

С 344.1м

В-19

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1894



В.С. Василев, Б.М. Головин, Б.П. Осипенко,
А. Червонко

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

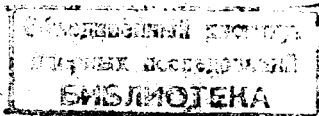
1964

1894

В.С. Васялев, Б.М. Головин, Б.П. Осипенко,
А. Червонок

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Направлено в ПТЭ



2562/3 48

1. Введение

В опытах, связанных с регистрацией и спектроскопией длиннопробежных ядерных частиц, в настоящее время начинают довольно широко применяться кремниевые детекторы с $p-i-n$ -структурой^{/1,2/}. Чувствительной областью такого детектора служит высокоомный i -слой, толщина W которого определяет ряд параметров детектора и является его важной характеристикой.

Обычно толщину i -слоя определяют на основании измерений емкости перехода детектора, предполагая, что эта емкость может быть рассчитана по формуле

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi W}, \quad (1)$$

где $\epsilon = 11,8$ - диэлектрическая постоянная кремния, S -площадь перехода. Однако опыт показывает^{/3,11/}, что результаты таких измерений часто дают неверные сведения о ширине чувствительной области детектора.

Имеется ряд причин, препятствующих надежному определению W по описанному методу.

Одной из них является трудность определения "эффективной" площади S , которая в реальных условиях отличается как от площади детектора, так и от площади электродов.

Другим обстоятельством, усложняющим определение ширины i - слоя, является необходимость измерять C с приложенным к детектору обратным напряжением U . При этом между W и приложенным к детектору обратным напряжением существует связь

$$W = \left(\frac{3\epsilon U}{\pi e a} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где $a = \frac{N_d - N_a}{x}$ -градиент разности концентрации донорных N_d и акцепторных N_a примесей в зоне перехода. Поэтому емкость приходится определять при различных, постепенно увеличивающихся напряжениях до получения минимального ее значения C_{min} . Тогда ширина i - слоя может быть найдена по формуле

$$W = \frac{\epsilon S}{4\pi C_{min}} \quad (3)$$

Третьей причиной, приводящей к серьезным погрешностям при определении ширины i -слоя по емкости перехода детектора, является появление инверсионных слоев /3/.

Кроме описанного способа (в дальнейшем для краткости будем называть его "конденсаторным") для проявления структуры переходов используются химические методы, позволяющие визуально наблюдать распределение слоев различной проводимости /8-8/. Широкое применение нашли, например, методы, связанные с гальваническим осаждением какого-либо металла (обычно меди) на предварительно шлифованный или протравленный торец перехода. Проявление структуры перехода при этом связано с зависимостью степени осаждения металла от сопротивления материала, на который металл садится.

Этот и подобные ему методы могут быть использованы при изучении отдельных лабораторных образцов, но непригодны для исследования большого числа детекторов (например, для производственного контроля и разбраковки детекторов по ширине чувствительного слоя), т.к. влекут за собой их повреждение.

В работах /4,5/ было показано, что при перемещении светового пятна по линии, пересекающей n - p -переход в германии, фотоэкс (или фототок) закономерно зависит от положения пятна. Максимальный фотоответ наблюдался при попадании светового зонда непосредственно на переход. Авторы цитированных работ использовали описанный эффект для определения времен жизни (диффузионных длин) неравновесных носителей в p - и n -областях германия.

Целью настоящей работы является разработка метода, позволяющего исследовать структуру и определять ширину чувствительного слоя по зависимости фототока от положения светового зонда на торце кремниевых n - i - p детектора.

2. Экспериментальная установка и метод исследований структуры детектора

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1а. Исследуемый детектор с помощью изолирующего держателя закреплялся на подвижном столике микроскопа Reichert-Wien. На том же держателе размещались две металлические пластинки, находящиеся в контакте с электродами детектора и соединенные с гальванометром G . С помощью объектива на шлифованный торец детектора фокусировалось световое пятно, представляющее собой изображение отверстия ирисовой диафрагмы. Диаметр этого светового зонда можно было уменьшать до нескольких десятков микрон. С помощью двух микрометрических винтов исследуемый

образец мог перемещаться в двух перпендикулярных направлениях, что было равнозначно соответствующим перемещениям светового зонда по торцу детектора. С помощью одного из микрометрических винтов световой зонд перемещался вдоль плоскости перехода в детекторе (линия А-В рис. 16). Другой микрометрический винт позволял перемещать световой зонд перпендикулярно плоскостям переходов (линии, параллельные ВС рис. 16). Положение светового пятна на торце детектора отсчитывалось по шкале микровинта, а соответствующий этому положению фототок измерялся с помощью гальванометра G . Вообще говоря, ток гальванометра является суммой темнового тока и тока фототовета, но в описываемых опытах темновой ток был пренебрежимо мал и измеряемый гальванометром ток можно было считать равным фототоку. Типичная зависимость фототока I от положения светового зонда при перемещении его по линии ВС рис. 16 приведена на рис. 2.

При движении светового пятна от $n - k - p$ -области наблюдается разное возрастание фототока в n -области и типичные его изменения при пересечениях $n - i$ и $i - p$ -переходов, которые могут быть использованы для определения их положений. Более точно положения этих переходов можно определить по пересечениям касательных к кривым фототока в отдельных областях детектора. Еще более точное определение толщины $n -$, $i -$ и p -областей может быть достигнуто при представлении результатов измерений в полулогарифмическом масштабе (см. рис. 26). Из рис. 2 видно, что фототок появляется прежде, чем световое пятно касается образца и не исчезает после выхода пятна за пределы образца. Это объясняется попаданием рассеянного света на непокрытые электродами плоские поверхности детектора. Соответствующий ток, в случае необходимости, может быть очень сильно уменьшен при некотором изменении конструкции держателя и затемнении непокрытых электродами поверхностей детектора.

Точность измерения толщины $n -$, $i -$, p -слоев в настоящей работе равнялась ± 25 мк, однако, в случае необходимости, она может быть повышена до ± 1 мк.

Все исследованные нами образцы были фоточувствительны, но величины фототочетов могли изменяться от образца к образцу на несколько порядков. Поэтому для удобства измерений подбиралось такое напряжение U на лампе F , которое позволяло при минимальной яркости пятна получить максимальное отклонение гальванометра.

Уменьшение яркости пятна влекло за собой уменьшение количества рассеянного света и снижение тока, регистрируемого до попадания пятна на детектор.

Использованная в этих опытах установка позволяла одновременно с измерениями фототока при большом (1600) увеличении наблюдать освещенную зондом поверхность детектора. Было отмечено, что видимые в микроскоп дефекты поверхности уменьшают фототок.

3. Влияние условий измерения на определение толщин p -, i -, p -областей

Для проверки того, насколько однозначными являются результаты описываемых измерений, были выполнены следующие контрольные опыты.

а) Влияние диаметра светового зонда

Измерения были выполнены на одном и том же образце при движении световых зондов разных диаметров по одной и той же линии. Опыты проводились при приближенно одинаковых значениях максимального фототока. Результаты измерений для двух диаметров зонда приведены на рис. 3. Из этого рисунка видно, что диаметр светового пятна не оказывает влияния на общий вид кривых и на результаты измерения толщин p -, i -, p -слоев.

б) Влияние яркости светового пятна (напряжения на источнике света).

На одном и том же образце при постоянном диаметре светового пятна и при его движении по одной и той же линии измерения были выполнены с четырьмя разными напряжениями на лампе F . Результаты измерений приведены на рис. 4. Видно, что с увеличением напряжения на лампе несколько увеличивается наклон кривой фототока в i -области, однако, такое изменение формы кривых не приводит к неоднозначности в определении толщин отдельных областей детектора.

4. Сравнение результатов измерения толщин p -, i -, p -слоев разными методами

Для проверки метода светового зонда толщины p -, i -, p -слоев на нескольких образцах были определены другими методами. Был использован описанный выше конденсаторный метод, а также несколько методов, основанных на проявлении структуры слоев с помощью осаждения металла на соответствующим образом подготовленный торец детектора. Для краткости различные варианты этих методов мы будем называть гальваническим, фотохимическим и электрофотохимическим.

а) Гальванический метод /8,9/

Капля электролита (200 г $CuSO_4$ + 10 г HF (48%)) наносилась на шлифованный или протравленный торец исследуемого образца. К детектору при дневном свете прикладывалось напряжение в запорном направлении. Медь отлагалась преимущественно на p -слое. Структура слоев более резко проявлялась на протравленном торце, но неизбежные при травлении округления краев торца мешали измерению толщин слоев под микроскопом. Поэтому в большинстве случаев проявление проводилось на шлифованных торцах.

б) Фотохимический метод /10/

Раствор (0,1-0,5% концентрированной HNO_3 , в концентрированной HF) каплями наносился на шлифованный торец детектора. Проявление происходило под действием света без приложения внешнего напряжения. Более темным получается p -слой, однако, контрастность получалась недостаточной для проведения микроскопических измерений.

в) Электрофотохимический метод. Используя рецептуру предыдущего метода, но проводя измерения при наложенном на детектор обратном напряжении, удается получить значительно более контрастное проявление структуры. В этих условиях i -слой получался почти черным, в цвет p -слоя почти не изменялся, так что переходы были ясно видны даже при увеличении до 1600. Хорошие результаты получались также при работе с протравленными поверхностями, но, как и раньше, скругление краев протравленной области мешало измерениям толщины слоев.

г) Конденсаторный метод

При использовании этого уже описанного выше метода толщина i -слоя подсчитывалась по формуле (3). Емкости детектора измерялись с помощью прибора ИИЕВ-1. Зависимость емкости C от запирающего напряжения U для одного из детекторов приведена на рис. 5.

Результаты измерений толщины n -, i -, p -слоев, выполненных на нескольких детекторах разными методами, сведены в таблице 1. Из приведенных в таблице данных можно заключить, что результаты измерений с помощью светового зонда удовлетворительно согласуются с данными, полученными другими методами.

Для иллюстрации сопоставимости результатов исследования $n-i-p$ -структур разными методами был сделан следующий опыт. На разных частях отшлифованного торца одного детектора были последовательно проведены гальваническое, фотохимическое и электрофотохимическое проявления. Фотография и схематическое изображение этого шлифа приведены на рис. 6. Зондовые измерения проводились по линиям 1,2,3,4. При передвижении светового зонда по линиям 1,3,4 в зрительном поле микроскопа можно наблюдать положение светового пятна и границы n -, i - и p -областей. Таким образом было установлено, что положения переходов, определяемые визуально и с помощью светового зонда, точно совпадают между собой.

5. Влияние обработки поверхности

Результаты экспериментов показали, что состояние поверхности детектора оказывает заметное влияние на вид экспериментальных кривых. Приведенная на рис. 2а кривая относится к свежему, недавно изготовленному образцу. Кривая 1 на рис. 7.

снята через 6 месяцев после изготовления детектора и сильно отличается от кривой рис. 2а. После повторного травления этого образца кривая фототока для него принимает вид кривой 2 (рис. 7), типичный для недавно изготовленных образцов.

Следует отметить, что нанесение на поверхность образца равномерной по толщине прозрачной (например, защитный лак) пленки не мешает изучению структуры детектора.

6. Выводы и заключения

В результате проведенных исследований показано, что метод светового зонда является удобным средством изучения $n-i-p$ структур. Он может быть использован как для измерения толщин отдельных зон и наблюдения за их изменением со временем, так и для наблюдения за изменением качества поверхности образца. В случае необходимости предлагаемый метод легко может быть автоматизирован и применен, например, для разбраковки серийно выпускаемых детекторов по толщине чувствительного слоя.

Метод, по-видимому, будет полезен также при изучении процессов старения полупроводниковых устройств, действия на них ядерной радиации и других агентов.

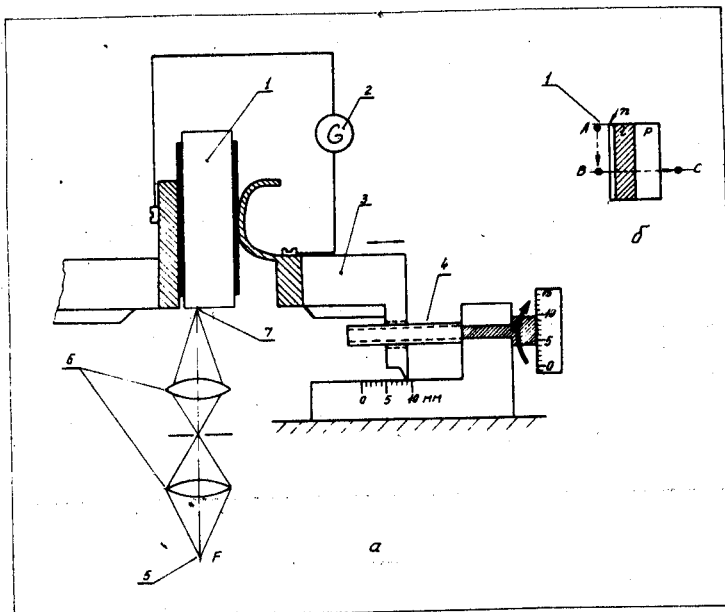
Некоторые теоретические вопросы, связанные с применением этого метода, будут рассмотрены в одной из наших последующих публикаций.

Авторы благодарны В.П. Дзелепову за интерес к работе и помощь при ее проведении.

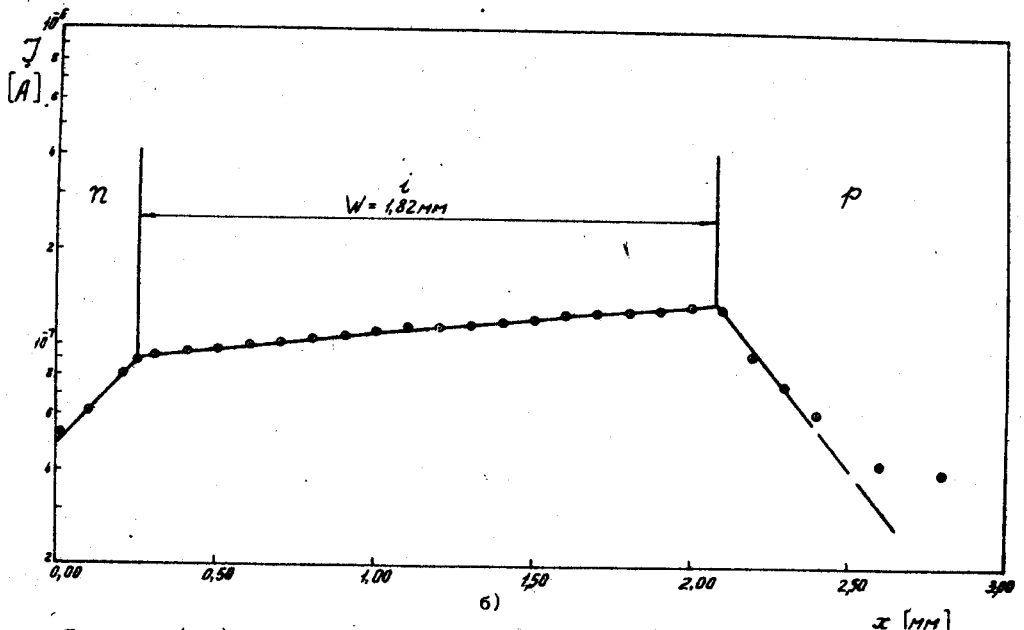
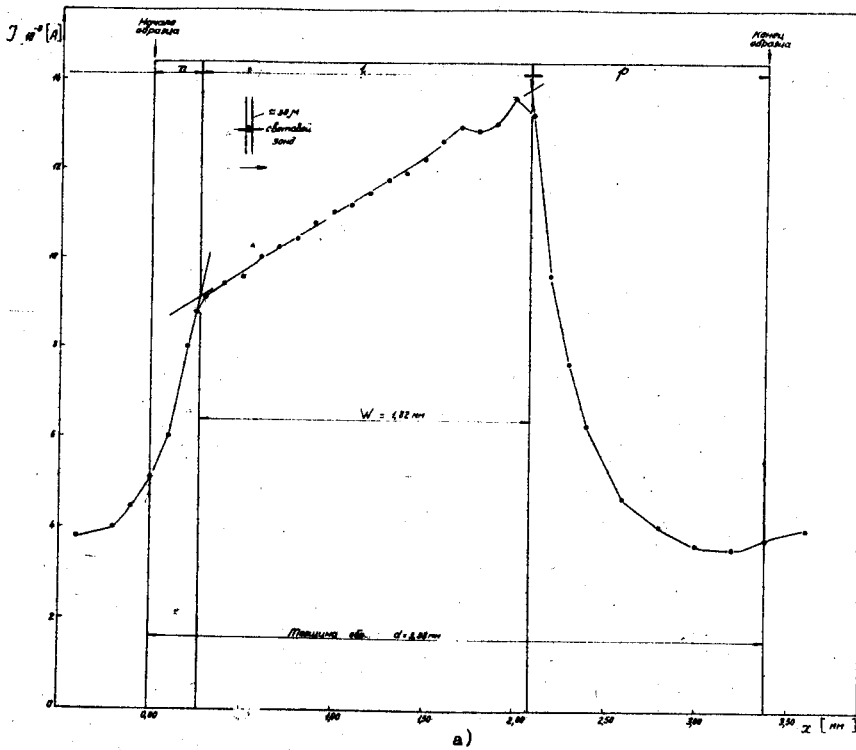
Л и т е р а т у р а

1. H.Nick, K.Rumpold, P.Weinzierl, Nucl. Instr. and Meth. 24, 253 (1963)
и ряд др. статей в том же журнале за 1981-84 гг.
2. H.M.Mann, J.H.Haslett and F.J.Janarek - IRI - Transactions on Nucl. Sci., V. NS-9, No. 4 43 (1962).
3. E.M.Pell, J. Appl. Phys. V. 31, No 2, p. 291 (1960).
4. F.S.Goucher, G.L.Pearson, M.Sparks, Teal G.K. and W.Shockley W., Phys. Rev. 81, p. 637 (1951).
5. J.N.Shive, Proc. Instr. Radio Engrs, 40, No.11, p.1410 (1952).
6. J.W.Mayer, J. Appl. Phys. V. 33, No. 9, p. 2895 (1962).
7. P.A.Hes and P.J.Coppen, Brit. J. Appl. Phys. V. 11, No. 5, p. 177 (1960).
8. D.R. Turner, J. Electrochem. Soc. 106, 701 (1959).
9. Е.А. Ефимов, И.Г. Ерусалимчик. "Электрохимия германия и кремния", Москва, 1963.
10. C.S.Fuller, J.A.Ditzenberger, J. Appl. Phys. V 27, No. 5, p. 544 (1956).
11. G.L.Miller, B.D.Pate and S.Wagner, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-10, p. 220, 1963.

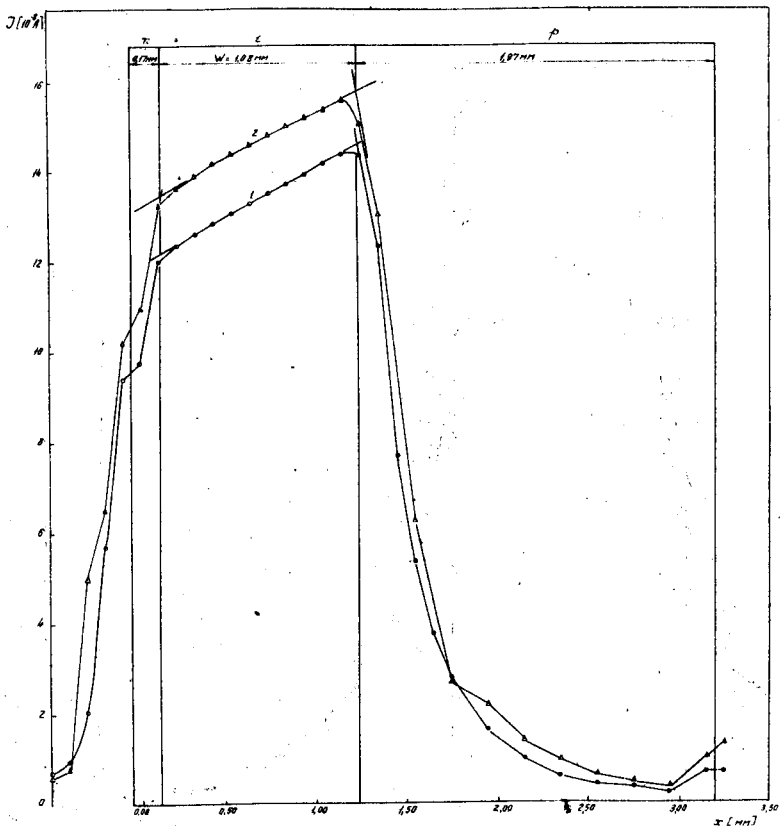
Рукопись поступила в издательский отдел
2 июня 1984 г.



Р и с. 1. Схема установки для изучения структуры полупроводниковых детекторов методом светового зонда. а) 1-детектор; 2- гальванометр; 3-держатель детектора; 4- микрометрический винт; 5-источник света; 6-оптическая система; 7- световой зонд. б) Вид шлифа образца. 1- световой зонд.

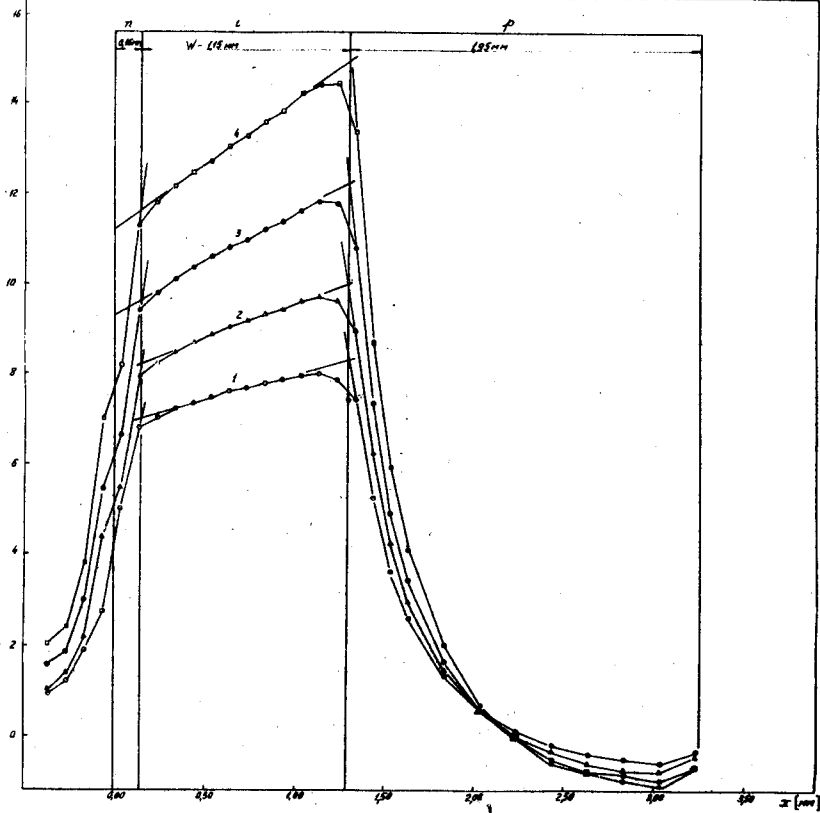


Р и с. 2 (а,б) - Результаты измерений со световым зондом. а) Линейный масштаб. б) Полулогарифмический масштаб.



Р и с. 3. Влияние диаметра светового пятна на результаты измерений со световым зондом. 1 - диаметр светового пятна 30 мкм.
 2 - " " " " 150 мкм.

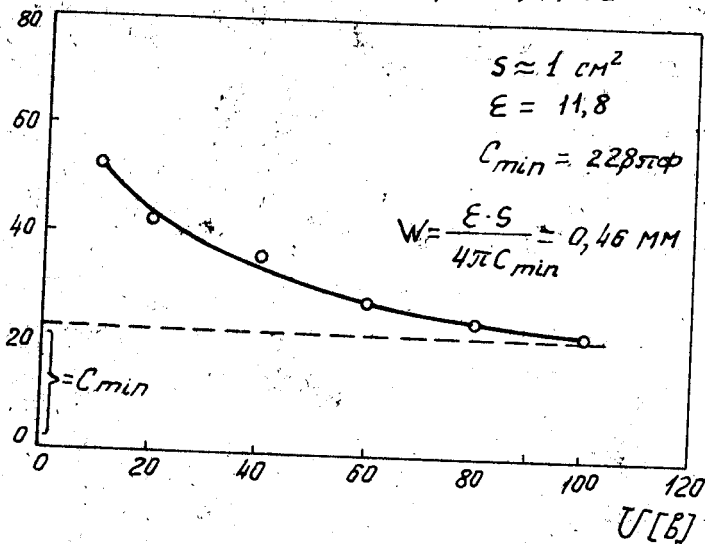
$J \cdot 10^{-9} A$



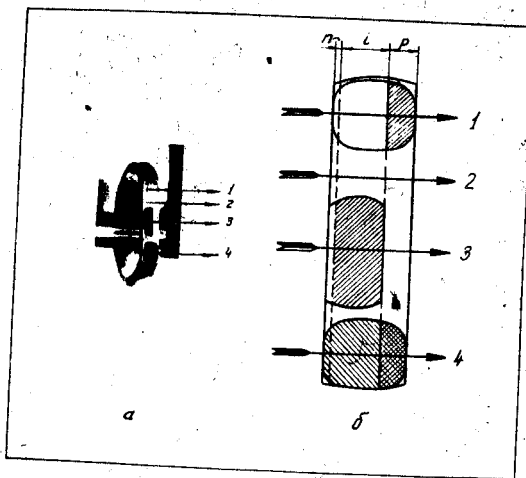
Р и с. 4. Влияние напряжения на осветительной лампе на результаты измерений со световым зондом 1- $u = 6,2$ в; 2- $u = 6,6$ в; 3 $u = 7,5$ в; 4 $u = 8,5$ в.

C [пФ]

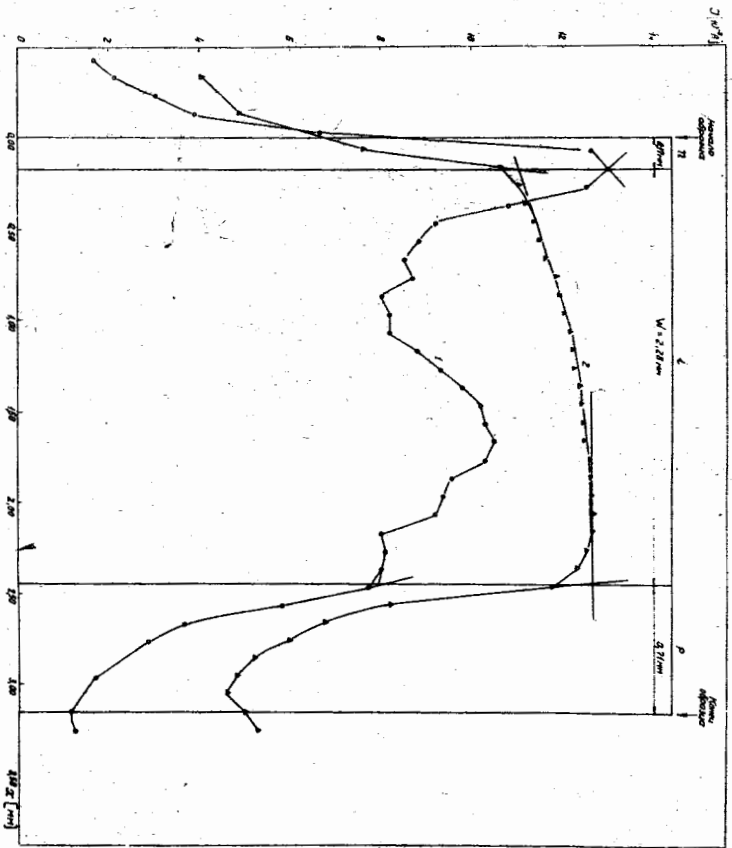
Образец № 82



Р и с. 5. Зависимость емкости образца от напряжения смещения.



- Р и с. 6.
- а) Снимок шлифта с проявленной структурой.
 - б) Схема движения светового пятна через различные области образца:
 - 1 - область гальванического осаждения.
 - 2 - область, на которой структура не проявлялась.
 - 3 - область электротехнического проявления.
 - 4 - область фотохимического проявления.



Р и с. 7. Влияние повторного травления образца на фотополет.
 1 - Фотополет "старого" образца.
 2 - Фотополет повторно протравленнного образца.

Таблица I

Метод презвращения	Обработка поверхности	Смеще- ние	№ 19 Толщина образца - 3,39 мм				№ 21 Толщина образца - 3,41 мм				№ 74 Толщина образца - 3,59 мм				№ 76 Толщина образца - 3,65 мм			
			Г о л о в н ы е с л о в а (мм)															
			а	l	а+l	р	а	l	а+l	р	а	l	а+l	р	а	l	а+l	р
Световой зонд	Программирована		0,14	2,67	-	0,42	0,17	2,30	-	0,94	0,15	0,15	-	1,91	0,23	1,18	-	2,11
Гальваничес- кий	"	Обратное	0,14 ^н	2,67 ^н	2,81	0,53	0,17 ^н	2,22 ^н	2,39	0,88	0,15 ^н	1,08 ^н	1,23	1,99	0,23 ^н	1,22 ^н	1,45	2,06
"	Премшифована	"	0,16 ^н	2,67 ^н	2,83	0,48	0,16 ^н	2,14 ^н	2,30	0,91	0,15 ^н	1,10 ^н	1,25	2,10	0,26 ^н	1,20 ^н	1,46	2,21
"	"	Прямое	0,16	-	-	-	0,16	-	-	-	-	-	-	-	0,26	-	-	-
Фотомикроскопический	"		0,16 ^н	2,65 ^н	2,81	0,54	0,16 ^н	2,25 ^н	2,41	0,89	0,15 ^н	1,21 ^н	1,36	2,18	0,26 ^н	1,20	1,46	2,10
Электрофотоко- мический	"	Обратное	0,16 ^н	2,48 ^н	2,62	0,74	0,16 ^н	2,23 ^н	2,39	0,90	0,15 ^н	1,16 ^н	1,31	2,22	0,26 ^н	1,16	1,42	2,21
"	Программирована	"	0,14 ^н	2,55 ^н	2,69	0,47	0,17 ^н	2,23 ^н	2,30	0,93	0,15 ^н	1,34 ^н	1,49	1,77	0,26 ^н	1,00	1,26	2,06
Конденсаторный			-	2,16	-	-	-	2,08	-	-	-	1,29	-	-	-	1,18	-	-

н Отмеченные звездочками результаты вычислены по данным о толщине - слоя, определенной с помощью метода светового зонда и гальванического метода со смещением в прямом направлении.