30 диффузионно-дрейфовых детекторах с шириной чувствительной области от 1,5 до 5,0 мм.

Разница температур ΔT между нагретым термозондом и холодными участками на контакте p -области детектора поддерживалась постоянной $(160 \pm 5)^\circ \text{C}$.

Результаты измерения тэдс

Для иллюстрации результатов измерения на диффузионных $n-p$ - переходах показаны две типичные зависимости тэдс от положения термомозонда. На рис.3 кривая 1 показывает зависимость, характерную для образцов с хорошими вольт-амперными характеристиками, а на рис.4 кривая 1 - для образцов с плохими вольт-амперными характеристиками. Видно, что в последнем случае на левой стороне n - области концентрация доноров уменьшается, а иногда превращается в область p - типа.

Для иллюстрации измерений на диффузионно-дрейфовых $n-i-p$ - переходах приведены результаты двух детекторов, с равномерным распределением концентрации примесей №225 и неравномерной концентрацией примесей по глубине i - области №5. Отметим, что образцы с неравномерной концентрацией примесей встречаются очень редко.

Так как измеренная величина тэдс сильно зависит от поверхностной обработки, измерения проводились после различных обработок поверхности детекторов.

На рис.5 (кривая 1) показано распределение тэдс на свежेत्रавленном детекторе №225 в травителе $Cr - 8$ с последующим кипячением в деионизованной воде. Из рисунка ясно видно разграничивание областей с разными типами проводимости. Кроме этого в i - области детектора заметно незначительное линейное увеличение тэдс в направлении к p - области, что указывает на разномерное уменьшение концентрации ионов лития. Угол наклона распределения тэдс уменьшается по мере нарастания окисной пленки на поверхности в процессе хранения на воздухе.

На рис.6 (кривая 1) показано распределение тэдс в том же детекторе, но со шлифованной поверхностью. Видно, что картина становится более четкой. В i - области тэдс уменьшается и на некоторых образцах равна нулю, например, на образце №5 (рис.8, кривая 7).

На рис.7 (кривая 1) показан результат измерения тэдс детектора №225 после обработки в водном растворе бихромата калия. Обработка сделана для уменьшения обратных токов детектора. Видно, что тэдс i -области увеличивается. По-видимому, это указывает на образование поверхностной пленки p - типа проводимости.

На всех рисунках четко наблюдаются области с разными типами проводимости. Измеренные значения n -, i - и p - областей по тэдс хорошо согласуются с результатами, полученными путем электрохимического отложения меди /6/ и по измерению емкости.

На рис.8 показаны результаты измерения тэдс на детекторе №5, имеющем неравномерно компенсированную i - область. На свежепротравленном образце четко выделяется участок неполной компенсации (кривая 1). Окисная пленка, которая нарастает на поверхности детектора при его хранении в атмосфере сухого воздуха в течение 10 дней, маскирует объемный эффект распределения тэдс (кривая 2). Для подтверждения наличия области неполной компенсации измерялось распределение потенциала на поверхности детектора методом потенциального зонда /7/. Полученная зависимость приведена на рис.8, кривая 3.

Результаты измерения термотоков

На всех детекторах параллельно с измерением тэдс измерялся термоток. На рисунках 5,6,7 и 8 показаны результаты измерений термотока на детекторах, на которых измерялась тэдс. Способ обработки указан в подписях к рисункам.

В дополнение на рис.8 кривая 6 показывает распределение термотока для детектора №5, который после шлифовки микропорошком М-5 хранился в течение 6 месяцев в атмосфере сухого воздуха. Компенсированная i - область проявляется как область p - типа проводимости.

ти. По-видимому, это связано с образованием пленки p -типа проводимости на поверхности образца в результате длительного хранения на воздухе.

Распределение термотока в n -области детектора не указано на рисунках, так как в принятом масштабе оно выходит далеко за пределы рисунков и обычно повторяет ход кривой 1 на рис.4 или очень редко повторяет ход кривой 1 на рис.3.

Несмотря на то, что поверхность очень сильно влияет на величину тэдс и термотока, общая закономерность хода кривых сохраняется. Наиболее четкая картина получается при измерении тэдс и термотоков после шлифовки поверхности тонким порошком.

Для практических целей термотоковые характеристики детекторов более удобны из-за их наглядности. Качественно их форма соответствует форме распределения концентрации примесей в $n-i-p$ -детекторах. Так как трудно учесть все условия на поверхности и в объеме детектора, а, следовательно, и оценить их вклад в измеряемую величину, в настоящее время не представляется возможным написать строгую зависимость, которая позволила бы по величине термотока определить концентрацию примеси. В общем виде

$$J = k N(x),$$

где J - измеряемый термоток, $N(x)$ - концентрация примесей и k - коэффициент пропорциональности, который принимает различные значения в областях с разными типами проводимости. Если принято, что для определенной области поверхностные состояния и структура монокристалла однородны, то можно интересующий нас коэффициент пропорциональности определить, сопоставляя результаты распределения концентрации примесей, полученных другим способом.

Известно, что для резкого $n-p$ -перехода, когда концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой, исполь-

зую зависимость барьерной емкости от запирающего напряжения, можно определить концентрацию примесей в переходе /8/. В нашей работе определено распределение примесей в $i - p$ - переходе по методу, предложенному в работе /9/.

Коэффициент пропорциональности $k = \frac{N(x)}{J}$ определялся для 8 образцов. Их поверхность была свежетравленная в травителе СР-8. Получается $k = (1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-3} \text{ мка}^{-1}$.

На рис.9 показаны значения концентраций примесей и термотока для детектора №156.

Выводы

Измеряя тэдс и термоток в зависимости от положения термозонда на боковой поверхности кремниевых $n - p$ и $n - i - p$ - переходов, можно качественно оценить распределение концентрации примесей по длине образца. По распределению концентрации примесей можно судить:

- 1) о глубине перехода после диффузии лития в кремний;
- 2) о качестве перехода после диффузии лития в кремний;
- 3) о равномерности компенсации i - области детектора.

Л и т е р а т у р а

1. R.Henck, L.Stab, G.Silva, G.Lopesda, P.Siffert, A.Codie. JEEE Tr. Nucl. se. NS. 3, 243 (1966).
2. Р.Смит. Полупроводники, перевод с английского, под редакцией В.П.Жузе, Москва (1962).
3. Я.Тауц. Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках, перевод с чешского, под редакцией Б.Т.Коломыйца, Москва (1962).
4. P. H.Geballe, G.W.Hull, Phys.Rev. 98, 940 (1955).
5. Л.П.Бабенко, Ван Чжень-ва, Б.М.Головин, Б.П.Осипенко, А.И.Сидоров. Материалы совещания по полупроводниковым детекторам ядерных излучений. ОИЯИ, Дубна, 40, 1962г.

6. А.С.Антонов, Б.П.Осипенко, Л.Г.Юскеселиева. *Ж.физ.химии*, 33; №9 (1965).
7. В.С.Васильев, Б.П.Осипенко, С.В.Лакева. *Препринт ОИЯИ*, 2875, Дубна, 1966.
8. Л.С.Берман. *Нелинейная полупроводниковая емкость*. Физматгиз, Москва, 1963.
9. А.С.Антонов, *ФТТ*, т.8, 1325 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
12 февраля 1968 года.

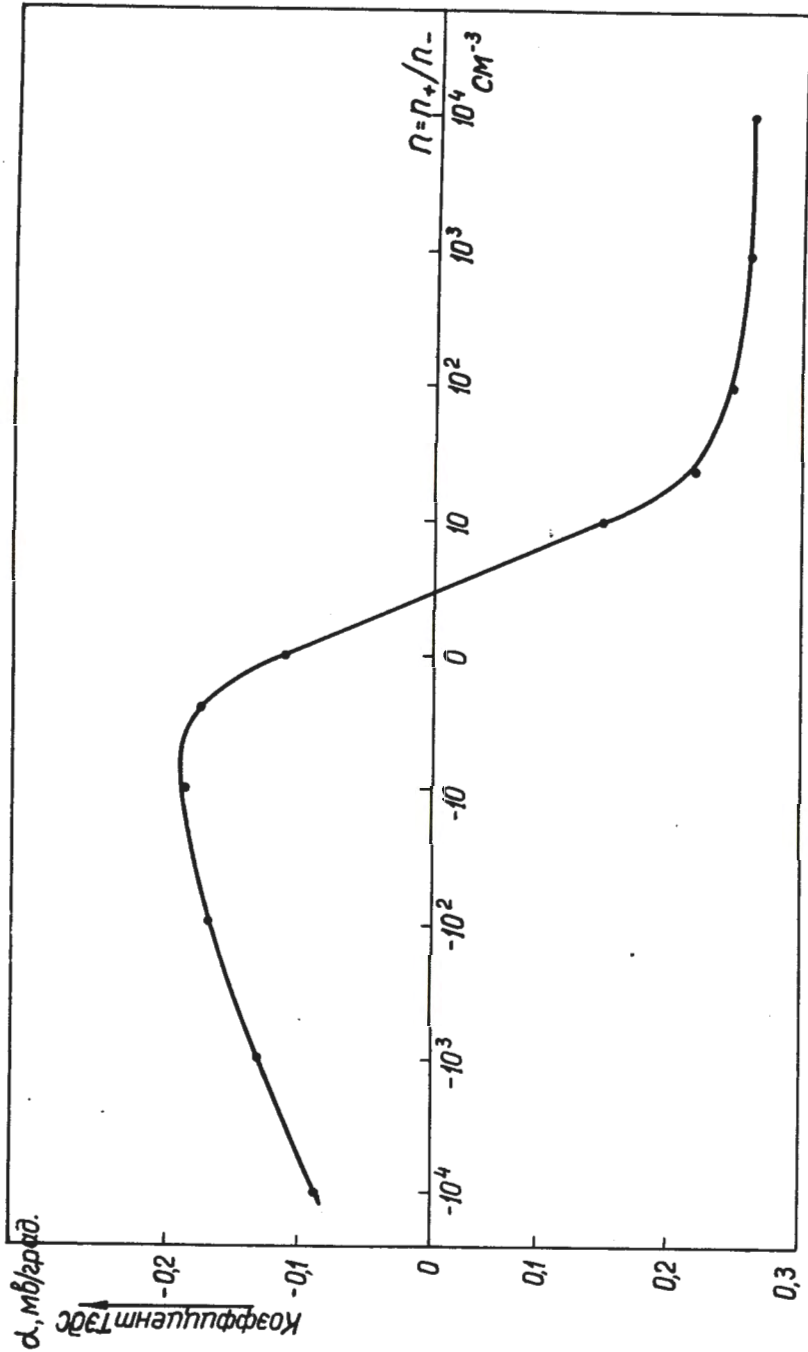


Рис.1. Зависимость коэффициента тэдс α при различных отношениях концентрации доноров n_+ и акцепторов n_- при температуре $T = 300^\circ K$. Концентрация акцепторов в исходном материале $n_+ = 10^{13} cm^{-3}$.

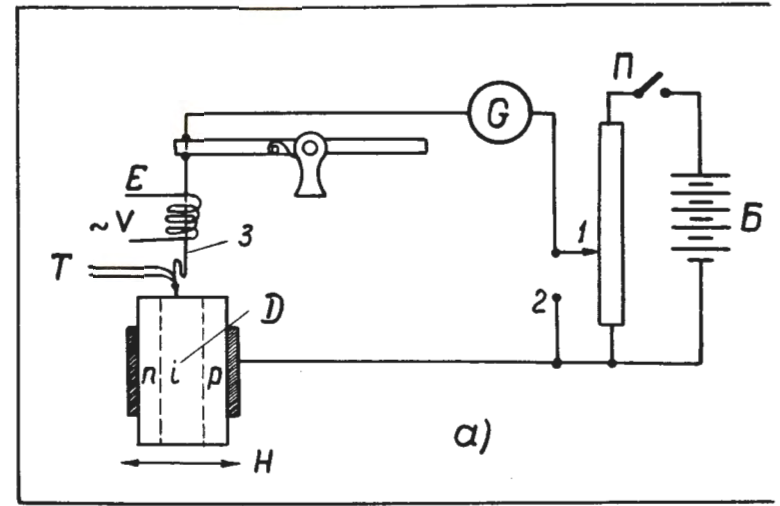


Рис.2а. Принципиальная схема измерительной установки; D - детектор, T - термозонд, E - электропечь, T - термopа, H - направление перемещения зонда, Π - потенциометр, B - батарея, положение 1-измеряется тэдс, положение 2-измеряется термоток.

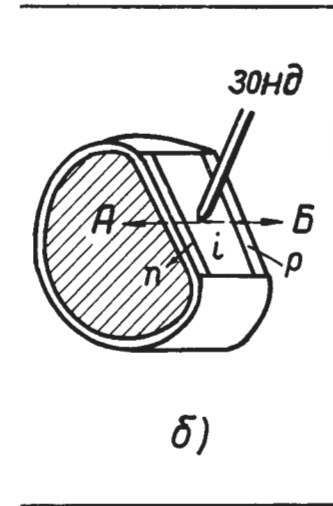


Рис.2б. Расположение термозонда над поверхностью детектора D , AB - направление перемещения зонда.

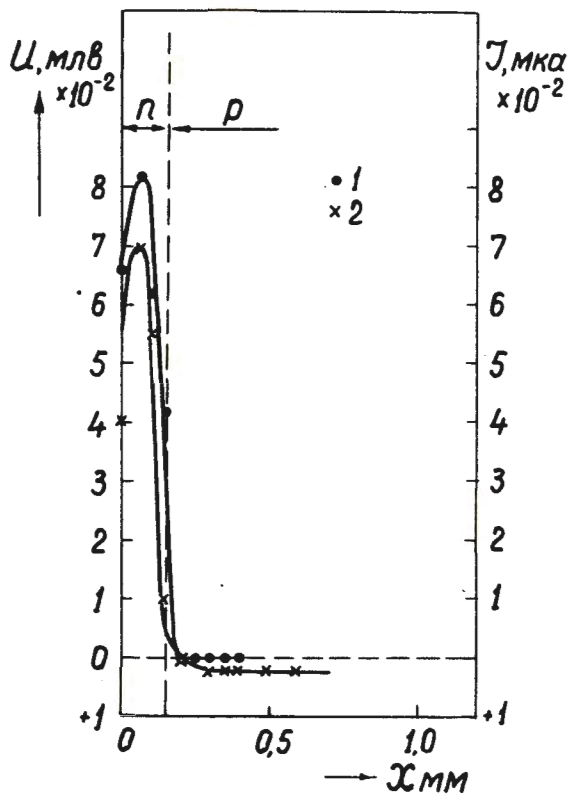


Рис.3. Распределение тэдс (кривая 1) и термотока (кривая 2) в диффузионном $n-p$ - переходе образца №19. При напряжении обратного смещения $U = 100$ вольт ток $I = 45$ мка.

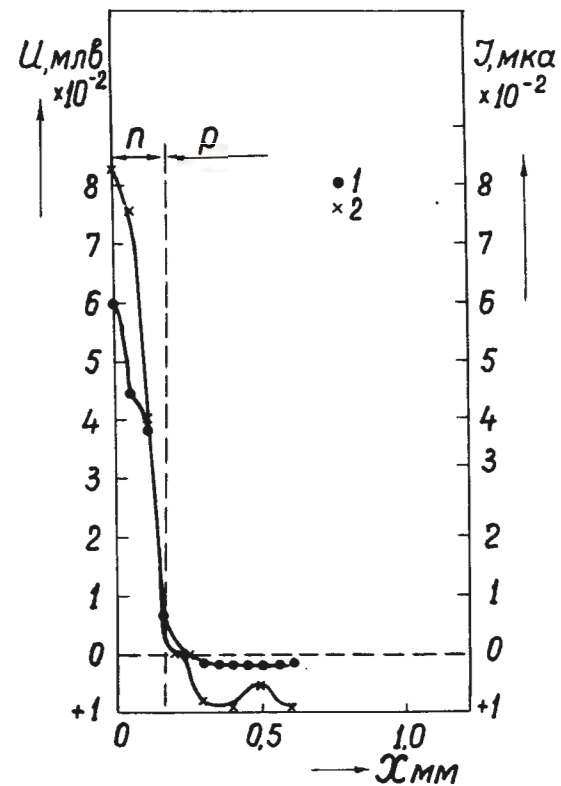


Рис.4. Распределение тэдс (кривая 1) и термотока (кривая 2) в диффузионном $n-p$ - переходе образца №18. При напряжении обратного смещения $U = 100$ вольт ток $J = 9$ мка.

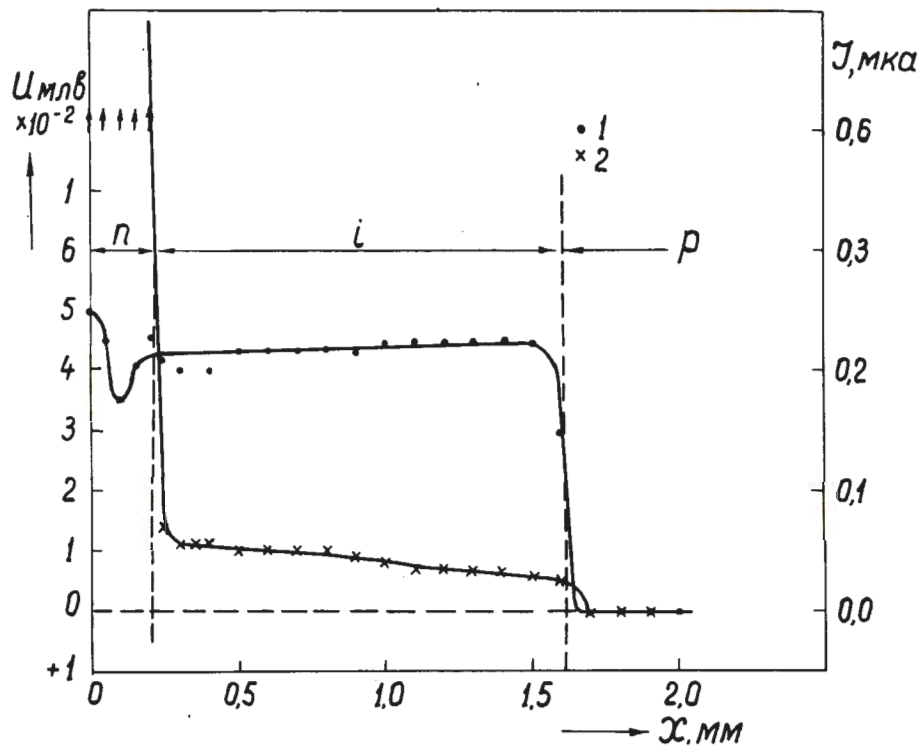


Рис.5. Распределение тэдс (кривая 1) и термотока (кривая 2) в дрейфовом п-і-р - детекторе №225 после свежего травления в смеси HNO_3 ; $\text{HF} = 10 : 1$.

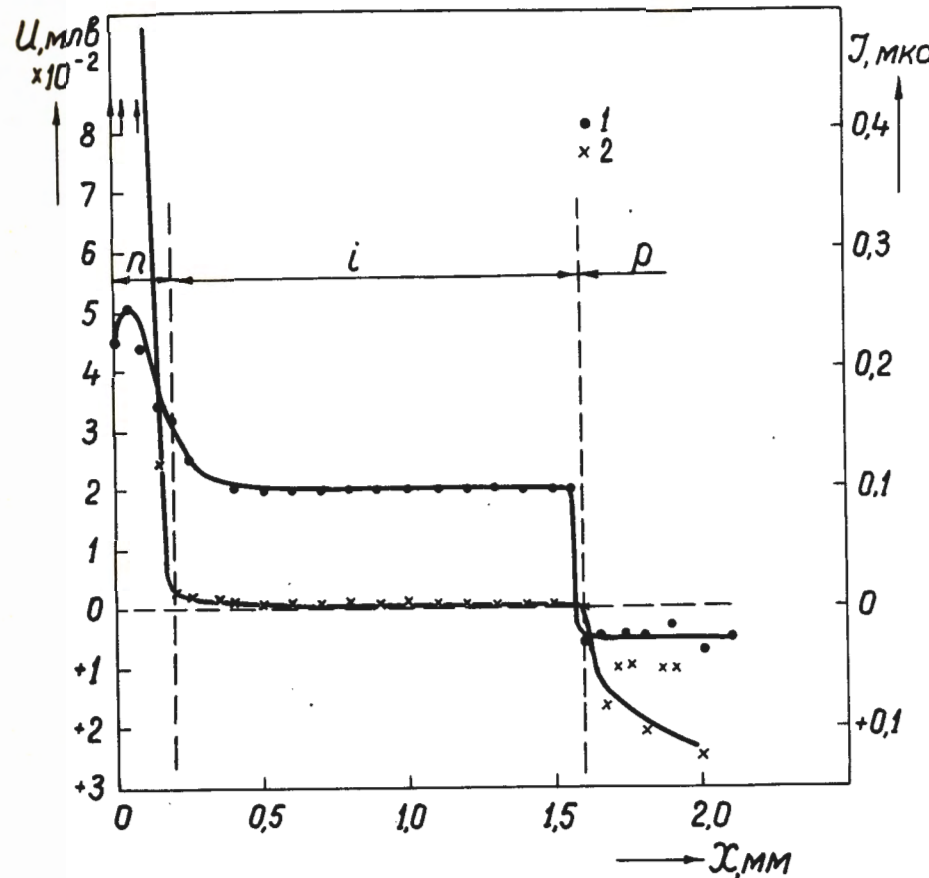


Рис.6. Распределение тэдс (кривая 1) и термотока (кривая 2) в дрейфовом п-і-р - детекторе №225 после шлифовки микропорошком М-14.

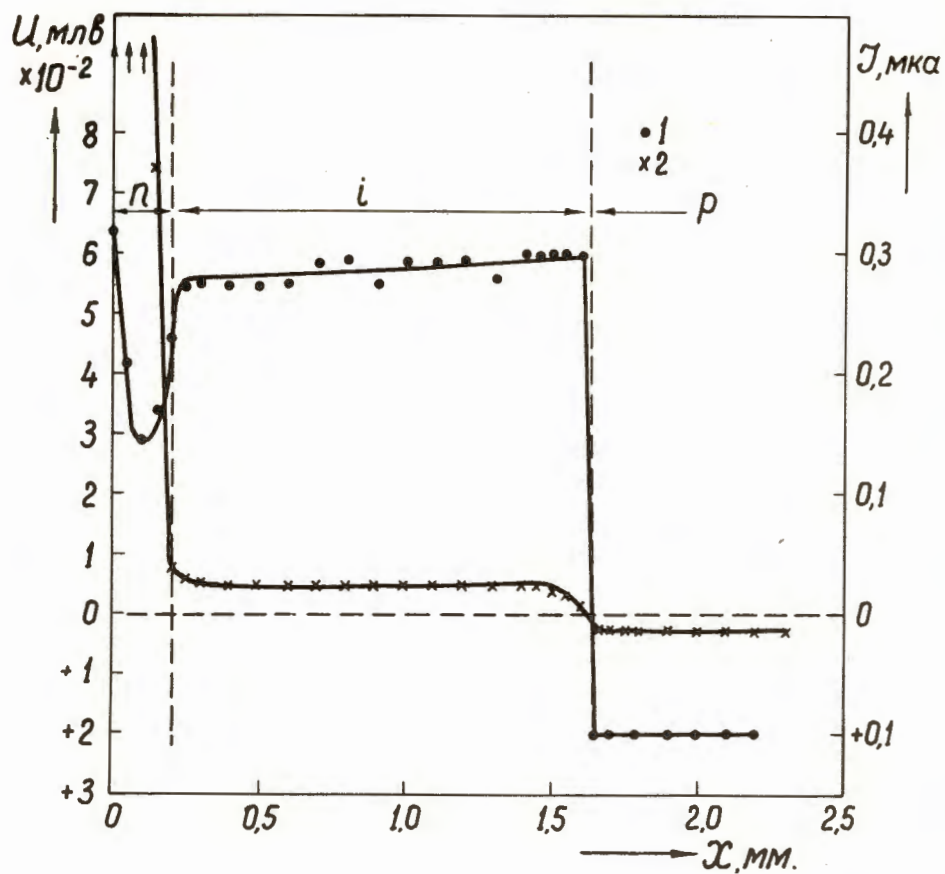


Рис.7. Распределение тэдс (кривая 1) и термотока (кривая 2) в n-i-p-детекторе №225 после обработки в водном растворе бихромата калия.

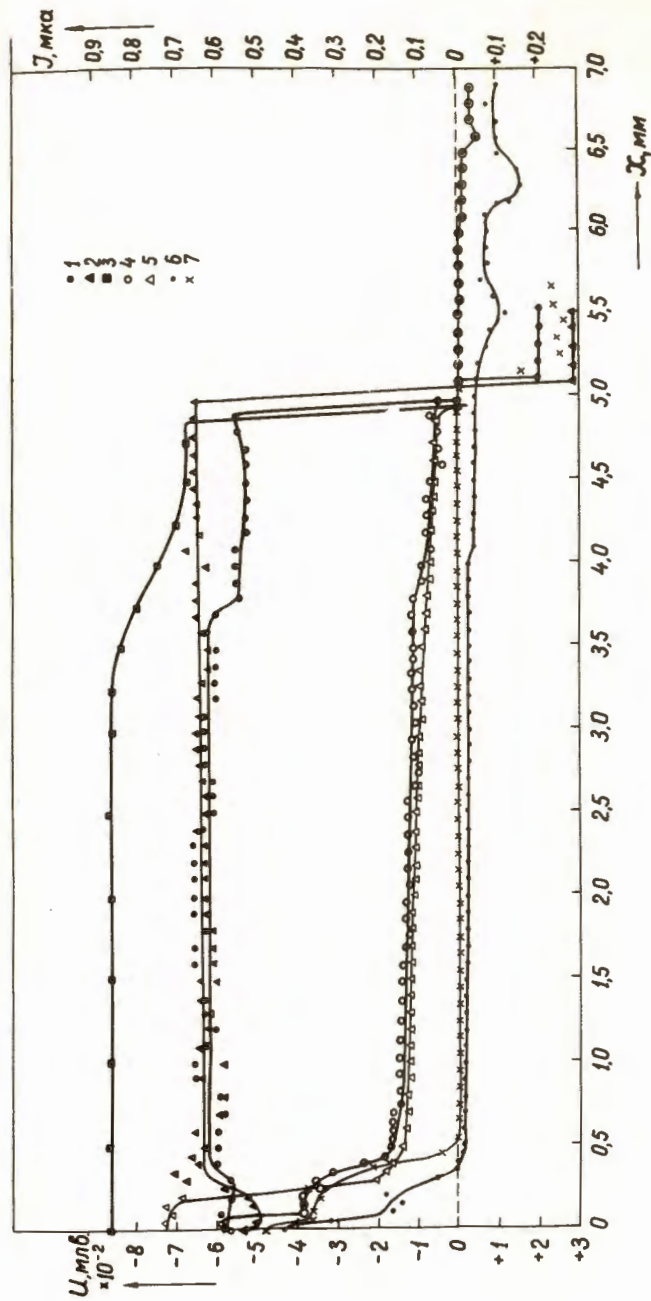


Рис.8. Распределение тэдс и термотока в n-i-p-детекторе №5; кривая 1 - тэдс на свежеравленном детекторе в СР-8; №5 кривая 2 - тэдс через 10 дней после травления в СР-8; №5 кривая 7 - тэдс на свежешлифованном детекторе; №5 кривая 4 - термоток на свежеравленном образце в СР-8; №5 кривая 5 - термоток через 10 дней после травления в СР-8; №5 кривая 6 - термоток через 6 месяцев после шлифовки микропорошком М-5; №5 кривая 3 - распределение потенциала по поверхности детектора при напряжении смещения 86 в.

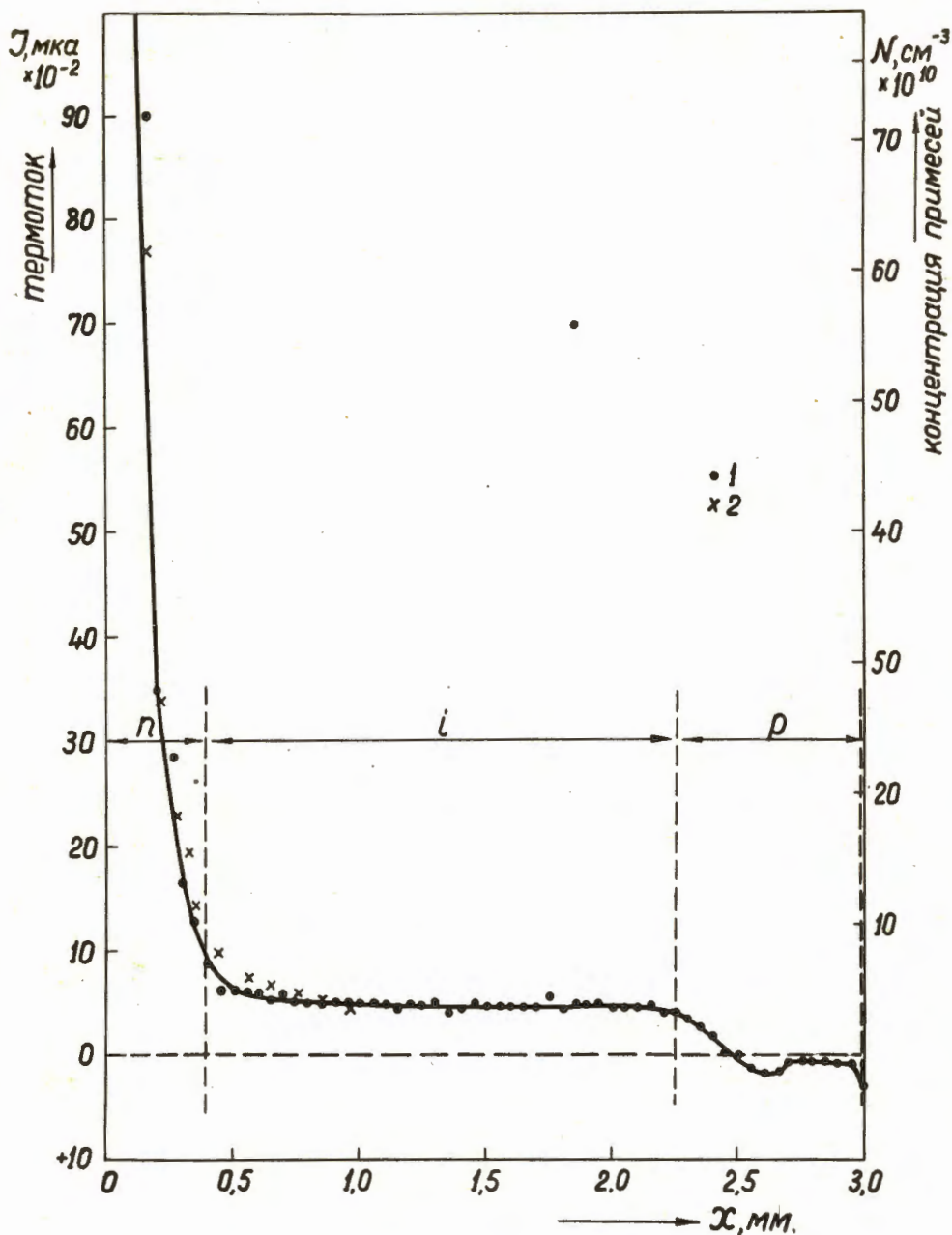


Рис.9. Распределение термотока (кривая 1) и концентрация примесей (кривая 2) на поверхности детектора №158, травленного в СР-8 $K = \frac{N(x)}{J} = 0,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \mu\text{A}^{-1}$.