

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015133038/28, 07.08.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.08.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.08.2015

(45) Опубликовано: 20.11.2016 Бюл. № 32

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2251759 C1, 10.05.2005. RU 2538032 C2, 10.01.2015. RU 2472171 C2, 10.01.2013. US 5166625 A1, 24.11.1992. US 6476597 B1, 05.11.2002. RU 2309417 C2, 27.10.2007.

Адрес для переписки:

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС,(для Гудкова А.Г., кафедра РЛ-6)

(72) Автор(ы):

Усыченко Виктор Георгиевич (RU),  
Выгинов Владимир Николаевич (RU),  
Гудков Александр Григорьевич (RU),  
Добров Владимир Анатольевич (RU),  
Кудряшова Татьяна Юрьевна (RU),  
Мешков Сергей Анатольевич (RU),  
Мещеряков Александр Владимирович (RU),  
Маржановский Иван Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
"Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

## (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ СВЧ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

(57) Реферат:

Использование: для отбраковки полупроводниковых приборов. Сущность изобретения заключается в подаче на каждый прибор из группы однотипных приборов неизменные напряжения питания, приложении последовательности циклов ионизирующего излучения, доза которого накапливается в каждом цикле с тем, чтобы получить вызванное ею приращение интегрального низкочастотного шума прибора над шумами его исходного состояния, анализе приращений интегрального шума с ростом накопленной дозы, определении приращения интегрального шума, достигнутого

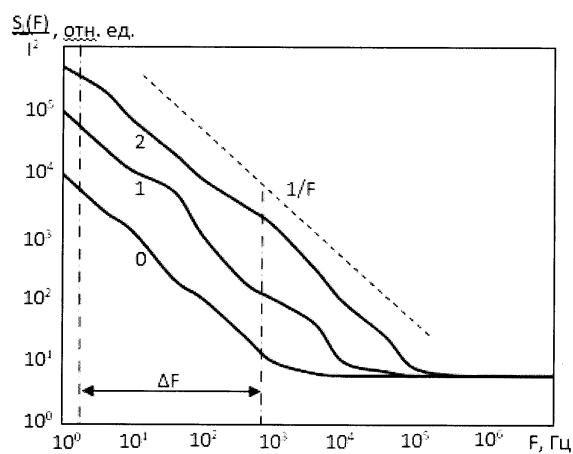
к моменту окончания М-го цикла, с которого начинают уверенно фиксироваться изменения рабочего тока прибора, выбраковке приборов тех типов, у которых среднее значение приращения интегрального шума на единицу дозы, достигнутое к моменту окончания М-го цикла, оказывается больше, чем у приборов других типов. Технический результат: обеспечение возможности повышения достоверности определения стойкости полупроводниковых приборов к проникающим ионизирующими излучениям. 2 ил.

RU 2602416 C1

RU 2602416 C1

R U 2 6 0 2 4 1 6 C 1

R U 2 6 0 2 4 1 6 C 1



Фиг.1

FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

## (12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2015133038/28, 07.08.2015

(24) Effective date for property rights:  
07.08.2015

Priority:

(22) Date of filing: 07.08.2015

(45) Date of publication: 20.11.2016 Bull. № 32

Mail address:

105005, Moskva, 2-ja Baumanskaja, 5, str. 1, MGTU  
im. N.E. Baumana, TSZIS,(dlja Gudkova A.G.,  
kafedra RL-6)

(72) Inventor(s):

Usychenko Viktor Georgievich (RU),  
Vjuginov Vladimir Nikolaevich (RU),  
Gudkov Aleksandr Grigorevich (RU),  
Dobrov Vladimir Anatolevich (RU),  
Kudrjashova Tatjana JUrevna (RU),  
Meshkov Sergej Anatolevich (RU),  
Meshcherjakov Aleksandr Vladimirovich (RU),  
Marzhanovskij Ivan Nikolaevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe budzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
professionalnogo obrazovaniya "Moskovskij  
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni  
N.E. Baumana" (MGTU im. N.E. Baumana)  
(RU)(54) METHOD FOR DETERMINING RESISTANCE OF MICROWAVE SEMICONDUCTOR DEVICES TO  
EFFECT OF IONIZING RADIATIONS

## (57) Abstract:

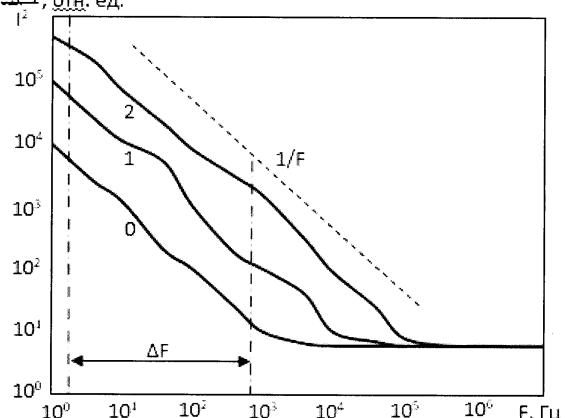
FIELD: electricity.

SUBSTANCE: invention can be used for rejecting semiconductor devices. Core of invention is feeding to each device from a group of single-type instruments with constant supply voltages, applying a sequence of cycles of ionizing radiation, the dose of which is accumulated in each cycle in order to obtain caused by it increment of integral low-frequency noise of the device over the noise of its initial state, analyzing the increments of integral noise with growth of the cumulative dose, determining the increment of integral noise achieved by the moment of completion of the M-th cycle, from which there is the start of a firm registration of change of operating current of the device, rejecting instruments of those types, in which the average value of integral noise increment per a dose unit achieved by the moment of completion of the M-th cycle is higher than that of other types instruments.

EFFECT: provided is higher reliability of determining resistance of semiconductor devices to infiltrating ionizing radiations.

1 cl, 2 dwg

S(F), отн. ед.



Фиг.1

RU 2 602 416 C1

RU 2 602 416 C1

Изобретение относится к полупроводниковой технике, а именно к способам отбраковки тех типов полупроводниковых приборов (ПП), которые недостаточно стойки к воздействию ионизирующих излучений (ИИ). Это особенно важно применительно к типам сверхвысокочастотных ПП (смесительные и детекторные 5 диоды, биполярные и полевые транзисторы, микросхемы сверхвысокой частоты (СВЧ), и т.п.), которые используются в высокочувствительных приемных устройствах и высокостабильных передающих устройствах космических аппаратов.

Под приборами разных типов будем понимать приборы одного класса или подкласса, которые выполнены по разным технологиям, различаются свойствами

10 полупроводникового материала, металлизацией, контактами, конструкцией, геометрией и т.п., а также наименованиями. Например, среди приборов подкласса кремниевые биполярные транзисторы СВЧ имеются типы 2T3120A, 2T3132A, 2T990-2, 2T996-2 и т.д., которые отличаются друг от друга основными характеристическими параметрами: напряжением питания, током, мощностью, верхней рабочей частотой и т.п.

15 Воздействие ИИ приводит к образованию разнообразных дефектов как в полупроводниковом материале прибора, так и в созданных на его базе структурах (переходы, барьеры, контакты и т.п.), которыми определяются характеристики ПП. Известно, что энергетический спектр низкочастотного шума содержит информацию о 20 всех видах дефектов, и единичных (точечных), и протяженных, таких как дислокации, скопления, границы зерен, кластеров (см. Жигальский Г.П., Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М., Физматлит, 2012, с.90-98, 295-297, 464-492).

25 Рост числа дефектов, возникающих при старении ПП, или создаваемых любыми видами воздействий, ведет к деградации прибора. В процессе деградации ПП интенсивность его низкочастотных шумов может меняться на порядки, в то время как значения токов или иных параметров меняются на единицы процентов (см. Закгейм А.Л. и др. Физика и техника полупроводников, 2012, т. 46, вып. 2, с. 219-224). Таким образом, низкочастотный шум является наиболее чувствительным индикатором роста дефектов и деградации прибора.

30 Технологические операции, применяемые для изготовления ПП, также создают дефекты. Чем больше дефектов, тем больше низкочастотный шум, тем меньше надежность ПП.

Известен способ отбраковки мощных светодиодов на основе InGaN/GaN посредством измерения спектральной плотности шума на частотах 1-10 Гц (см. RU №2523105, кл. H01L 33/30, 20.07.2014).

35 Шум каждого светодиода измеряется в ограниченных диапазонах температур и плотностей токов до и после проведения процесса старения светодиода, осуществляемого в течение времени не менее 50 часов. Светодиоды со сроком службы менее 50000 часов выявляют по превышению уровня спектральной плотности низкочастотного шума после процесса старения более чем на порядок по сравнению с значениями до процесса 40 старения.

Недостатком известного способа является его узкая применимость для отбраковки только ненадежных InGaN/GaN светодиодов. Для отбраковки других классов и даже типов ПП, например, красных светодиодов, способ не годится.

Известен способ сравнительной оценки надежности интегральных схем (см. RU 45 №2492494, кл. G01R 31/26, 27.01.2012) по среднеквадратичному напряжению шума на частотах менее 200 Гц, измеряемому в цепи питания микросхемы. Менее надежными считаются микросхемы, у которых шумы больше.

В известных способах низкочастотный шум используется как индикатор качества и

надежности приборов, изготовленных в процессе производства. Однако технологические дефекты существенно отличаются от дефектов, создаваемых ИИ: по структуре, по физическим свойствам, по местам локализации, по информативности спектрального состава, по способам выявления и т.д. Оба описанных способа не приспособлены для 5 оценки стойкости ПП к воздействию ионизирующих излучений, а лишь подтверждают возможность использования низкочастотного шума в качестве индикатора дефектов в ПП.

Технический результат, на достижение которого направлено изобретение, заключается в повышении достоверности определения стойкости к проникающим ИИ

10 сверхвысокочастотных ПП разных типов и подклассов посредством использования низкочастотных шумов, спектральная плотность которых чувствительна к различным дефектам, возникающим в объеме любого ПП при воздействии проникающих ИИ, начиная с доз, которые на два-три порядка меньше необходимых для изменения значений основных параметров ПП. К проникающим ИИ будем относить потоки энергичных 15 протонов, нейтронов, электронов, гамма квантов и т.д., глубина проникновения которых в материал, из которого изготовлен ПП, намного превышает размеры ПП.

Указанный технический результат достигается тем, что Способ определения стойкости полупроводниковых приборов СВЧ к воздействию ионизирующих излучений реализуется при подаче на каждый прибор из группы однотипных приборов неизменных напряжений 20 питания, приложении последовательности циклов ионизирующего излучения, доза которого накапливается в каждом цикле с тем, чтобы получить вызванное ею приращение интегрального низкочастотного шума прибора над шумами его исходного состояния; анализе приращений интегрального шума с ростом накопленной дозы, определении приращения интегрального шума, достигнутого к моменту окончания M- 25 го цикла, с которого начинают уверенно фиксироваться изменения рабочего тока прибора, выбраковке приборов тех типов, у которых среднее значение приращения интегрального шума на единицу дозы, достигнутое к моменту окончания M -го цикла, оказывается больше, чем у приборов других типов.

Изобретение будет понятно из последующего описания и приложенных к нему 30 чертежей.

На фиг. 1 показан вид энергетических спектров низкочастотного шума ПП, нормированных на квадрат тока.

На фиг. 2 приведены статические характеристики биполярного транзистора

35 Обозначим через  $S_1(F)$ ,  $[A^2/\text{Гц}]$  энергетический спектр низкочастотных шумов тока ПП, измеренный при токе I на частоте анализа F. Введем энергетический спектр этих же шумов, нормированных на квадрат тока:  $\frac{S_1(F)}{I^2}$ ,  $[1/\text{Гц}]$ . Характерная для сверхвысокочастотных ПП форма энергетических спектров шума изображена на фиг. 40 1 в двойном логарифмическом масштабе. Кривые призваны отобразить лишь форму спектров, поэтому ось ординат отражает порядок изменений безотносительно к какому-либо типу ПП и реальному уровню его шума. На высоких частотах спектр шума равномерный. Информативным является тот участок спектра, на котором с уменьшением частоты анализа F интенсивность шумов, часто называемых фликкерными 45 шумами, возрастает в среднем пропорционально  $1/F$ . Иногда измеренные зависимости могут иметь плавные отклонения от закона  $1/F$ , вызванные вкладом генерационно-рекомбинационных шумов, возникающих при взаимодействии носителей заряда с многочисленными ловушками, залегающими в запрещенной зоне полупроводника на одном уровне. Все составляющие фликкерного шума, принадлежащие любой частоте,

имеют примерно одинаковую информационную ценность.

Кривая 0 на фиг. 1 характеризует шумы ПП в исходном состоянии, т.е. до облучения, кривая 1 - шумы после первого цикла воздействия, кривая 2 - шумы после второго цикла воздействия.

5 По формуле

$$J_0 = \frac{1}{I^2} \int_{\Delta F} F \cdot S_{I0}(F) dF$$

вычисляется безразмерный интегральный низкочастотный шум исходного состояния.

10 Множитель F в подынтегральном выражении, уравнивает информационный вклад всех составляющих фликкерного шума, попадающих в полосу интегрирования  $\Delta F$ .

15 Из формулы следует, что безразмерный интегральный шум не зависит от токов и напряжений, а его значение определяется числом разнообразных дефектов и интенсивностью их воздействия на ток прибора. Если интегральный шум умножить на полное число носителей заряда, участвующих в переносе тока I, то получим интегральную форму известного коэффициента Хоуге, который широко используется для оценки степени дефектности полупроводниковых материалов и приборов, см., например, Н.М. Шмидт и др. ФТП, 2004. Т. 38, вып. 9, с. 1036-1038.

20 На фиг. 1 полоса  $\Delta F$  интегрирования ограничена вертикальными штрихпунктирными линиями. Равномерный участок шумового спектра не содержит информацию о дефектах в ПП, поэтому включать его в полосу  $\Delta F$  не следует. В области низких частот границу  $\Delta F$  желательно приближать сколь угодно близко к нулевой частоте; на практике же она упирается в возможности используемого анализатора спектра.

25 Для измерения спектральной плотности  $S_1(F)$  низкочастотного шума используется цифровой анализатор спектра, в состав которого входят малошумящий усилитель с фильтром, формирующим необходимую полосу пропускания  $\Delta F$ , и аналого-цифровой модуль Е20-10, соединенный через USB с персональным компьютером, снабженным 30 программным обеспечением «PowerGraph». Значение спектральной плотности шумов определяется с помощью быстрого преобразования Фурье. Вычисление интегрального шума и вся дальнейшая обработка результатов измерений осуществляются по специальной программе, написанной на базе системы MatLab.

35 Кривые 1 и 2 на фиг. 1 - это спектры шумов, измеренные после последовательных циклов воздействия ионизирующими излучениями, глубина проникновения которых в материал, из которого изготовлен ПП, намного превышает размеры ПП. Циклов воздействия может быть значительно больше двух. После каждого цикла шумы измеряются при тех же значениях приложенных к ПП напряжений, при которых измерялся шум исходного состояния. После каждого измерения находится интеграл

$$J_m = \frac{1}{I^2 \Delta F} \int_{\Delta F} F \cdot S_{Im}(F) dF$$

40 где  $m=0, 1, 2, \dots, M$  - номер цикла, включая исходное (нулевое) состояние и завершающий цикл  $M$ .

45 Измерения начинаются с подачи доз ИИ, которые на два-три порядка меньше необходимых для появления признаков деградации основных параметров ПП. Первым информативным циклом является цикл  $m=1$ , по окончании которого значение интеграла  $J_1$  уверенно превысит значение  $J_0$  интегрального шума исходного состояния, например, вдвое. С каждым последующим циклом доза ИИ увеличивается в определенное число раз. По окончании испытаний строится зависимость  $J_m(D_m)$  значений  $J_m$  интегрального шума от накопленной дозы  $D_m$ . По этой зависимости находится средняя скорость роста

интегрального шума

$$V_{M,0} = \frac{J_M - J_0}{D_M},$$

порождаемого дефектами, возникающими только под воздействием ИИ.

5 Действительно, шумы исходного состояния приведенная формула исключает. Менее стойкими к воздействию ИИ считаются ПП, у которых значение  $V_{M,0}$  скорости роста интегрального шума больше. Соответственно, менее стойкими к воздействию ИИ считаются те типы ПП, у которых значение  $\langle V_{M,0} \rangle$  скорости роста интегрального шума, 10 усредненное по числу обследованных приборов, больше, чем у приборов других типов.

Для каждого ПП конечным является цикл  $M$ , по окончании которого уверенно фиксируются изменения характеристических параметров ПП, в первую очередь - тока прибора. Вплоть до  $M$ -го цикла низкочастотный шум является основным индикатором роста дефектов, порождаемых ИИ. После  $M$ -го цикла шумовые измерения могут продолжаться с целью отыскания корреляций с поведением других параметров.

15 Дополнительную информацию о динамике деградации ПП можно получить, анализируя скорость роста шума при переходе от произвольного цикла  $m-1$  к следующему циклу  $m$ , которую определяют по формуле

$$20 V_{m,m-1} = \frac{J_m - J_{m-1}}{D_m - D_{m-1}},$$

где  $D_{m-1}$  и  $D_m$  - дозы излучения, полученные прибором в  $(m-1)$ -м и  $m$ -м циклах соответственно. Можно также получить информацию о начальной скорости деградации ПП

$$25 V_{m,0} = \frac{J_m - J_0}{D_m},$$

зная дозу  $D_m$ , после получения которой интегральный шум  $J_m - J_0$  возрос над шумами исходного состояния, например, на 10 дБ. При этом чем меньше значение  $D_m$ , тем выше скорость деградации на начальном этапе.

30 После каждого цикла на ПП подаются одни и те же напряжения питания, желательно такие, при которых в токе ПП проявляется наибольшее количество источников шума. Например, в прямом токе диода могут проявлять себя два источника шума, одним из которых является барьер (переход), другим - сопротивление базы и контактов. Ток диода описывается формулой

$$35 I \cong I_0 \exp \frac{qU_b}{nkT},$$

где  $q$  - абсолютное значение заряда электрона,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура диода,  $n$  - коэффициент идеальности барьера, от которого зависит интенсивность низкочастотного шума барьера;  $U_b = U_d - IR$  - напряжение на барьере, где 40  $U_d$  - напряжение на диоде,  $R$  - сопротивление базы диода. При малых токах на экспоненциальном участке ВАХ проявляются шумы барьера. Шумы сопротивления базы начнут проявляться при повышенных значениях тока, т.е. на участке ВАХ, на котором экспоненциальный рост тока меняется на линейный.

45 При испытании транзисторов наиболее информативным является режим вблизи тока насыщения. На фиг. 2 на примере ВАХ биполярного транзистора эта область помечена вертикальной штриховой линией. Значения тока базы  $I_B$  и напряжения  $U_{KЭ}$  между коллектором и эмиттером выбираются такими, чтобы попасть в зону изгиба тока  $I_K$

коллектора. В этом режиме в шумы тока коллектора соизмеримый вклад дают источники шума, локализующиеся как в области перехода эмиттер-база, так и в области коллекторного перехода. Подобные области имеются и у транзисторов других подклассов - полевых, с высокой подвижностью электронов и т.д.

5 При неизменных напряжениях питания и накоплении достаточной дозы ИИ после М-го цикла начнет меняться ток ПП. Начиная с этой дозы, о скорости деградации ПП можно судить по изменению не только шумов, но и различных характеристических параметров прибора, таких как, токи, проводимости, ВАХ, подвижность носителей и т.п. Преимущество заявляемого способа в том, что он информативен, начиная с 10 предельно малых доз, когда иные методы обнаружения дефектов нечувствительны.

Минимальная доза, после которой в эксперименте будет замечено первое уверенное возрастание интегрального шума (например, на 2 дБ), в каждом последующем цикле удваивается. Так продолжается до тех пор, пока не начнется деградация 15 характеристических параметров ПП. В последующих циклах следят как за изменением интенсивности шума, так и за деградацией параметров прибора. В результате создается полная картина деградации ПП под воздействием ИИ, начиная с самых малых доз и заканчивая параметрическим или катастрофическим отказом.

#### Формула изобретения

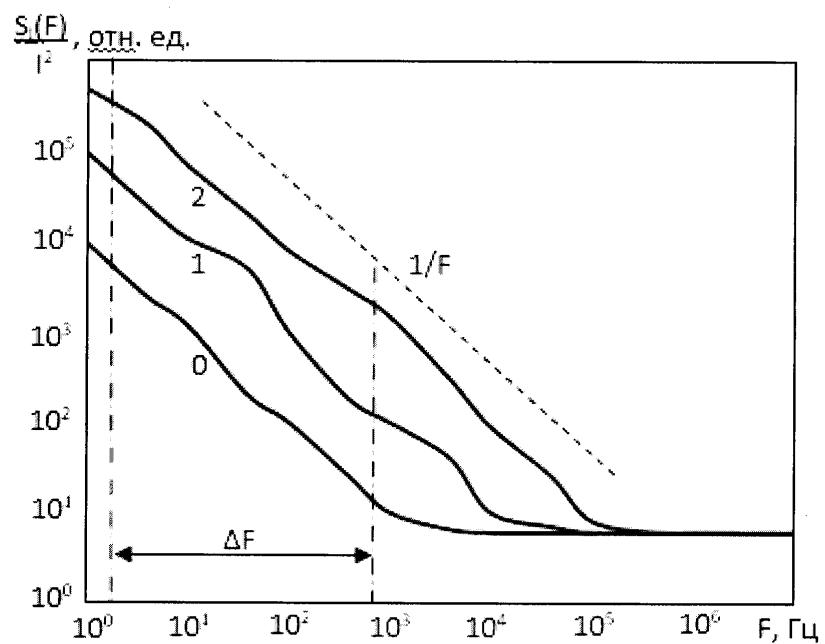
20 Способ определения стойкости полупроводниковых приборов СВЧ к воздействию ионизирующих излучений, заключающийся в подаче на каждый прибор из группы однотипных приборов неизменных напряжений питания, приложении последовательности циклов ионизирующего излучения, доза которого накапливается в каждом цикле с тем, чтобы получить вызванное ею приращение интегрального 25 низкочастотного шума прибора над шумами его исходного состояния, анализе приращений интегрального шума с ростом накопленной дозы, определении приращения интегрального шума, достигнутого к моменту окончания М-го цикла, с которого начинают уверенно фиксироваться изменения рабочего тока прибора, выработке приборов тех типов, у которых среднее значение приращения интегрального шума на 30 единицу дозы, достигнутое к моменту окончания М-го цикла, оказывается больше, чем у приборов других типов.

35

40

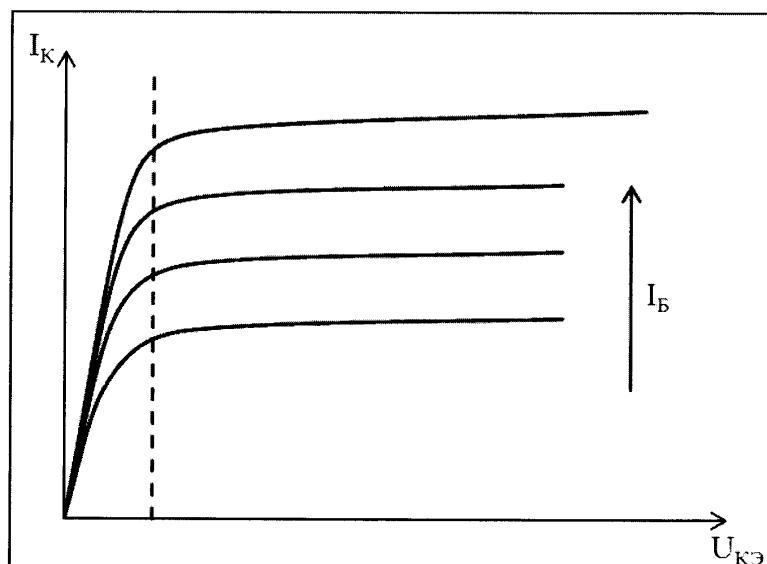
45

Энергетические спектры низкочастотного шума ПП, нормированные на квадрат тока



Фиг.1

Статические характеристики биполярного транзистора



Фиг. 2