

Александров



ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

N 33

Серия 2

Полупроводниковые приборы

Выпуск 8(907)

В.М.Горин, А.Е.Кив, Л.Г.Плотникова,

В.Н.Соловьев

МЕХАНИЗМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ
И ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

1983

УДК 621.382.019.3

Рассмотрены микроскопические механизмы естественного старения и деградации приборов различного назначения. Показано, что процессы естественного старения контролируются низкотемпера турными активационными электронными возбуждениями. Указаны экспериментальные и теоретические возможности адекватного моделирования процессов естественного старения.

Использовано 102 отечественных и зарубежных источника в основном за 1970-1982 гг.

Обзор предназначен для технологов и разработчиков, занимающихся надежностью полупроводниковых приборов и микросхем.

Научный редактор канд.техн.наук В.Ф.СИНКЕВИЧ

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 2 «Полупроводниковые приборы»

ВЫПУСК 8(967)

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

**МЕХАНИЗМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ
И ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

(по данным отечественной и зарубежной печати за 1970-1982 гг.)

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ	3
1. Статистические методы оценки ресурса прибора	3
2. Элементный и системный подходы к про- блеме надежности	6
Глава II. ПРОЦЕССЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ И РАДИАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ- БОРОВ	7
1. Механизмы радиационной деградации материалов и приборов	7
2. Механизмы старения приборов	10
3. Аналогии в механизмах радиационной деградации и естественного старения	26

Глава III. МИКРОМЕХАНИЗМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ	31
1. Механизмы атомных перестроек типа "ЭВ → СА"	31
2. Радиационно-стимулированные процессы и их характерные спектры ЭВ в работающих приборах	39
3. Возможности машинного моделирования естественного старения	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
ЛИТЕРАТУРА	50

В В Е Д Е Н И Е

Проблема старения сложных систем приборной техники включает в себя принципиальные задачи исследования молекулярных механизмов старения, зависимости надежности от уровня организации системы, воздействия экстремальных условий на процесс старения. В последнее время наметился переход от эмпирического прогноза (основанного на экстраполяции к длительным временам эксплуатации) к методам, учитывающим механизмы деградации материалов и приборных структур, а также взаимодействие элементов в сложных системах.

Данный обзор освещает различные стороны проблемы, но не дает исчерпывающего анализа полученных результатов и намечающихся тенденций. В нем суммированы некоторые экспериментальные данные и представлены полученные в последние годы результаты исследования механизмов старения, обусловленных электрон-решеточными взаимодействиями.

Глава I. РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ

I. Статистические методы оценки ресурса прибора

Для ориентировочных оценок надежности приборов пользуются методами, основанными на статистической теории. Под надежностью прибора понимается его способность выполнять определенные функции и сохранять свои эксплуатационные показатели в установленных пределах при заданных режимах и условиях эксплуатации в течение требуемого времени.

Математической основой теории надежности являются теория вероятностей, теория случайных функций и математическая статистика. Количественными критериями надежности служат вероятность безотказной работы или функции надежности $F(t)$, являющаяся интегральной функцией распределения времени безотказной работы, и интенсивность отказов $\lambda(t)$, представляющая собой условную вероятность длительности работы до отказа, вычисленную при условии отсутствия отказов до момента времени t . Соотношение между $F(t)$ и $\lambda(t)$:

$$F(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right].$$

Оно является математическим выражением закона надежности.

Основой экспериментального изучения надежности являются массовые испытания. Приближенные аналоги вероятностных характеристик надежности $F(t)$ и $\lambda(t)$ количественно определяют в результате математической обработки данных об отказах, происшедших за время испытаний, а также на основе обобщения опыта эксплуатации. На практике в качестве первого приближения часто используется экспоненциальное распределение для времени безотказной работы, а интенсивность отказов λ не зависит от времени. В действительности в широком временном интервале отказы подчиняются более сложным законам распределения, наибольшее распространение среди которых получило логарифмически-нормальное и вейбулловское распределение.

В большинстве практических случаев надежность системы определяется с помощью соответствующей схемы анализа надежности, основанной на комбинаторных соображениях. Схема анализа надежности системы получается в результате разложения системы на функциональные составные части, каждая из которых содержит одну или несколько подсистем элементов. Различают последовательные, параллельные соединения и более сложные структуры взаимодействия элементов. Последовательное соединение элементов — наиболее простая и наиболее часто встречающаяся структура анализа надежности.

Структура взаимодействия элементов систем на практике часто такова, что соответствующую схему анализа надежности нельзя расчленить на составляющие типа последовательного или параллельного соединения блоков. В таких случаях применяются более общие

методы анализа: метод логических функций, метод перебора состояний, метод анализа возможных путей и сечений, метод практического отказа и др.

Методы нахождения $F(t)$ и $\lambda(t)$ для произвольных структур описаны в [1]. Сюда относятся метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), применение теории графов. Одним из возможных вариантов построения количественной теории надежности приборов является метод параметрической надежности [2]. Он характеризует способность устройства сохранять уровень рабочего параметра $\gamma(t)$ в поле допуска (α, β) в течение требуемого времени при заданных режимах и условиях работы. Математическим критерием постепенного отказа является нарушение неравенства $\alpha < \gamma(t) \leq \beta$, а количественной мерой надежности — вероятность выполнения этого условия в течение времени t , т.е.

$$F_n(t) = P\{\alpha < \gamma(\xi) \leq \beta, \xi \leq t\}.$$

В некоторых случаях характеристики параметрической надежности могут быть получены на основе интегральной или дифференциальной функции распределения определяющего параметра $\gamma(t)$ в начальный момент $F_0(\gamma_0, t_0)$ или $f_0(\gamma_0, t_0)$ и функции его изменения во времени $\gamma(t)$. Функция надежности $F_n(t)$ при постепенных отказах будет результатом временного изменения статистического распределения параметра $\gamma(t)$.

Различают две компоненты, определяющие вид функции $\gamma(t)$ [2]. Случайная обусловлена флуктуациями температуры, давления, влажности, электрической нагрузки, напряжения питания. Детерминированная обусловлена собственно деградацией прибора и является основной в хорошо контролируемом эксперименте. При наличии необратимого деградационного процесса изменение параметра сохраняет постоянное направление и может быть представлено монотонной аналитической функцией времени $\gamma(t)$. Ее монотонность сохраняется, если ведущий механизм отказа остается постоянным. В этом случае совокупность элементов или схем, характеризующих параметрами $\gamma_i(t)$, в первом приближении сохраняет тип начального распределения $\gamma(t_0) = \gamma_0$ в любом временном сечении.

Взяв за основу построения характеристик параметрической надежности нормальный закон распределения параметров $\gamma(t_0)$, мож-

но найти функцию параметрической надежности $F_n(t)$ по обычным правилам нахождения интегральных законов распределения случайных величин [3]:

$$F_n(t) = \int_a^b f(\gamma, t) d\gamma = F(\gamma, t) \Big|_a^b.$$

Дифференциальная функция параметрической надежности

$$f_n(t) = - (d/dt) [F_n(t)].$$

Зная функцию $f(\gamma, t)$, можно определить тип распределения времени безотказной работы. Для полного анализа необходимо найти явный вид функции $f(\gamma, t)$. Получение на основе опыта и теоретических предположений зависимости параметров элементов или схем от времени является важным этапом построения модели параметрической надежности. Аппроксимация истинного процесса с помощью аналитической монотонной функции требует физического подхода в каждом отдельном случае. Физико-химические характеристики деградации входят в виде параметров в $F_n(t)$. Ряд примеров вычисления функций $F_n(t)$ и $f_n(t)$ для различных $f(\gamma, t)$ на основе предположения о нормальном законе распределения входящих в $f(\gamma, t)$ величин приведен в [2].

Изучение параметрической надежности неэффективно без исследований физических механизмов старения.

2. Элементный и системный подходы к проблеме надежности

В исследованиях надежности находят применение логико-математические модели старения, которые позволяют вскрыть наиболее общие черты проблемы [4]. В последнее время возникли новые концепции теории надежности [5]. Традиционно считалось, что система X не может функционировать безошибочно при наличии определенного числа ошибок в работе подсистем X_1, X_2, \dots, X_n . Ныне рассматривается концепция, согласно которой системы X_1, X_2, \dots, X_n сами теряют стабильность из-за ошибок в системе X при полной сохранности собственных эксплуатационных качеств. Такой подход противоположен рассматриваемому в [6]. Согласно последнему старение связано со стохастической неустойчивостью простейшего элемента в системной иерархии.

Определение ресурса приборной системы зависит не только от сложности системы и ее многокомпонентности, но и от количества

параметров, подлежащих одновременной оценке. Надежность системы оценивали по возрастающему числу различных параметров (рис. I) [7].

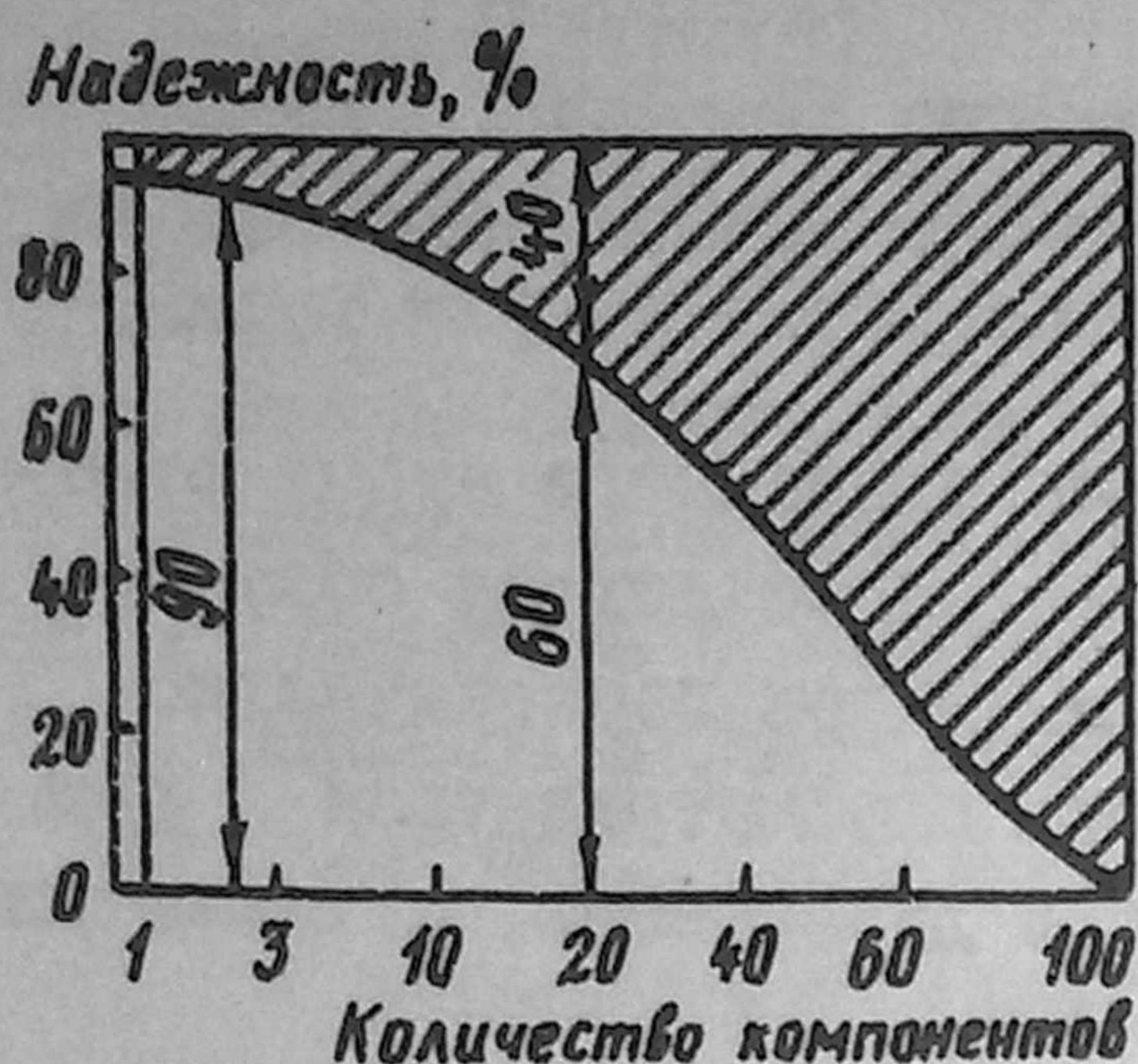


Рис. I. Зависимость надежности системы от количества входящих в нее компонентов (или числа признаков, по которым ведется отбор). Надежность дана в процентном отношении количества приборов, вышедших из строя, к количеству проработавших приборов

Обычно кривая распределения параметров в серии приборов есть кривая нормального распределения вероятностей случайных величин. Именно кривая Гаусса может рассматриваться как характеристика разброса параметров, при котором данная серия приборов находится в пределах нормы. Вредное воздействие внешних условий постепенно деформирует начальную кривую распределения параметров.

В кибернетических системах, если внешний физико-химический фактор вредит стабилизации системы, то последняя или преодолевает его действие или сама перестает существовать как стабильная система. В функциональной системе результат является организующим фактором. Именно он определяет, в какой степени, в каком месте и в какое время включается тот или иной компонент системы [8].

Стабильность физических систем обеспечивается в определенных условиях наиболее общими термодинамическими закономерностями, корректирующими протекание аномальных процессов стимулирующей им противодействующих. Сюда относится известное в физике полупроводников явление нестехиометрической и стехиометрической самокомпенсации [9].

Исследование надежности и старения сложных систем электронной техники требует многопланового анализа с учетом элементарных актов в простейших структурных элементах, и функционального взаимодействия всех компонентов.

Глава II. ПРОЦЕССЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ И РАДИАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИБОРОВ

I. Механизмы радиационной деградации материалов и приборов

Сведения, необходимые для анализа механизмов радиационной деградации, можно найти в работах по радиационной физике полу-

проводников и полупроводниковых приборов [10-13]. При достаточно больших энергиях частиц необходимо рассматривать взаимодействие первичной частицы не с одним атомом, а с некоторой областью в кристалле.

В зависимости от энергии E первично смещенного атома различные виды возможных нарушений условно можно разделить на три типа [12]:

1. Если $E < 1$ кэВ, пробег первично смещенного атома отдачи меньше десятка межатомных расстояний, и создаются области нарушений "малого" размера с небольшим числом первоначально смещенных атомов. Такие нарушения могут рассматриваться как простые дефекты: междоузлия, вакансии и дивакансии, а также их комплексы с примесями.

2. Когда $E \sim 10$ кэВ, области нарушений достигают значительных размеров ($\sim 0,1$ мкм), что соответствует плотному "сгустку" смещенных атомов с плотностью вторично смещенных атомов $N_d \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Введение "сгустков" дефектов характерно для случая облучения быстрыми нейтронами.

3. Если $E > 100$ кэВ, пробег первичного атома отдачи $\sim 0,1$ мкм, а распределение смещенных атомов становится рассеянным - возникают "размытые области" с плотностью дефектов порядка начальных плотностей исходных примесей.

При облучении кремния и германия протонами с энергией 660 мэВ и быстрыми реакторными нейтронами в результате упругого рассеяния первичной частицы должны создаваться одинаковые разупорядоченные области. В случае неупругого взаимодействия первичного протона с ядрами дефекты, создаваемые такими атомами, должны отличаться от дефектов, возникающих под действием нейтронов.

Действие нейтронов на твердое тело зависит от их энергии. Нейтроны с энергией выше 10 кэВ при столкновении с атомами смещают их из узлов решетки. Нейтроны с энергией выше 1 МэВ способны вызвать ядерные процессы. Для нейтронов промежуточных энергий не существует доминирующего типа взаимодействия с веществом.

Действие протонного излучения приводит к созданию пар "вакансия-междоузлие" с целыми областями нарушенной структуры в конце трека. Вопросы деградации полупроводниковых материалов под действием протонного облучения подробно рассмотрены в монографиях [10-12].

При больших энергиях излучения, начиная с 50-100 МэВ, необходимо учитывать действие механизма ядерных реакций, которые в случае больших энергий становятся определяющими в процессе дефектообразования [14]. При облучении кристалла электронами (γ -квантами с энергией меньше 5 - 10 МэВ) дефекты образуются в основном в результате рассеяния вторичных электронов на ядрах решетки.

Исследования деградации времени жизни неосновных носителей в кремнии n -типа, облученном при комнатной температуре электронами с энергией от 2 до 50 МэВ, позволили определить пороговую энергию электронов (~ 9 МэВ), выше которой в кремнии могут возникать области разупорядочения [14].

На близкий характер радиационного воздействия высокоэнергетических γ -квантов и протонов указывают результаты [15]. Высокоомные кристаллы кремния n -типа облучались при 300 К γ -квантами Co^{60} , электронами (100 МэВ), протонами (660 МэВ) и γ -квантами тормозного спектра с максимальной энергией 100 МэВ. Интегральные потоки были выбраны таким образом, чтобы во всех случаях плотность вводимых пар Френкеля была равной. Результаты исследований показали, что образование областей разупорядочения под действием тормозных γ -квантов и протонов не может быть объяснено миграцией и кластеризацией точечных дефектов, а также воздействием вторичных электронов и позитронов электронно-фотонного каскада. Причиной образования областей разупорядочения являются быстрые ядра отдачи, образующиеся в результате ядерных реакций.

Ядерными процессами взаимодействия объясняется также образование устойчивых областей скопления дефектов в германии n -типа, облученном высокоэнергетическими частицами (протонами с энергией 30 и 660 МэВ, электронами с энергией 100 МэВ, а также γ -квантами тормозного излучения с энергией 100 МэВ) [16].

Одиночные дефекты - пары Френкеля - создаются в кристалле при облучении электронами или γ -квантами с энергией 1 МэВ. При облучении электронами дефекты распределяются неравномерно по объему образца: их концентрация спадает по мере удаления от поверхности (подробно этот вопрос рассматривается в [17]). При γ -облучении дефекты возникают в основном за счет упругих соударений комптон - и фотоэлектронов с атомами кристалла. В этом случае дефекты практически равномерно распределены по объему образца. γ -кванты взаимодействуют в основном с электронной подсистемой кристалла. Сечение взаимодействия непосредственно с ядрами атомов решетки мало.

Таким образом, вариации вида и энергии частиц, используемых для воздействия на параметры полупроводниковых материалов и приборов, приводят к разным последствиям [17]:

1) изменяются количество элементарных структурных дефектов (вакансий и междоузельных атомов) на одну инициирующую частицу и скорости возникновения вторичных радиационных эффектов;

2) реализуются разные механизмы образования и трансформации дефектов;

3) изменяются размеры и термическая стабильность нарушений, а также их пространственное распределение в кристалле.

Параметры основных радиационных дефектов в кремнии могут быть сведены в таблицу (табл.1) [17].

2. Механизмы старения приборов

Преждевременные отказы и ухудшение параметров полупроводниковых приборов при эксплуатации и хранении во многих случаях связаны с их естественным старением, т.е. изменением микроструктуры материала и приборов с течением времени. Старение полупроводниковых приборов обусловлено физико-химическими процессами, механизмы которых связаны с их функциональными особенностями, определяющими специфические электрон-решеточные взаимодействия и безызлучательные переходы. Вызванные указанными механизмами небольшие структурные сдвиги, постепенно накапливаясь, вызывают переход от точечных к более сложным дефектам.

Механизмы старения полупроводниковых приборов определяются рекомбинацией электронов и дырок в неоднородных полупроводниках со многими рекомбинационными каналами, движением и взаимодействием примесей и дефектов [18].

Основные задачи анализа старения приборов:

а) определение характера взаимодействия решеточной и электронной подсистем в реальных полупроводниках при температурах, близких к комнатной, низкотемпературные процессы генерации, диффузии, дрейфа и взаимодействия точечных дефектов [19];

б) установление режимов эксплуатации приборов, подавляющих микромеханизмы естественного старения;

в) отработка технологических условий производства приборов, обеспечивающих низкую эффективность действия микромеханизмов естественного старения;

г) прогнозирование ресурса приборов по результатам ускоренных испытаний.

Рассмотрим отдельные физические механизмы естественного старения определенных типов приборов.

Дискретные активные элементы. Обычно различают механизмы деградации планарных маломощных транзисторов, связанные с объемными и поверхностными процессами. Согласно [20] в основе процессов старения всех типов приборов лежат явления диффузии, распада пересыщенных твердых растворов и дефектообразования. В [20-21] исследованы отказы приборов, обусловленные процессами перераспределения примесей. В активных областях прибора, имеющих высокие градиенты примесей, с течением времени "размываются" концентрационные профили, что приводит к ухудшению параметров прибора.

На диффузию примесей оказывают влияние электрические поля, обусловленные неравномерностью распределения примеси, и внешние поля. Напряженность внутреннего электрического поля в приборе при градиентах акцепторной $\partial N_a / \partial x$ и донорной $\partial N_d / \partial x$ примесей выражается формулой [22]:

$$E \approx \frac{kT}{e} \frac{1}{N_d - N_a} \left(\frac{\partial N_d}{\partial x} - \frac{\partial N_a}{\partial x} \right),$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, e - заряд электрона.

Параметры основных радиационных дефектов в кремнии

Таблица I

Дефект	Символ	Зарядовое состояние	Положение уровня, эВ	Тип уровня	Сечение захвата $\sigma_n, \sigma_p, \text{см}^2$	Температура отжига, К	Энергия активации, эВ
Вакансия	V	V^-	$E_C - 0,09$	A	$\sigma_p^0 = 5 \cdot 10^{-17}$	90	$0,18 \pm 0,02$
		V^-	?	A		-	-
		V^0	-	-		150	$0,33 \pm 0,03$
		V^+	$E_V + 0,11$	D		-	-
Междоузельный атом	I	I^-	$E_C - 0,4$	A	-	$\sim 140-180$	$\sim 0,3$
		I^0	-	-		$540-600$	$\sim 1,5$
		I^+	$E_V + 0,4$	D		$370-420$	$0,85$
Вакансия-кислород (А-центр)	V-O	$(V-O)^-$	$E_C - 0,18$	A	$\sigma_n^0 \sim 10^{-14}$ $2 \cdot 10^{-16}$	600-620	1,3
		$(V-O)^0$	-	-		$\sigma_p^- \sim 5,5 \cdot 10^{-13}$ $2,5 \cdot 10^{-14}$	-
Вакансия-фосфор (Е-центр)	V-P	$(V-P)^-$	$E_C - 0,44$	A	$\sigma_n \gg 10^{-16}$ $\sigma_p \sim 10^{-13}$	420	1,25
		$(V-P)^0$	-	-		400	$0,93-0,95$
Вакансия - мышьяк	V-As	$(V-As)^-$	-	A	$\sigma_p = 4 \cdot 10^{-14}$	440	1,07
	V-As ₂	$(V-As)^0$	-	-		400	1,27
Вакансия - сурьма	V-Sb	$(V-Sb)^-$	-	A	-	460	1,28
	V-Sb	$(V-Sb)^0$	-	-		-	-
	V-Sb	$(V-Sb)^0$	-	-		400	1,84

Продолжение табл. I

Дефект	Символ	Зарядовое состояние	Положение уровня, эВ	Тип уровня	Сечение захвата	Температура отжига, К	Энергия активации, эВ
Вакансия - алюминий	$V-Al$	$(V-Al)^0$ $(V-Al)^+$	$E_V+0,48$	Д	$\sigma_p \gg 10^{-16}$	470	0,77
Вакансия - бор	$V-B$	$(V-B)^0$ $(V-B)^+$	$E_V+0,45$	Д	-	300	0,42
Вакансия - галлий	$V-Ga$	$(V-Ga)^0$ $(V-Ga)^+$	-	Д	-	~ 470	0,6
Вакансия - кислород-углерод (К-центр)	$(V-O-C)$	$(V-O-C)^0$ $(V-O-C)^+$	$E_V+0,16$ $E_V+0,3$	Д	-	570-620	-
Междоузельный алюминий	Al_I	Al_I^0 Al_I^+ Al_I^{++}	$E_V+0,25$	Д Д -	$\sigma_p = 7 \cdot 10^{-18}$	~ 470 ~ 470 -	- - -
Междоузельный углерод	C_I	C_I^0 C_I^+	$E_V+0,27$	Д	$\sigma_p = 7 \cdot 10^{-18}$	300	-
Дивакансия	VV	V^- V^- V^0 V^+	$E_C-0,23$ $E_C-0,4$ $E_C-0,39$ $E_V+0,21$	А А А Д	$\sigma_p = 2 \cdot 10^{-16}$ - $\sigma_p = 4 \cdot 10^{-15}$ $\sigma_p^0 = 2 \cdot 10^{-16}$	550 - 140 610	$\leq 1,5$ - - -

Влияние внутреннего и внешнего электрических полей приводит к возникновению дополнительно к диффузионному дрейфового потока атомов. В результате получаем уравнение диффузии

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \mu F N,$$

где D - коэффициент диффузии; $\mu = D/kT$ - подвижность примесных ионов. В [23] рассматривается также компонента потока, обусловленная эффектом "электронного ветра".

Стабильность работы полупроводниковых приборов определяется стабильностью созданных в процессе их производства твердых растворов [20]. Скорость распада твердых растворов определяется 1) степенью пересыщения; 2) концентрацией центров распада (при этом центрами распада могут быть различного рода микро- и макродефекты, а также флуктуации плотности введенной в кристалл примеси); 3) коэффициентом диффузии, определяющим скорость притока примесных атомов к центрам распада.

При наличии границы раздела двух фаз на процесс распада влияет перераспределение примеси, вызванное сложными явлениями на границе (механическими напряжениями, встроенными электрическими полями и др.). Распад пересыщенных твердых растворов, как и диффузное перераспределение примесей, приводит к появлению комплекса различных дефектов.

Состояние поверхности, например, границы раздела $Si - SiO_2$ очень важно учитывать для понимания механизмов деградации приборов. Окисная пленка содержит положительный ионный заряд $Q = q N_{SiO_2}$, где N_{SiO_2} - концентрация ионизованных примесей (Na^+ , K^+ , H), q - заряд электрона.

Накопление заряда инициирует процессы, приводящие к старению или даже к катастрофическому отказу приборов [2]:

I. Положительный заряд в пленке стягивает в поверхностный слой электроны ($p^+ - n$ - переход). Это приводит к появлению генерационно-рекомбинационной составляющей обратного тока $p - n$ - перехода:

$$I_1 = q S n_i L / \tau_i,$$

где $n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp(-E_g/2kT)$ - концентрация носителей в собственном кремнии, E_g - ширина запрещенной зоны, S - площадь, а L - ши-

рина $p-n$ - перехода, τ_i - время жизни носителей в собственном кремнии.

2. Наличие положительного заряда в системе $Si-SiO_2$ приводит к образованию обедненного слоя p - области (случай n^+-p -перехода) вследствие электростатического выталкивания дырок полем положительных ионов в SiO_2 . При этом возникает новая составляющая обратного тока I_2 . Она обусловлена тепловой генерацией электронно-дырочных пар с центров на границе $n-Si-SiO_2$ и равна $I_2 = q S_0 n S$, где S_0 - площадь $p-n$ -перехода под слоем окисла p - области; S - скорость поверхностной рекомбинации. Компонента I_2 возникает лишь в случае сильнолегированной p - области ($N_a > 10^{17} \text{ см}^{-3}$), поскольку большая плотность положительного заряда в окисле может образовать инверсионный слой n - типа на $p-Si$.

3. Когда инверсионный слой контактирует с металлизацией, возникает омическое шунтирование $p-n$ перехода через проводящий n - слой [24].

4. Если уровень легирования базы превышает $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, проявляется дополнительная составляющая обратного эмиттерного тока I_3 , обусловленная туннелированием электронов из валентной зоны p - области через тонкий наведенный $p-n$ - переход в зону проводимости p - области:

$$I_3 = (q^2 m^* U_3 / 2 \pi h^3) \exp \left\{ - \frac{4}{3} \sqrt{2 m^* E_g} \frac{3/2}{q h E} \right\},$$

где $m^* = [(1/m_e^*) + (1/m_n^*)]$; m_e^* , m_n^* - эффективные массы электрона (e) и дырки (n), h - постоянная Планка; E - средняя напряженность поля $p-n$ -перехода.

Компонента I_3 существенна для узких переходов (0,05 мкм). Нестабильность обратных токов в процессе эксплуатации прибора часто связана с изменением во времени поверхностного заряда.

Другой важный параметр транзистора - низкочастотный интегральный коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером K_{213} , по определению [2] также зависит от обратных токов. В зависимости K_{213} от времени различают три участка [24]:

1) быстрого изменения, которое происходит в период от начала эксплуатации до нескольких десятков и сотен часов (это малоинерционные процессы перестройки заряда);

2) медленного изменения, которое проявляется на последующих стадиях старения и длится до нескольких тысяч часов (это процессы атомарных перестроек и перемещений);

3) периода стабилизации h_{213} , когда объемная компонента базового тока I_{B0} начинает преобладать над поверхностной I_{Bn} .

Относительное изменение h_{213} зависит как от отношения поверхностной и объемной компонент базового тока I_{Bn}/I_{B0} , так и от относительного изменения поверхностной компоненты базового тока $\Delta I_{Bn}/I_{B0}$. Следовательно, задача повышения стабильности коэффициента h_{213} не тождественна задаче уменьшения Q и N_{SiO_2} , которые определяют I_{Bn} , а сводятся к отысканию путей уменьшения отношения I_{Bn}/I_{B0} и $\Delta I_{Bn}/I_{Bn0}$.

В последние годы интенсивно исследуются механизмы старения МДП-транзисторов [2]. Наличие границы раздела Si-SiO₂ часто является источником нестабильности характеристик транзисторов. Например, согласно [25] напряжение отпирания МДП-транзистора

$$U_{отп} = (Q_1 + Q_{SiO_2} + Q_2)/C_0,$$

где Q_1 - положительный заряд в поверхностных состояниях на границе раздела Si-SiO₂; Q_{SiO_2} - ионный заряд в пленке окисла; Q_2 - заряд доноров в обедненной области подложки n -типа ниже канала. Всякий временной дрейф зарядов Q_1 и Q_{SiO_2} вызывает дрейф $U_{отп}$.

Главной причиной нестабильности МДП-транзисторов в настоящее время является дрейф ионов натрия и водорода через пленку окисла при наличии напряжения на затворе $U_3 \approx 10$ В [2]. Непрерывное стремление к уменьшению размеров МДП-транзисторов приводит к возрастанию электрических полей. Это, в свою очередь, активизирует процессы деградации, обусловленные высокоэнергетическими ("горячими") электронами в проводящем канале [26].

В работе [27] исследована деградация n -канальных МДП-транзисторов при низких температурах (77 К). Все основные параметры транзисторов подвержены деградации. В отличие от традиционного механизма деградации вследствие захвата электронов границей Si-SiO₂ здесь предлагается дополнительный механизм, связанный с образованием точечных дефектов в объеме полупроводника. В качестве возможных механизмов дефектообразования рассматрива-

ются генерационно-рекомбинационные [28], стимулированные высокими плотностями тока и большими полями. МДП-структуры используются в качестве основных рабочих элементов в приборах с зарядовой связью (ПЗС) [29].

В работе [16] исследованы типы локализованных дефектов в приемниках изображения на ПЗС типа STD 5250I (фирма RCA, США), причины их возникновения. Обнаружены следующие дефекты:

1. Полосатость. Дефект проявляется в виде концентрических полос. Появление дефекта связывают с неоднородностями распределения центров рекомбинации и локальными вариациями сопротивления.

2. Сдвиг. Виден как скопление коротких горизонтальных и вертикальных белых линий. Установлено, что картина расположения этих линий точно совпадает с картиной нарушений периодичности кристаллической решетки на данном участке кремниевой подложки.

3. Черные вертикальные линии. Дефект является результатом замедления передачи заряда в канале ПЗС. Возможная причина - диффузия акцепторной примеси в область канала при формировании стоп-канальных областей.

4. Четыре горизонтальные линии, проявляющиеся в результате разрыва или замыкания поликремниевых электродов.

5. Белые точки и линии. Возникают вследствие паразитной инжекции заряда в каком-либо элементе из-за замыкания поликремниевых электродов на подложку через проколы в SiO_2 . Другим источником (точечных) дефектов может быть диффузия фосфора через проколы в SiO_2 в процессе формирования областей стока и истока, наличия дислокаций и прочих нарушений кристаллической решетки.

6. Черные точки. Являются следствием аномалий в слое поликремния, нарушающих его прозрачность, либо препятствующих передаче заряда. Черные точки свидетельствуют о наличии в подложке зоны с низкой светочувствительностью. Такая зона может возникать в участках нарушения кристаллической решетки с повышенной концентрацией центров рекомбинации.

В [30] исследован захват носителей объемными ловушками в ПЗС с объемным каналом. Наличие объемных примесных центров оказывает неблагоприятное влияние на некоторые характеристики при-

боров (повышение токов термогенерации, деградацию формы сигнала, увеличение шумов на выходе прибора). Предложен усовершенствованный вариант методики определения постоянной времени эмиссии, основанной на сравнении двух выходных импульсов, отделенных друг от друга некоторым промежутком времени. Обнаружено проникновение атомов железа в объем. Активную роль в процессе переноса атомов железа играет газообразный HCl , используемый для геттерирования подвижных ионов Na^+ .

Интегральные схемы. Методы исследования механизмов старения ИС находятся практически в стадии зарождения. Это связано, во-первых, с чрезвычайной сложностью исследуемых объектов, деградация которых во многом определяется схмотехническим исполнением и технологическими особенностями получения ИС. Во-вторых, традиционные методы исследования дискретных элементов в большинстве случаев неприменимы. Наконец, отсутствие устоявшейся технологии производства ИС, дефекты процессов производства приводят к тому, что отказы ИС происходят раньше, чем начинают проявляться механизмы старения. Данные о надежности ИС и составляющих их дискретных элементов на начало 1975 г. приведены в [2].

Рассмотрены частоты отказов р-п-МОП и КМОП ИС, производимых различными фирмами [31] (табл. 2, 3). Общими для деградации МОП-ИС являются нестабильности, связанные с ионами щелочных металлов; пробой окисла под затвором (по локализованным в диэлектрике дефектам); нестабильности, вызванные медленным захватом; дрейф поверхностных ионов; коррозия металла; пробой диэлектрической изоляции в многослойной разводке между металлом и поликремнием в приборах с кремниевым затвором или между первым и вторым слоями поликремния; дефекты металлизации, фотолитографии. Для приборов в пластмассовых корпусах главной причиной отказов является коррозия металла.

Надежность приборов зависит от условий эксплуатации. Например, высокая температура и постоянное смещение приводят к ионному загрязнению, в то время как работа в динамических режимах приводит к эффектам, определяемым зарядовой инжекцией или явлениями электромиграции.

Специфическими факторами, влияющими на старение, являются материал корпуса, сложность кристалла и уровень экранировки.

Таблица 2

Частота отказов МОП ИС в керамических корпусах
при температуре среды 125°C

Характеристика прибора			Скорость отказов, % / 10 ³ ч	Энергия активации, эВ	Источник
Т и п	Обозначение	Емкость памяти			
R A M (п-МОП)	(V-МОП)	1К	-	0,7	[32]
	-	4К	4,9(при 155°C)	-	[33]
	-	1К, 4К	-	0,3-1,0	[34]
	6800	-	0,25	-	[35]
	2102	1К	1,0	-	[35]
	4096P ^Ж	4К	0,74	-	[36]
	МК4727P	4К	1,2	-	[36]
Микропро- цессор	F-8	-	7,1	-	[37]
	Z-80	-	1,4	-	[37]
Микроком- пьютер	TMS1000 ^{ЖЖ}	-	-	0,4	[38]
	8080(п-МОП)	-	-	0,5	[39]

^Ж Прибор типа RAM 4096 с емкостью памяти 4К в пластмассовом корпусе имеет скорость отказов 1,6% / 10³ч [36]:

^{ЖЖ} Температура среды не указана.

Таблица 3

Частота отказов КМОП ИС при температуре среды 125°C

Обозначение прибора	Скорость отказов, %/10 ³ ч	Энергия активации, эВ	Источник
<u>В керамическом корпусе</u>			
С	-	1,0	[40]
4002*	-	1,0	[41]
CD4000A (класс А)	0,14	-	[42]
CD4000	0,071	1,1	[42]
MIS-M -38510	0,03-0,44	0,3	[42]
CDP1800*	-	1,1	[43]
4000D	0,076	-	[43]
4000C	0,495	-	[43]
<u>В пластмассовом корпусе</u>			
4000E	0,168	0,8	[44]
CP	-	1,0	[45]

*Температура среды не указана

Эпоксидные материалы могут служить источником загрязнения, а газовая среда в герметизированных корпусах содержит много влаги. КМОП ИС, запрессованные в пластмассу, при работе рассеивают незначительную мощность. Поэтому из-за поверхностных эффектов они менее стабильны, чем n -МОП- или ТТЛ-схемы.

Из [31] следует, что влияние напряжения на частоту отказов зависит от условий испытания. Например, наблюдалось относительное увеличение частоты отказов КМОП ИС в 2-12 раз при напряжении 15 В по сравнению с 10 В. Статические запоминающие устройства надежнее динамических. В [46] приведены данные по надежности ИС в пластмассовых корпусах, проработавших в течение 8-10 лет в массовой радиоаппаратуре (при 40% влажности и температуре 25°C). Замечена анодная и катодная коррозия металлических проводников, изменение пороговых напряжений и увеличение токов утечек МОП-транзисторов. Наличие влаги в корпусе способствует выделению ионных примесей, содержащихся в пластмассе. В [47], кроме вышеописанных процессов деградации, приведены современные методы тестирования приборов.

Светосизлучающие приборы. К этому классу приборов относятся в основном светодиоды и полупроводниковые лазеры. Деградационные явления в полупроводниковых лазерах привлекли внимание специалистов после создания в 1970 г. непрерывных неохлаждаемых гетеролазеров на основе $AlGaAs$. Обнаружились неизвестные ранее процессы старения и новые механизмы отказов. Процессы старения в этих приборах состоят в развитии очагов ускоренной деградации (дефекты в виде темных линий, ДТЛ), ибо сводятся к однородному старению люминесценции по объему [48]. Кроме того, старение зависит от процессов на поверхности: окисления, эрозии, разрушения. Большую роль в понимании процессов деградации сыграла расшифровка дислокационной структуры "темных линий". В итоге были выработаны условия, исключаящие такие дислокации, в частности, путем перехода к малодислокационным подложкам и усовершенствованным методам обработки готовых пластин.

В $GaInPAs$ -лазерах ДТЛ практически отсутствуют, химическая и фотохимическая стойкость поверхностей на несколько порядков выше. Как отмечено в [48], история проблемы долговечности была бы совершенно иной, если бы $GaInPAs$ -лазеры были изобретены раньше, чем $AlGaAs$ -лазеры.

Физические механизмы, контролирующие старение полупроводниковых лазеров, очень разнообразны [49]. В [50] исследована устойчивость гетеролазеров непрерывного действия (Al, Ga) As. Взята выборка из 90 приборов при низких (жидкий азот) температурах и 70°C. Экстраполяция к комнатным температурам (22°C) результатов эксперимента с энергией активации $E_a = 0,7$ эВ обеспечивает долговечность лазеров > 10 лет. Авторы [51] указывают на явление катастрофической деградации тех же структур. Механизмы деградации не обсуждаются. Деградация двойных лазерных гетероструктур $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/Al_{0,08}Ga_{0,92}As$ при температуре от 60 до 100°C [52] позволила прогнозировать ресурс работы при 22°C, равный 10^6 ч. Используемая энергия активации при этом равнялась 0,95 эВ. Для гетеролазеров на основе InGaAsP/InP энергия активации деградации в интервале температур 50-70°C оказалась существенно ниже (0,3 эВ) [53], чем для вышеописанных структур.

Анализ старения полупроводниковых лазеров приведен в [54]. Исследования их деградации показали, что возможна как быстрая деградация их, так и медленная, долговременная. Быструю деградацию часто наблюдают в первые 100 ч работы прибора. Она сопровождается формированием дефектов в виде темных пятен (ДТП) и ДТЛ. При долговременной деградации ДТП и ДТЛ не образуются, хотя интенсивность электролюминесценции падает.

Формирование ДТЛ и ДТП связывают с наличием дислокаций в структуре. Результат электронно-микроскопического исследования активных областей приборов после деградации [55-57] показал, что ДТЛ представляют собой трехмерные дислокационные сетки. В активной области приборов на основе $Ga_{1-x}Al_xAs$ наблюдается три типа дислокационных сеток: удлиненная сетка, распространяющаяся вдоль <100> направления; сетка дислокаций, расположенная вблизи плоскости (001), и дислокационная сетка, лежащая в плоскости перехода.

При деградации дислокационные сетки распространяются с большими скоростями в результате поглощения точечных дефектов [55]. Источниками таких дефектов могут быть гетерограницы [57], [58], на которых возможно локальное изменение стехиометрии кристалла; проросшие из подложки дислокации [59]; скопление нарушений (дарапины, края кристалла, неоднородности и т.д.) [60, 61].

Быстрому распространению ДТЛ способствует также образование центров безызлучательной рекомбинации (ЦБР) в активном слое [62]. Об увеличении ЦБР при деградации полупроводниковых лазеров свидетельствует рост рекомбинационной и избыточной компонент прямого тока [63-67], увеличение обратного тока [68] и низкочастотных шумов [69], уменьшение времени жизни неосновных носителей [70] и их диффузионной длины [67,71], увеличение порога генерации [72].

Согласно модели объемной деградации, описанной в работе [54], в различных приборах может наблюдаться один, два или три этапа деградации.

На первом этапе деградации полупроводниковых лазеров, а также светодиодов наблюдается диффузия точечных межузельных дефектов со стоков в объем активной области и ассоциация дефектов в объеме, что приводит к образованию новых центров излучательной и безызлучательной рекомбинации.

На первом этапе деградации полупроводниковых лазеров и светоизлучающих диодов обнаружен, например, рост интенсивности полос люминесценции шириной 0,067 мкм в GaAlAs-лазерах и 0,7 мкм в GaP-диодах.

Существенно, что увеличение концентрации донорно-акцепторных пар и ЦБР наблюдается не только в обедненном слое $p-n$ -перехода (что было в случае механизма Ловжини [73]), а во всей активной области, определенной длиной диффузии неравномерных носителей, что следует непосредственно из данных работы [74].

Наиболее интенсивно процесс деградации происходит в приборах, содержащих различные микро- и макронесовершенства. Часто встречающимися несовершенствами в светодиодах и инжекционных лазерах, как показано в [75], являются локальные сужения $p-n$ -перехода, обуславливающие высокий уровень избыточных туннельно-рекомбинационных токов и шумов; высокоомные области $p-n$ -перехода. Нередко наблюдаемое на первом этапе деградации уменьшение туннельно-рекомбинационных токов $p-n$ -перехода и рост интенсивности свечения могут быть связаны с термическим распадом ЦБР в местах сильных локальных разогревов.

Таким образом, на первом этапе деградации происходит формирование ЦБР вокруг стоков, окруженных точечными дефектами.

Иногда первый этап деградации может отсутствовать и деградация начинается со второго или третьего этапов.

На втором этапе деградации происходит бурное развитие ДТЛ за счет интенсивной безызлучательной рекомбинации через ЦБР, созданные на первом этапе. Чем меньше энергия, выделяющаяся при безызлучательной рекомбинации, тем меньше скорость деградации на этом этапе. Такую зависимость получили авторы [76], исследуя скорость деградации светодиодов на основе твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$. Образование ДТЛ, индуцированное безызлучательной рекомбинацией, сопровождается вакансиями, которые могут образовывать дислокации вакансионного типа либо участвовать в образовании ЦБР на третьем этапе.

На третьем этапе деградации вакансии, кроме того, могут облегчать диффузию различных примесей, что также может привести к появлению новых ЦБР. Различия в энергиях активации долговременной деградации (0,57 эВ - 0,7 эВ) и быстрой деградации (0,2 эВ) связаны с различием энергий активации диффузии примесей по междоузлиям и вакансиям. Появление вакансий может облегчить и фототермический распад центров свечения донорно-акцепторных пар благодаря облегчению диффузии одной из компонент пары.

Второй большой класс светоизлучающих приборов составляют СД. Анализ экспериментальных данных по старению светодиодов позволяет выделить следующие возможные механизмы старения [18]:

- а) образование глубоких рекомбинационных центров;
- б) квазихимические реакции точечных дефектов при возбуждении электронной подсистемы;
- в) дислокационно-стимулированное старение.

Выявлены доминирующие центры рекомбинации в светодиодах (табл.4), надежного установления природы большинства других глубоких уровней, участвовавших в деградации светодиодов, необходимы дальнейшие исследования.

Модель квазихимических реакций была предложена в [77] наряду с диффузионной моделью Лонжини [73]. Согласно [77] деградация светодиодов и туннельных диодов на основе $GaAs < Zn >$ происходит в результате выхода цинка в междоузлия за счет энергии рекомбинирующего электрона. Модель качественно объясняет умень-

Таблица 4

Энергия ионизации центров, концентрация которых
изменяется при старении светодиодов
(энергия отсчитана от "потолка" валентной зоны
[18]; в скобках указаны примеси, с которыми
связано появление центров)

GaAs	GaAs _{1-x} P _x	Ga _{1-x} Al _x As	GaP
0,17(Si)	0,08(Si)	0,08(Si)	0,20
0,18	0,17	0,21	0,22(Si)
0,23	0,2	0,24	0,24
0,27	0,24	0,31	0,27
0,44	0,23	0,45(Cu)	0,30
0,43	0,33	0,49	0,33
0,45	0,38	0,52(Fe)	0,36
0,55	0,45	0,6	0,39
0,52(Fe)	0,55	0,89	0,41
0,54	0,74(O)	-	0,42
0,76	-	-	0,52*

*Далее 0,50(Cu); 0,58; 0,59, 0,71; 0,82

шение пикового тока, рост избыточного тока, уменьшение емкости р-п-переходов туннельных диодов при длительном пропускании прямого тока.

Модель Лонжини предполагает, что основной причиной деградации является дрейф междоузельных положительно заряженных ионов цинка из р-области в n-область. При этом, переходя в n-область и становясь акцептором, цинк частично компенсирует эту область и этим расширяет туннельный переход. вследствие чего уменьшается пиковый ток.

Прямые доказательства протекания квазихимических реакций дефектов в полупроводниках $A^{III}B^V$ получены с использованием методики релаксационной емкостной спектроскопии глубоких уровней [78]. Исследованы температурные зависимости скорости отжига доминирующих рекомбинационных центров при прямом и обратном смещении p - n -перехода, облученного электронами с энергией 1 МэВ [79]. Пропускался также прямой ток плотностью 30 А/см². Энергия активации уровня E_3 в несмещенном p^+n -переходе составляет $E_3 = 1,4$ эВ, а при пропускании прямого тока $-E_3^* = 0,34$ эВ. Разность $E_3 - E_3^* = 1,05$ эВ соответствует энергии $E = 1,09$ эВ, выделяющейся при захвате дырки на уровень E_3 . Это, по мнению авторов, подтверждает, что причиной ускорения отжига является фоновый удар, т.е. мгновенная передача энергии захватываемой дырки колебательной подсистеме ловушки. Дальнейшее изучение отжига радиационных дефектов в GaAs и GaP показало, что для всех других ловушек вопрос о конкретных механизмах квазихимических реакций "дефект + электронное возбуждение" требует дальнейшего исследования [80].

В ряде экспериментальных работ показано, что ни генерация и рекомбинация неосновных носителей заряда, ни оптический поток, ни разогрев активной области кристалла в определенных условиях не являются основной причиной деградации светодиодов [18, 81].

Деградация структур происходит вследствие движения примесных атомов и точечных дефектов в изменяющемся электрическом поле p - n -перехода.

3. Аналогии в механизмах радиационной деградации и естественного старения

В связи с повышением функциональной сложности современных электронных систем требования к надежности полупроводниковых приборов и ИС постоянно возрастают. Ускоренные испытания позволяют получить необходимый объем информации о надежности электронной техники в короткие сроки по сравнению со временем их ресурса. Продолжительность испытаний сокращается благодаря ускорению физико-химических процессов, протекающих внутри изделий при их долговременном функционировании и вызывающих отказы.

Результаты ускоренных испытаний приборов Таблица 5

Изделие	Режим испытаний			Показатели надежности
	Температура, °С	Электрическая нагрузка	Время наработки, ч	
Биполярные транзисторы на 4 А	220; 250; 280	Постоянное напряжение	6000	В течение 20 лет кол-во отказов при $T_{пер} = 100^{\circ}\text{C}$ менее 0,025%
КМОП цифровые ИС 4007	200; 225; 250	Постоянное напряжение 15 В	200	$t_{50} = 5,2 \cdot 10^8 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda = 2 \cdot 10^9 \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 50^{\circ}\text{C}$
Операционные усилители 74I	250	40 В	6000	$t_{50} = 8 \cdot 10^{12} \text{ ч}^{-1}$ $\lambda = 2 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$
Цифровые ТТЛ ИС 5410	250	5 В	6000	Количество отказов менее 1-3%
Гибридные ИС (аналоговый ключ)	200	5 В	2500	$t_{50} = 8 \cdot 10^9 \text{ ч}^{-1}$ $\lambda = 8 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 30^{\circ}\text{C}$
ЛД кремниевые на 36-40 ГГц	325; 350	28 В, 400 мА	1000	$t_{50} = 10^6 \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 200^{\circ}\text{C}$
ЛД на основе GaAs	350; 400	29 В, 380 мА	7000	$t_{50} = 10^6 \text{ ч}^{-1}$
Диоды Ганна, 10 ГГц, 500 мВт	220; 300	10 В, 525 мА	1000	$\lambda < 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 280^{\circ}\text{C}$
Светоизлучающие диоды на основе GaAs	145; 167	77 А/см ²	1000	$t_{50} = 10^5 \text{ ч}^{-1}$ $\lambda < 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 25^{\circ}\text{C}$
Транзисторы MSC-1330 на 30 Вт	250; 280; 340	Импульсы частотой 1,4 ГГц длительностью 120 мкс	1000	$t_{50} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 100^{\circ}\text{C}$
Транзисторы MSC-2010 на 12,5 Вт	180- 300	Импульсы частотой 1,4 ГГц, длительностью 1,5 мс	20000	$t_{50} = 10^9 \text{ ч}^{-1}$ при $T_{пер} = 140^{\circ}\text{C}$

t_{50} - медианный ресурс (время наработки до наступления отказов 50% приборов); λ - интенсивность отказов; $T_{пер}$ - температура p-n-перехода.

В настоящее время наибольшее распространение получили высокотемпературные ускоренные испытания. Из табл. 5 [82] следует, что в качестве ускоряющего фактора используется температура $p-n$ -перехода, а электрическая нагрузка, как правило, соответствует режиму применения прибора. Различают две разновидности испытаний: высокотемпературные испытания с обратным смещением, подаваемым на $p-n$ -переходы приборов, и высокотемпературные испытания в рабочем режиме, соответствующем схеме применения прибора [82].

Ускоренные испытания приемлемы при выполнении следующих условий: выбор оптимального режима и температуры; правильный анализ результатов испытаний. При выборе электрического режима и температуры бывает трудно не нарушить условия автономности процессов, вызывающих отказы. Например, при испытаниях кремниевых транзисторов температура $p-n$ -перехода не должна превышать $350-370^{\circ}\text{C}$, так как в противном случае образуется эвтектический сплав золото - кремний и появляются виды отказов, которые не характерны для эксплуатации при нормальной температуре.

Допустимое значение температуры может быть ограничено также конструктивными особенностями приборов. Например, полупроводниковые приборы в пластмассовых корпусах из-за структурных изменений пластмассы нельзя испытывать при температурах выше $150-200^{\circ}\text{C}$. При высокой температуре может возрасти также поверхностная утечка тока. Последнее часто наблюдается в линейных ИС, у которых используется высокое рабочее напряжение. Повышение температуры выше 220°C может приводить к нарушению электрического режима операционных усилителей [83] и катастрофическим отказам из-за электрической перегрузки. Схемы ТТЛ могут короткое время работать при 300°C , но при длительной работе начинают преобладать отказы, вызванные электромиграцией металлизации. Цифровые КМОП ИС могут устойчиво работать при 300°C , но из-за высокой чувствительности к ионным загрязнениям время наработки на отказ при этом крайне мало.

Однако даже при соблюдении вышеупомянутых условий данные ускоренных испытаний не всегда соответствуют данным в нормальном режиме работы. В [84] приведены результаты испытаний КМОП ИС. Показано, что энергия активации процесса дестабилизации порогового напряжения имеет значительный разброс от 0,83 до

1,55 эВ. При экстраполяции результатов ускоренных испытаний к нормальному режиму эксплуатации часто наблюдались ошибочные результаты: например, частота отказов ИС отличалась от прогнозируемой на порядок.

В [85] также отмечено слабое соответствие результатов длительных и ускоренных испытаний. Коэффициенты ускорения у разных авторов различаются в 3-5 раз. Наконец, в работе [86] всесторонне исследовано расхождение данных по естественному старению, взятых из программы "Предсказание надежности электронного оборудования" (MIL-HDBK-317B).

Как уже упоминалось, в качестве ускоряющего процесса деградации фактора используется повышенная температура. Уравнение Эйринга или его упрощенный вариант - уравнение Аррениуса является основой для нахождения энергии активации процесса деградации:

$$\tau = A \exp(-E_a/kT). \quad (1)$$

Здесь A - константа, не зависящая от температуры, E_a - энергия активации процесса деградации, τ - скорость деградации.

Если активационный процесс описывается уравнением (1), то время протекания его равно

$$t = C \exp(E_a/kT), \quad (2)$$

где C - температурно независимая константа.

Иногда уравнения (1) и (2) преобразуются:

$$\tau = a 2^{\theta/\Delta}, \quad (3)$$

$$t = c 2^{-\theta/\Delta}, \quad (4)$$

где Δ - температурный инкремент удвоения τ или уменьшения в два раза t , равный

$$\Delta = (\ln 2)/\beta = 0,69/\beta. \quad (5)$$

Согласно [86] $\beta = 0,69/8$, а константы a и c зависят от материала. Из (3) - (5) следует простое эмпирическое правило, что скорость процесса деградации удваивается с повышением температуры на 8°C .

В [86] приведены имеющиеся в литературе энергии активации процессов, определяющих нестабильность работы разных приборов. Значения энергий активации получены при высоких температурах (около 175°C), при которых могут преобладать высокотемпературные механизмы деградации. Идентичные приборы, изготовленные различными фирмами, могут давать разные значения энергии активации. Другие ускоряющие деградацию факторы приводят к другим энергиям.

Программа МП-НДВК-217В основана на данных по исследованию естественного старения различных приборов, начиная с сентября 1974 г. по март 1978 г. Данные показывают, что действительные энергии активации процессов естественного старения существенно ниже, чем найденные при ускоренных испытаниях. В табл.6 приведены энергии активации отношения интенсивности отказов при 50°C к интенсивности отказов при 25°C и температуре удвоения скорости деградации T_2 .

Энергии активации процессов естественного старения существенно меньше, чем энергии, полученные при высоких температурах. Энергии активации ИС в зависимости от их конструктивных и функциональных особенностей составляют 0,4-0,7 эВ.

Согласно [87] нормальное функционирование полупроводниковых приборов обеспечивается протеканием физических процессов, имеющих общую природу. В процессе эксплуатации приборов периодически изменяется пространственное распределение зарядов и полей, происходит перезарядка центров, непрерывная генерация и релаксация электронных возбуждений. В результате безызлучательных переходов энергий электронных возбуждений (эВ) на кристаллическую решетку видоизменяются дефектные атомные конфигурации, примесные профили, структура всевозможных комплексов. Механизмы атомных перестроек типа "эВ-СА" ("электронное возбуждение \rightarrow смещение атома") описаны далее. С другой стороны, возможно радиационное моделирование процессов естественного старения путем прямой генерации радиационных дефектов, как было показано в начале данной главы. Все специфические механизмы деградации сводятся к рождению и перестройке дефектов. Задача, следовательно, заключается в выявлении комплекса дефектов, определяющих процессы естественного старения, и в их моделировании при помощи радиационных воздействий.

Таблица 6

Температурная зависимость скорости деградации дискретных приборов [86]

Тип прибора	Энергия активации, эВ	$\lambda_{50c} / \lambda_{25c}$	$T_2, ^\circ\text{C}$
Si-n-p-n -транзистор	0,091	1,31	31
Si-p-n-p -транзистор	0,114	1,41	23
Ge-n-p-n -транзистор	0,191	1,78	15
Ge-p-n-p -транзистор	0,185	1,75	13
Полевой транзистор	0,100	1,35	27
Si-диод	0,184	1,74	18
Ge-диод	0,308	2,53	10
Диод Зенера	0,069	1,23	27
Тиристор	0,177	1,70	25
Si-микроволновый диод	0,034	1,10	31
Ge-микроволновый диод	0,041	1,13	20
Варактор, туннельный диод	0,100	1,35	27
Микроволновый транзистор (алюминиевая металлизация)	0,497	4,47	26
Оптоэлектронные приборы	0,322	2,64	10

Глава III. МИКРОМЕХАНИЗМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

I. Механизмы атомных перестроек типа "ЭВ→СА"

Возможность существенного влияния состояния электронной подсистемы на активационные процессы в кристаллической решетке следует из самых общих соображений. Это влияние обусловлено прежде всего изменением формы потенциального рельефа в зависимости от состояния электронной подсистемы. Экспериментальные исследования влияния электронных состояний на решеточные про-

цессы разнообразны. В них входят работы по фотолизу галогенидов серебра. Сейчас установлено, что процессы фотолиза тесно связаны с миграцией ионов, подвижность которых превышает подвижность дырок.

Принципиальное значение имеют работы по образованию центров окраски в щелочно-галогидных кристаллах [88]. Гипотеза Варли явилась развитием идеи Платзмана. Механизм Варли состоит в следующем:

1. Ионизация внутренней электронной оболочки аниона приводит в результате перезарядки к приобретению анионом положительного заряда.

2. Положительно заряженный галогид оказывается в электростатически неустойчивом положении и в результате тепловых колебаний выталкивается в междоузлие.

Основной вопрос, возникающий при обсуждении этого механизма, свелся к выяснению соотношения времени жизни многократно ионизованного состояния и эффективного периода атомных колебаний.

Подпороговыми механизмами называют механизмы образования, реализующиеся по схеме "ЭВ \rightarrow СА". При этом безызлучательные переходы энергии возбуждения электронной подсистемы кристалла на решетку происходят и без тепловой стадии. Важно при этом обосновать принципиальную возможность реализации подпороговых механизмов дефектообразования в разных типах твердых тел и выявить их возможные модификации. Исследования этих механизмов выходят за пределы радиационной физики твердого тела. Относящиеся сюда эффекты могут вызываться и нерадикационными воздействиями.

Рассмотрим общую схему подпороговых механизмов в предположении, что атомные смещения вызываются изменением состояния электронной подсистемы. Барьер ΔU определяется как разность потенциальных энергий ядер в седловой точке Q и в исходном равновесном положении P_0 : $\Delta U = U(Q) - U(P_0)$. В оба члена входят слагаемые, описывающие как отталкивание ($U_{от}$), так и притяжение ($U_{пр}$). $U_{от}$ и $U_{пр}$ могут быть обусловлены межатомными взаимодействиями различной природы. Например, в модели Вайзера барьер в кремнии определяется поляризационной

энергией притяжения и энергией отталкивания по Борну - Майеру.

Используя вычисленные эффективные адиабатические потенциалы для различных состояний химической связи в кристаллах, можно проанализировать изменения ΔU , обусловленные влиянием локализованных электронных возбуждений:

$$U(Q) = \sum U_{от}^i(Q) + \sum U_{пр}^i(Q),$$

$$U(P_0) = \sum U_{от}^i(P_0) + \sum U_{пр}^i(P_0).$$

Естественно ожидать существенной деформации потенциального барьера при локализации электронных возбуждений. В общем случае изменения состояния электронной подсистемы могут привести к уменьшению ΔU , к $\Delta U = 0$ и $\Delta U < 0$.

Обсудим принципы классификации подпороговых механизмов [87]. После изменения состояния электронной подпороговой системы ($\Psi_1 \rightarrow \Psi_2$) возникают локальные силы, стремящиеся привести ее в новое равновесное положение. Назовем условно эти силы экситонными. Далее введем время их действия τ_i' , необходимое для того, чтобы произошел элементарный процесс дефектообразования. Очевидно, должно быть $\tau_i > \tau_i'$ (τ_i - время жизни электронного возбуждения). Если $\tau_i' < T^*$ (где $T^* = 1/\nu^*$, ν^* - эффективная частота колебаний), происходит быстрое накопление импульса $\Delta P = \int_0^{\tau_i'} F dt$ как в процессе упругого рассеяния на атоме быстрой частицы.

Если время смещения атома τ_d , возможны два варианта: $\tau_d < T^*$ и $\tau_d > T^*$. Первый соответствует чисто ударному механизму [89], второй - локальному квазитепловому [90]. При $\tau_i' > T^*$

за время действия экситонных сил атом имеет возможность сместиться в междоузлие. В этом случае $\tau_d > T^*$ приводит к механизму потенциального смещения [91], а $\tau_d < T^*$ - к адиабатно-ударному [92]. Итак, представляется достаточно полной следующая классификация подпороговых механизмов.

1. $\tau_i, \tau_d < T^*$ (ударного типа).
2. $\tau_i < T^*, \tau_d > T^*$ (ударно-адиабатного типа).
3. $\tau_i > T^*, \tau_d > T^*$ (потенциальное смещение).
4. $\tau_i > T^*, \tau_d < T^*$ (адиабатно-ударного типа).

Необходимо уточнить вышеотмеченное условие $\tau_i > \tau_i'$. Для реализации этих механизмов (рис.2) существенно не полное время

жизни электронного возбуждения, а время жизни на данном узле (τ_e). Именно время τ_e определяет вероятность возникновения дефекта при релаксации неравновесной конфигурации, возникшей в результате электронного перехода. Таким образом, должно быть $\tau_i \geq \tau_i > \tau_i'$. Это условие может в принципе выполняться для всех типов твердых тел - в случае возбуждения внутренних (рентгеновских) оболочек, для полупроводников - в случае оптических возбуждений, локализованных на примесях и дефектах, для щелочно-галогидных кристаллов - в случае возникновения оптических дырок и экситонов в идеальной решетке.

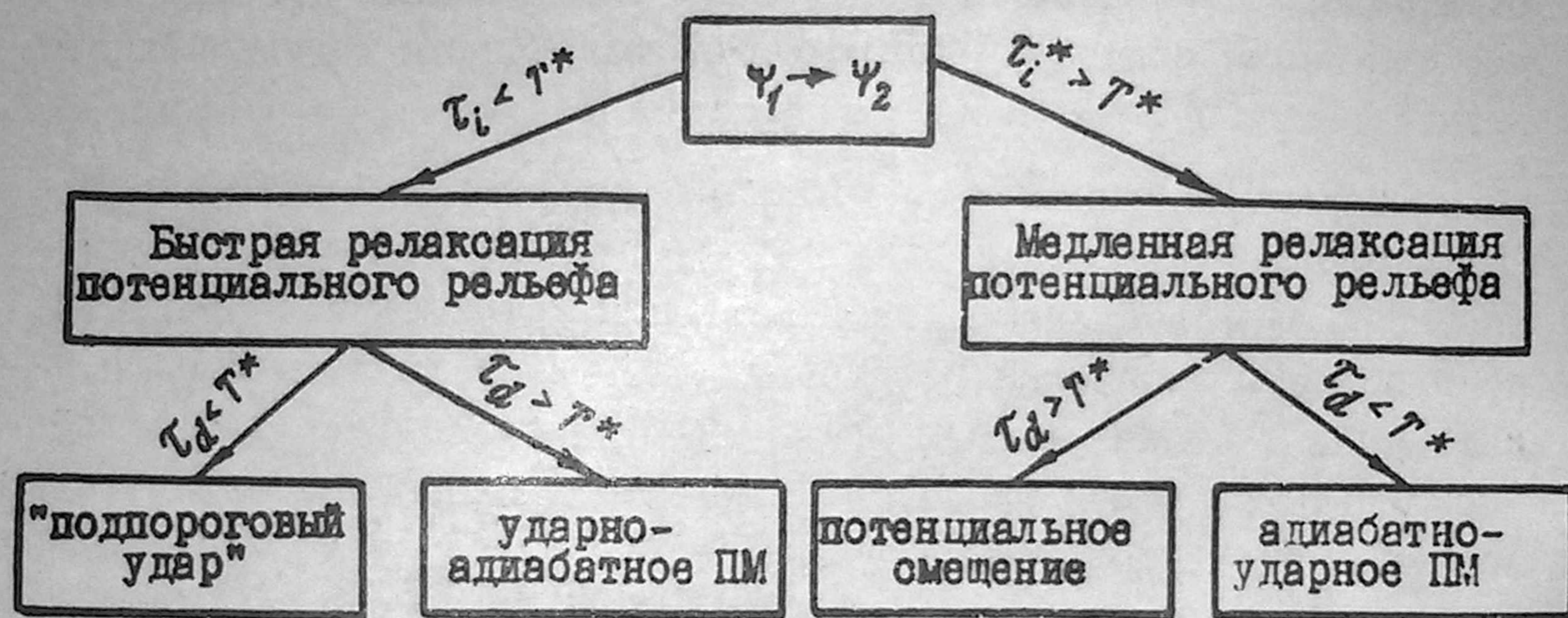


Рис. 2. Схема реализации подпороговых механизмов

Рассмотрим в качестве примера подпороговый удар в кремнии [87]. Пусть в кристалле кремния ионизована К-оболочка (электронный удар, фотоионизация и т.д.). После ионизации К-оболочки происходит один из вариантов Оже-релаксации, одна связь оказывается разорванной и реализуется перезарядка. Время жизни такого возбужденного состояния $\Delta t \leq 10^{-14}$ с. Под действием силы кулоновского отталкивания атомы смещаются; в течение времени $\Delta t \approx 10^{-15}$ с, как показывает расчет, накапливается импульс, обеспечивающий их ударный выход в междоузлия.

Проведем сначала ориентировочную оценку отрезка времени, необходимого для накопления атомами кинетической энергии [88]. Будем считать, что атомы взаимодействуют только по закону Кулона. Связи описываются с помощью рассчитанных эффективных адиабатических потенциалов. С изменением расстояния между ато-

мами от R_0 до R каждый из атомов приобретает кинетическую энергию

$$E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{R_0} - \frac{d}{R} \right),$$

где $d = Z^* \Delta Z$, Z^* - эффективный заряд атомного остова в кристалле кремния, $\Delta Z_{1,2}$ - приращения зарядов атомов в процессе Оже-ионизации, $\epsilon = 1$ - диэлектрическая проницаемость.

Обозначив через E_d энергию смещения в ударном процессе и $R - R_0 = \Delta R$, получим

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2F_d}{\frac{d}{R_0} - 2F_d}.$$

Оценим время Δt , за которое происходит смещение атомов на ΔR :

$$\frac{m}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{2d}{R_0} - \frac{2d}{R}.$$

Отсюда при $y = \Delta R$

$$2\sqrt{\frac{d}{mR_0}} \Delta t = \int_0^{R-R_0} dy \sqrt{1 + \frac{R_0}{y}}.$$

Окончательно

$$\Delta t = \sqrt{\frac{mR_0^3}{d}} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\sqrt{\frac{\Delta R}{R_0}} + \sqrt{\frac{R}{R_0}} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta R}{R_0}} \sqrt{\frac{R}{R_0}} \right].$$

Если $E_d \approx 10$ эВ, $\Delta R/R \approx 25$, каждый атом смещается на $\Delta x \approx \approx 0,125 R_0$ за $\Delta t \approx 10^{-14}$ с*.

На кластерной модели было проведено моделирование подпорогового удара. Расчеты проводились в динамическом варианте. Для сокращения процедуры траектория атомов полностью не рассчитывалась. С момента ионизации остова разрыв связи и включения кулоновской силы \bar{F}_1 начинается подсчет энергии, накапливаемой атомами в процессе смещения. Счет останавливался, когда оказывалось, что накопленная энергия $E > E_d$. Неравенство $E > E_d$ начинает выполняться при смещениях 0,015-0,020 нм и временах $\Delta t \approx 5 \cdot 10^{-15}$ с.

Смещение атомов под действием кулоновской силы \bar{F}_1 происходит несимметрично. Это обусловлено тем, что окружающие связи возмущены появлением на атомном остове дополнительного заряда ΔZ .

*В рассматриваемой конфигурации барьер для выхода атома из потенциальной ямы значительно понижен. Поэтому $\Delta t < 10^{-14}$ с.

Термы, описывающие возмущенные связи в области $R - R_0$, определяют отталкивание. В рассмотренном случае Оже-релаксации происходил разрыв одной связи. Однако возможны и другие варианты.

Приведенные результаты показывают, что в области пороговых энергий элементарный акт дефектообразования всегда определяется изменением состояния электронной подсистемы, характером перестройки химических связей. Это приводит к "эффекту демпфирования" [93]. Оказываются возможными конфигурации дефектов с неразорванными связями, изменяющими ориентацию.

В [87] описан цикл экспериментов по обнаружению неупругого дефектообразования в кремнии. При этом было принято во внимание, что важной характеристикой механизма дефектообразования является энергетическая зависимость радиационных изменений свойств кристаллов. Таким образом, для определения точной энергетической зависимости скорости дефектообразования желательно исследовать подпороговые радиационные эффекты с выполнением условия $\Delta E \ll E_0$, где ΔE - потери энергии при прохождении слоя, E_0 - энергия падающего электрона.

В [94] были исследованы монокристаллы кремния p -типа, легированные бором, с удельным сопротивлением $1-750 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Плотность дислокаций в исследованных образцах изменялась от 10^4 до 10^5 см^{-2} . Пластины кремния вырезались перпендикулярно к кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $4 \times 8 \times (0,3 + 0,2) \text{ мм}$.

Исследовались также эпитаксиальные слои кремния p -типа с сопротивлением $6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и плотностью фигур травления 10^6 см^{-2} . Подложкой служил высокоомный кремний n -типа с удельным сопротивлением $10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Исследовали набор пленок толщиной от 2 до 50 мкм. Использовали нанесенные электролитически палладиевые контакты. В опытах с эпитаксиальными слоями наряду с палладиевыми наносились контакты из индий-галлиевой пасты.

Образцы облучались электронами с энергией от 0 до 100 кэВ. Интенсивность потока варьировалась от 0,1 до 5 $\text{мкА}/\text{см}^2$. Эксперимент проводился в интервале температур от 90 до 400 К при вакууме $665 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$. Таким образом, радиационный эффект исследовался непосредственно после облучения при разных температу-

рах в высоком вакууме. Сопротивление образцов измерялось компенсационным методом Ван-дер-Пау.

Было установлено, что имеет место значительный радиационный эффект относительного изменения сопротивления ($\Delta R/R_0$) образцов $p-Si$, облученных при температуре жидкого азота. Был получен ряд результатов, указывающих на то, что наблюдавшиеся радиационные эффекты обусловлены нарушениями кристаллической решетки.

Скорость накопления радиационных изменений $\dot{\gamma} = \Delta R/R_0/\Phi$ (Φ — интегральный поток электронов) пропорциональна сечению области дефектообразования. Задача состояла в нахождении точной зависимости $\dot{\gamma}(E_0)$. Для толстых образцов ($\Delta E \sim E_0$) эта зависимость имеет характерный максимум и напоминает ионизационную кривую. В тонких пленках толщиной от 2 до 8 мкм было обнаружено смещение максимума энергетической зависимости скорости введения дефектов при изменении толщины пленки. При уменьшении толщины пленки максимум $\dot{\gamma}(E)$ смещается в сторону меньших энергий, экстраполяция к нулевой толщине приводит к значению энергии для максимума ~ 6 кэВ.

Без учета характера локализации радиационных дефектов, который следует из зависимости $\dot{\gamma}(E_0)$, невозможно сопоставление результатов по неупругому дефектообразованию в кремнии, полученных в экспериментах, подобных описанному.

Исследование новых дефектных конфигураций показывает, что в случае подпорогового дефектообразования А-центры могут не создаваться и, следовательно, их проявление в спектрах электронного парамагнитного резонанса не является дискриминирующим условием для определения реальности подпорогового дефектообразования. Наиболее вероятным механизмом образования структурных дефектов в кремнии является "подпороговый удар". Механизмы потенциального смещения в алмазных структурах не реализуются, поскольку они перекрываются ударными механизмами, обеспечивающими смещение атомов при условии $\tau_i' < T^*$. Можно полагать, что именно благодаря этому обстоятельству подпороговое дефектообразование оказалось возможным в алмазоподобных кристаллах.

В результате смещения атомов по механизму "подпорогового удара" может возникнуть метастабильная конфигурация, представ-

ляющая собой дивакансию или моновакансию с одной разорванной связью. Такой дефект, в отличие от вакансии, не образует А-центра и не проявляется в спектре электронного парамагнитного резонанса. В [87] подпороговое дефектообразование исследовано путем непосредственного наблюдения структурных дефектов. Кристаллы CdS подвергались воздействию γ - и рентгеновских лучей, электронов с энергией до 100 кэВ и реакторного излучения. Оказалось, что при указанных радиационных воздействиях происходит порча поверхности кристаллов, причем одинакового эффекта удавалось добиться при воздействии жесткого излучения и низкоэнергетичного подпорогового излучения. Впоследствии выяснилось, что радиационная порча поверхности обусловлена выходом из объема смещенных атомов кадмия. Этот факт получил подтверждение при исследовании накапливающегося на поверхности вещества методом угольных реплик и нейтронно-активационного анализа.

Таким образом, было установлено, что под действием низкоэнергетичных излучений в CdS происходит образование и миграция точечных дефектов. Кристаллы CdS относятся к широкозонным полупроводникам. Подпороговые механизмы в этом случае могут относиться к категории механизмов потенциального смещения. В кристаллах с преобладанием ионного характера химической связи условия для "подпорогового удара" неблагоприятны. Реальным для кристаллов CdS является механизм потенциального смещения, предложенный В.Л.Винецким [12]. В кристаллах с широкой запрещенной зоной дефекты образуются за счет энергии, выделяющейся при локализации носителей тока или экситона. Для реализации элементарного акта необходимо, чтобы одновременно с локализацией носителя произошла небольшая тепловая флуктуация, которая добавила бы необходимую для дефектообразования энергию. Микроскопическое исследование такого безызлучательного перехода проведено Э.И.Адировичем [95].

Принципиальное значение имеют результаты, полученные при изучении подпороговых радиационных дефектов в InSb . Кристаллы InSb относятся к узкозонным полупроводникам, и оптические возбуждения не могут обеспечить энергетические условия, необходимые для дефектообразования. Поэтому в InSb наиболее вероятна реализация подпорогового механизма в виде "подпорогового удара."

Кристаллы InSb облучались рентгеновскими лучами с энергией 55 и 250 кэВ (ниже пороговой) при 77 К. В результате облучения в кристаллах p -типа наблюдалось возрастание концентрации дырок. Отжиг радиационного дефекта происходил при 100 К. В этой же области отжигаются дефекты, созданные γ -облучением. В рассматриваемых экспериментах доказано, что упомянутые радиационные эффекты не могут быть обусловлены процессами перезарядки в объеме или на поверхности. Образование точечных дефектов приводит к дезактивации ранее существовавших доноров и акцепторов (уменьшение N_d и N_a). Одновременно, но с меньшей скоростью, вводятся дефекты с акцепторным уровнем $E_v + 17$ мэВ.

С точки зрения развитых выше представлений весьма интересны работы по фотохимическим реакциям в кристаллах CdS [80]. Установлены следующие особенности фотохимических реакций:

- а) они требуют термической активации;
- б) концентрация образующихся центров в области 150–250 К при длительном освещении не зависит от температуры;
- в) образование новых центров происходит не в идеальной решетке;
- г) необходимо присутствие одного из свободных носителей.

Здесь имеются в виду фотохимические реакции, приводящие к возникновению γ -центров рекомбинации и образованию новых центров прилипания.

При интерпретации этих результатов предполагается, что в исходном состоянии γ -центр и мелкий донор объединены в донорно-акцепторную пару. В результате захвата свободной дырки происходит нейтрализация γ -центра и исчезает кулоновское притяжение между этим центром и мелким донором (предположительно междоузельным атомом кадмия). Далее в процессе низкотемпературной миграции эти компоненты разделяются.

2. Радиационно-стимулированные процессы и характерные спектры ЭВ в работающих приборах

Описанные механизмы типа " $\text{ЭВ} \rightarrow \text{СА}$ " определяют большой класс радиационно-стимулированных квазихимических реакций в твердых телах и прежде всего радиационно-стимулированную диффу-

зию (РСД). Рассмотрим в общих чертах некоторые особенности РСД на основе соображений Дамаока - Гиббонса [74].

Коэффициент диффузии примесей $D(x)$ складывается из двух частей D_{te} и $D^*(x)$, одна из которых соответствует обычной тепловой диффузии, другая - усиленной радиационными дефектами:

$$D(x) = D_{te} + D^*(x). \quad (6)$$

Если для собственных атомов кристалла обозначить все эти величины значком S , то можно записать:

$$D_S(x) = D_{S-te} + D_S^*(x). \quad (7)$$

Далее используется положение, согласно которому в каждой точке коэффициент диффузии пропорционален локальной плотности дефектов:

$$\frac{D(x)}{D_{te}} = \frac{D_S(x)}{D_{S-te}}. \quad (8)$$

Обозначив коэффициент диффузии радиационных дефектов D_d , запишем соотношение:

$$D_S^*(x) = n_d^*(x) D_d. \quad (9)$$

Из (6)-(9) получим:

$$D(x) = D_{te} + \frac{D_{te}}{D_{S-te}} n_d^*(x) D_d. \quad (10)$$

Здесь n_d^* - решение уравнения непрерывности для плотности дефектов:

$$\frac{\partial n_d^*}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 n_d^*}{\partial x^2} + G(x) - \frac{n_d^*}{\tau_d},$$

где τ_d - время жизни дефектов, $G(x)$ - скорость генерации дефектов $G(x) \sim J(x) \sigma_d$; $J(x)$ - плотность потока бомбардирующих частиц, σ_d - сечение дефектообразования.

Отсюда следует, что в случае РСД можно снизить температуру диффузионной обработки материала. Это снижение компенсируется вторым членом в (10). Следовательно, эффект РСД в значительной степени зависит от избытка дефектов. Для выявления температурной зависимости $D(x)$ положим в (10) $D_{te} \approx D_{S-te} \approx D_d$. Тогда учитывая, что $\tau_d = \tau_d^0 \exp[-E_0/kT]$,

получим

$$D_d = D_d^0 \exp[-(E_d/kT)], \quad (II)$$

где $E_{отж}$ - энергия активации отжига, E_m - энергия миграции дефекта. Из (II) получим:

$$D(x) \approx D_d^0 \exp[-(E_d/kT)] \{1 + K_d \tau_d^0 \exp[-(E_d/kT)]\}. \quad (I2)$$

Формула (9) показывает, что при $T \rightarrow \infty$ радиационная добавка исчезает. При $T \rightarrow 0$ радиационные дефекты не отжигаются, однако они и не движутся в силу стремления к нулю первого множителя. Оптимальной с точки зрения РСД является некая промежуточная область температур 500-800°C (диффузия вакансионных примесей в полупроводниках проводится при 1200 - 1500°C). Второй член в скобках (I2) намного превосходит единицу, и если $E_0 \approx E_d$, то коэффициент диффузии $D(x)$ оказывается температурно не зависящим.

Механизмы РСД могут проявиться, как уже отмечалось, при генерации элементарных возбуждений в кристаллах. Воздействие ионизирующей радиации (не вызывающей образования структурных дефектов) приводит вместе с тем к возникновению в кристаллах различного типа электронных и решеточных возбуждений: неравновесных носителей заряда, возбужденных и разорванных связей, локальных зарядов, постоянно перезаряжающихся в поле излучений атомов, кристаллических экситонов, плазмонов, локальных фононов, которые могут существенно изменить элементарный акт и обусловить принципиально новую его разновидность.

Необходимо подчеркнуть, что наряду с исследованием влияния разных факторов (в том числе возбуждений электронной подсистемы на термофлуктуационный элементарный акт) рассматривается элементарный акт нетермической и вместе с тем некантовой природы. Это влияние в металлах и полупроводниках исследовалось, например, в связи с явлением электропереноса. Исследования проводились в Советском Союзе (П.Л.Грузин, П.П.Кузьменко, И.Н.Францевич и др.), а также в других странах (В.Веффер, Е.Хафнер, А.Клемм и др.). Теоретические представления, объясняющие

вою совокупность известных экспериментальных данных, развиты В.Б.Фиксом [23]. Последовательный учет электрон-решеточных взаимодействий оказался эффективным методом решения проблемы электропереноса в металлах и полупроводниках. При этом, как отмечено в [23], оказались связанными процессы электронной проводимости и диффузии, протекающие в электронной и решеточной подсистемах и изучавшиеся ранее независимо.

Исследование влияния электронной подсистемы на ионную проводимость кристаллов привело к модели электронного "ветра", так что сила, действующая на ион, представляется суммой

$$\vec{F}_i = z\vec{E} + \vec{F}_{ni},$$

где z - заряд иона, \vec{E} - внешнее поле, \vec{F}_{ni} - сила электронного "ветра".

$$D = \frac{1}{2} \sum_j a_j^2 \cos^2 \psi_j W_{ja},$$

где W_{jo} - вероятность "перескока" (в I с) по направлению, составляющему угол ψ_j с направлением диффузии, a_j - длина скачка.

Изучение процесса передачи импульса от рассеянного электрона центру рассеяния в решетке привело к объяснению таких явлений, как увлечение ионов электронами, электрокинетические явления и др.

Характерно то, что увлечение ионов электронами существенно проявляется и в полупроводниках, в которых концентрация носителей на несколько порядков меньше, чем в металлах. Это связано с тем, что в полупроводниках электроны обладают меньшими тепловыми скоростями, а следовательно, их сечения рассеяния могут быть весьма велики. Такая ситуация возникает в полупроводниках с большой подвижностью носителей, малой диэлектрической постоянной и небольшой шириной запрещенной зоны (Ge, Si, InSb, InAs).

Анализ имеющихся экспериментальных данных [23] привел к выводу, что заряд активированного иона может заметно отличаться от "нормального". Заряд является кинетическим, а не термодинамическим параметром.

Нахождение спектра ЭВ в работающем приборе позволяет через механизмы РСД и "ЭВ → СА" перейти к процессам деградации

приборов. В качестве примера рассмотрим $p-n-p$ -транзистор.

Несмотря на то, что дырочная составляющая тока эмиттера много больше электронной составляющей ($I_{ep} \gg I_{en}$), диффузия электронов из базы в эмиттер дает достаточную для естественного старения скорость рекомбинационно-стимулированных процессов. Одновременно эти процессы протекают в базе прибора. Как известно, центры рекомбинации, представляющие собой дефектно-примесные комплексы, претерпевают существенные изменения под влиянием энергии рекомбинации [96].

Можно усилить рекомбинационно-стимулированные процессы действием ионизирующей радиации, генерирующей дополнительную концентрацию электронов в базе. Таким воздействием эти процессы можно вызвать и в транзисторе, не подключенном к внешней цепи. Указанные активационные процессы идут за счет ЭВ с энергией порядка энергии перехода "зона-зона" (ϵ_n).

При обратном смещении коллекторного перехода работающего транзистора в переходе возникают электрические поля, достаточные для ускорения диффузии ионизированных примесей при рабочих температурах [97]. Флуктуирующие электрические поля, вызывающие миграцию примесей, появляются в результате перезарядки дефектно-примесных комплексов излучением с энергией $\epsilon < \epsilon_n$. Такое излучение способно инициировать процессы естественного старения, близкие к тем, которые имеют место в коллекторе работающего прибора. Излучение такой же энергии переводит электроны дефектно-примесных комплексов из основного состояния на антисвязывающие орбиты, вызывая атомные перестройки по механизму деформации потенциального барьера [98].

На основании проведенного анализа приходим к выводу, что адекватное моделирование микромеханизмов естественного старения требует применения внешних воздействий, которые приводили бы к результатам, обусловленным структурными изменениями в приборе при таком старении. Ясно, что естественное старение вызывается структурными изменениями прибора двух типов: деформацией диффузионных профилей, изменением спектра уровней дефектно-примесных комплексов.

Применение низкоэнергетических ионизирующих излучений - наиболее удобный способ селективного попадания в область ЭВ,

вызывающего определенные процессы естественного старения. Менее удобен способ ограниченных тепловых воздействий, который, однако, тоже дает при соблюдении строгих условий [19] структурные изменения в приборе указанных типов.

Применение ионизирующих излучений для ускорения естественного старения требует знания "действующих спектров", нахождение которых уделяется в последнее время большое внимание [99].

Для светоизлучающих диодов задача ускорения ЕС обсуждалась с близких позиций [49]. При этом показано, что внутренняя генерация ЭВ связана с физическими процессами в приборе при нормальных условиях эксплуатации и хранения.

3. Возможности машинного моделирования естественного старения

В последнее время для расчета параметров полупроводниковых приборов интенсивно используются ЭВМ. Достоинством машинных расчетов является возможность быстрой обработки данных, решение систем уравнений и др. Перспективно направление, использующее вычислительные машины не для вычислений, а для так называемых машинных экспериментов, результаты которых не всегда можно предвидеть. Примером такого рода машинных экспериментов являются работы [100, 101]. В [100] приведены результаты расчета статических характеристик одномерных транзисторных структур. Работа [101] посвящена моделированию частотных и переходных характеристик.

Исходная система уравнений, описывающих стационарные физические процессы в одномерной полупроводниковой структуре, приводится в [100]:

$$J_p = -qN_v \mu_p(x) F_p(\varphi_p, \psi) \frac{\partial \varphi_p}{\partial x},$$

$$J_n = -qN_c \mu_n(x) F_n(\varphi_n, \psi) \frac{\partial \varphi_n}{\partial x},$$

$$J = J_p + J_n,$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + qR = 0,$$

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - qR = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon} [N_V F_p(\Psi_p, \Psi) - N_C F_n(\Psi_n, \Psi) + N(x)],$$

где $\mu_p(x), \mu_n(x)$ - подвижность дырок и электронов; q - заряд электрона; ϵ - диэлектрическая проницаемость; N_V, N_C - эффективные плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости; $\Psi_p(x), \Psi_n(x)$ - квазипотенциалы Ферми для дырок и электронов, связанные с концентрациями через уравнения статистики Ферми; $\Psi(x)$ - электростатический потенциал; $F_p(\Psi_p, \Psi), F_n(\Psi_n, \Psi)$ - интегралы Ферми; $N(x)$ - концентрация примесных атомов; R - скорость генерации - рекомбинации носителей заряда.

Модели, основанные на решении столь общих уравнений, имеют широкую сферу применения и требуют знания электрофизических параметров и, в частности, параметров примеси при различных сочетаниях внешних условий.

Эффективно применение метода машинного моделирования при исследовании долговременной эволюции прибора - его естественного старения. В [87] описан алгоритм машинного моделирования процессов естественного старения кремниевого транзистора. Электронные возбуждения, рождаемые радиационным (Р) или нерadiационным (НР) путем, активируют процессы трех типов (рис.3). В большинстве случаев процессы первого типа являют-

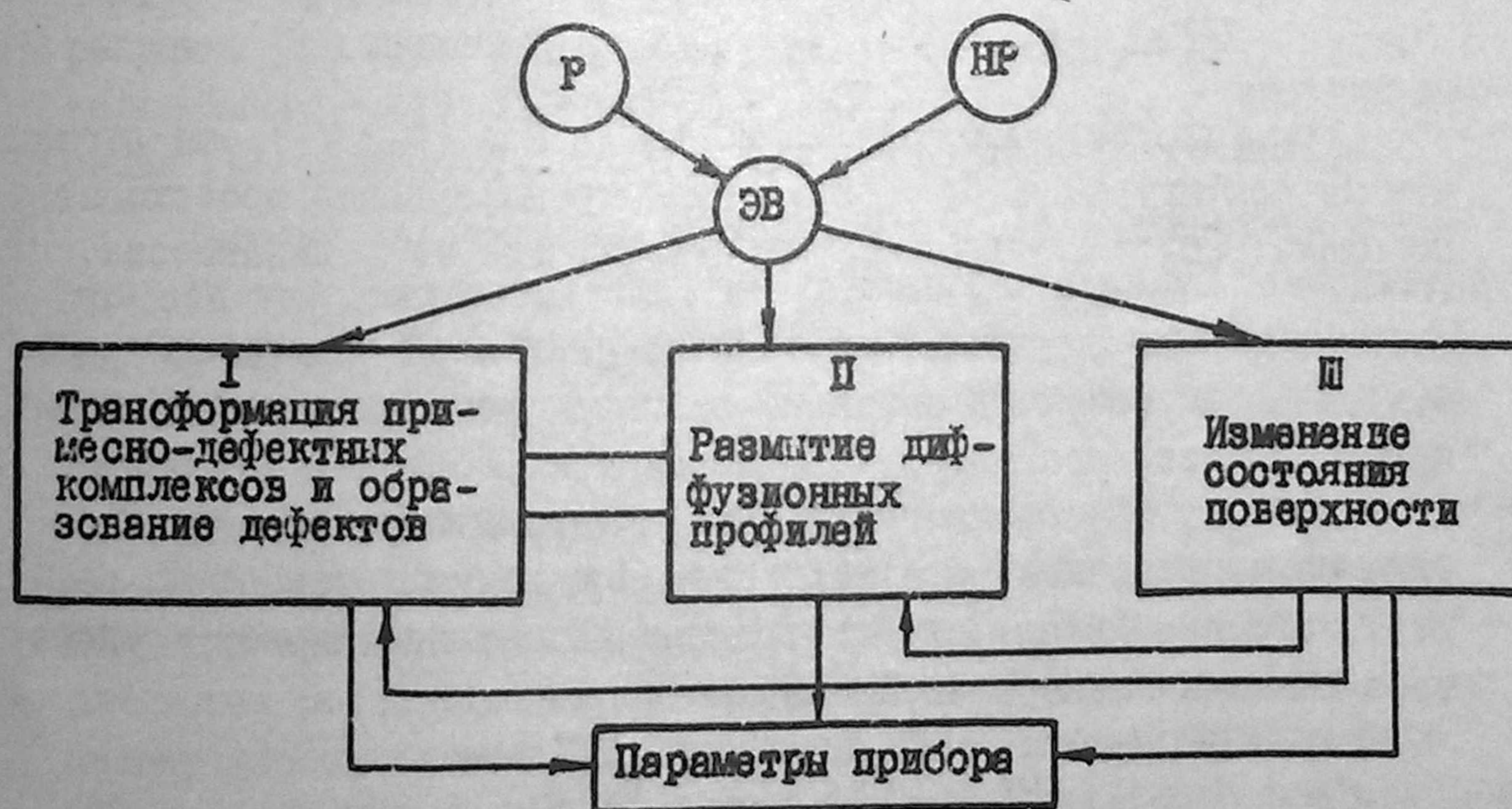
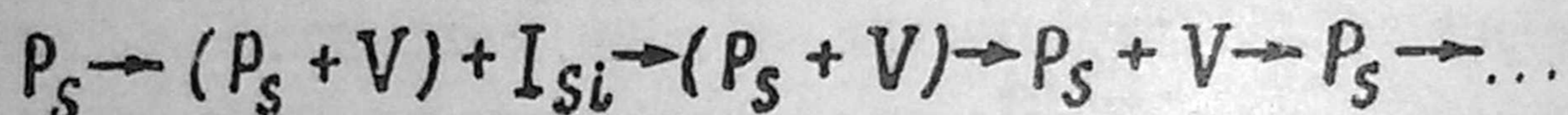


Рис.3. Схема алгоритма естественного старения кремниевых транзисторов

ся определяющими в процессах естественного старения. Поэтому остановимся на их моделировании более подробно. Рассмотрим Si - n - p - n - транзистор, полученный введением легирующих примесей бора и фосфора.

Квантово-химическое моделирование динамики собственных атомов кремния вблизи указанных примесей позволило выяснить следующие закономерности их поведения:

1. При комнатных температурах бор и фосфор занимают положения замещения (B_S и P_S). Повышение температуры до 400 - 500 К переводит фосфор в комплексы с вакансией, генерируя разделенную пару Франкеля. Дальнейшее повышение температуры активирует реориентацию E-центра ($P_S + V$) с "выбросом" вакансии в кристалл и повторным рождением генетически связанной с фосфором вакансии. Схема процесса такова:



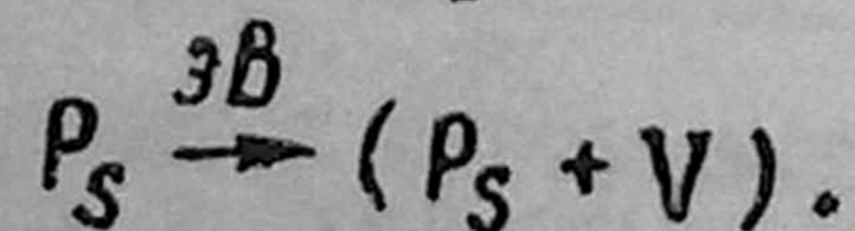
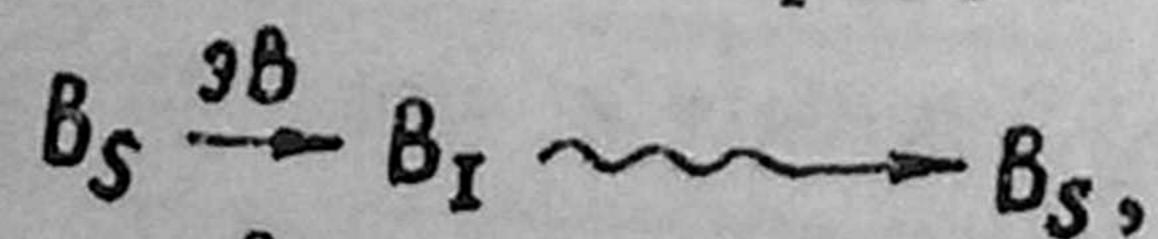
Здесь I_{Si} - собственный междоузельный атом.

2. При этих же температурах бор смещается по направлению к междоузлию B_I , образуя с оставшейся на месте B_S вакансией комплекс ($B_I + V$). Последний неустойчив при ≈ 450 К относительно перехода в комплекс ($B_S + V$) с рождением I_{Si} :



Бор выходит в междоузлие из комплекса ($B_S + V$) еще легче, чем из конфигурации B_S . Дальнейшая трансформация происходит по схеме: $(B_S + V) + I_{Si} \rightarrow B_I + VV + I_{Si}$, где VV - дивакансия.

3. В поле радиации, эффективно рождающей электронные возбуждения или точечные дефекты, процессы перелокализации упомянутых примесей несколько модифицируются. Локализуясь вблизи B_S и P_S , ЭВ обеспечивают нетермический переход $B_S \rightarrow B_I$ (для бора) с последующей миграцией B_I по междоузлиям до захвата на стоки. В случае фосфора при достаточно низкой температуре возможна генерация E-центров:



\rightsquigarrow длиннопробежная миграция.

С учетом описанных закономерностей проведения бора и фосфора кинетические уравнения преобразуются:

$$\frac{\partial [P_S]}{\partial t} = -\alpha_8 [P_S] - \alpha_2 [P_S][V] + \alpha_5 [E][I_{Si}] + \alpha_7 [E] \quad (I3)$$

$$\frac{\partial [E]}{\partial t} = \alpha_8 [P_S] + \alpha_2 [P_S][V] + \alpha_5 [E][I_{Si}] - \alpha_7 [E] \quad (I4)$$

$$\frac{\partial [B_S]}{\partial t} = -\alpha_1 [B_S] - \alpha_2 [B_S][V] + \alpha_6 [B_I][V] + \alpha_5 [B_S+V][I_{Si}] \quad (I5)$$

$$\frac{\partial [B_I+V]}{\partial t} = \alpha_1 [B_S] - \alpha_3 [B_I+V] + \alpha_4 [B_S+V] - \alpha_5 [B_I+V][I_{Si}] - \alpha_9 [B_I+V] \quad (I6)$$

$$\frac{\partial [B_S+V]}{\partial t} = \alpha_2 [B_S][V] + \alpha_3 [B_I+V] + \alpha_5 [B_S+V][I_{Si}] \quad (I7)$$

$$\frac{\partial [B_I]}{\partial t} = \alpha_5 [B_I+V][I_{Si}] - \alpha_6 [B_I][V] + \alpha_9 [B_I+V] \quad (I8)$$

$$\frac{\partial [V]}{\partial t} = \alpha_4 [B_S+V] - \alpha_2 [B_S][V] - \alpha_6 [B_I][V] - \alpha_2 [P_S][V] + \alpha_7 [E] + \alpha_9 [B_I+V] \quad (I9)$$

$$\frac{\partial [I_{Si}]}{\partial t} = \alpha_3 [B_I+V] - \alpha_5 [B_I+V][I_{Si}] + \alpha_8 [P_S] + \alpha_5 [E][I_{Si}], \quad (20)$$




где $[]$ - концентрация компонента, указанного в скобках; α_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) - коэффициенты скорости соответствующей реакции. При линейных членах $\alpha_i = \nu \exp(-E_z^i/kT)$, при нелинейных - $\alpha_i = a^3 \nu \exp(-E_{m,z}^i/kT)$. Здесь $E_{m,z}^i$ - энергия миграции (m) или диссоциации (z) i -го дефектного центра.

Систему кинетических уравнений решали градиентным методом при энергиях активации, приведенных в табл.8. Температура варьировалась от 210 до 420 К. Успех этого метода зависит от удачного определения кинетических коэффициентов в записанной системе.

Анализ результатов привел к некоторым общим закономерностям кинетики накопления рекомбинационных центров в активных областях кремниевых транзисторов (рис.4). Во всех случаях наблюдается рост и насыщение концентрации E -центров (рис.5), междоузельных атомов (2), вакансий (7), междоузельного бора (6) и комплекса B_S+V (2). Концентрация узельного фосфора при этом уменьшается незначительно (1).

Следовательно, при низких температурах в нормальном режиме эксплуатации или при хранении приборов процессы естествен-

Расшифровка реакций, входящих в систему уравнений

Номер уравнения	Рекомбинационный центр	Начальная концентрация, см ⁻³	Реакция	Энергия активации, эВ
(13)	[P _в]	10 ²⁰	P _в → (P _в + V)	0,6-0,8
(14)	[E]	10 ¹³ -10 ¹⁶	(P _в + V) → P _в + V	0,97-1,37
(15)	[B _в]	10 ¹⁸	B _в → (B _х + V)	0,3-0,5
(16)	[B ₁ + V]	10 ¹³ -10 ¹⁴	(B ₁ +V) → B ₁ +V	0,6-0,8
(17)	[B _в + V]	10 ¹³	(B _в +V) → (B ₁ +V)+V	0,6-0,8
(18)	[B ₁]	10 ¹³	B ₁ 	0,3-0,9
(19)	[V]	10 ¹²	V 	0,1-0,9
(20)	[I _{Si}]	10 ¹²	I _{Si} 	0,1-0,9

* Волнистая стрелка означает миграцию компонента к стокам.

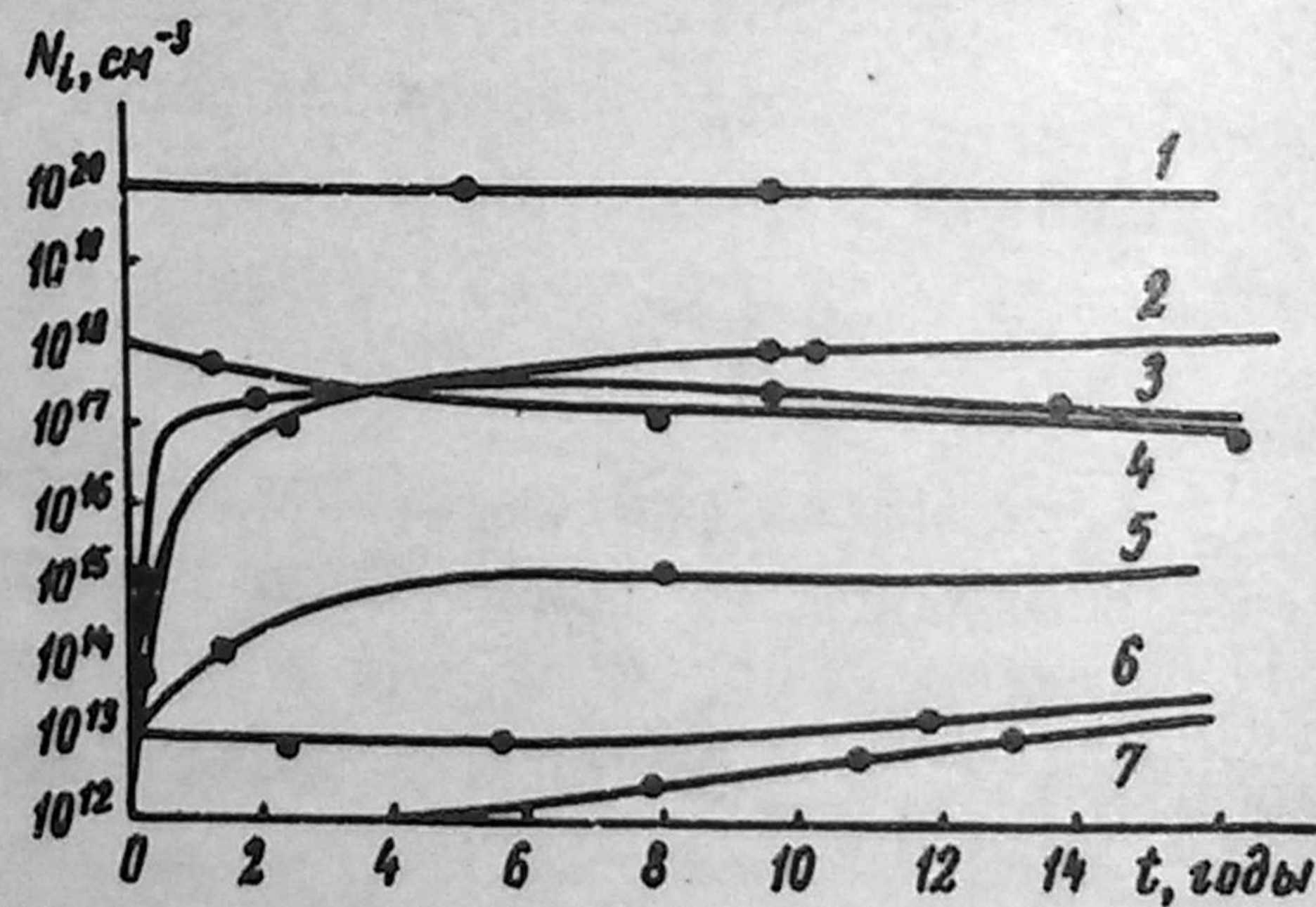


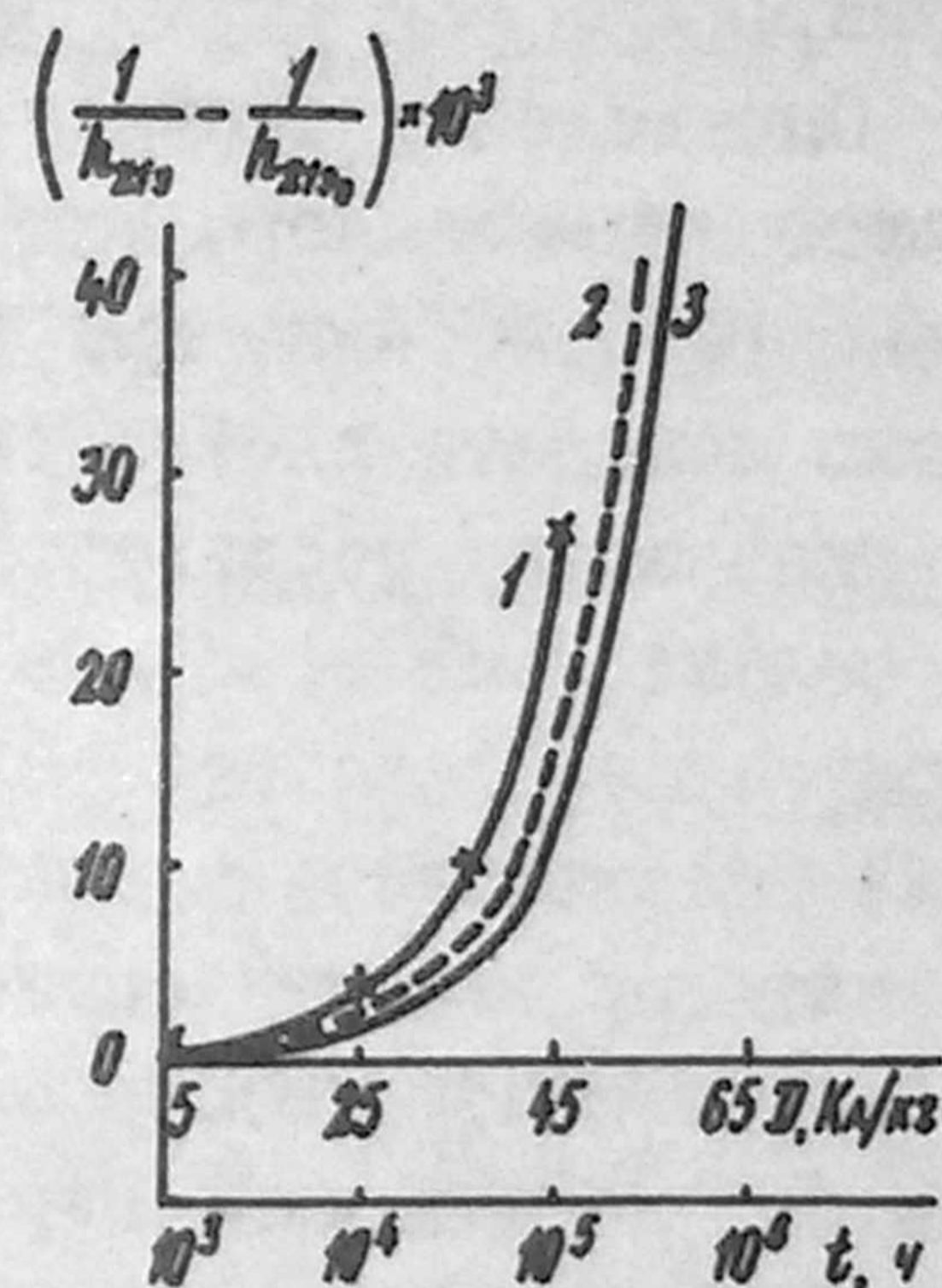
Рис. 4. Кинетика накопления дефектных комплексов в кремнии при 300 К:
 1 - [P_в]; 2 - [B_в+V], [I_{Si}]; 3 - [B₁+V]; 4 - [B_в];
 5 - [E]; 6 - [B₁]; 7 - [V]

ного старения могут происходить в результате генерации вблизи примесных атомов точечных дефектов. Эти дефекты, в свою очередь, определяют большинство квазихимических реакций, трансформацию центров рекомбинации.

Процессы "размытия" диффузионных профилей описываются как краевые задачи с коэффициентами диффузии, характерными для механизмов "ЭВ → СА". Учет влияния поверхности проводится по двум каналам: перезарядке и генерации дефектов, идущих в объем прибора.

Получены кинетические кривые экспериментальной стимуляции процессов естественного старения при γ -облучении, машинного моделирования естественного старения и естественного старения, имевшего место при практическом использовании приборов (рис.5) [102]. Сверхлинейная кинетика в машинном моделировании получена вследствие перераспределения уровней при перестройке примесь-дефектных комплексов. Действие радиации также привело к кинетике, близкой к наблюдавшейся в [102].

Рис.5. Дegrадация статического коэффициента передачи тока биполярных кремниевых транзисторов при γ -излучении (кривая 1), естественном старении (кривая 3). Кривая 2 - результат машинного моделирования



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Естественное старение полупроводниковых приборов может определяться действием механизмов, обусловленных конкретными электрон-решеточными взаимодействиями. Эти механизмы специфичны для каждого типа приборов и проявляются в зависимости от функциональных особенностей прибора и режимов их эксплуатации. Однако в их основе всегда лежат безызлучательные переходы энергии возбуждения электронной подсистемы на кристаллическую решетку. Возбуждения электронной подсистемы могут вызываться внешними воздействиями (например, в фотоэлектрических приборах), внутренними источниками (в светоизлучающих приборах), а также внутренними процессами, протекающими в нормально функциониру-

щем приборе (в транзисторах, МДП-структурах различных типов и др.). Последний случай представляет особый интерес. Таким образом, выяснение механизмов естественного старения невозможно без определения спектра электронных возбуждений в нормально функционирующем приборе.

Приведенные в настоящем обзоре данные показывают, что до сих пор не уделялось серьезного внимания изучению динамики активных центров в ходе нормальной эксплуатации прибора. Именно эти процессы могут оказывать определяющее влияние на механизмы естественного старения приборов. Имеющиеся результаты относятся в основном к конечным, усредненным характеристикам приборов, в то время как задача состоит в изучении долговременной кинетики параметров приборов в условиях нормальной эксплуатации.

Определение ресурса приборов возможно путем экспериментального и машинного моделирования возможных механизмов естественного старения. При экспериментальном моделировании необходимо повышать плотность электронных возбуждений в спектральном диапазоне, соответствующем спектру работающего прибора. Такое селективное возбуждение электронной подсистемы кристалла достигается воздействием низкоэнергетической радиации. Можно также использовать высокоэнергетическую радиацию, приводящую к адекватному эффекту естественного старения. При машинном моделировании имитируются возможные механизмы с целью выбора вариантов, дающих кинетику естественного старения, наблюдающуюся на практике.

Совместное применение перечисленных методов позволяет оценить ресурс каждого конкретного типа приборов относительно естественного старения.

Л и т е р а т у р а

1. Беккер П., Йенсен Ф. Проектирование надежных электронных схем. Пер. с англ. /Под ред. И.А.Ушакова. - М.: Сов радио, 1977, - 256 с.
2. Физические основы надежности интегральных схем. /Под ред. Ю.Г.Миллера. - М.: Сов.радио, 1976. - 320 с.
3. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества надежности. - М.: Сов.радио, 1965. - 316 с.
4. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. - М.: Радио и связь, 1982. - 224 с.

5. Rosen R. Feedforwards a global system failure: a general mechanism for senescence.- J.Theor.Biol., 1978, v.74, N 4, p.579.
6. Abernethy J.D. The Exponential increase in mortality rate with age. - J.Theor. Biol.1979, v.80, N 3, p.333.
7. Березовский В.А., Бойков К.А., Клименко К.С. Гипоксия и индивидуальные особенности реактивности. - Киев: Наукова думка, 1978. - 320 с.
8. Анохин П.К. Методологическое значение кибернетических закономерностей. - В кн.: Материалистическая диалектика и методы естественных наук. - М.: Наука, 1968- 24 с.
9. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Статистическое взаимодействие электронов и дефектов в полупроводниках. - Киев: Наукова думка, 1969. - 286 с.
10. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Атомиздат, 1969.- 312 с.
11. Коноплева Р.Ф., Литвинов В.А., Ухин Н.А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. - М.: Атомиздат, 1971. - 283 с.
12. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. - Киев: Наукова думка, 1979. - 332 с.
13. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. - Минск: Наука и техника, 1978. - 232 с.
14. Легирование полупроводников методами ядерных реакций. Под ред. Л.С.Смирнова. - Новосибирск: Наука, 1981. - 181 с.
15. Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. - М.: Атомиздат, 1975. - 128 с.
16. Cosmetic defects in CCD imagers./ L.Jastrebski, P.A.Levine, W.A.Fisher e.a.- J.Electrochem.Soc., 1981, v.128, N 4, p.885-892.
17. Вопросы радиационной технологии полупроводников. /Под ред. Л.С.Смирнова. - Новосибирск: Наука, 1980.- 296 с.
18. Птащенко А.А. Деграция светоизлучающих диодов (обзор).- Журнал прикладной спектроскопии, 1980, т. XXXIII, вып.5, с.781-803.
19. Кив А.Е., Соловьев В.Н. Примесные комплексы - генераторы дефектов. - ФТТ, т.22, в.9, с.2575-2577.
20. Болтакс Б.И. Процессы диффузии в полупроводниках и деграция полупроводниковых структур. - Ученые записки Тартусского государственного университета, 1976, вып.379, с.3-19.

21. Акопян А.С., Акопян Г.К., Шатахян П.М. К вопросу старения полупроводниковых приборов. - Межвузовский сборник трудов Ереванского политехнического института. Радиотехника и электроника, 1980, вып.4, с.82-86.
22. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. - Л.: Наука, 1972.
23. Фикс В.Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. - М.: Наука, 1969. - 296 с.
24. Слайдиньш И.Я. Причины нестабильности коэффициента передачи тока планарных транзисторов. - В кн.: Тез.докл. Всесоюзного научно-технического семинара "Развитие, внедрение, эксплуатация средств связи". - Рига, 1980, с.106-107.
25. Кроуфорд Р. Схемные применения МОП-транзисторов. Пер.с англ.- М.: Мир, 1970.
26. Cottrell P.E., Troutman R.R., Ning T.H. Hot-electron emission in n-channel IGFET's. - IEEE. - J.Solid-State Circuits, 1979, SC-14, p.442-455.
27. Davis J.R., B.Sc., M.S. Degradation behaviour of n-channel MOSFET's operated at 77K.- IEE Proc., 1980, v.127, Pt.1, N 4, p.183-187.
28. Kimerling L.C. Recombination enhanced defect reaction.- Solid-State Electronics, 1978, v.21, p.1391-1401.
29. Приборы с зарядовой связью: Пер.с англ. Под ред.М.Хоувза и Д.Моргана. - М.: Энергоиздат, 1981, - 376 с.
30. McNutt M.J., Meyer W.E. Bulk impurity charge trapping in buried channel charge coupled devices.- J.Electrochem.Soc., 1981, v.128, N 4, 892-896.
31. Schnable G.L., Comizzoli R.B. CMOS integrated circuit reliability.- Microelectron Reliab., 1981, v.21, N 1, p.33-50.
32. VMOS reliability/ J.R.Edwards, E.Fuller, G.Allman, M.L. Malwah. - In: 16th Ann.Proc.Reliab.Phys., 1978, p.23-27.
33. Kasouf G., Mercurio S. Evaluation of LSI/MSI reliability models.- In: 1978 Proc.Ann.Reliab. Maint.Symp., p.443-446.
34. Rosenberg S., Crook D., Euzent B. H-MOS reliability. - In: 16th Ann.Proc.Reliab.Phys., 1978, p.19-22.
35. Hnatek E.R. Microprocessor device reliability.- Microelectron. Reliab, 1978, v.17, N 3, p.379-385.
36. Mostek Reliability Report-4096-Bit Random Access Memories.- Mostek Corp., Carrollton, TX, Jan., 1977.
37. Microprocessor Reliability Data. - Mostek Corp. Quality.- Reliability assurance Report No RE-0115, Mostek Corp., Carrollton, TX, Feb., 1977.

38. Texas Instruments TMS Series Single-Chip Microcomputers.- Reliability Report, Texas Instruments, Inc., Houston, Texas, 1977.
39. Pascoe B. 8080/8080A Microcomputer. - In.: Intel Reliability Report RR-10, Intel Corp., Santa Clara, CA, 1976.
40. McCullough D.T., Lane C.H., Bloke R.A. Reliability of EOS screened gold doped 4002 CMOS devices electrical overstress.- In.: Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1980, p.41-44.
41. Schnable G.L., Gallace L.J., Pujol H. Reliability of CMOS integrated circuits.- Computer, 1978, v.11, N 10, p.6-17.
42. High reliability integrated circuits. - RCA solid state RIC-300, RCA solid state division somerville, New Jersey, April 1979.
43. CMOS integrated circuits: the many sides of built-in reliability.- Solid State Scientific., 1978, Montgomeryville, PA.
44. IK CMOS memory reliability test data.- Toshiba Corp., Semiconductor Div., 1979, Kawasaki, Japan.
45. CMOSIC Reliability 1978.- Motorola Semiconductor Products, Inc., Austin, TX, Apr., 1978.
46. Bickley J. Reliability aspects of semiconductor devices.- Electronic Engineering, 1981, v.53, N 651, p.76-85.
47. Blanks H.S. Electronics reliability: a state-of-the-art survey.- Microelectronics and Reliability, 1980, v.20, N3, p.219-245.
48. Елисеев П.Г. Физические факторы надежности и долговечности полупроводниковых лазеров. - В сб.: Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов. Тез. докл.- Кишинев, 1982, ч.1, с.22-23.
49. К теории стимулированного движения дислокаций в лазерных полупроводниковых кристаллах в условиях интенсивной накачки/П.Г.Елисеев, И.Н.Завестовская, И.А.Полуэктов, Ю.М.Попов.-М.: ФИ АН СССР, 1980. - (Препринт I20).
50. Jose W.B., Dixon R.W., Hartman R.L. Statistical characterization of the lifetimes of continuously operated (Al, Ga)As double-heterostructure lasers.- Appl.Phys.Lett., 1976, v.28, N 11, p.684-686.
51. Henshall. Gallium aluminium arsenide heterostructure lasers: factors affecting catastrophic degradation. - Solid State Electronics, 1977, v.20, p.595-602.
52. Kressel H., Ettenberg M., Ladany I. Accelerated step-temperature aging of Al_xGa_{1-x}As heterojunction laser diodes.- Appl.Phys.Lett., 1978, v.32, N 5, p.305-307.

53. Accelerated Aging Characteristics of InGaAsP/InP buried heterostructure lasers emitting at 1.3 μ / K. Mizuishi, M. Hiraio, S. Tsuji e.a. - Jap. J. of Appl. Phys., 1980, v.19, N 7, p. L429-L432.
54. Сушков В.П. Физические основы деградации полупроводниковых излучающих диодов. - В сб.: Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов, ч. I. - Кишинев, 1982, с. 24-25.
55. Petroff P., Hartman R.L. Defect structure introduced during operation of heterojunction GaAs lasers. - Appl. Phys. Lett., 1973, v.23, N 8, p.469-471.
56. Hutchinson P.W., Dobson P.S. Defect structure of degraded GaAlAs-GaAs lasers. - Phil. Mag., 1975, v.32, N 5, p.745-754.
57. Petroff P., Hartman R.L. Rapid degradation phenomenon in heterojunction GaAlAs-GaAs lasers. - J. Appl. Phys., 1974, v.45, N 9, p.3899-3903.
58. Naunichi J. Degradation in optoelectronic devices. - Jap. J. Appl. Phys., 1977, v.16, Suppl. 16-1, p.361-362.
59. Defect structure of degraded $Ga_{1-x}Al_xAs$ double heterostructure lightemitting diodes/ O. Ueda, S. Jisorumi, S. Yamakochi, T. Kotani. - J. Appl. Phys., 1979, v.50, N 2, p.765-772.
60. Degradation sources in GaAs-AlGaAs double heterostructure lasers/ R. Ito, H. Nakashima, S. Kishino, O. Nakada. - IEEE J. Quant. Electr., 1975, v.11, N 7, p.551-556.
61. Henry C.H., Logou R.A. The origin of large dark spots in $Al_xGa_{1-x}As$ - GaAs heterostructure photoluminescence. - Appl. Phys. Lett., 1977, v.31, N 3, p.203-207.
62. Naunichi J., Matsui J., Ishida K. Rapid degradation in double-heterostructure lasers. - Jap. J. Appl. Phys., 1975, v.14, N 11, p.1561-1568.
63. Bergh A.A. Bulk degradation of GaP red LED's - IEEE Trans. Electr. Dev., 1971, v.18, N 3, p.166-170.
64. Елисеев П.Г. О кинетике старения электролюминесцентных диодов инжекционных лазеров. - ФТП, 1972, вып. 6, № 9, с. 1655.
65. Ralston J.M., Lorimer O.G. Degradation of bulk electroluminescent efficiency in Zn, O doped GaP LED's. - Proc. Soc. Inform Display, 1977, v.18, N 2, p.186-188.
66. Shinoda J., Kamakami T. Rapid degradation in GaAs AlGaAs lasers caused by process induced defects. - Jap. J. Appl. Phys., 1977, v.16, N 7, p.1271-1272.
67. Kanedo K. Degradation of GaP green LED's. - Jap. J. Appl. Phys., 1976, v.15, N 7, p.1287-1296.

68. Избыточные токи и старение светодиодов на основе GaAs/ А.А.Птащенко, В.А.Преснов, И.И.Круглов и др. - Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 1971, вып.7, с.16-20.
69. Лукьянчикова Н.Б., Гарбар Н.П., Шейнкман М.К. Избыточные токи и шумы прямосмещенных GaP диодов. - ФТП, 1972, вып.6, № 5, с.889-877.
70. Исследование механизмов деградации светолучающих диодов на основе $GaAs_{1-x}P_x$ и $Ga_{1-x}Al_xAs$ при низких уровнях инжекции/ А.А.Птащенко, В.П.Сушков, А.Ф.Литовченко и др. - Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 1976, вып.8, с.41-54.
71. Rapid degradation of the LED's/ С.Н. Henry, Р.М. Petroff, R.A. Logan, F.R. Maritt. - J. Appl. Phys., 1979, v.50, N 2, p.3721-3725.
72. Елисеев П.Г., Пинскер Н.З., Федоров Ю.Р. О деградации инжекционных лазеров в процессе работы и под действием быстрых частиц. - Квантовая электроника, 1974, т.1, № 5, с.1271-1279.
73. Longini R.L. Rapid zinc diffusion in gallium arsenide. - Solid State Electronics, 1962, v.5, N 3, p.127-130.
74. Degradation of $Ga_{1-x}Al_xAs$ LED's/ S. Yamakoshi, O. Nasegawa, F. Namaguchi. e. a. - Appl. Phys. Lett., 1977, v.31, N 9, p.627-629.
75. Шумы и деградационные процессы в инжекционных лазерах/ Н.Б. Лукьянчикова, Н.П. Гарбар, Н.И. Сыско и др. - Письма в ЖТФ, 1979, вып.5, № 9, с.1358-1362.
76. Ettenberg M., Nuese C.J. Reduced degradation in $In_xGa_{1-x}As$ electroluminescent diodes. - J. Appl. Phys., 1975, v.46, N 5, p.2137-2142.
77. Gold R., Weisberg L.R. Permanent degradation of GaAs tunnel diodes. - Sol. St. Electron., 1964, v.7, N 11, p.811-821.
78. Lang D.V., Kimerling L.C. - In: Lattice Defects in Semiconductors, 1974, London. The Inst. of Phys. Conf. Ser., 1975, N 23/10, p.581-588.
79. Lang D.V., Kimerling L.C. Observation of athermal defect annealing in GaP. - Appl. Phys. Lett., 1976, v.28, N 5, p.248-250.
80. Шейнкман М.К. Фотохимические реакции и явления деградации в полупроводниках. - В сб.: Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов: Тез. докл. - Кишинев, 1982, ч.1, с.26-27.
81. Птащенко А.А., Преснов В.А. Исследование деградаций опто-электронных структур на основе полупроводников АЗВБ. - В сб.: Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов. Тез. докл. - Кишинев, 1982, ч.2, с.28-29.

82. Воротинский В.А., Дадерко Н.К. Ускоренные испытания полупроводниковых приборов и ИС на надежность. - Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 7, с.50-65.
83. Microcircuit accelerated testing using high temperature operating tests/ M.Smitch, G.M.Johnson, B.R.Kirk, J.B.Brauer.- IEEE Trans., 1975, v.R-24, N 4, p.328-250.
84. CMOS reliability: a useful case history to revise extrapolation effectiveness length and slope of the learning curve/ P.Brambilla, F.Frantini, P.Malberti, G.Mattana. - Microelectron. and Reliab., 1981, v.21, N 2, p.191-201.
85. Reynolds F.H., Stevens J.W. Semiconductor component reliability in an equipment operating in electromechanical telephone exchanges. - Proceedings 16th Annual Reliability Physics., 1978, p.7-13.
86. Blanks H.S. The temperature dependence of component failure rate. - Microelectron and Reliab., 1980, v.20, p.297-307.
87. Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. - М.: Наука, 1981. - 368 с.
88. Лушик Ч.Б., Витол И.К., Эланго М.А. Распад электронных возбуждений на радиационные дефекты в ионных кристаллах. - УФН, 1977, т.122, вып.2, с.223-251.
89. Подпороговые ударные механизмы образования радиационных дефектов в полупроводниках/ З.А.Искандерова, А.Е.Кив, А.А.Малкин, В.А.Янчук.- ФТП, 1973, т.7, вып.9, с.1755-1759.
90. Кив А.Е., Умарова Ф.Т. Радиационно-стимулированные процессы миграции в твердых телах. - ФТП, 1967, т.9, вып.8, с.2225-2229.
91. Кив А.Е., Искандерова З.А., Соловьев В.Н. О механизме образования Е-центра в кремнии. - ФТП, 1977, т.11, вып.1, с.199-201.
92. Кив А.Е., Малкин А.А., Янчук В.А. Подпороговый механизм дефектообразования при сверхплотном возбуждении электронной подсистемы кристалла. - ФТП, 1974, т.8, вып.6, с.1194-1196.
93. Кив А.Е., Соловьев В.Н. Демпфирование химическими связями атомных смещений в алмазоподобных кристаллах. - ФТП, 1977, т.11, вып.9, с.1657-1660.
94. Радиационные изменения в кремнии под действием электронов "подпороговых" энергий/ М.А.Зайкозская, А.Е.Кив, О.Р.Ниязова, С.В.Стародубцев. - ФТП, 1967, т.1, вып.8, с.1131-1137.
95. Адирович Э.И. Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов. - М.: ГИТТЛ, 1951. - 281 с.
96. Фото(рекомбинационно)стимулированное преобразование локальных центров в монокристаллах GaS / М.К.Шейнкман, Н.Е.

- Корсунская, И.В.Маркевич, Т.В.Точинская.- В кн.: Радиационная физика полупроводников и родственных материалов. - Тбилиси: Изд-во ТГУ, 1980, с.676-679.
97. Кив А.Е., Умарова Ф.Т. Активация диффузии атомов излучением. - В кн.: Радиационная физика неметаллических кристаллов. - Киев: Наукова думка, 1967, с.32-37.
98. Кив А.Е., Умарова Ф.Т. К микроскопической теории диффузии в полупроводниках. - ФТП, 1970, т.4, вып.3, с.571-573.
99. Энтинзон И.Р. Вычисление действительных спектров γ -лучей для промышленной γ -установки. - Атомная энергия, 1980, т.48, вып.4, с.261-263.
- 100.Петросянц К.О. Анализ с помощью ЭЦВМ статических характеристик одномерных транзисторных структур. - Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 1975, вып.1, с.43-52.
- 101.Петросянц К.О. Анализ на ЭЦВМ переходных и частотных характеристик одномерных транзисторных структур. - Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 1976, вып.3, с.11-20.
102. Frank R., McTague L., Provence R. Storage reliability of chip and bond wire electronic devices. - 26th Electron Components Conf., San Francisco., Calif., 1976, S.1, p.263-271.

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Борис Михайлович ГОРИН
Арик Ефимович КИВ
Лина Григорьевна ПЛОТНИКОВА
Владимир Николаевич СОЛОВЬЕВ

МЕХАНИЗМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ И ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Редактор Л.А.Красовская
Технический редактор И.М.Лосева
Корректор Т.И.Шалимова

Т-18688	Подп. к печ. 28.09.83	Формат 60 x 90 / 16
Печать офсетная	Усл.печ.л. 3,5	Уч.-изд. л. 3,4
Тираж 1850 экз.	Зак. № 826	Цена 53к. Индекс 4848

Издательство ЦНИИ "Электроника". Москва, 117415

УДК 621.382.019.3

Механизмы естественного старения и вынужденной деградации полупроводниковых приборов: События по электронной технике / Б.М.Горин, А.Е.Кляв, Л.Г.Длотникова, Б.Н.Соловьев. - М.: ЦНИИ "Электроника", 1983, 56 с. (Сер.2. Полупроводниковые приборы, вып.8(967)).

Рассмотрены микроскопические механизмы естественного старения и деградации приборов различного назначения. Показано, что процессы естественного старения контролируются низкотемпературными активационными электронными возбуждениями. Указаны экспериментальные и теоретические возможности адекватного моделирования процессов естественного старения. Использовано 102 отечественных и зарубежных источника в основном за 1970-1982 гг. Обзор предназначен для технологов и разработчиков, заботящихся надежностью полупроводниковых приборов и микросхем.