

С 344. 1м  
Ю-896

Изв. АН СССР, сер. физ., 1967, т. 31,  
№2, с. 255-259

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2489



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Л.Г. Юскеселиева

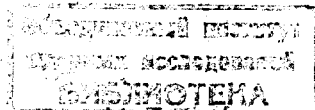
О ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ  
В КРЕМНИЕВЫХ p-i-n-ДЕТЕКТОРАХ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1965

P-2489

Л.Г. Юскеселива

О ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ  
В КРЕМНИЕВЫХ p-i-n-ДЕТЕКТОРАХ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



3893/2 чф

## В в е д е н и е

Кремниевые р - i - п -детекторы ядерных излучений, полученные путем дрейфа ионов лития в электрическом поле р - п -перехода<sup>/1/</sup>, нашли в последнее время большее применение в ядерной спектроскопии<sup>/2/</sup>.

В процессе исследования механизма формирования области, чувствительной к излучению, нами были обнаружены некоторые структурные дефекты р - п -перехода кремниевых р - i - п -детекторов. В настоящей работе приведены результаты по выявлению дефектов, возникающих во время дрейфа ионов лития в монокристалле кремния р -типа, изменения и связи этих дефектов с некоторыми электрическими характеристиками р - п -перехода кремниевых р - i - п -детекторов.

### Выявление дефектов р - п -перехода в кремниевых

### р - i - п -детекторах и экспериментальные результаты

Дефекты р - п -перехода в кремниевых р - i - п -детекторах были обнаружены во время дрейфа ионов лития при выявлении границы р - п -перехода одновременно тремя методами:

- 1) проявление сухими негативными и позитивными электрофотографическими проявителями<sup>/3/</sup>;
- 2) проявление жидким электрофотографическим проявителем<sup>/4/</sup>;
- 3) проявление методом электрохимического отложения меди<sup>/5/</sup>.

На рисунке 1 показана микрофотография границы р - п -перехода, в образце № 9 у которого был обнаружен дефект после 29 ч. дрейфа ионов лития. Благодаря присутствию неоднородностей в монокристалле кремния граница р - п -перехода изменилась. Проявление р - п -перехода было осуществлено с помощью сухого позитивного электрофотографического проявителя ПС-1. Образец № 9 был отрезан перпендикулярно направлению<sup>(III)</sup> из слитка кремния р -типа, выращенного методом Чохральского, и находился на расстоянии 7 см от начала слитка. Образец представлял

собой пластинку толщиной 5,8 мм и диаметром 1,80 см с удельным сопротивлением  $\rho = 259 \text{ ом.см}$  и временем жизни основных носителей  $\tau = 150 \text{ мксек.}$

Диффузия лития проводилась в атмосфере аргона при температуре  $T = 283^\circ\text{C}$  в течение 30 минут. Условия дрейфа ионов лития для этого образца были следующие: температура  $T = 138^\circ\text{C}$ ; напряжение обратного смещения  $U = 100 \text{ в.}$  Время  $t = 36 \text{ ч.}$  Полученные толщины отдельных слоев детектора имеют следующие значения (вне дефекта): толщина скомпенсированной области  $w_1 = 1,104 \text{ мм.}$ ; толщина  $n$ -области  $w_n = 124 \text{ мкм.}$

Обнаруженный после 28 ч дрейфа дефект  $p-n$ -перехода в образце 8 увеличился после 36 ч дрейфа.

Вид  $p-n$ -перехода у другого детектора (образец 5) также довольно странный. Дефект был обнаружен после 50 ч дрейфа ионов лития. Граница  $p-n$ -перехода была проявлена последовательно жидким электрофотографическим проявителем (рис. 2а) при напряжении обратного смещения  $U = 100 \text{ в}$  и с помощью электрохимического отложения меди без прикладывания напряжения (рис. 2б).

Образец 5 был отрезан также перпендикулярно направлению (111) из другого слитка и находился на расстоянии 3 см от начала слитка. Удельное сопротивление образца  $\rho = 422 \text{ ом.см.}$  время жизни основных носителей  $\tau = 470 \text{ мксек.}$  Диффузия и дрейф ионов лития производились при следующих условиях: температура диффузии  $T = 300^\circ\text{C}$ , время диффузионного отжига  $t = 30 \text{ мин.}$  температура дрейфа  $T = 138^\circ\text{C}$ , напряжение обратного смещения  $U = 97 \text{ в.}$  время дрейфа  $t = 50 \text{ ч.}$  Средние толщины отдельных слоев (вне дефекта) имеют следующие значения:

$$w_n = 187 \text{ мкм}; \quad w_1 = 1,316 \text{ мм.}$$

Обнаруженные дефекты  $p-n$ -перехода в монокристалле кремния  $p$ -типа распространяются обратно направлению дрейфа ионов лития и достигают только  $n$ -области. Это хорошо видно на рис. 2б.

В образце 14 был обнаружен во время дрейфа ионов лития дефект вблизи торца образца. На рис. 3 показана микрофотография границы  $p-n$ -перехода этого образца. Форма дефекта, очевидно, сохранялась с 14 ч. по 44 ч. дрейфа ионов лития, только глубина залегания  $p-n$ -перехода увеличилась. Условия диффузии и дрейфа ионов лития для образца 14 были одинаковы с условиями для образцов, у которых не обнаружено никаких дефектов  $p-n$ -перехода.

#### Обсуждение результатов

Обычно считается, что любой дефект  $p-n$ -перехода детектора должен внести изменение в его электрические характеристики. Нами этого не наблюдалось. На рис. 4

дана емкостная характеристика образца 5. Видно, что никаких изменений в виде кривой не произошло во время дрейфа, несмотря на присутствие дефекта  $p-n$ -перехода детектора (см. рис. 2). Вид кривой вольт-амперной характеристики детекторов с дефектами  $p-n$ -перехода тоже не изменился. В некоторых кремниевых  $p-i-n$ -детекторах, однако, во время дрейфа ионов лития наблюдались дефекты в виде трещины. В этом случае ток через образец сразу увеличивался, наступал пробой. Изменение значения тока во время дрейфа ионов лития через образец 4, у которого наблюдалась трещина, и через образец 9, у которого обнаружен дефект  $p-n$ -перехода (см. рис. 1), показано на рис. 5. Ток через образец 4 увеличился на порядок при появлении трещины (момент А, на рис. 5), а ток через образец 9 не изменялся существенно (в моменте В на рис. 5 обнаружен дефект; в моменте В - дефект увеличился и сделана фотография (см. рис. 1)). Вольт-амперные характеристики образца 4, снятые до появления трещины и после ее удаления, показаны на рис. 6. Очевидно, что структурные несовершенства монокристалла кремния в виде трещины оказывают влияние на его электрические свойства. У всех детекторов с дефектами  $p-n$ -перехода подобных изменений не наблюдалось.

Нами были проведены эксперименты, позволяющие сравнить электрические свойства  $p-i-n$ -детекторов, у которых были обнаружены дефекты  $p-n$ -перехода во время дрейфа ионов лития с электрическими свойствами детекторов, у которых не обнаружено никаких дефектов. Все образцы были отрезаны из одного и того же слитка и получены одновременно при одинаковых условиях диффузии и дрейфа ионов лития. Поверхностная обработка всех образцов проводилась тоже одинаково.

На рис. 7 показаны вольт-амперные характеристики четырех кремниевых  $p-i-n$ -детекторов во время дрейфа ионов лития ("а" - после диффузии; "б" - после 4 ч. дрейфа; "в" - после 20 ч. дрейфа и "г" - после 50 ч. дрейфа). В образцах 1 и 2 (кривые с точками и треугольниками) никаких дефектов во время дрейфа ионов лития не наблюдалось. В образце 14 (кривая с крестиками) обнаружен дефект  $p-n$ -перехода после 14 ч. дрейфа; в образце 5 (кривая с кружками) обнаружен дефект  $p-n$ -перехода после 50 ч. дрейфа. Хорошо видно, что с самого начала дрейфа ионов лития в кремний значение обратного тока в образцах с дефектами  $p-n$ -перехода значительно выше, чем в образцах, у которых нет дефектов.

Ток через образец 9, у которого наблюдался дефект  $p-n$ -перехода, тоже на порядок выше, чем ток через образец 4, у которого такого дефекта не наблюдалось (рис. 8).

## В ы в о д ы

1. В настоящей работе впервые приведены результаты исследования дефектов  $p-n$ -перехода в кремниевых  $p-i-n$ -детекторах, возникших во время дрейфа ионов лития. Измерения производились одновременно методом проявления  $p-n$ -перехода сухими и жидкими электрофотографическими проявителями при прикладывании напряжения обратного смещения (порядка 100 вольт) и с помощью электрохимического отложения меди без прикладывания напряжения. Результаты, полученные на основе применения этих трех методов, идентичны.

2. Обнаруженные дефекты  $p-n$ -перехода кремниевых  $p-i-n$ -детекторов приводят к большим значениям обратного тока в образцах по сравнению с током в образцах без дефектов. Установлено, что никакая обработка поверхности образца не уменьшает значения обратного тока до его нормального значения (2-10 мкА при 100 В). Вероятно, справедлива и обратная ситуация. Этот вопрос является особенно перспективным с точки зрения улучшения технологии кремниевых  $p-i-n$ -детекторов.

3. Влияние дефектов  $p-n$ -перехода во время дрейфа ионов лития на процесс формирования чувствительной к излучению области детектора достаточно сложно. Возможно, что обнаруженные дефекты  $p-n$ -перехода обязаны присутствию неоднородностей в распределении акцепторов в монокристалле кремния. В этом случае метод выявления дефектов  $p-n$ -перехода во время дрейфа ионов лития позволил бы измерять довольно маленькие изменения в плотности акцепторных примесей в кремнии, имеющие большое значение для изучения механизма процесса выращивания монокристаллов по методу Чохральского.

4. Метод выявления дефектов  $p-n$ -перехода в кремниевых  $p-i-n$ -детекторах во время дрейфа ионов лития вполне приложим для исследования неоднородностей  $p-n$ -перехода и других полупроводниковых материалов, в частности, в германиевых  $p-i-n$ -детекторах.

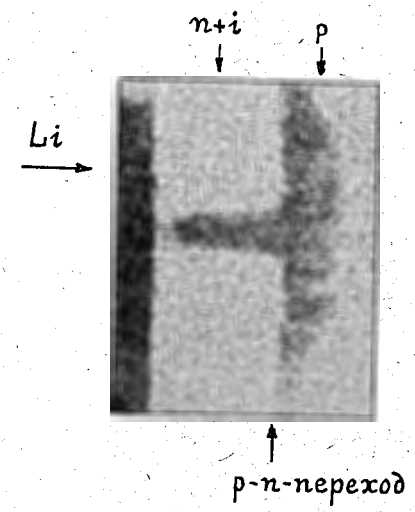
## Л и т е р а т у р а

1. E.M.Pell. J. Appl. Phys., 31, no. 2, 291 (1960).
2. N.A.Baily, J.W.Mayer, R.J.Grainger. IRE Trans. NS-9, no. 1, 91 (1962).
3. А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева. Препринт ОИЯИ 2232, Дубна 1965.
4. А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева. Препринт ОИЯИ Р-2002, Дубна 1965.
5. А.С. Антонов, Б.П. Осипенко, Л.Г. Юскеселиева. ЖФХ, 39, № 9, 2252 (1965).

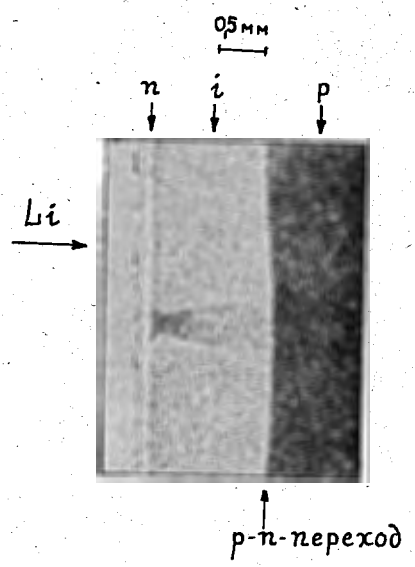
Рукопись поступила в издательский отдел  
6 декабря 1965 г.



Рис. 1. Дефект  $p-n$ -перехода в кремниевом  $p-i-n$ -детекторе (образец 9), выявленный сухим позитивным электрофотографическим проявителем. Стрелкой указано направление диффузии и дрейфа ионов лития. Время дрейфа - 36 часов.



a)



б)

Рис. 2. Дефект p-n-перехода в кремниевом p-i-n-детекторе (образец Б), выявленный жидким электрофотографическим проявителем (а) и электрохимическим отложением меди (б). Время дрейфа - 50ч.

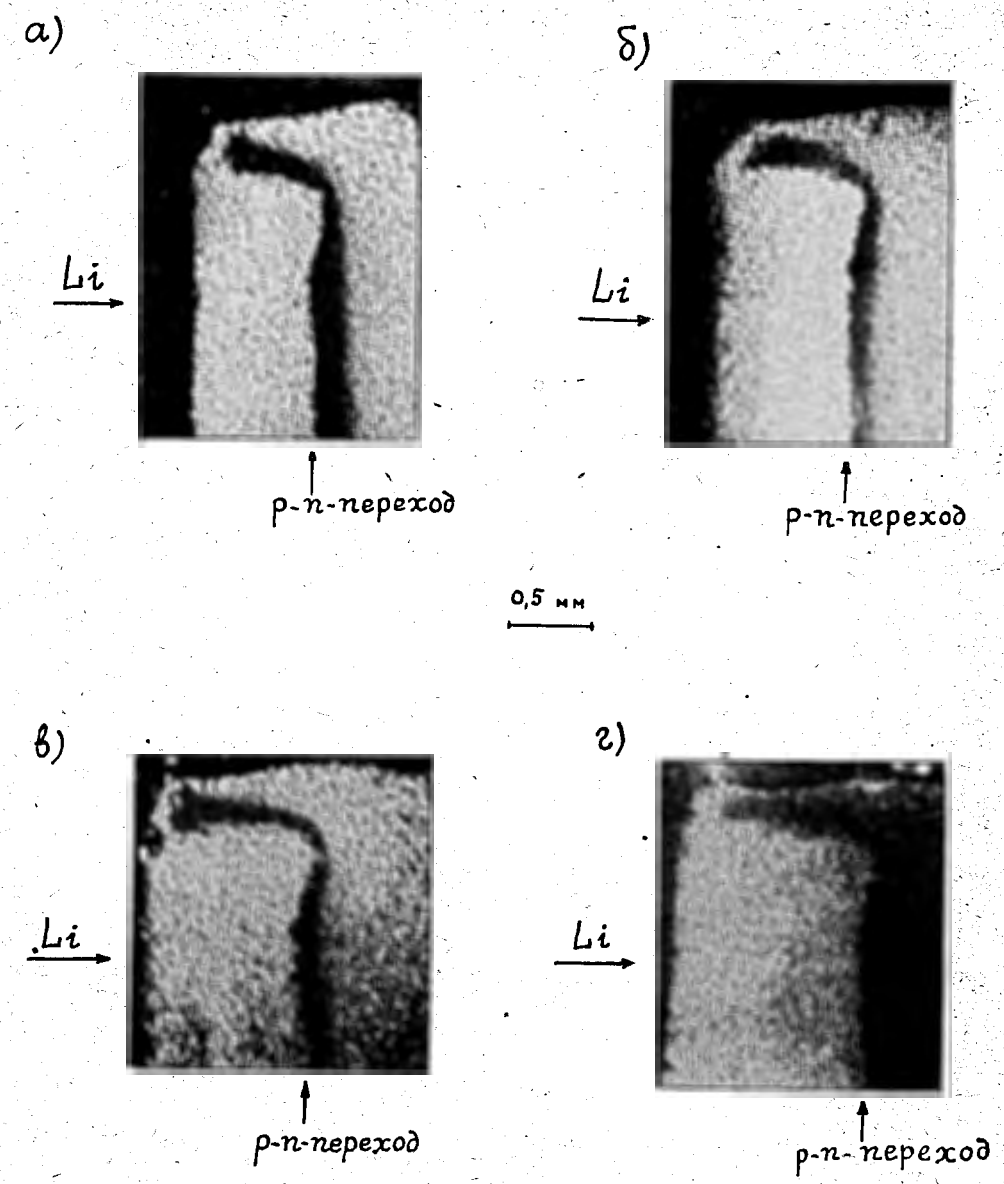


Рис. 3. Изменение дефекта p-n-перехода в кремниевом p-i-n-детекторе (образец 14) во время дрейфа ионов лития. а) после 14 ч. дрейфа; б) после 24 ч. дрейфа; в) после 34 ч. дрейфа; г) после 44 ч. дрейфа. p-n-переход выявлен жидким электрофотографическим проявителем. Стрелка слева показывает направление диффузии и дрейфа ионов лития.

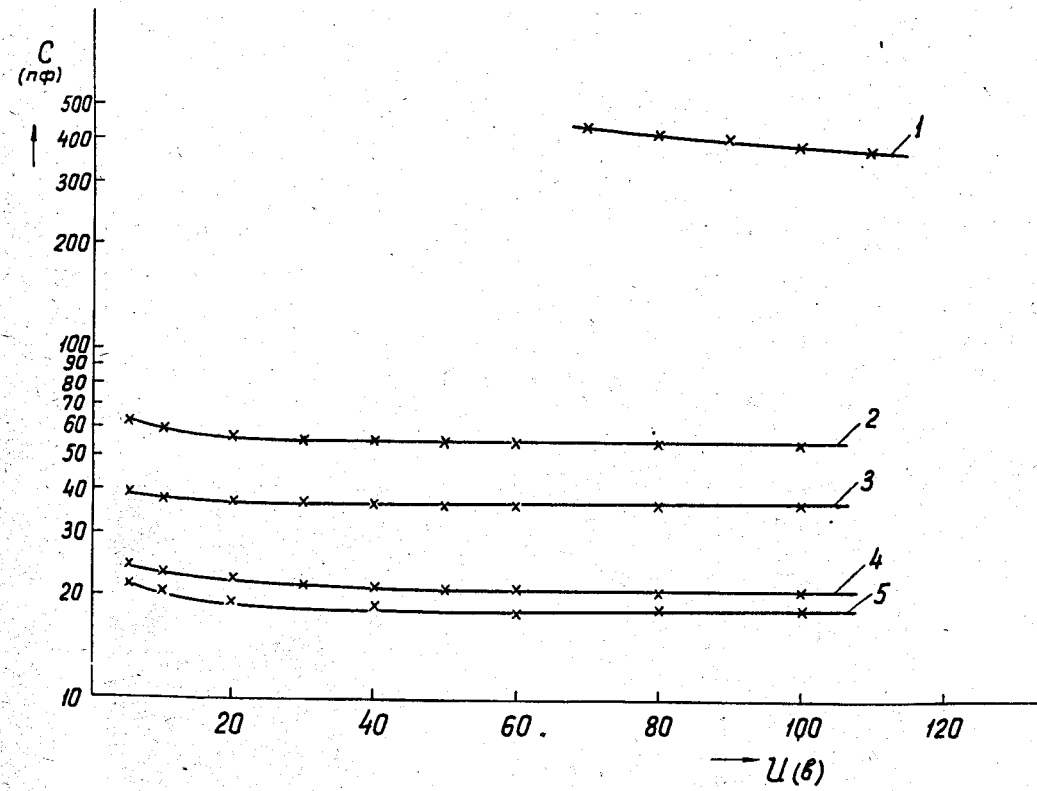


Рис. 4. Емкостная характеристика кремниевого р - и - п - детектора (образец 5) во время дрейфа ионов лития. 1 - после диффузии; 2 - после 4 ч. дрейфа; 3 - после 10 ч. дрейфа; 4 - после 30 ч. дрейфа; 5 - после 50 ч. дрейфа (обнаружен дефект).

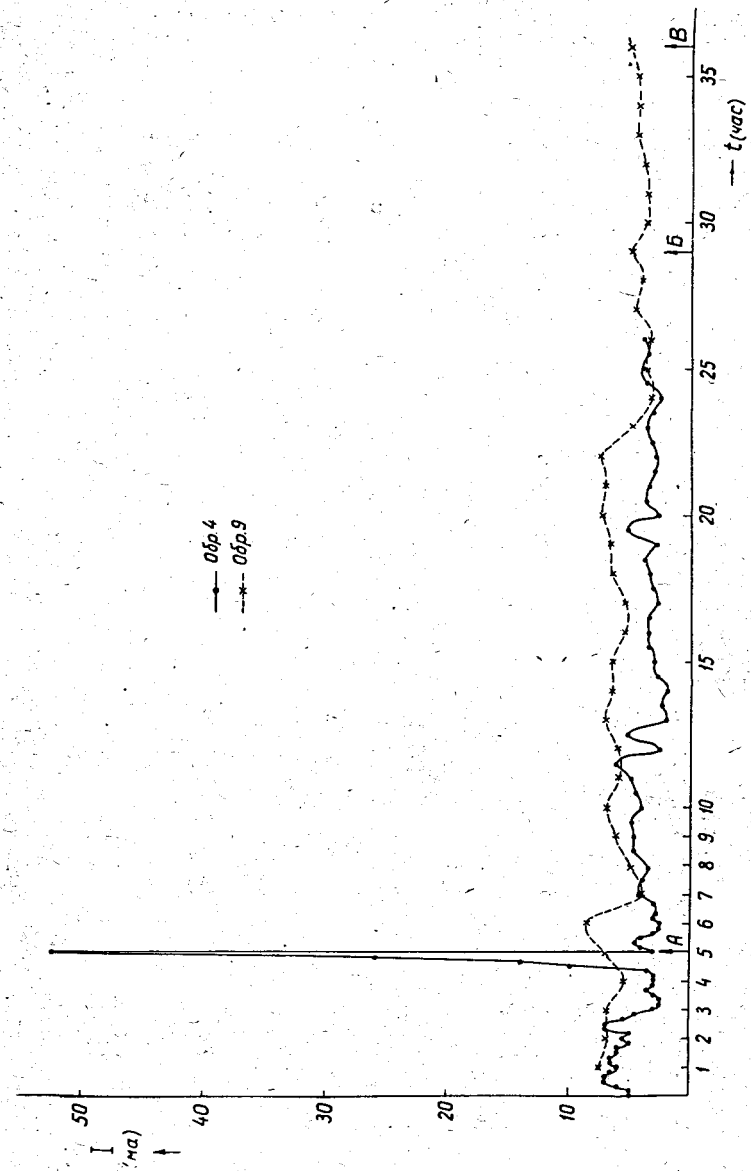


Рис. 5. Ток обратного смещения через образцы 4 и 9 во время дрейфа ионов лития. А - момент появления трещины в образце 4; Б - момент обнаружения дефекта р - и - перехода в образце 9; В - момент фотографирования дефекта в образце 9 (см. рис. 1).

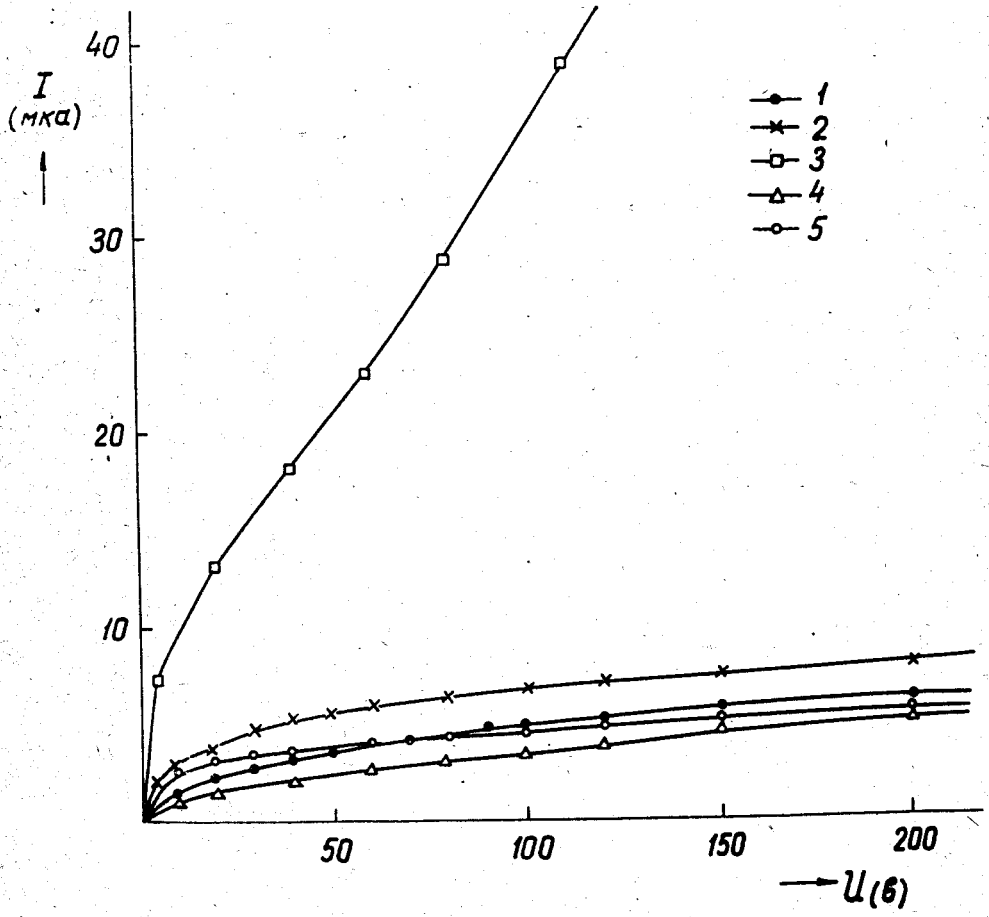


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика кремниевого р - i - n - детектора, у которого обнаружена трещина. Кривая 1 снята после 2 ч. дрейфа; кривая 2 - после 4 ч. дрейфа; кривая 3 - после 5 ч. дрейфа (обнаружена трещина); кривая 4 - после удаления трещины; кривая 5 - после 13 ч. дрейфа.

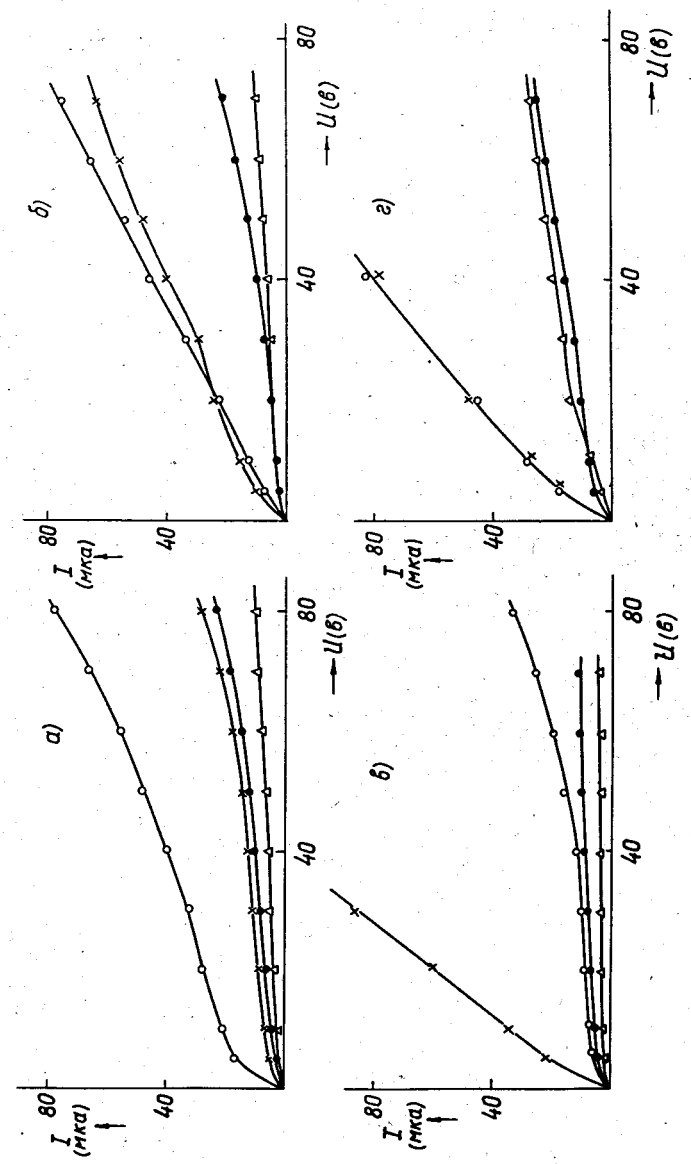


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики четырех кремневых р - i - n - детекторов во время дрейфа ионов лития: а) после диффузии; б) после 4 ч. дрейфа; в) после 20 ч. дрейфа; г) после 50 ч. дрейфа. . . . - обр. 1;  $\Delta\Delta\Delta$  - обр. 2;  $\circ\circ\circ$  - обр. 5;  $\times\times$  - обр. 14. В образцах 5 и 14 обнаружены дефекты р - n - перехода (см. рис. 2 и 3).



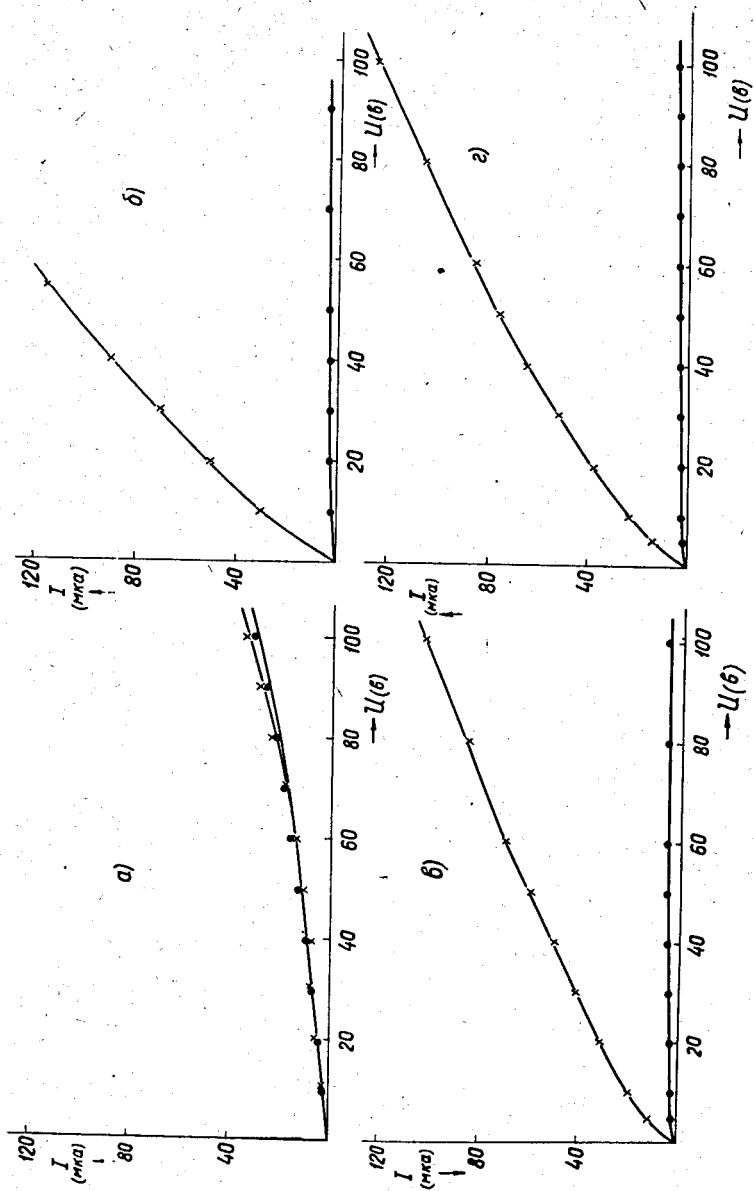


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики двух кремниевых  $p-i-n$ -детекторов во время дрейфа конов лития: а) после диффузии; б) после 2 ч. дрейфа; в) после 4 ч. дрейфа; г) после 29 ч. дрейфа.  $\times \times \times$  - образец 9, у которого обнаружен дефект  $p-n$  - перехода (см. рис. 1);  $\dots$  - обр. 4 - без дефектов.