

С 344.1м

ПТЭ, 1967, №4

30/18

В-19

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

С. 246

Дубна

2909



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.С. Василев

ИССЛЕДОВАНИЕ p-i-n КРЕМНИЕВЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ БЕГУЩЕГО  
СВЕТОВОГО ЗОНДА

1966

2909

4486 / 11 нр.

В.С. Васялев

ИССЛЕДОВАНИЕ p-i-n КРЕМНИЕВЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ БЕГУЩЕГО  
СВЕТОВОГО ЗОНДА

Направлено в ПТЭ

Объединение НИИ ПИИТЭ  
Ядерное Исследования  
Библиотека

В последнее время широкое распространение получили кремниевые и германиевые детекторы с р-і-п структурой<sup>/1-4/</sup>. Чувствительной областью р-і-п детекторов является высокоомный і-слой, толщина  $W$  которого определяет ряд параметров детекторов и является его важной характеристикой.

В нашей работе<sup>/5/</sup> сообщается о применении светового зонда для исследования структуры полупроводниковых детекторов. По торцу детектора микрометрическим винтом передвигается световой зонд, пересекающий р-і-п переходы под прямым углом. Характерная зависимость фото-э.д.с. от положения зонда позволяет определить толщины отдельных областей структуры. Представляя фото-э.д.с. в логарифмическом масштабе, мы определяли времена жизни электронов в р-области р-і-п кремниевых детекторов<sup>/8/</sup>.

Метод бегущего светового зонда<sup>х)</sup> впервые был использован Адамом<sup>/7/</sup> для определения коэффициента диффузии (или подвижности) и диффузионных длин (или времени жизни) неосновных фотоинжектированных носителей тока в гомогенном германии с помощью металлического зонда-коллектора. В работе<sup>/8/</sup> Сорокин разработал метод измерения скорости поверхностной рекомбинации в тонких полупроводниковых пластинках, применяя бегущий световой зонд и коллектор-иголку. Этот метод использовали Рывкин и Махалов<sup>/9/</sup> для определения распределения концентрации неосновных носителей тока при движении области инжекции и наличия поля.

Баев<sup>/10/</sup> и Баев и Валяшко<sup>/11/</sup> использовали бегущий световой зонд для измерения времени жизни и коэффициента диффузии неосновных носителей тока в  $I_n S_b$  и определения однородности германиевых кристаллов.

В настоящей работе предлагается использование бегущего светового зонда для проявления р-і-п кремниевых детекторов, являющееся дальнейшим усовершенствованием метода светового зонда, разработанного в нашей ранней работе<sup>/5/</sup>.

х) Непрерывное перемещение зонда и непрерывное снятие фото-э.д.с. в отличие от ступенчатого измерения и снятия фото-э.д.с. в отдельных фиксированных положениях ("по точкам")<sup>/5,8/</sup>.

## I. Экспериментальная установка и метод измерения

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки, с помощью которой исследовалась структура  $p-i-n$  кремниевых детекторов. В этой установке образец-детектор неподвижен, а световой зонд вследствие вращения зеркала  $\beta$  периодически перебегает по торцу детектора. В цепи последнего возникает переменный фотосигнал, который усиливается и подается на осциллограф  $\beta$ . На экране осциллографа, работающего в режиме ждущей развертки, наблюдается кривая фото-э.д.с., отражающая координатную зависимость бегущего светового зонда.

Установка позволяла снимать кривые для фото-э.д.с. либо "по точкам", либо на осциллографе при одном и том же световом зонде, что дало возможность непосредственного сравнения этих двух методов.

## II. Описательная теория метода

Как известно из цитированных работ, для фото-э.д.с., получаемой перемещением светового зонда "по точкам" по длине гомогенного образца, на котором находится игла-коллектор, получается симметричная кривая в виде колокола с максимумом в месте коллектора. Тогда по наклону прямой для логарифма фото-э.д.с. из любой ветви кривой можно определить диффузионную длину фотоинжектированных неосновных носителей тока.

При применении бегущего светового зонда возникает асимметрия в наклонах отдельных ветвей, так как к скорости одних носителей прибавляется скорость движения светового зонда, а от скорости других - вычитается. В результате этого ветвь кривой, соответствующая встречному движению светового зонда и диффундирующего носителя, становится более крутой, а ветвь, соответствующая их движению в одну сторону - более пологой. Изменения в наклоне отдельных ветвей можно получить при приложении соответствующего поля.

При снятии кривых фото-э.д.с. на  $p-n$  переходе "по точкам" наклон кривых в  $p$ - и  $n$ -областях будет определяться диффузионными длинами неравновесных носителей тока в соответствующих областях<sup>/12/</sup>. Как правило, диффузионные длины в  $p$ - и  $n$ -областях разные и прямые, отражающие логарифм фото-э.д.с., имеют разные наклоны.

Когда контактное поле перехода не распространяется глубоко в  $n$ - или  $p$ -области ("узкий переход"), его влиянием на форму кривых можно пренебречь. Сам переход является коллектором для поступающих к нему соответствующих неосновных носителей тока и выполняет ту роль, которую выполняет игла на гомогенном материале.

При использовании бегущего светового зонда к существующей в наклонах кривых для фото-э.д.с. асимметрии прибавляется асимметрия, возникающая вследствие движения самого зонда. Эта асимметрия будет увеличиваться с увеличением скорости движения светового зонда.

На рис. 2 представлены три осциллограммы фото-э.д.с., снятые на обычном  $p-n$  кремниевом переходе<sup>x)</sup>, соответственно при трех скоростях  $V_A < V_0 < V_B$ .

Форма кривых для фото-э.д.с., получаемая "по точкам" на кремниевых детекторах, подробно исследована в нашей работе<sup>/13/</sup>. В основном она зависит от диффузионных длин в  $n$ -,  $i$ -,  $p$ -областях, от ширины  $W$   $i$ -области и наличия  $n$ -, или  $p$ -пленок над  $i$ -областью.

## III. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 3 представлена кривая фото-э.д.с. в зависимости от положения светового зонда на торце детектора, снятая "по точкам", как описано в нашей работе<sup>/5/</sup>.

На рис. 4 представлена осциллограмма того же самого  $p-i-n$  кремниевых детектора, полученная на осциллографе при использовании бегущего светового зонда с шириной  $d = 100$  мкм. Так как известна ширина  $i$ -области  $W = 5,0$  мм и цена метки (1 метка = 100 мксек), то для скорости движения светового зонда получается  $V = 7$  м сек<sup>-1</sup>.

На рис. 5 представлена кривая для фото-э.д.с.  $p-i-n$  кремниевых детектора, снятая "по точкам" после его обработки в бихромате калия, при которой образуется  $p$ -пленка над  $i$ -областью<sup>/13/</sup>. Из фотографии, полученной с бегущим зондом (рис. 6), видно, что в  $i$ -области наблюдается постоянство фотосоответа с временем. Было показано, что фото-э.д.с. не зависит ни от скорости движения зонда, ни от его направления.

На рис. 7 представлена кривая фото-э.д.с. для другого  $p-i-n$  кремниевых детектора сразу после травления в  $CP-4$  и промывки в деионизированной воде. Из формы кривой видно<sup>/13/</sup>, что в этом случае образуется  $n$ -пленка над  $i$ -областью. На рис. 8 показаны четыре осциллограммы фото-э.д.с. этого детектора. Из них видно, что форма кривой фото-э.д.с. зависит от направления движения светового зонда. Скорости  $V_A \neq V_0 \neq V_B \neq V_\Gamma$ , поэтому на фотографии ширина  $i$ -области  $w$  содержит разное число меток (каждая метка по 10 мксек). Кривые в) и г), снятые при заземленной  $n$ -области, являются фактически зеркальным изображением кривых а) и б). Аналогичные кривые были получены на всех исследованных 15 кремниевых  $p-i-n$  детекторах. Зная скорость движения светового зонда, по числу меток между  $n-i$  и

x) Переход получен диффузией лития в  $p$ -кремнии.

$i$ -р фотопиками на осциллограмме определяется ширина  $i$ -области. Ширину  $i$ -области можно определить и при неизвестной скорости движения светового зонда. Для этой цели достаточно снять осциллограмму одного детектора с известной шириной  $i$ -области (определена другим методом), а потом при той же самой скорости, снять осциллограмму фото-э.д.с. исследуемого детектора. Из сравнения двух осциллограмм (по меткам времени в  $i$ -области) можно сразу определить неизвестную ширину  $i$ -области. Измерения можно проводить и тогда, когда на детекторе приложено обратное напряжение. В этом случае<sup>х)</sup> независимо от способа поверхностной обработки получаются осциллограммы для фото-э.д.с., подобные представленной на рис. 6.

Точность измерения ширины  $i$ -области не ниже точности, которая получается при измерении фото-э.д.с. "по точкам".

### З а к л ю ч е н и е

Разработанный метод определения ширины  $i$ -области на  $p$ - $i$ - $n$  кремниевых детекторах с помощью бегущего светового зонда не оставляет никаких загрязнений на детекторе; дает возможность судить о наличии  $n$ - или  $p$ -пленок на  $i$ -области; дает возможность обнаруживать барьеры на электродах (по возникающим фотопикам). Указанный метод помимо перечисленных общеизвестных достоинств оптических методов имеет и дополнительные:

он удобен для применения в массовом производстве; и, наконец, самое главное: его практическая безинертность, вносит принципиально новый элемент: открывает возможность исследовать кинетику образования на поверхности пленок и каналов в зависимости от разных обработок и воздействия на поверхность газов, паров, влияния температуры на них и пр.

Только из этих перечисленных возможностей становится видно, что новый метод может найти широкое применение для исследования кинетики поверхностных явлений, имеющих иногда решающую роль при конструировании полупроводниковых приборов.

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

<sup>х)</sup> Измерения были проведены при обратных напряжениях  $V > 10$  в.

### Л и т е р а т у р а

1. H. Hick, K. Rumpold, P. Weinzierl. Nucl. Instr. and Methods, 24, 253 (1963) и ряд др. статей в том же журнале за 1961-64 г.г.
2. H.M. Mann, J. H. Haalett and F. J. Janerek. IRI - Trans. Nucl. Sci. v. NS-9, N 4, 43 (1962).
3. A. J. Tavendale. IEEE, Trans. Nucl. Sci. NS-11, 191 (1964).
4. В.А. Дидоренко, Ю.А. Мареев, Э.З. Рындяна, Б. Савитска, Ю.С. Язвинский. Препринт ОИЯИ 2575, Дубна 1966.
5. В.С. Васильев, Б.М. Головин, Б.П. Осипенко, А. Червонок. Препринт ОИЯИ 1694, Дубна 1964; ПТЭ № 4, стр. 208 (1965).
6. В.С. Васильев. Препринт ОИЯИ 2280, Дубна 1965.
7. G. Adam. Physica, 20, 1037 (1954).
8. О.В. Сорокин. ЖТФ, т. 28, в. 11, 2473 (1958).
9. С.М. Рыбкин, Ю.А. Михайлов. ЖТФ т. 27, вып. 3, стр. 441 (1957).
10. И.А. Баев. ФТТ, 6, в. 1, 272 (1964).
11. И.А. Баев и Е.Г. Валяшко. ФТТ, 6, в. 6, 1729 (1964).
12. F. S. Goucher, G. L. Pearson, M. Sparks, G.K. Teal and W. Shockley. Phys. Rev., 81, p. 637 (1951).
13. В.С. Васильев. Препринт ОИЯИ 2887, Дубна 1966.
14. В.С. Васильев, Б.П. Осипенко, С. Пакева. Препринт ОИЯИ 2875, Дубна 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 августа 1966 г.

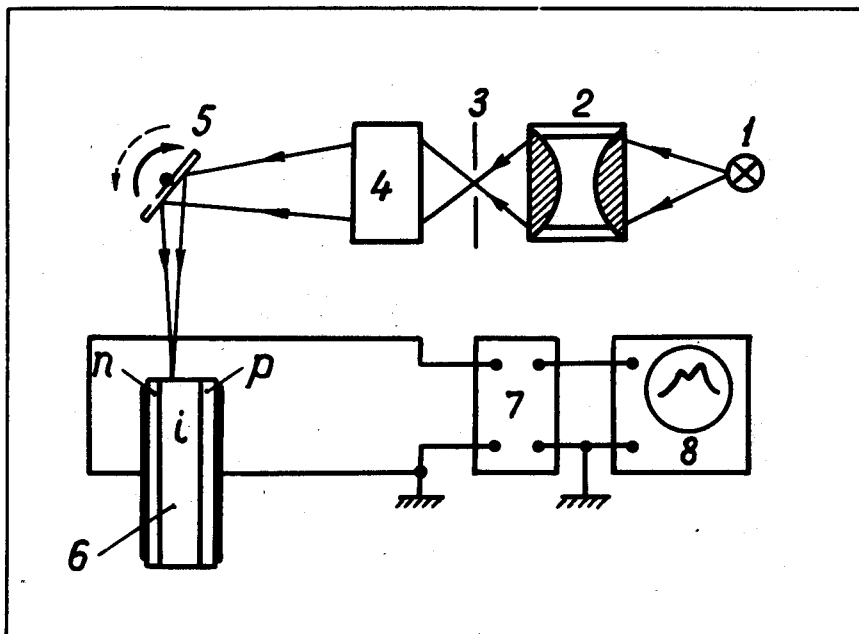


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки: 1) лампа накаливания; 2) конденсор; 3) диафрагма; 4) объектив; 5) вращающееся зеркало; 6) измеряемый образец; 7) усилитель; 8) осциллограф.

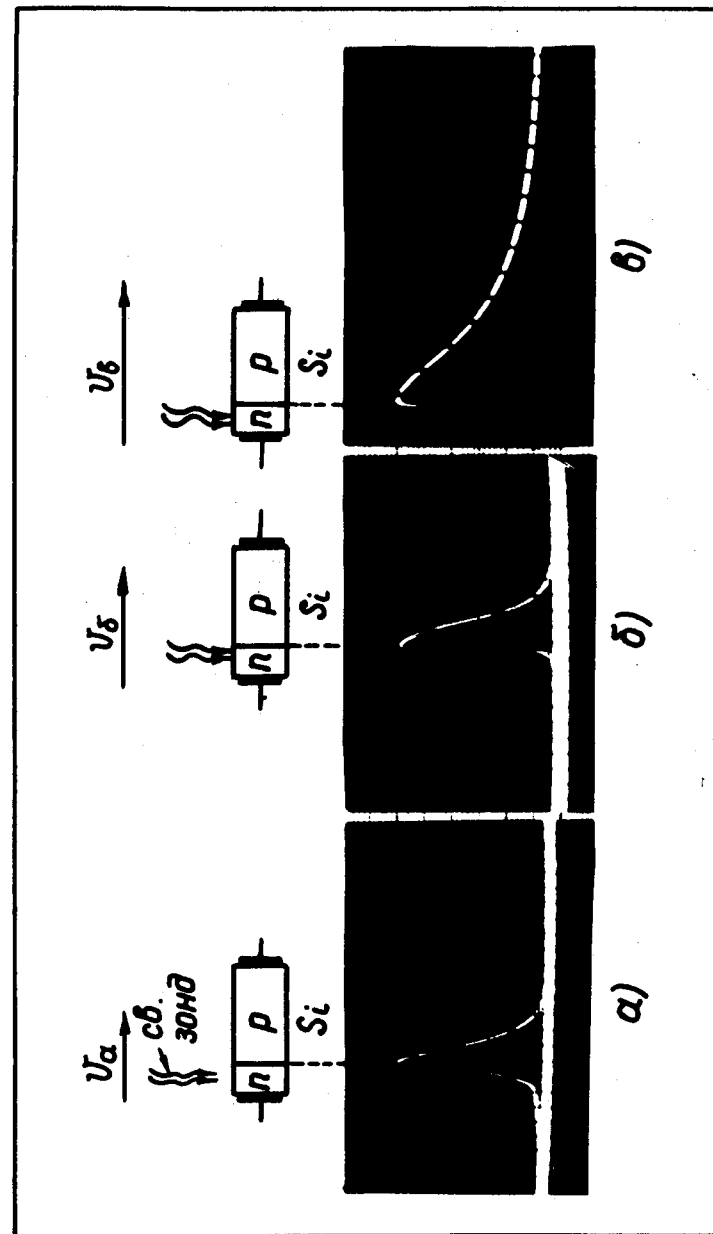


Рис. 2. Осциллограммы фото-э.д.с., снятые на кремниевом p - n-переходе с помощью бегущего светового зонда соответственно со скоростью  $v_a < v_b < v_b$ .

фото-эдс,  
произв. единицы

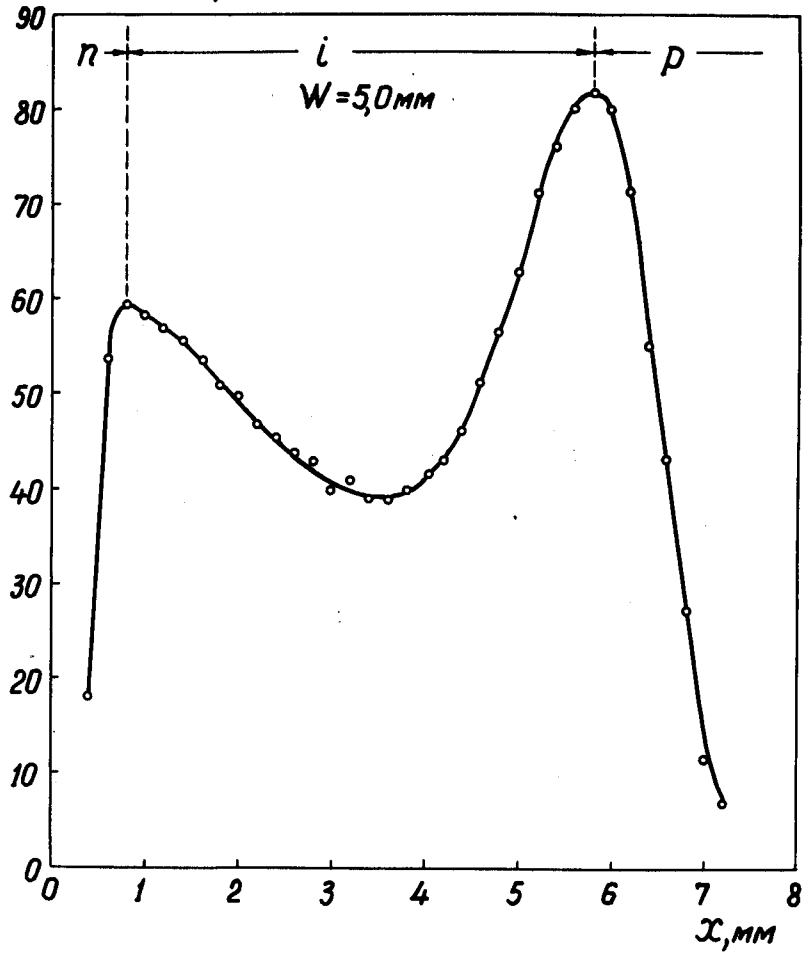


Рис. 3. Фото-эдс. толстого р-і-п кремниевого детектора № 3 в зависимости от положения светового зонда.

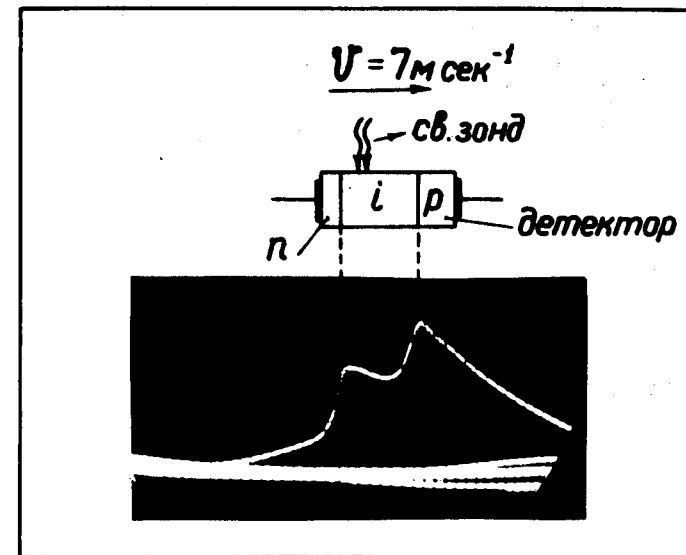


Рис. 4. Осциллограмма фото-эдс., полученная с помощью бегущего светового зонда на р-і-п кремниевом детекторе № 3, для которой кривая фото-эдс., снятая "по точкам", представлена на рисунке 3.

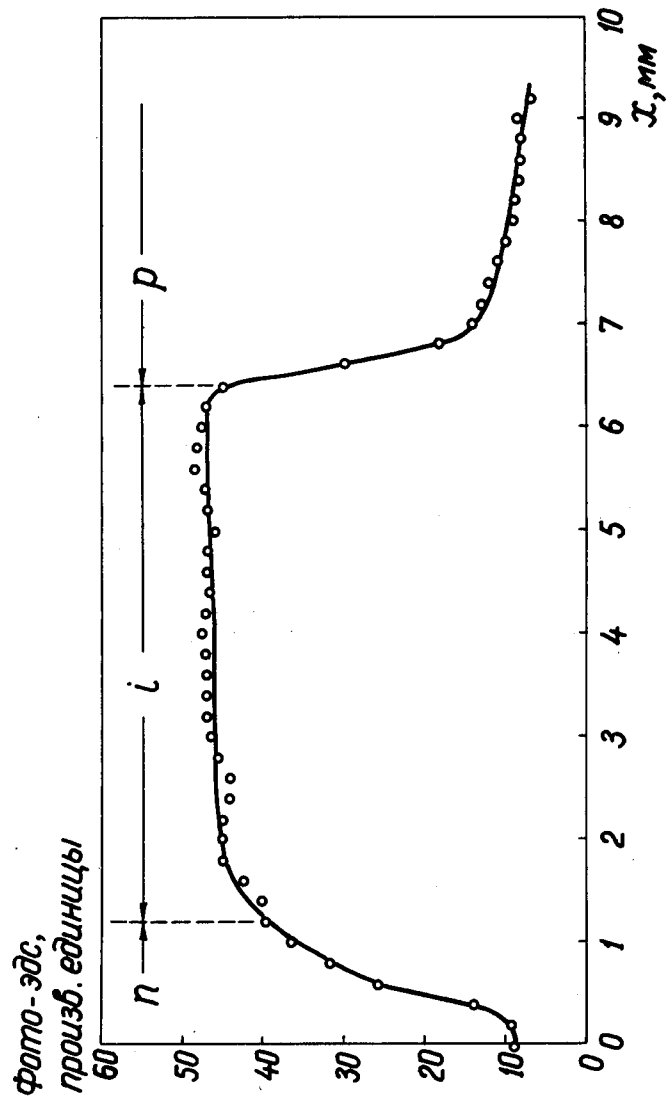


Рис. 5. Фото-эдс. толстого p-i-n кремниевого детектора № 7, снятая "по точкам", после обработки его поверхности в бихромате калия.

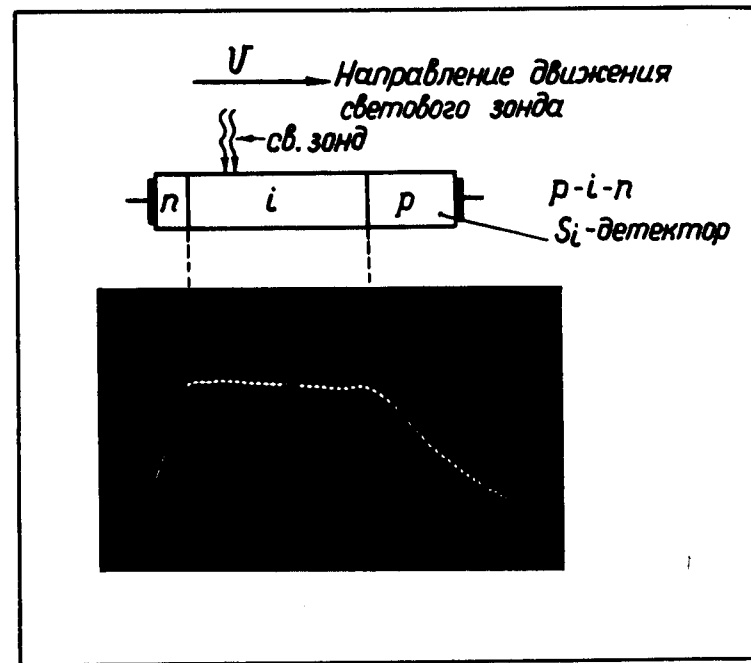


Рис. 6. Осциллограмма фото-эдс., полученная на p-i-n кремниевом детекторе № 7, фото-эдс. которого, снятая "по точкам", представлена на рис. 5.



фото-эдс,  
произв. единицы  
100

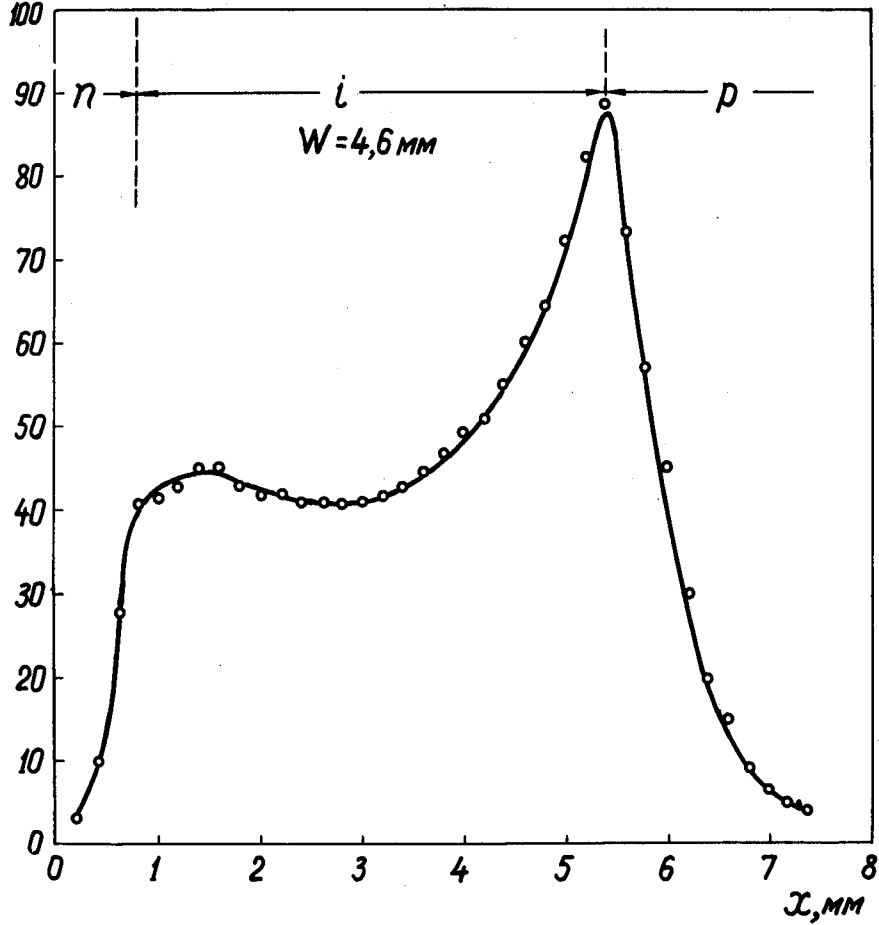


Рис. 7. Фото-эдс. толстого р-і-п кремниевого детектора № 14, снятая после травления в СР-4 и промывки в деионизированной воде. По уменьшению фото-эдс. в і-области со стороны п-і-перехода можно судить о наличии пленки с n-проводимостью над і-областью.

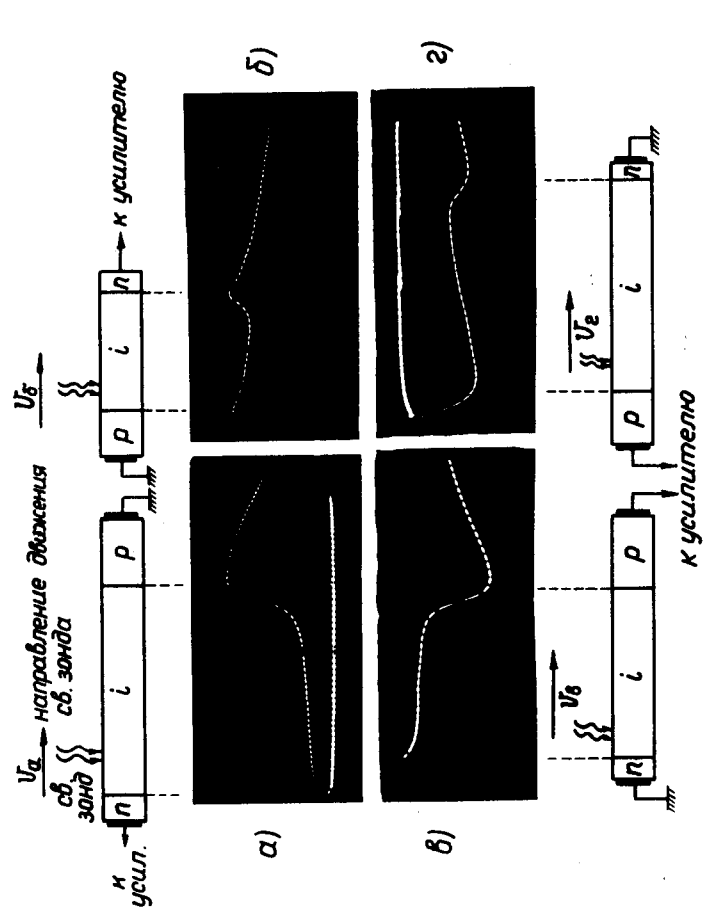


Рис. 8. Осциллограммы фото-эдс., полученные на толстом р-і-п-кремниевом детекторе № 14, фото-эдс. которого, снятая "по точкам", представлена на рис. 7. Кривые а) и б) сняты при заземлении р-области. Направление движения светового зонда обозначено над фотографиями. Кривые в) и г) сняты при заземлении n-области.