ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

ВЫПУСК 5(156)

1982

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Серия 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Выпуск 5(156)

Научно-технический сборник 1982 Издается с 1958г.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Сокол В.А., Широков Ю.Ф. Анализ процесса нагрева тонкопленочных резисторов в полупроводниковых устройствах 3

Барышев Р.С. Эффективность эмиттера биполярных транзисторов 8

Вдовенков В.А., Зубков А.М., Короткова Н.В. Исследование контактов фосфида индия n-типа с металлами 12

Бахтиозин В.У., Высоцкий С.А., Козейкин Б.В., Фролов И.А. Расчет параметров ионнолегированных транзисторных структур n-GaAs 20

ФИЗИКА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ

Атабиев И.Ж., Горюнов Н.Н., Ладыгин Е.А., Макаров В.А., Ногин В.М. Энергетический спектр уровней радиационных центров в кремниевых p^+-n-структурах после обработки быстрыми электронами различных энергий 25

Рожков В.А. Фотоэлектрические свойства кремниевых МДП-структур при нестационарном истощении поверхности полупроводника 28

КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ

Василегин Б.В., Кармазинский А.И., Евстигнеева Г.В. Влияние организации и конструкции, БИС ОЗУ на ее быстродействие 34

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ

Старшинов И.П., Ерусалимчик И.Г. Использование метода светящихся точек для оценки загрязненности поверхности кремниевых пластин ионами .. 41

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ЭЛЕКТРОНИКА»

МОСКВА

СОДЕРЖАНИЕ

(окончание)

Малышев В.А., Кобазева З.Н., Лапидус И.И. Влияние механической обработки обратной стороны эпитаксиальных p^+-n- структур на дефектообразование и качество транзисторов 47

Рюхтин В.В., Товсюк К.Д. Кремниевый фотодиод для регистрации предельно низких освещенностей 50

Веригин А.А., Коваль Б.А., Крючков Ю.Ю., Лебедева Н.И., Мамонтова А.П., Проскуровский Д.И., Чернов И.П. Импульсный электронный отжиг кремния, имплантированного фосфором 56

Матвеев Ю.А., Мкртчан М.Л., Тригубович Т.Н., Щербина С.М. Ионнохимическое травление: количественный состав и кристаллическая структура поверхностных слоев полупроводников 59

НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ

Абдурахманов К.П., Квурт А.Я., Миндлин Н.Л., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф. Исследование переходных тепловых характеристик транзисторных структур с дефектами 66

МАШИННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Горин Б.М., Кив А.Е., Лихман А.В., Плотникова Л.Г., Соловьев В.Н., Шейхман М.К. Методы адекватного моделирования микромеханизмов естественного старения полупроводниковых приборов 71

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Китаев Г.А., Маркова В.М., Хазин М.Л., Улитин Е.И. Защитные покрытия халькогенидных маскирующих слоев фотошаблонов 75

Колмакова Т.П., Лымарь Г.Ф. Экспрессный способ измерения профиля концентрации основных носителей в эпитаксиальных слоях InP 77

Смульский А.С., Егудин А.Б., Гречаник А.И., Иноземцев С.А., Мордкович В.Н., Полянов А.Б. Об использовании импульсного отжига в производстве полупроводниковых приборов 78

Гарбер Г.З. Экономичный метод анализа работы полевого транзистора в статическом режиме 79

© Центральный научно-исследовательский институт "Электроника", 1982

УДК 621.382.3.019.3

Б.М.Горин, А.Е.Кив,
А.В.Лихман,
Л.Г.Плотникова,
В.Н.Соловьев,
М.К.Шейнкман

МЕТОДЫ АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЗМОВ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Развита концепция естественного старения полупроводниковых транзисторов, основанная на учете электрон-решеточных взаимодействий, вызванных электронными возбуждениями в нормально функционирующем приборе. Анализирован спектр возможных электронных возбуждений и рассмотрены механизмы, приводящие к старению двух типов: макроскопическое размытие примесных профилей и микроскопическая перестройка дефектно-примесных комплексов. Указаны возможности выявления истинных механизмов старения. Предложены методы машинного и экспериментального моделирования естественного старения.

Естественное старение (ЕС) полупроводниковых приборов происходит в процессе их нормальной эксплуатации и в условиях хранения при оптимальных параметрах среды. Вынужденная деградация приборов, обусловленная экстремальными воздействиями (радиационными, механическими, тепловыми), выходит за рамки ЕС. Поэтому, рассматривая причины ЕС, необходимо провести анализ физических процессов в связи со структурой и функциями конкретного типа приборов.

В настоящей статье соответствующий анализ проводится на примере планарных кремниевых транзисторов.

Низкотемпературные активационные процессы в полупроводниках. Известен широкий класс активационных процессов в кристаллической решетке полупроводников, которые протекают вследствие возбуждения электронной подсистемы (ЭП) кристаллов и последующих электрон-решеточных взаимодействий [1]. Существуют многочисленные способы возбуждения ЭП полупроводников, приводящие к атомным перемещениям. В этом случае реализуются процессы, протекающие по схеме "электронное возбуждение → смещение атома" (ЭВ → СА). Задача адекватного моделирования микромеханизмов ЕС сводится к правильному определению спектра ЭВ, возникающего в нормально функционирующем и содержащемся в нормальных условиях приборе. Спектр ЭВ, возникающий в экстремальных условиях (мощные радиационные воздействия, перегрузки при эксплуатации), приводит к перестройке атомов, не характерной для процессов ЕС. Поэтому традиционные методы ускоренных испытаний не могут дать правильную информацию о ресурсе прибора, обусловленном процессами ЕС.

2. Спектр электронного возбуждения в *p-n-p*-транзисторе. Несмотря на то, что дырочная составляющая тока эмиттера много больше электронной составляющей, диффузия электронов из базы в эмиттер дает достаточную для ЕС скорость рекомбинационно-стимулированных процессов (РСП) [2]. Одновременно РСП протекают в базе прибора. Как извест-

но, центры рекомбинации, представляющие собой дефектно-примесные комплексы (ДПК), за счет энергии рекомбинации претерпевают существенные изменения [3]. Представляется возможным усилить РСП действием ионизирующей радиации, генерирующей дополнительную концентрацию электронов в базе.

Таким воздействием РСП вызываются и в транзисторе, не подключенном к внешней цепи. Указанные активационные процессы идут за счет ЭВ с энергией порядка энергии перехода "зона-зона" ($\varepsilon_п$).

В работающем транзисторе при обратном смещении коллекторного перехода в нем возникают электрические поля, достаточные для ускорения ионизованных примесей при рабочих температурах [4]. Флуктуирующие электрические поля, вызывающие миграцию примесей, появляются в результате перезарядки ДПК излучением с энергией $\varepsilon<\varepsilon_п$. Такое излучение способно инициировать процессы ЕС, близкие к тем, которые имеют место в коллекторе работающего прибора.

Такой же энергии излучение переводит электроны ДПК из основного состояния на антисвязывающие орбиты, вызывая перестройку атомов по механизму деформации потенциального барьера [5].

На основании проведенного анализа приходим к выводу, что адекватное моделирование микромеханизмов ЕС требует применения внешних воздействий, которые приводили бы к результатам, обусловленным структурными изменениями в приборе при ЕС. Из общих соображений ясно, что ЕС вызывается структурными изменениями прибора двух типов: деформацией диффузионных профилей и изменением спектра ДПК.

Применение низкоэнергетических ионизирующих излучений - наиболее удобный способ селективного попадания в область электронного возбуждения, вызывающего определенные процессы ЕС. Менее удобен способ ограниченных тепловых воздействий, который, однако, тоже дает при соблюдении строгих условий [6] структурные изменения в приборе указанных типов.

Применение ионизирующих излучений для ускорения ЕС требует знания "действующих спектров", нахождению которых уделяется в последнее время большое внимание [7].

В отношении светоизлучающих диодов подход к задаче ускорения ЕС обсуждался с позиций [8]. Однако предложенная концепция принципиально отличается тем, что имитируется внутренняя генерация ЭВ, идущая по специфическим механизмам, связанным с физическими процессами в приборе при нормальных условиях эксплуатации и хранения.

<u>О характерной кинетике естественного старения</u>. Для однозначного определения истинных механизмов ЕС, учитывая их возможное многообразие, важно иметь данные о характерной кинетике ЕС, обусловленной конкретными процессами структурных изменений в приборе. В качестве примера рассмотрим размытие диффузионных профилей.

В хорошем приближении распределения акцепторов $N_а$ и доноров $N_д$ аппроксимируется экспонентами [9]:

$$N_а(x) = N_а(x_1)\exp\left[-(x-x_1)/L_а\right], \quad (1)$$

$$N_д(x) = N_д(x_{эо})\exp\left[-(x-x_{эо})/L_д\right], \quad (2)$$

где $L_а$, $L_д$ - длины диффузии акцепторов и доноров;
x_1 - точка начала экспоненциального спада;
индексы "э" и "к" соответственно относятся к эмиттеру и коллектору.

Границы базы $x_{эо}$ и $x_{ко}$ находятся из условий:

$$\left| N_а(x) - N_д(x) \right|_{x = x_{эо}} = 0 ; \quad (3)$$

$$\left| N_д(x) - N_{ак} \right|_{x = x_{ко}} = 0. \quad (4)$$

Тогда из [9] коэффициенты переноса β и инжекции эмиттера γ имеют вид:

$$\beta = 1 - bt ; \quad (5)$$

$$\gamma = 1 - at , \quad (6)$$

где a и b выражаются через концентрации доноров и акцепторов в точке x_1, длины диффузии электронов и дырок в базе, коэффициенты диффузии акцепторов и доноров, концентрацию доноров в коллекторе.

Оценки показывают, что для прибора с хорошими параметрами $k = \frac{L_a L_д}{\tau} \simeq 10^{-4}$ [9]) имеем $b \ll 1$ и временная зависимость коэффициента передачи тока ($h_{21Э} = \frac{\beta\gamma}{1-\beta\gamma}$), определенная в основном изменением коэффициента β, является линейной. По мере расплывания примесных профилей за счет РСП (когда L_a и $L_д$ при неизменном времени жизни растут) одновременно с ухудшением параметров прибора наблюдается все более отчетливый переход к сверхлинейной кинетике старения. И такое поведение прибора свидетельствует о возможном доминировании рекомбинационно-стимулированных процессов размытия диффузионных профилей при естественном старении.

Алгоритм машинного и экспериментального моделирования ЕС. Для перебора различных доминирующих факторов в процессах ЕС разработан алгоритм, структурная схема которого показана на рис.1. Процессы 1 рассматриваются с учетом возможной их активации при помощи ЭВ, локальных электрических полей, тепловых воздействий. Примеры кинетических уравнений см. в [1]. Процессы II описываются как краевые задачи с коэффициентами диффузии, характерными для механизмов ЭВ → СА или близкого характера.

Учет влияния поверхности (III) проводится по двум каналам: перезарядка и генерация дефектов, идущих в объем прибора [10]. В алгоритме учтено взаимное влияние процессов I и II, а также возможность влияния поверхности на ЕС по второму каналу (через процессы I и II).

На рис.2 приведены кинетические кривые экспериментальной стимуляции ЕС при γ-облучении, полученные при машинном моделировании ЕС, а также ЕС, имевшего место при практическом использовании приборов. Сверхлинейная кинетика при машинном моделировании получена за счет перераспределения уровней при перестройке ДПК. Действие радиации в данном случае также привело к кинетике, близкой к наблюдавшейся в [11]. При сравнении расчетных и экспериментальных данных с [11] производилась "растяжка" кривых во времени с сохранением относительного изменения скорости процесса.

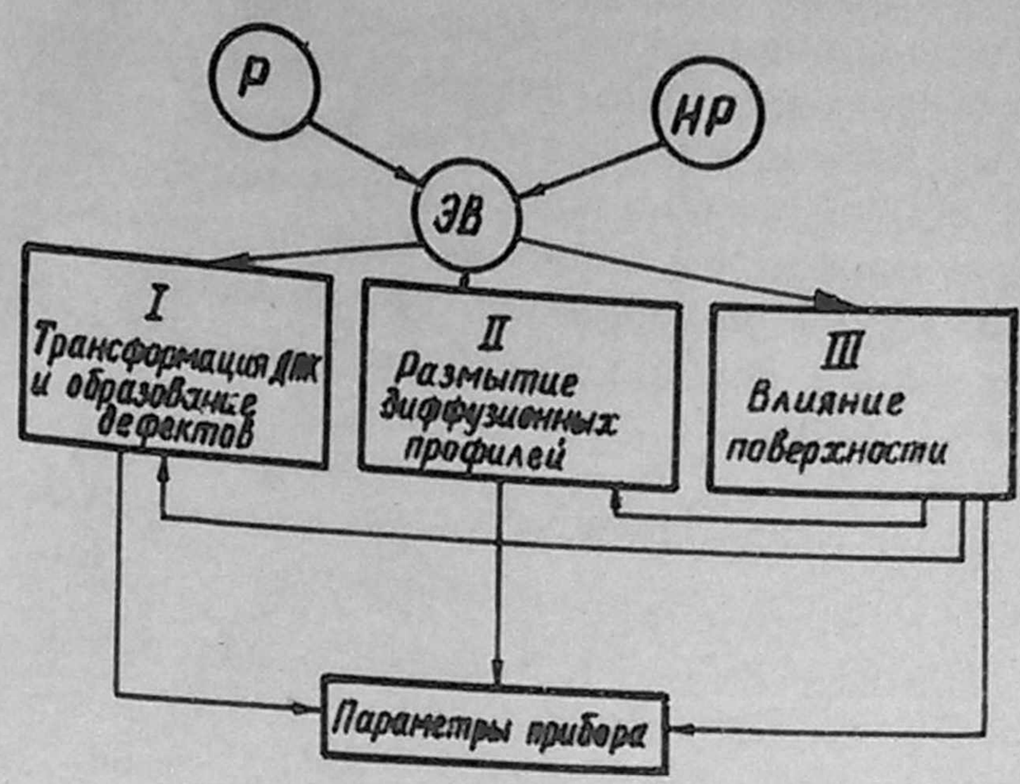


Рис.1. Алгоритм естественного старения. Отмечена возможность радиационной (Р) и нерадиационной (НР) генерации дефектов

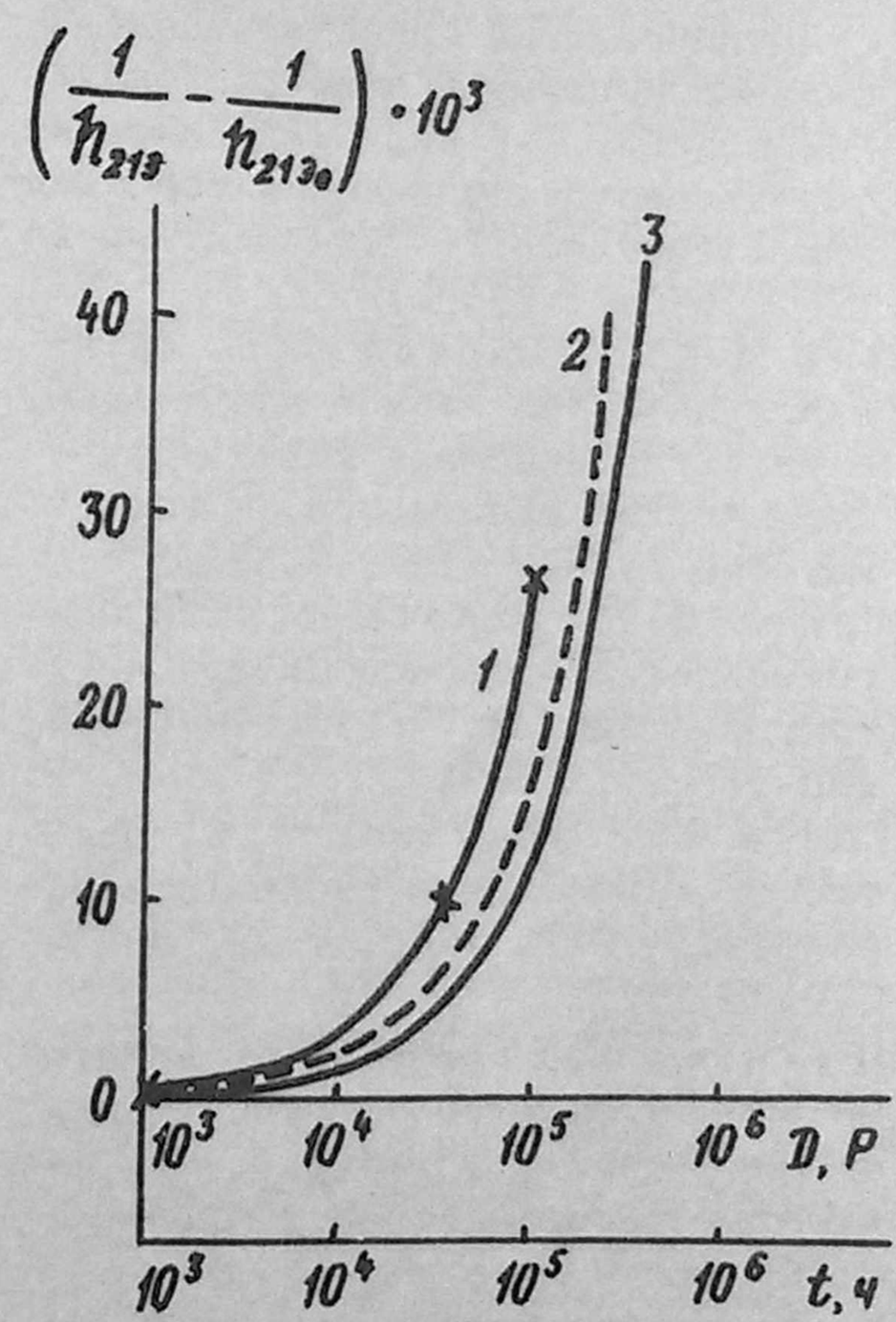


Рис.2. Деградация коэффициента усиления кремниевых транзисторов при γ-излучении (кривая *1*), естественном старении (кривая *3*); кривая *2* – результат машинного моделирования

ВЫВОДЫ

В реальных условиях эксплуатации полупроводниковых приборов могут протекать различные активационные процессы, приводящие к атомным перемещениям и соответственно деградации параметров приборов. Предложен алгоритм машинного моделирования процессов деградации приборов в нормальных условиях работы.

ЛИТЕРАТУРА

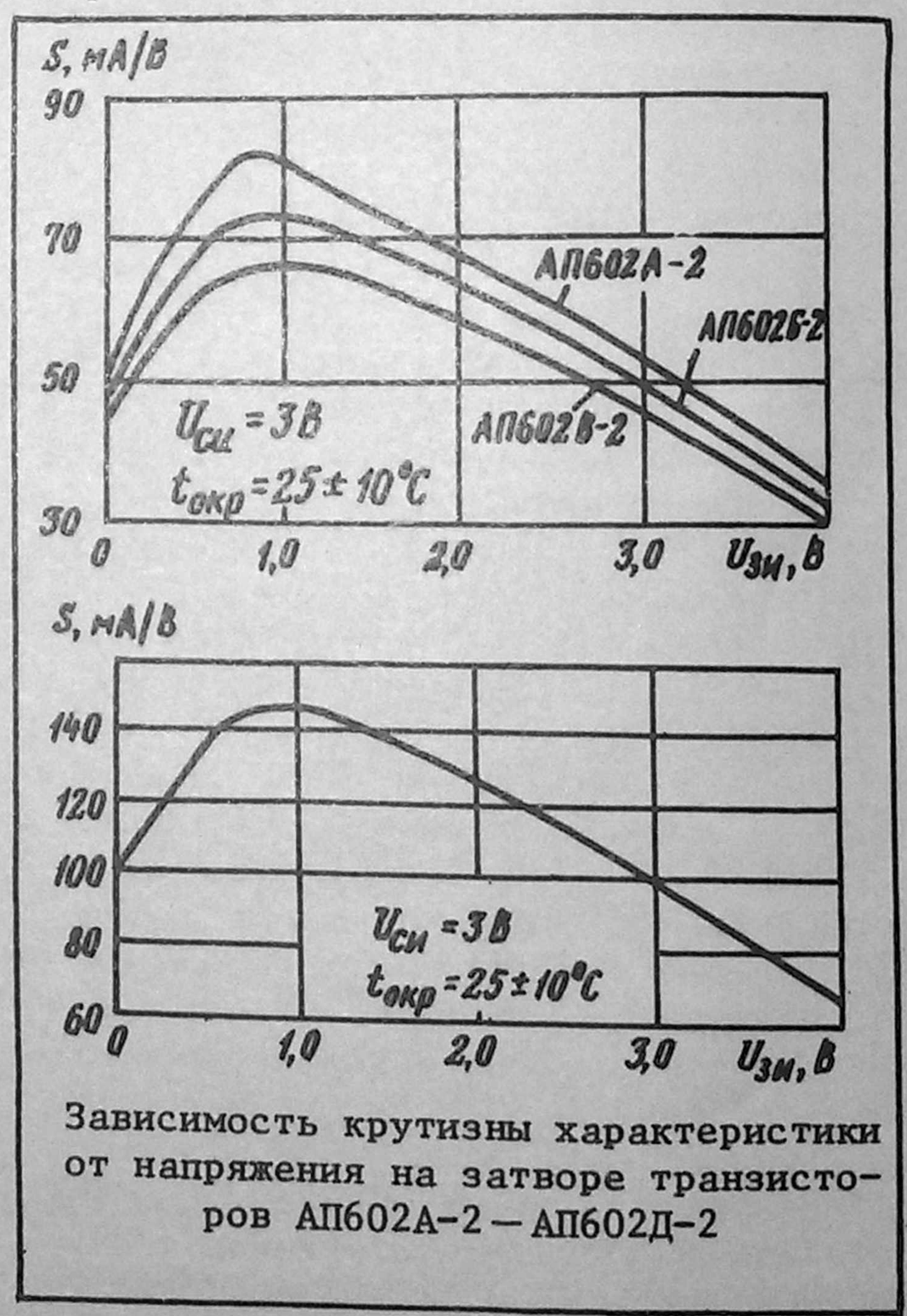
1. Вавилов В.С., Кив А.Е.,Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. - М.: Наука, 1981. -368с.
2. Kimerling L.C. Recombinator enhanced defect reactions. - Sol. St. Electron, 1978, v.21,p.1391-1401.
3. Шейнкман М.К., Корсунская Н.Е., Маркевич И.В., Торчинская Т.В. Фото(рекомбинационно)-стимулированное преобразование локальных центров в монокристаллах CdS и ZnSe. - В кн.: Радиационная физика полупроводников и родственных материалов. - Тбилиси:Изд-во ТГУ, 1980, с.676-679.
4. Кив А.Е., Умарова Ф.Т. Активация диффузии атомов излучением.- В кн.: Радиационная физика неметаллических кристаллов. - Киев: Наукова думка, 1967, с.32-37.
5. Кив А.Е., Умарова Ф.Т. К микроскопической теории диффузии в полупроводниках. - ФТП, 1970,т.4, вып.3, с.571-573.
6. Кив А.Е., Соловьев В.Н. Примесные комплексы - генераторы дефектов. - ФТТ, 1980, т.22, вып.9, с.2575-2577.
7. Энтинзон И.Р.Вычисление действительных спектров γ-лучей для промышленной γ-установки. - М.: Атомная энергия, 1980,т.48,вып.4, с.261-263.
8. К теории стимулированного движения дислокаций в лазерных полупроводниковых кристаллах в условиях интенсивной накачки.- М., 1980. - 30 с. Препринт (ФИАН СССР: № 120). Авт.: П.Г.Елисеев, И.Н.Завестовская, И.А.Полуэктов, Ю.М.Попов.
9. Кремниевые планарные транзисторы./ Под ред. Я.А.Федотова. - М.: Сов. радио, 1973.- 336 с.
10. Жукова Г.А., Мордкович В.Н. Особенности образования радиационных дефектов у поверхности кремния, покрытой пленкой диэлектрика. - В кн.: Радиационная физика полупроводников и родственных материалов.- Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1980,с.829 - 832.
11. Frank R., McTigue L., Provence R. Storage reliability of chip and bond wire electronic devices.- 26-th Electron Components Conf., San Francisco, Calif., 1976, S.I, p.263-271.

Статья поступила 11 января 1982г.

ИНФОРМАЦИЯ • ЭТ • ИНФОРМАЦИЯ

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ АП602А-2 — АП602Д-2

(*Продолжение. Начало на с.70*)



Зависимость крутизны характеристики от напряжения на затворе транзисторов АП602А-2 — АП602Д-2

Продолжение на с.80 →

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА "ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕРИЯ 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ"

Требования к рукописи

1. Содержание направляемых в редакцию статей должно соответствовать профилю сборника, его научно-техническому уровню и представлять интерес для широкого круга квалифицированных специалистов.

2. Статьи для публикования в сборнике представляются в редакцию в двух экземплярах (один из которых обязательно должен быть первым) с сопроводительным письмом за подписью руководителя предприятия, необходимой документацией, подтверждающей возможность открытого опубликования рукописи.

3. Рукопись и чертежи подписываются всеми авторами с указанием домашних адресов и телефонов. Текст статьи должен быть отпечатан на машинке через два интервала с полями слева 3–4 см на одной стороне листа форматом 21 x 30 см. Объем статьи не должен превышать 10 страниц. К статье необходимо приложить аннотацию объемом до 0,5 страницы. В конце текста должны быть даны конкретные выводы.

4. Заглавие статьи не должно содержать сокращенных наименований и условных обозначений.

5. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

Необходимо следить за научной чистотой терминологии, не прибегая к расплывчатым формулировкам и жаргонным названиям. Все буквенные обозначения, употребленные в тексте статьи и в формулах, должны быть расшифрованы при первом упоминании. Нумеровать следует только те формулы, на которые авторы ссылаются в последующем изложении. Промежуточные математические выкладки следует опускать.

6. Формулы и буквенные обозначения должны быть разборчиво вписаны в текст рукописи чернилами с четким написанием индексов, показателей степени, ясным различием между заглавными и строчными буквами. В сомнительных случаях следует делать расшифровки на полях.

7. Заглавия таблиц, все надписи в вертикальных графах и горизонтальных строках пишут полностью, используя только общепринятые сокращения или буквенные обозначения, расшифрованные ранее в тексте статьи.

8. Рисунки должны быть выполнены черной тушью на плотной белой бумаге или на кальке с соблюдением ГОСТов. Фотографии должны быть контрастными, на глянцевой бумаге размером не менее 9 x 12 см. На рисунках нужно изображать только те кривые, детали и элементы, которые используются в статье. Все необходимые разъяснения и наименования деталей, кривых, блоков следует выносить в подрисуночную подпись, а не в текст статьи. Подписи к рисункам нужно оформить на отдельном листе. На обороте каждого рисунка должны быть проставлены: фамилия автора, название статьи, номер рисунка. На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

9. Библиография дается общим списком в конце статьи, а в тексте указывается в квадратных скобках порядковый номер.

10. Список литературы приводится в порядке упоминания источников в тексте. В список можно включать только печатные источники. Для статьи необходимо указать фамилии и инициалы всех авторов, полное название статьи, названия журналов или трудов (все на языке оригинала), год, том, номер выпуска, страницу. Если иностранный журнал (книга) переведены на русский язык, то название статьи (книги) приводят на русском языке с указанием в скобках "перевод с...". Для авторского свидетельства нужно указать его номер и номер бюллетеня, в котором оно обусловлено. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып.5(156)

Редактор Г.Г.Коровин
Техн.редактор С.Е.Крупнова
Корректор Т.И.Шалимова

Т-12525	Подписано к печати 29/VII-82г.		Формат 60x90/8
Печать офсетная	Усл.печ.л. 10	Уч.-изд.л. 8,7	Тираж 2100
Заказ 556 .	Цена 1 р. 30 к.	Индекс 3836	18 статей

Издательство ЦНИИ "Электроника", Москва 117415

1 р. 30 к.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕР.2.ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ, ВЫП.5(156), 1982, 1-80

Индекс 3836