

С 361

72/14-60

A-724

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 2598



А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДРЕЙФА ИОНОВ ЛИТИЯ В КРЕМНИЕВЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ p -ТИПА

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

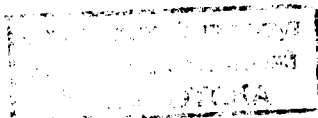
1966

P - 2598

А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДРЕЙФА ИОНОВ ЛИТИЯ В КРЕМНИЕВЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ p -ТИПА

Направлено в ФТТ



ИИИИ / 1 сеп.

Исследования компенсации акцепторов бора в кремнии p -типа путем дрейфа ионов лития в электрическом поле p - n -перехода были проведены впервые Пеллом^{/1/}. Толщина скомпенсированной литием области (i -области) вычислялась из емкости p - n -перехода. Результаты опыта хорошо согласуются с теоретическими выводами, полученными Пеллом при предположении, что в области компенсации концентрация атомов лития N_d везде постоянна и равна концентрации атомов бора N_a .

В работах^{/2,3/} изучался микромеханизм образования комплексов литий - бор и литий - кислород. Лерер и Рейсс^{/4/} определили теоретически функцию распределения атомов лития в области компенсации акцепторов бора в кремнии при предположении, что положение p - n -перехода во время дрейфа не изменяется и распределение концентрации доноров после диффузии имеет линейный характер. В ранее выполненной работе^{/5/} было получено экспериментально распределение концентрации примесей в области дрейфа путем измерений емкости p - n -перехода и толщины области отрицательного пространственного заряда^{/6/}.

Настоящая работа посвящена исследованию вопроса о механизме формирования p - i - n -структуры путем дрейфа ионов лития в кремниевых монокристаллах p -типа. В частности, приводятся некоторые экспериментальные результаты по изучению поведения n -, i -, p -слоев во время дрейфа ионов лития^{x/}.

Методика эксперимента

Исследование проводилось на монокристаллическом кремнии p -типа, выращенном по методу Чохральского. Экспериментальные образцы были отрезаны перпендикулярно направлению $[111]$ и имели форму пластинки с диаметром 1,8 см и толщиной 5 мм. Удельное сопротивление - 683 ± 216 ом. см; время жизни основных носителей 200 ± 470 мксек; содержание кислорода $< 10^{16}$ см⁻³.

Образцы шлифовались карборундовым микропорошком и травились в травителе СР-4.

Диффузия лития проводилась в атмосфере аргона. Тонкий слой лития наносился

^{x/} Некоторые вопросы были кратко рассмотрены в предыдущей работе^{/5/}. Ниже приводится ряд новых результатов.

на одну сторону образцов путем испарения в вакууме (10^{-5} мм рт.ст.). Условия диффузии (время испарения, температура и время диффузионного отжига) приведены в таблице 1. После диффузии образцы быстро охлаждались до комнатной температуры и торцы образцов травились в медленном травителе ($\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 6:1:2$). В качестве омического контакта на образцы наносились никелевые электроды по методике, описанной в /7/.

Дрейф ионов лития проводился в обычной разряженной атмосфере (1 мм рт.ст.). Температура дрейфа и напряжение обратного смещения указаны в таблице 2. Через определенное время дрейф останавливался, образцы охлаждались быстро до комнатной температуры, и после травления торцов (в медленном травителе) проводились измерения.

Емкость диффузионного и дрейфового $p-n$ -переходов измерялась по методике, описанной в /8/. Область отрицательного пространственного заряда в $p-n$ -переходе исследовалась с помощью жидкого электрофотографического проявителя /8/. Измерение положения границ между $n-$, $i-$ и $p-$ областями во время дрейфа изучалось путем электрохимического осаждения меди на переходах /9/.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

а) Исследования образцов после формирования диффузионного $p-n$ -перехода

На образцах с диффузионным $p-n$ -переходом снимались следующие зависимости:

- 1) зависимость емкости $p-n$ -перехода от напряжения обратного смещения;
- 2) зависимость ширины области отрицательного пространственного заряда от величины приложенного обратного напряжения. Исследовались также форма и глубина залегания диффузионного $p-n$ -перехода.

Результаты измерений для пяти образцов приведены в таблице 1. Концентрация примеси бора N_B была получена как усредненное значение данных, вычисленных тремя методами: измерением емкости $p-n$ -перехода, проявлением области отрицательного пространственного заряда и измерением удельного сопротивления (см. /6/).

Неровность границы $p-n$ -перехода, наблюдаемая в образце 1, по-видимому, связана с неодинаковым осаждением лития на поверхности образца (вероятно, из-за небольшого времени испарения).

б) Исследование образцов после формирования дрейфового $p-n$ -перехода

Через определенное время дрейфа на образцах снимались по порядку следующие зависимости: 1) зависимость емкости дрейфового $p-n$ -перехода от напряжения обратного смещения (величина напряжения менялась в пределах от нуля до соответствующего напряжения, при котором происходил дрейф); 2) зависимость ширины области отрицательного пространственного заряда в $p-n$ -переходе δ от времени дрейфа при обратном напряжении, равняющемся напряжению дрейфа; 3) зависимость ширины сильно обогащенной литием n -области x' и глубины залегания $p-n$ -перехода x_0 от времени дрейфа.

Результаты третьей группы исследований для образцов 1, 2, 5 и 14 приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, ширина n -области не изменяется во время дрейфа ионов лития независимо от условий диффузии и дрейфа. Об этом экспериментально обнаруженном результате (при более ограниченных условиях) сообщалось в предыдущей работе /5/. Интересно отметить, что толщина n -слоя во время дрейфа на несколько микронов меньше глубины $p-n$ -перехода после диффузии. Эта разница, по-видимому, должна быть равна ширине области положительного пространственного заряда.

Аналогичный результат получен и на образце 3, в котором диффузия лития произошла значительно глубже, чем в других образцах. Это иллюстрирует рис. 2, на котором показано изменение положения границ между $n-i$ и p -областями в образце 3 во время дрейфа. Толщина n -слоя у этого образца во время дрейфа оказывается тоже меньше глубины залегания диффузионного $p-n$ -перехода, причем разница между ними больше, чем у остальных образцов.

Глубина залегания $p-n$ -перехода растет во время дрейфа (см. рис. 1 и 2). Как видно из рис. 2, при больших временах дрейфа резкость отложения меди на границе между $n-i$ областями уменьшается. Это наблюдается во всех образцах. Очевидно, что электрохимическое отложение меди на этой границе, являющейся n^+-n -переходом, зависит от градиента концентрации примесей в переходе /9/. Так как градиент концентрации примесей в этом переходе уменьшается с увеличением времени дрейфа (см. /5/), то резкость в отложении меди ухудшается.

Зависимость ширины области отрицательного пространственного заряда в $p-n$ -переходе δ от времени дрейфа для пяти образцов показана на рис. 3. Как видно из рисунка, δ практически не изменяется во время дрейфа. Интересно отметить, что величина δ приблизительно постоянна для всех образцов, т.е. не зависит от условий диффузии и дрейфа лития и от концентрации бора в кремнии. Она тоже на порядок меньше толщины i -области. Так как n -область не изменяется во время дрейфа и δ

имеет довольно маленькие значения, то толщину скомпенсированной литием области можно получить практически, если из глубины залегания дрейфового $p-n$ -перехода вычитается глубина залегания диффузионного $p-n$ -перехода. Это полностью обосновывает предложенный раньше авторами метод для определения толщины скомпенсированной области в $p-i-n$ -детекторах с помощью сухих электрофотографических проявителей^{/10/}.

Полная ширина области пространственного заряда $p-n$ -перехода w была определена путем измерения толщины i -области (с помощью электрохимического отложения меди) и толщины области отрицательного пространственного заряда (с помощью жидкого электрофотографического проявителя) при напряжении U , равняющемся напряжению дрейфа. При предположении, что можно пренебречь свободными носителями в $p-n$ -переходе, т.е. в том случае если $p-n$ -переход полностью истощен, w вычисляется из выражения для емкости $p-n$ -перехода:

$$w = \frac{\epsilon S}{4\pi C},$$

где C - емкость $p-n$ -перехода, S - площадь перехода, ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Сравнение результатов, полученных для w обоими методами, показано в таблицах 3,4 и 5 (для образцов 1,3,14). Как видно из таблиц, получены довольно близкие значения (особенно при коротких временах дрейфа). Это указывает на то, что модель полностью истощенного $p-n$ -перехода подтверждается довольно хорошо для перехода, полученного путем дрейфа ионов лития в кремнии.

Экспериментально полученные значения для w (путем измерения ширины i -области и ширины области пространственного заряда) сравнивались со значениями, вычисленными по следующей хорошо известной формуле Пелла^{/11/} (выведенной для очень больших времен дрейфа):

$$w = (2\mu Ut)^{\frac{1}{2}},$$

(1)

где μ - подвижность ионов лития; U - прикладываемое к образцу напряжение в заданном направлении; t - время дрейфа ионов лития.

Экспериментальные и расчетные кривые для четырех образцов представлены на рисунках 4 и 5. Подвижность μ вычислена из значения коэффициента диффузии лития, измеренного Пеллом^{/11/}. Как видно из рисунков, у всех образцов экспериментальные кривые лежат выше теоретических, причем расхождение между ними уменьшается с увеличением времени дрейфа. Это можно объяснить тем, что в действительности литий не компенсирует полностью бор в области дрейфа, как это предполагается при выводе формулы (1). Только в том случае, когда время дрейфа растет неограниченно, концентрация ионов лития стремится достичь во всей области дрейфа концентрации атомов бора в кремнии (см.^{/5/}).

Выводы

1) Приведены данные по исследованию сильно обогащенной литием n -области после формирования диффузионного $p-n$ -перехода и во время дрейфа ионов лития в кремнии p -типа. Показано, что скомпенсированная литием область растет во время дрейфа только по направлению перемещения ионов лития независимо от условий диффузии и дрейфа. Толщина n -области не изменяется во время дрейфа и практически равна величине глубины залегания $p-n$ -перехода после диффузии.

2) С помощью жидкого электрофотографического проявителя исследовалась область отрицательного пространственного заряда $p-n$ -перехода после диффузии и во время дрейфа ионов лития. Показано, что ширина области отрицательного пространственного заряда не изменяется во время дрейфа и приблизительно одинакова для всех образцов.

3) Сделано заключение, что путем измерения глубины залегания дрейфового и диффузионного $p-n$ -переходов можно получить практически величину толщины скомпенсированной литием области.

4) Полная ширина w скомпенсированной литием области измерена путем проявления дрейфового $p-n$ -перехода электрохимическим отложением меди и путем осаждения жидкого электрофотографического проявителя на области отрицательного пространственного заряда. Результаты сравнивались с результатами, полученными по измерению емкости $p-n$ -перехода. Экспериментальные данные обсуждены с применением теории Пелла.

Литература

1. E.M.Pell. J.Appl. Phys., **31**, N 2, p.291 (1960).
2. E.M.Pell. J.Appl. Phys., **32**, p.1048 (1961).
3. R.M.Chrenko, R.S.McDonald., E.M.Pell. Phys. Rev., **138**, N:6A, p. 1775 (1965).
4. F.A.Lehrer, H.Reiss. J.Appl. Phys., **33**, N 7, p. 2353 (1962).
5. А.С. Антонов. Препринт ОИЯИ, 2242, Дубна, 1965.
6. А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева. ДАН, **184**, № 6 (1965).
7. J.H.Eigler, J.Electrochemical Soc., **104**, N 4, p. 226 (1957).
8. А.С. Антонов. Препринт ОИЯИ, 2029, Дубна, 1965.
9. А.С. Антонов, Б.П. Осипенко, Л.Г. Юскеселиева, ЖФХ, **39**, № 9, 2252 (1965).
10. А.С. Антонов, Л.Г. Юскеселиева. Материалы восьмого совещания по ядерной спектроскопии нейтронодефицитных изотопов, изомерии ядер и теории ядра. Препринт ОИЯИ, 2412, Дубна, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 1966 г.

Таблица 1

№ образца	$10^{-13} N_{\text{л}} \text{ (см}^{-3}\text{)}$	Время испарения лития (сек)	Время диффуз.отжига (мин)	Температура диффуз.отжига ($^{\circ}\text{C}$)	Глубина р-в перехода (мкм)	Вид р-в перехода
1	1,8	45	30	300	177	неровный
2	1,8	162	30	306	227	ровный
3	1,8	300	120	306	475	ровный
5	2,4	45	30	300	187	ровный
14	4,2	162	30	306	212	ровный

Таблица 2

№ образца	Температура дрейфа ($^{\circ}\text{C}$)	Напряжение обратного смещения (в)
1	141	49
2	142	162
3	141	98
5	138	87
14	127	102

Таблица 3

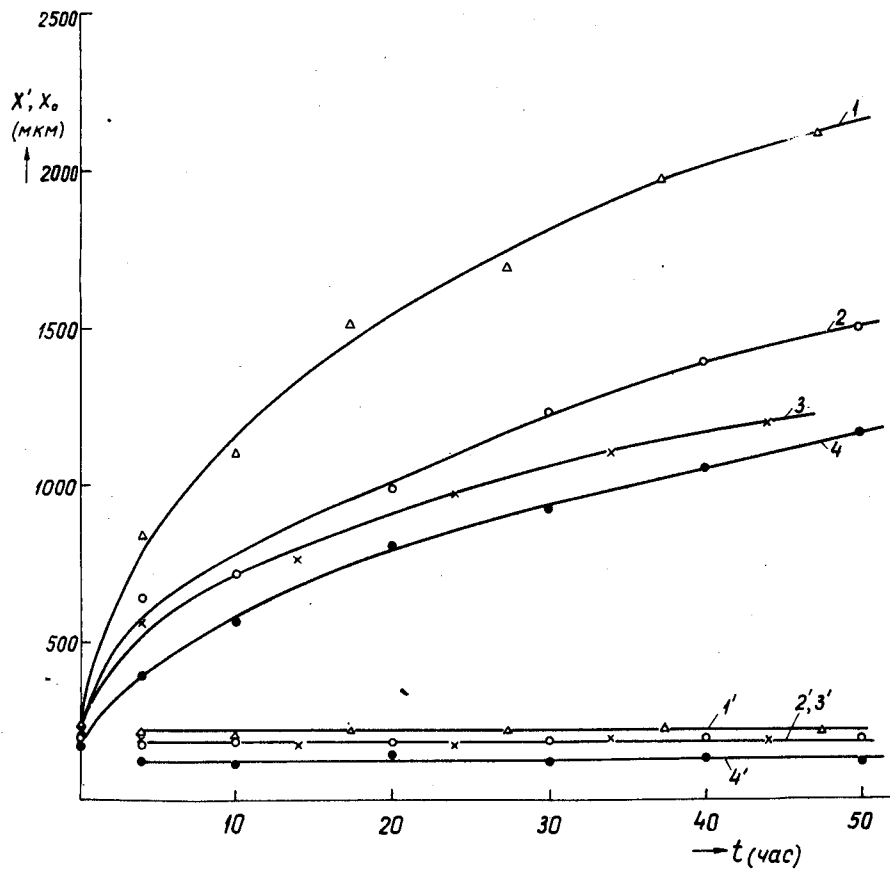
Время дрейфа (час)	w (мм) для образца 1	
	из электрохимического и электрофотографического проявления р-в-перехода	из измерения емкости р-в-перехода
10	0,558	0,582
20	0,788	0,729
30	0,906	0,821
40	1,030	0,993
50	1,156	1,079

Таблица 4

Время дрейфа (час)	w (мм) для образца 3	
	из электрохимического и электрофотографического проявления р-в-перехода	из измерения емкости р-в-перехода
4	0,661	0,671
10	0,929	0,904
20	1,103	1,120
30	1,309	1,316
40	1,428	1,480
50	1,590	1,616

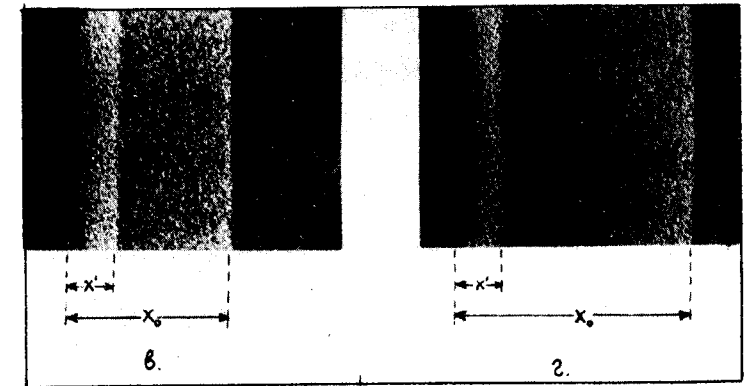
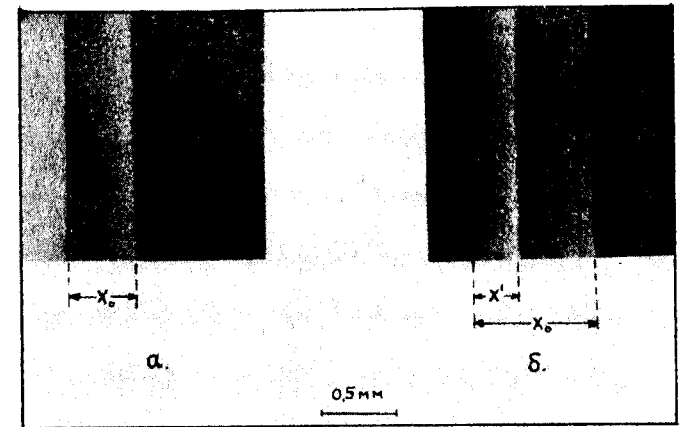
Таблица 5

Время дрейфа (час)	w (мм) для образца 14	
	из электрохимического и электрофотографического проявления р-в-перехода	из измерения емкости р-в-перехода
4	0,450	0,416
14	0,684	0,673
24	0,906	0,807
34	1,022	0,912
44	1,120	1,033

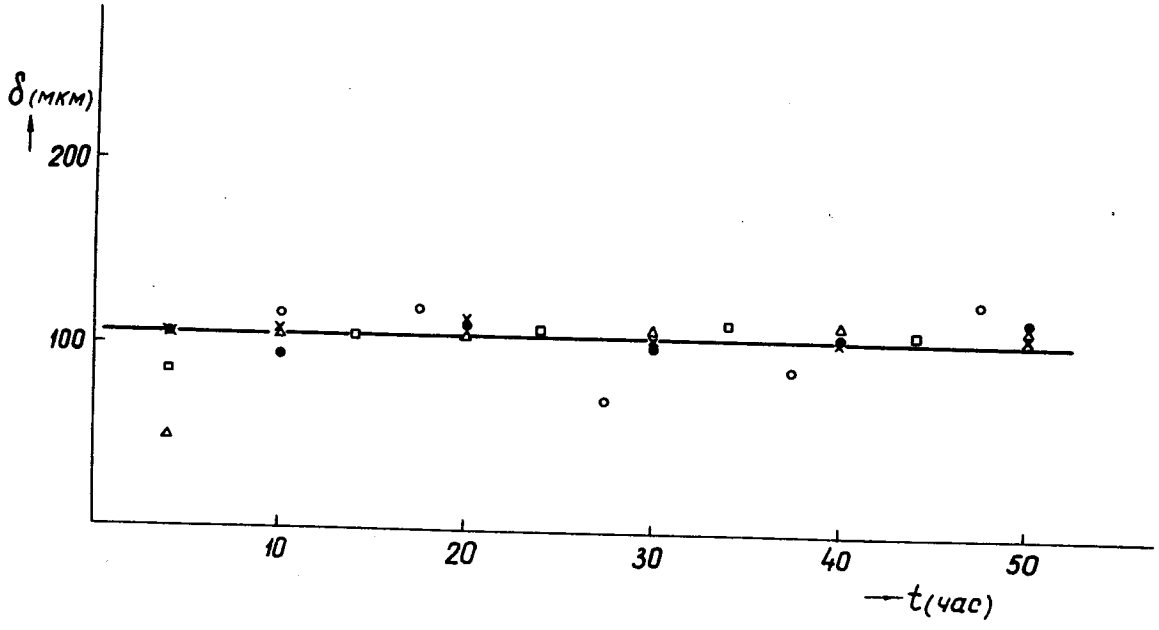


Р и с. 1. Зависимость глубины залегания $p-n$ -перехода x_0 (кр. 1, 2, 3 и 4) и толщины α -области x' (кр. 1', 2', 3' и 4') от времени дрейфа для образцов № 1, 2, 5 и 14. Обр. 1 - кривые 1 и 1'; образец 2 - кривые 2 и 2'; образец 5 - кривые 3 и 3'; образец 14 - кривые 4 и 4'.

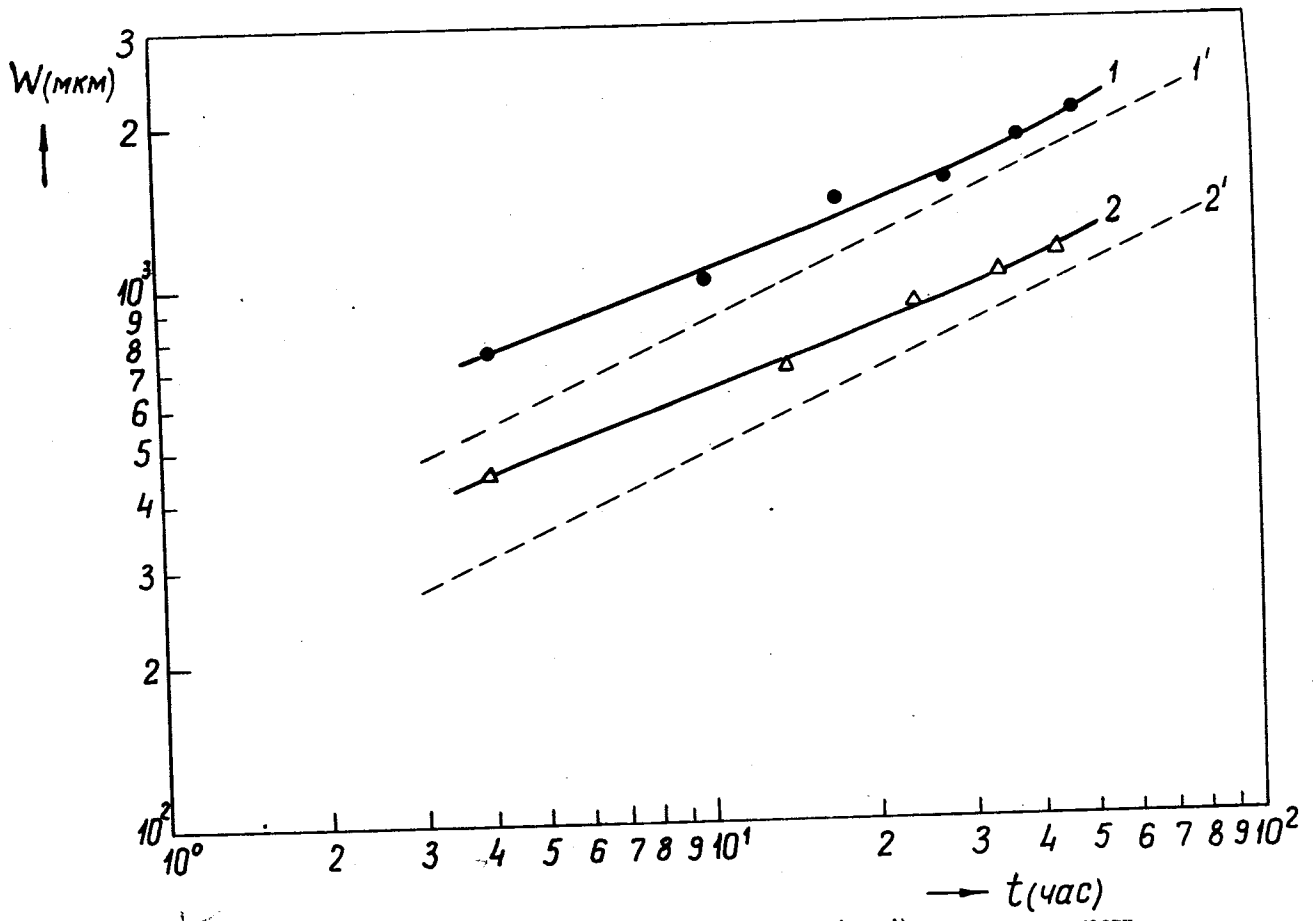
✓



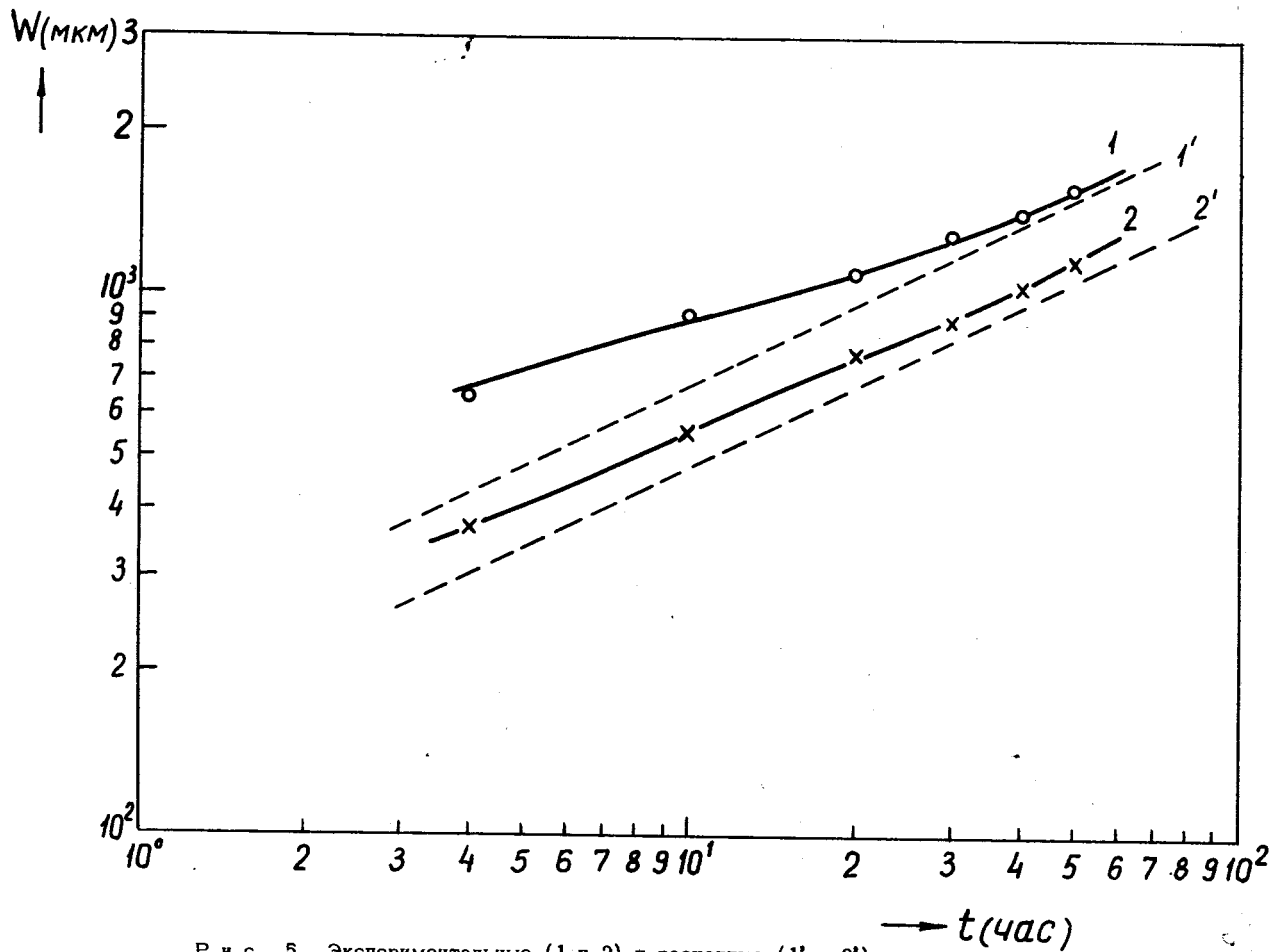
✓ Р и с. 2. Изменение $p-i-n$ -структуры во время дрейфа в образце 3. Картины переходов получены электрохимическим осаждением меди: а) после диффузии лития, б) после 4 часов дрейфа, в) после 10 часов дрейфа и г) после 40 часов дрейфа.



Р и с. 3. Зависимость толщины области отрицательного пространственного заряда от времени дрейфа. x - образец 1; o - образец 2; • - образец 3; Δ - образец 5; □ - образец 14.



Р и с. 4. Экспериментальные (1 и 2) и расчетные (1' и 2') кривые зависимости $w = f(t)$. 1 и 1' - для образца 2; 2 и 2' - для образца 14.



Р и с. 5. Экспериментальные (1 и 2) и расчетные (1' и 2') кривые зависимости $w = f(t)$. . 1 и 1' - для образца 3; 2 и 2' - для образца 1.