

С 349 Л

К-615

22/xI-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2385



И.Ф. Колпаков

НЕОБРАТИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
НЕКОТОРЫХ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ ПРОТОНАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 680 МЭВ

ЛБОРТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

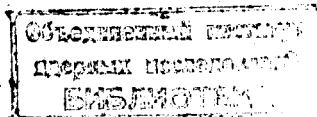
1965

2385

И.Ф. Колпаков

НЕОБРАТИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
НЕКОТОРЫХ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ ПРОТОНАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 880 МЭВ

Направлено в "Вопросы радиоэлектроники"



Исследование поведения полупроводниковых приборов в условиях излучения имеет существенное значение для конструирования электронной аппаратуры, работающей в сильных радиационных полях (аппаратура для спутников, орбиты которых находятся в радиационных поясах Земли, космических кораблей, экспериментальные приборы для измерений на реакторах и ускорителях, аппаратура, регистрирующая ядерные взрывы). Протонная компонента радиационных поясов и космических лучей может быть смоделирована на ускорителях частиц высоких энергий (интересными являются пучки протонов с энергией в диапазоне от 10 до 850 Мэв с интенсивностями 10^5 частиц/см²сек), поэтому исследование поведения полупроводниковых приборов и схем при облучении их протонами высоких энергий полезно не только с точки зрения вопросов конструирования аппаратуры для экспериментов на самих ускорителях, но также и с точки зрения разработки электронных приборов для космических исследований.

Действие излучения на сами полупроводниковые материалы достаточно хорошо изучено. Различают объемные и поверхностные, обратимые и необратимые эффекты ионизирующего излучения. Поверхностные эффекты, как вообще поверхностные явления в полупроводниках, являются изученными сравнительно слабо. Поверхностные повреждения могут быть обратимыми и исчезать через некоторое время после прекращения облучения. Необратимые поверхностные явления сводятся к появлению дополнительных энергетических уровней на поверхности, что приводит к увеличению обратного тока через рп-переход. К обратимым объемным эффектам относится протекающий через полупроводник электрический ток, обусловленный образованием электронно-дырочных пар в условиях ионизирующих излучений. Ионизация исчезает с постоянной, равной времени жизни неосновных носителей. К обратимым эффектам относится также повышение температуры полупроводникового вещества вследствие энерговыделения при очень больших потоках частиц.

В данной работе исследовались изменения некоторых параметров полупроводниковых приборов, являющиеся, в основном, результатом необратимых эффектов. Протоны с энергиями от 10 до 500 Мэв вызывают смещения атомов решетки ^{/1/} (эффект Френкеля), что приводит к образованию дефектных уровней в области запрещенной

зоны полупроводника. Эти дефектные уровни увеличивают скорость рекомбинации неосновных носителей и уменьшают время их жизни, поскольку скорость рекомбинации обратно пропорциональна времени жизни. Уменьшение времени жизни и изменение сопротивления являются основными объемными необратимыми эффектами облучения. Время жизни связано с пропущенным потоком частиц следующим соотношением:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + C\Phi, \quad (1)$$

где Φ - поток в $1/\text{см}^2$, τ_0 - время жизни до облучения, C - постоянная, которая зависит от вида и энергии частиц, типа полупроводникового вещества (германий, кремний и т.д.), проводимости, температуры, типа проводимости (p, n), типа примесей, плотности неравновесных носителей, то есть от величины протекающего тока и т.д. Проявление последствий облучения в сильной степени зависит также от режима измерений. Все данные, которые будут приведены ниже, получены при пассивном облучении, а измерения проводились в активном режиме. Постоянная C для кремния на порядок меньше, чем для германия. Что касается изменения сопротивления с облучением, то для кремния наблюдается его увеличение. Для n -германия также наблюдается увеличение сопротивления, но под действием облучения он может переходить в p -германий. Для p -германия эффект увеличения сопротивления выражен не так сильно, как для кремния и n -германия.

Изучалось поведение диодов, туннельных диодов и транзисторов при облучении протонами с энергией 680 Мэв на синхротронном ОИЯИ. Полученные данные следует считать предварительными и оценочными, так как они не подкреплены статистически по числу облучаемых приборов (исследовались единичные количества образцов каждого типа, а поведение при облучении характеризуется различием от образца к образцу), кроме того, положение приборов в самом протонном пучке контролировалось недостаточно точно, что могло привести к значительным отклонениям реально прошедшего потока от измеренного; также надо отметить относительно невысокую точность измерения потока (поток измерялся в большинстве опытов по алюминию, а в части опытов по углероду определялась интенсивность, затем по сцинтилляционному счетчику контролировалась относительная интенсивность в течение опыта). Точность измерений параметров не была высокой вследствие недостаточной точности измерительных приборов (использовались большей частью характеристики), а также вследствие того, что проходил значительный период времени между моментом измерения характеристик и установки прибора на дальнейшее облучение, так что могло иметь место частичное восстановление параметров прибора, время экспозиции было большим (сутки), а за этот период происходили изменения температуры, изменяющие параметры приборов и т.д.

Потоком отказа считался поток протонов, при котором какой-либо параметр испытываемого прибора выходил за пределы, указанные в справочных данных. Такой критерий отказа является весьма строгим, поскольку в конкретных случаях использования приборов в схемах может быть допущено значительно большее отклонение данного параметра, особенно, когда применяется отрицательная обратная связь. Поток отказа определялся с точностью линейного приближения между экспериментальными точками.

Изменение параметров диодов

Для диодов при облучении характерно объясняемое поверхностными эффектами увеличение обратного пробивного напряжения и прямого сопротивления. Обратный ток увеличивается ввиду роста числа центров захвата и поверхностного тока, поэтому обратное сопротивление, как правило, падает с ростом пропущенного потока частиц.

Испытывался ряд диодов, германиевых и кремниевых. В основном измерялся только обратный ток диодов, хотя изменение прямого сопротивления может также служить дополнительно причиной отказа.

Ниже приводятся основные полученные результаты для диодов. В подзаголовках в скобках указано число испытанных образцов.

Германиевый выпрямительный сплавной диод Д7 (1)

Обратный ток не выходит из допустимых пределов отклонения при потоке 10^{15} $\text{p}/\text{см}^2$ (см. рис. 1). Прямое сопротивление не измерено. Большой поток не пропускался.

Германиевые точечные диоды

Д9 (1)

Обратный ток остался в допустимых пределах при потоке 10^{15} $\text{p}/\text{см}^2$ (см. рис. 1). Прямое сопротивление не измерено. Большой поток не пропускался.

Д10 (1)

Поток отказа по обратному току находится между $0,3 - 1 \cdot 10^{15}$ р/см² (см. рис. 1).

Прямое сопротивление не измерено.

Д11 (1)

Поток отказа по прямому сопротивлению близок к 10^{15} р/см² (см. рис. 2а).

При этом потоке обратный ток не превышает допустимого.

Д18 (1)

Поток отказа по обратному току равен $3 \cdot 10^{14}$ р/см² (см. рис. 1). Прямое сопротивление при этом потоке заметно увеличивается, но остается меньше предельно допустимого.

Кремниевый точечный диод Д103А (1)

Обратный ток не превышает предельно допустимого при потоке 10^{15} р/см² (см. рис. 1), однако, увеличение прямого сопротивления уже при потоке менее $3 \cdot 10^{14}$ приводит к отказу (см. рис. 2б). Большой поток протонов через диод не пропускаться.

Поведение туннельных диодов

Известно, что туннельные диоды более стойки к облучению, чем диоды и транзисторы, так как принцип их работы базируется на основных носителях и не зависит от времени жизни неосновных носителей. Изменяется ток минимума и диффузионная ветвь вследствие образования ловушечных центров в запрещенной зоне под действием облучения^{/3/}. Указанные изменения при облучении протонами не были обнаружены, так как не был достигнут предел радиационной стойкости. Облучались α -германиевый туннельный диод типа ИИ302 с током максимума 3,5 ма и туннельный диод из арсенида галлия с током максимума 3,5 ма и емкостью 5 пф потоком $3 \cdot 10^{15}$ р/см², а также туннельные диоды на p -германии (2 образца) с токами максимума 4,85 и 9,55 ма и емкостями 18 и 23 пкф, соответственно, и обращенные диоды на p -германии с токами максимума 68 и 73 мка и емкостью 2 пкф потоком $3,7 \times 10^{14}$ р/см².

Изменение параметров транзисторов

Наиболее выраженным эффектом облучения для транзисторов является уменьшение коэффициента усиления, связанное с уменьшением времени жизни неосновных носителей

$$\alpha = \alpha_0 - \bar{t} K' \Phi, \quad (2)$$

где \bar{t} - среднее время пролета носителей через базу, а K' - постоянная, являющаяся функцией тех же переменных, что и C в выражении (1). В частности, зависимость α от Φ может быть нелинейной вследствие того, что K' зависит от типа проводимости, а при облучении α -германий переходит в p -германий, поэтому коэффициент усиления может даже расти при определенных дозах. Так как f_α - обратно пропорциональна $1/\bar{t}$, то можно записать для α :

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{K}{f_\alpha} \Phi. \quad (3)$$

Поскольку предельные частоты транзисторов находятся в диапазоне 1 кГц - 1 ГГц, то потоки частиц, при которых происходят отказы, могут различаться на 8 порядков. Высокочастотные транзисторы могут выходить из строя раньше, чем предсказывается в выражении (3), так как при облучении увеличивается сопротивление полупроводников и могут иметь место изменения величин, связанных с проводимостью, таких, как емкость перехода, напряжение прокаливания, падение напряжения на транзисторе в состоянии насыщения, распределенное сопротивление базы и т.д. Выход из строя может быть также обусловлен поверхностными эффектами, которые проявляются в увеличении обратного тока и уменьшения пробивного напряжения. Протоном облучался ряд маломощных транзисторов, германиевых и кремниевых. Коэффициент усиления, в целом, изменяется в соответствии с выражением (3), но для высокочастотных транзисторов наблюдались значительные отклонения, которые кроме неточности измерений можно объяснить зависимостью постоянной K от типа проводимости и изменением типа проводимости под действием облучения.

Далее даны результаты, полученные для транзисторов. Как и для диодов, в подзаголовках в скобках указано число исследованных образцов.

Германиевые маломощные низкочастотные транзисторы

П9А(2)

Коэффициент передачи в схеме с общей базой - α становится меньше предельно допустимого значения при потоке не более $5 \cdot 10^{12}$ р/см² (см. рис. 3). Поток отказа для обратного тока коллектора J_{K_0} не достигается при падении α до 0 (см. рис. 4).

$$K/f_\alpha = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{р.сек.}$$

П13(1)

Отказ наступает из-за увеличения J_{K_0} при потоке $2,4 \cdot 10^{14}$ р/см² (см. рис. 4). При таком потоке (см. рис. 3) α остается еще в пределах допусков. Возможно, что данные по α превышают поток отказа, как видно из результатов по П14 и П15 далее.

$$K/f_\alpha = 7,5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{р.сек.}$$

П14(2)

Поток отказа по $J_{k_0} - 2,5 \cdot 10^{13}$ p/cm² (рис. 4), по $\alpha - 2,2 \cdot 10^{14}$ p/cm² (рис. 3).
Постоянная K/f_α заключена в пределах $1 - 1,9 \cdot 10^{-15}$ см²/p.сек.

П15 (1)

Поток отказа по J_{k_0} равен $8 \cdot 10^{13}$ p/cm² (см. рис. 4), а по $\alpha - 1,75 \cdot 10^{14}$ p/cm² (рис. 3). K/f_α находится в диапазоне $5 - 9 \cdot 10^{-17}$ см²/p.сек.

Кремниевый маломощный низкочастотный транзистор П103 (1)

Отказ наступает из-за падения α при потоке $1,2 \cdot 10^{12}$ p/cm² (см. рис. 3).
По J_{k_0} отказ не наступает и при падении α до 0 (см. рис. 4).

$$K/f_\alpha = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{p.сек.}$$

Германиевые диффузионные высокочастотные транзисторы

П403А(2)

Один из образцов случайно вышел из строя после экспозиции $2,38 \cdot 10^{14}$ p/cm² (1-я точка на рис. 3 и 4), но уже после этой экспозиции ток J_{k_0} данного транзистора превышал предельно допустимый, поэтому поток отказа можно считать равным $2,4 \cdot 10^{14}$ p/cm². Поток отказа для второго образца, по-видимому, завышен - по J_{k_0} он не достигается даже при наибольшем пропущенном потоке - $3;1 \cdot 10^{15}$ p/cm², а по α поток отказа равен $2 \cdot 10^{15}$ p/cm².

$$K/f_\alpha = 3,4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{p.сек.}$$

П416 (3)

Один образец случайно вышел из строя при замере на потоке $4,3 \cdot 10^{13}$ p/cm², поэтому при больших потоках измерения велись на двух образцах, однако, поток отказа по α был достигнут раньше и составляет $3 \cdot 10^{13}$ p/cm² (см. рис. 3). По J_{k_0} поток отказа равен $1,4 \cdot 10^{14}$ p/cm² (рис. 4). Постоянная

$$K/f_\alpha = 1,3 - 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{p.сек.}$$

1Т308 (5)

Поток отказа по α составляет $8 \cdot 10^{13}$ p/cm² (рис. 3), а по $J_{k_0} - 1,5 \cdot 10^{14}$ p/cm² (рис. 4)

$$K/f_\alpha = 5,5 \cdot 10^{-16} \text{ п/см}^2.$$

1Т303 (2)

У одного из образцов наблюдалось anomальное увеличение коэффициента усиления с ростом потока пропущенных протонов (см. рис. 3), причины которого могут заклю-

чаться в переходе n-Ge в p-Ge. Поток отказа не был достигнут при $1,86 \cdot 10^{13}$ p/cm² (большим потоком эти транзисторы не облучались).

$$K/f_\alpha = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ п/см}^2.$$

П418 (3)

Ток J_{k_0} возрастал, а коэффициент α падал, при облучении до потока $3,1 \cdot 10^{15}$ p/cm², но поток отказа достигнут не был. У образцов наблюдалось anomальное возрастание коэффициента α на начальных этапах облучения (рис. 3), которое можно объяснить переходом n-Ge в p-Ge. По-видимому измерения дали завышенную величину радиационной стойкости. Постоянная

$$K/f_\alpha = 5,6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{p.сек.}$$

Кремниевый диффузионный высокочастотный транзистор

П503 (1)

Поток отказа по α составляет $1,4 \cdot 10^{12}$ p/cm² (см. рис. 3), при этом не было замечено изменения J_{k_0} .

$$k/f_\alpha = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{p.сек.}$$

Итоги измерений сведены в таблицы 1, 2 и 3.

З а к л ю ч е н и е

Несмотря на небольшое количество исследованных образцов каждого типа приборов и недостаточную точность измерений параметров из результатов облучения могут быть сделаны количественные выводы и даны определенные рекомендации по использованию этих приборов в аппаратуре, работающей в условиях облучения протонами высоких энергий. Германиевые плоскостные и точечные диоды не выходят из строя по обратному току до потоков $0,3 - 3 \cdot 10^{15}$ p/cm². Прямое сопротивление, как правило, не измерялось, но оно может служить причиной отказа (Д11). Кремниевый диод Д103А выходит из строя вследствие увеличения прямого сопротивления при потоках менее $3 \cdot 10^{14}$ p/cm². Потоки отказа туннельных и обращенных диодов выше $3 \cdot 10^{15}$ p/cm² (α - германий, арсенид галлия) - $3,7 \cdot 10^{14}$ p/cm² (ρ - германий). Германиевые плоскостные и диффузионные маломощные транзисторы типа пар выходят из строя в области потоков $5 \cdot 10^{12} - 2,4 \cdot 10^{14}$ p/cm² вследствие увеличения J_{k_0} и уменьшения α .

Стойкость высокочастотных транзисторов оказывается выше, как правило, чем низкочастотных. Кремниевые транзисторы выходят из строя вследствие падения α при потоках менее $1,2 \cdot 10^{12}$ р/см², то есть их стойкость ниже, чем у германиевых транзисторов. Радиационная стойкость схем может быть обеспечена за счет применения более высокочастотных полупроводниковых приборов, применения пониженных напряжений питания для уменьшения влияния роста J_{K_0} и введения отрицательной обратной связи для компенсации падения α . Падение коэффициента усиления α можно предсказывать при известных потоках, пользуясь полученными постоянными K/f_α и K .

В заключение автор пользуется возможностью поблагодарить Э.Г. Литвинову, А.Г. Морозова и Б.П. Осипенко за помощь в измерениях.

Л и т е р а т у р а

- 1 Wertheim Gunter. Radiation Effects in Semiconductors, Nucleonics, 20, no. 7, 47 (1962).
- 2 James W. Easley. Radiation Effects in Semiconductor Devices. Nucleonics, 20, no. 7 (1962).
- 3 W.A. Bohan, A.J. Wager. The Effects of Steady-State and Pulse Radiation on GaAs Tunnel Diodes. IRE Trans., NS-9, no. 1, 346 (1962).
4. Radiation Effects on Transistors for Space. Nucleonics, 21, no. 7, 56 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел
4 октября 1965 г.

Т а б л и ц а 1

Д и о д ы

Материал	Тип	Количество	Поток отказа (в р/см ²)	Парам. отказа	Примечание
Герм. плоск.	Д7	1	более 10^{15}	J обр	Прямое сопротивление не измерено
Герм. точеч.	Д8	1	более 10^{15}	J обр	Прямое сопротивление не измерено
"-	Д10	1	менее $0,3-1 \cdot 10^{15}$	"-	"-
"-	Д11	1	10^{15}	R пр	
"-	Д18	1	$3 \cdot 10^{14}$	J обр	
Кремн. точеч.	Д103А	1	менее $3 \cdot 10^{14}$	R пр	J обр не изменилось

Т а б л и ц а 2

Туннельные диоды

n -герм.	1И302	1	более $3 \cdot 10^{15}$	
арсен. галл.		1	более $3,7 \cdot 10^{14}$	
p -герм.		2	более $3,7 \cdot 10^{14}$	
p -герм.	обращ. диод	2	"-	

Таблица 3

Транзисторы

Материал	Тип	Количество	Поток отказа (в р/см ²)	Парам. отказа	Примечание
Спл.герм.	П9А	2	$5 \cdot 10^{12}$	α	
"	П13	1	$2,4 \cdot 10^{14}$	J_{K_0}	
"	П14	2	$2,5 \cdot 10^{13}$		по α поток отказа $2,4 \cdot 10^{14}$
"	П15	1	$6 \cdot 10^{13}$		по α поток отказа $1,75 \cdot 10^{14}$
Спл. кремн.	П103	1	$1,2 \cdot 10^{12}$	α	
Герм. диф.	П403А	2	$2,4 \cdot 10^{14}$	J_{K_0}	по α поток отказа $2 \cdot 10^{15}$
"	П418	3	$3 \cdot 10^{13}$	α	по J_{K_0} поток отказа $1,4 \cdot 10^{14}$
"	1Т308	5	$8 \cdot 10^{13}$		по J_{K_0} поток отказа $1,5 \cdot 10^{14}$
"	1Т303	2	более $1,88 \cdot 10^{13}$		имеются допустимые изменения обоих пара- метров J_{K_0}, α
"	П418	3	более, $3,1 \cdot 10^{15}$		имеются допустимые отклонения обоих пара- метров J_{K_0}, α
Кремн. диф.	П503	1	$1,4 \cdot 10^{12}$	α	

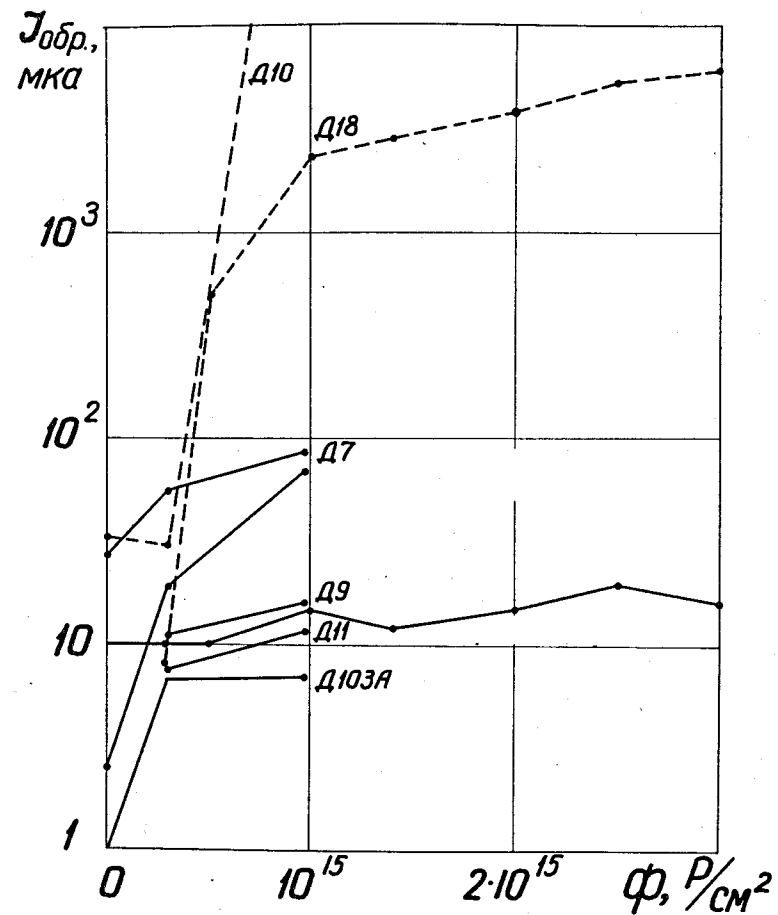


Рис. 1. Зависимость обратного тока диодов от пропущенного потока протонов. Обратное напряжение измерения для диода Д18 - 10 в, для остальных - 11,5 в.

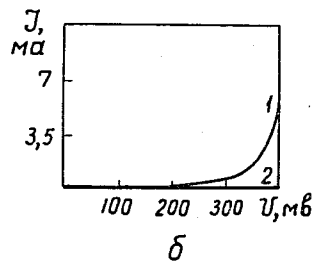
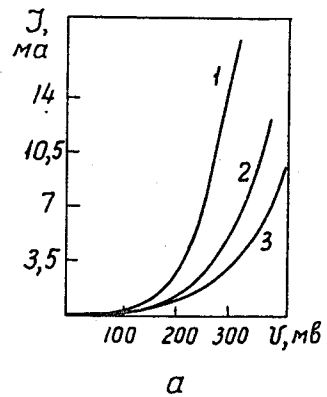


Рис. 2. Увеличение прямого сопротивления диодов:

- а) Д11 при облучении потоком протонов
 2 - $3 \cdot 10^{14}$ p/cm², 3 - 10^{15} p/cm²,
 б) Д103А при облучении потоком протонов
 2 - $3 \cdot 10^{14}$ p/cm².

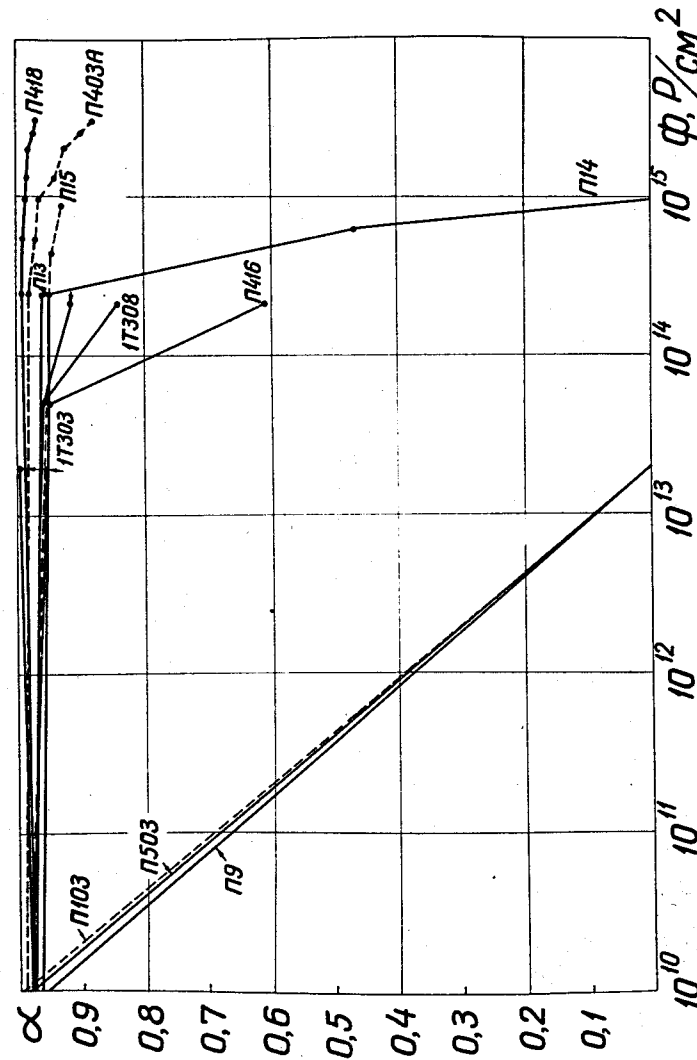


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи по току в схеме с общей базой α от пропущенного потока протонов.

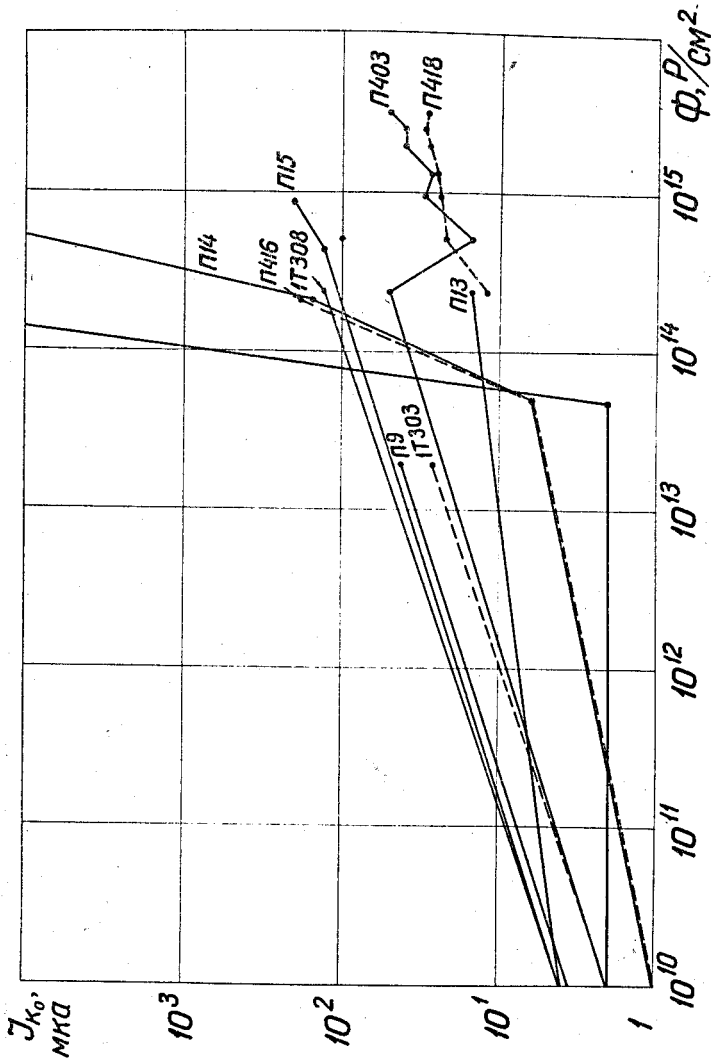


Рис. 4. Зависимость обратного тока транзисторов J_{k0} от пропущенного тока прогона.