

С 361 + С 344.1а

ПТЭ, 1967, №3

31/VIII-65

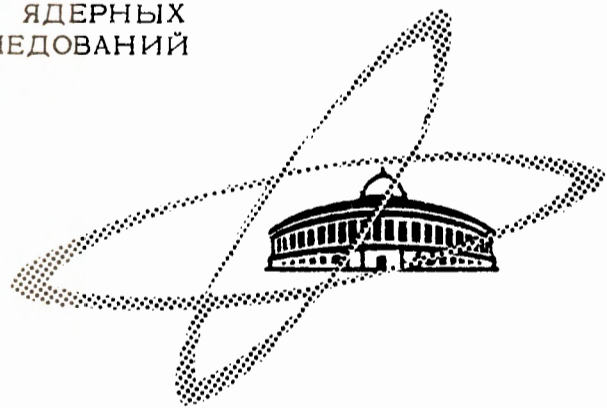
B-19

С.181-182

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2260



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.С. Василев

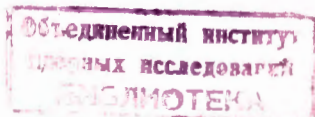
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ p-i-n
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ЭЛЕКТРОНОВ В ИХ p-ОБЛАСТИ

1965

В.С. Васильев

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ p-i-n
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ЭЛЕКТРОНОВ В ИХ p-ОБЛАСТИ

Направлено в ПТЭ



3514/1 m

1. Введение

В^{1/1} сообщается о применении светового зонда для измерения толщины отдельных областей $p-i-n$ кремниевых детекторов. Основной целью этих измерений было определение толщины i -области. Из определения толщины чувствительной области по реакции на ядерное излучение известно, что она увеличивается, когда к детектору приложено напряжение в запирающем направлении.

Мы поставили перед собой задачу с помощью светового зонда исследовать изменения толщины n -, i -, p -областей кремниевого детектора при приложенном напряжении.

В работе^{1/2/} сообщается о возможности использования светового зонда для измерения времени жизни неосновных носителей тока в германиевом кристалле с $p-n$ переходом. В этой работе указывается, что неосновные носители тока, которые создаются светом на расстоянии x от перехода, диффундируют к переходу и их концентрация уменьшается по экспоненте $\exp(-x/L)$, где

$$L = (D\tau)^{1/2} \quad (1)$$

диффузионная длина неосновных носителей тока, D - их диффузионная постоянная, а τ - время жизни. Зная D из уравнения Эйнштейна

$$D = \frac{kT}{q} \mu, \quad (2)$$

где μ - подвижность носителей, q - заряд электрона, k - постоянная Больцмана и T - абсолютная температура, определяем L по зависимости логарифма фото-тока от координаты x ($x = 0$ в месте перехода). В нашем случае из уравнения (1) можно определить время жизни τ для электронов в p -области и для дырок в n -области детектора.

Измерения времени жизни дырок в n -области оказалось невозможным из-за малой толщины этой области (около $200 \div 300$ мкм). Особенности $p-i-n$ -структуры

не позволяли определить время жизни носителей тока в i - области непосредственно на торцах детекторов. В i -области время жизни носителей тока было определено другим методом ^{/3/}.

Фотоэлектрический метод оказался удобным для измерения времени жизни электронов в p - области детекторов, когда эта область имела ширину не менее $1,0-1,5$ мм.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Она отличается от установки, описанной в ^{/1/}, тем, что здесь для светового зонда используется прерывистый свет. Это обстоятельство позволяет отделить фототок от темнового тока (который превышает фототок, когда к детектору приложено обратное смещение) и усилить его. В этой установке предусмотрена возможность подавать напряжение на детектор в любом направлении.

С помощью микрометрического винта световой зонд перемещался по торцу детектора, пересекая n -, i -, p -области. Положение светового зонда на торце детектора определялось по шкале микрометрического винта с точностью 2 мкм. Обычно через 100 мкм с помощью микроамперметра измерялся фототок на выходе усилителя.

Световой зонд имел круглую форму с диаметром 30 ± 100 мкм. Оптическая система позволяла использовать зонд также в форме длинного светового штриха, толщина которого регулировалась с помощью микрометрической щели.

В качестве источника света использовалась 30-ваттная лампа накаливания с вольфрамовой нитью, для питания которой служил стабилизированный выпрямитель. Интенсивность света изменялась регулировкой напряжения накала лампы. Регулированием интенсивности светового зонда для каждого образца задавался один и тот же максимальный фототок. При изменениях интенсивности света не наблюдалось видимых изменений в форме кривых фотоответа.

Дополнительная подсветка дневным светом не мешала измерениям, а только уменьшала величину фототока. Водяной фильтр на пути света также не менял формы кривых фотоответа.

Скорость вращения прерывателя света была выбрана так, чтобы длительность световых импульсов равнялась 6 мсек, а время затемнения между соседними импульсами 18 мсек.

Форма кривых фототока одновременно наблюдалась и на экране осциллографа.

3. Структура p-i-n кремниевого детектора с приложенным обратным напряжением и без него

На рисунке 2 представлена зависимость логарифма фототока от положения светового зонда на торце детектора. Кривая 1 снята без напряжения смещения, а остальные кривые — при разных смещениях на детекторе, величины которых обозначены на рисунке. Из этих кривых видно, что толщина i-области не изменяется, когда к детектору прикладывается обратное смещение. Видно, однако, что в некоторой степени изменяется форма кривых в этой области.

При тех же самых смещениях измерялась и емкость этого образца. На рисунке 3 видно, что емкость образца сначала уменьшается с увеличением напряжения, а потом принимает постоянную величину. Если для этого образца подсчитать толщины W_1 и W_2 , которые соответствуют емкостям $C_0 = 21,5$ пф, и $C_{\text{min}} = 18,5$ пф, то по формуле

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

(где $\epsilon = 11,8$ — относительная диэлектрическая постоянная кремния, а $S = 2,48 \text{ см}^2$ — площадь перехода) для этого образца получается: $W_1 = 1170$ мкм и $W_2 = 1390$ мкм, т.е. $\Delta W = W_2 - W_1 = 220$ мкм. Хотя такое увеличение толщины i-области должно было быть заметно в масштабе рисунка 2, экспериментально оно не наблюдалось.

Подобные закономерности наблюдались на всех измеряемых образцах.

Сложный характер кривых фототока в конце p-области можно объяснить наличием электрода и микронеровностей.

4. Время жизни электронов в p-области p-i-n кремниевого детектора

Наклон прямой, отражающей зависимость логарифма фототока от расстояния x , можно использовать для определения времени жизни электронов в p-области детектора. Если начало координат совпадает с i-p-переходом, в p-области фототок будет уменьшаться по закону

$$I_{\phi} = I_0 \exp(-x/L), \quad (4)$$

где I_{ϕ} — фототок в точке x , I_0 — фототок при $x = 0$, т.е. когда световой зонд пересекает i-p-переход, и L — диффузионная длина электронов в p-области, определяемая экспериментально из наклона прямой

$$\ln I_{\phi} = f(x). \quad (5)$$

Время жизни электронов τ_{ϕ} в p -области p - i - n кремниевых детекторов вычислялось по уравнению (1) в предположении, что диффузионная постоянная

$$D_{\phi} = 3.10^{-3} \text{ м}^2 / \text{сек}^{1/4,5/}.$$

До измерения все образцы-детекторы травились в травителе из азотной и 48%-ной плавиковой кислот, смешанных в отношении 2:1.

На рисунке 4 представлены две кривые логарифма фототока как функции перемещения зонда. Из рисунка видно, что при узкой p -области (кривая 1) не наблюдается четкого прямолинейного участка, используемого для определения диффузионной длины. На кривой 1 толщина p -области достаточна для определения диффузионной длины.

Было исследовано влияние диаметра светового зонда на кривые фототока. Форма кривых в i -области заметно не менялась при изменении диаметра светового зонда. Некоторые изменения в наклоне кривых в p -области были заметны. На рисунке 5 представлены три кривые для фототока, снятые на одном и том же образце для трех значений диаметра светового зонда, указанных под рисунком. Хорошая прямолинейная зависимость получалась при выборе подходящего диаметра светового зонда. Изгиб вверх при больших диаметрах зонда можно объяснить возникновением интенсивного отражения света и ореола около зонда, которые i - p -переход "чувствует" на более далеком расстоянии. Для разных образцов диаметр зонда подбирался в интервале между 40 и 100 мкм.

При тех интенсивностях света, которые использовались для снятия кривых фототока, не было замечено изменения в наклоне кривых в p -области.

При использовании инфракрасного светофильтра также не было замечено изменений кривых фототока по сравнению с кривыми, полученными без светофильтра.

Известно, что при измерениях диффузионных длин носителей тока в исследуемых образцах не должно быть электрического поля. Если существует поле, кроме диффузии, будет иметь место и дрейф. Из наклона прямой для логарифма фототока в этом случае определяется "эффективная" длина диффузии $L_{\text{эф}}$, которая, как показал Рыбкин¹⁰ для аналогичных измерений, будет связана с диффузионной длиной $L_{\text{диф}}$ и дрейфовой длиной $L_{\text{др}} = \mu \tau E$ (где E - электрическое поле) уравнением

$$L_{\text{др}} = L_{\text{эф}} - \frac{L_{\text{диф}}^2}{L_{\text{эф}}}. \quad (6)$$

На рисунке 6 приведены 7 кривых фототока при напряжениях на образце, изменя-

ющихся через 20 в в интервале $100 \div 220$ в. Из рисунка видно, что не наблюдается заметных изменений наклона прямых в зависимости от величины обратного смещения. Эти измерения проведены на нескольких образцах, и можно было заключить, что обратное смещение не мешает измерениям времени жизни электронов в p - области детекторов. Этот факт можно объяснить тем, что p - область очень низкоомная по сравнению с i - областью, и в ней не возникает заметного электрического поля.

Применение обратного смещения увеличивает чувствительность метода. Это обстоятельство можно использовать, когда детектор не имеет достаточной фоточувствительности.

Полученные данные о временах жизни электронов в p - области детекторов удовлетворительно совпадают с паспортными данными исходного материала.

5. Заключение

Как показывает эксперимент, толщины отдельных областей $p-i-n$ структуры, измеренные световым зондом, заметно не зависят от обратного смещения на детекторе.

Кроме того, применяя оптический зонд для определения толщины и структуры отдельных областей, по наклону прямых логарифма фототока от положения зонда на торце детектора можно определить время жизни электронов в p - области детекторов. В этой работе экспериментально исследованы условия, при которых возможны измерения времени жизни.

Величина времени жизни исходного материала является одной из его основных характеристик и в значительной степени определяет качество детектора. Если в процессе изготовления детектора (например, во время диффузии лития) время жизни изменялось, это можно определить на готовом детекторе, не повреждая его.

Кроме того, предлагаемую методику, по нашему мнению, можно с успехом применять для исследования приконтактных областей, дающих сведения о качестве контактов, играющих важную роль в технологии изготовления хороших детекторов.

Описанную методику можно применить и на других детекторах, изготовленных из фоточувствительного полупроводникового материала и, в частности, на $p-i-n$ - германиевых детекторах.

Автор выражает сердечную благодарность Б.М.Головину и Б.П.Осяпенко за интерес к работе и полезные советы.

Л и т е р а т у р а

1. В.С.Василюв, Б.М.Головин, Б.П.Осипенко, А.Червонко. Препринт ОИЯИ, 1694, Дубна, 1964.
2. F.S.Goucher, G.L.Pearson, M.Sparks, G.K.Teal and W.Shockley. Phys. Rev., v. 81, N° 4, p.637 (1951).
3. В.С.Василюв. Препринт ОИЯИ, Р-2201, Дубна, 1965.
4. М.И.Иглицин, Ю.А.Концевой и В.Д.Кудми. ЖТФ, т.27, в.7, стр.1425 (1957).
5. M.V.Prinse. Phys.Rev., 23, N° 6, p.1204 (1954).
6. С.М.Рывкин, ЖТФ, 24, 2136 (1954).
7. J.Pakasa. Nucl. Instr. and Methods, 33, 171-172 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел
8 июля 1965 г.

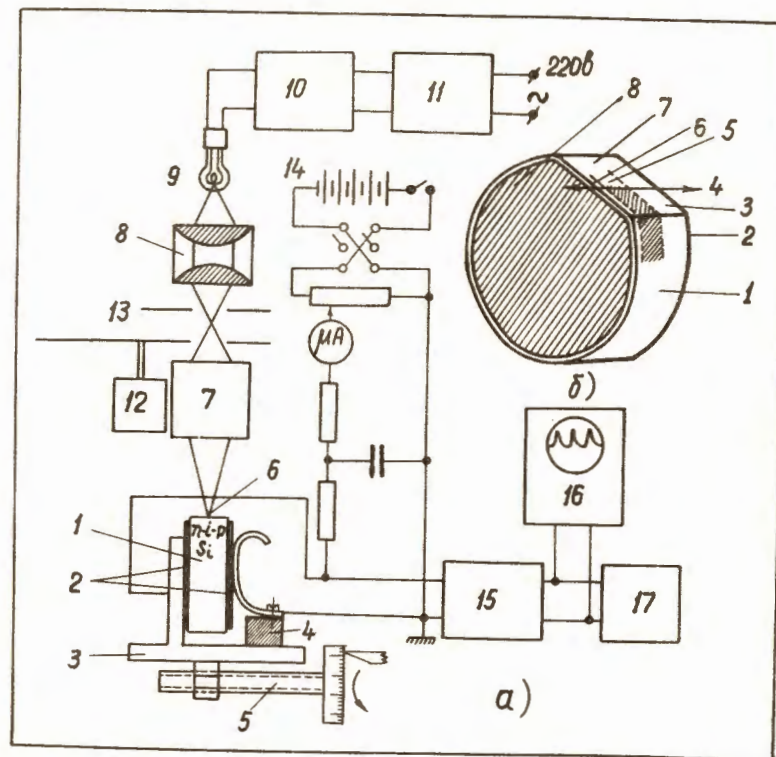


Рис. 1. а) Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования р-п-структуры кремниевых детекторов и измерения диффузионных длин фотонинжектированных электронов в их р-области: 1 - детектор, 2 - его электроды, 3 - держатель образца, 4 - изолятор, 5 - винт для перемещения образца во время измерения, 6 - световой зонд, 7 - объектив "Юпитер-3", 8 - конденсор, 9 - 30-ваттная лампа накаливания, 10 - выпрямитель, 11 - стабилизатор, 12 - прерыватель света, 13 - шель, 14 - батарея, 15 - усилитель, 16 - осциллограф, 17 - микроамперметр.

б) Измеряемый образец: 1 - общий вид образца, 2 - электрод к р-области, 3 - р-область детектора, 4 - направление перемещения светового зонда во время измерения, 5 - i-область детектора, 6 - п-область детектора, 7 - шлиф детектора, 8 - электрод к п-области.

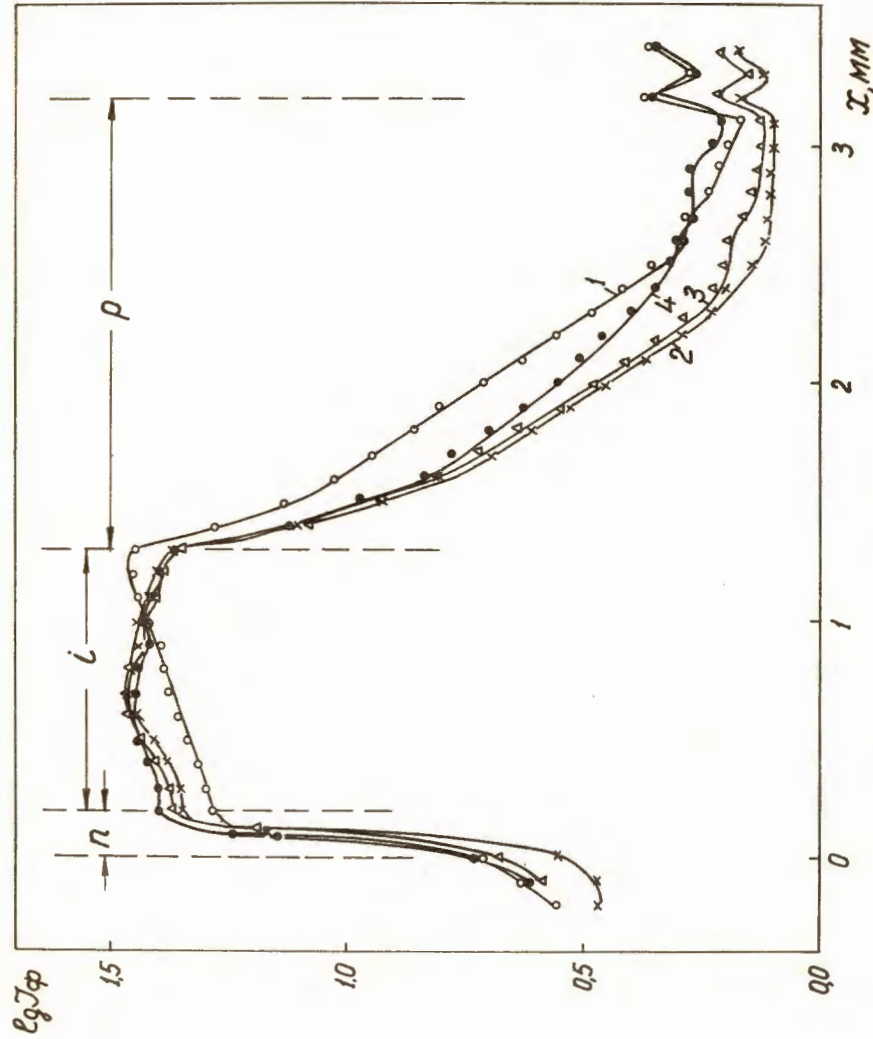


Рис. 2. Зависимость логарифма фототока 1 (в произвольных единицах) от положения светового зонда на торце детектора. Кривая 1 снята без смещения на детекторе, а кривые 2, 3 и 4 - при напряжениях смещения на детекторе соответственно 6, 10 и 40 в.

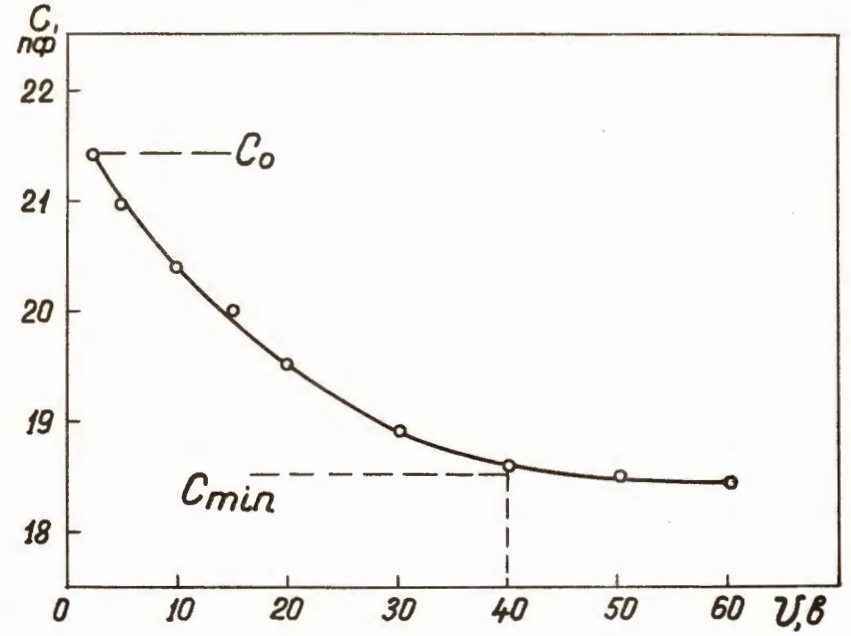


Рис. 3. Зависимость емкости детектора от напряжения смещения.

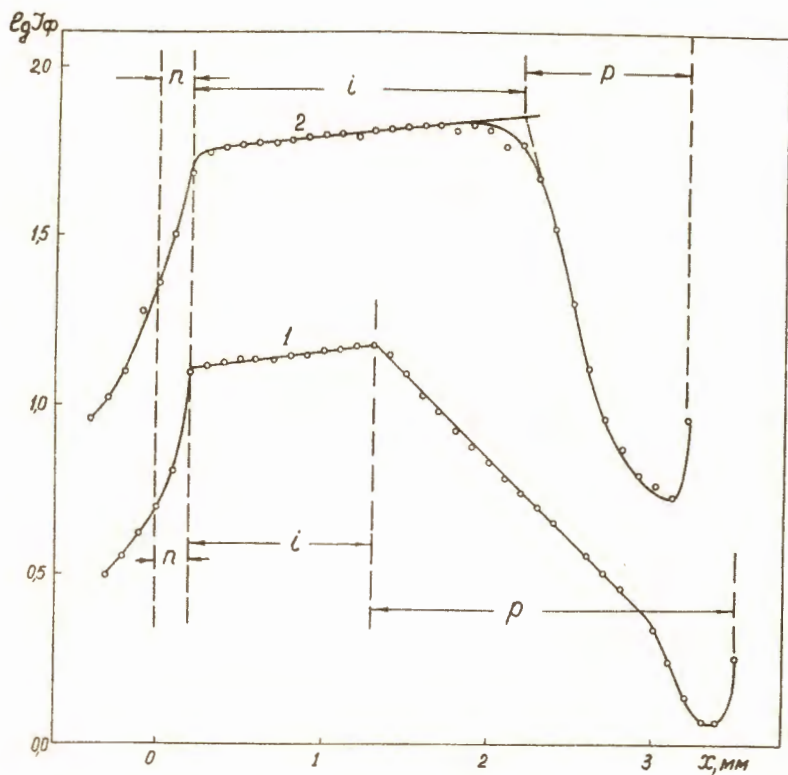


Рис. 4. Зависимость логарифма фототока от положения светового зонда для двух образцов: кривая 1 - образец с толстым p -слоем, для которого $I_0 = 0,8$ мм и $\tau_0 = 270$ мсек, и кривая 2 - образец с узким p -слоем.

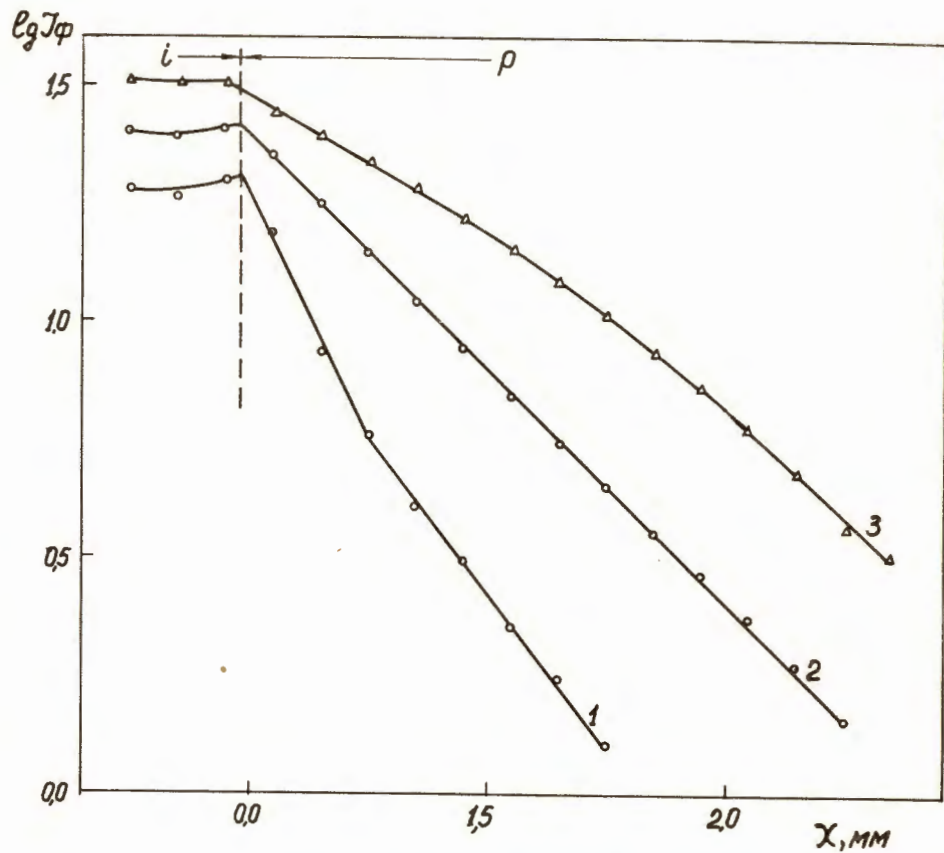


Рис. 5. Логарифм фототока в p -области при разных значениях диаметра светового зонда: кривые 1, 2 и 3 соответствуют диаметрам световых зондов 30; 80 и 150 мкм.

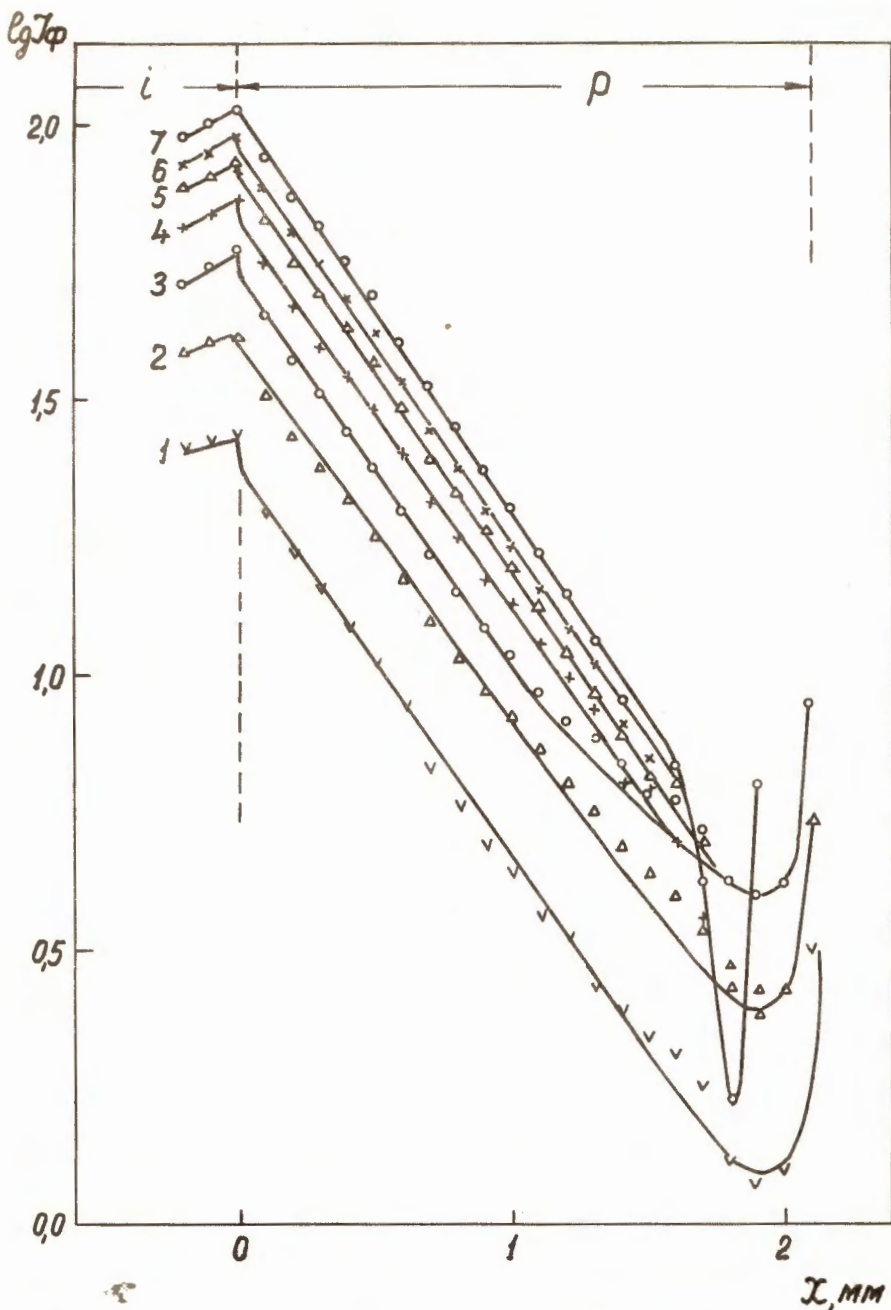


Рис. 6. Логарифм фототока в ρ -области при разных значениях обратных смещений на детекторе S_2 : кривые 1,2,3,4,5,6,7 и 8 соответствуют смещениям 100,120,140,160,180,200 и 220 в. $L = 0,81$ мм, $\tau_0 = 125$ мксек; диаметр светового зонда 32 мкм.