

С.344.1М

Б-97

28/01/65
✓

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2011



М.П.Бэдэноу, Ван-Цжень-ва, А.И.Сидоров,
Л.П.Сидорова

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТОЛСТЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ
ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

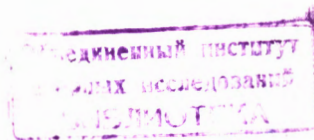
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

3033/3 чр.

М.П. Бедэноу, Ван Цжень-ва, А.И. Сидоров,
Л.П. Сидорова

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТОЛСТЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ
ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ



В предыдущих работах нами исследовался эффективный квантовый выход η кремниевых детекторов ядерных частиц с толстым слоем объемного заряда (компенсированных литием)^{/1/}. Уменьшение η в области коротких длин волн объяснялось большим влиянием поверхностной рекомбинации в этой области спектра^{/1,2/}. Качественное, а не количественное совпадение экспериментальных и теоретических кривых при этом связывалось с тем, что в расчете не учитывались инверсионные явления и связанные с ними искажения электрического поля.

В литературе описаны следующие методы исследования инверсионных слоев в р-п переходах с широким слоем объемного заряда:

1. Измерение распределения потенциала по торцевой поверхности р-п перехода методом вибрирующего зонда^{/3/}.

2. Измерение распределения потенциала посредством электрометрических приборов (с очень высоким входным сопротивлением)^{/4/}.

3. Изучение зависимости фототока $J(x)$ при освещении перехода очень узкой перемещающейся полоской света. Этот метод был впервые применен Христенсенем^{/5/} в 1964 г. для исследования канальных явлений и с тех пор опубликовано много работ, где он применялся^{/6,7/ x)}. Это метод также был положен в основу нашей работы, однако, мы использовали монохроматический свет двух длин волн, соответствующий объемному и поверхностному возбуждению пар носителей. Схема установки представлена на рис. 1. От лампы накаливания свет через отражающее параболическое зеркало попадал на спектрофотометр СФ-4. Выходящий из прибора монохроматический свет модулировался с $f = 150$ гц и попадал на узкую щель, за которой располагался образец. Ширина освещаемой полосы составляла величину 0,05 мм. Микрометрические устройства позволяли перемещать образец и регулировать ширину щели с большой точностью.

Как было показано ранее^{/1/}, при освещении поверхности детектора светом, с длиной волны $\lambda = 1075$ нм в i области при поле $E > 20000$ в/м практически несущественны ни поверхностная, ни объемная рекомбинации, и эффективный квантовый выход равен единице. Поэтому объемный фототок при этой длине волны является как бы абсолютной

x) Этот метод применялся также в^{/8/} для определения толщины i -области детекторов.

световой характеристикой детектора и используется для градуировки кривой с поверхностным возбуждением ($\lambda = 600$ нм, чему соответствует глубина поглощения света в $2 \cdot 10^{-3}$ мм). Для каждого образца измерялись объемная и поверхностная кривые фототоков при разных значениях напряжения, приложенного к образцу (от 20 до 140 в). Исследуемые в данной работе поверхностные явления были получены после следующих обработок поверхности $n-i-p$ -структуры:

- 1) травление в $sr-4$;
- 2) травление в смеси $HNO_3 : HF = 10 : 1$;
- 3) травление в смеси $HNO_3 : HF = 1 : 10$;
- 4) обработка поверхности дихроматом после травления в $sr-4$;
- 5) защита поверхности некоторыми халькогенидными стеклами;
- 6) защита поверхности некоторыми кремний-органическими лаками.

Следует отметить, что травление детектора является плохо управляемым процессом. При травлении в-8, казалось бы, одинаковых образцов по п.п.1-3 всегда имеется большой разброс по величине обратных токов и состоянию поверхности в каждой партии, так что речь будет идти о наиболее типичных результатах. Важно и то, что при перетравливании образца всегда получаются иные результаты, чем при первом травлении, даже в случае, если это травление происходит через длительное время после первого. Итак, рассмотрим кривые фототока при различных обработках поверхности детектора. После травления в $sr-4$ поверхностная кривая имеет максимум вблизи границы $i-p^+$. Этот максимум практически не растет в высоту и лишь расширяется при увеличении приложенного к образцу напряжения (рис. 2а). На большинстве образцов, травленных в $sr-4$, максимальные значения поверхностного фототока: 1) не зависят от напряжения; 2) не меняются от образца к образцу. Поэтому было предположено, что максимальный фототок соответствует полному сборанию носителей, генерируемых на поверхности. Исходя из этого, масштаб построения объемного и поверхностного возбуждения был выбран таким образом, что эти кривые совпадают в области максимума поверхностного фототока. В случае других поверхностных обработок, когда не имело места полное собрание носителей даже в максимуме фототока, кривая поверхностного фототока оказывалась ниже, и расхождение кривых являлось критерием величины поверхностной рекомбинации. Обратные токи детекторов $J_{обр}$ (в темноте) показаны на графиках.

В процессе хранения обратный ток детекторов, как правило, увеличивается. При этом максимум на поверхностной кривой (рис. 2б, образец № 9) заметно расширяется со временем. Таким образом, чаще всего оказывается, что малый обратный ток детектора связан с тем, что мала область, из которой этот ток эффективно собирается.

На образцах, травленных по п.2, кривые нередко имеют вид, изображенный на рис. 3а. Видно, что объемная кривая фототока имеет аномально медленный спад в p^+ -области, а поверхностные кривые имеют в этой области максимальное значение фототока; все это говорит об образовании мощного поверхностного канала на p^+ -области. Обратный ток этого образца, однако, невелик. При хранении образца через некоторое время канал исчезает (рис. 3б), обратный ток при этом почти не меняется. Представленные на рис.2 и 3 поверхностные кривые в первом приближении можно объяснить, если предположить, что образуется инверсионный слой n -типа на i -области (рис.2 и 3б), или на i и p -областях (рис. 3а). Структура обедненной области детектора и распределение эквипотенциалей имеет при этом вид, изображенный на рис. 4а и 4б.

Точная картина распределения эквипотенциалей зависит от сопротивления инверсионного слоя: если оно мало, то падение напряжения на поверхности i -области (вдоль инверсионного слоя) близко к нулю, и в этом случае эквипотенциаль $v=0$ на поверхности очень сильно смещена в сторону p^+ -области. Если сопротивление инверсионного слоя увеличивается, то эта эквипотенциаль смещается в сторону n^+ -области, совпадая с ней в отсутствие инверсии. (Следует отметить, что трактовка компенсированной области как i -области оправдана тем, что при напряжениях смещения ≥ 20 в слой объемного заряда (вдали от поверхности) занимает практически всю компенсированную область).

Малая величина обратного тока на образцах с сильными каналами, по-видимому, связана с тем, что при сильной инверсии на поверхности скорость поверхностной рекомбинации и генерации оказывается малой. Уменьшение каналов на образце № 5 (рис. 3) и увеличение обратного тока на образцах типа № 9 (рис. 2) может быть объяснено, если предположить, что инверсионный слой уменьшается со временем хранения. Увеличение обратного тока (рис. 2), по-видимому, связано с увеличением размеров области, из которой собирается обратный ток (и может быть также с увеличением поверхностной рекомбинации на i -области). На некоторых образцах (рис. 5) максимальное значение обратного тока превосходит градуировочную объемную кривую и увеличивается при увеличении напряжения. Обратный ток при этом велик и нестабилен. По-видимому, инверсионные слои при этом таковы, что имеет место поверхностный пробой и размножение носителей в области сильного поля. Однако такие образцы, где явно был выражен поверхностный пробой, встречаются относительно редко. При хранении такого образца максимальное значение поверхностного фототока уменьшилось до уровня объемной кривой, плато расширилось обычным образом, а обратный ток уменьшился, что свидетельствует об исчезновении поверхностного пробоя.

Образцы, травленные в травителях с большим содержанием плавиковой кислоты, обычно имеют сильные каналы и большой обратный ток, медленно увеличивающийся

со временем под напряжением, что свидетельствует о существовании ионной проводимости на поверхности детектора (рис. 8). Инверсионный слой здесь очень низкоомный, поэтому кривые поверхностного фототока на значительном участке параллельны оси x .

Интересные результаты получились на образцах, обработанных после травления в дихромате натрия (рис. 7а и 7б). На образце № 30, который обрабатывался кипящим дихроматом в течение 10 мин (рис. 7а), инверсионные слои, по-видимому, не образовались, зато велика поверхностная рекомбинация. Кроме того, форма поверхностных кривых позволяет сделать предположение, что длина пролета в поле для электронов L_n значительно больше длины пролета для дырок L_p , т.е. $L_n \gg L_p$, так как на границе $i - p^+$ практически нет потерь от поверхностной рекомбинации. Обратный ток этого образца значителен, что согласуется с предположением о значительной величине поверхностной рекомбинации. На образце № 17, обработанном кипящим дихроматом в течение 1 часа, обратный ток был так велик, что его невозможно было измерить. Кривые, снятые примерно через месяц после хранения (рис. 7б), свидетельствует об очень большой величине скорости поверхностной рекомбинации. Об этом же говорят и вольтамперная характеристика образца. Для создания стабильной во времени поверхности часть образцов покрывалась некоторыми кремний-органическими лаками и халькогенидными стеклами. При напылении халькогенидов на свежепотравленную в $sr -4$ поверхность получились кривые, представленные на рис. 8а. Обратный ток при этом велик и нестабилен. Характер кривых говорит о том, что в данном случае возник инверсионный слой p -типа и имеет место поверхностный пробой. Если халькогенидное стекло напыляется на долго лежавший или многократно перетравленный образец, то поверхностного пробоя не наступает, обратный ток имеет обычную величину, хотя инверсионный p -слой, по-видимому, образуется.

Интересные результаты получились также на образцах, защищенных после травления в $sr -4$ кремний-органическим лаком (рис. 8б). Как видно, на таких образцах образуются очень сильные инверсионные слои и каналы, однако обратный ток мал и очень слабо зависит от напряжения. Ни форма кривой, ни значение обратного тока не меняется со временем. Однако недостатком такой защиты, как и всякой другой, связанной с образованием инверсионных слоев, является искажение линий электрического поля у поверхности на расстояние (по радиусу) равное \approx толщине i -слоя. Это приводит к увеличению времени собирания носителей, что связано с уменьшением амплитуды импульса от частицы, если импульс тока не полностью интегрирован.

Отметим здесь, что на объемных кривых долго лежавших образцов возникает "завал" вблизи p^+i -перехода, связанный, по-видимому, с диффузией лития в i -область (рис. 8).

Из проделанной работы можно сделать следующие практические выводы:

1) Чаще всего минимальный обратный ток получается в том случае, когда на поверхности образца в процессе травления образуется инверсионный слой электронной проводимости.

2) Увеличение обратного тока при хранении образца можно интерпретировать как результат увеличения площади, с которой эффективно собираются генерированные поверхностью носители, из-за уменьшения инверсионного слоя n -типа.

3) Образование больших каналов на поверхности не приводит к существенному увеличению обратного тока, по-видимому, из-за уменьшения скорости поверхностной рекомбинации и генерации.

4) Защита поверхности халькогенидными стеклами приводит к образованию инверсионного слоя p -типа и к поверхностному пробою (на свежеприготовленных образцах), или просто к образованию p -типа на долголежащих образцах.

5) Защита поверхности кремний-органическими лаками приводит к образованию мощных каналов на поверхности, однако обратный ток мал и стабилен во времени. К недостаткам этого метода защиты относится зависимость длительности импульса тока пар носителей, созданных частицей, от места ее попадания вблизи края детектора. Следует отметить, что трудно выдать определенные рекомендации относительно поверхностной обработки, дающей минимальный обратный ток, в связи с тем, что: во-первых, при одном и том же травлении получается большой разброс характеристик детекторов; во-вторых, поверхностные свойства образца сильно меняются со временем. Ясно, что проблема рационального травления и защиты должна решаться совместно.

В заключение выражаем благодарность за интерес к работе Ю.К. Акимову, А.И. Калинину и Б.П. Осипенко, а также Л.А. Ермолиной за помощь в подготовке образцов и проведении измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.К.Акимов, Ван Цжень-ва, А.И.Сидоров, М.И.Эпштейн. Препринт ОИЯИ Р-1869, Дубна, 1964.
2. Ю.К.Акимов, Ван Цжень-ва, А.И.Сидоров. Препринт ОИЯИ Р-1867, Дубна, 1964.
3. W.Shockley, H.L.queisser and W.W.Hooper. Phys. Rev. Lett., v.11, No.11, 489 (1963).
4. T.Llacer. IEEE Transactions on Nuclear Science. No. 3, 221, (1964).
5. H.Christensen Proc. IRE, 42, No. 9, 1371 (1954).
6. Н.Б.Хеняя. Полупроводники И.Л.1962.
7. Расчет и проектирование полупроводниковых приборов под ред. Г.Д.Глебова И.Л.1963.
8. В.С.Василев, Б.М.Головин, Б.П.Осипенко, А.Червонко. Препринт ОИЯИ Р-1894, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 февраля 1965 г.

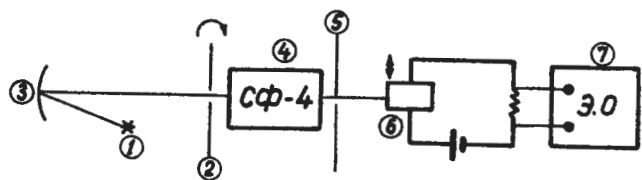


Рис. 1. Схема установки.

1. Лампа накаливания.
2. Модулятор.
3. Параболическое зеркало.
4. Спектрофотометр -СФ-4.
5. Выходная щель.
7. Осциллограф.

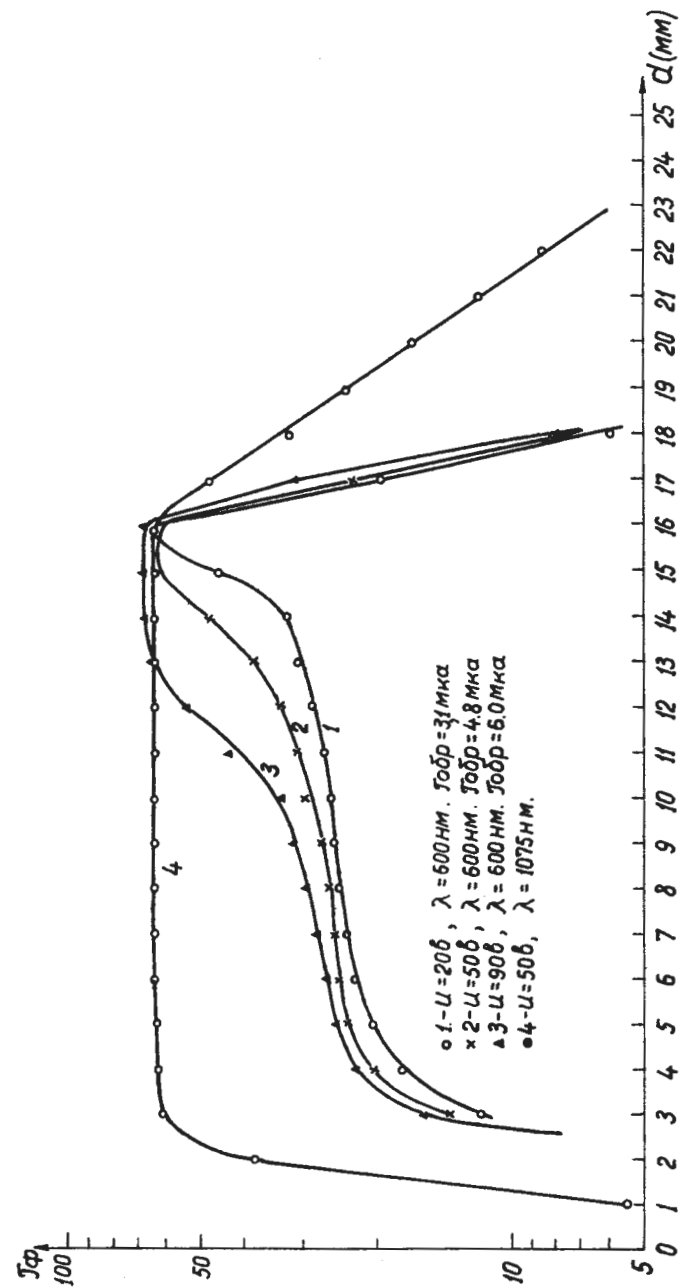


Рис. 2а. Образец № 9 сразу после травления в ср - 4.

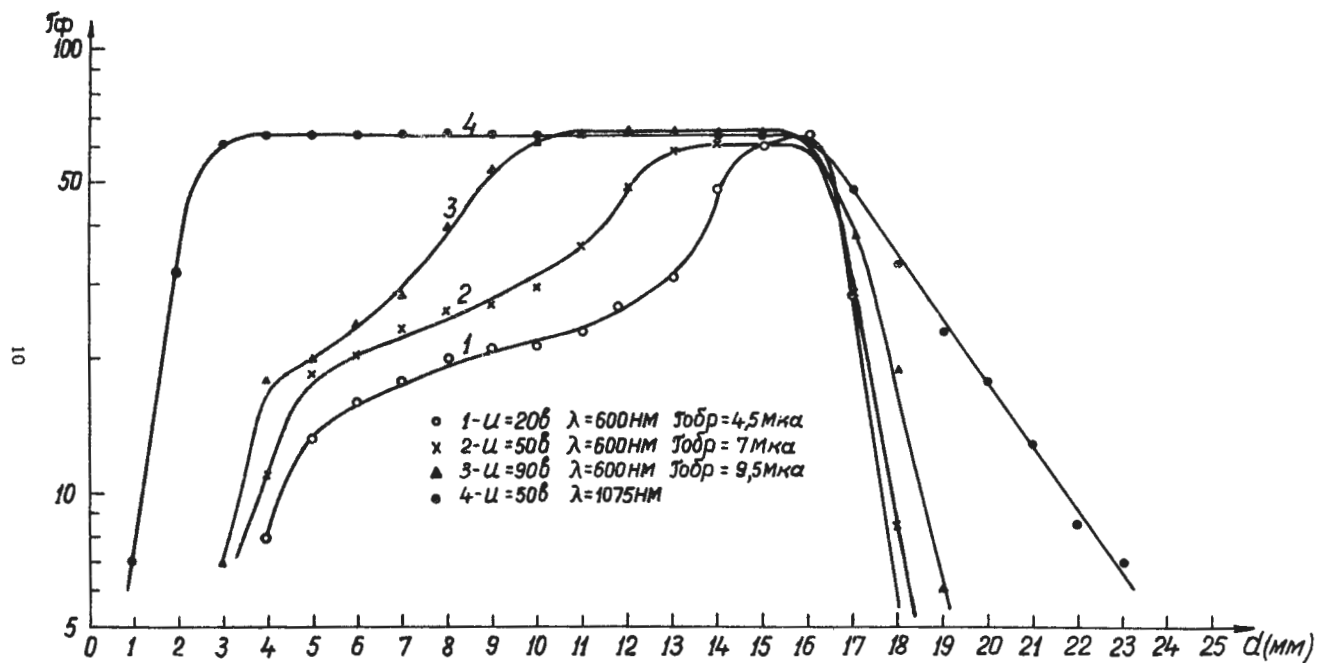


Рис. 26. Образец № 9 через 10 дней после травления в ср - 4.

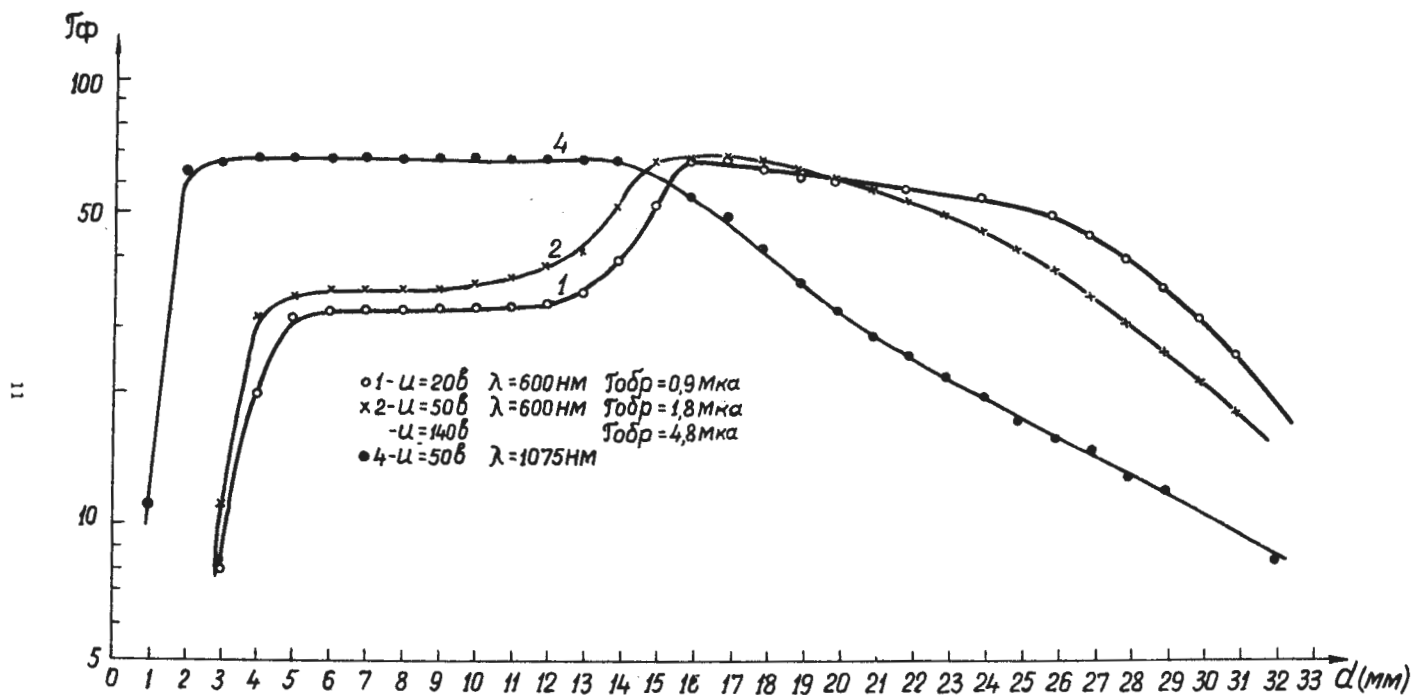


Рис. 2а. Образец № 5 сразу после травления в смеси $\text{HF}:\text{HNO}_3$ 1:10.

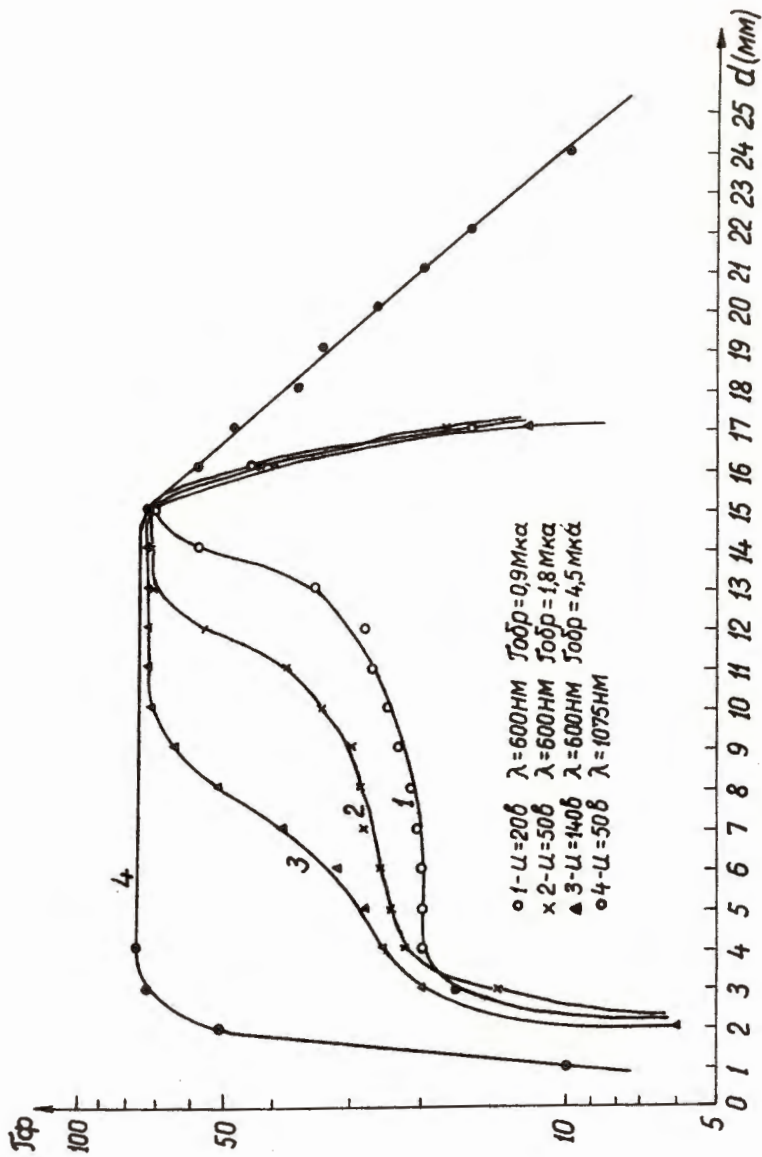


Рис. 36. Образец № 15 через 10 дней после травления. HF : HNO₃

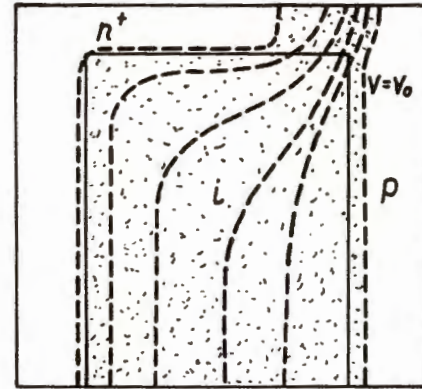


Рис. 4а. Структура обедненной области детектора и распределение эквипотенциалей при образовании инверсионного слоя n^+ на i -области.

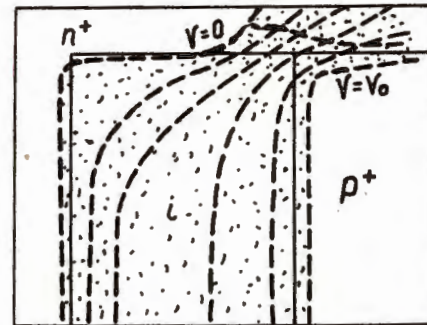


Рис. 4б. Структура обедненной области детектора и распределение эквипотенциалей при образовании инверсионного слоя n^+ на i и p^+ -областях (каналы).

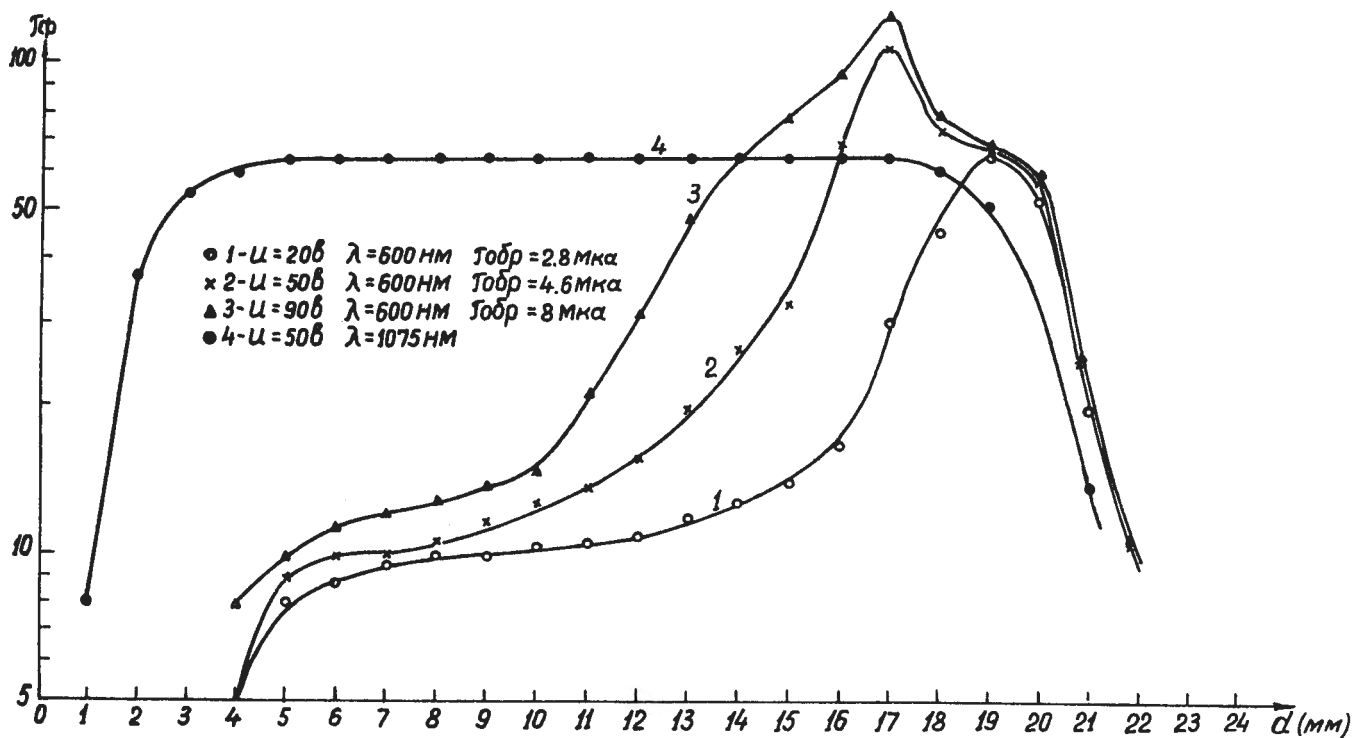


Рис. 5. Образец № 4 сразу после травления в ср-4.

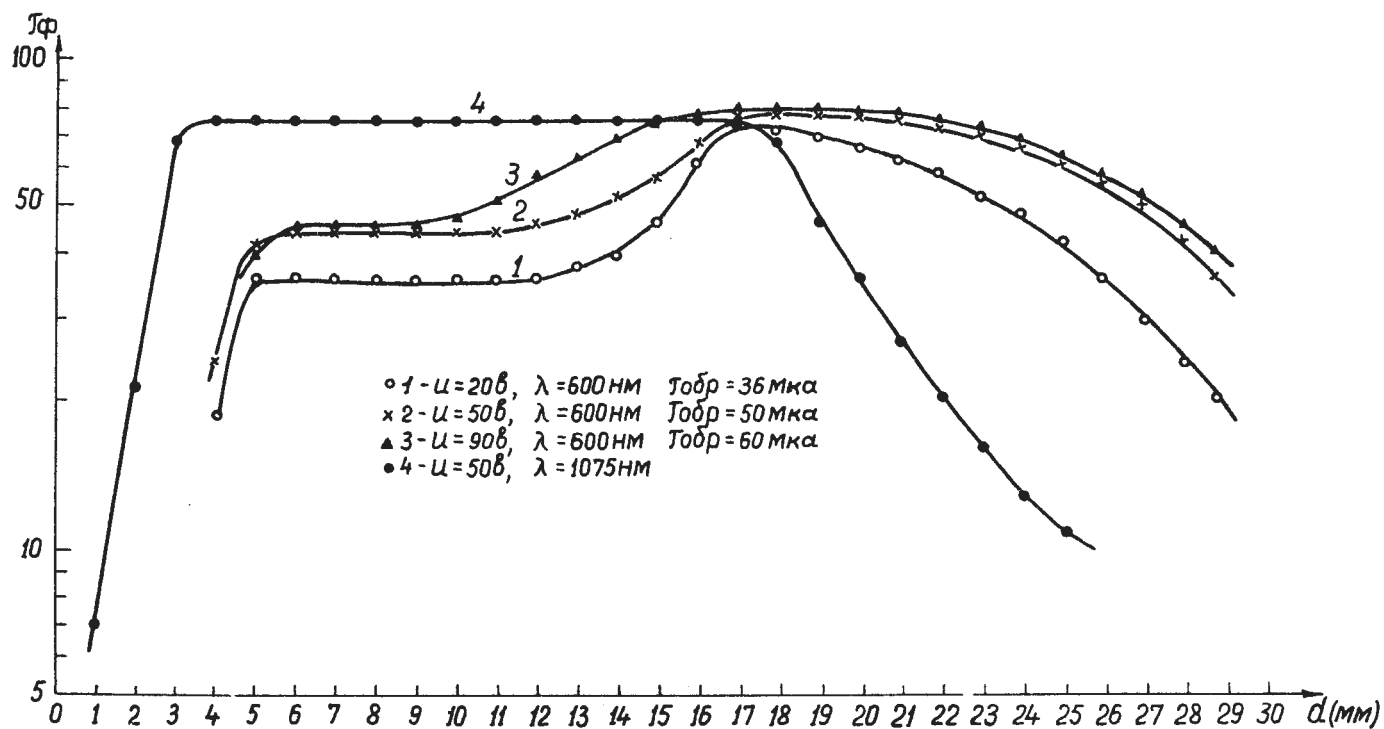


Рис. 6. Образец № 24, травленный в травителе с большим содержанием плавиковой кислоты.

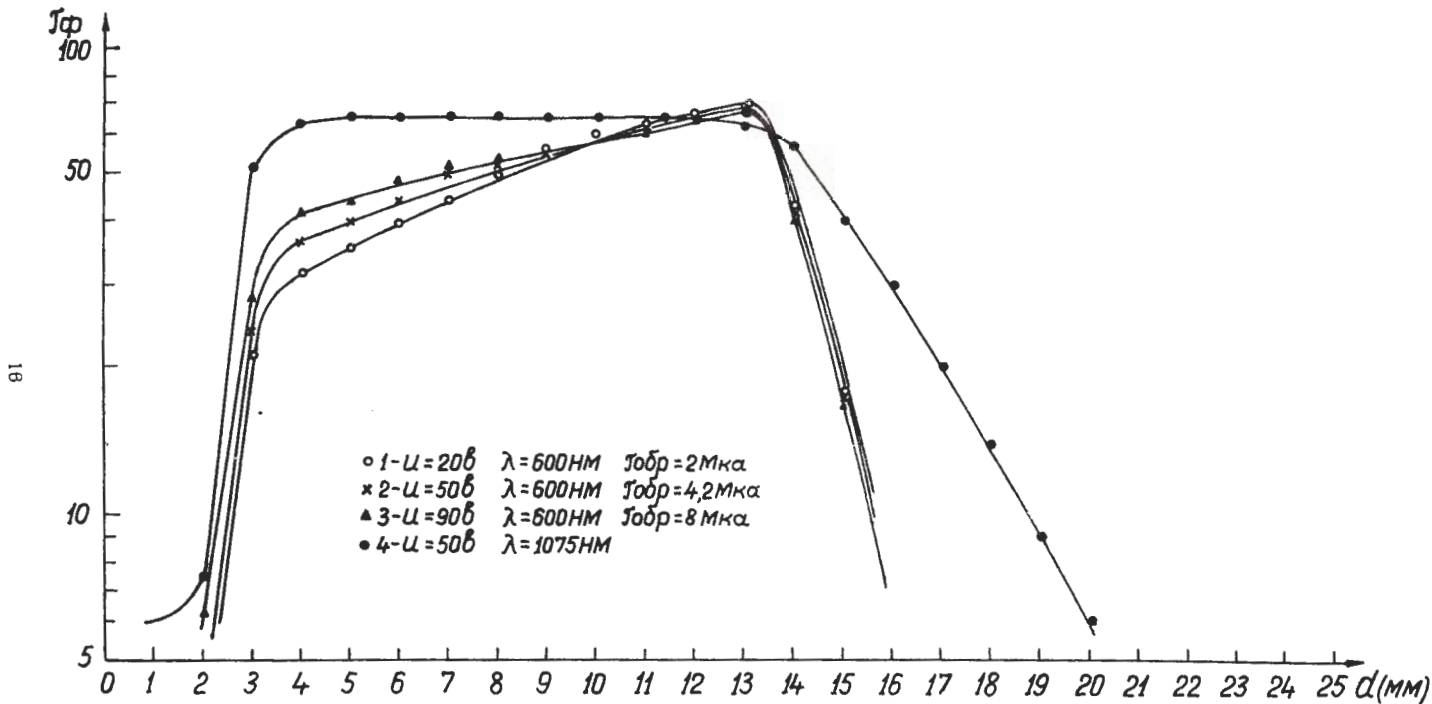


Рис. 7а. Образец № 30, после травления в ср-4 кипятится в дихромате натрия в течение 10 мин.

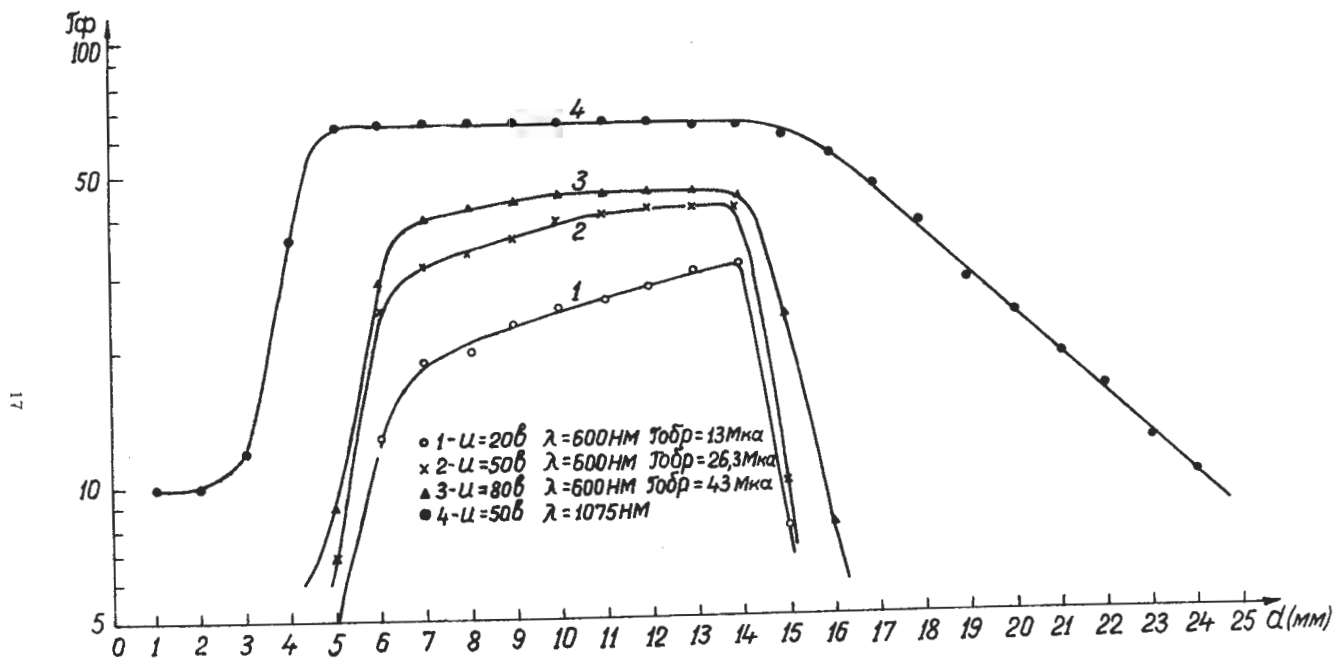


Рис. 7б. Образец № 17, после травления в ср-4 кипятится в дихромате натрия в течение 1 часа.
(Кривые сняты через с месяц после кипячения).

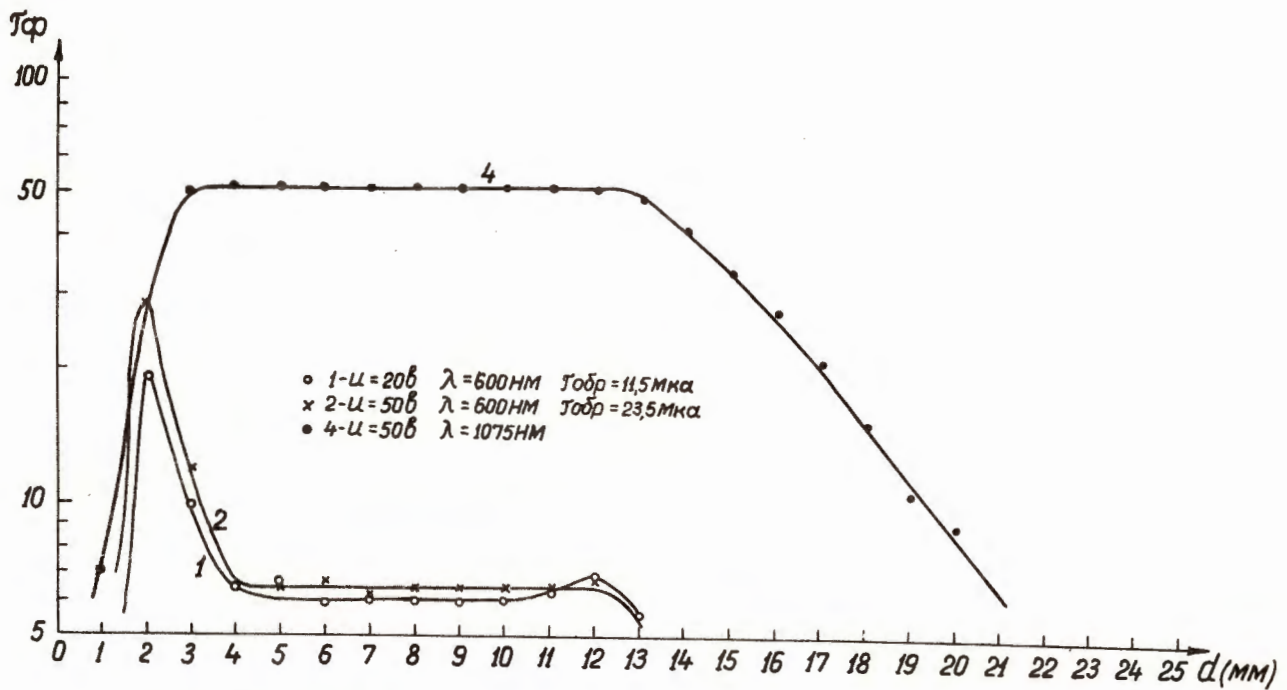


Рис. 8а. Образец № 28, после травления в sr^{-4} и последующего напыления халькогенидного стекла.

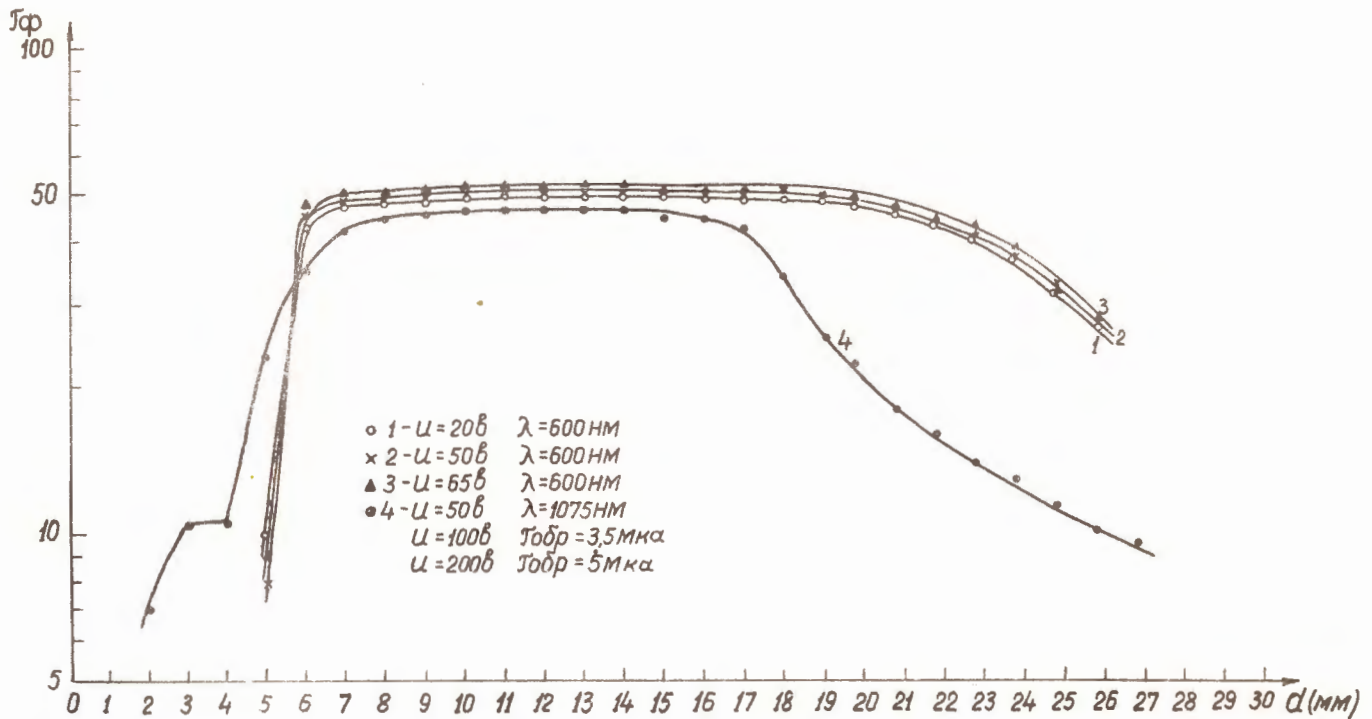


Рис. 8б. Образец № 6 после травления в sr^{-4} и последующей защиты кремний-органическим лаком.

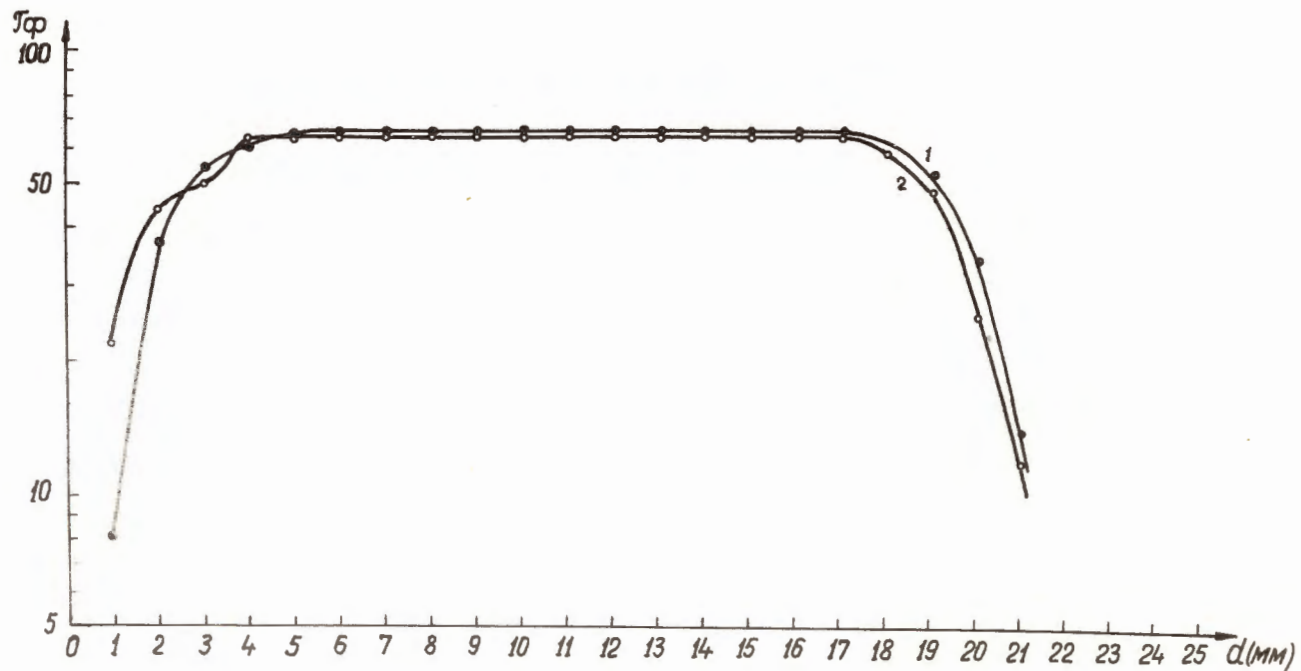


Рис. 9. Кривые объемного фототока для образца № 8.

1. После изготовления образца, 2. После хранения в течение 3 месяцев.